



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.12.2024
Kabul Tarihi : 14.02.2025

Received Date : 02.12.2024
Accepted Date : 14.02.2025

FARKLI EĞİM VE AZİMUT AÇISI SENARYOLARI ALTINDA GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN ÜRETİM PERFORMANSLARININ ANALİZİ

ANALYSING THE GENERATION PERFORMANCE OF A SOLAR POWER PLANT UNDER DIFFERENT TILT AND AZIMUTH ANGLE SCENARIOS

Furkan DİNÇER^{1*} (ORCID: 0000-0001-6787-0850)

Emre ÖZER² (ORCID: 0000-0001-5881-2253)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Furkan Dincer, furkandincer@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, 14,82 kWp / 10 kWe gücündeki bir güneş enerji santralinin farklı eğim ve azimut açısı senaryoları altında üretim performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Santralin yıllık elektrik enerjisi üretimi bilgisayar destekli analiz programı kullanılarak hesaplanmıştır. İlgili mevzuatlar gereği; günün belirli saatlerinde üretilen güç, sözleşme gücünü aştığında şebekeye enerji verilmesi sınırlandırılmakta ve güç çıkışı kısıtlanmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmasında santralin panel kapasitesi elektrik bağlantı gücünden %48,2 daha yüksek olacak şekilde tasarlanmış ve farklı yüklenme senaryoları değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı eğim ve yönlendirme kombinasyonlarını içeren dokuz panel yerleşim senaryosu analiz edilmiştir. En uygun konfigürasyon, panellerin %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) yönlü yerleştirilmesi olarak belirlenmiş ve yıllık net 23.831 kWh elektrik enerjisi üretimi sağlanmıştır. Ayrıca, enerji üretiminin çevresel etkileri değerlendirilmiş ve en iyi senaryoda yılda 15,12 ton CO₂ salınımının önlendiği hesaplanmıştır. Bu çalışma, fotovoltaiik santrallerde panel yerleşim optimizasyonunun enerji üretim verimini artırmada ve güç kısıtlamalarını en aza indirmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaiik, panel yerleşimi, azimut, eğim, enerji üretim performansı

ABSTRACT

In this study, the production performance of a 14.82 kWp / 10 kWe solar power plant was analyzed in detail under different tilt and azimuth angle scenarios. The plant's annual electricity generation was calculated using a computer-aided analysis program. As per relevant regulations, when the generated power exceeds the contract power during certain hours of the day, energy injection into the grid is restricted, and the power output is limited. In the simulation study, the panel capacity of the plant was designed to be 48.2% higher than the electrical connection capacity, and different loading scenarios were evaluated. The study analyzed nine panel layout scenarios, considering various tilt and orientation combinations. The optimal configuration was determined as 10% of the panels facing east (10°), 10% facing west (10°), and 80% facing south (20°), resulting in an annual net electricity generation of 23,831 kWh. Additionally, the environmental impacts of energy production were assessed, and it was calculated that the best scenario prevents 15.12 tons of CO₂ emissions per year. This study highlights the critical role of panel placement optimization in photovoltaic power plants to enhance energy production efficiency and minimize power limitations.

Keywords: Photovoltaic, panel placement, azimuth, tilt, energy generation performance

GİRİŞ

ToCite: DİNÇER, F., & ÖZER, E., (2025). FARKLI EĞİM VE AZİMUT AÇISI SENARYOLARI ALTINDA GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN ÜRETİM PERFORMANSLARININ ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 644-659.

Dünya genelinde günden güne artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimine yönelik talep giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi yöntemleri içerisinde güneş enerjisi kaynağı önemli bir yer tutar. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi ise güneş panelleri (fotovoltaik paneller) ile üretilir. Ancak güneş panellerinin üreteceği elektrik enerjisi miktarı panel özellikleri, bulutluluk, tozluluk gibi çevresel faktörler, kurulum yeri özellikleri, panel eğimi ve panellerin yerleşim şekli gibi kuramsal birçok faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Boztepe, 2017; Ogundimu vd., 2019).

Güneş enerji santrallerinde sisteme sağlaması istenilen belli bir sınır güç değeri bulunmaktadır. Buna sözleşme gücü veya bağlantı anlaşma gücü de denilmektedir. Santral kurulumu yapılırken bağlantı anlaşma gücü baz alınarak belirli bir oranda da sözleşme gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklemesi yapılmaktadır. Çünkü, panelin elektrik enerjisi üretimi çevresel faktörlere göre değişmektedir. Bağlantı anlaşma gücü değerinin aşımında sistem, şebekenin dengesi ve güvenilirliği için kesime veya kıpmaya gider. Belirlenen sınır değer altında sistem enerji üretimine devam ederken bu değer aşımında kesintiye girerek ekipman ve şebeke üzerinde oluşabilecek sorunlar önlenir. İlgili dağıtım veya iletim şirketi ile de bağlantı anlaşma gücü üzerinden sözleşme yapılmaktadır. Bundan ötürü bu gücün aşılması durumunda santralin çeşitli yaptırımlara maruz kalması söz konusu olabilir. Bundan ötürü bağlantı anlaşma gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklemesi yapılan santrallerde yüklenme değeri önem arz etmektedir.

Güneş enerjisi santrallerinin veriminin artırılmasında panellerin eğim ve azimut değerinin optimal şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Literatürde panel eğim derecesi ve yönü (azimut açısı) üzerine birçok farklı çalışmalar mevcuttur (Hafez ve vd., 2019; Geliş vd., 2020). Atlım vd. (2019) Balıkesir ilinde güney yönlü farklı iki santralin panel açısından verimliliklerinin karşılaştırılması yapmıştır ve 29° de en yüksek verim elde edilmiştir. Yağlı ve Koç (2020), panel eğim açısının üretilen enerji miktarına etkisini Gaziantep bölgesi için incelemiş ve optimum açının 31° olduğunu belirtmiştir. En iyi eğim açısını sırasıyla Kaçan ve Ülgen (2012) İzmir için 30,3°, Koçer vd. (2016) Ankara için 34° ve Bakirci (2012) ise Erzurum için 34,3° olarak belirlemiştir. Çalışmalarda Türkiye genelinde en iyi eğim açısı 30° ile 34° arasında değişmektedir. Panel yerleşimi genellikle kuzey yarımkürede güneye yönünde yönlendirilmiştir (Rowlands vd., 2011). Arslan ve Çunkaş (2024), Konya’da kurdukları sistemle panelleri doğu-batı yönünde 0° ile 60° arasında 10 derecelik artışlarla hareket ettirerek sistem performansını incelemişlerdir. Optimum eğimi 32.08° olarak belirlemişlerdir. Hussein vd., (2004), Kahire için en iyi eğim açısı ve yönelimi panellerin güneye yönlü ve 20°-30° arası olduğu durumda elde etmiştir. Ayrıca Dünya genelinde farklı lokasyonlar için eğim ve azimut açısı değişiminin fotovoltaik modüllerinin yüzeyine düşen ışıma dolayısıyla enerji üretimine etkisini araştıran yakın zamanlı birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu kapsamda Çin (Lu & Qin, 2024), İtalya ve Fransa (Memme ve Fossa, 2022), Uganda (Mukisa ve Zamora, 2022), kuzey yarımkürede yer alan Kolombiya, Tayland Meksika, Pakistan, Mısır, İspanya Kanada, Avusturya, Almanya ve Finlandiya ülkelerinde yer alan on farklı şehrin (Barbón vd., 2022) incelendiği araştırmalar dikkat çekicidir.

Türkiye jeopolitik konumu itibarıyla güneşten elektrik enerjisi elde etme potansiyeli yüksek bir ülkedir (Dincer ve Ozer, 2023). Güneş enerjisiyle elektrik enerjisi üretimi Haziran 2022 sonu itibarıyla 8.479 MW kurulu güce ulaşmış ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı %8,35 e gelmiştir (ETKB, 2024a). Doğu Akdeniz’de yer alan Kahramanmaraş ili de, bu çalışmada referans lokasyon olarak seçilmiştir ki yüksek enerji potansiyeline sahiptir (Yılmaz vd., 2015). Bu nedenle Kahramanmaraş’ta fotovoltaik yatırımlar giderek daha fazla ilgi görmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayınlanan aylık elektrik piyasası sektör raporuna göre 2024 yılı Eylül ayı itibarıyla Türkiye’ de toplam lisanslı elektrik kurulu gücü 96.548,15 MW olup, Kahramanmaraş ili 4.411,92 MW ile bu üretimin % 4,57 ’lik kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca 2024 Eylül sonu itibarıyla 17.666,97 MW lisanssız elektrik kurulu gücünün % 96,02’si güneş kaynaklı olup Kahramanmaraş ili özelinde de güneş kaynaklı 501,53 MW lisanssız üretim gerçekleşmektedir (EPDK, 2024).

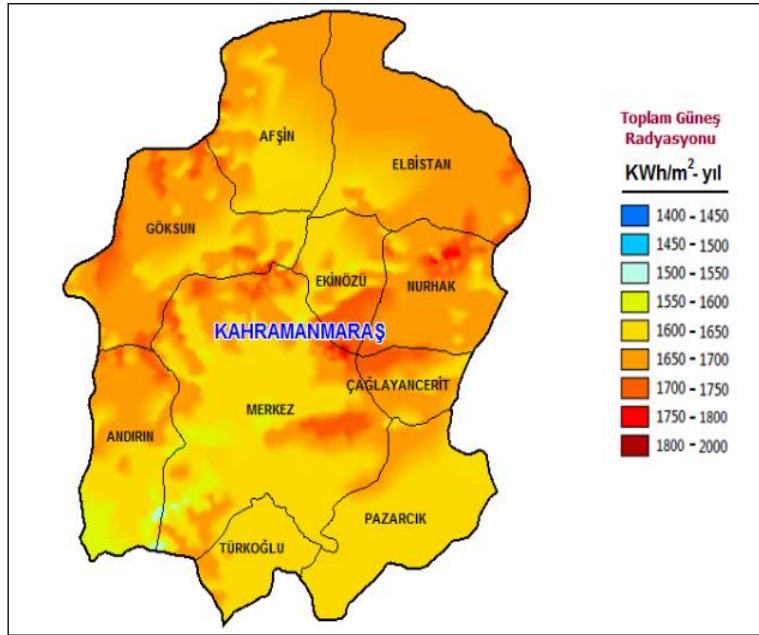
Güneş enerjisi santralleri kurulmadan önce kurulacak sistemlerinin simülasyon programları yardımıyla bilgisayar destekli analizinin yapılması zaman ve maliyet tasarrufunun yanı sıra olası hataların da minimize edilmesi sağlanır. Çünkü, fotovoltaik panel yüklemeleri belirlenirken detaylı bir analiz yapılmamaktadır. Çevresel faktörlere göre üretilen elektrik enerjisi bağlantı anlaşma gücü değerinde limitlenmekte ve limit üstü üretilen elektrik enerjisi boşa gitmektedir. Dolayısı ile fotovoltaik panel yüklenme değerleri optimum ölçüde belirlenmelidir. Bu çalışmada, Kahramanmaraş ilinde kurulacak bir santralin bağlantı anlaşma gücünün üzerinde yüklü durumda iken optimum panel yönelimi ve açısının belirlenmesi ile birlikte farklı üretim senaryoları detaylı olarak analiz edilmiştir. Gelecekte kurulacak güneş enerjisi santrallerinin fotovoltaik panel yüklenme değerleri konusunda önemli bir rol taşımaktadır. Bu çalışmanın literatüre olan ana katkısı, 14,82 kWp / 10 kWe kapasiteli bir güneş enerji santrali için farklı eğim ve azimut açısı senaryolarının analiz edilerek en verimli panel yerleşiminin belirlenmesi olmuştur. %10 doğu (10°), %10

batı (10°) ve %80 güney (20°) yönlendirme ile yıllık net 23.831 kWh enerji üretildiği gösterilmiştir. Panel yüklenme oranlarının enerji üretimi ve şebeke entegrasyonu üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiş, bağlantı anlaşıma gücünü aşan üretim nedeniyle oluşan enerji kayıpları belirlenerek optimum sistem tasarımı önerilmiştir. Ayrıca, en iyi panel yerleşimi ile yıllık 15,12 ton CO₂ salınımının önlenebileceği hesaplanarak çevresel etkiler ortaya konmuştur. Huawei FusionSolar analiz programı (Fusionsolar, 2025) kullanılarak yapılan bilgisayar destekli performans değerlendirmesi, fotovoltaiik santrallerin daha verimli tasarlanmasına ve güç kısıtlamalarının minimize edilmesine yönelik bilimsel bir rehber sunmaktadır. Bu bulgular, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu gibi yüksek güneş potansiyeline sahip bölgelerde santral tasarımına katkı sağlayacaktır.

Bu makale çalışması giriş, materyal ve metot, bulgular ve tartışma, sonuç ve öneriler bölümlerinden meydana gelmektedir. Çalışmanın materyal ve metot bölümünde, kullanılan simülasyon analiz programı, meteorolojik veriler ve panel yerleşim senaryoları detaylandırılmıştır. Bulgular ve tartışma bölümünde, farklı panel yönlendirme ve yüklenme oranlarının elektrik enerjisi üretimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmış, bağlantı anlaşıma gücünün aşılması durumunda oluşan enerji kayıpları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en verimli senaryo olarak %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) konfigürasyonunun yıllık net 23.831 kWh elektrik enerjisi üretimi sağladığı belirlenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde, optimum panel yerleşimi için yönlendirme stratejileri sunulmuş, karbon salınımının azaltılmasına yönelik çevresel katkılar vurgulanmış ve gelecekteki saha uygulamaları için önerilerde bulunulmuştur.

MATERYEL VE METOT

Bu çalışmada, analizlerin gerçekleştirileceği lokasyon olarak Kahramanmaraş ili tercih edilmiştir. Analizler, Huawei FusionSolar programında gerçekleştirilmiştir (Fusionsolar, 2025). Bilgisayar destekli analizlerin yapılabilmesi için belirli bir lokasyonun seçilmesi gerekmektedir. Kahramanmaraş, Türkiye'nin güneyinde ve Akdeniz bölgesinin doğusunda yer alır. Bu sebeple yaz aylarında ortalama 27,2 °C ile hava sıcak ve kurak, kış aylarında ise 5,9°C ile soğuk ve nemlidir. En yüksek ve en düşük sıcaklık sırasıyla 14 Ağustos 2023 te 47,2 °C ve 6 Şubat 1997' de sıfırın altında 9,6 °C olarak ölçülmüştür (MGM, 2024). Tablo 1'de görüleceği üzere Kahramanmaraş ili özellikle yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) ortalama günlük 6,53 kWh/m² radyasyon ve 11,66 saat güneşlenme süresi ile yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Kahramanmaraş iline ait Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan yıllık toplam güneş radyasyonu bilgisini içeren Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası Şekil 1'de gösterilmiştir (GEPA, 2024).



Şekil 1. Kahramanmaraş Toplam Güneş Işınım Radyasyonu Dağılımı Atlası (GEPA, 2024)

Tablo 1. Kahramanmaraş İli Aylık Global Radyasyon Değerleri ve Güneşlenme Süreleri (GEPA, 2024)

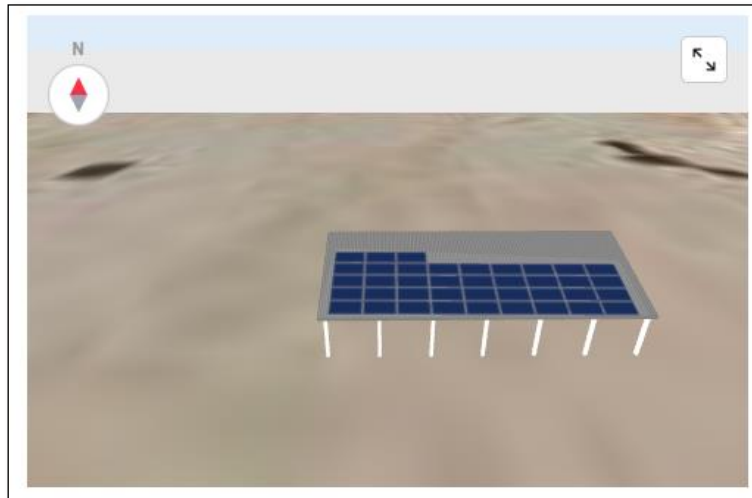
Aylar	Global Radyasyon Değerleri (kWh/m ² -gün)	Güneşlenme Süreleri (Saat)
Ocak	1,99	4,21
Şubat	2,58	5,47
Mart	4,17	6,61
Nisan	5,09	7,85
Mayıs	6,29	9,57
Haziran	6,81	11,49
Temmuz	6,77	12,07
Ağustos	6,00	11,43
Eylül	5,06	10,13
Ekim	3,78	7,55
Kasım	2,40	5,56
Aralık	1,81	3,86

Bu çalışmada, güneş enerjisi santralinin farklı eğim ve azimut açıları altındaki üretim performansını analiz etmek için bilgisayar destekli analiz gerçekleştirilmiştir. Huawei FusionSolar, Huawei tarafından geliştirilen bir güneş enerjisi yönetim ve simülasyon platformu olup, fotovoltaik sistemlerin tasarım, izleme, performans analizi ve yönetimi için kapsamlı çözümler sunmaktadır. Çalışmada, bu yazılım aracılığıyla farklı panel eğim ve yönlendirme senaryoları simüle edilmiştir. Yıllık elektrik enerjisi üretim tahminleri hesaplanmış ve en verimli panel konfigürasyonu belirlenmiştir. Ayrıca, santral tasarımında enerji kayıplarının analizi yapılmış, güç çıkışını optimize etmek için çeşitli yüklenme oranları test edilmiştir (Fusionsolar, 2025).

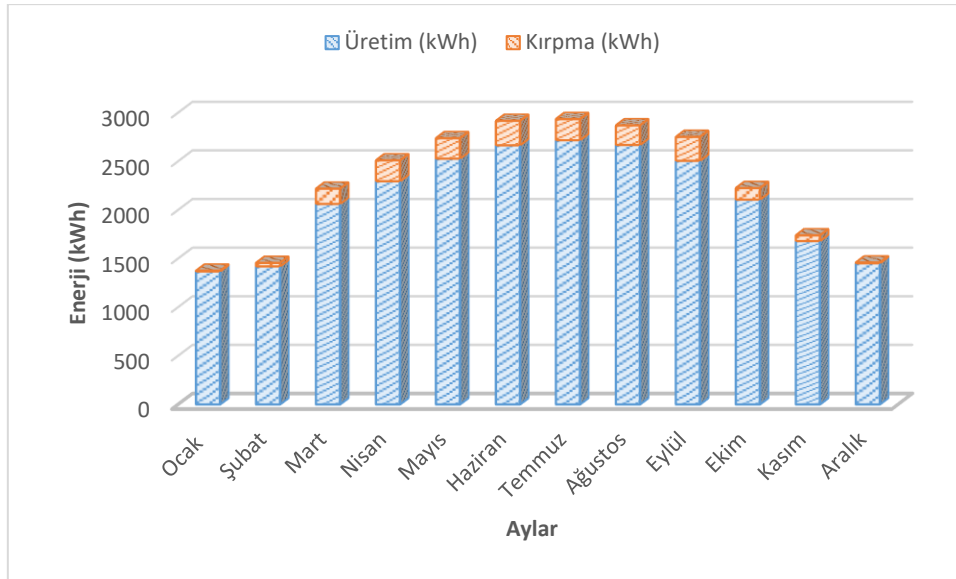
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı panel yerleşimleri ve yüklenme oranları altında elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Tüm elektrik enerjisi üretim senaryolarında, sistemin %48,2 oranında yüklü olduğu; yani daha yüksek elektrik enerjisi üretimi durumunda şebekeye enerji verilemediği ve güç çıkışının sınırlandırıldığı kabul edilmiştir.

İlk senaryoda Şekil 2’de görüldüğü gibi panellerin tamamı 20° açıyla güneye bakmaktadır. Bu yerleşim senaryosunda 25.463 kWh elektrik enerjisi üretimine karşılık 1.724 kWh enerji kırılmaktadır ve sonuç olarak net 23.739 kWh enerji üretilmektedir. Aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları Şekil 3 (a)’ da grafik ve (b)’ de tablo halinde verilmiştir.



Şekil 2. Bütün Paneller (%100) Güney Yüklenmede



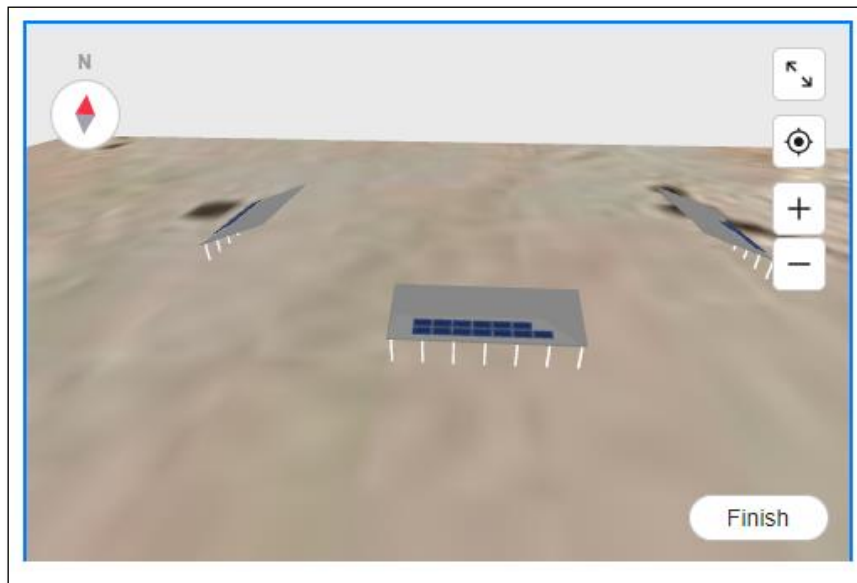
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1367	1419	2062	2295	2527	2665	2717	2668	2505	2106	1680	1452	25.463	
Kırpma (kWh)	7,8	36,4	156	214,5	210,6	250,9	217,1	201,5	245,7	118,3	58,5	6,5	1.724	6,770

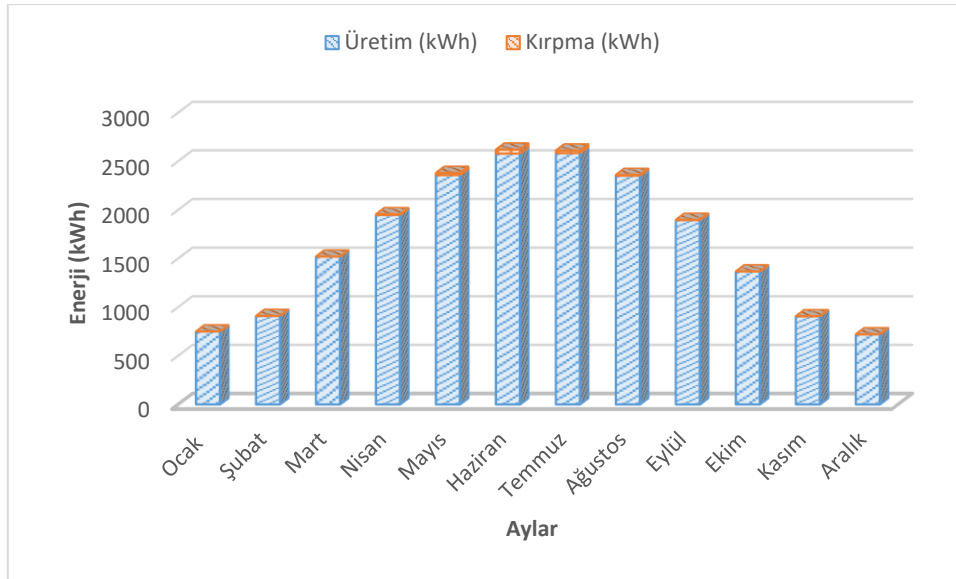
(b)

Şekil 3. %100 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

İkinci senaryo panellerin doğu, batı ve güney cephelere bakacak şekilde ve 3 yönde de eşit yüklendiği durum göz önüne alınmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi 20° açıyla paneller % 33'ü doğu, % 33'ü batı ve % 33'ü güney yüklenmede olacak şekilde sahaya yerleştirilmiştir. Yıllık net 19.781 kWh enerji üretilmektedir. Şekil 5'te grafik ve tablo halinde aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 4. % 33 Doğu , % 33 Batı ve % 33 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



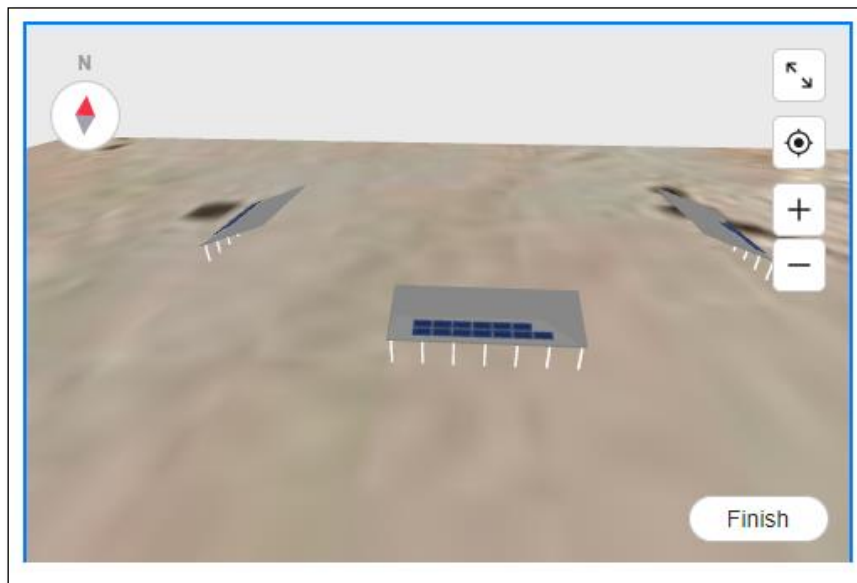
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	750	909	1520	1948	2358	2579	2584	2352	1895	1367	906	720	19.888	
Kırpma (kWh)	0	0	0	7	22	41	26	8	3	0	0	0	107	0,538

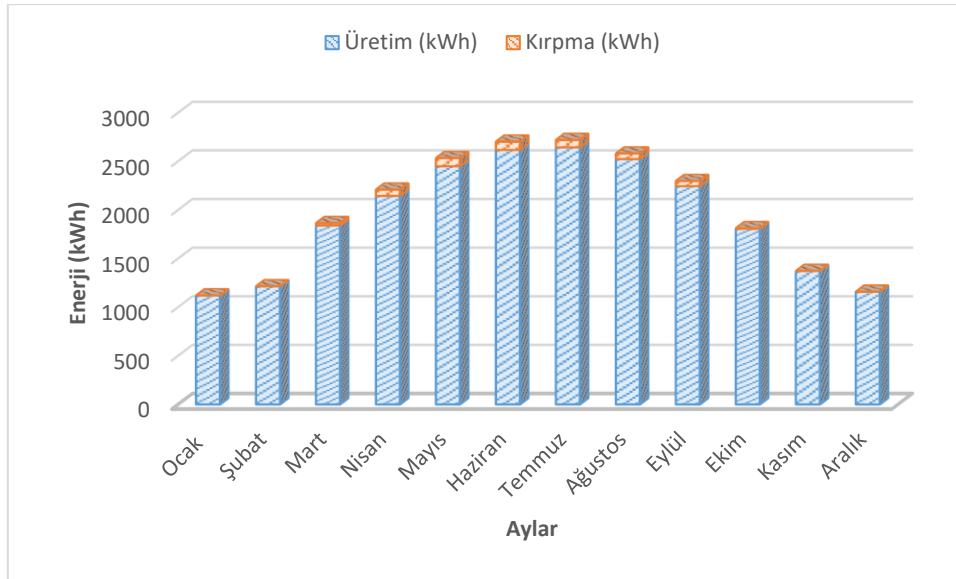
(b)

Şekil 5. % 33 Doğu , % 33 Batı ve % 33 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Üçüncü senaryoda panellerin yarısının güney yönlü yüklenmede, kalanların doğu ve batı eşit yüklenmede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi paneller 20° açıyla %25 Doğu, %25 Batı ve %50 Güney yüklenme şeklinde yerleştirilmiştir. Bu senaryoda yıllık toplam 22.687 kWh net enerji üretilmektedir. Şekil 7'de grafik ve tablo halinde aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 6. % 25 Doğu ,% 25 Batı ve % 50 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



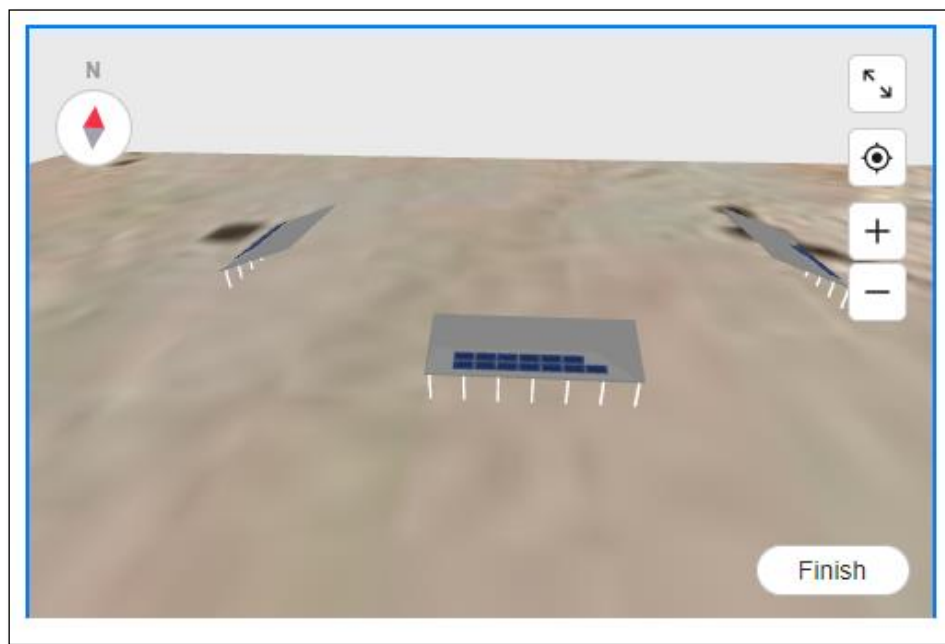
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1120	1214	1840	2145	2449	2617	2644	2524	2244	1806	1372	1159	23.134	
Kırpma (kWh)	0	0	24	64	84	85	75	56	53	6	0	0	447	1,932

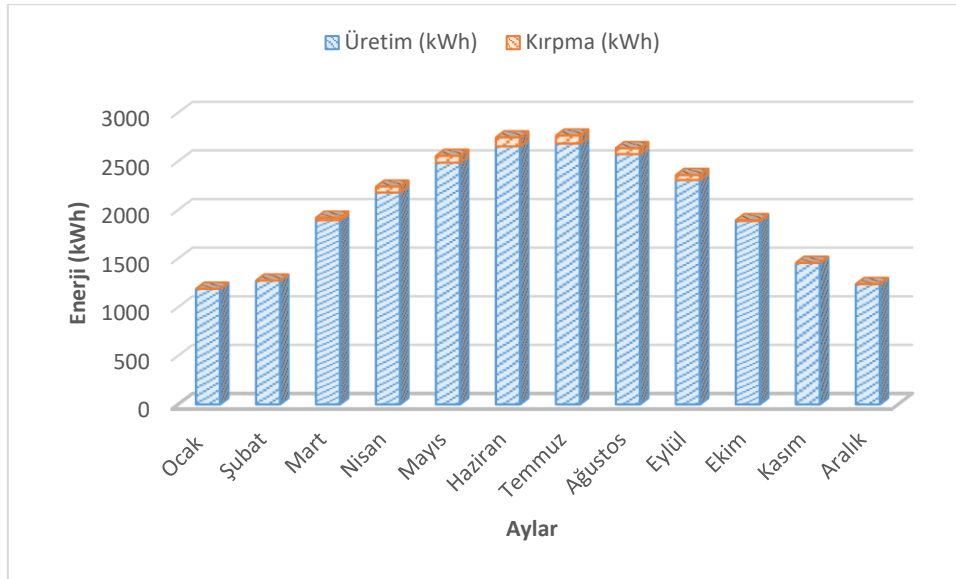
(b)

Şekil 7. % 25 Doğu ,% 25 Batı ve % 50 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Dördüncü senaryoda Şekil 8’de görüldüğü gibi paneller % 20 doğu, % 20 batı ve % 60 güney yüklenme altında 20° açıyla yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.374 kWh’dır. Şekil 9’da bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 8. % 20 Doğu ,% 20 Batı ve % 60 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



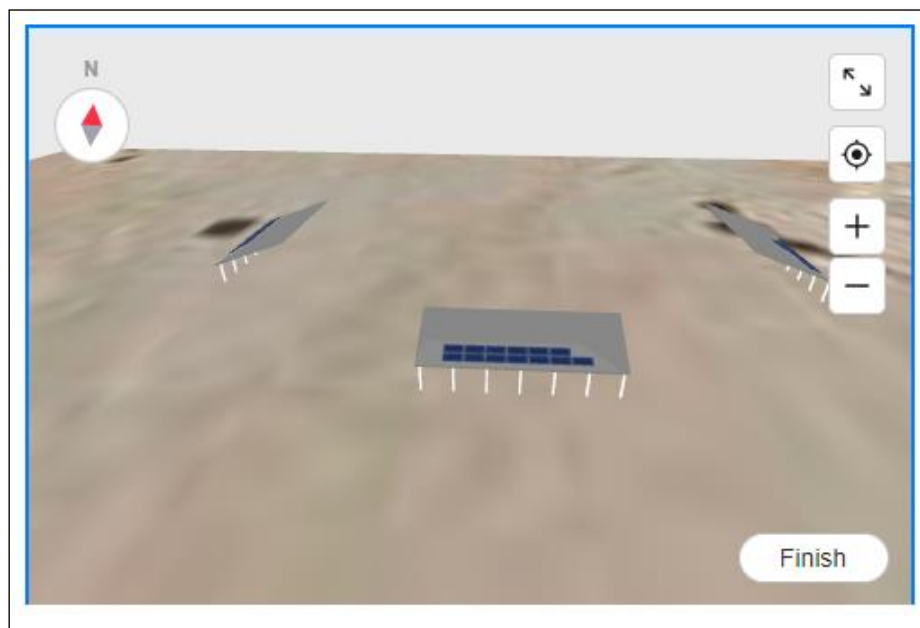
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1188	1273	1895	2179	2486	2654	2683	2574	2308	1886	1455	1237	23.818	
Kırpma (kWh)	0	0	24	60	70	91	81	60	50	8	0	0	444	1,864

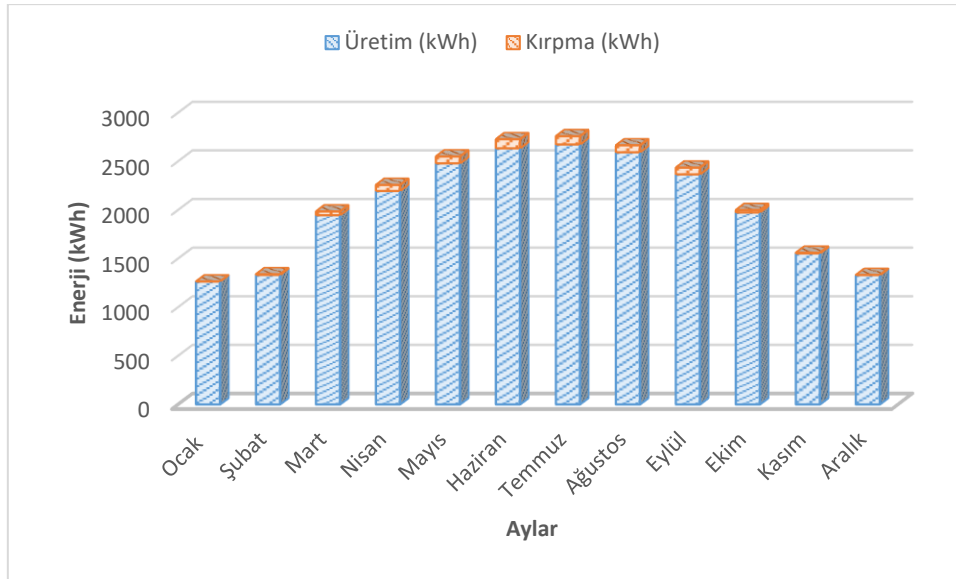
(b)

Şekil 9. % 20 Doğu ,% 20 Batı ve % 60 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Beşinci senaryoda paneller % 10 doğu, % 10 batı, % 80 güney yüklenmede şeklinde 20° açıyla Şekil 10'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.813 kWh'dır. Şekil 11'de bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 10. % 10 Doğu ,% 10 Batı ve % 80 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



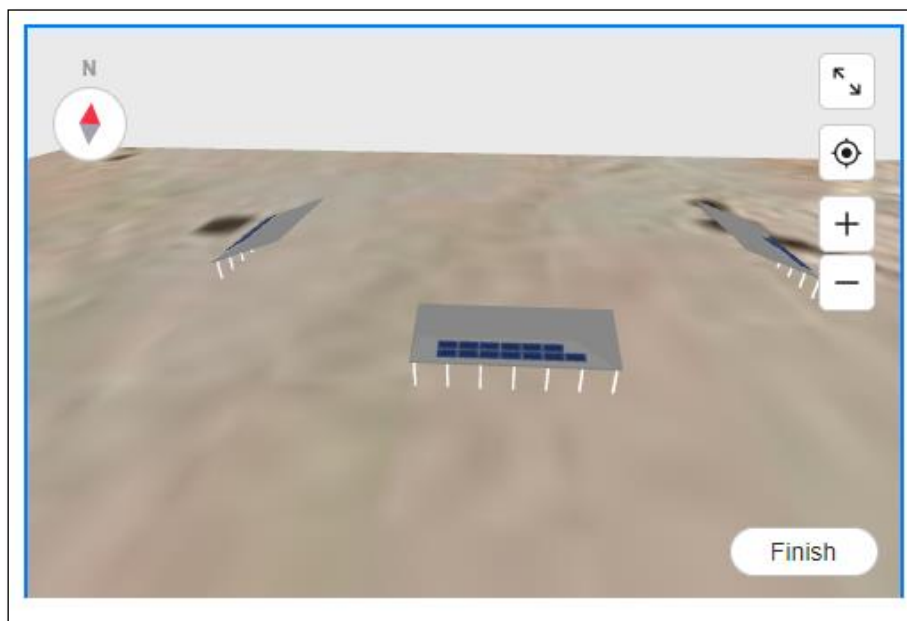
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1264	1332	1946	2195	2479	2634	2673	2593	2366	1974	1553	1330	24.339	
Kırpma (kWh)	0	6	38	62	71	93	85	71	69	25	6	0	526	2,161

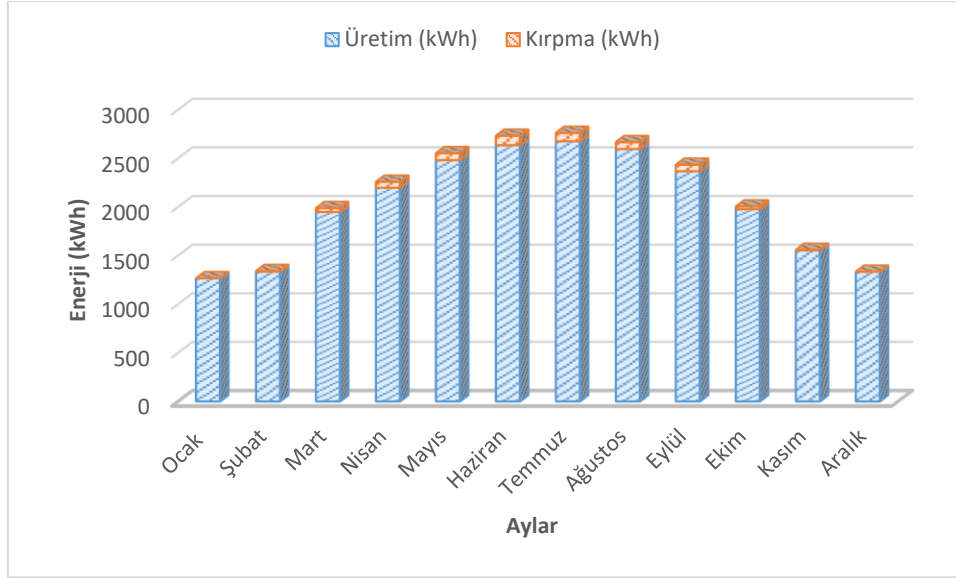
(b)

Şekil 11. % 10 Doğu ,% 10 Batı ve % 80 Güney Yönlü Panel Yerleşiminde Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Altıncı senaryoda paneller 10° açıyla % 10 doğu, % 10 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 80 güney yüklenmede şeklinde Şekil 12’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.831 kWh’dır. Şekil 13’te bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 12. % 10 Doğu (10°), % 10 Batı (10°) ve % 80 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



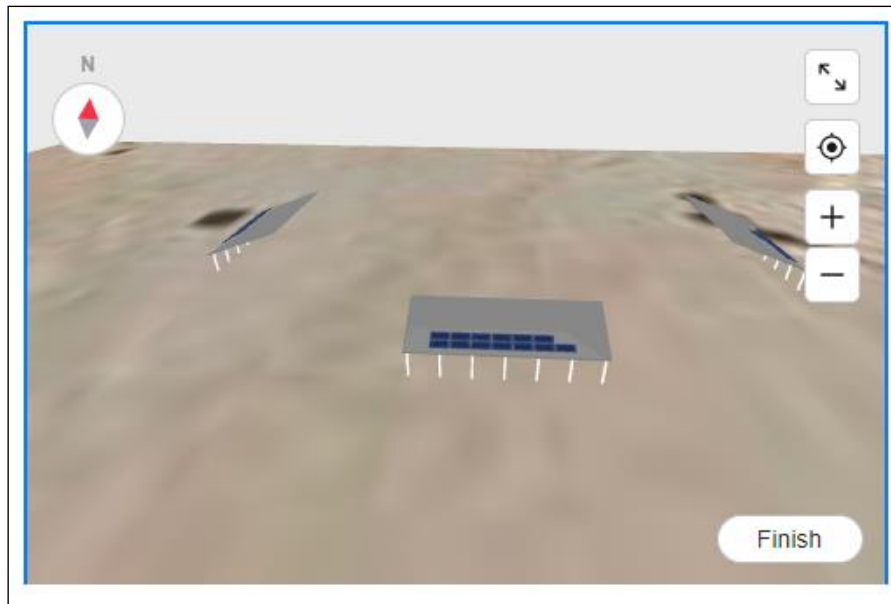
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1266	1334	1948	2197	2482	2635	2675	2595	2367	1976	1553	1333	24.361	
Kırpma (kWh)	0	6	40	61	70	96	86	71	67	28	5	0	530	2,176

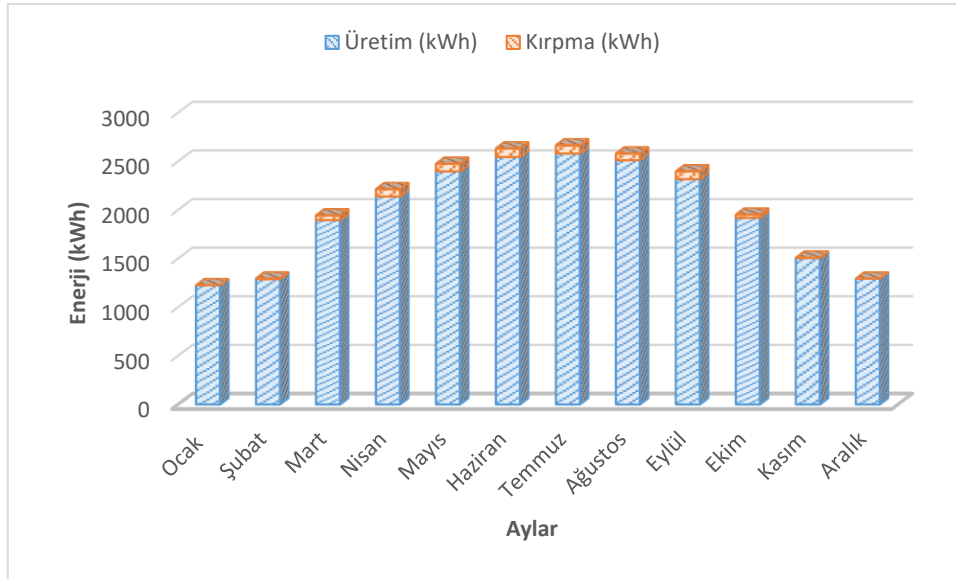
(b)

Şekil 13. % 10 Doğu (10°), % 10 Batı (10°) ve % 80 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Yedinci senaryoda paneller 10° açıyla % 7,5 doğu, % 7,5 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 85 güney yüklenmede olacak şekilde Şekil 14'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Böylece, 6. senaryoda kıyasla doğu ve batı yönlü panel yüklenmesinin %2,5 oranında azaltılmasının etkileri araştırılmıştır. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.046 kWh'dır. Şekil 15'te bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir. Ancak, doğu ve batı yönlü panel yüklenmesinin %10'un altına düşürülmesi enerji üretimine olan katkıyı azalttığı için önerilmemektedir.



Şekil 14. % 7,5 Doğu (10°), % 7,5 Batı (10°) ve % 85 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



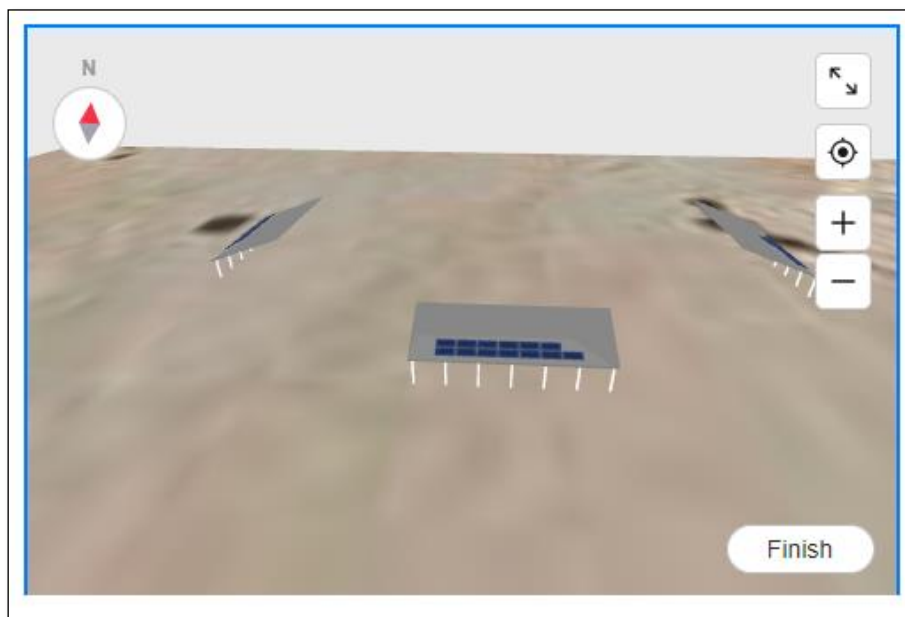
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1225	1288	1895	2138	2396	2544	2580	2511	2316	1919	1505	1293	23.610	
Kırpma (kWh)	0	6	48	75	79	88	84	69	80	32	3	0	564	2,389

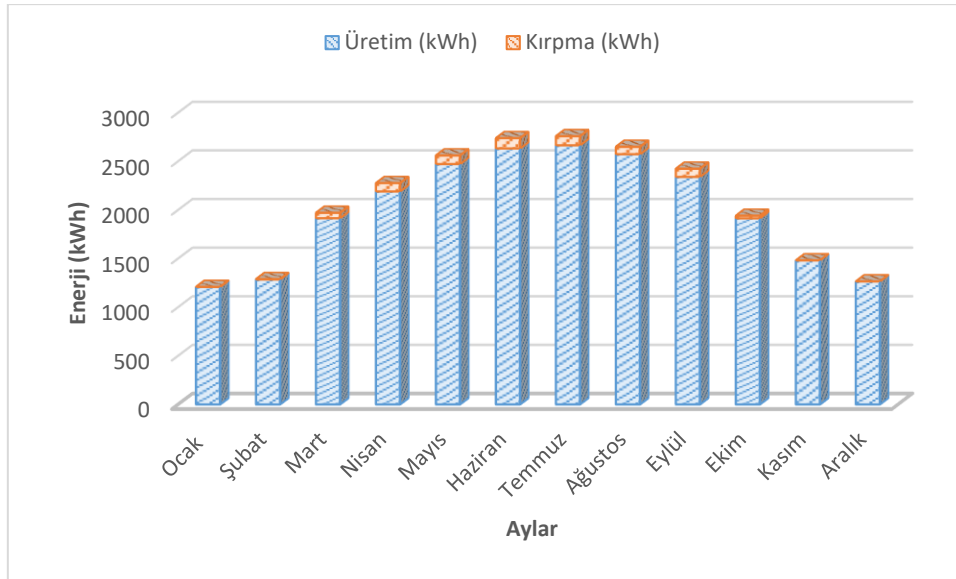
(b)

Şekil 15. % 7,5 Doğu (10°), % 7,5 Batı (10°) ve % 85 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Sekizinci senaryoda paneller 10° açıyla % 15 doğu, % 15 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 70 güney yüklenmede şeklinde Şekil 16'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.323 kWh'dır. Şekil 17'de bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 16. % 15 Doğu (10°), % 15 Batı (10°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



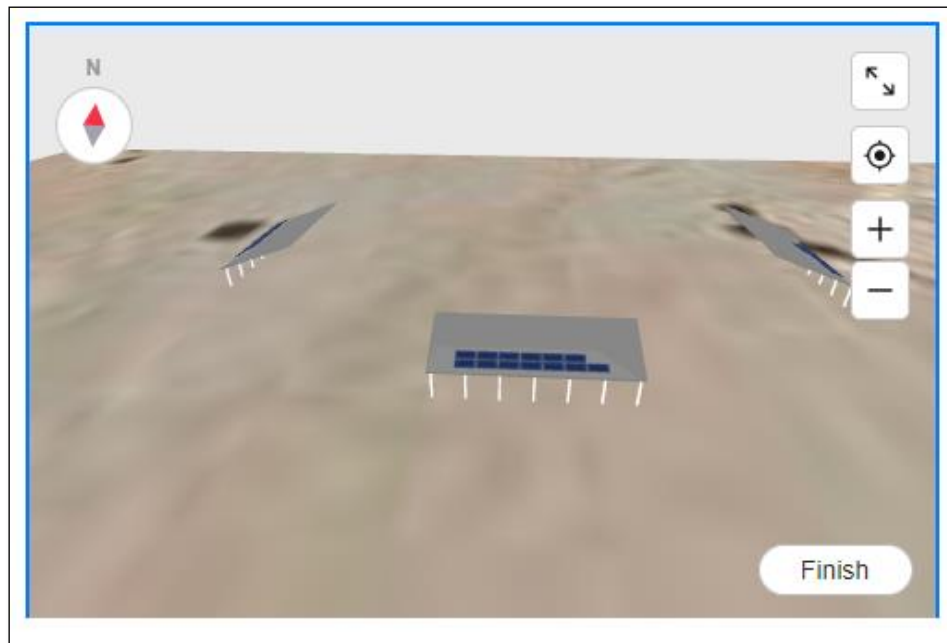
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1208	1285	1915	2190	2472	2632	2665	2573	2340	1914	1481	1265	23.940	
Kırpma (kWh)	0	3	55	86	88	106	93	76	84	26	0	0	617	2,577

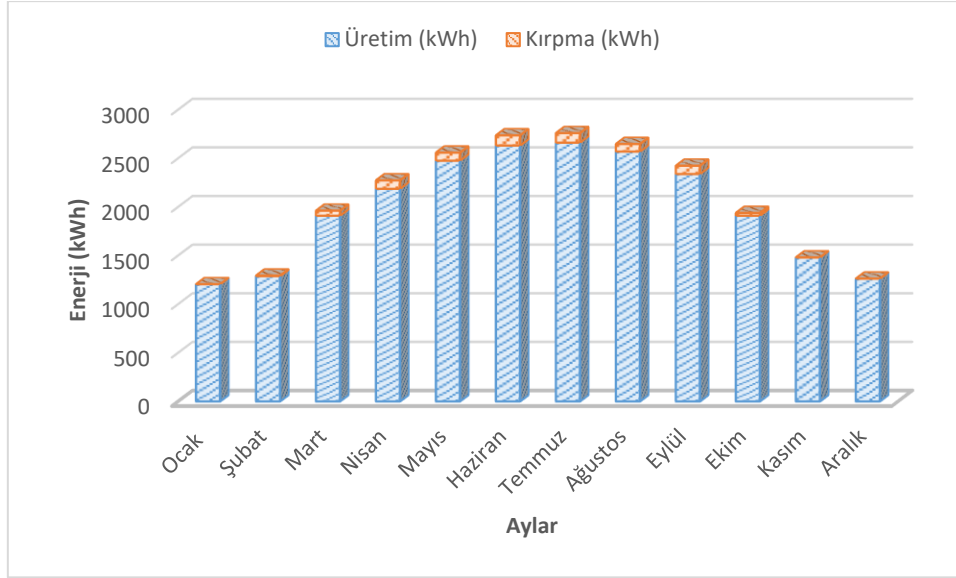
(b)

Şekil 17. % 15 Doğu (10°), % 15 Batı (10°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Son olarak dokuzuncu senaryoda paneller 20° açıyla % 15 doğu, % 15 batı ve % 70 güney yüklenmede Şekil 18’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen toplam enerji 23.298 kWh’dır. Şekil 19’da bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 18. % 15 Doğu (20°), % 15 Batı (20°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1205	1288	1910	2187	2467	2631	2661	2569	2338	1910	1480	1262	23.908	
Kırpma (kWh)	0	5	51	86	82	105	98	78	86	28	0		619	2,589

(b)

Şekil 19. % 15 Doğu (20°), % 15 Batı (20°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

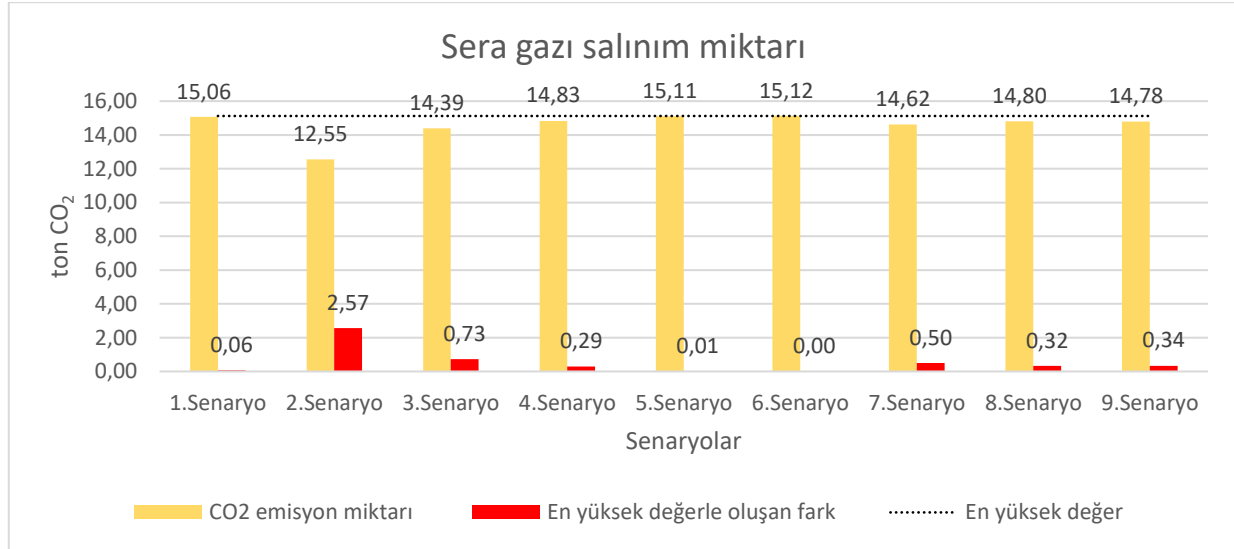
Tablo 2’de farklı panel eğimi, yönü ve yüklenme oranı için üretilen elektrik enerjisi miktarları ve karşılaştırması sunulmuştur. Sonuçlar, tüm panellerin sadece güneye yönlendirilmesinin (Senaryo 1) her zaman en yüksek enerji üretimini garanti etmediğini göstermektedir. En yüksek net enerji üretimi, %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) yönelimli paneller ile 23.831 kWh olarak elde edilmiştir (Senaryo 6). Bu bulgu, güneşin gün doğumu ve gün batımındaki ışınımından daha iyi yararlanmak için doğu ve batı yönlü panel kullanımının belirli oranlarda dahil edilmesi gerektiğini göstermektedir. Yalnızca güneye yönlendirilmiş panellerin (Senaryo 1) üretimi 23.739 kWh ile üçüncü sırada yer alırken, doğu-batı ve güney yönlerine eşit dağılımla tasarlanan sistem (Senaryo 2) 19.781 kWh ile en düşük üretimi sağlamıştır.

Bu sonuçlar, güneş enerji santrallerinin tasarımında yüklenme oranlarının dikkatlice belirlenmesi gerektiğini ve panellerin yalnızca tek bir yöne yönlendirilmesinin en verimli seçenek olmayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, optimum enerji üretimi için doğu ve batı yönelimli panellerin %10-15 oranında kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, bağlantı anlaşıma gücü üzerindeki yüklenme nedeniyle şebekeye verilemeyen enerjinin (kırılan enerji) minimize edilmesi için stratejik panel yerleşiminin kritik olduğu görülmüştür. Bu çalışma, güneş enerji santrallerinde panel yönlendirme stratejilerinin enerji üretim verimliliğini doğrudan etkilediğini ve en uygun konfigürasyonların belirlenmesinin ekonomik ve çevresel katkılar sağlayacağını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Farklı Panel Eğimi, Yönü ve Yüklenme Oranı için Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarları ve Karşılaştırması

Senaryo	Panel Yüklenme Oranı	Panel Yönü Ve Açısı	Üretilen Enerji	Sıralama
1	% 100	Güney (20°)	23.739 kWh	3
2	% 33 , % 33 ,% 33	Doğu (20°), Batı (20°), Güney (20°)	19.781 kWh	9
3	% 25 , % 25 ,% 50	Doğu (20°), Batı (20°), Güney (20°)	22.687 kWh	8
4	% 20 , % 20 ,% 60	Doğu (20°), Batı (20°), Güney (20°)	23.374 kWh	4
5	% 10 , % 10 ,% 80	Doğu (20°), Batı (20°), Güney (20°)	23.813 kWh	2
6	% 10 , % 10 ,% 80	Doğu (10°), Batı (10°), Güney (20°)	23.831 kWh	1
7	% 7,5 , % 7,5 ,% 85	Doğu (10°), Batı (10°), Güney (20°)	23.046 kWh	7
8	% 15 , % 15 ,% 70	Doğu (10°), Batı (10°), Güney (20°)	23.323 kWh	5
9	% 15 , % 15 ,% 70	Doğu (20°), Batı (20°), Güney (20°)	23.298 kWh	6

Ayrıca, bilindiği üzere yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretimi sera gazı salınımının azaltılmasında önemli rol oynar. Sera gazı salınım miktarı ise birleşik marj emisyon faktörü değeriyle hesaplanabilir. Bu değer güneş için 0,6345 tCO₂/MWh olup güneş santralleri tarafından üretilen her 1 MWh'lik elektrik için 0,6345 ton CO₂ emisyonundan kaçınıldığını ifade eder (ETKB, 2024b). Buna göre en iyi senaryoda güneşten üretilen 23.831 kWh elektrik enerjisiyle 15,12 ton CO₂ salınımı engellenir. Şekil 20'de tüm senaryolar için CO₂ salınım miktarları ve en iyi senaryo ile aradaki fark gösterilmiştir. Buna göre en iyi senaryoda, en kötü senaryoya kıyasla 2,57 ton daha fazla CO₂ salınım engellenir.

**Şekil 20.** Sera Gazı Salınım Miktarları

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerji santrallerinde panellerin yerleşim yönü, eğimi ve bağlantı anlaşıma güçlerine göre yüklenme oranı elektrik enerjisi üretimini etkileyen önemli etmenlerdir. Bu çalışmada, bu önemli kriterlerin etkisine detaylı olarak odaklanılmıştır. Panellerin tamamının tek yönlü yerleşimi yani güney yöne bakması enerji üretiminin en yüksek olacağını garantilemez. En önemli hususlardan biri de budur. Normal şartlarda uygulamada paneller tamamen güney yönünde olacak şekilde rastgele panel yüklenme oranları belirlenmektedir. Panellerin en yüksek ışınlamı alacağı temel yön olan güney yönünden uzaklaşmak ve farklı yükleme oranları altında Senaryo 2'de görüleceği gibi elektrik enerjisi üretimini ciddi miktarda düşürmüştür. Bu sebeple, panellerin büyük çoğunluğu güney yönlü yerleştirilmelidir. Panellerin güneşin doğumu ve batımında daha yoğun ışımaya maruz kalacağı dolayısıyla enerji üretimine katkı

sağladığı durum olan panellerin doğu-batı yerleşiminde %10 ile %20 arasında yükleme oranı belirlenmesinin enerji üretimine olumlu katkı sağladığı gözlenmiştir. Panellerin eğiminin azalması üzerlerine düşen ışımanın artmasına dolayısıyla elektrik enerjisi üretiminin artmasını sağlamaktadır. Dolayısı ile bağlantı anlaşıma gücü üzerinde fotovoltaiik panel yüklemesi yapılırken sadece güney yönünde değil, belirli bir oranın üzerinde fotovoltaiik panel yüklenmelerinde ek olarak sadece doğu ve batı şeklinde de yüklenmeler göz önünde bulundurulmalıdır. Neticede, güneş enerjisi santralleri gün doğumu ile elektrik enerjisi üretimine başlarken, öğle vakitlerinde en yüksek üretim, demand, değerine, gün batımına doğru ise düşerek bir çan eğrisi şeklinde elektrik enerjisi üretimi yapmaktadırlar. Bundan ötürü çan eğrisi düşünüldüğünde eğrinin sağ ve solu da göz önünde bulundurulmalı ve olabildiğince maksimum performansta çalışacak güneş enerjisi santralleri tasarlanmalıdır. Böylece, bağlantı anlaşıma gücü üzerinde şebekeye elektrik enerjisi verilemediği için güç limitlemesinden ötürü boşa giden elektrik enerjisi kullanılabilecek durumda olacaktır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre 6. senaryoda belirtilen panellerin 10° açıyla %10 doğu, %10 batı ve 20° açıyla %80 güney yön ve yüklenmelerle yerleşimi; 2. senaryoda belirtilen 20° açıyla doğu, batı ve güney ve %33 yüklenmelere kıyasla % 20.47 daha fazla, ilk senaryoda belirtilen panellerin 20° açıyla tamamının güney yönlü yüklendiği senaryoya kıyasla ise %0.39 fazla enerji üretmektedir. Buradan şu sonuca ulaşılabilir; panelleri tek (sadece güney) yönlü yerleştirmek yerine doğu, batı ve güney şeklinde yerleştirmek enerji üretimine katkı sağlamaktadır.

Fotovoltaiik santralin üreteceği elektrik enerjisinin belirlenen her lokasyonun meteorolojik özelliklerine bağlı olarak farklı olacağı göz önünde bulundurulduğunda çalışma sonuçlarının birebir diğer lokasyonlar için aynı olmayacağı açıktır. Ayrıca kullanılan program diğer iller için de seçim yapılmasına izin verdiğinden benzer analizler istenilen lokasyonlar için hızlıca gerçekleştirilebilir. Ancak çalışma bulgularının şu şekilde yorumlanması faydalı olacaktır: Akdeniz bölgesinde yer alan benzer meteorolojik özelliklere ve yakın enlem değerine sahip yakın illerde yakın sonuçlar elde edilecektir. Bu sebeple yüksek enerji potansiyeline sahip bu bölgede kurulacak güneş enerji santrallerinde bağlantı anlaşıma gücü üzerinde fotovoltaiik panel yüklenme oranı, panel yönü ve açısı belirlenirken tek yön ve açı tercih etmek yerine çalışmanın özellikle 5. veya 6. senaryosu kullanılarak belirlenmesi elektrik enerjisi üretimine ciddi katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Arslan, M., & Çunkaş, M. (2024). An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. *Journal of Engineering Research*. (Article in Press) <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.015> .
- Atlım, F., Esen, B., & Demirtaş, M. (2019). Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 679-696. DOI: 10.25092/baunfbed.636967.
- Bakirci, K. (2012). Correlations for optimum tilt angles of solar collectors: a case study in Erzurum, Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(11), 983-993. DOI: 10.1080/15567031003735279.
- Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L., & Rodríguez-Suanzes, C. (2022). Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications. *Applied Energy*, 305, 117802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117802>
- Boztepe, M. (2017). Fotovoltaiik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. *EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni*, 321, 13-17.
- Dincer, F. , & Ozer, E. (2023). Assessing the potential of a rooftop grid-connected photovoltaic system for Gaziantep Islamic Science and Technology University/Turkey. *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 9(2), 149-165. <https://doi.org/10.5455/jjee.204-1670146602> .
- EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) . Elektrik Piyasası Aylık Sektör Raporu Listesi-2024 Yılı Elektrik Piyasası Eylül Ayı Sektör Raporu. (2024). <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/aylik-sektor-raporu> Erişim tarihi: 28.11.2024

ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Bilgi Merkezi- Güneş. (2024a). <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> Erişim tarihi: 05.11.2024

ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Çevre ve iklim, Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü. (2024b). <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru> Erişim tarihi: 22.11.2024

Fusionsolar. Web sayfası. (2025). <https://eu5.smartdesign.huawei.com/> Erişim tarihi: 29.01.2025

Geliş, K., Akyürek, E. F., & Yoladı, M. (2020). Panel konumu ve açısının fotovoltaiik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 1899-1908. DOI: 10.21597/jist.686478.

GEPA. (2024). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası-Kahramanmaraş. <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/46.aspx> Erişim tarihi: 22.11.2024

Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2017). Tilt and azimuth angles in solar energy applications—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 77, 147-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131>.

Hussein, H. M. S., Ahmad, G. E., & El-Ghetany, H. H. (2004). Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy conversion and management*, 45(15-16), 2441-2452. doi:10.1016/j.enconman.2003.11.013.

Kaçan, E., & Ülgen, K. (2012). Güneş Enerjisi Toplayıcılarında Eğim Ve Yönlendirmenin Yararlanabilirliğe Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(4), 837-846.

Koçer, A., Şevik, S., & Güngör, A. (2016). Ankara ve İlçeleri için Güneş Kolektörü Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(1), 63-78. DOI: 10.17482/uujfe.80088.

Lu, N., & Qin, J. (2024). Optimization of tilt angle for PV in China with long-term hourly surface solar radiation. *Renewable Energy*, 229, 120741. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120741>

Memme, S., & Fossa, M. (2022). Maximum energy yield of PV surfaces in France and Italy from climate based equations for optimum tilt at different azimuth angles. *Renewable Energy*, 200, 845-866. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.019>

MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). Resmi İklim İstatistikleri. (2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=KAHRAMANMARAS> Erişim tarihi: 05.11.2024

Mukisa, N., & Zamora, R. (2022). Optimal tilt angle for solar photovoltaic modules on pitched rooftops: A case of low latitude equatorial region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101821. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101821>

Ogundimu, E. O., Akinlabi, E. T., & Mgbemene, C. A. (2019, December). Maximizing the output power harvest of a Pv panel: a critical review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1378, No. 3, p. 032054). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1378/3/032054.

Rowlands, I. H., Kemery, B. P., & Beausoleil-Morrison, I. (2011). Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, 39(3), 1397-1409. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.012.

Yağlı, H., & Koç, Y. (2020). Gaziantep Bölgesi İçin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminde Kurulacak Panellerin Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 475-483. DOI: 10.31590/ejosat.733530.

Yilmaz, S., Ozcalik, H. R., Kesler, S., Dincer, F., & Yelmen, B. (2015). The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaraş, Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 52, 1015-1024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.146>.