



FOTOVOLTAİK SİSTEM ENTEGRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ SİSTEMLERİNDE OPTİMUM KAPASİTENİN BELİRLENMESİ

Hakan AKÇA^{1*}, Ramazan AYAZ^{2,3}

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik Sistem,
Elektrikli Araç,
Batarya Kapasitesi,
Optimum Kapasite,
Şarj İstasyonu.

Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik (FV) sistem entegreli ve şebekeye bağlı bir elektrikli araç şarj istasyonunda optimum FV kapasitesinin belirlenmesi için yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Gerçek ortamda FV panelin ürettiği güç değerleri, MATLAB FV modeli ve FV simülatör yardımıyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada 16,8 kWh kapasiteli bir elektrikli araç bataryasının şarj edilmesi için gereken FV sistem kapasitesinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bunun için FV sistem optimum eğim ve azimut açıları belirlendikten sonra FV boyutlandırması yapılmıştır. Elektrikli araç bataryasının bir yıllık toplam enerjisinin FV sistemin bir yıllık toplam ürettiği enerji ile karşılanması amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında MATLAB modeli yardımıyla elde edilen sonuçlar 3,35 kWp'lik FV kapasitesinin bir aracın yıl boyunca ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, FV sistemlerin elektrikli araç şarj sistemleri için optimum kapasitenin belirlenmesinde etkili bir yöntem sunmaktadır.

DETERMINATION OF OPTIMUM SYSTEM CAPACITY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTEGRATED ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEMS

Keywords

Photovoltaic System,
Electrical Vehicle,
Battery Capacity,
Optimum Capacity,
Charging Station.

Abstract

In this study, a new approach is proposed for determining the optimum photovoltaic (PV) capacity in a grid-connected electric vehicle charging station with integrated PV system. The power generated by the PV panel in real environment is compared with the results obtained with the help of MATLAB PV model and PV simulator and the results are found to be compatible with each other. It is aimed to optimize the PV system capacity required for charging an electric vehicle battery with a capacity of 16,8 kWh in this study. For this purpose, PV system optimum tilt and azimuth angles are determined, and PV sizing is performed. The objective function is determined as providing the total energy of the electric vehicle battery for one year with the total energy produced by the PV system for one year. Under these conditions, the results obtained with the help of the MATLAB model show that a PV capacity of 3,35 kWp can supply the energy needs of a vehicle throughout the year. This study presents an effective method for determining the optimum capacity of PV systems for electric vehicle charging systems.

Alıntı / Cite

Akça, H., Ayaz, R., (2024). Fotovoltaik Sistem Entegreli Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinde Optimum Kapasitenin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 476-487.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Akça, 0000-0001-9138-0755
R. Ayaz, 0000-0002-6201-1181

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.07.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

DETERMINATION OF OPTIMUM CAPACITY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTEGRATED ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEMS

Hakan Akça^{1†}, Ramazan Ayaz^{2,3}

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In this study, the optimum PV system capacity is determined for meeting the energy of an electric vehicle battery for one year.
- It is shown that a PV system with 3,35 kWp installed power can provide the energy of a 16,8 kWh electric vehicle battery for one year.
- MATLAB PV model verified with experimental data is used for PV system capacity determination.
- It is determined that the tilt and azimuth angles at which the annual total energy produced is maximum are $\beta=28^\circ$ and $\gamma=21^\circ$, respectively.

Graphical Abstract (If applicable)

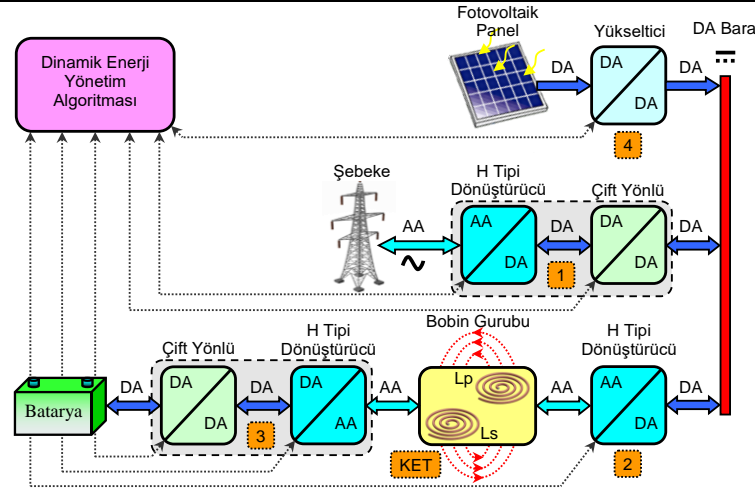


Figure. FV integrated and grid-connected electric vehicle charging station block diagram

Purpose and Scope

In this study, the PV capacity is sized in an electric vehicle charging station connected to the grid and integrated with a PV system. The objective function was determined as the annual total energy required to charge the electric vehicle battery to be met by the PV system.

Design/methodology/approach

Real ambient data such as irradiance, temperature, and wind etc. of Izmir province were used. These data are used together with the PV model created in MATLAB environment to calculate the capacity at optimum tilt and azimuth angles.

Findings

It has been revealed that an optimum PV system installed power of 3,35 kWp can meet the one-year energy of an electric vehicle with a battery capacity of 16,8 kWh.

Originality

This study presents a method for determining the optimum PV system capacity for electric vehicle charging systems.

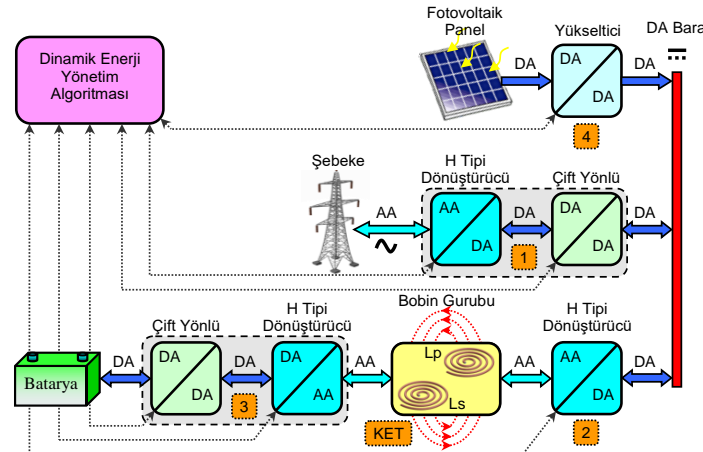
[†] İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

1. Giriş (Introduction)

Elektrikli araçların hızla yaygınlaşmasıyla beraber şarj (Yousuf vd., 2023) için gerekli enerjinin (Gülkaya vd., 2021) miktarı da artmıştır. Dolayısıyla bu enerjinin nereden ve nasıl karşılanacağı problemi ortaya çıkmıştır. Elektrikli araç şarj istasyonlarının güçleri incelendiğinde özellikle hızlı şarj özelliğine sahip doğru akım (DA) şarj istasyonu güçleri birkaç 100 kW (Rangaraju vd., 2020) mertebesine çıkabilmektedir. Mevcut yükler ile geleneksel şebeke altyapısının sınırları zorlanırken elektrikli araç şarj istasyonu gibi yüksek güçte ve sayıda yükün aynı anda enerji talebi (Mukherjee vd., 2015) şebeke altyapısının çökmesine kadar gidebilecek sonuçlara sebep olabilir. Dolayısıyla enerji talebinin artması bu araçların şarj altyapısının etkili bir şekilde yönetilmesi konularında yeni zorlukları beraberinde getirmiştir. Bu ciddi problem için farklı çözüm önerileri sunulabilir. Bunlardan ilki enerjiye talebin az olduğu puant saat dışındaki saatlerde bu yükleri beslemek için enerji tüketiminin yönetilmesi (Das vd., 2021) için yeni stratejiler geliştirilebilir. Diğer bir çözüm ise yenilenebilir enerji kaynaklarının (Zhang vd., 2022) şarj istasyonlarının yakınına veya bu istasyonlar ile entegreli (Arulvendhan vd. 2024, Muttaqi vd. 2022) olarak yapılması önerilebilir. Mevcut literatürde fotovoltaik sistemlerin elektrikli araç şarj istasyonlarına entegrasyonu ile ilgili sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda, FV entegreli ve şebeke bağlı şarj istasyonları, enerji tüketimini sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılayabilme potansiyeli sunmaktadır.

Mevcut elektrikli araçların artan sayısı göz önüne alındığında tüm elektrikli araç şarj enerjisinin (Zhang vd., 2014) aynı anda şebeke altyapısı tarafından kaldırılamayacağı sorunu, FV entegreli şarj istasyonlarının önemini daha da artırmaktadır. Bu noktada, FV entegrasyonu (Heba vd. 2022, Li vd. 2024), güneş panelleri aracılığıyla elde edilen enerjiyi kullanarak şebeke bağlı şarj istasyonlarının enerji ihtiyacını destekler. Böylece, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, elektrikli araçların şarj süreçlerini daha sürdürülebilir ve ekolojik açıdan uyumlu hale getirir. FV entegrasyonu, güneş enerjisiyle elektrikli araçları şarj etme (Xiao vd. 2023) kapasitesine sahip istasyonlar, sadece çevre dostu bir enerji kaynağı sunmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut şebeke (Yildizhan vd., 2022) kaynaklarının üzerindeki yükü hafifletir (Chen vd., 2021). Bu, enerji talebinin yoğun olduğu saatlerde ve bölgelerde, şebeke altyapısının (Güner vd., 2022) daha az zorlanmasına ve enerjinin daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanır.

Elektrikli araç talebinin sürekli artmasıyla birlikte, FV entegreli şarj istasyonlarının kullanımı, enerji verimliliğini artırabilir ve karbon ayak izini azaltabilir (John vd., 2021). FV entegreli (Mishra vd. 2022, Sekhar vd. 2023) şarj istasyonları, güneş ışığına bağlı olarak enerji üretebilir ve bu durum, özellikle güneşli günlerde ekstra avantaj sağlar. Bu sistemler, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak (Praapati vd., 2019), elektrikli araçların şarj süreçlerini daha sürdürülebilir ve ekolojik açıdan uyumlu hale getirir.



Şekil 1. FV entegreli ve şebeke bağlantılı elektrikli araç şarj istasyonu blok diyagramı (PV integrated and grid-connected electric vehicle charging station block diagram)

FV entegreli ve şebeke bağlı şarj istasyonları, elektrikli araç endüstrisinde yenilenebilir enerji kullanımına yönelik çevre dostu olan bir çözüm sunar. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kullanımının ve çevre dostu teknolojilerin yaygınlaştırılmasında FV entegreli şarj istasyonlarının potansiyeli vurgulanmaktadır. Elektrikli araçlar ve şebeke altyapısı arasındaki arz talep dengesinin korunmasına yardımcı olan FV entegrasyonu enerjinin sürdürülebilir olarak sağlanması için önemli bir strateji sunmaktadır. Bu çalışma Şekil 1'de verilen bir sistemin FV sistem ve batarya kısmında boyutlandırma çalışmasını kapsamaktadır. Şekilden görüldüğü üzere FV panelden elde edilen enerji çift yönlü güç dönüştürücüleri ile 4 ve 1 nolu bloklar üzerinden hem şebekeye hem de 4, 2 ve 3 nolu bloklar üzerinden bataryaya aktarılabilir. Dolayısıyla FV panelden elde edilen enerji (Yüzer vd., 2023) ihtiyaç durumuna göre şebeke veya bataryaya aktarılabilir. Batarya, FV panelden enerjisini karşılayabildiği gibi FV sistemden gelen enerji yetersiz olduğunda 1, 2 ve 3 nolu bloklar üzerinden enerjisini şebekeden alabilmektedir. FV sistem

boyutlandırması yapılırken FV sistem ve bataryanın yıllık toplam enerjileri eşitlenmeye çalışılmıştır. Bir sonraki bölümden yapılan analizlerde görüleceği üzere bu şarta göre belirlenen FV kapasitesi yılın bazı zamanlarında bataryanın enerji ihtiyacını karşılayamazken bazı zamanlarda fazla enerji ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla fazla enerjinin olduğu zamanlarda FV sistemin ürettiği ve batarya için fazla olan enerji şebekeye aktarılırken batarya için yeterli enerjinin üretilmediği zamanlarda şebekeden bataryaya enerji aktarımı sağlanacaktır. Bu yıllık bazda mahsuplaşma yapıldığında şebekeye verilen ve alınan enerjinin eşitlenmesini sağlayarak net sıfır enerjinin dengesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada aşağıdaki başlıklar ve konular ele alınmıştır. İlk olarak materyal ve yöntem bölümü sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak FV sistem modeli için temel matematiksel altyapı verilmiştir. Analizler sırasında 2013 yılı için İzmir iline ait gerçek ortam verileri (ışınım, sıcaklık, rüzgar hızı) kullanılmıştır. Eğimli yüzeye gelen global ışınım verisinden analitik model kullanılarak eğimli yüzeye gelen ışınım verisi elde edilmiştir. Bu veriler MATLAB ortamında oluşturulan FV model için giriş verisi olarak kullanılmıştır. Model çıktıları ile gerçek ortam verileri karşılaştırılarak modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca FV simülatör ile model sonuçlarının uyumluluğu olduğu da ortaya konulmuştur. Farklı eğim ve azimut açıları için bu FV model ve gerçek ortam verileri kullanılarak azimut açısı için -90° 'den $+90^{\circ}$ 'ye ve eğim açısı için 0° 'den 90° 'ye kadar analiz yapılmıştır. FV modelin önemi burada ortaya çıkmaktadır. Gerçek bir sistemde bu kadar açı için ölçümün alınması hem zaman hem de aynı koşullarda yapılabilmesi açısından imkansızdır. FV model bu durumda kısa sürede bu sonuçları bize sağlamıştır. Bu açı değerleri için FV sistemin kapasitesini belirlemek adına farklı panel sayıları için analizler yapılmıştır. Nissan leaf marka bir aracın 16,8 kWh'lık batarya kapasitesi göz önüne alınarak bir yıllık enerji ihtiyacının karşılanması için FV kapasite hesabı yapılmıştır. Son olarak sonuçlar bölümünde ise genel değerlendirme ve sonuçlar sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yapılan çalışmada, FV güç çıktısı doğruluğu kanıtlanmış bir FV model üzerinden elde edilmiştir (Ayaz vd., 2014). FV modeli için çevresel faktörler arasında bulunan ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı giriş parametresi olarak kullanılmıştır. FV modelin çıktısı olarak FV panelin akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. İzmir iline ait yatay yüzeye gelen global ışınım eğimli yüzeye dönüştürülerek FV modelde kullanılmıştır.

2.1. Eğimli Yüzeye Gelen Global Işınım (Global Radiation on Tilt Surface)

Yatay yüzeye gelen toplam global ışınım (I) direk ışınım (I_b) yayınık ışınımın (I_d) toplamıdır (Benghanem vd., 2011). Bu da Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$I(t) = I_b(t) + I_d(t) \quad (1)$$

Yayınık ışınım miktarı, gökyüzü açıklık indeksi olan k_T değerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Global ışınım ve atmosfer dışı ışınım (I_0) arasındaki oran ise açıklık indeksi olarak ifade edilmektedir. Yayınık ışınım ve açıklık indeksi sırasıyla (2) ve (3) nolu eşitlikler kullanılarak verilmiştir (Duffie vd., 2013).

$$\frac{I_d(t)}{I(t)} = \begin{cases} 1 - 0.09k_T(t), & k_T(t) \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T(t) + 4.388k_T^2(t) - 16.638k_T^3(t) + 12.336k_T^4(t), & 0.22 \leq k_T(t) \leq 0.80 \\ 0.165, & k_T(t) > 0.80 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_T(t) = \frac{I(t)}{I_0(t)} \quad (3)$$

Eğimli yüzeye gelen ışınım farklı bileşenlerin toplamından oluşmaktadır. Bu bileşenler, yüzeye gelen direk ışınım, yüzey yayınık ışınımı ve yatay düzlemde yansıtılarak gelen ışınımlardır. Eğimli yüzeye gelen toplam ışınım Eşitlik (4)'te verilmiştir (Liu vd., 1963).

$$G(t, \beta) = I_b(t)R_b(t, \beta) + I_d(t) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I(t)\rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

bu eşitlikte; β yüzey eğim açısını, ρ yüzey yansıtma katsayısını (0,2) ve R_b ise eğimli yüzeydeki direk ışınımın global ışınımına oranını ifade etmektedir. R_b değerinin hesaplanması için gereken eşitlikler (5), (6) ve (7) ile verilmiştir (Duffie vd., 2013).

$$R(t, \beta) = \left(\frac{\cos \theta(t, \beta)}{\cos \theta_z(t)} \right) \quad (5)$$

$$\cos \theta(t, \beta) = \sin \delta(t) \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta(t) \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta(t) \cos \varphi \cos \beta \cos \omega(t) + \cos \delta(t) \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega(t) + \cos \delta(t) \sin \beta \sin \gamma \sin \omega(t) \quad (6)$$

$$\cos \theta_z(t) = \cos \varphi \cos \delta(t) \cos \omega(t) + \sin \varphi \sin \delta(t) \quad (7)$$

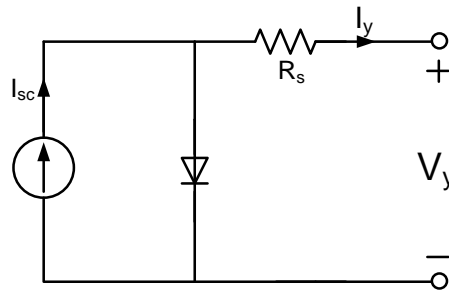
Burada;

γ	yüzey azimut açısı	G	eğimli yüzeye gelen toplam ışınım
φ	enlem	I_b	yatay yüzeye gelen direkt ışınım
δ	deklinasyon açısı	I_d	yatay yüzeye gelen yayınlık ışınım
ω	saat açısı	I	yatay yüzeye gelen toplam ışınım

Sabit bir açıda konumlandırılmış piranometreden alınan gerçek ışınım verileri ile matematiksel olarak hesaplanan ışınım verileri karşılaştırılmıştır. İki veri için aradaki fark 0 ile 126 W/m² arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler için hata (RMSE: Root Mean Square Error) değeri iki farklı durum için hesaplanmıştır. İlk durum ölçülen ve hesaplanan 113 adet verilerin tamamı kullanıldığında RMSE değeri 39,65 W/m² hesaplanmıştır. İkinci durumda ise ışınımın 0 (sıfır) olduğu anlardaki değerler çıkarılarak hesaplandığında (74 adet ölçülen ve hesaplanan veri için) RMSE değeri 48,99 W/m² olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda dikkate alındığında model ve ölçülen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. FV model ve ölçülen veriler kullanılarak eğimli yüzeydeki toplam ışınım değerleri aralarındaki farklar karşılaştırıldığında, model ve ölçülen ışınım değerleri arasındaki fark %0,6 olarak hesaplanmıştır.

2.2. FV Model (PV Model)

FV model için (Bellini vd., 2009)'de ile verilen çalışma göz önüne alınmıştır. Modelin basit olarak Şekil 2'de verilen basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli üzerine kurulmuştur. Bu modelde FV'nin akımı gerilimin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Model için ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı giriş parametrelerini oluştururken, FV akımı, gerilimi ve güç çıkış parametreleri arasında yer almaktadır.



Şekil 2. Basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli (Simplified equivalent circuit model)

$$I_y = I_{SC} \cdot \left[1 - K_1 \cdot \left(e^{\left(\frac{V_y}{K_2 \cdot V_{OC}} \right)} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

$$K_1 = \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-V_{MP}}{K_2 \cdot V_{OC}} \right)} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{\left(\frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1 \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right)} \quad (10)$$

Burada K_1 ve K_2 katsayıları aşağıdaki panel parametrelerine göre değişmektedir.

I_{SC} kısa devre akımı

I_{MP} maksimum güç noktasındaki akım

V_{OC} açık devre gerilimi

V_{MP} maksimum güç noktasındaki gerilim

Bu parametrelerin ışınım ve/veya sıcaklığa bağlı değişimleri aşağıda verilmiştir.

$$I_{SC}(G, T_C) = I_{SCS} \cdot \frac{G}{G_S} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - T_S)] \quad (11)$$

$$I_{MP}(G, T_C) = I_{MPS} \cdot \frac{G}{G_S} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - T_S)] \quad (12)$$

$$V_{OC}(T_C) = V_{OCS} + \beta \cdot (T_C - T_S) \quad (13)$$

$$V_{MP}(T_C) = V_{MPS} + \beta \cdot (T_C - T_S) \quad (14)$$

I_{SCS} , I_{MPS} , V_{OCS} ve V_{MPS} değerleri ürün teknik dökümanında üretici tarafından standart test koşulları altında elde edilen değerlerdir. G ve T_C sırasıyla ışınım ve hücre sıcaklığı olup standart test şartları olan $G_S=1000 \text{ W/m}^2$ ve $T_S=25 \text{ }^\circ\text{C}$ altında elde edilen değerlerdir. α akım sıcaklık katsayısını ifade ederken ve β gerilim sıcaklık katsayısını ifade etmektedir.

Hücre sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığı arasında fark bulunmaktadır. Bu nedenle ışınım ve rüzgâr verileri göz önüne alınarak ortam sıcaklığından FV hücre sıcaklığı elde edilmiştir ve (15)'te verilmiştir.

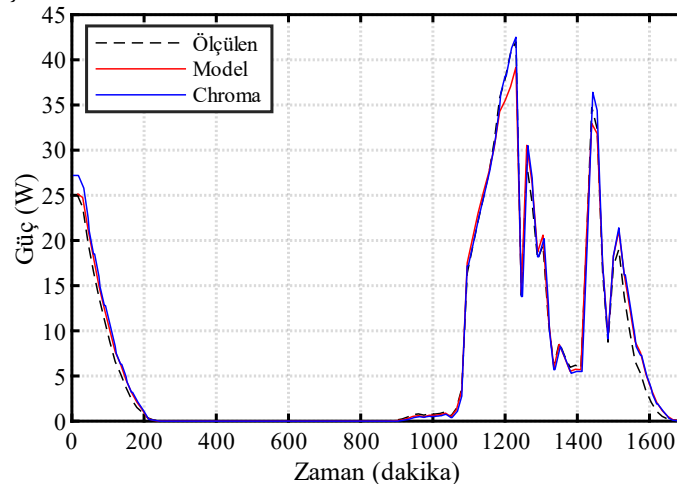
$$T_C = 1,14 \cdot (T - T_S) + 0,0175 \cdot (G - 300) - k_r \cdot w + 30 \quad (15)$$

Bu formülde T dış ortam sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), w rüzgâr hızı (m/s), k_r katsayısı her bir FV teknolojisine bağlı bir katsayıdır. Yapılan çalışmada monokristal panel teknolojisi için $k_r=1,509$ olarak alınmıştır (Tamizhmani vd., 2003).

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. FV Modelin Doğrulanması (PV Model Validation)

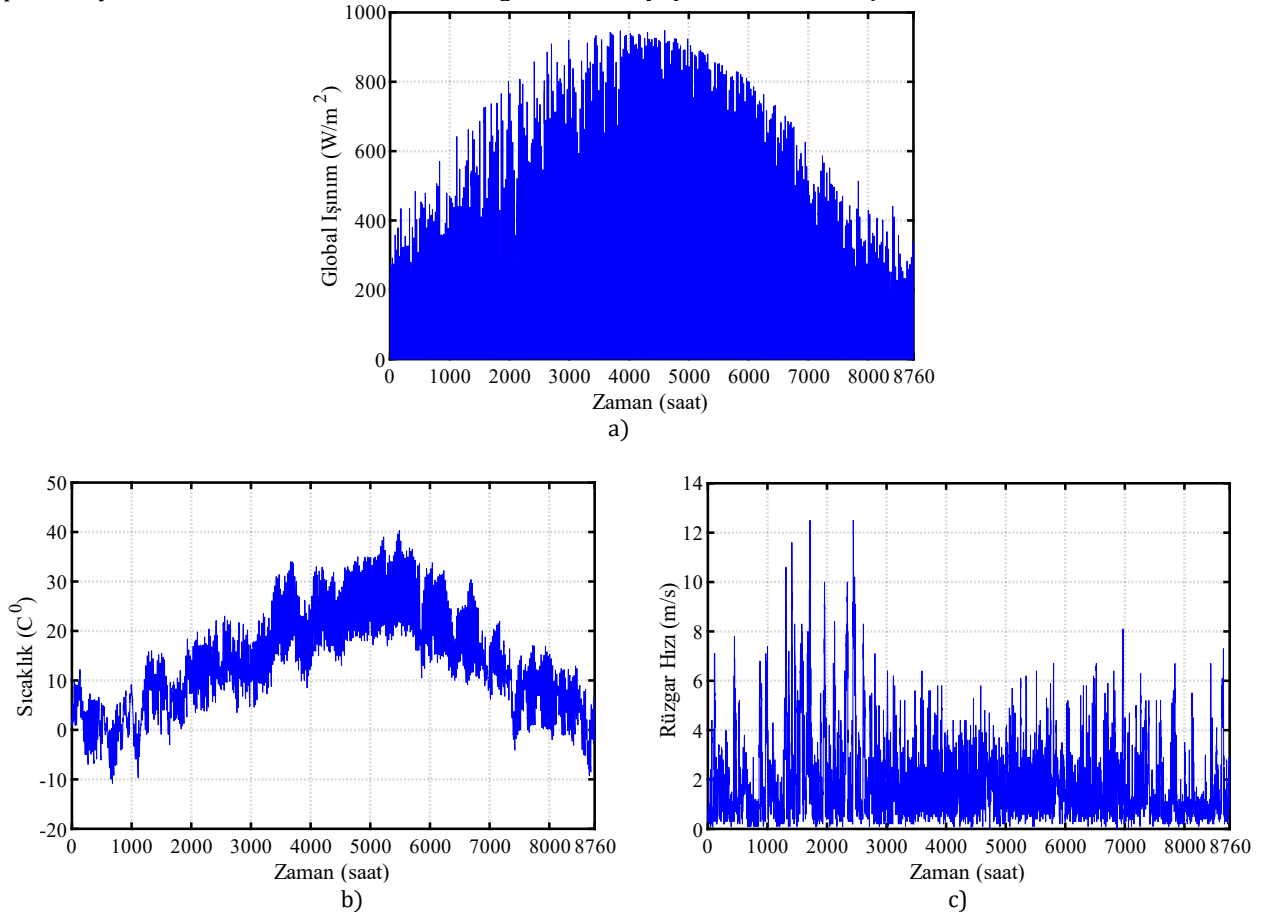
Gerçek ortam şartlarında belirli bir açıda konumlandırılan FV panellerin elde edilecek panel gerilimi ve akımı 15 dakika aralıklarla toplamda 1695 dakika boyunca ölçülmüş ve 113 adet veri kaydedilmiştir. Ölçülen ve matematiksel modelden elde edilen güç değerlerinin değişimleri karşılaştırılmış ve birbirleri ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür. İki veri için aradaki fark 0 ile 3,72 W arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler için hata (RMSE: Root Mean Square Error) değeri iki farklı durum için hesaplanmıştır. İlk durum ölçülen ve hesaplanan 113 adet verilerin tamamı kullanıldığında RMSE değeri 0,95 W hesaplanmıştır. İkinci durumda ise ışınımın 0 (sıfır) olduğu anlardaki değerler çıkarılarak hesaplandığında (74 adet ölçülen ve hesaplanan veri için) RMSE değeri 1,17 W olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda dikkate alındığında model ve ölçülen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. FV model ve ölçülen veriler kullanılarak toplam enerji çıktıları aralarındaki farklar karşılaştırıldığında, model ve ölçülen enerji değerleri arasındaki fark %3,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Chroma FV simülatörden elde edilen güç değerleri de ölçülen değerlerle karşılaştırılmış ve fark %4,7 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen FV değerleri ile FV model ve Chroma FV simülatörden elde edilen güç değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ölçülen, model ve FV simülatör çıktıları (Measured, model and FV simulator outputs)

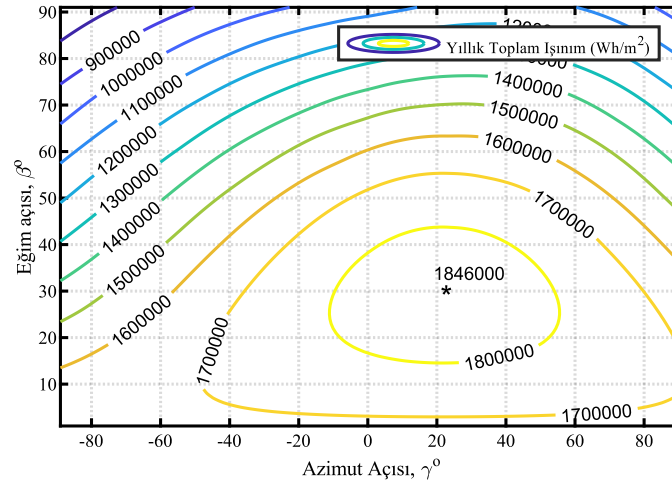
3.2. Optimum Eğim ve Azimut Açılarının Belirlenmesi (Determination of Optimum Tilt and Azimuth Angles)

Doğrulanmış ışınım ve FV panel modelleri, optimum eğim ve azimut açılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Modellerin giriş değerleri (ışınım, sıcaklık, rüzgar hızı, vb.) Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden temin edilmiştir. Model giriş değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Yatay yüzeye gelen global ışınım (Şekil 4a) yaklaşık 900 W/m^2 değerlerine çıktığı görülmüştür. Sıcaklık verilerine (Şekil 4b) bakıldığında ise -10°C ile 40°C arasında değiştiği, rüzgar hızı ise (Şekil 4c) maksimum 12 m/s 'ye ulaştığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri yılın farklı zamanlarında farklı değerler almıştır. Bu nedenle hesaplamalar yapılırken yılın sadece bir kısmına bakarak değerlendirme yapmak hatalı sonuçlara neden olabilir.



Şekil 4. İzmir'e ait yıllık veriler a) global ışınım, b) sıcaklık ve c) rüzgar hızı (Annual data for Izmir a) global radiation, b) temperature and c) wind speed)

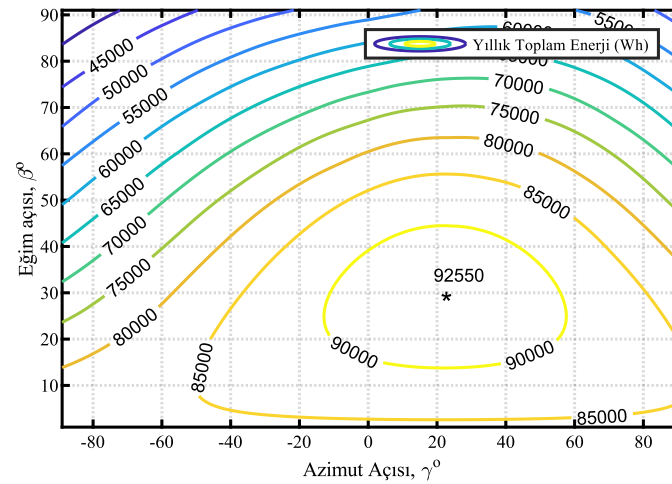
Optimum eğim ve azimut açılarının tespiti için iki farklı yol izlenmiştir. İlk olarak FV panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınımın maksimum olduğu eğim ve azimut açıları optimum konumlandırma açıları olarak seçilmiştir. Bu değerlerin tespiti için panel eğim açısı 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($0 \leq \beta \leq 90$) ve panel yüzey azimut açısının 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($-90 \leq \gamma \leq 90$) yapılarak panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınım değerleri tespit edilmiştir. FV panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınım değerlerinin farklı değerlerdeki eğim ve azimut açılara göre değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yıllık toplam ışınlama göre optimum açılar (Optimum angles based on total annual radiation)

Yıllık toplam ışınlama maksimum olduğu eğim açısı $\beta=29^\circ$ ve azimut açısı ise $\gamma=21^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Optimum eğim ve azimut açısı için eğimli yüzeye düşen toplam ışınlama değeri ise 1846000 Wh/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Optimum eğim ve azimut açılarının tespiti için kullanılan ilk yöntemin, gerçek ortam şartları ve FV panellerin sıcaklık ve diğer ortam değişkenlerine göre güç çıktılarının değiştiği düşünüldüğünde optimum eğim ve azimut açılarının tespitinde yetersiz olduğu görülmektedir. İkinci ve ilkinin göre daha doğru bir yol olarak FV panel yıllık enerji üretiminin maksimum olduğu eğim ve azimut açıları optimum konumlandırma açıları olarak seçilmiştir. Bu değerlerin tespiti için panel eğim açısı 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($0 \leq \beta \leq 90$) ve panel yüzey azimut açısının 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($-90 \leq \gamma \leq 90$) yapılarak panel yıllık toplam enerji değerleri tespit edilmiştir. FV panel yıllık toplam enerji değerlerinin farklı değerlerdeki eğim ve azimut açılarına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



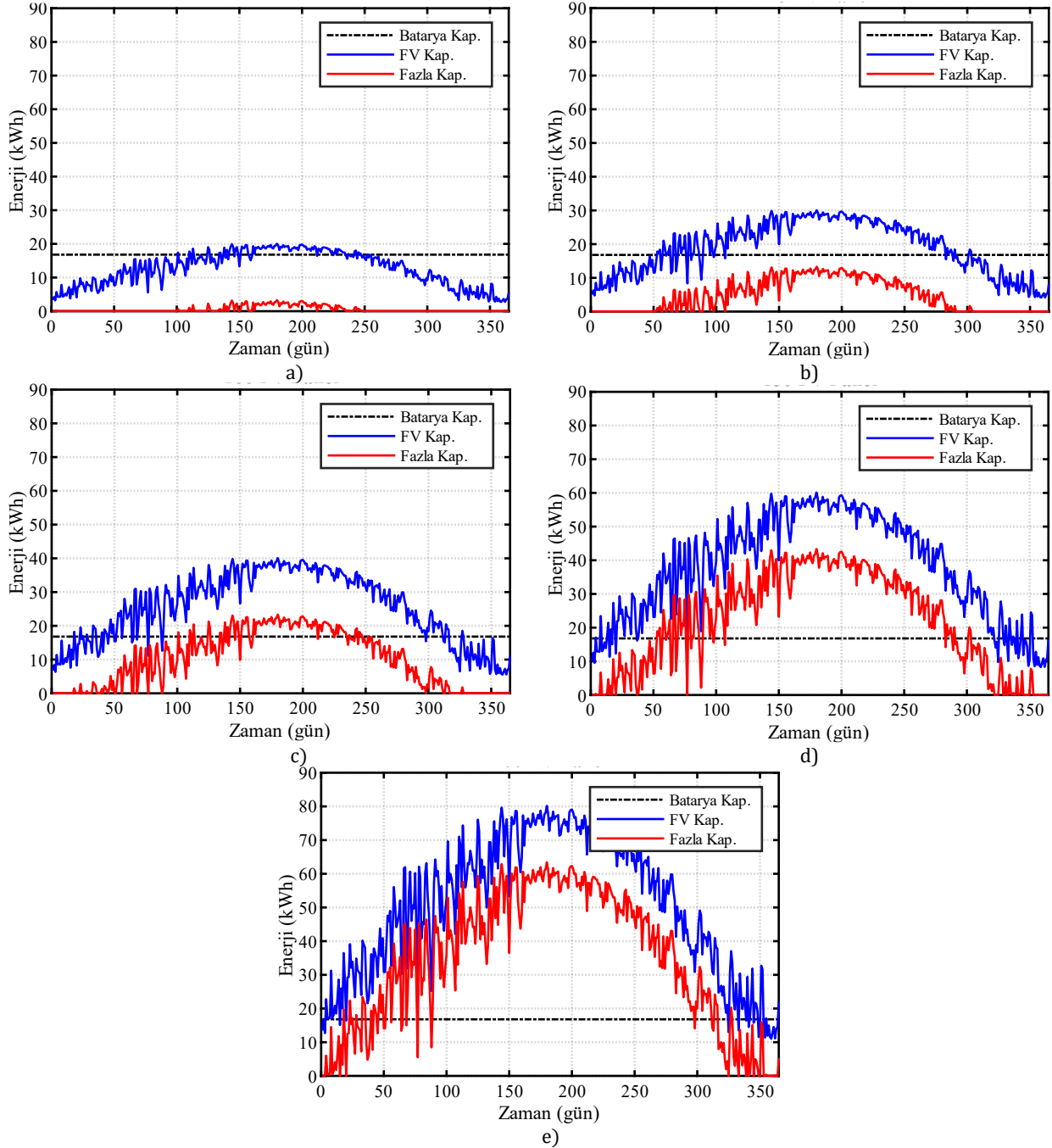
Şekil 6. Yıllık toplam enerji değerine göre optimum açılar (Optimum angles based on total annual energy)

Yıllık toplam enerji değerinin maksimum olduğu eğim açısı $\beta=28^\circ$ ve azimut açısı ise $\gamma=21^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Optimum eğim ve azimut açısı FV panelin toplam enerji değeri ise 92550 Wh olarak hesaplanmıştır.

3.3. FV Sistem Boyutlandırması (PV System Sizing)

Ticari olarak üretilen elektrikli araç bataryaları incelendiğinde 16.5 kWh ve 90 kWh aralığında (Anon vd., 2020) batarya kapasiteleri bulunmaktadır (Bacherif vd., 2011). Proje kapsamında kullanılacak olan elektrikli araç batarya kapasitesi $16,8 \text{ kWh}$ olarak seçilmiştir. FV sistem için optimum eğim ve azimut açıları belirlendikten sonra FV boyutlandırması yapılmıştır. Optimum eğim ve azimut ($\beta=28^\circ, \gamma=21^\circ$) açılarında konumlandırılmış FV sistemin $16,8 \text{ kWh}$ kapasiteye sahip EV bataryasını şarj etme durumuna göre boyutlandırma yapılmıştır. EV bataryasının gün içerisinde şarj edildiği düşünülmüştür. EV bataryasını şarj etmek için şebeke ve FV olmak üzere iki alternatif bulunmaktadır. Proje kapsamında 10 kW çatı FV sistemi ve şebekenin EV bataryasını şarj etme durumu

planlanmıştır. Ancak FV sistemler dış ortam şartlarına bağlı olarak nominal gücünde güç çıktısını gün boyu verememektedir. FV boyutlandırması için iki alternatif dikkate alınmıştır. İlk durum EV bataryasının gün içerisinde olabildiğince FV sistem ile şarj olmasıdır. İkinci durum ise yıllık toplam EV şarj ihtiyacının FV sistemden karşılanmasıdır. İkinci durumda FV sistem yıllık enerji üretiminin batarya ihtiyacına eşit olacak bir boyutlandırma yapılmıştır. Her iki durumu da dikkate almak için 10 kW (200 adet FV panel) FV kurulu gücünden başlanarak kademeli olarak kurulu güç azaltılarak 7,5 kW (150 adet FV panel), 5 kW (100 adet FV panel), 3,75 kW (75 adet FV panel) ve 2,5 kW (50 adet FV panel) FV sistem için sonuçlar alınmıştır. Farklı kurulu güce sahip FV sistemler için gün içerisinde EV bataryasını şarj etme durumları ve bir yıllık süreçte batarya şarjı için gerekli olan enerji ihtiyacını karşılama durumları değerlendirilerek sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. Aşağıda grafiklerden görüldüğü üzere 16,8kW hedef güç değerinin karşılanma durumu hem kurulu güce hem de yılın hangi gününde olduğuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, yılın ilk ve son günlerinde fazla kapasite değeri sıfır veya sıfıra yakın değer almıştır.



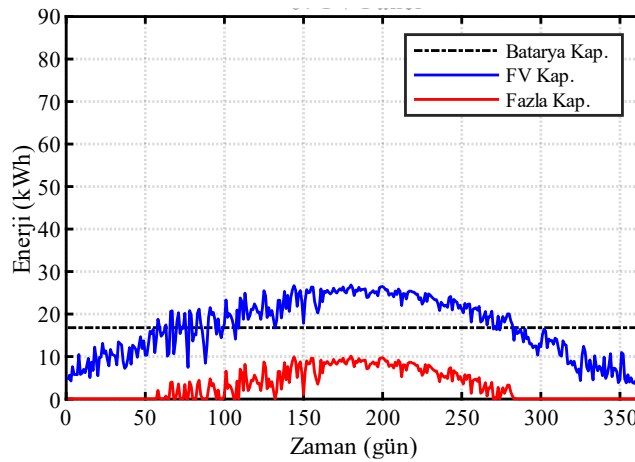
Şekil 7. a) 2,5kWp b) 3,75kWp c) 5kWp d) 7,5kWp ve e) 10kWp farklı FV kurulu gücüne sahip sistemlerin enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi (a) 2,5kWp b) 3,75kWp c) 5kWp d) 7,5kWp ve e) 10kWp energy production, excess energy and battery capacity of systems with different PV installed power)

Her bir FV kurulu gücüne ait yıllık toplam enerji, EV batarya yıllık enerji ihtiyacı ve fazla enerji miktarlarını veren detaylar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. FV kurulu gücüne göre yıllık enerji değerleri (Annual energy according to PV installed power)

FV kurulu gücü [kW]	Yıllık FV enerjisi [kWh]	EV batarya enerji ihtiyacı [kWh]	Fazla enerji [kWh]
10,00	18515,037	6132	12383,037
7,50	13886,278		7754,278
5,00	9257,518		3125,518
3,75	6943,139		811,139
2,50	4628,760		-1503,240

FV sistem boyutlarına göre batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılamada 2,5 kW FV sistem haricindeki diğer boyutlandırmalar yeterli olmaktadır. Batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılama durumu dikkate alındığında FV kapasitesinin 2,5 kW ile 3,75 kW aralığında değiştirilmesi durumunda 3,35 kW FV sistemin (67 adet FV panel) batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak boyuta sahip olduğu görülmektedir. Şekil 8’de 3,35 kW FV sistem için enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi değerleri verilmiştir. Yılın günlerine bağlı olarak fazla kapasite oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8. 3,35 kW FV kurulu gücüne sahip sistem için FV enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi (Energy production, excess energy and battery capacity for a system with 3,35 kW PV installed power)

3,35 kW FV sistemin yıllık enerji üretimi 6202,538 kWh'tir. Batarya yıllık enerji ihtiyacı ise 6132 kWh'tir. Dolayısı ile 3,35 kW'lık FV sistem enerji üretiminin %1,137'lik kısmı EA bataryasına aktarılamamaktadır.

EV bataryasının gün içerisinde şarj olması durumu için yukarıda verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, FV sistem boyutunun küçülmesi EV bataryasının gün içerisinde şarj edilemediği gün sayısını artırmaktadır. FV sistem boyutuna göre EV bataryasının şarj edilemediği gün sayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. FV kurulu gücüne göre EV bataryasının şarj edilemediği gün sayıları (Number of days EV battery cannot be charged according to PV installed power)

FV kurulu gücü [kW]	EV bataryasının şarj edilemediği gün sayısı
10,00	23
7,50	46
5,00	93
3,75	141
3,35	167
2,50	293

FV sistem boyutunun 10 kW olması durumunda ocak ve aralık aylarında toplam 23 gün EV bataryası gün içerisinde şarj edilememektedir. FV sistem boyutunun azalması durumlarında ise gün içerisinde EV bataryasının şarj edilemediği günler kasım ve şubat aylarına da kaymaktadır. FV sistem boyutunun daha düşürülmesi durumlarında ise sonbahar ve ilkbahar mevsimlerinde de EV bataryasının şarj edilmediği görülmektedir. FV sistem boyutunun 2,5 kW'a düşürülmesi durumunda ise yılın büyük çoğunluğunda EV bataryası gün içerisinde şarj edilememektedir.

EV bataryasının FV sistem tarafından şarj edilemediği durumlarda şebeke devreye girmekte ve EV bataryası şebeke üzerinden şarj olmaktadır. İlk durum için EV bataryasının gün içerisinde yıl boyunca şarj edilebilmesi için FV sistem boyunun 10 kW'ın üzerine çıkması gerektiği görülmektedir. Ancak bu durum sistemde kullanılacak güç elektroniği dönüştürücülerinin güçlerinin artmasına sebep olduğu için hem FV sistem açısından hem de devreler açısından sistem maliyetini arttıracaktır. Dolayısı ile ilk durum için yıl içerisinde, özellikle kış aylarında EV bataryasının gün içerisinde şarj olması durumu ihmal edilebilir olarak düşünülürse, FV sistem boyutunun 5 kW seviyelerinde tutulması yeterlidir. İkinci durum için ise EV bataryasının yıllık şarj ihtiyacının FV sistem tarafından karşılanması durumu için (şebeke ile yılsonu mahsuplaşma) 3,35 kW'lık bir FV sistem boyutu yeterli olacaktır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Elektrikli araçların kullanımına paralel olarak şarj için gerekli enerjinin karşılanması için kaynak arayışı da giderek artmaktadır. Bu konuda yenilenebilir enerji kaynakları çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle kurulum kolaylığı ve düşük maliyetli altyapı gereksinimlerinden dolayı FV sistemler yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. FV sistemin ihtiyacı karşılayabilmesi için kurulumu yapılmadan önce bazı fizibilite çalışmaları yapılmalıdır. Bu kapsamda gerçek ortam koşullarına ait sıcaklık, rüzgâr hızı ve ışınım değerleri göz önüne alınarak bazı hesaplamalar yapılmalıdır. Bu hesaplamalar farklı paket programlar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada, FV sistem entegreli ve şebekeye bağlı bir elektrikli araç şarj istasyonunda optimum FV kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Gerçek ortam koşulları altında MATLAB ortamında oluşturulan bir FV model kullanılarak aynı şartlar altında farklı açılar için hesaplamalar yapılmış ve İzmir ili için optimum eğim ve azimut açıları belirlenmiştir. Çalışmanın odak noktası, 16,8 kWh kapasiteli bir elektrikli araç bataryasının bir yıllık toplam enerjisi için gereken FV sistem kapasitesinin optimizasyonunu sağlamaktır. Matematiksel modelleme ve simülasyonlar yardımıyla elde edilen sonuçlar, önerilen 3,35 kW'lık FV kapasitesinin bir elektrikli aracın yıl boyunca ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabileceğini göstermektedir. Bu durum, FV sistemlerin elektrikli araç şarj sistemleri için optimum kapasitenin belirlenmesinde etkili bir yöntem sunmaktadır. Bu sonuçlar, fotovoltaik sistemlerin elektrikli araç şarj istasyonlarında kullanımının enerji maliyetlerini azaltabileceğini ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve elektrikli araçlar için etkin şarj altyapısı geliştirmek isteyen araştırmacılar ve endüstri paydaşları için önemli bir kılavuz niteliği taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalar kapsamında, farklı coğrafi bölgelerde ve farklı elektrikli araç modelleri için benzer optimizasyon stratejileri incelenerek şarj enerjisinin karşılanmasında FV sistem entegrasyonu ve kullanılan devre topolojileri konusundaki bilgi birikimi genişletilebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 120E365 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Anon., 2020. BU-1003: Electric Vehicle (EV) – Battery University. Battery University. Retrieved March 6, 2024 (www.batteryuniversity.com).
- Arulvendhan, K., Srinivas, K. N., Rajamanickam, N., Alharbi, M., Seada, H., 2024. Hybrid Compensation Based Efficient Wireless Charging System Design with Solar Photovoltaic Interface Toward Sustainable Transportation. *IEEE Access*, 12, 87152–87166.
- Ayaz, R., Nakir, I., Tanrioven, M., 2014. An Improved Matlab-Simulink Model of PV Module Considering Ambient Conditions. *International Journal of Photoenergy*.
- Becherif, M., Ayad, M. Y., Hissel, D., Mkahl, R., 2011. Design and Sizing of a Stand-Alone Recharging Point for Battery Electrical Vehicles Using Photovoltaic Energy. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC*.
- Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., Cornaro, C., 2009. Simplified Model of A Photovoltaic Module. *Applied Electronics*.
- Benghanem, M. 2011. Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case Study for Madinah, Saudi Arabia. *Applied Energy* 88(4),1427–33.
- Chen, Y., Cao, L., Wang, F., 2021. Research on Optimal Configuration Method of Devices for Integrated PV Storage and Charging Station. 5th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Energy Internet for Carbon Neutrality, EI2 2021 1344–48.
- Das, S., Acharjee, P., Bhattacharya, A., 2021. Charging Scheduling of Electric Vehicle Incorporating Grid-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Technology Considering in Smart Grid. *IEEE Transactions on Industry Applications* 57(2),1688–1702.

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition.
- Gülkaya, B., Ateş, Y., 2021. Elektrikli Taşıtların Dağıtılmış Üretim Tabanlı Şebekeler Üzerindeki Etkilerinin Analizi Ve Çözüm Önerileri. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(4),1174–99.
- Güner, S., Yazıcı, S., 2022. Bir Güneş Enerji Sisteminin Dağıtım Sistemi Güvenilirliğine Etkilerinin İncelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10(2),538–49.
- Heba, A., Gastli, A., Ben-Brahim, L., Semira, M., 2022. Planning and Optimizing Electric-Vehicle Charging Infrastructure Through System Dynamics. IEEE Access, 10, 17495–17514.
- John, S., Vincent. G., 2021. PV Fed Electric Vehicle Charging Station with Power Backup. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2021-November.
- Li, B., Sun, H., Lou, J., Sun, K., Zhang, Z., Sun, Y., 2024. An Integration Scheme for Highway Rest Area Integrating the Distributed Photovoltaic Generation and Energy Storage. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(1), 1083–1092.
- Liu, B., Jordan, R., 1963. The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors: With Design Data for the U.S., Its Outlying Possessions and Canada. Solar Energy 7(2),53–74.
- Mishra, D., Singh, B., Panigrahi, B. K., 2022. Sigma-Modified Power Control and Parametric Adaptation in a Grid-Integrated PV for EV Charging Architecture. IEEE Transactions on Energy Conversion, 37(3), 1965–1976.
- Mukherjee, J. C., Arobinda G., 2015. A Review of Charge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grid. IEEE Systems Journal 9(4),1541–53.
- Muttaqi, K. M., Rahman, O., Sutanto, D., Hossain Lipu, M. S., Abdolrasol, M. G. M., Hannan, M. A., 2022. High-Frequency Ripple Injection Signals for the Effective Utilization of Residential EV Storage in Future Power Grids With Rooftop PV System. IEEE Transactions on Industry Applications, 58(5), 6655–6665.
- Prajapati, S, and Fernandez, E., 2019. Rooftop Solar PV System for Commercial Office Buildings for EV Charging Load. 2019 IEEE 6th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application, ICSIMA 2019.
- Rangaraju, J., Gong X., 2020. Taking Charge of Electric Vehicles-Both in the Vehicle and on the Grid.
- Sekhar, K. S. R., Chaudhari, M. A., Khadkikar, V., 2023. Enhanced Hybrid Converter Topology for PV-Grid-EV Integration. IEEE Transactions on Energy Conversion, 38(4), 2634–2646.
- Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci L., 2003. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating. NCPV and Solar Program Review Meeting, NREL.
- Yildizhan, D., Erenoğlu, A. K., Erdiç, O., 2022. Elektrikli Araç Entegrasyonunun Dağıtım Sistemine Etkilerinin İncelenmesi Ve Şarj İstasyonu Altyapısının Tayin Edilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10(4),1232–42.
- Xiao, L., Muttaqi, K. M., & Agalgaonkar, A. P., 2023. Improving Reliability of PV-Powered Highway with Electric Vehicle Charging Services. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(2), 2002–2011.
- Yousuf, A. K. M., Wang, Z., Paranjape, R., Tang, Y., 2023. Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Mitigation Strategies. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 588–92.
- Yüzer, E. Ö., Bozkurt, A., Barutçu, Ç., 2023. Fotovoltaik Sistem Çıkış Gücünün Yapay Sinir Ağları Ve Matlab/Simulink Modellerinin Entegrasyonu İle Belirlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 11(2),551–63.
- Zhang, S., James, J. Q. Y., 2022. Electric Vehicle Dynamic Wireless Charging System: Optimal Placement and Vehicle-to-Grid Scheduling. IEEE Internet of Things Journal 9(8),6047–57.
- Zhang, T., Wei C., Zhu, H., Zhigang, C., 2014. Charging Scheduling of Electric Vehicles with Local Renewable Energy under Uncertain Electric Vehicle Arrival and Grid Power Price. IEEE Transactions on Vehicular Technology 63(6),2600–2612.