



Enerji Gereksinimlerine Dayalı Fotovoltaik Güneş Enerji Santrali Analizi ve Tasarımı

Energy Requirements Based Photovoltaic Solar Power Plant Analysis and Design

Süleyman Güneş , Rıfat Hacıoğlu*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Fosil yakıtların sürdürülebilirlik sorunları ve çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye’de olduğu gibi dünyada da yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji yaygınlaşmaktadır. Artan enerji talebi dikkate alındığında üniversite gibi eğitim kurumlarının kendi enerjilerini üretmeleri ülke ekonomisi ve enerji verimliliği açısından önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, kurumların kendi enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla kurulması muhtemel güneş enerji santrali (GES) analizi ve tasarımı için bir öngörü oluşturma hedeflenmektedir. Üniversitelerin kampüs alanları bu amacı gerçekleştirmek için seçilmiş olup güneşlenme, konum, sıcaklık değişimi kıyaslamaları ile beş farklı üniversite yerleşkesinde kurulum senaryoları gerçekleştirilmektedir. Mevcut yönetmelikler çerçevesinde enerji dönüşümünde sadece radyasyon ve güneşlenme süresi değil aynı zamanda panel sıcaklığı, panel açısı sonuçları da analiz edilerek tasarım yaklaşımları önerilmektedir. Üniversite yerleşkelerine arazi, eğimli çatı ve düz çatı sistemi olmak üzere üç farklı güneş enerjisi santrali kurulumu değerlendirilmektedir. Ek olarak sabit açı, tek ekseninde aylık değişken açı ve yılda iki açı değiştirme durumları incelenerek enerji üretim verimliliği de incelenmektedir. Farklı illerde kurulan güneş enerji santrali sistemlerinin analizleri için PVGIS çevrim içi veri tabanı ve hesaplama sistemi kullanılmaktadır. PVGIS, konum bilgisine dayalı güneş radyasyonu, güneşlenme süresi, ortam koşulları ile fotovoltaik (PV) sistem performansıyla ilgili bilgiler sağlayan bir çevrim içi Avrupa Birliği projesi hesaplama sistemidir. PVGIS kullanılarak dünya genelindeki herhangi bir koordinat için meteorolojik verilere erişilebilir ve farklı PV sistemlerinden ne kadar enerji üretilebileceği hesaplanabilir. Toplanan gerçek veriler ile kıyaslama yapılan bu tasarımda karşılaşılabilecek hata seviyeleri ortaya koyulmakta olup maliyet hesaplaması değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi sistemleri, arazi ve çatı sistemleri ihtiyaç analizi, PVGIS

Abstract

Considering the sustainability problems and environmental impacts of fossil fuels, renewable and sustainable energy is becoming widespread in the world as well as in Turkey. Considering the increasing energy demand, the ability of educational institutions such as universities to produce their own energy is an important research topic in terms of the country’s economy and energy efficiency. In this study, it is aimed to create a prediction for the analysis and design of solar power plants (SPP) that may be established in order to meet the energy needs of institutions. Campus areas of universities have been selected for this purpose, and installation scenarios are carried out in five different university campuses with comparisons of insolation, location and temperature change. Within the framework of current regulations, design approaches are suggested by analyzing not only radiation and sunshine duration but also panel temperature and panel angle results in energy conversion. Three different solar power plant installations are being evaluated on university campuses, including land, sloping roof and flat roof systems. In addition, energy production efficiency is also examined by examining fixed angle, monthly variable angle on a single axis and bi-annual angle changing situations. PVGIS online database and calculation system is used for analysis of solar power plant systems installed in different provinces. PVGIS is an online European Union project calculation system that provides information on solar radiation, sunshine duration, ambient conditions and photovoltaic (PV) system performance based on location information. Using PVGIS, meteorological data can be accessed for any coordinate around the world and how much energy can be produced from different PV systems can be calculated. In this design, which is compared with the real data collected, the error levels that may be encountered are revealed and the cost calculation is evaluated.

Keywords: Solar energy systems, land and roof systems needs analysis, PVGIS

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hacirif@beun.edu.tr

Süleyman Güneş orcid.org/0000-0002-9825-4185

Rıfat Hacıoğlu orcid.org/0000-0002-2480-0729

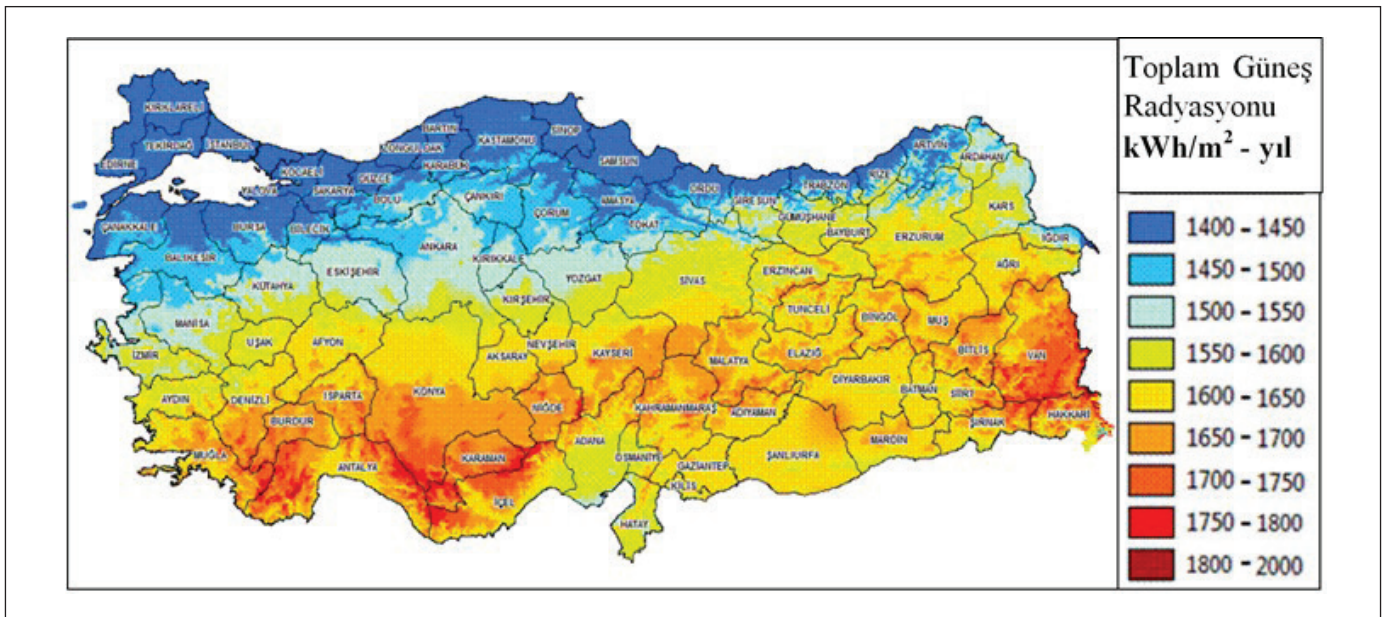


1. Giriş

Nüfus artışı ve sanayileşme nedeniyle enerji talebi sınırlı enerji kaynakları ile karşılanamadığı için enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark hızla büyümektedir. Ek olarak günümüzde geleneksel enerji üretimi karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diğer sera gazlarındaki artışa neden olmaktadır ki bu durum çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın başlıca nedenleri olarak görülmektedir. Ayrıca fosil yakıtların zamanla tükeneceği de kaçınılmaz bir gerçektir (Üney ve Çetinkaya 2014). Bu durum ülkelerin ve bilim insanlarının alternatif enerji kaynaklarına yönelmelerini teşvik etmektedir. Yenilenebilir, yaygın ve erişilebilir olmasıyla güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi nükleer füzyon reaksiyonları sayesinde ortaya çıkar. Bu etkileyici enerji, dünya ya sonsuz bir güç ve ışık sağlar. Güneş'ten yıllık olarak 1.5x10¹⁸ kWh elde edilen enerji, Dünya'nın mevcut enerji tüketiminden yaklaşık olarak 10000 kat daha fazladır (Messenger ve Ventre 2017). Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de güneş enerjisi uygulamaları hızla artmaktadır. Türkiye güneş radyasyon değeri yılda 1314 ile 1753 kWh/kWp (güneş panelin maksimum üretebileceği değer) arasında yer alır (Eroglu 2022, Güneş 2024) ki fotovoltaik (PV) paneller yardımıyla doğrudan elektrik enerji üretimi sağlanabilmektedir. Ek olarak bölgesel enerji ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için güneş enerji santrallerinin (GES) kurulumunda uygun yerin belirlenmesi ve planlanması önemli bir araştırma konusudur (Di Bari 2020). Bu çalışmada bölgesel enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için enerji verimliliğine dayalı karşılaştırmalı analiz ve tasarım önerileri üzerinde durulmaktadır.

Türkiye'nin bölgesel olarak güneş enerji potansiyeli haritası Şekil 1 ile verilmekte olup ortalama güneşlenme süresi 7.2 saat/gün (illere göre en düşük 5.8 saat/gün, en yüksek 9.2 saat/gün) olarak hesaplanmaktadır (Eroglu 2022, Güneş 2024). Fotovoltaik güneş enerji santrali kurulumunda en iyi üretimi sağlamak sadece güneş radyasyon miktarı ve güneşlenme sürelerinin iyi olması ile değil aynı zamanda uygun sıcaklık, rüzgar hızı, nem, yağış, hava basıncı koşullarının da uygun olması ile mümkündür (Huld ve Amillo 2015). Ek olarak üretimi etkileyen önemli bir faktör güneş ışığının geliş açısıdır ve PV modüllere dik gelmesi beklenir. İşletme maliyetleri açısından sabit açılı kurulan güneş enerji santrallerine alternatif olarak tek veya çift eksen hareketli güneş enerji santralleri de önerilmektedir (Bouabdallah vd. 2013, Handoyo ve Ichsani 2013). Yüksek kapasiteli arazi tipi güneş enerji santralleri ile birlikte çatı tipi güneş enerji santrallerinin yaygınlaştığı bu durumda kurulum/işletme maliyetleri değerlendirildiğine yatırım maliyetlerinin kısa sürede karşılanması önemlidir (Akkaya ve Akkaya Oy 2021).

Güneş enerjisi teknolojisinin en mütevazı tahminleri çerçevesinde bile, 2050 yılında ülkenin tüm elektrik ihtiyacını karşılamak için Türkiye'nin toplam yüzölçümünün binde 25'inden az bir alanı güneş modülleriyle kaplamak yeterli olacaktır (Güneş 2024). Genel anlamda güneş ışınımının yüksek olduğu ülkenin coğrafi konumu nedeniyle bölgelere göre güneş ışınımı dağılımı eşit değildir. Şekil 1'de güneş radyasyonu haritasına bakıldığında özellikle ülkenin kuzey bölgelerinin düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Türkiye güneş enerji potansiyeli haritası.

Öte yandan, enerji tüketiminde artışa neden olan ve sanayinin geliştiği iller genellikle ülkenin batısında yer almaktadır. Bu durum enerji taşımacılığında mesafelerin uzun olması nedeniyle hatlarda iletim kayıplarına neden olmaktadır.

Bu değerlendirmeler kapsamında Diyarbakır, İstanbul, İzmir, Osmaniye ve Zonguldak olmak üzere beş ilimizde bulunan üniversite kampüslerinde güneş enerji santrallerinin verimlilik analizleri bu çalışmada ortaya koyulmaktadır. Arazi ve çatı tipi enerji santralleri kıyaslanmakta olup sabit ve hareketli sistem tasarımı önerilerinde bulunmaktadır. Kurumların enerji ihtiyacını karşılayabilmeleri için güneş enerji santralleri konusunda bir öngörü oluşturulması hedeflenmektedir. Yapılan çalışmalarda, güneş enerji santrallerinin ihtiyacı yoğun olan beş bölgeyi temsilen beş ilde bulunan Üniversitelerin kampüs alanları bu amacı gerçekleştirmek için seçilmiş olup güneşlenme, konum, sıcaklık değişimi kıyaslamaları ile üniversite yerleşkelerinde kurulum senaryoları değerlendirilmektedir. Ek olarak maliyet hesaplamaları ile birlikte uzun vadeli yatırım planlarına katkı sunulmaktadır.

2. Gereç ve Yöntemler

Bu bölümde GES analizi için kullanılan hesaplama sistemi ile etkileyen faktörler değerlendirilmektedir. Örnek bir GES tasarımı için gerçekçi kısıtlar bu hesaplama sisteminde değerlendirilmektedir. PVGIS, PVSyst, PVSOL, Polysun, Helioscope gibi programlar PV sistem analizlerinin, benzetimlerinin ve maliyet hesaplamalarının yapılmasında kullanılmaktadır. Bu gelişmiş programlar, gerçeğe yakın analizlerin kolayca yapılabilmesine olanak tanır. Özellikle

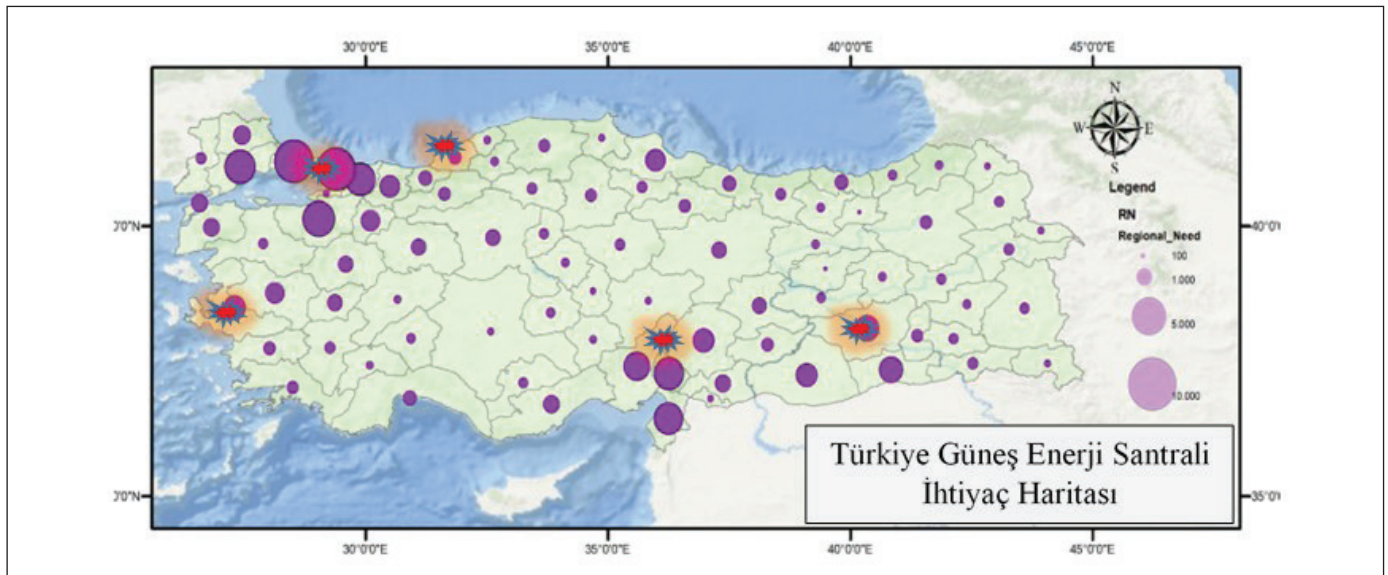
PVGIS, Avrupa Birliği tarafından geliştirilmiş ücretsiz ve hata payı düşük bir benzetim programıdır ve meteorolojik verileri kullanarak güneş ışınımından elde edilebilecek elektrik enerjisi potansiyelini hesaplamaktadır. Bu program, uygulama alanının koordinatlarına göre günlük, aylık ve yıllık en iyi radyasyon (ışınım) değerlerini ve üretilen elektrik enerji miktarını hesaplayabilir (PVGIS 2022). Bu çalışmada 2022 yılı PVGIS çevrim içi veri tabanı kullanılarak, tasarlanan güneş enerjisi santrallerinin günlük, aylık, yıllık enerji üretimi hesaplanmaktadır. Her kampüs için kurulum (arazi, eğimli çatı, düz çatı) ve PV panel açısı durumuna göre 45 farkı hesaplama elde edilmektedir.

2.1. Güneş Enerji Santrali İhtiyaç Belirleme

Yapılan araştırmalarda (Eroğlu 2022), coğrafi veriler ve denklem (1)'den alınan değerler neticesinde Türkiye'nin güneş enerji santral ihtiyaç haritası Şekil 2'de görülmektedir. Burada bölgesel ihtiyaç endeksi RN_i ,

$$RN_i = \frac{S_i C_i}{L_i I P_i k} \quad (1)$$

ile tanımlanırken C_i ; şehrin MWh cinsinden enerji tüketimi S_i ; şehrin 100 m²'lik (kWh/m²-Yıl) alanında monokristal silikon tipi PV modül ile üretililecek enerji miktarı, L_i ; şehrin arsa maliyeti katsayısı, $I P_i$; MW cinsinden şehrin kurulu güneş enerjisi miktarı, k ; normalizasyon katsayısını vermektedir. İhtiyaç endeksi değerleri neticesinde Şekil 2'deki haritada görüleceği üzere üretim ve tükemin dengesiz olduğu değerlendirilmektedir. Hem ihtiyaç endeksi hem de bölgesel katkı birlikte değerlendirilerek kıyaslamalı ihtiyaç analizi



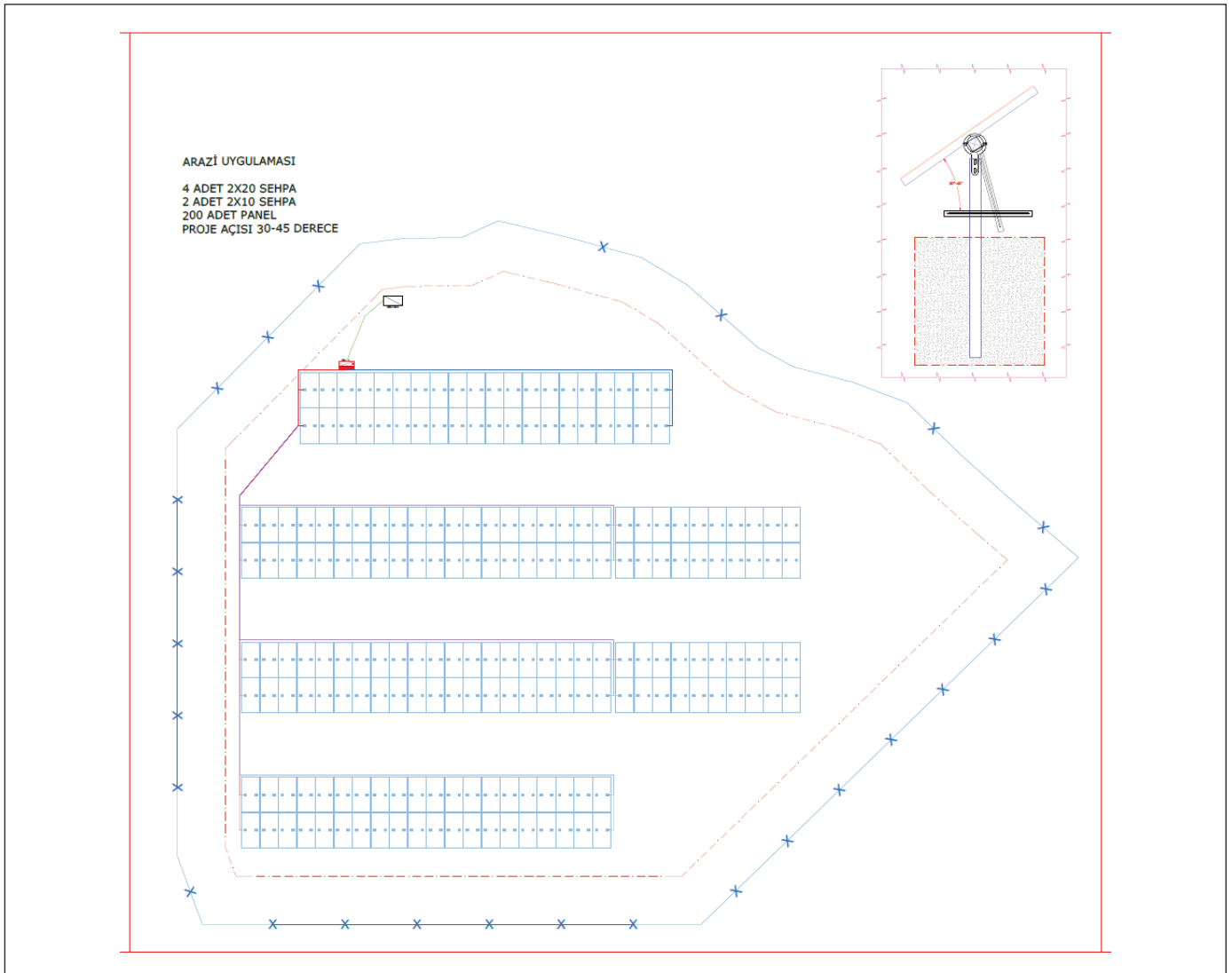
Şekil 2. Türkiye güneş enerjisi santrali ihtiyacı haritası (Eroğlu 2022).

neticesinde beş il seçilmiştir. İhtiyaç endeksi İstanbul 6730, Osmaniye 3874, Diyarbakır 2561, İzmir 2160 ve Zonguldak yaklaşık 1100 olup seçilen bu iller ayrı beş bölgeyi temsil etmektedir. Buna göre Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ZBEÜ), Dicle Üniversitesi (DÜ), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi (OKAÜ), Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) ve Marmara Üniversitesi (MÜ) kampüs alanlarında (Şekil 2) 100 kWh'lık gücünde GES kurulumları incelenmektedir.

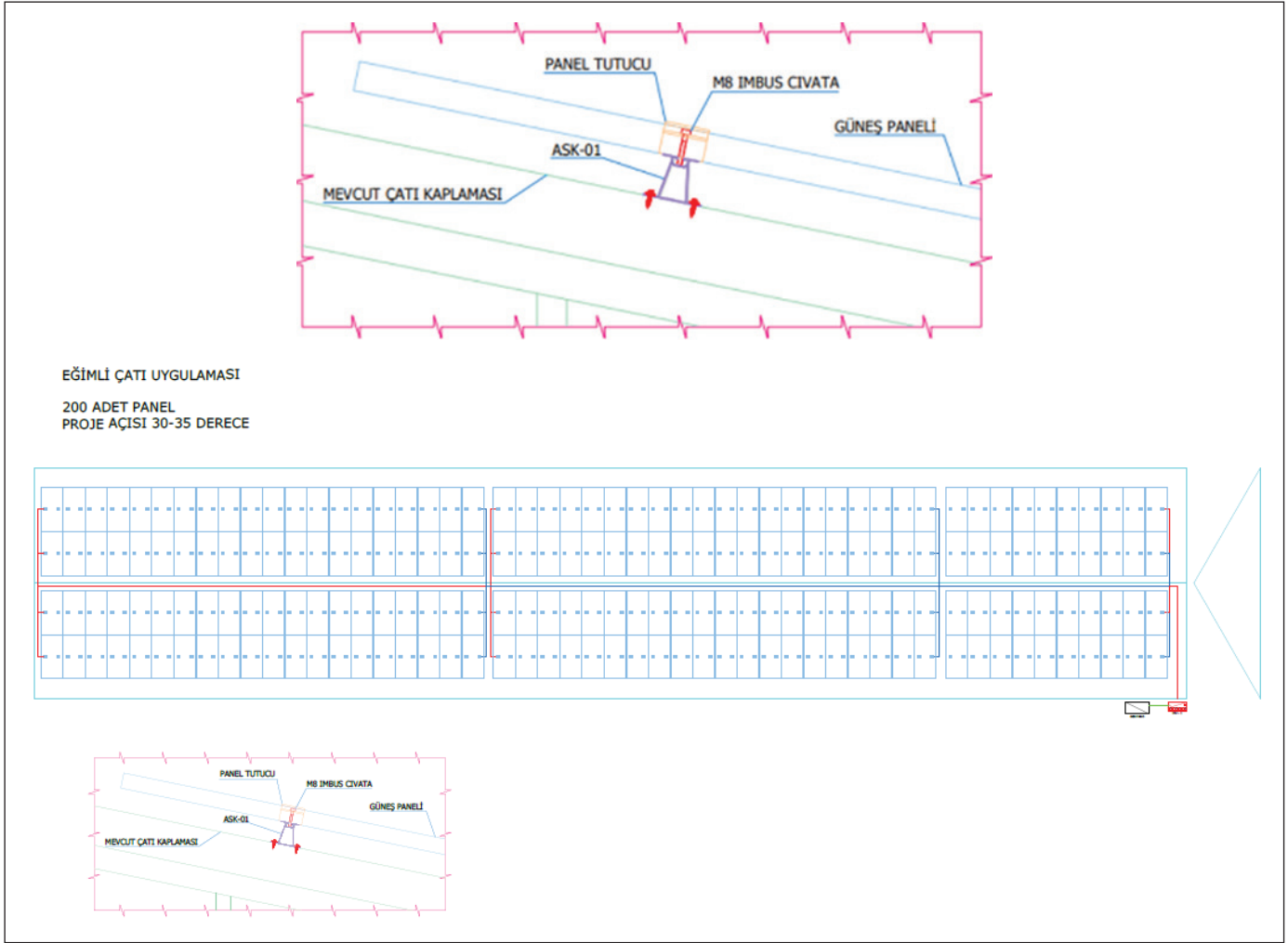
Kurulum hedeflerine göre arazi, eğimli çatı ve düz çatı sistemleri olmak üzere üç farklı yerleşim planı değerlendirilmekte olup enerji verimliliği çerçevesinde sabit açı sistemleri tek eksenle aylık değişken açı ve tek eksenle yılda iki değişken açı sistemleri ile kıyaslanmaktadır. Değişken eğimli çatı sisteminde kullanılan açı değerleri; İstanbul Büyükşehir Belediyesinin imar yönetmeliği 7.02.1. nolu "Çatı yüzeyleri-

nin meyili %45'i geçemez" maddesi ve İzmir Büyükşehir Belediyesi imar yönetmeliğindeki madde 41'de geçen "Genel olarak çatıların %33 meyilli gabari dahilinde kalması şarttır" ibarelerine göre açı değerleri hesaplanmıştır. Değişken açılı arazi sisteminin ve değişken eğimli çatı sisteminin başlangıç değeri 30 derecedir. Buna karşın değişken açılı düz çatı sisteminin başlangıç değeri ise 10 derecedir. Bu durumda değişken açılı arazi sisteminin açı aralığı 30-45 derece, değişken açılı eğimli çatı sisteminin açı aralığı 30-35 derece ve değişken açılı düz çatı sisteminin açı aralığı 10-15 derece aralığında olmaktadır.

Değişken açı değerleri Şekil 3'de arazi, Şekil 4'de eğimli çatı ve Şekil 5'de düz çatı için tasarlanan tek eksenli krikolu güneş paneli standı yardımıyla sağlanmaktadır. Bu düzenekler arazi ve çatı sistemleri için iki farklı şekilde tasarlanmak-



Şekil 3. Arazi uygulama örneği ve tasarlanan tek eksenli (30-45°) krikolu güneş paneli standı.



Şekil 4. Eğimli çatı uygulama örneği ve tasarlanan tek eksenli (çatı eğimine ek 0-5°) krikolu güneş paneli standı.

tadır. Değişken açılı arazi sistemi için 15 derece değişim sağlayan düzenek yer alırken, çatı sistemleri için 5 derece değişim sağlayan krikolu düzenek sistemi kullanılmaktadır. Düzenegin her bir kademesi 1 (bir) derecelik açı değişimleri sağlayacak şekilde tasarım yapılmaktadır (Güneş 2024). Burada yönetmeliklere ve rüzgar etkisi gibi hava koşulları kısıtlamaları sınır değerleri belirlemede dikkate alınmaktadır (Messenger ve Ventre 2017, Obi ve Bass 2016).

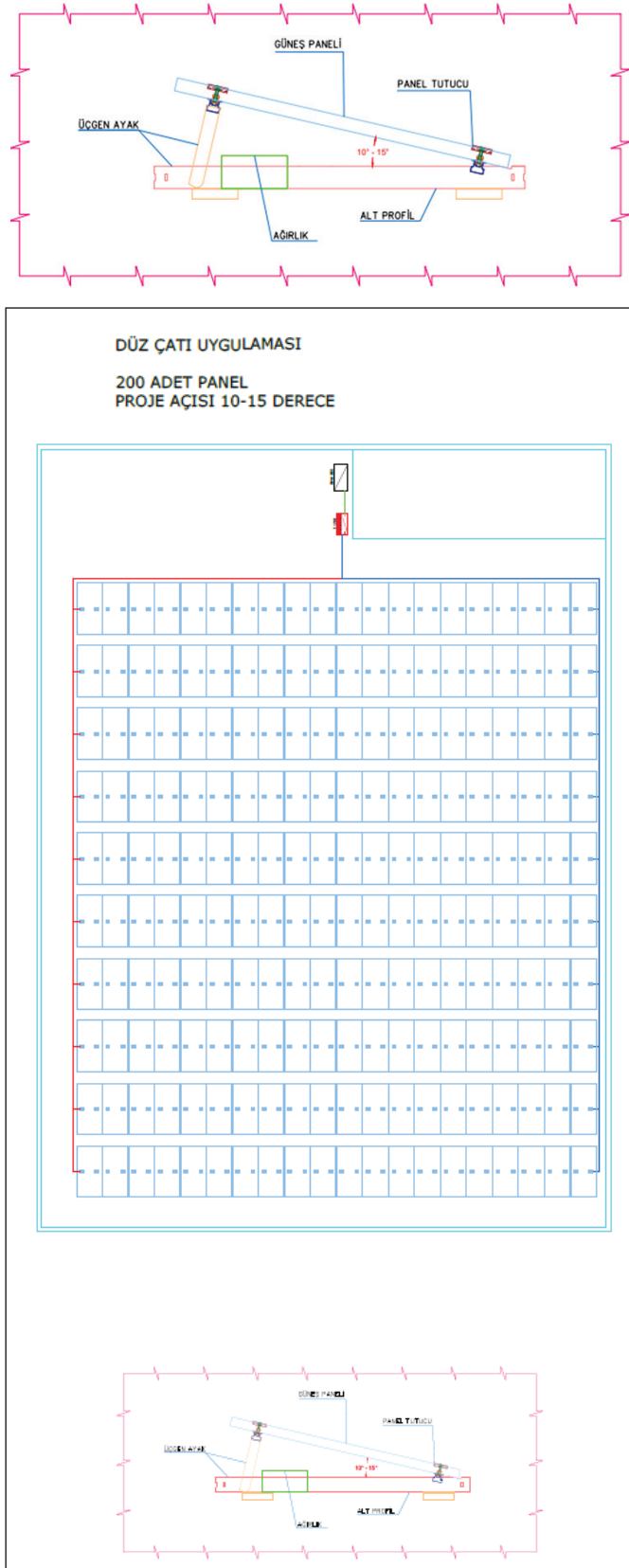
2.2. PVGIS Veri Analiz

PVGIS, sadece Avrupa ve Afrika'yı değil, aynı zamanda Asya ve Amerika'nın geniş bir bölgesini kapsayan güneş radyasyonu ve fotovoltaik (PV) sistem performansı hakkında bilgi sunar (PVGIS 2022). PVGIS arayüzü, Şekil 6'da görüldüğü gibidir. PVGIS, bir dizi seçenek sunar ve çoğu seçenek için yardım almak mümkündür. Örneğin, haritanın altındaki "Enlem/Boylam" seçeneğine üzerine geldiğinizde bu konuda yardım alınabilir. Enlem/Boylam bilgisi kullanıla-

rak, dünya üzerinde herhangi bir yerde sistem kurmak için gerekli meteorolojik ve güneş radyasyon verilerine ulaşılabilir.

PVGIS programında GES tasarımı için,

- kurulum yeri harita üzerinde yaklaşılıp uzaklaşarak manuel olarak, haritanın altındaki "Adres" alanına bir yerin (ilçe, cadde) adını girerek, haritanın altındaki uygun alanlara enlem ve boylam koordinatlarını yazarak belirlenebilmekte olup
- kullanılan panellerin azimut açısı güney yönünde (0°) açısını konumlandırarak,
- panel olarak kristal silikon seçimiyle,
- santrallerin kaybı %14 belirleyerek,
- santraller şebekeye (on grid) bağlı olmasıyla,



Şekil 5. Düz çatı uygulama örneği ve tasarlanan tek eksenli (10-15°) krikolu güneş paneli standı.

- santrallerin kurulacağı alanlar üniversitelerin yerleşkesinde (tasarrufunda) üretilen enerji yerleşkelerin Alçak Gerilim (AG) panolarına bağlanacağı

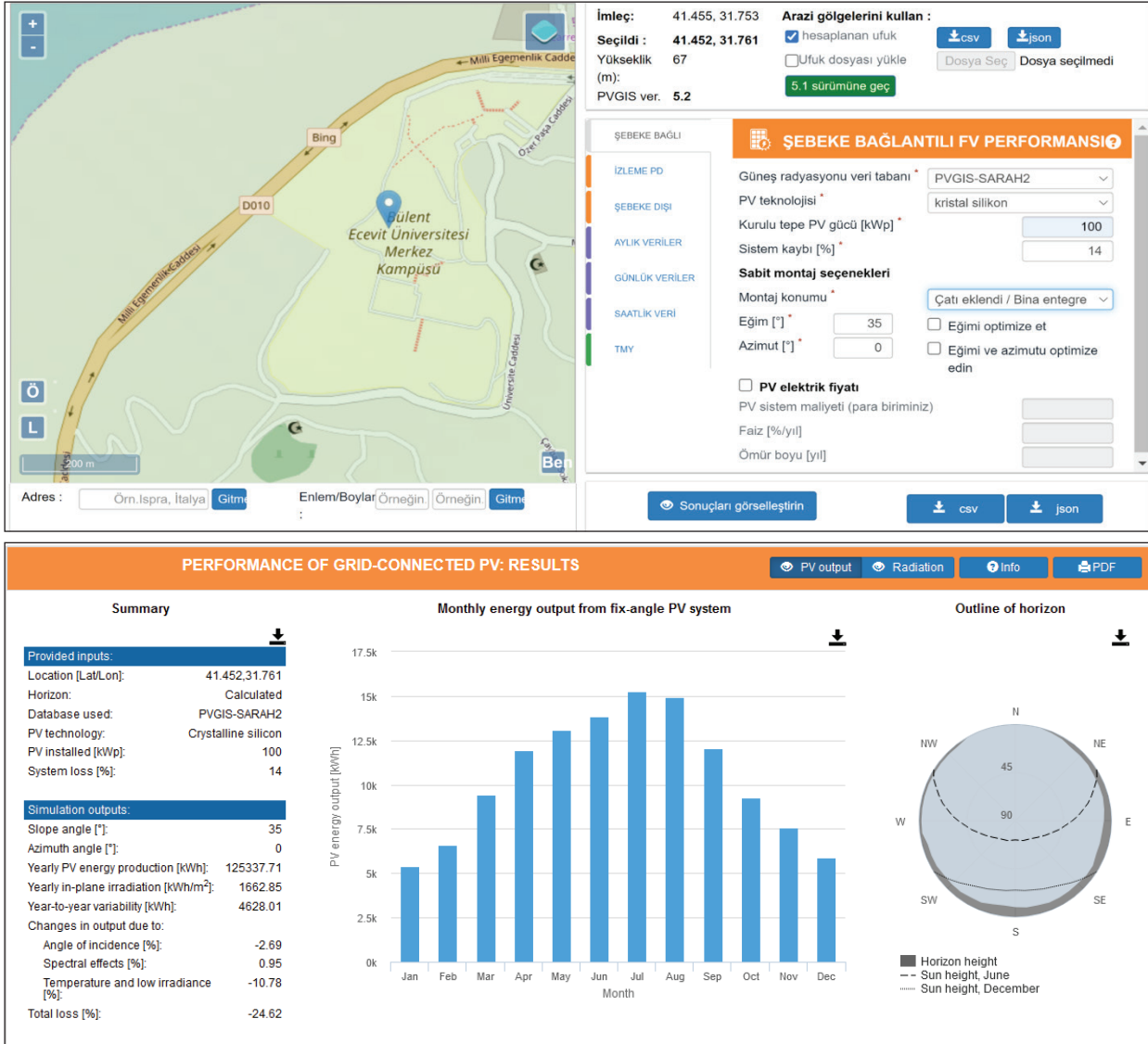
kabul edilmektedir. Programda elektrik enerjisi çıktısı kWh olarak kullanılmaktadır.

PVGIS ile farklı kurulum planlamaları için de hesaplamalar yapılabilmektedir.

- Şebekeye bağlı PV sistemlerinin performansı: Burada, üretilen enerjinin yerel olarak kullanılabilmesi veya şebekeye iletilmesi için elektrik şebekesine bağlı PV sistemlerinin uzun vadeli ortalama enerji çıkışı hesaplanabilir. PV modüllerinin bağımsız bir araziye veya bir binaya sabit konumda monte edildiği sistemleri için geçerlidir.
- Şebekeden bağımsız PV sistemlerinin performansı: Burada, elektrik şebekesine bağlı olmayan fakat enerji depolama bataryalarının kullanıldığı PV sistemlerinde hesaplamalar yapılabilir.
- **Tracking PV sistemlerinin performansı:** Burada, modüllerin daha fazla güneş ışığı alması için güneşi izleme montajının gerçekleştirildiği, şebekeye bağlı PV sistemlerinden elde edilen uzun vadeli ortalama enerji çıkış değerleri hesaplanabilir.
- **Aylık radyasyon:** Bir yıl aralığında her ay için aylık ortalama radyasyon ve sıcaklık verileri alınmaktadır.
- **Günlük radyasyon:** Her ayın ortalama bir günü için gün içindeki ortalama güneş ışıması ve sıcaklığı hesaplanmaktadır.
- **Saatlik radyasyon:** Saatlik güneş radyasyon değerleri hesaplanmaktadır.
- **Yıllık meteorolojik veriler:** Binaların enerji performansının hesaplanması gibi birçok alanda kullanılan güneş radyasyonu, sıcaklık ve diğer meteorolojik veriler sistemden çekilmektedir.

Her hesaplama türü için belirli bilgilerin girilmesi gerekmektedir; örneğin, kurmayı planladığınız sistemin gücü, kullanacağınız güneş hücrelerinin türü, panellerinizin açısı gibi. Program, hesaplama sonuçlarını iki farklı seçenek olarak sunar. PVGIS, hesaplama sonuçları hem grafik hem de sayısal olarak görüntülenebilir veya elektronik tablolar ve diğer yazılımlarda kullanılmak üzere elde edilebilir.

PVGIS, uydu görüntülerinden elde edilen yüksek kaliteli güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verilerini kullanır. Enerji verim modelinin doğruluğu, JRC'nin Euro-



Şekil 6. Fotovoltaik coğrafi bilgi sistemi (PVGIS) arayüzü.

pean Solar Test Installation (ESTI) tarafından ticari modüller üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerle teyit edilmiştir. ESTI, ISO 17025 onaylı bir fotovoltaik kalibrasyon laboratuvarı olup, tüm fotovoltaik malzemeler için hizmet vermektedir (PVGIS 2022). Bu programda uygulanan model ile Güç (P) değeri, güneş ışınım ve sıcaklığa bağlı olarak

$$P(G_T', T') = G_T' (P_{STC,m} + k_1 \ln(G_T') + k_2 \ln(G_T')^2 + k_3 T' + k_4 T' \ln(G_T') + k_5 T' \ln(G_T')^2 + k_6 T'^2) \quad (2)$$

$$G_T' = G_T / G_{STC} \quad (3)$$

$$T' = T_{mod} - T_{STC} \quad (4)$$

$$\eta_{rel}(G_T', T') = P(G_T', T') / (P_{STC,m}, G_T') \quad (5)$$

hesaplanır ki burada, G_T' , toplam güneş ışınımını (1000 W/m²) temsil ederken, T' panel sıcaklığını (°C), $k_1 \dots k_6$ JRC'nin ESTI tarafından modülün güç katsayıları olarak tanımlanmaktadır (Huld vd. 2011, PVGIS 2022). $P_{STC,m}$ Standart Test Koşullarında (25 °C) maksimum gücü ifade ederken, η_{rel} modül verimini temsil eder.

2.3. Güneş Enerji Santrali Üretimi Etkileyen Faktörler

Burada PVGIS verileri kullanılarak araştırmaya konu olan Zonguldak, Diyarbakır, Osmaniye, İzmir ve İstanbul illerindeki beş farklı üniversite kampüsünde (Şekil 2) kurulumu önerilen güneş enerji santralini etkileyen faktörler

incelenmektedir. PV sistemler üzerinde belirgin bir etkisi bulunan temel faktörlerden biri sıcaklıktır. Güneş ışınlarının PV hücrelere düşmesi, hücrelerde önemli bir ısınmaya neden olur. Bu ısınma, PV hücrelerin verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Ek olarak aşırı soğumalar da PV sistemlerde enerji üretimini olumsuz etkilemektedir. Güneşlenme süresi ve radyasyon miktarıyla ise olumlu bir şekilde etkileşir (Messenger ve Ventre 2017, Wang vd. 2017). Şekil 7 ile veri analizlerine göre yapılan elektrik üretim miktarı değerlendirmelerinde, mevsimsel değişimlerin etkileri, sırasıyla güneşlenme miktarı (radyasyon), güneşlenme süresi ve sıcaklık değişimleri aylara göre sunulmaktadır. Ek olarak tüm faktörlerin beş farklı kampüsteki genel kıyaslaması Şekil 8'de verilmektedir. Güneşlenme miktarı ve süresi yüksek görünen DÜ değerlendirildiğinde sıcaklık farkının aşırı olduğu da not edilmelidir. ZBEÜ'de sıcaklık farkı az olmasına karşılık radyasyon ve güneşlenme süresinin de az olması üretim açısından önemli bir faktördür. DEÜ yerleşkesinin enerji üretim potansiyeli diğer yerleşkelere göre daha üstün olduğu değerlendirilmektedir.

2.4. Güneş Enerji Santrali Kurulum Maliyet Analizi ve Projelendirme

Burada araştırmaya konu olan güneş enerji santralleri; arazi, eğimli çatı ve düz çatı sistemlerinin maliyetini etkileyen faktörler incelenmektedir. Enerji potansiyeli 100 kWp değerine sahip güneş enerji santrali için maliyet sabit arazi sistemine göre yüzdesel değerler ile Çizelge 1'de verilmektedir.

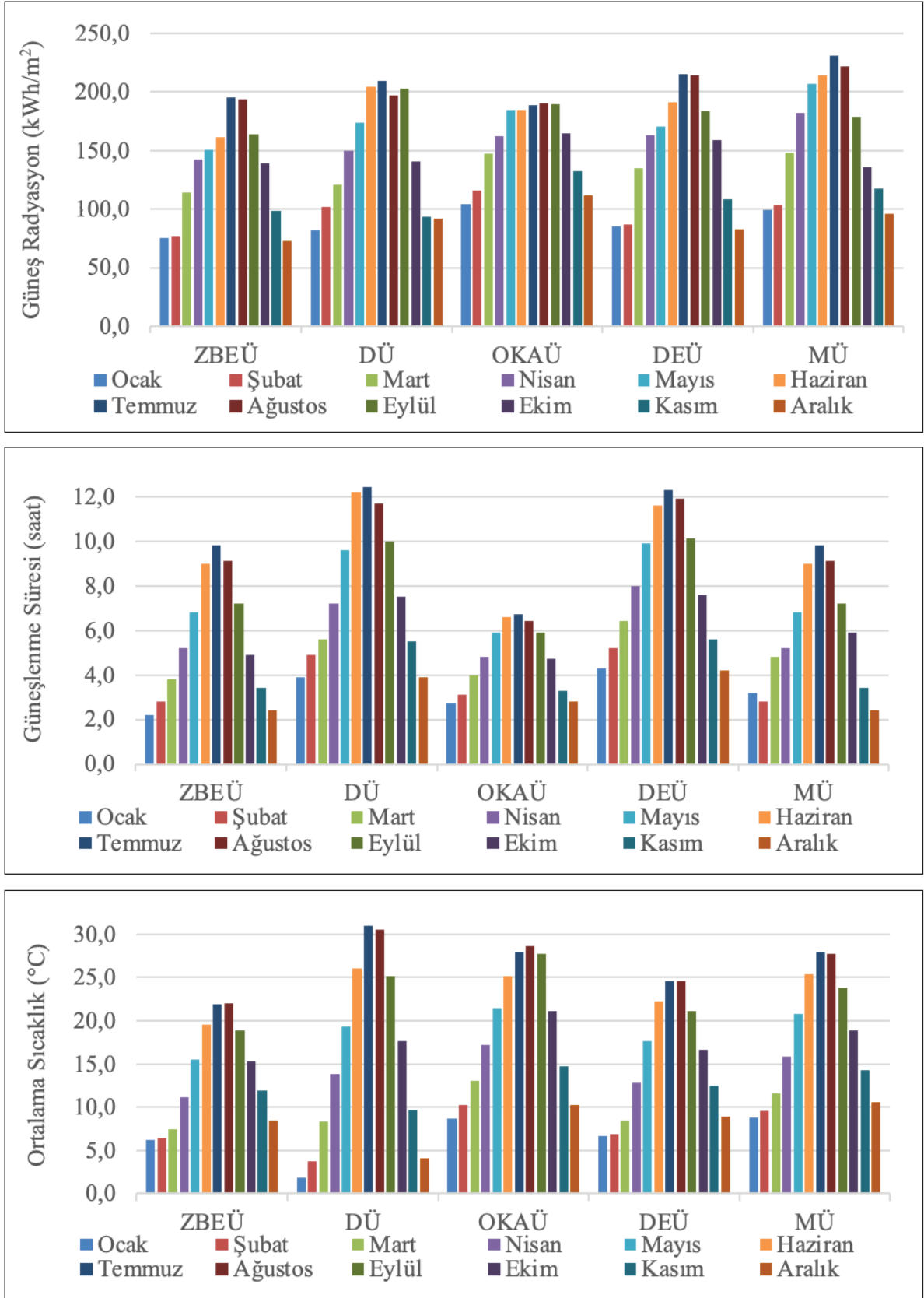
Çatı sistemlerine göre arazi sistemlerinde konstrüksiyon ve kablolama ek maliyet olarak görülmektedir. Önerilen mekanik güneş takip sistemi (Şekil 3-5) ise toplam maliyetler incelendiğinde oldukça düşük oranda yer almaktadır. Temel alınan sabit açılı arazi sistemine tek eksen güneş takip sistemi ve hat bağlantı sistemi yüzde 15.19 ek maliyet getirirken çatı sistemlerinde bu oran sadece yüzde 0.71 oranındadır. Ek olarak not etmek gerekir ki şebekeye aktarılan enerji kWh değeri yüzdesel olarak 1/425000 olarak ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) belirlediği fiyat tarifesine (EPDK 2023) göre değerlendirilmektedir.

Seçtiğimiz üniversitelerin enerji ihtiyacının bir kısmının karşılanması için 100 kWh lık santraller tasarlanmaktadır. Tasarlanan 100 kWh santral için toplam 183 adet 545 Wp gücünde panel ve 1 adet 100 kW gücünde invertör kullanılmıştır. Arazinin etrafında gölgelemeye sebebiyet verebilecek herhangi bir unsurun olmadığı varsayılmıştır. Santraller; Üniversitenin mülkiyetinde olan bir bölge üzerinde kurulacak şekilde tasarlandığından arazi gideri olmayacaktır. Ayrıca kurulum için gerekli olan sermaye, kurumun öz sermayesinden karşılanacağı kabul edilmiş olup kredi, sigorta vb. giderler için de ayrıca bir maliyet analizi yapılmamıştır.

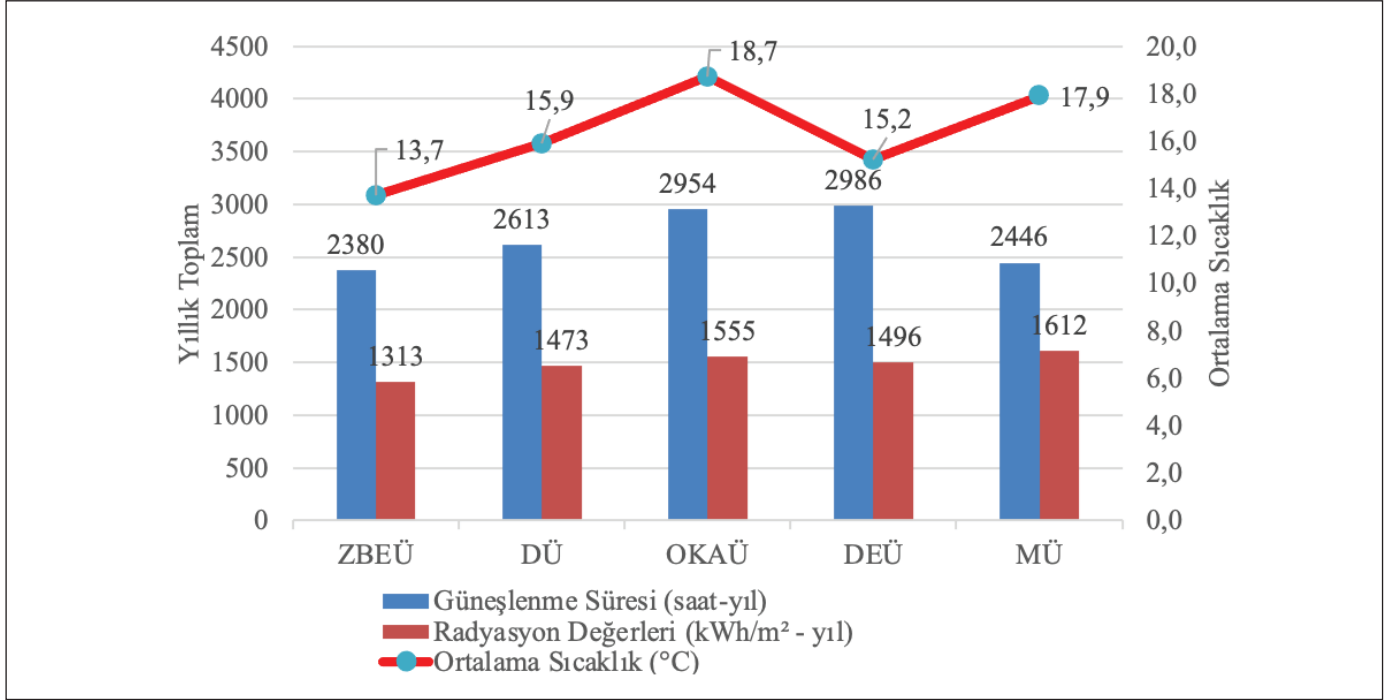
Arazi, eğimli ve düz çatı yerleşim planları ile birlikte örnek GES proje tasarımı Şekil 3-5'de verilmektedir (Güneş 2024). Şekil 3-5'de panellerde kullanılacak tek eksenli kriko standın temsili çizimleri bulunmaktadır. Standlar; panel tutucu, üçgen ayak, alt profil, dengeleyici ağırlık, tutucu

Çizelge 1. GES sistem elemanları ve yüzdesel maliyet değerleri.

	Arazi	Eğimli Çatı	Düz Çatı
Güneş Paneli 100 kWp	47.22	47.22	47.22
Invertör 100 kW (Ekipmanları ile birlikte)	4.83	4.83	4.83
100 kW GES Pano (Ekipmanları ile birlikte)	3.53	3.53	3.53
Solar Sistem Çelik Konstrüksiyon	15.99	6.92	12.69
1X240 mm ² N2XH Kablo	1.41	1.41	1.41
1X6 mm ² SOLAR Kablo	4.41	3.00	3.00
Topraklama Malzemesi Set	5.65	5.65	5.65
SCADA Sistemi	6.48	6.48	6.48
Uzaktan İzleme Sistemi ve Sensörler (Ekipmanları ile birlikte)	1.06	1.06	1.06
İşçilik	9.42	9.42	9.42
Hat Bağlantı Sistemi	14.13	0.00	0.00
Güneş Takip Sistemi (Ayarlanabilir Kol)	1.06	0.71	0.71
TOPLAM	115.19	90.23	96.00



Şekil 7. Aylık ortalama radyasyon değerleri (kWh/m²), güneşlenme süreleri (saat) ve sıcaklık değerleri (°C).



Şekil 8. Yıllık toplam radyasyon değerleri (kWh/m²), güneşlenme süreleri (saat) ve sıcaklık değerleri (°C).

direk, panel yerleştirme sehpa ve kriko sisteminden oluşmaktadır. Kriko sistemi sayesinde istenen açı değeri manuel olarak ayarlanabilmektedir.

Projelendirme, Lisansız Elektrik Üretim yönetmeliği (EP-LÜY 2019) gereği Çağrı mektubu başvurusu ile başlamakta olup yönetmelik gereği, öztüketim dışındaki tüm başvurularda, kurulması planlanan üretim tesisinin kurulu gücü, bağlı olduğu tüketim tesisi veya tesislerinin bağlantı sözleşme gücü toplamını aşamaz. Çağrı mektubu ile birlikte Elektrik Tesisleri Proje Yönetmeliği'nde belirtilen şekilde proje dosyası hazırlanarak 90 gün içerisinde ilgili kurum ve kuruluşlara sunulmalıdır (ETPY 2014). Eğer proje, ilgili kurum tarafından 90 gün içinde onaylanmazsa, talep sahibi ilgili dağıtım şirketine süre uzatımı için başvurabilir. Projenin incelenme aşamasında olması durumunda, ilave 180 gün süre verilir. Onaylanan proje 30 gün içerisinde ilgili Dağıtım Şirketi ile bağlantı anlaşması yapması gerekmektedir. Bağlantı anlaşması yapılan tesislerin özellik ve boyutlarına göre 1-3 yıl içerisinde tesislerin geçici kabulün tamamlanması gerekmektedir. Onaylanan projenin yönetmelikte tanımlanan kriterlere ve bağlantı anlaşmasında yer alan şartlara uygun olduktan sonra talep sahibi tarafından geçici kabul başvurusunda bulunabilir.

Ek olarak kampüslerde kurulacak santraller Şebeke bağlantılı sistemler (on grid) olarak değerlendirilmektedir. Bu tür

tesislerde güneş enerjisinden elde edilen elektrik tüketim için kullanılmakta, üretilen enerjinin fazlası genel elektrik şebekesine basılmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi santral kısmında tek yönlü sayaç önerilmektedir (Güneş 2024). Çift yönlü sayaç kullanım ile de kampüslerde enerji fazlasından kazanç sağlanmak mümkün olacaktır ki bu durumda mahsuplaşma ile ilgili yasal süreçlerin işletilmesi gerekmektedir (Sümerbaş 2023). Bununla birlikte bu çalışma GES potansiyelini ortaya koymayı, kıyaslamalı olarak etkileyen faktörler değerlendirmeyi, projelendirme aşamasına destek bir öngörü oluşturmayı hedeflemektedir. Beş üniversite kampüsü GES enerji üretimini etkileyen faktörlerin kıyaslanabilir olması için seçilmekte olup 100 kW kurulu güç kampüs ihtiyaçlarının belirli bir miktarını karşılayacağı bilinci ile kıyaslama amacıyla tercih edilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Temiz enerji ihtiyacının, değişmeye başlayan doğamız ve küresel iklim için, mutlak bir gereklilik halini aldığını görmekteyiz. Bu çerçevede neredeyse tüm dünya ülkeleri ciddi çalışmalar yapmış ve yapıyor olmakla beraber bu konudaki önlemlerin günden güne arttırıldığını söylemek mümkündür. Bu çalışma, hem ülke politikasını hem de sera gazı salınımını azaltmaya yönelik çalışmaları desteklemektedir. Bu amaçla Türkiye'de ki bazı üniversitelere 100 kWh'lık güneş

santralleri kurulumu değerlendirilmektedir. Santrallerin kurulduğu üniversiteler olarak ZBEÜ, DÜ, OKAÜ, DEÜ ve MÜ seçilmiştir. Seçilen bu üniversiteler ihtiyaç endeksine göre ülkenin dört bir tarafını temsil etmektedir. Üniversitelerin yerleşkelerine arazi, eğimli çatı ve düz çatı olmak üzere üç farklı GES kurulumu değerlendirilmektedir. Sabit açılı GES ile kıyaslama yapılmakta olup değişken açılı değerleri Şekil 3-5’de gösterilen krikolu düzenek aracılığıyla sağlanmaktadır.

Değişken açılı arazi sisteminin ve değişken eğimli çatı sisteminin başlangıç değeri 30°’dir. Buna karşın değişken açılı düz çatı sisteminin başlangıç değeri ise 10°’dir. Bu sınırlamalar yönetmelikler ve rüzgar etkisi gibi hava koşulları değerlendirilerek belirlenmektedir. Bu durumda değişken açılı arazi sisteminin açılı aralığı 30-45°, değişken açılı eğimli çatı sisteminin açılı aralığı 30-35° ve değişken açılı düz çatı sisteminin açılı aralığı 10-15° aralığında olmaktadır.

Beş üniversite kampüsünde aylık açılı değişimli GES enerji üretimi aylara göre Şekil 9’da görülmektedir. Burada arazi, eğimli çatı ve düz çatı sistemleri sırasıyla değerlendirilmektedir. Not etmek gerekir ki arazi sistemleri çatı sistemlerine göre sıcaklık kayıpları yüzde 4 kadar daha azdır. Tüm aylar değerlendirildiğinde DEÜ en iyi üretimi sağladığı görülmektedir ki güneş radyasyon değişimi MÜ’den az olsa da güneşlenme süresi ve sıcaklık etkisi ile üretim daha fazladır. ZBEÜ yaz aylarında DÜ ve OKAÜ kampüslerinden daha fazla üretim sağladığı görülmektedir ki bu durum sıcaklık değişiminin az olması ile değerlendirilmektedir.

Yıllık üretim değerleri arazi sistemleri için Çizelge 2’de, eğimli çatı sistemleri için Çizelge 3’de ve düz çatı sistemleri için Çizelge 4’de verilmektedir. Burada sabit açılı değerleri 32-33°’dir. PVGIS veri analiz programı hesaplamalarda hem arazi hem de çatı sistemlerinde sıcaklık değişimlerine göre oluşacak kayıpları da vermektedir. Bu kayıplar tüm kampüslerde arazi sistemlerinde %5.8-%10.9 aralığında yer alırken eğimli çatı %9.3-%14.9 ve düz çatı sistemlerinde %9.1-%14.7 aralığındadır. Çatı sistemleri %4 kadar sıcaklık kayıplarına neden olmaktadır.

Yapılan analizlere göre elektrik üretim miktarları değerlendirildiğinde, mevsimsel değişiklikler, kış aylarının etkisi (sıcaklık, radyasyon, güneşlenme süresi) bir araya gelmesi, DEÜ yerleşkesinin enerji üretimi açısından diğer yerleşkelere göre daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. ZBEÜ’de ise enerji üretimi, yıllık güneş ışınım miktarına bağlı olarak en düşük seviyede kalmaktadır. Genel olarak, tüm üniversite yerleşkeleri için en yüksek enerji üretiminin değişken açılı arazi sisteminden elde edildiği görülmektedir. Ayrıca,

Çizelge 2. Arazi GES yıllık toplam üretim.

Yıllık Toplam Üretim (kWh)	Sabit Açılı	Aylık Açılı Değişimli	Yılda iki (30-45°) Açılı Değişimli
ZBEÜ	131 057.03	133 829.05	133 728.07
DÜ	149 758.93	153 461.11	153 349.93
OKAÜ	144 332.28	147 821.84	147 725.49
DEÜ	152 401.35	156 080.70	155 970.04
MÜ	138 574.62	141 633.63	141 538.38

Çizelge 3. Eğimli çatı GES yıllık toplam üretim.

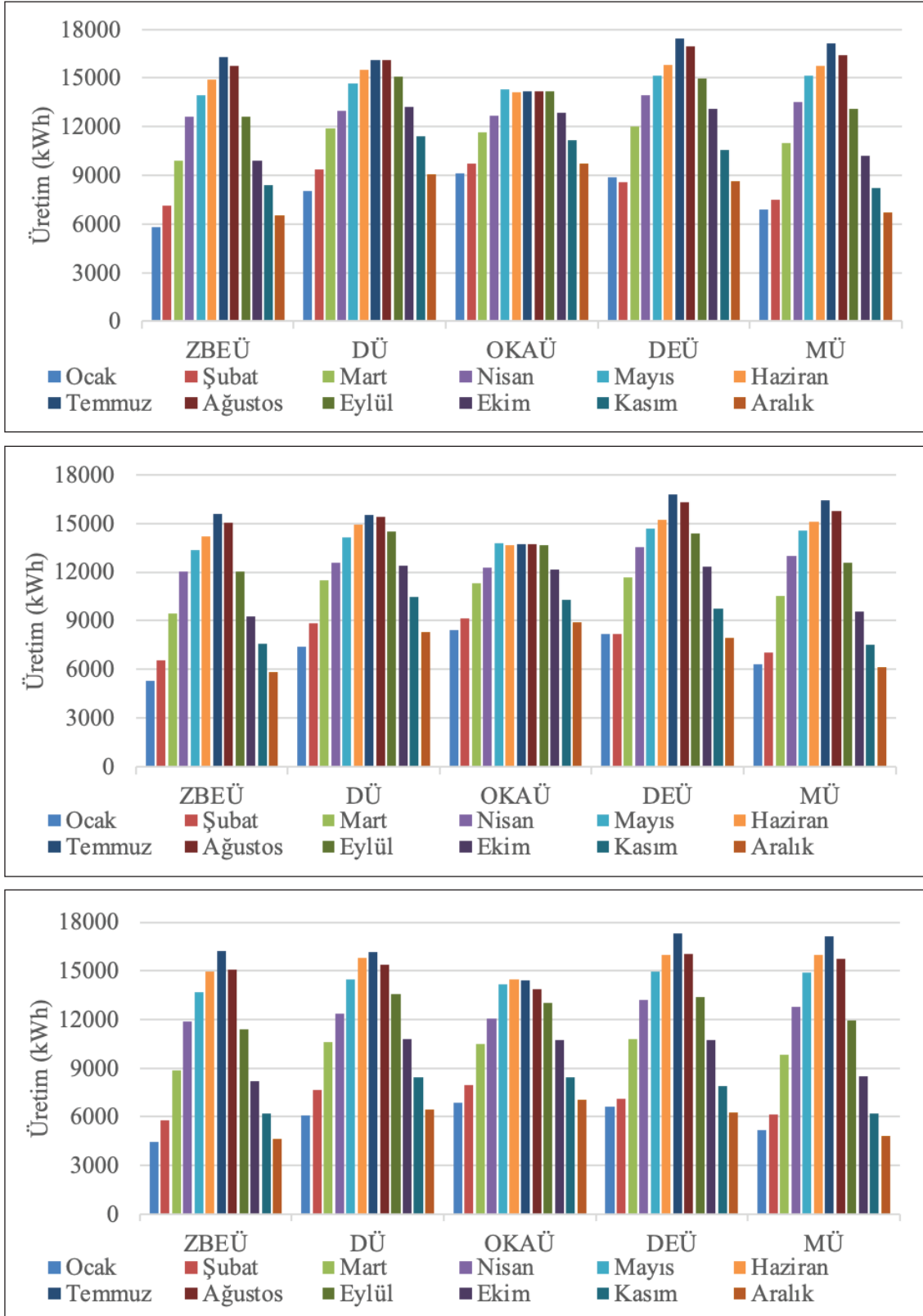
Yıllık Toplam Üretim (kWh)	Sabit Açılı	Aylık Açılı Değişimli	Yılda iki (30-35°) Açılı Değişimli
ZBEÜ	125 203.74	126 272.35	126 272.35
DÜ	144 481.25	145 923.01	145 923.01
OKAÜ	139 687.01	141 006.02	141 005.46
DEÜ	147 481.18	148 947.74	148 947.74
MÜ	133 341.40	134 546.39	134 546.39

Çizelge 4. Düz çatı GES yıllık toplam üretim.

Yıllık Toplam Üretim (kWh)	Sabit Açılı	Aylık Açılı Değişimli	Yılda iki (10-15°) Açılı Değişimli
ZBEÜ	121 206.77	121 339.91	121 325.91
DÜ	137 373.07	137 688.88	137 688.88
OKAÜ	133 188.45	133 433.86	133 433.86
DEÜ	140 039.08	140 373.73	140 373.73
MÜ	128 959.25	129 108.59	129 105.05

tüm yerleşkelerdeki üretim verilerine göre aylık açılı değişiminin yapılması durumunda en yüksek verimin elde edildiği gözlemlenecektir. Buna göre DEÜ arazisine aylık değişken açılı olarak kurulan sistemden, tüm senaryolar arasında 156 080.70 kWh’lik enerji üretim miktarı ile en yüksek değer elde edilmektedir.

Üretim değerlerine bağlı olarak maliyet hesaplamalarına göre ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nun (EPDK) belirlediği fiyat tarifesine (EPDK 2023) göre yapılan hesaplamalarda tüm kampüslerdeki yatırım maliyetlerini karşılama süreleri yıl bazlı Çizelge 5’de verilmektedir. Beklentiler üzerine DEÜ en kısa sürede yatırım maliyetini karşılayabil-



Şekil 9. Aylık ortalama enerji üretimi (kWh); aylık açılışimli arazi, eğimli çatı, düz çatı sistemleri.

mektedir. Arazi sistemleri için 6.27-7.40 yıl süre gerekirken çatı sistemlerinde 5.15-6.12 ve 5.89-6.72 yıl gerekmektedir.

Çizelge 5. GES yatırım maliyet geri kazanım süreleri(yıl).

Arazi	Sabit Aç	Aylık Aç Değişimli	Yılda iki (30-45°) Aç Değişimli
ZBEÜ	7.40	7.31	7.32
DÜ	6.47	6.38	6.38
OKAÜ	6.72	6.62	6.62
DEÜ	6.36	6.27	6.27
MÜ	7.00	6.91	6.91
Eğimli Çatı	Sabit Aç	Aylık Aç Değişimli	Yılda iki (30-35°) Aç Değişimli
ZBEÜ	6.12	6.07	6.07
DÜ	5.30	5.25	5.25
OKAÜ	5.49	5.44	5.44
DEÜ	5.20	5.15	5.15
MÜ	5.75	5.70	5.70
Düz Çatı	Sabit Aç	Aylık Aç Değişimli	Yılda iki (10-15°) Aç Değişimli
ZBEÜ	6.68	6.72	6.72
DÜ	5.89	5.92	5.92
OKAÜ	6.08	6.11	6.11
DEÜ	5.78	5.81	5.81
MÜ	6.28	6.32	6.32

Not etmek gerekir ki arazi ve eğimli çatı sistemlerinde güneş takip sistem kullanımı yatırım maliyet süresini azaltırken düz çatı için aynı sonuca varmak mümkün olmamaktadır. Ek olarak tek eksen aç değişimi ile sabit aç arazi sistemlerine göre %2.04-2.47, sabit açılı eğimli çatı sistemlerine göre %0.85-1.01 ve sabit açılı düz çat sistemlerine göre %0.11-0.24 oranında karşılaşılan üretimdeki artışı da uzun vadede iyi değerlendirmek gerekmektedir. Yaklaşık 25 yıl kullanım ömrü tavsiye edilen GES'ler için tek eksen değişimli sistemler ile yatırım maliyetleri baz alınarak sabit aç arazi sistemlerine göre %2.51-3.01, sabit aç eğimli çatı sistemlerine göre %1.13-1.27 ek kar elde edileceği hesaplanmaktadır. Düz çatı sistemlerinde pozitif yönde ek kar hesaplanamamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, beş farklı üniversite yerleşkesinde arazi, eğimli çatı ve düz çatı olmak üzere üç farklı 100 kW'lık güneş

enerjisi santralinin kurulum senaryosu değerlendirilmektedir. Her bir GES'de PV sistem aç değişimlerine bağlı olarak sabit aç, aylık aç değişimi, yılda iki aç değişimi durumları bağlı olarak üç farklı şekilde kıyaslanmaktadır. Üniversitelerin seçimi, belirtilen, güneş enerjisi ihtiyaç haritasına dayalı olarak belirlenmektedir. İlk olarak üniversite arazisine panel açılarının sabit ve değiştirilebilir olduğu senaryolarda kurulumlar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üniversite yerleşkelerinde bulunan binaların çatılarına güneş panelleri yerleştirilerek senaryolar tamamlanmıştır. Binaların çatılarına iki farklı şekilde kurulum yapılmıştır. Eğimli çatı ve düz çatı olarak sistem tasarımı planlanmıştır. Arazi ve eğimli çatı için oluşturulan senaryolarda panel açıları 30-45 derece aralığında olacak şekilde sonuçlar alınırken, düz çatı için aç değerleri 10-15 derece aralığında tutulmuştur. Sonuçlara göre panel açılarının; yıl boyunca sabit tutulması, verimin en yüksek olduğu üretim değerlerine göre aylık değiştirilmesi ve işçilik maliyetlerini düşürmek için yılda iki sefer değiştirilmesi gibi senaryolar oluşturularak değerlendirmeler yapılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre Dokuz Eylül Üniversitesi yerleşkesinin, enerji üretimi konusunda karşılaştırılan diğer yerleşkelere göre, daha önde olduğu görülmektedir. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesinin enerji üretim değerleri, sıcaklık koşulları olumlu olsa dahi yıllık güneşlenme süresine bağlı olarak, en düşük seviyede kalmıştır. Kurulum maliyetlerinden bağımsız bir değerlendirme yapacak olursak, tüm üniversite yerleşkeleri için en yüksek enerji üretim değerlerinin değişken açılı arazi sisteminden elde edildiği görülmektedir.

Yapılan çalışmalar ve karşılaştırmalar, üniversitelere kendi enerjilerini çevre dostu kaynaklar aracılığıyla üretmede yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır. Ayrıca bu çalışmanın Üniversitelerin imkanlarına ve beklentilerine bağlı olarak en uygun sistemin kurulumunda rehber olacağı değerlendirilmektedir. Çalışmanın devamında yapılan maliyet analizi ile bu çalışmanın kapsamı genişletilmiş olup arazi sistemleri ve eğimli çatı sistemleri sınırlar çerçevesinde ek kazanç sağlarken aynı durum düz çatı sistemlerinde yeterli seviyede olmadığı tespit edilmektedir. Örnek olarak kurulan 100 kW'lık sistemin kurulu gücü, ihtiyaca bağlı olarak arttırılabilir veya azaltılabilir. Ek olarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kampüs alanlarına kurulacak GES projelerinden elde edilecek gerçek zaman verilerine dayalı olarak enerji üretim analizlerinde kıyaslanma yapılması yönünde değerlendirilebilecektir. Bu çalışmanın, enerji dağıtımıyla ilgili mahsuplaşma süreçlerine yönelik detaylı proje çalışmalarına olanak tanıyabileceği değerlendirilmektedir.

Çıkar çatışması beyanı: Yazarlar bu çalışmada araştırma, yazarlık ve yayın için herhangi bir destek almamışlardır. Beyan edilen hiçbir çıkar çatışması veya ortak çıkar bulunmamaktadır.

Yazar katkısı: Yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuşlardır.

Etik kurul onayı: Bu çalışma etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

5. Kaynaklar

- Akkaya, S., Akkaya Oy, S. 2021.** Samsun, Bayburt ve Mersin İllerine Kurulabilecek Güneş Enerjisi Santrallerinin Model-lenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(2), 759-773. Doi: 10.29130/dubited.785908
- Bouabdallah, A., Bourguet, S., Olivier, J.C., Machmoum, M. 2013.** Photovoltaic energy for the fixed and tracking system based on the modeling of solar radiation. In IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1821-1826. Doi: 10.1109/IECON.2013.6699408
- Di Bari, A. 2020.** A real options approach to valuate solar energy investment with public authority incentives: the Italian case. Energies, 13(16): 4181. Doi: 10.3390/en13164181
- EPDK 2024.** Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları. <https://www.epdk.org.tr/>
- EPLEÜY 2019.** Elektrik Piyasasında Lisansız Elektrik Üretim Yönetmeliği <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190512-1.htm>
- Eroğlu, H. 2022.** Development of a novel solar energy need index for identifying priority investment regions: a case study and current status in Turkey. Environment, Development and Sustainability, 24: 8840-8855. Doi: 10.1007/s10668-021-01812-3
- ETPY 2014.** Elektrik Tesisleri Proje Yönetmeliği <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/12/20141230M1-2.htm>
- Güneş, S. 2024.** Enerji verimliliğine dayalı fotovoltaik güneş enerji santrali analizi ve tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 99 s.
- Handoyo, EA., Ichsani, D. 2013.** The optimal tilt angle of a solar collector. Energy Procedia, 32, 166-175. Doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.022
- Huld, T., Friesen, G., Skoczek, A., Kenny, RP., Sample, T., Field, M., Dunlop, ED. 2011.** A power-rating model for crystalline silicon PV modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(12), 3359-3369. Doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.026
- Huld, T., Amillo, AMG. 2015.** Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. Energies, 8, 5159-5181. Doi: 10.3390/en8065159
- Messenger, RA., Ventre, J. 2017.** Photovoltaic systems engineering, 4th ed., CRC Press, Boca Raton, USA, 504 pp.
- Obi, M., Bass, R. 2016.** Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 1082-1094. Doi: 10.1016/j.rser.2015.12.289
- PVGIS 2022.** Photovoltaic geographical information system (PVGIS) European Commission <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS>
- Sümerbaş, B., 2023.** Lisansız Üretim-Mahsuplaşma İşlemleri. VII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre Ve Sergisi, İzmir, Türkiye. https://www.emo.org.tr/ekler/b237575f5446b6f_ek.pdf
- Üney, MŞ., Çetinkaya, N. 2014.** Comparison of CO2 emissions fossil fuel based energy generation plants and plants with Renewable Energy Source. In Proceedings of the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Bucharest, Romania, 29-34. Doi: 10.1109/ECAI.2014.7090175.
- Wang, Z., Li, Y., Wang, K., Huang, Z. 2017.** Environment-adjusted operational performance evaluation of solar photovoltaic power plants: A three stage efficiency analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 1153-1162. Doi: 10.1016/j.rser.2017.03.119