

DİZİ VE OPTİMİZERLİ İNVERTERLİ ÇATI TİPİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ UYGULAMALARI VE MALİYET ANALİZİ

Fatih KAYA¹, Bayram KÖSE², Serkan HORZUM³

¹İzmir Bakırçay Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir, Türkiye ,
ORCID: 0009-0008-8272-2977, fatihkayaesm@gmail.com

²İzmir Bakırçay Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir, Türkiye ,
ORCID: 0000-0003-0256-5921, bayram.kose@bakircay.edu.tr

³Ege Üniversitesi, Aliğa Meslek Yüksekokulu, Elektrik, İzmir, Türkiye ,
ORCID: 0000-0002-5725-5595, serkan.horzum@ege.edu.tr

ÖZET

Artan nüfus, gelişen sanayi ve teknoloji ile elektrik enerjisi talebi her geçen gün artış göstermektedir. Bu alanda yapılan yatırımların yaygınlaşması için sistem verimi ve maliyet analizi yapılarak doğru sistemin uygulanması büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, gölgelenme ve diğer etmenler kaynaklı fotovoltaik (PV) panellerde verim düşümü problemlerini azaltmak için güç optimizierli güneş enerji sistemleri ve dizi inverterli sabit açılı güneş enerji sistemleri incelenmiştir. Gölgeleme faktörü için iki farklı senaryo oluşturularak analiz edilmiştir. Ege bölgesinde bu güneş enerjisi sistemlerinin uygulama, bakım ve maliyetlerini hesaba katılarak elektrik üretimi ve verimlilik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, her iki sistemin avantajları, dezavantajları ve maliyetleri karşılaştırılmıştır. Senaryo-1 için PV panellerin üzerine sıralı bir gölge düştüğü varsayılmıştır. Sadece gölgelenme faktörü göz önüne alındığında dizi inverterli sistemin amorti süresinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır. Senaryo-2 için PV panellere rasgele (dizi inverterli sistemde her MPPT'den bir panele gölge düştüğü varsayılmıştır.) gölgelenme meydana geldiği varsayılmıştır. Bu durumda her iki sistemde bulunan 120 PV panele gölge düşmesi durumunda sistem amorti sürelerinin eşit olduğu, gölgelenen panel sayısı arttırıldığında optimizierli inverter sisteminin amorti süresinin daha kısa olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, inverter, fotovoltaik sistemler, optimizier, maliyet optimizasyonu

BÖLÜM 1: GİRİŞ

Nüfus artışı, endüstriyel gelişme ve hızlı teknolojik gelişmeler, dünya çapında elektrik enerjisine olan talebin sürekli artışında etkili bir rol oynamıştır. Günümüzde elektrik ihtiyacının çoğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak bu fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevreye olan etkileri nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına olan talep de hızla artmaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji sağlama potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir.

Güneş enerjisi, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Fotovoltaik bir sistem aracılığıyla doğrudan güneş ışığından elektrik elde edilmektedir. Yapılan teknolojik çalışmalarla beraber her geçen gün artan fotovoltaik sistem verimi bu alanda yapılan yatırımların artmasını sağlamaktadır. Her geçen daha verimli sistemler üzerinde çalışma yapılmaktadır. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın verilerine göre PV panel verimleri %17-%23 arasındadır[1]-[3]. Bu nedenle bu sistemlerin dış etmenler ile veriminin

düşmesini engellemeye yönelik çalışmalar bu alanda büyük önem arz etmektedir.

Anahtarlamalı kapasitör devresi içeren güç optimize ediciler, kısmi gölgelenme nedeniyle güç üretimindeki azalmanın giderilmesinde uzun dizili PV enerji santrallerinde kullanılmıştır. Kısmi gölgeleme anında daha güvenli ve uygulaması kolay olan güç optimizere uzun dizili PV santrallerde daha verimli olup güç üretiminin diğerine göre daha da arttığını gösteriyor. Performans analizinde mevcut güç, dizi çıkış gücü, sistem kayıpları, verim karşılaştırmaları gibi farklı parametrelere bakılmış olup On ve yirmi modül dizisine sahip iki enerji santrali farklı kısmi gölgeleme senaryolarında incelenmiştir.[4]

PV panellerden maksimum fayda sağlamak panellerden olabildiğince yüksek güç elde etmekle alakalıdır. Ancak kısmi gölgeleme maksimum güç çıkışını sağlamayı azaltan faktörlerden birisi olması nedeniyle PV dizinin verimini azaltır ve maliyeti arttırmaktadır. PV dizisi karakteristik eğrisi, literatürde bilinen maksimum güç noktası izleme (MPPT) teknikleri kullanılarak belirli ışınım durumunda maksimum güç noktasında çalışmasını belirler.[5]

MPPT genellikle Dağıtılmış Maksimum Güç Noktası İzleme (DMPPT) tekniği kullanılarak MPPT kullanılırsa daha verimli sonuçların çıkacağı görülmüştür. Bu DMPPT tekniği mikro invertörler ve PV sistemleri için güç optimize ediciler (POPS) olmak üzere iki farklı şekilde literatürde yerini almakta olup POPS teknolojisinin halen geliştirilmeye açık alan olduğu belirtilmiştir. [6]

PV modüllerde modül düzeyinde güç elektroniği (MLPE) kullanımı, modüllerde gücün optimal olarak sağlanmasında gittikçe önem kazanan konular arasında yer almaya başlamaktadır. MLPE'ler, DC optimizere gibi, bir diziye veya bir PV modülü dizisine bağlanan geleneksel PV invertörler bir diziye ya da modüle, DC optimizere MLPE'ler gibi PV dizisindeki her bir PV modülünün çıkışına bağlanır. Merkezi ya da dizi DC-AC çevirici invertör sistemine optimize edilmiş çıkışlar bağlanarak PV sisteminin kurulum maliyetinin de azalma sağlanır. NREL'nin raporuna göre PV modüllerinin modül uyumsuzluğu sebebiyle kayıpları da önleme konusu başta olmak üzere MLPE'ler kısmi gölgelenmeden oluşan kayıpları önlemede önemli rol oynar. DC optimizere başka bir avantajı ise her bir modülünün ayrı ayrı geçmiş çıkış gücü ve voltaj düşüklüğü zamanlarının ve değerlerinin tespit edilebilmesidir. MLPE kullanımı ve avantajları günden güne artarak devam etmekte olup Endüstri Araştırma Raporunda MLPE 2021- 2026 arasında %14,7'lik yıllık bazda bir büyüme oranına sahip olabileceği ve 2026 yılına kadar 2250,4 milyon ABD doları pazar payı olacağı öngörülmüyor. [7]

PV ve Güneş Işınımı:Fotovoltaik güneş pilleri, güneş ışığını emmek ve elektriğe dönüştürmek için tasarlanmış yarı iletken diyotlardır. Güneş pili akımını belirleyen serbest azınlık taşıyıcıları güneş ışığının emilimini sağlar. Bu taşıyıcılar, gerilimi belirleyen diyotun birleşimi ile toplanır ve ayrılır. Fotovoltaik güneş pilleri, 1958'den beri uydular için tercih edilen güç kaynağı

olmuştur; 1998'de uzay uygulamaları için 350 kilovatlık güneş pili üretilmiştir. Karasal uygulamalar için fotovoltaik güneş pillerinin yaygın kullanımı 1973'teki petrol krizi sırasında başlamıştır. Bu güneş pillerinin pazarı 1976'da 240 kilovatta, 1998'de 160 megavata yükselmiştir. Uzay'da kullanılan güneş pilleri, karasal güneş pillerinin yaklaşık 100 kat daha maliyetlidir. Işınım, fotovoltaik süreci yönlendirir ve elektriğe dönüştürülen enerjiyi sağlar. Herhangi bir zamanda dünyanın yüzeyine çarpan toplam güneş enerjisi miktarı yaklaşık $1,2 \cdot 10^{17}$ watt'tır. [8]

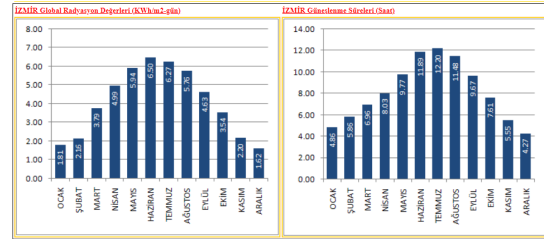
Bu çalışmada, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerinden biri olan Ege bölgesinde iki farklı fotovoltaik enerji sisteminin farklı özelliğe sahip; sabit açılı dizi inverterli sistem diğeri ise güç optimizasyonlu fotovoltaik panel sistemi olmak üzere çatı gölgelemesi nedeniyle dizi kayıplarını azaltmak için karşılaştırılmıştır.

Bölüm 1'de Literatür taraması yapılarak bu alanda yapılan çalışmalara değinilmiştir. Bölüm 2'de Materyal metot kısmı yer almakta olup optimizasyonlu inverter ve dizi inverterli sistem bileşenlerinden bahsedilerek ürün performansı, sistem verimi, ilk yatırım maliyeti ve amorti süresi karşılaştırılmıştır. Bu alanda uygulaması yapılmış çalışmalar değerlendirilmiştir. Bölüm 3'te Bulgular ve Tartışma kısmında yapılan değerlendirmeler sonucu optimizasyonlu inverter ve dizi inverterli sistem verimini etkileyen gölgeleme faktörü için iki farklı senaryo oluşturularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca Ege Bölgesinde bulunan yaklaşık olarak

aynı ortam şartlarına sahip, aynı teknik özelliklere sahip PV panel dört günlük sahada gerçek ölçüm verileri kullanılarak iki sistemin üretim performansları PV panel bazında kıyaslanmıştır. Bölüm 4'te Sonuçlar ve Yorumlar kısmında optimizasyonlu inverter ile dizi inverterli sistemin gerçek saha verileri ile hesaplanan verilerin karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Yapılan çalışma değerlendirilmiş olup ileriki çalışmalar konusunda önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2: MATERYAL VE METOT

Güneş Verileri: Güneş radyasyonu verileri, güneş enerjisi santrallerinin performansını analiz etmek için kullanılır. Bu veriler, belirli bir alanın saatlik, günlük veya aylık olarak aldığı güneş ışığı miktarını içeren ölçümler olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, Ege Bölgesi'ne özgü güneş radyasyonu verileri kullanılarak güneş enerjisi üretimi için temel girdi elde edilmiştir.



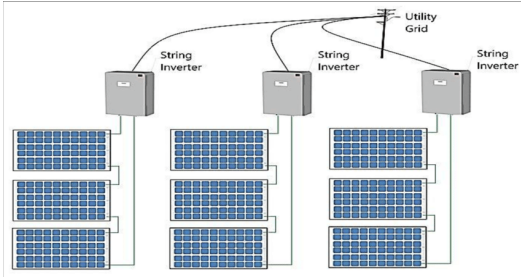
Şekil 1 : İzmir Selçuk İlçesi a) Global Radyasyonu b) Güneşlenme süreleri [9]

Şekil 1'de İzmir Selçuk İlçesi Global Radyasyonu Güneşlenme süreleri verilmiştir. Yapılan çalışmada bu değerler göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılacaktır.

Dizi İnverter: Dizi inverter, panellerin DC giriş voltajının izin verdiği bir voltaj

değerine kadar seri olarak bağlanır. Her bir fotovoltaik panel dizisinin doğrudan invertere bağlı olduğu bir inverterdir. Paneller arasında seri bağlantı yapıldıktan sonra son ve birinci panelden gelen akım DC kablosu ile eviriciye gönderilir. Seri bağlı fotovoltaik panel sayısı, hücre sıcaklığı ve sıcaklık katsayısına bağlıdır. En iyi performans için, eviricinin en iyi MPPT voltajında çalışması sağlanmalıdır.

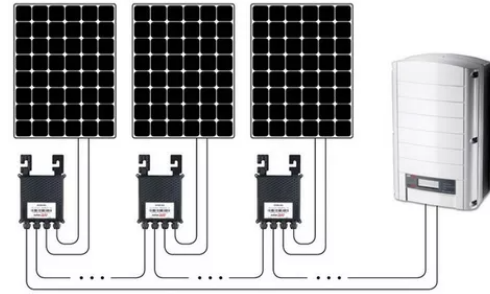
Dizi inverter belli sayıda güneş panelini seri bağlayıp ardından invertere bağlamaktır. Seri dizideki herhangi bir güneş paneli arızalanır veya gölgeye maruz kalırsa tüm güneş panellerindeki üretim olumsuz yönde etkilenir ve sistem verimi ciddi oranda azalabilir. Şekil 2’ de Dizi inverter bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 2 : Dizi inverter bağlantı şeması [10]

Optimizierli İnverter: Optimizierli inverterde, optimizier her fotovoltaik panelin arkasına kurulur, böylece her panel birbirinden bağımsız hale gelir. Burada paneller optimizier aracılığıyla seri bağlanacaktır. Fakat gölge durumunda sadece gölgelenme olan fotovoltaik panellerin verimleri düşecektir. Yani panellerin enerji üretimleri birbirinden bağımsız şekilde toplanarak invertere iletilecektir. Optimizier modüllerin bağımsız çalışmasını sağladığı gibi maksimum güç noktası izleme (MPPT)

gerçekleştirerek enerji üretimini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Güç optimizierleri, dizi uzunluğuna ve çevre koşullarına bakılmaksızın dizi gerilimini sabit bir seviyede düzenler. Güç optimizierleri, arıza durumunda, güç optimizierinin evirici ile bağlantısının kesilmesi durumunda veya eviricinin kapalı olması durumunda, her güç optimizierinin çıkışını otomatik olarak 1 Vdc'ye düşüren bir güvenlik gerilim modunda çalışabilir. Her güç optimizier aynı zamanda modül performans verilerini DC güç hattı üzerinden eviriciye iletir. İki tip güç optimizier mevcuttur: Bunlardan ilki modül eklentili güç optimizier bir diğeri ise akıllı modül güç optimizierdir[11].



Şekil 3 : Optimizierli inverter bağlantı şeması [12]

Optimizierli inverter genel olarak üç bölümden oluşmakta olup bunlar; Güç Optimizier, Evirici ve İzleme Platformudur. Şekil 3’de Optimizierli inverter bağlantı şeması gösterilmektedir.

Güç Optimizier: Güç optimizierleri her PV panelin arkasına bağlanır ve PV panelleri akıllı panel haline getiren DC/DC dönüştürücülerdir. Güç optimizierleri her PV panelin maksimum güç noktasını (MPPT) sürekli takip ederek enerji çıkışını en üst düzeyde tutar. Dizi inverterli sisteme nazaran optimizierli sistemlerde her PV panelden

%25 civarı fazla enerji elde edilebilir. Her PV panelin performansı hakkında izleme platformu sayesinde kesintisiz geri bildirim alınabilir. Acil durumlarda bağlı oldukları PV panellerdeki enerjiyi otomatik olarak kapatırlar. Şekil 4’de Güç optimizeri gösterilmiştir. Optimizerli inverter sistemlerinde 15 kW kurulu güce kadar her PV panele bir güç optimizeri bağlanırken 15 kW üstü sistemlerde her iki PV panele 1 güç optimizeri bağlanmaktadır.



Şekil 4 : Güç optimizeri [13]

Optimizerli inverter sisteminde %30’a kadar daha fazla modül kurulabilir.[13]

Evirici-Inverter: Tüm bilgiler ve fonksiyonlar güç optimizeri ile sağlandığı için eviriciler sadece DC/AC dönüşümü yaparlar. Sistem verimi yüksektir. Değişik markalara ait inverterler genel olarak iç ve dış ortamlarda kullanılabilir. Şekil 5’te Üç fazlı evirici-inverter gösterilmektedir.



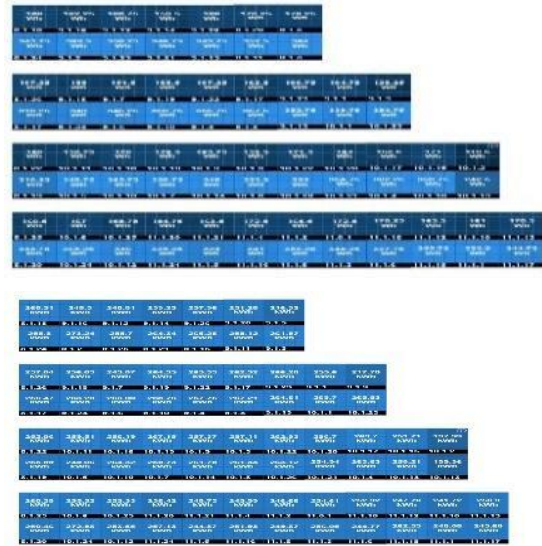
Şekil 5 : Üç Fazlı evirici-inverter [11]

Optimizerli inverter kullanılan sistemlerde inverter enerji verimi %2 ile % 5 oranında yükselmektedir.[13]

İzleme Platformu: Her bir PV panel gerçek zamanlı veri akışı ile izlenebilmektedir. Bu sayede sistemin tüm performans bilgileri görüntülenir. Sistemsel arıza yaşandığında otomatik alarm verir. Telefon veya bilgisayar ile kolay erişim sağlanır[11]. Şekil 6’da Wifi bağlantılı izleme anteni gösterilmiştir.



Şekil 6 : Wifi bağlantılı izleme anteni

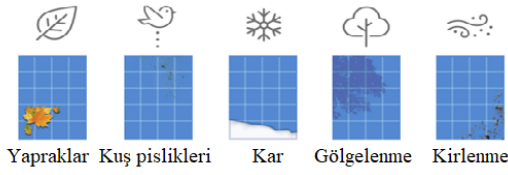


Şekil 7 : Güç optimizeri panel bazlı izleme [11]

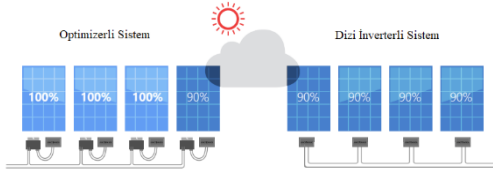
2.1 Dizi İverterli Sistem- Optimizerli İverterli Sistem Karşılaştırılması

Dış Etmenler: Fotovoltaik sistem uygulamalarında her PV panelin kendine özgü maksimum güç noktası bulunmaktadır. PV panellerin seri bağlanması durumunda dizideki en düşük güç noktasına bağlı olarak diğer PV panellerin güç çıkışları sınırlanacaktır. Şekil 8’de bu güç sınırlanmalarına neden olan bazı

parametreler verilmiştir. Bu nedenle sistemin genel verimi düşecektir. Optimizerli sistemde her PV panel maksimum güç noktasına göre çalışacağı için sistem verimi en üst düzeyde olacaktır. Şekil 8’de Optimizerli sistem ve dizi inverterli sistemde PV panel etkileşimleri gösterilmiştir[11].

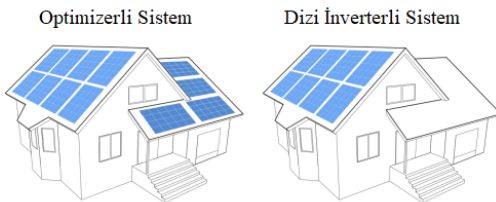


Şekil 8 : PV panel maksimum güç noktasını etkileyen parametreler [11]



Şekil 9 : Optimizerli sistem ve dizi inverterli sistemde PV panel etkileşimleri [11]

Uygulama: Dizi inverter sisteminde tüm PV paneller aynı açı ile aynı cephede aynı şartlarda çalışmalıdır. Bu nedenle güney ve doğu-batı cephe uygulamaları yapılmaktadır. Optimizerli sistem her türlü cephe ve çatıda kullanılabilir. Bu sayede çatıdaki PV sistem kapasitesi artırılabilir. Şekil 10’da Optimizerli sistem ve dizi inverterli sistem çatı uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 10 : Optimizerli sistem ve dizi inverterli sistem çatı uygulaması [11]

Sistem Performansının İzlenmesi:

Dizi inverter sisteminde herhangi bir PV panelin üretim verisi görülemez. Sadece panelin bağlı olduğu inverterin üretim verileri izlenebilir. Fakat optimizerli sistemde her bir PV panelin performansları ayrı ayrı izlenebilir.

Güvenlik: Dizi inverter sistemlerinde PV paneller seri bağlanarak 800-1000 volt civarı DC voltaj değerlerine ulaşılmaktadır. Herhangi bir acil durumda günışığı olduğu sürece elektrik üretimi devam edecektir. Optimizerli sistemlerde ise AC güç kesildiği anda DC kablolardaki enerji otomatik olarak kesilir. Bu durumda acil durumlarda müdahale kolaylığı sağlar.

Optimizerli inverter sisteminde geleneksel dizi inverter sistemine göre daha fazla parça kullanılmaktadır. Bu durum daha fazla parça kullanılıyor olması güvenliği olumsuz yönde etkiliyor algısı yaratabilir. Fakat bu parçalar güvenlik ekipmanı olarak kullanılıyorsa güvenliği arttırmayı sağlayacaktır. Bu duruma örnek olarak daha az parça ve fonksiyonu bulunan eski bir araba ve tüm özellikleri bulunan son model arabanın güvenlik donanımları verilebilir. Güç optimizerlerinin PV panel seviyesinde gerilim kapatma özelliği, aşırı ısınma takibi, ark tespiti durumunda devreyi kapama, izleme modülü sayesinde PV panel bazlı hata tespit özelliği sayesinde güvenlik düzeyi dizi inverter sistemine göre çok üst düzeydedir. [14]

PV Panel Kaynaklı Hatalara Duyarlılık:

Sektörde yoğun olarak 545-550 Watt bypass diyotlu busbar PV panel kullanılmaktadır.[15] PV panellerin hata katsayıları yıllar içerisinde değişiklik gösterebilir.

Buradan meydana gelecek kayıplar 20 yıllık periyotta %1-3 arası üretim performans farkı açığa çıkarmaktadır. [8]

Solar Kablo Kullanımı: Sektörde optimizierli inverter için özel bir firmanın ürünlerine bakıldığında P serisi için 28-30 PV panel, S serisi için 38-40 PV panel bir dizi oluşturmaktadır. Dizi inverter sisteminde inverter DC giriş voltajı ve proje tasarımına göre ortalama 16-22 PV panel seri bağlanarak bir dizi oluşturulmaktadır. Bu durumda solar kablo kullanımını %50 civarında azalmaktadır. Kablo miktarının azalmasına bağlı olarak kablo tavası kesiti de azalacaktır. Tüm bu durumlar için 1 MW bir güneş enerji santrali için 200.000 Euro fiyat farkı oluşmaktadır. [11]

2.2 Bu Yapılan Örnek Çalışmalar ve Çıkarımlar

Bursa ilinde bulunan 5850 adet 540 Watt PV panel, 2925 adet P1100 güç optimizieri kullanılan AC güç kapasitesi 2600 kWe, DC güç kapasitesi 3159 kWp olan optimizierli güneş enerji santrali sisteminin aynı lokasyonda dizi inverterli sistem ile sabit ve değişken farkları karşılaştırılmıştır[11].

Tablo 1 : Maliyet Analizinde Ortaya Çıkan Sabit Farklar [11]

| Malzeme | Optimizierli İnverter | Dizi İnverter |
|---------------------------|-----------------------|---------------|
| İnverter | 100.000,00 € | 42.000,00 € |
| Kablo, Şalt Malzeme Farkı | - | 20.000,00 € |
| Garanti Uzatımı (10 yıl) | - | 8.000,00 € |
| Gerilim Kapama Kutusu | - | 25.500,00 € |

| | | |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Eşit Şartlarda Satın Alma Maliyeti | 100.000,00 € | 92.500,00 € |
|------------------------------------|--------------|-------------|

Tablo 1’de gösterilen dizi inverterlerin garanti süresi genel olarak 5 yıldır. (Garanti süresi 12 yıl olan string inverterler de mevcuttur.) Optimizierli sistemlerde inverterin 12 yıl, güç optimizierlerinin 25 yıl garantisi vardır. Optimizierli sistemler gerilim kapama özelliğini elektronik olarak yaparken, geleneksel sistem için ilave ekipmanlar gerekir.

Tablo 2 : Maliyet Analizinde Ortaya Çıkan Değişken Farklar [11]

| Malzeme | Optimizierli İnverter | Geleneksel İnverter |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Üretim Farkı (5 yıl) | - | 21.249,28€ |

Tablo 2’de gösterilen PV panel bazında MPPT sayesinde daha fazla üretim artışı alınır. PvSyst programı verilerine göre ilk 5 yıl ortalamasında 97 MWh/yıl ve 25 yıl ortalamasında ise 155 MWh/yıl daha fazla üretim sağlanacağı öngörülmüştür. (Elektrik birim fiyatı (kWh) 11 euro cent olarak baz alınmıştır.)

Tablo 3 : Genel Maliyet Karşılaştırılması[11]

| GENEL MALİYET KARŞILAŞTIRILMASI | | |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Zaman | Optimizierli İnverter | Geleneksel İnverter |
| 5. Yıl | 100.000,00 € | 113.749,28 € |
| 10. Yıl | 100.000,00 € | 141.418,45 € |
| 25. Yıl | 100.000,00 € | 262.945,34 € |

Türkiye’de Ege Bölgesinde yapılan 26xSolaredgeSE100K inverter ve 24xSMA 110 kW inverter ile, 540 Wp 5850 Adet PV panel kullanılarak Pvsyst programında güç optimizieri ve dizi inverterli sistem tasarlanmış ve projenin

1. Ve 20. Yıl üretim değerleri simüle edilmiştir.[11]

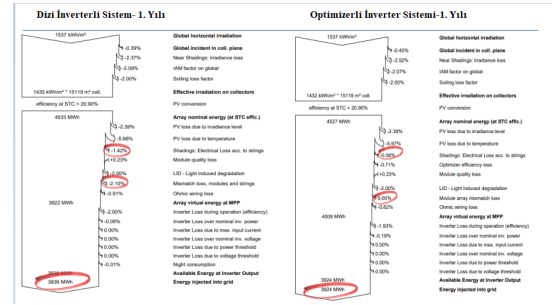
Tablo 4 : Simulasyon Verileri [11]

| | | Birinci Yıl | |
|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | | Dizi İnv. | Opt. İnv. |
| PVsyst Verim Tahmini | Yıl. Ür. En. | 3839 MWh/y | 3924 MWh/y |
| | Per. Or. | %79,4 | %81,1 |
| | Göl.Kay. | %1,4 | %0,6 |
| Pvsyst Tasarımı | Eviriciler | 23 | 26 |
| | Diziler | 324 | 207 |
| | Panel ve Opt. | 3850 Adet PV Panel | 3850 Adet PV 1925Opt |
| | Dizi Baş.Pan. Sayısı | 18 | 28 |
| Opt.İnv. Avantajı | | | %2,2 |
| | | Yirminci Yıl | |
| | | Dizi İnv. | Opt. İnv. |
| PVsyst Verim Tahmini | Yıl. Ür. En. | 3432 MWh/y | 3628 MWh/y |
| | Per. Or. | %70,9 | %75 |
| | Göl.Kay. | | |
| Pvsyst Tasarımı | Eviriciler | | |
| | Diziler | | |
| | Panel ve Opt. | | |
| | Dizi Baş.Pan. Sayısı | | |
| Opt.İnv. Avantajı | | | %6,0 |

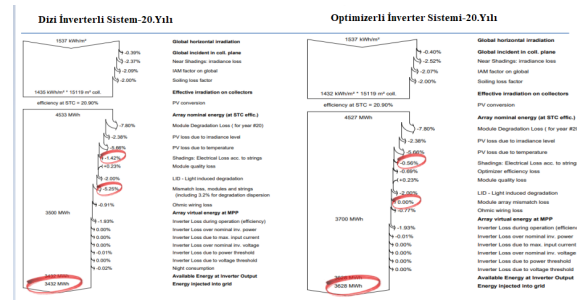
PVsyst Raporları-Sankey Diyagramı:

PVsyst programı aracılığı ile oluşturulan optimizierli inverter ve dizi inverter sankey diyagramları ile iki sistemin Birinci yıldaki kayıpları Şekil 11'da karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Aynı iki sistemin yirminci yıllardaki kayıpları da sankey diyagramları ile Şekil 12'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. PV paneller yirmi yıllık süreç sonunda ön görülen ve kabul edilen ölçüde çıkış gücünün ancak %80'ini sağlayabilmektedir. Ayrıca bu zaman

diliminde PV panellerin yaşlanma hızlarındaki farklılıklar nedeniyle yaşlanma kaynaklı uyumsuzluk kayıplarına (mismatch losses) sebep olmaktadır. PV paneller arası uyumsuzluk miktarı ile sistem verimi ters orantılı olarak değişmektedir. Burada dizi inverter sisteminde dizide bulunan bir PV panelde yüksek oranda meydana gelecek yaşlanma kayıpları tüm diziyi etkileyecektir. Güç optimizierli sistemin panel bazlı izleme ile yaşlanma bazlı uyumsuzluk kayıpları ortadan kalkmaktadır. (PV panelde meydana gelen kayıp sadece kendi ürettiği enerji miktarını düşürecek.)[11]



Şekil 11 : Simulasyon Sonucu Dizi ile Optimizierli İnveterli Sistemin 1. Yılı Karşılaştırılması [11]



Şekil 12 : Simulasyon Sonucu Dizi ile Optimizierli İnveterli Sistemin 20. Yılı Karşılaştırılması [11]

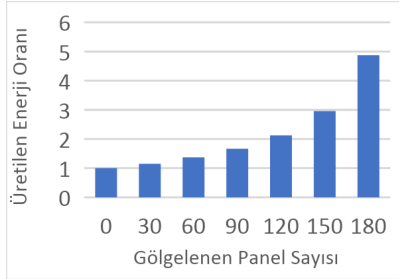
BÖLÜM 3: BULGULAR VE TARTIŞMA

Optimizasyonlu sistem ile dizi inverterli sistem kıyaslandığında optimizasyonlu sistemi ön plana çıkaran en önemli özelliklerden birisi olan gölgelenme faktörünün üretilen enerji ve fizibilite süresi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki senaryo üretilmiştir. Birinci senaryoda sistemde kullanılan 5850 adet PV panele her iki sistemde de sırasıyla gölge düştüğü düşünülmüştür. Burada dizi inverterde iki dizi birbirine bağlanarak bir MPPT oluşturma durumu göz önüne alınmıştır. İkinci senaryoda ise gölgelenme durumu dizi inverterli sistemde farklı MPPT'lere denk gelecek ve optimizasyonlu sistemde rasgele gölgelenme olacaktır.

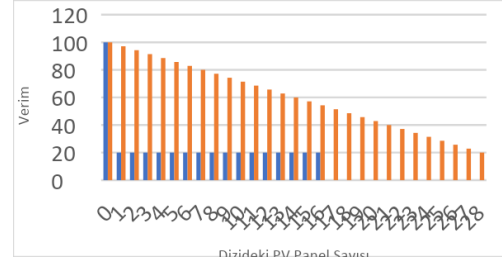
Amortisman süresi denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

$$MGKB = YM + YBM - YESM \quad (1)$$

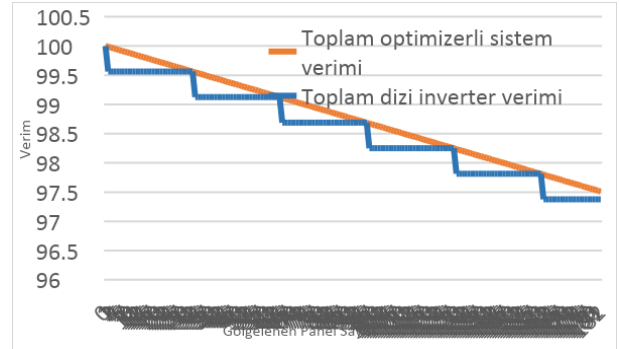
MGKB: Maliyet Geri Kazanımı Beklentisi
 İYM: İlk Yatırım Maliyeti
 YİBM: Yıllık İşletme Bakım Maliyeti
 YESM: Yıllık Enerji Satış Maliyeti



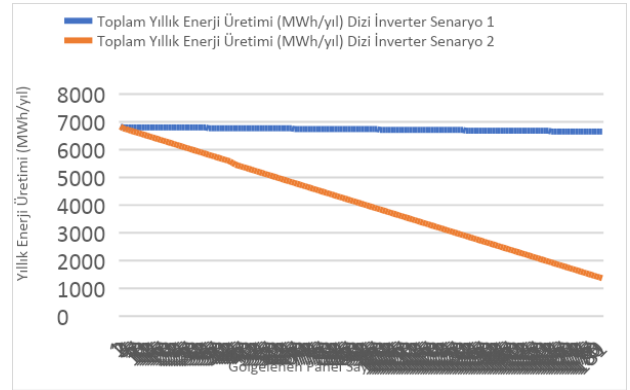
Şekil 13 : Senaryo-2 için Gölgelenen Panel Sayısına Göre Üretilen Enerji Oranı



Şekil 14 : Bir dizide iki sistemde bulunan PV panellere sırasıyla gölge düşmesi durumunda dizi verimi



Şekil 15 : Her bir MPPT'den bir panele gölge düşmesi durumu ile optimizasyonlu sistemde rasgele PV panellere gölge düşmesi durumu



Şekil 16 : Dizi inverterli sistemde birinci ve ikinci senaryo için yıllık enerji üretimindeki değişim

Tablo 5 : Kayıp Oranı Senaryo-1

| Gölgelenen Panel Sayısı Senaryo-1 | Optimizasyonlu İnv. Toplam Kayıp | Dizi İnv. Toplam Kayıp |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 0 | 10 | 10 |
| 30 | 10,04390779 | 10,04390779 |
| 60 | 10,08820287 | 10,08820287 |
| 90 | 10,13289037 | 10,13289037 |

| | | |
|-----|-------------|-------------|
| 120 | 10,17797553 | 10,17797553 |
| 150 | 10,22346369 | 10,22346369 |
| 180 | 10,26936027 | 10,26936027 |

Tablo 6 : Amorti Süresi Senaryo-1

| PV Panel Sayısı | Optimizierli İnverter | Dizi İnverter |
|-----------------|-----------------------|---------------|
| 0 | 7 yıl | 6 yıl 1 ay |
| 0-32 | 7 yıl 1 ay | 6 yıl 3 ay |
| 32-64 | 7 yıl 2 ay | 6 yıl 4 ay |
| 64-96 | 7 yıl 5 ay | 6 yıl 6 ay |
| 96-128 | 7 yıl 6 ay | 6 yıl 8 ay |
| 128-160 | 7 yıl 8 ay | 6 yıl 9 ay |
| 160-182 | 7 yıl 11 ay | 6 yıl 11 ay |

Tablo 7 : Kayıp Oranı Senaryo-2

| Gölgelenen Panel Sayısı Senaryo-2 | Optimizierli İnv. Toplam Kayıp | Dizi İnv. Toplam Kayıp |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 0 | 10 | 10 |
| 30 | 10,04390779 | 11,56763523 |
| 60 | 10,08820287 | 13,80090417 |
| 90 | 10,13289037 | 16,85082774 |
| 120 | 10,17797553 | 21,63120441 |
| 150 | 10,22346369 | 30,19801803 |
| 180 | 10,26936027 | 49,99999707 |

Tablo 8 : Amorti Süresi Senaryo-2

| PV Panel Sayısı | Optimizierli İnverter | Dizi İnverter |
|-----------------|-----------------------|---------------|
| 0 | 7 yıl | 6 yıl 1 ay |
| 30 | 7 yıl 1 ay | 6 yıl 3 ay |
| 60 | 7 yıl 2 ay | 6 yıl 7 ay |
| 90 | 7 yıl 5 ay | 6 yıl 11 ay |
| 120 | 7 yıl 6 ay | 7 yıl 6 ay |
| 150 | 7 yıl 8 ay | 9 yıl 2 ay |
| 180 | 7 yıl 11 ay | 11 yıl 3 ay |

Saha Verileri

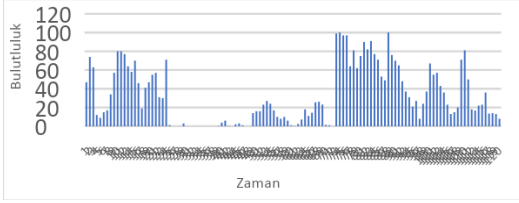
Bu bölümde Muğla İli Milas İlçesi konumunda bulunan bir fabrika çatısında bulunan optimizierli güneş

enerji santrali ve İzmir İli Menemen İlçesi konumunda bulunan dizi inverterli güneş enerji santralinden elde edilen dört günlük üretim verileri ile bu iki sistem farklı parametreler göz önüne alınarak kıyaslanmıştır. İki sahadan elde edilen veriler için inverter odasına eşit mesafede bulunan, aynı açı ile yerleştirilen ve aynı malzemeler kullanılan iki sistem ele alınmıştır.

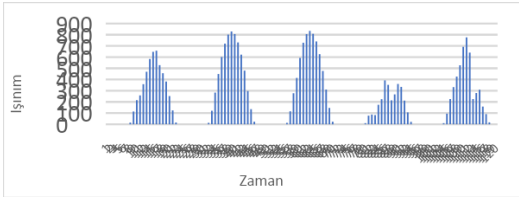
Tablo 9: Dizi ve optimizierli inverterli 3 MW Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali Maliyet Listesi

| Malzeme | Optimizierli İnverter Sistemi | Dizi İnverter Sistemi |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 2925 Adet Güç Optimizer | 165.000 € | x |
| İnverter | 200.000 € | 84.000 € |
| 5850 Adet PV Panel | 1.175.000 € | 1.175.000 € |
| MC4 Konnektör | 275 € | 550 € |
| Solar Kablo (Kırmızı ve Siyah) | 18.501 € | 37.002,24 € |
| Konstrüksiyon Sistemi | 2800 € | 2800 € |
| Kablo Tavası | 6850 € | 7.000 € |
| İnverter Odası | 5.830 € | 5.830 € |
| GES Panosu | 100.000 € | 100.000 € |
| AC Kablo | 12.000 € | 12.000 € |
| Meteoroloji istasyonu | 3000 € | 3000 € |
| Topraklama ve yıldırım | 30.000 € | 30.000 € |
| Proje ve onay işleri | 2.000 € | 2.000 € |
| Nakliye | 50.000 € | 50.000 € |
| İşçilik | 28.500 € | 33.500 € |
| Toplam | 1.799.756 € | 1.542.682 € |

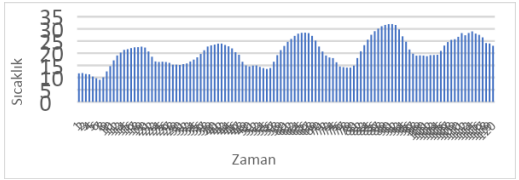
Sektörel fiyat araştırması sonucu İzmir’de bulunan bir fabrika çatısına kurulacak olan dizi inverterli sistem fiyatı 510.000 USD/MWp ve optimizierli inverterli sistem fiyatı 550.000 USD/MWp ‘dir.



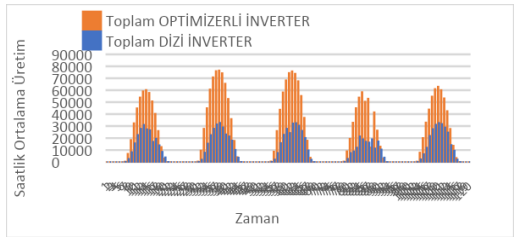
Şekil 17 : İzmir İli Ağustos Ayı Bulutluluk verileri [16]



Şekil 18 : İzmir İli Ağustos Ayı Işınım verileri [16]



Şekil 19 : İzmir İli Ağustos Ayı Sıcaklık Verileri [16]



Şekil 20 : Dizi ve Optimizierli Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali PV Panel Başına Beş Günlük Saatlik Ortalama Üretim Verileri

BÖLÜM 4: SONUÇ VE YORUMLAR

Yapılan çalışmada optimizier ve dizi inverter sistemli inverterler teknik

açından, dış etmenlerle verim düşümleri, kurulum ve işletme vb. yönlerden kıyaslanmıştır. İki sistem ekipmanlarının maliyet analizi yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda optimizierli inverter sistemini dizi inverter sistemine avantajlı kılan en önemli parametrelerden bir tanesi olan gölgelenme faktörü iki senaryo için değerlendirilmiştir.

PV panellerde kurulum esnasında meydana gelen montaj hataları sebebiyle ve kurulum sonrası üretim esnasında yıllar içerisinde PV panel performansında değişiklik meydana gelmektedir. En iyi bakımlı sahada bile 25 yıllık periyod göz önüne alındığında %3 üretim farkı oluşmaktadır. Ayrıca PV panellerde bulunan ters enerji akışını engelleyen bypass diyotları zaman içerisinde arızalanabilmektedir. Meydana gelen arıza ile birlikte dizi inverterli sistemde %65 oranı civarında kayıplar meydana gelmektedir[11]. PV panellerde bulut, yaprak, kuş pislikleri, kar, gölgelenme ve kirlenme kaynaklı kayıplar meydana gelir.

Dizi inverterli sistemlerde, PV paneller birbirlerine seri olarak bağlanır. Bu nedenle, bir PV panelde meydana gelen verim düşüklüğü tüm diziyi etkiler. Güç optimizierli sistemlerde ise PV paneller bireysel olarak değerlendirilir ve maksimum güç izleme noktasına (MPPT) göre çalışır. Bu sayede, bir panelde meydana gelen kayıplar diğer PV panelleri etkilemez. Yani PV paneller birbirinden bağımsız şekilde çalışır. Güç optimizierli inverter sistemlerinde, PV panel bazlı izleme sağlanabilir. Bu sayede, PV panel arızaları, dış etmenlere bağlı kayıplar vb. izlenebilir[11].

Güneş enerji santrallerinde evsel sistemlerde 600 volt, endüstriyel sistemlerde nominal 800-1500 volt DC voltajda çalışma yapılmaktadır. Bu nedenle güvenlik büyük önem arz etmektedir. Güç optimizasyonlu inverter sistemlerinde acil durumlarda inverter enerji çıkışının kesilmesiyle birlikte PV panel arkasına montajı yapılan güç optimizasyonlarından 1 volt gerilim çıkışı sağlanmaktadır. Dizi inverterli sistemlerde ise herhangi bir kesici (DC sigorta vb.) bulunmamaktadır. PV paneller güneş olduğu sürece enerji üretmeye devam edecektir. Bu nedenle optimizasyonlu sistemlerin güvenlik düzeyi en yüksektir.[11]

Dizi ve optimizasyonlu inverter sistemleri kullanılan malzeme yönünden kıyaslandığında, dizi inverterli sistemde 16-22 adet PV panel seri bağlanarak bir dizi elde edilirken, optimizasyonlu inverter sisteminde 28-30 veya 38-40 PV panel bağlantısı ile bir dizi elde edilmektedir. Bu nedenle %40 ila %60 civarında solar kablo maliyeti azaltılmaktadır. Bununla birlikte bağlantı için kullanılan MC4 konnektör sayısı da azalacaktır.[11]

İki sistemde gölgelenme faktörüne bağlı kayıpları değerlendirmek amacıyla (diğer tüm parametreler eşit kabul edilmiştir.) iki farklı senaryo için dizi bazlı ve sistem bazlı verim düşümü analiz edilmiştir. Birinci senaryoda iki sistemde bulunan PV panellere sırasıyla gölge düşmesi durumu incelenmiştir. İkinci senaryoda ise PV panellere rasgele (dizi inverterli sistemlerde gölgelenen PV paneller farklı MPPT'lere bağlıdır.) düşmesi durumu için verim kaybı hesaplanmıştır. Birinci senaryo için dizi inverterli sistem amorti süresi optimizasyonlu inverter sistemine göre daha kısa çıkarken ikinci

senaryoda sistem kendini daha kısa sürede amorti etmiştir. Buradan çıkarılan sonuç lokal gölgelenme ile PV paneldeki performans kaybı dizide ve paralel bağlı olduğu MPPT'de bulunan tüm PV panelleri etkilenmektedir. Bu nedenle optimizasyonlu inverter sistemi baca vb. gibi kısmi gölgelenmeye sebep olan çatılarda en uygun sistemdir sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca ev tipi uygulamalarda çalışma alanının kısıtlı olması nedeniyle PV paneller için aynı ortam şartlarının (açı, cephe vb.) dizi inverterli sisteme nazaran optimizasyonlu sistemin PV panel bazlı MPPT özelliğinden dolayı uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir.

Ege Bölgesi'nde bulunan optimizasyonlu ve dizi inverter sistemli çatı tipi güneş enerji santralleri teknik açıdan kıyaslanarak maliyet analizi yapılmıştır. İki sistemin birinci ve yirminci yıldaki analizi işletme ve bakım giderleri göz önüne alınarak yapılmış olan simülasyonlar değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde optimizasyonlu inverter sistemi ilk kurulum maliyetinin dizi inverter sistemine göre daha fazla olduğu, tespit edilmiştir. Fakat işletme bakım maliyetleri ve sistem ömrü boyunca özellikle kısmi gölgelenmeye bağlı PV panel performansını düşüren etmenler göz önüne alındığında optimizasyonlu sistemler özellikle lokal gölgelenmelerin fazla olduğu alanlarda kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca optimizasyonlu sistemler güvenlik ve PV panel bazlı izlenme sayesinde hata tespiti açısından avantaj sağlamaktadır. Sahadan elde edilen verilerin sınırlı olması sistem verimi hakkında sağlıklı yorum yapmak için yeterli değildir. Çalışmada üretim yapan sahalarda PV panel bazlı üretim

değerleri karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu alanda yapılacak çalışmalarda sistemlerin daha sağlıklı değerlendirilmesi için ortam şartları ve malzemelerin aynı özellikte olması ve en az bir yıllık verilerin kullanılması uygun olacaktır.

Yapılan maliyet analizinde optimizasyonlu invertelerin dizi inverterli sisteme nazaran ilk yatırım maliyetinin %16,6 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bakım onarım işletme giderleri ve yıllık enerji satış maliyeti göz önüne alındığında özellikle kısmi gölgelenme olan çatılarda optimizasyonlu sistemin amorti süresinin dizi inverterli sisteme göre daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır.

Güneş enerji santrali uygulamalarında doğru sistemin tercih edilmesi, gerek sisteme yapılan yatırımın amorti süresi gerek sistem performansı gerekse güvenlik ve izleme açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle bu alanda kullanılacak inverter sistemi (merkezi, dizi, optimizasyonlu ve mikro inverter.) belirlenirken proje parametreleri iyi analiz edilmeli ve yatırımcı için optimum sistem belirlenmelidir. Bu uygulama alanında ilerleyen çalışmalarda mikro inverterli sistem ile optimizasyonlu sistem teknik, uygulama ve maliyet açısından kıyaslanarak en ideal sistemin belirlenmesi çalışma konusu olarak ele alınabilir.

Kaynaklar

- [1] Clean Energy Reviews, "https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels."

Mühendistan, "https://muhendistan.com/en-verimli-gunes-panelleri/."

R. Selbaş, H. Çetîn, I. Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, T. Fakültesi, and M. Mühendisliği Bölümü, "FOTOVOLTAİK GÜNEŞ SANTRALLERİNİN VERİMLERİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ," 2022.

B. Aljafari, "Production enhancement of long string photovoltaic plants during partial shading through switching capacitor power optimizer circuit," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 74, pp. 427–444, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.AEJ.2023.05.043.

A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 854–867, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.083.

J. L. de Souza Silva, H. S. Moreira, M. V. G. dos Reis, T. A. dos S. Barros, and M. G. Villalva, "Theoretical and behavioral analysis of power optimizers for grid-connected photovoltaic systems," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10154–10167, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.07.154.

M. Afridi, S. Tatapudi, J. Flicker, D. Srinivasan, and G. Tamizhmani, "Reliability evaluation of DC power optimizers for photovoltaic systems: Accelerated testing at high temperatures with fixed and cyclic power stresses," *Eng Fail Anal*, vol. 152, p. 107484, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENGFANAL.2023.107484.

D. Yıldırım, "Photovoltaic Arrays," in *Renewable Energies*, 1st ed., Şahin Ahmet Duran, Ed., Turkish Water Foundation(Su Vakfı), 2006, pp. 187–223.

- [9] İzmir Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası,
“<https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/35.aspx>.”
- [10] N. K. Kasim and H. H. Hussain,
“Performance Improvement of CIGS PV Solar Grid Tied System Using Planer Concentrators, Case Study : Baghdad,”
2020, doi: 10.13140/RG.2.2.33172.73604.
- [11] Solaredge Türkiye,
“<https://www.solaredge.com/us/>.”
- [12] Solar Blog,
“<https://www.keremcilli.com/optimizerli-solar-inverter-ile-elektrik-uretimi/>.”
-] Huawei,
“<https://solar.huawei.com/tr/professionals/c-i>.”
-] STendüstri,
“<https://www.stendustri.com.tr/elektrik-enerji/optimizerli-invertorlerimiz-geslerin-beynini-olusturuyor-h103067.html>.”
-] CW Enerji,
“<https://cw-enerji.com/tr/index.html>.”
-] Meteoblue,
“https://www.meteoblue.com/tr/hava/hafta/%c4%b0zmir_t%c3%bcrkiye_311046.”