

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**MİKRO ÖLÇEKLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI BİR  
FOTOVOLTAİK SANTRALİN TASARLANMASI VE  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NURLAN MAJİDZADE**

**DENİZLİ, KASIM - 2018**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**



**MİKRO ÖLÇEKLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI BİR  
FOTOVOLTAİK SANTRALİN TASARLANMASI VE  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NURLAN MAJİDZADE**

**DENİZLİ, KASIM - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

NURLAN MAJİDZADE tarafından hazırlanan “Mikro Ölçekli Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Santralin Tasarlanması ve Uygulanması” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16.11.2018 tarihinde yapılmış olup, aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Selim KÖROĞLU  
Pamukkale Üniversitesi



Eş Danışman  
Doç. Dr. Engin ÇETİN  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Engin KARATEPE  
Dokuz Eylül Üniversitesi



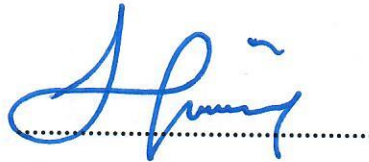
Üye  
Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Yusuf ÖNER  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/11/2018 tarih ve 49/08.2.2 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez alışması Pamukkale Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından 2018FEBE022 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**NURLAN MAJİDZADE**

## ÖZET

**MİKRO ÖLÇEKLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI BİR FOTOVOLTAİK  
SANTRALİN TASARLANMASI VE UYGULANMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
NURLAN MAJİDZADE  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SELİM KÖROĞLU)  
(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. ENGİN ÇETİN)  
DENİZLİ, KASIM - 2018**

Fotovoltaik (FV) sistemler; teknolojilerindeki önemli gelişmeler, verimlerdeki iyileşmeler ve maliyetlerindeki ciddi oranda azalmalara bağlı olarak, dünyada ve ülkemizde enerji üretimindeki payını her geçen gün arttırmaktadır. FV sistemler modüler yapıda olup, kolay kurulum özelliğine sahiptir. Uygulamaya bağlı olarak, FV sistemler şebeke bağlantısı olmayan bir sistemin beslenmesinde kullanılabilirdiği gibi, şebeke bağlantılı olarak da tesis edilmektedir. Böylelikle FV sistemler, birkaç kW'tan başlayıp GW seviyelerine kadar inşa edilebilirler.

Yapılan tez çalışmasında, mikro ölçekli şebeke bağlantılı bir FV santralin tasarlanması ve uygulanması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, hali hazırda PAÜ Temiz Enerji Evi'nde (PAÜ – TEE) kurulu 2,5 kW gücündeki FV modül dizisi kullanılmıştır. Dizi, toplamda her biri 125 W gücünde olan yirmi adet modülün seri bağlanması ile oluşturulmuştur. FV modül dizisinin ürettiği DC enerji, evirici ile AC enerjiye dönüştürülerek sistem panosu üzerinden ulusal enterkonnekte şebekeye aktarılmıştır. Sistem panosunda; sigorta, AG parafudr, devre kesici, kaçak akım rölesi, çift yönlü sayaç ve enerji analizörü gibi şalt ve ölçüm ekipmanı bulunmaktadır. Yanı sıra, ulusal enterkonnekte şebekedeki enerji kesintilerinde, fotovoltaik sistemin ada modunda çalışmasını engelleyici bir şebeke koruma rölesi de şalt panosunun içerisine entegre edilmiştir. Sistemin benzetimi hem MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiş hem de PVSOL Premium yazılımı kullanılmıştır. Tüm tasarım ve benzetim işlemlerinden sonra sistem kurulumu yapılmış, tüm sistemin test ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin ürettiği enerji ve bu enerjinin kalitesine dair veriler gözlemlenmiştir. Böylelikle, şebeke bağlantılı bir sistemin sistem entegrasyonu tüm aşamaları ile gerçekleştirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Fotovoltaik santral, mikro santral, şebeke bağlantısı, MATLAB Simulink, PVSOL.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND APPLICATION OF A MICRO-SCALE ON-GRID PHOTOVOLTAIC POWER PLANT**

**MSC THESIS**

**NURLAN MAJİDZADE**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR SELİM KÖROĞLU)**

**(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ENGİN ÇETİN)**

**DENİZLİ, NOVEMBER 2018**

Photovoltaic (PV) systems increase their share of energy production in the world and in our country day by day due to significant improvements in their technologies, improvements in their efficiency and effects on the reductions in the system costs. PV system is modular and easy to install. Depending on the application method, it can be connected to the national grid or constructed as an off-grid system. For this respect, PV systems are built from several kW to GWs level.

In this study, a micro-scaled grid-connected PV power plant design and application was realized. To achieve this aim, a 2.5 kW PV module array installed at PAU Clean Energy House (PAU - CEH) was used. The PV array consists of twenty PV modules and each of 125 W. The DC energy produced by the PV module array is converted in to the AC energy by an inverter and connected to the national grid via the system mainboard. On the system mainboard; there are switching and measuring equipment such as fuse, low voltage surge arrester, circuit breaker, residual current device, bi-directional electric meter, and digital multimeter. Additionally, the system mainboard has a mains protection relay, which prevents the operation of the photovoltaic system in island mode. Whole system is simulated with the MATLAB-Simulink and PVSOL Premium softwares. After all design and simulation procedures, the system was carried out in experimentally. The energy produced by the system and the quality of this energy are measured. Thus, the network integration of the grid-connected PV system has been realized with all procedure.

**KEYWORDS:** Photovoltaic power plant, micro power plant, on-grid application, MATLAB Simulink, PVSOL.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER</b> .....	<b>10</b>
3.1    Fotovoltaik Kavramı.....	10
3.2    Fotovoltaik Hücre.....	11
3.3    Fotovoltaik Sistem Bileşenleri .....	15
3.3.1    Şarj Regülatörü .....	15
3.3.2    Akü.....	16
3.3.3    Evirici.....	16
3.3.4    Diğer Sistem Bileşenleri .....	18
3.4    Fotovoltaik Sistem Tipleri.....	19
3.4.1    Şebekeden Bağımsız Sistemler .....	19
3.4.2    Şebeke Bağlantılı Sistemler .....	20
<b>4. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SANTRALİN TASARIM AŞAMALARI</b> .....	<b>23</b>
4.1    Evirici Seçimi ve Fotovoltaik Modül – Evirici Uyumunun Kontrolü 23	
4.2    Şalt Ekipmanı Seçimi .....	31
4.3    Sistemin PVSOL Benzetimi .....	35
4.4    Sistemin MATLAB Simulink Benzetimi .....	41
<b>5. SANTRALİN KURULUMU, İŞLETMEYE ALINMASI VE TEST-ÖLÇÜM İŞLEMLERİ</b> .....	<b>46</b>
5.1    Santralin Kurulumu ve İşletmeye Alınması .....	46
5.2    Test ve Ölçüm .....	49
5.2.1    ABB Aurora İzleme Sistemi .....	49
5.2.2    Solar Test Cihazı Ölçümleri .....	51
5.2.3    Elektriksel Test Cihazı ile Yapılan Test ve Ölçümler .....	54
5.2.4    Evirici Çıkışında Yapılan Ölçümler .....	56
5.2.5    Yük Bankı Deneyleri .....	59
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇ</b> .....	<b>63</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>64</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>69</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1 Bell laboratuvarları solar hücre ürün tanıtımı.....	10
Şekil 3.2 Fotovoltaik hücrenin katmanları.....	11
Şekil 3.3 Polikristal ve monokristal fotovoltaik hücreler .....	12
Şekil 3.4 İnce film fotovoltaik hücre .....	13
Şekil 3.5 FV hücrenin eşdeğer devre modeli .....	13
Şekil 3.6 Fotovoltaik hücrenin I-V ve güç karakteristiği.....	14
Şekil 3.7 Fotovoltaik sistemlerde kullanılan örnek bir şarj regülatörü .....	15
Şekil 3.8 Jel akü .....	16
Şekil 3.9 Mikro evirici .....	17
Şekil 3.10 Şebeke bağlantılı dizi evirici .....	18
Şekil 3.11 Merkezi evirici.....	18
Şekil 3.12 Fotovoltaik sistemlerde kullanılan diğer ekipmanlar .....	19
Şekil 3.13 Şebekeden bağımsız FV sistem temel prensip şeması.....	20
Şekil 3.14 PAÜ TEE solar aydınlatma direği .....	20
Şekil 3.15 Şebeke bağlantılı FV sistem temel prensip şeması.....	21
Şekil 3.16 Şebeke bağlantılı DESKİ GES-1 FV santrali .....	21
Şekil 3.17 Şebeke bağlantılı akü depolamalı evirici.....	22
Şekil 4.1 PAÜ Temiz Enerji Evi.....	23
Şekil 4.2 Kyocera KC125GHT-2 FV modül genel görünümü .....	23
Şekil 4.3 Fotovoltaik modül grubunun genel görünümü .....	24
Şekil 4.4 Fotovoltaik panel elektriksel bağlantı şeması.....	24
Şekil 4.5 FV panel grubu çıkışındaki SPD kutusu.....	25
Şekil 4.6 ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB model evirici .....	25
Şekil 4.7 Temiz Enerji Evi FV sistem şebeke entegrasyonu prensip şeması....	26
Şekil 4.8 ABB sizing tool lokasyon seçim ekranı .....	28
Şekil 4.9 ABB sizing tool FV modül seçim ekranı.....	29
Şekil 4.10 ABB sizing tool evirici seçim ekranı.....	29
Şekil 4.11 ABB sizing tool FV modül konfigürasyon ekranı.....	30
Şekil 4.12 ABB sizing tool çıktısına ait ekipman bilgi ekranı.....	30
Şekil 4.13 ABB sizing tool çıktısına ait MPP bilgi ekranı .....	30
Şekil 4.14 6 mm <sup>2</sup> H1Z2Z2-K solar kablo .....	32
Şekil 4.15 NVV (NYM) 05VV-U / 05VV-R kablo .....	34
Şekil 4.16 Sistemin tek hat şeması.....	35
Şekil 4.17 PAÜ Temiz Enerji Evi modeli.....	36
Şekil 4.18 PAÜ Temiz Enerji Evi PVSOL modeli kuşbakışı görünümü .....	36
Şekil 4.19 PAÜ Temiz Enerji Evi çatısındaki FV modüllerin yerleşim ölçüleri .....	37
Şekil 4.20 PAÜ Temiz Enerji Evi çatısındaki FV modüllerin solar-kolektörler üzerindeki gölgeleme etkisinin PVSOL benzetimi .....	37
Şekil 4.21 Işınım geliş açısı grafiği.....	38
Şekil 4.22 Sistemin PVSOL elektriksel modeli .....	38
Şekil 4.23 Evirici çıkışı için aylara göre enerji üretiminin tahmin edilmesi ....	39
Şekil 4.24 Şebeke bağlantılı FV santralin MATLAB Simulink modeli .....	41
Şekil 4.25 Benzetim için kullanılan ışınım ve sıcaklık grafiği .....	42

Şekil 4.26	MATLAB Simulink FV panel elektriksel veri giriş paneli .....	42
Şekil 4.27	FV panel 1000 W/m <sup>2</sup> ışınım değeri için, çıkış gerilimi ve güç grafiği .....	43
Şekil 4.28	Evirici parametre ekranı .....	43
Şekil 4.29	Evirici çıkışı harmonikli gerilim dalga şekli .....	44
Şekil 4.30	Filtre edilmiş AC şebeke gerilim ve akım dalga şekli .....	44
Şekil 4.31	MATLAB Simulink benzetimde kullanılan şebeke parametreleri ..	45
Şekil 5.1	FV santral evirici ünitesi ve şebeke entegrasyon panosu .....	47
Şekil 5.2	FV santral şebeke entegrasyon panosu iç donanımı .....	47
Şekil 5.3	Çift yönlü elektronik elektrik sayacı tesis görünümü .....	48
Şekil 5.4	ABB dashboard ana ekran görüntüsü .....	49
Şekil 5.5	ABB Dashboard`da sistemin toplam çıkış gücü .....	50
Şekil 5.6	ABB Dashboard`da sistemin toplam çıkış gücü eğrisi .....	50
Şekil 5.7	FV modül çerçevesi toprak geçiş direnci ölçümü için kurulan sistem .....	51
Şekil 5.8	FV dizi açık devre gerilimi, FV dizi kısa devre akımı ve FV hücre – çerçeve arası izolasyon direnci ölçümü için kurulan sistem .....	52
Şekil 5.9	Çerçeve toprak geçiş direnci, dizi açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve izolasyon direnci ölçüm sonuçları .....	52
Şekil 5.10	Solar Survey ışınım ve sıcaklık ölçümleri .....	53
Şekil 5.11	Solar Survey açı ve konum ölçümleri .....	53
Şekil 5.12	Kaçak akım rölesi testi için elektriksel tesisat test cihazının tesisi ..	54
Şekil 5.13	Kaçak akım rölesi testleri .....	55
Şekil 5.14	L-PE çevrim empedansı ölçüm düzeneği .....	55
Şekil 5.15	L-PE çevrim empedansı ölçüm sonucu .....	56
Şekil 5.16	Evirici çıkışı için güç kalitesi ölçüm düzeneği .....	56
Şekil 5.17	Evirici çıkışı ölçüm değerleri .....	57
Şekil 5.18	Evirici çıkışı gerilim harmoniği ölçümleri .....	58
Şekil 5.19	Evirici çıkışı akım harmoniği ölçümleri .....	59
Şekil 5.20	Evirici çıkışı rezistif yük bankı test düzeneği .....	60
Şekil 5.21	500 W`lık rezistif yük için evirici çıkış değerleri .....	61
Şekil 5.22	2500 W`lık rezistif yük için evirici çıkış değerleri .....	61
Şekil 5.23	Yük kademeleri sıfır pozisyonu için evirici çıkış değerleri .....	62

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 4.1:</b> Kyocera KC125GHT-2 FV modülünün elektriksel verileri .....	<b>24</b>
<b>Tablo 4.2:</b> ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB evirici DC elektriksel özellikleri .....	<b>26</b>
<b>Tablo 4.3:</b> ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB evirici AC elektriksel özellikleri .....	<b>26</b>
<b>Tablo 4.4:</b> 6 mm <sup>2</sup> H1Z2Z2-K solar kablo teknik özellikleri .....	<b>32</b>
<b>Tablo 4.5:</b> NVV (NYM) 05VV-U / 05VV-R kablo teknik özellikleri.....	<b>34</b>
<b>Tablo 4.6:</b> Sistem PVSOL benzetim sonuçları.....	<b>39</b>
<b>Tablo 4.7:</b> Modül alanı başına PVSOL benzetim sonuçları.....	<b>40</b>
<b>Tablo 4.8:</b> FV sistem PVSOL benzetimi enerji bilançosu .....	<b>40</b>
<b>Tablo 5.1:</b> FV santral şebeke entegrasyon ekipmanı.....	<b>46</b>

## SEMBOL LİSTESİ

$I$	: Hücre tarafından üretilen akım[A]
$I_D$	: Diyot akımı [A]
$I_L$	: Güneş ışınımı etkisinden oluşan elektrik akımı [A]
$I_{mpp}$	: Maksimum güç akımı [A]
$I_{sc}$	: Kısa devre akımı [A]
$I_{SH}$	: Şönt direnç üzerinden geçen akım [A]
$I_{1\sim}$	: Monofaze AC hat akımı [A]
$I_{3\sim}$	: Trifaze AC hat akımı [A]
$k$	: Boltzmann sabiti [J/K]
$k_{CU}$	: Öziletkenlik katsayısı [ $m/(\Omega \cdot mm^2)$ ]
$l$	: Kablo uzunluğu [m]
$L$	: Faz iletkeni
$n$	: Adet (hücre, modül, dizi)
$N$	: Nötr iletkeni
$P$	: Nominal güç [W]
$P_{mpp}$	: Maksimum güç [W]
$P_{1\sim}$	: Monofaze nominal güç [W]
$P_{3\sim}$	: Trifaze nominal güç [W]
$PE$	: Koruma iletkeni
$q$	: Elektron yükü [C]
$R_{iso}$	: İzolasyon direnci [ $\Omega$ ]
$R_S$	: Dış kontak direnci [ $\Omega$ ]
$R_{SH}$	: Şönt direnç [ $\Omega$ ]
$s$	: Kablo kesiti [ $m^2$ ]
$T$	: Ortam sıcaklığı [ $^{\circ}C$ ]
$U$	: Şebeke gerilimi [V]
$U_{mpp}$	: Maksimum güç gerilimi [V]
$U_{mpp-dizi}$	: Dizinin maksimum güç gerilimi [V]
$U_{mpp-modül}$	: Modülün maksimum güç gerilimi [V]
$U_{OC}$	: Açık devre gerilimi [V]
$U_{OC-dizi}$	: Dizinin açık devre gerilimi [V]
$U_{OC-modül}$	: Modülün açık devre gerilimi [V]
$V$	: Hücre çıkış gerilimi [V]
$Z_l$	: Çevrim Empedansı [ $\Omega$ ]
$\%e_{AC}$	: AC gerilim düşümü [%]
$\%e_{DC}$	: DC gerilim düşümü [%]
$\%e_{ACT}$	: Toplam AC gerilim düşümü [%]

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ABD</b>	:	Amerika Birleşik Devletleri
<b>AC</b>	:	Alternative Current; Alternatif Akım
<b>ADP</b>	:	Ana Dağıtım Panosu
<b>AEK</b>	:	Alternatif Enerji Kaynakları
<b>ARC</b>	:	Anti Reflecting Coating; Yansıma Azaltıcı Kılıf
<b>DC</b>	:	Direct Current; Doğru Akım
<b>EP</b>	:	Evirici Panosu
<b>EPDK</b>	:	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
<b>FDP</b>	:	Fen-Edebiyat Fakültesi Dağıtım Panosu
<b>FV</b>	:	Fotovoltaik
<b>MCB</b>	:	Miniature Circuit Breaker; Minyatür Devre Kesici
<b>MGTS</b>	:	Maksimum Güç Takip Sistemi
<b>MPP</b>	:	Maximum Power Point; Maksimum Güç Noktası
<b>MPPT</b>	:	Maximum Power Point Tracking; Maksimum Güç Noktası İzleme
<b>PAÜ</b>	:	Pamukkale Üniversitesi
<b>PF</b>	:	Power Factor; Güç Faktörü
<b>RCD</b>	:	Residual Current Device; Kaçak Akım Rölesi
<b>SPD</b>	:	Surge Protection Device; Darbe Koruma Cihazı
<b>TEE</b>	:	Temiz Enerji Evi
<b>THD</b>	:	Total Harmonic Distortion; Toplam Harmonik Bozulma
<b>TN</b>	:	Terre Neutre; Toprak Nötr
<b>TT</b>	:	Terre Terre; Toprak Toprak

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca insani, ahlaki değerleri ile örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum, ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocalarım, Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na ve Doç. Dr. Engin ÇETİN'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca tezin uygulama kısmında teknik bilgilerini benden esirgemeyen Elektrik Teknikeri Levent ERBİL'e, simülasyon, modelleme çalışmalarında her zaman destek olan Arş. Gör. Mustafa TÜMBEK ve Arş. Gör. Akif DEMİRÇALI'ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı, bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve benden maddi-manevi desteğini esirgemeyen aileme ve dostlarıma ithaf ederim.

**Nurlan MAJİDZADE**  
Denizli, Kasım-2018

# 1. GİRİŞ

Fotovoltaik (FV) sistemler, teknolojik gelişmeler ve enerji ihtiyacındaki artışla birlikte, dünya enerji piyasasında hızla artan bir tanınırlık ve taleple karşı karşıya kalmıştır. İlk solar hücrenin üretildiği 1954 yılından bu yana, %4'ler civarında seyreden FV modül verimleri %16'lar seviyesine yükselmiş, watt başına 500 USD'yi bulan hücre maliyetleri ise 50 USD-cent seviyesine inmiştir. Bu durum, FV sistemler üzerine yapılan bilimsel Ar-Ge faaliyetlerinin ve beraberinde süregelen küresel enerji krizlerinin bir sonucu olarak karşımıza çıkmıştır.

FV sistemler, şebeke bağlantılı (on-grid) ve şebekeden bağımsız (off-grid) sistemler olarak temelde ikiye ayrılabilir. Şebeke bağlantılı sistemler, güneş enerjisinden ürettiği elektrik enerjisini doğrudan şebekeye aktarırken, şebekeden bağımsız sistemler, enerji hatlarının ulaşamadığı bölgelerde ihtiyaç halinde kurulan sistemlerdir. Gerek büyük ölçekli olmaları, gerekse üretilen elektrik enerjisinin tüketilen enerji ile birlikte mahsuplaşılabilir olması gibi nedenlerle, şebeke bağlantılı FV sistemlerin pazar payının yüksek olduğu, rahatlıkla ifade edilebilir.

Yapılan bu çalışmada; Pamukkale Üniversitesi Kınıklı Yerleşkesi'nde yer alan Temiz Enerji Evi'nde kurulu 5 kW fotovoltaik modül gücüne sahip şebekeden bağımsız FV sistemin Temiz Enerji Evi çatısında kurulu 2,5 kW'lık bölümünün, yapılacak tasarımla ulusal enterkonnekte şebekeye entegrasyonu ele alınmıştır. Çalışma, toplamda altı bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümü, yapılan çalışmanın bölümlerini özetler niteliktedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, FV sistemler ile ilgili genel bir literatür değerlendirmesi sunulmuştur. Dünya çapında FV sistemler üzerine yapılan tez, makale, bildiri faaliyetlerinden; ağırlıklı olarak şebeke bağlantılı sistemler üzerine yapılan faaliyetler ve bu faaliyetlerin ışığında, sunulan bu çalışmanın genel akademik literatür içerisindeki yeri gözlemlenmeye gayret edilmiştir.

Üçüncü bölümde; FV sistem kavramı, FV hücre yapısı, FV sistem bileşenleri (akü, evirici, şarj regülatörü v.b.), şebeke bağlantılı FV sistemler, şebekeden bağımsız FV sistemler gibi hususlara değinilmiştir. Bu bölümün hazırlanmasındaki amaç; araştırmacılara, şebeke bağlantılı bir FV sistem üzerine yapılan bu çalışmayı incelemeyi önce, FV sistemlerle ilgili temel kavramları tanıtabilmektir.

Tezin dördüncü bölümünde, çalışma kapsamında sunulan şebeke bağlantılı FV santralin tasarım aşamaları irdelenmiştir. Santral kurulumundan önce yapılan ABB StringSizer yazılım analizleri, elektrik tek hat şeması oluşturma aşamaları (gerilim düşümü, akım taşıma kapasitesi hesapları v.b.), bununla ilintili olarak şalt ekipmanı seçimi, evirici seçimi ve evirici – FV modül uyum süreçleri, PVSOL yazılımında yapılan teknik analiz ile sistemin MATLAB Simulink benzetimleri gibi unsurlara, bu bölümde değinilmiştir.

Şebeke bağlantılı FV santralin kurulum, devreye alma ve test – ölçüm prosedürleri, çalışmanın beşinci bölümünde yer almaktadır. Burada; santralin şebeke entegrasyonu ile ilgili ekipman montaj aşamaları, DC kısım ile ilgili test ve ölçümler (izolasyon testi, dizi akım ve gerilim ölçümleri), AC kısım ile ilgili elektriksel test ve ölçümler (kaçak akım rölesi testleri, kısa devre çevrim empedansı ölçümleri) ile güç kalitesi analizörü kullanılarak yapılan güç kalitesi analizleri bulunmaktadır. Bu test ve ölçümlerin yanı sıra, santralin on-line izlenmesine olanak sağlayan ABB monitoring yazılımı da yine bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmanın altıncı ve son bölümünde de, şebeke bağlantılı FV santralin kurulum ve işletme koşullarına dair genel bir değerlendirme yapılmış, yapılan bu çalışma ışığında gelecekte yapılması düşünülen benzer faaliyetlere ilişkin bir projeksiyon tutulmaya çalışılmıştır.

Yukarıda bahsi geçen hususlarla birlikte sunulan bu çalışmanın, ülkemiz FV sistem entegrasyon faaliyetlerini destekler nitelikte olması amaçlanmıştır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bilindiği üzere FV santraller, son yıllarda tüm dünyada yoğun bir araştırma ve uygulama konusu haline gelmiştir. Öyle ki; birkaç wattlık deneysel uygulamalardan binlerce megawattlık büyük ölçekli santrallere kadar FV sistem yapılanmaları söz konusu olmaktadır. Yapılan bu çalışmada da, FV modül gücü 2,5 kW, evirici gücü ise 2,0 kW olan mikro ölçekli bir santralin tasarım, kurulum, işletmeye alma ve işletme esnasındaki elektriksel durumuna yönelik test ve ölçüm safhaları irdelenmiştir.

Çalışmanın içeriğine detaylı olarak girmeden önce, çalışma ile ilgili literatür verileri incelenmiş ve netice olarak aşağıda sunulan literatür bilgisi elde edilmiştir. Sunulan bu çalışma, ilgili literatür bilgisi de incelendiğinde, gerek santralde kullanılan ekipman muhteviyatı, gerek tasarım kriterleri, gerekse santralin bulunduğu ortamın meteorolojik koşulları dikkate alındığında kendi alanında tek diyebileceğimiz bir çalışma olmuştur.

Geleneksel elektrik enerji üretim yöntemlerinde kullanılan hammadde kaynaklarının hızla tükenme eğilimi içerisinde girmesi, hammadde fiyatlarının artması, fosil yakıtlarının çevreye ve insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri, kullanımlarındaki birtakım zorluklar, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine olan ilgiyi artırmıştır. Buna bağlı olarak, Alternatif Enerji Kaynakları (AEK) üzerine yapılan çalışma ve uygulamalar, son yıllarda artan bir ivme kazanmıştır. Bilindiği üzere, FV santraller son yıllarda tüm dünyada yoğun bir araştırma ve uygulama konusu haline gelmiştir.

Enerji tüketiminin tüm dünyadaki sektörlere göre dağılımına bakıldığında, konutlardaki tüketim oranının payının önemli ölçüde yüksek olduğu görülmektedir. Dünya çapında bu oran, %30 ila %40 arasında değişmektedir. Türkiye açısından durum değerlendirilirse; Enerjisi Piyasa Düzenleme Kurumu (EPDK) Elektrik Piyasası Sektör Raporu Mayıs 2018 verilerine göre, faturalanan elektrik tüketiminin dağılımı sırasıyla; %44,79 sanayi, %28,16 ticarethane,

%21,22 mesken, %3,95 sulama ve %1,88 aydınlatma şeklinde değişmektedir (EPDK, 2018).

FV sistemler, en önemli alternatif enerji üretim kaynaklarından birisidir. Son yıllarda FV sistem maliyetlerinin ciddi oranda azalması ve teknolojilerindeki çığır açıcı gelişmelere bağlı olarak, FV sistemler önemli birer enerji üretim kaynağı olarak, global dünyadaki yerini almaktadır. Kazanılmış bu gelişim ivmesi yakın gelecek için, FV sistemlerin enerji üretimindeki payının daha da artacağını göstermektedir.

FV sistemler şebekeye bağlantı türüne göre; şebeke bağlantısız (off-grid) ve şebeke bağlantılı (on-grid) olarak iki sınıfta değerlendirilebilir. Şebekeden bağımsız sistemler genellikle şebeke elektriğinin olmadığı, şebeke elektriğinin sık sık kesildiği, şebeke hattının tesisinin zor ya da ekonomik olmadığı yerlerde, nispeten düşük güç ve düşük enerji talebinin sağlanması için kullanılırlar. Ayrıca FV sistemler, yerleşim yerlerinden uzak olan bölgelerde; acil durum aydınlatma sistemleri, sokak aydınlatması, sulama sistemleri, sulama pompaları, telekomünikasyon ve trafik işaretleri gibi sistemlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için de iyi birer çözüm olmaktadır. Şebekeden bağımsız bir FV sistem genel olarak; FV modül, şarj regülatörü, akümülatör (akü grubu) ve eviriciden oluşmaktadır (Alkan ve diğ, 2014).

Şebekeden bağımsız sistemlerde, güneş enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda enerji talebinin karşılanması için hibrid yapıda olma gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yapılan bir çalışmada, kurşun akülü batarya sistemine sahip şebekeden bağımsız bir FV sistem için gerilim kontrolü incelenmiştir. Farklı atmosfer koşullarında bağımsız yüklerin güç ihtiyaçlarının sorunsuz bir şekilde karşılanması amaçlanmış ve buna uygun olarak bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır (Boukebbous ve diğ, 2014). Başka bir çalışmada ise; yakıt pili, FV modül ve batarya kullanan hibrid bir sistemle beslenen bağımsız bir sokak aydınlatma düzeneğinin boyutlandırılmasına yönelik optimizasyon süreci ele alınmıştır (Lagorse ve diğ, 2009).

Güneş ışınımının yetersiz kaldığı durumlarda veya gece şartlarında ihtiyaç duyulan güç talebinin karşılanmasında, şebeke bağlantılı FV sistemlerin kullanımı optimum bir çözüm olarak görülmektedir. Son yıllarda bu tür sistemlerle ilgili araştırma ve uygulama faaliyetleri artarak devam etmektedir. Bu türden yapılar, aynı zamanda daha büyük güçlerde santrallerin kurulmasına da olanak sağlamaktadır.

Meskun mahallerdeki enerji tüketimi ülkelere göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, Cezayir Enerji Bakanlığı'nın açıklamasına göre, Cezayir'de konutlarda tüketilen enerji miktarı, ülkede tüketilen toplam enerji miktarının yaklaşık %42'lik kısmını oluşturmaktadır. Bu durum kapsamında yapılan bir çalışmada, Cezayir'in kuzeyinde Souidania Köyü'nde yer alan 90 m<sup>2</sup>'lik bir konutun enerji ihtiyacının karşılanması için 1,2 kW gücünde şebekeye bağlı bir FV santral kurulmuştur. Bu bağlamda; konutun günlük, aylık ve yıllık enerji üretim-tüketim verileri incelenmiş, bunlara ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Yaz aylarında, FV sistem tarafından üretilen günlük enerji, konutta tüketilen toplam enerji miktarının %67,6'sına karşılık gelmektedir. Şebekeden satın alınan günlük enerji miktarı, tüketilen enerjinin sadece %32,4'lük kısmına tekabül etmektedir. Ayrıca, yıllık ortalama enerji üretim-tüketim verileri değerlendirildiğinde, FV santralin günlük 2 kWh'lik ilave bir enerji üretimine yol açtığı, üretilen bu enerjinin de şebekeye üretim fazlası olarak verildiği gözlemlenmiştir. Nihayetinde; konutun enerji ihtiyacının yaklaşık %88'lik kısmının kurulan bu FV sistem tarafından karşılandığı sonucuna ulaşılmıştır (Laib ve diğ, 2018).

Yapılan bir başka çalışmada, güneş enerjisi kurulum maliyetlerinin düşmesi ve şebeke entegrasyonuna bağlı olarak sektörel büyüme potansiyeli, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) için incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, geçtiğimiz on yıllık periyotta güneş enerjisi endüstrisi için ortaya çıkan muazzam gelişmelere bağlı olarak FV sistem maliyetleri yaklaşık altı kat düşmüştür. Bu da, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin diğer enerji üretim yöntemleri arasında kayda değer bir yeri olacağını göstermektedir. ABD'de 2006 yılında toplam enerji üretimindeki payı %0,01 olan FV sistemlerin 2016 yılında bu payı %1'e kadar yükselmiştir. Gelecek süreçte FV sistemlerin enerji piyasasındaki

rolünün giderek artması beklenmektedir. Temel projeksiyonlar, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin, diğer enerji üretim çeşitleri göz önüne alındığında 2030`da %5`ler seviyesine, 2050 yılı içerisinde ise %12-17`ler civarına yükselmesi olasıdır. Güneş enerjisi ve enerji depolama gibi teknolojik gelişmelere; artan şebeke esnekliği ve maliyetlerdeki keskin düşüşler ilave edildiğinde, ABD`de tüketilen elektrik enerjisinin dörtte birinden fazlasının güneş enerjisinden sağlanacağı değerlendirilmektedir (Jones-Albertus ve diğ, 2018).

Katar`da yapılan bir çalışmada, şebekeye bağlı FV sistemlerin ekonomik karlılık analizi üzerinde durulmuştur. Katar`da hızla gelişmekte olan sektörel büyümeye bağlı olarak artan enerji ihtiyacının, dağıtık FV sistemlerle karşılanabileceği değerlendirilmiştir. Katar Hükümeti`nin 2030 yılına kadar fosil yakıtlara olan bağımlılığının azaltılmasını amaçladığı ve buna yönelik FV sistemlerin geliştirilmesi için yatırımlar planladığı bilinmektedir. Bu bağlamda, hayata geçirilecek teşviklerle şebekenin enerji ihtiyacının 2020 yılına kadar %2`lik, 2030 yılına kadar ise %20`lik kısmının FV sistemler tarafından karşılanması amaçlanmıştır (Ellabban 2018).

Yaz aylarında sıcak iklimli bölgelerde, soğutma sistemlerine bağlı artan güç ihtiyacını karşılamak için entegre edilmiş FV sistemler ideal bir alternatif olarak kullanılabilir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, Çin`in güneyinde bir iş merkezinde klimaların enerji beslemesi için şebeke bağlantılı bir FV sistem kurulmuştur. Sistemin performansı, meteorolojik koşullar dikkate alınarak; günlük, aylık ve yıllık bazda incelenmiş ve tüm veriler analiz edilmiştir. Sonuçta; soğutma sezonu boyunca sistemin enerji ihtiyacının önemli bir kısmının FV sistemden karşılanabileceği gösterilmiştir (Li ve diğ. 2018).

Malezya`da Malaya Üniversitesi`nde yapılan bir çalışmada, şebekeye bağlı FV sistemde farklı modül tipleri (monokristal, polikristal ve ince film) kullanılarak, 3 ayrı eviriciden alınan sonuçlara göre genel bir sistem-performans analizi yapılmıştır. Sistemde toplam olarak 7.849,58 kWh enerji üretilmiş, FV modüllerin verimliliği %4-11, evirici verimliliği %85,36-%97,15 arasında gözlenmiştir. Elde edilen verilere göre, sistemin yıllık ortalama performansı %89,75 olarak bulunmuştur (Halabi ve diğ, 2018).

Şebeke bağlantılı FV sistemlerin analizinde, çeşitli yazılımlardan faydalanılır. Örneğin; TRNSYS yazılımı kullanılarak, şebekeye bağlı FV sistemlerin uzun dönem performans tahmini yapılabilir. TRNSYS yazılımı, sistemlerin davranışını simüle etmek için kullanılan son derece esnek, grafik tabanlı bir yazılımdır. Yapılan bir çalışmada, tahminleme ile elde edilen verilerle şebekeden ölçülen değerler, TRNSYS yazılımı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar, gerçek değerlere yakın bulunmuştur (Mondol ve diğ, 2007).

Yapılan başka bir çalışmada, Brezilya için şebekeye bağlı FV sistemlerin durum analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, piyasa şartlarına uygun teşvik edici bir tarife politikasının oluşturulması ve dar gelirli konut tüketicisinin bu tarife programına dahil edilmesi önerilmiştir. Ayrıca, Brezilya'nın hammadde (silikon ve güneşlenme) mevcudiyeti bakımından zengin olduğu belirtilerek, FV sistem üretimi için uygun koşullara sahip olduğu vurgulanmıştır. Son olarak, Amazon bölgesindeki yerleşim birimlerinin şebekeden izole dağıtık FV sistemlerle beslenmesinin, ekonomik anlamda uygun bir yöntem olacağı da not edilmiştir (Rüther ve Zilles 2011).

FV sistemlerle ilgili birçok tesis şebekeye alçak gerilim barası üzerinden bağlanmaktadır. Bu da, güç şebekesi üzerinde birçok etki oluşturmaktadır. Meydana gelebilecek etkilerin sistem davranışına tesirlerini önceden bilmek için, sistemin iyi bir şekilde simüle edilmesi gerekir. Yapılan bir çalışmada, tek fazlı şebekeye bağlı bir FV eviricinin MATLAB Simulink modeli geliştirilmiştir. Çalışmada, tek fazlı şebekeye bağlı FV sistemlerin genel davranışları analiz edilmiş ve deneysel sonuçlarla da bu analiz doğrulanmıştır. Çalışmada, yaygın olarak kullanılan basitleştirilmiş bir maksimum güç takip sistemi (MGTS) modelinin aksine, gradyan tabanlı bir MGTS önerilmiş ve önerilen sistemin daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir (Ropp ve Gonzalez 2009).

Başka bir çalışmada, FV sistemlerde kullanılan tek fazlı şebeke bağlantılı eviriciler incelenmiştir. Ele alınan evirici topolojileri; talep kapasiteleri, teknik özellikleri, maliyetleri ve çalışma ömürleri açısından karşılaştırılmıştır. Buna göre, ele alınan topolojilerin uygulama bazında kullanılabilirlik düzeyleri değerlendirilmiştir (Kjaer ve diğ, 2005).

Geleneksel elektrik güç sistemlerinde şebeke genellikle büyük ölçekli güç santralleri tarafından beslenecek şekilde tasarlanmıştır. Belli seviyenin altındaki güç değişimlerine karşı santral tepkileri sınırlı kapasitede olmaktadır. FV sistemler yenilebilir enerji kaynağı sınıfında olup, üretim kapasiteleri ışınım şiddetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yani, FV sistemlerin güç üretimi günün değişik saatlerine bağlı olarak farklılık arz eder. Yapılan bir çalışmada, şebekeye bağlı FV güç üretim yöntemlerinin teknik ve potansiyel problemleri detayları ile ele alınmış ve bu problemlere ilişkin çözüm önerileri sunulmuştur. Çalışmada; FV sistemlerin kurulumunda meydana gelebilecek adalanma, kullanılan sistemlerin neden olacağı harmonikler, elektromanyetik girişim gibi güç kalite problemlerinin de dikkate alınarak planlamaların yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Neticede, güç sistemince sağlanması zorunlu olan teknik gereklilikler dikkate alınarak, sistem güvenilirliğini bozmayacak şekilde planlı bir yapılanmanın daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır (Eltawil ve Zhao 2010). Her ne kadar, yapılan çalışmada, FV sistemlerin potansiyel problemlerinden ve güç sistemi üzerindeki olumsuz etkilerinden söz edilse de, günümüz FV sistemlerdeki teknik gelişmelerin bu problemlerin çoğunun üstesinden geldiği de, yine aynı çalışmada vurgulanmıştır (Eltawil ve Zhao 2010).

İrlanda'da yapılan bir çalışmada, 1,72 kW gücünde çatı montajlı şebeke bağlantılı FV sistemin performans analizi yapılmıştır. Alçak gerilim barasından şebekeye bağlanan sistem, Kasım 2008 ile Ekim 2009 arasında izlenmiştir. Buna bağlı olarak sistem performans parametreleri; aylık, mevsimsel ve yıllık bazda değerlendirilmiştir. Değerlendirilen FV sistem; hücre kayıpları, FV modülü verimliliği, sistem verimliliği, evirici verimliliği, performans oranı, kapasite faktörü vb. performans parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir. FV sistemin günlük enerji üretimi ortalama değeri 2,4 kWh / kWp / gün olarak bulunmuş ve bu değer, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre; sistem veriminin Almanya, Polonya ve Kuzey İrlanda'da bildirilen muadillerine oranla daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur (Ayompe ve diğ, 2011).

Ilıman iklimli bölgelerdeki güneş ışımaya karakteristiği, çoğunlukla şebeke üzerinde kısa süreli dalgalanmalara neden olur. Bu durum, özellikle yüksek yoğunluklu FV sistemlerin bulunduğu düşük voltajlı şebekelerde, güç ve gerilim

değerlerinde öngörülemeyen değişimlere yol açabilir. Yapılan bir çalışmada, güneş ışınımındaki kısa dalgalanmaların, dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, tipik bir senaryo üzerinden benzetim yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır (Woyte ve diğ. 2006).

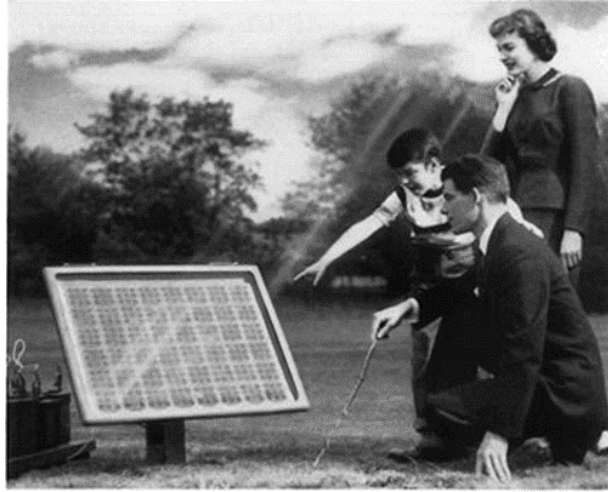
Başka bir çalışmada, şebeke bağlantılı FV sistemlerde parçalı gölgelenme durumunda sistemin göstereceği tepki irdelenmiştir. Çalışmada geliştirilen yöntem; modelleme, benzetim ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır (Drif ve diğ, 2008).

FV hücrelerin / modüllerin verimleri, sıcaklığa bağlı olarak değişir. Yapılan bir çalışmada, ticari sınıf silikon bazlı FV hücrelerin / modüllerin çalışma sıcaklığı ve bunun FV sistem elektriksel performansı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Çalışmada, sıcaklığa bağlı performans değişimleri detaylı bir şekilde sunulmuştur (Skoplaki ve diğ, 2009).

### 3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

#### 3.1 Fotovoltaik Kavramı

“Fotovoltaik” kelimesi, Yunanca “Phos” (Işık) kelimesi ile Alessandro Volta'nın soyadının birleşiminden (İngilizce “Photovoltaic”) oluşturulmuştur. 1839 yılında Fransız fizikçi A. E. Becquerel, elektrolitler üzerinde yaptığı deneyde, elektrotlar arasında oluşan gerilimin elektrolit üzerine düşen ışıktan etkilendiğini gözlemlemiştir. Daha sonra, bu duruma benzer şekilde ışıktan etkilenme olayı, 1876 yılında G. W. Adams ve R. E. Day'ın Selenyum maddesi üzerinde yapılan bir deneyde de gözlenmiştir. Bu hadisenin önemi; ışığın katı bir maddeyi (Selenyum) etkilemiş olmasıdır. 1946 yılında, Charles Fritts %1 verimli Selenyum solar hücreleri geliştirmiştir. Bu aşamada, foto diyotlar fotoğrafçılık alanında kullanılmaya başlanmıştır. 1954 yılı, FV hücreler ve Bell Laboratuvarları için dönüm noktası olarak kabul edilir (Şekil 3.1). Çünkü, %6 verimli silisyum hücreler (modern hücreler), Bell Laboratuvarları'nda Chapin ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Oktik 2001).



Şekil 3.1: Bell Laboratuvarları'nın solar hücre ürün tanıtımı (Perlin 2004)

1960 yılından başlayarak, Silisyum hücreler uzay çalışmalarında enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Oktik 2001).



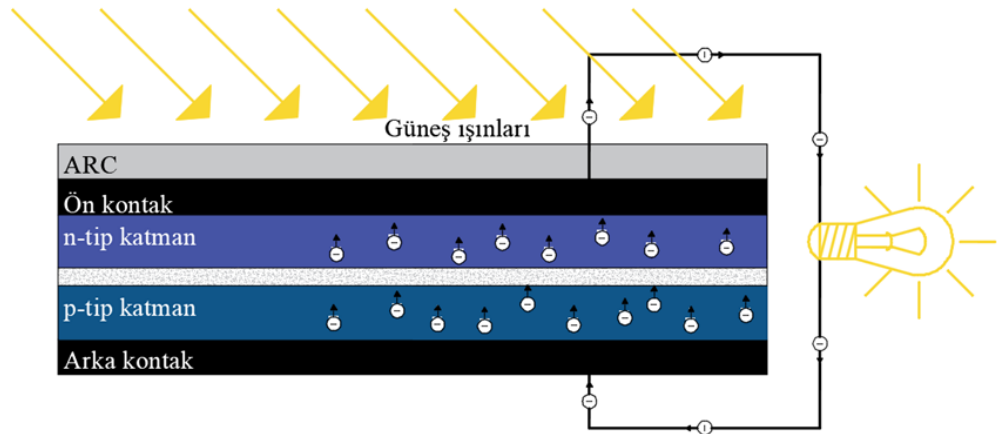
Başlangıcı 1970 yılı sayılan Dünya petrol krizi, öncesinde uzay araştırmaları alanında kendini kanıtlamış, FV hücrelerin verimliliği üzerine yapılan çalışmaları ivmelendirmiştir. Yanı sıra, alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan ar-ge çalışmaları da artmıştır (Oktik 2001).

1970`li yıllarda; Amerika`da, Avrupa ülkelerinde ve Japonya`da, FV hücrelerin geniş ölçekte araştırılması ve geliştirilmesi için büyük bütçeli projeler başlatılmıştır. Bu da, modern FV sanayisinin oluşmasına sebep olmuştur (Oktik 2001).

Tüm bu gelişmeler neticesinde, birçok kuruluş tarafından değişik verimlerde FV hücreler üretilmeye başlanmıştır. En çok dikkati çeken, 2009 yılında Spectrolab firması tarafından %41,5 verimli ve üç eklemlili FV hücrenin geliştirilmesi olmuştur (Oktik 2001).

### 3.2 Fotovoltaik Hücre

Fotovoltaik Hücre (şekil 3.2), yarı iletken maddelerin (daha çok silikon kullanılır) ışıktan etkilenme ilkesine dayalı çalışan katmanlı bir yapıdır. Bu yapı, üzerine düşen güneş ışınımlarını doğrudan elektrik enerjisine çevirir.



şekil 3.2: Fotovoltaik hücrenin katmanları (Bethel ve diğ. 2018)

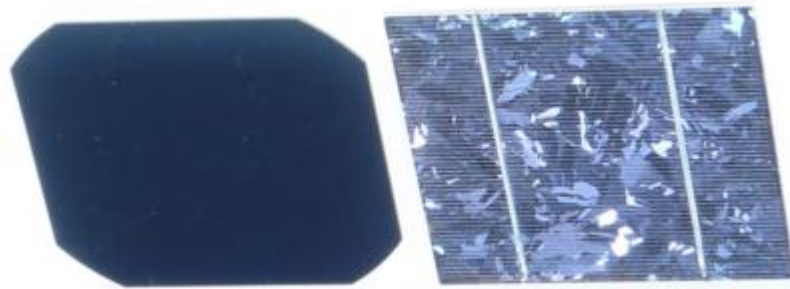
Hücre katmanının en üst tabakası, güneşten gelen ışınımların hücre içerisine nüfuz edebilmesi için yansıma azaltıcı Anti Reflecting Coating (ARC) tabakasıdır. ARC tabakasının altında, n-tip katman (Fosfor maddesi ile katkılandır)

bulunmaktadır. Bu aşamada, Silikon atomları Fosfor atomları ile yer değiştirerek elektron hareketini oluştururlar. Bu tabakanın altına *p*-tip katman (Bor maddesi ile katkılanır) yerleştirilir. Bu katmandan sonra, Bor atomları Silikon atomları ile yer değiştirir ve sonuç olarak milyonlarca hareketli elektron, elektrik akımını doğurur (Sofronova ve diğ. 2016)

FV hücreler, farklı üretim teknolojileri ile oluşturulur. En temel FV hücre çeşitleri; Monokristal Hücreler, Polikristal Hücreler ve İnce Film Hücreler`dir.

Monokristal Hücreler`in (Şekil 3.3) verimleri %17 civarında olup, teknolojik olarak üretim hammaddesini Silisyum oluşturur. Silisyum, doğada kum veya kuvars şeklinde bulunmaktadır. Silisyum oranı (%91) daha çok olan Kuvars işlenerek, Silika elde edilir. Silika`nın Silisyum`a dönüşmesi için birçok kimyasal süreçten geçmesi gerekir. Silisyum, saflaştırma işlemlerine tabi tutularak malzemenin yarı-iletken özelliği artırılır. Saflaştırılmış Silisyum tekrardan eritilerek bir dizi işlem sonrası mono kristal yapı elde edilir (Tucci ve İzzi 2013).

Polikristal Hücreler (Şekil 3.3), yaklaşık %16 civarında verime sahiptir. Bu tip hücrelerin üretim süresi, Monokristal Hücre üretim süresine göre daha kısadır ve ayrıca üretim proseslerinin karmaşıklığı da daha azdır. Bu hücrelerin üretiminde önce Silisyum yüksek sıcaklıkta eritilir ve elde edilen eriyik, kalıplara dökülerek Polikristal Hücre elde etme yoluna gidilir. Polikristal Hücre`deki Silisyum`un kristal kafesinin farklı boyutlarda olması, genel hücre verimini olumsuz etkiler. Bu hücrenin üretiminde, kalıplara dökme neticesinde elde edilen *Wafer* yapılarının verimleri, Monokristal yapılara göre düşük olur (Bethel ve diğ. 2018).



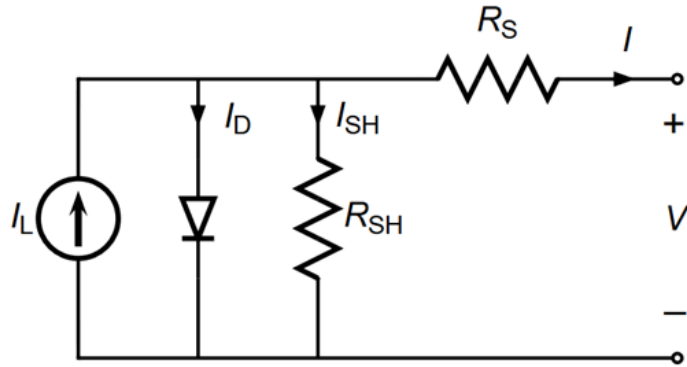
Şekil 3.3: Polikristal (solda) ve monokristal (sağda) FV hücreler (Bethel ve diğ. 2018)

İnce Film Hücreler (Şekil 3.4) ise, Mono ve Poli Kristal hücrelere göre daha düşük verimli hücrelerdir. Bunlardan üretilen FV modüllerin verimleri yaklaşık %12 civarındadır. Polikristal Hücreler`de olduğu gibi hücreyi oluşturan kristal kafeslerinin boyutlarının farklı olması, hücre içi elektron akışına da engel olmaktadır. Bu tip yapılarda, hücre katmanlarının metal oksit yapılarla birbirlerine bağlanması sonucu kısmen daha büyük verimli hücreler elde edilebilmektedir (Yang ve diğ. 2014).



Şekil 3.4: İnce film fotovoltaik hücre (Yang ve diğ. 2014)

Elektriksel açıdan bir FV hücre, Şekil 3.5`te verildiği şekilde bir elektriksel eşdeğer devre şemasına sahiptir.



Şekil 3.5: FV hücrenin eşdeğer devre modeli (Nayan ve Ullah 2015)

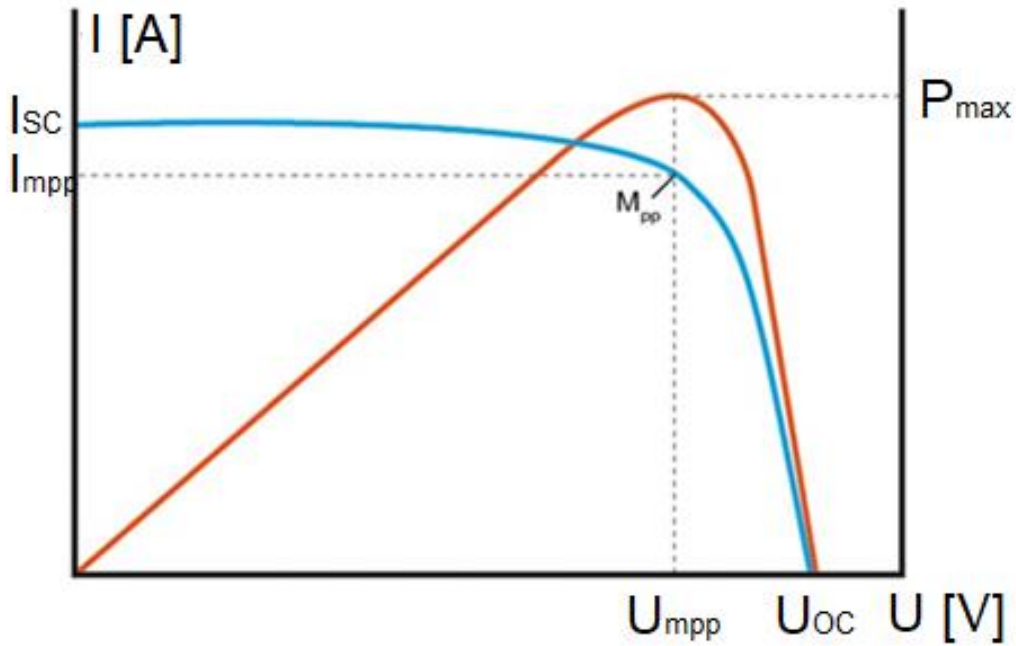
Burada  $I_L$ ; güneş ışınımının etkisinden oluşan elektrik akımını [A],  $I_D$ ; diyot akımını [A],  $I$ ; yük akımını [A],  $R_S$ ; dış kontak direncini [ $\Omega$ ],  $R_{SH}$  ise, dahili kayıpları oluşturan iç direnci [ $\Omega$ ] ifade eder. Buna göre; solar hücre tarafından üretilen akım ve hücre çıkışındaki gerilim, aşağıdaki şekilde formülize edilir.

$$I_L = I_D + I_{SH} + I \quad (3.1)$$

$$V = \frac{kT}{q} n \quad (3.2)$$

Denklem 3.2`de  $k$ ; Boltzmann Sabiti`dir ve  $1.3806 \times 10^{-23}$  J/K`e eşittir.  $q$ ; elektron yükünü ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),  $n$ ; seri bağlantılı hücrelerin sayını ifade eder.

FV hücrenin akım-gerilim (I-V) karakteristiği ise, Şekil 3.6`da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Fotovoltaik hücrenin I-V ve güç karakteristiği

Şekil 3.6`da da görüldüğü gibi, FV hücreden elde edilebilecek en büyük güç değeri, maksimum güç noktasında ( $P_{mpp}$ ) oluşur. Bu nokta, FV hücrenin nominal çalışma şartlarında oluşan Maksimum Güç Akımı ( $I_{mpp}$ ) ile FV hücre uçlarından elde edilen Maksimum Güç Gerilimi`nin ( $U_{mpp}$ ) kesişiminden elde edilir. Şu husus unutulmamalıdır ki; FV hücreden elde edilebilecek maksimum akım ( $I_{mpp}$ ) değeri ile maksimum gerilim değeri ( $U_{mpp}$ ) her zaman, FV hücre uçlarının kısa devre edilmesi ile oluşan kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ile FV hücre uçlarının açık devre edilmesi halinde uçlar arasında ölçülen açık devre geriliminin ( $U_{oc}$ ) altındadır.

### 3.3 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

FV sistemlerin gerek teknik gerekse ekonomik anlamda en önemli bileşeni FV hücredir. FV hücre ile ilgili bilgiler, Bölüm 3.2'de sunulmuştur. Bu bölümde ise, FV Sistemleri oluşturan diğer bileşenlere ait bilgilere değinilmiştir. Bu bileşenler; şarj regülatörü, akü, evirici ve diğer sistem bileşenleri şeklinde sıralanmıştır

#### 3.3.1 Şarj Regülatörü

FV sistemlerde kullanılan Şarj Regülatörleri, FV modül ile sistemde yer alan akü ve DC yük ya da evirici ünitesi arasında yer alan bir ünedir. Görevi; gün içerisinde değişen ışınım şiddetine bağlı olarak farklılık gösteren FV modül DC akım ve gerilim değerlerini, akü şarjı, DC yük beslemesi veya evirici giriş modülü için uygun hale getirmektir. Şekil 3.7'de, örnek bir şarj regülatörü sunulmuştur.



Şekil 3.7: Fotovoltaik sistemlerde kullanılan örnek bir şarj regülatörü (Photonic Universe 2018)

Şarj regülatörlerinin seçiminde; FV modül grubunun çıkış akım ve gerilim değerleri dikkate alınır. Seçim yapılırken, özellikle sistem verimini arttırıcı özelliklere sahip şarj regülatörlerinin (Maximum Power Point Tracking – MPPT) seçimi yerinde olacaktır. Ticari ürün olarak sunulan şarj regülatörleri genellikle 12

V, 24 V ve 48 V DC sistemlere uygun olarak üretilirler. Üzerlerinde FV modül, akü ve genellikle en fazla 1 A değerli DC yük beslemesi yapabilecek (örneğin DC lamba beslemesi) bağlantı terminalleri bulunur.

### 3.3.2 Akü

Aküler (Şekil 3.8), FV sistemlerde enerji depolama görevini üstlenirler. FV sistemlerdeki FV modüller, ancak güneş ışınımı mevcutken yük beslemesi yapabilir. Bununla birlikte, ışınımın yeterli olmadığı veya gece periyodunda, yüklerin ihtiyacı olan enerji, akülerce sağlanır. Aküler, özellikle şebekeden bağımsız sistemlerin önem arz eden ekipmanı arasındadır.



Şekil 3.8: Jel akü (Gold Light Power, 2018)

FV sistemlerde kullanılan batarya grupları; 12 V, 24 V ve 48 V DC gerilim elde edilecek şekilde tesis edilir. Kurşun-asit ve tam kapalı/tam bakımsız olarak üretilen akülerin solar sistemlere yönelik derin şarj ve derin deşarj özellikleri daha iyi olan tipleri, *Jel Akü* olarak adlandırılır.

### 3.3.3 Evirici

FV sistemlerde kullanılan eviricilerin görevi, FV modüllerce üretilen veya akülerde depo edilen DC elektrik enerjisini, 1 faz (L1-N gerilimi 230 V / 50 Hz) veya 3 faz (L1-L3 gerilimi 400 V / 50 Hz) AC elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bir fazlı eviriciler 3 iletkenli (faz, nötr, koruma), üç fazlı eviriciler ise 5 iletkenli (3 faz, nötr, koruma) imal edilirler.

Eviriciler, FV sistemin şebeke bağlantılı (on-grid) veya şebekeden bağımsız (off-grid) olmasına göre *Şebeke Bağlantılı Evirici* veya *Şebekeden Bağımsız Evirici* olarak adlandırılır. Şebeke Bağlantılı Eviriciler, şebeke gerilim ve frekansını referans olarak kullanarak çalıştığı için, her iki evirici tipinin birbirlerine ikame olarak kullanılması mümkün değildir.

FV sistemlerde kullanılan eviriciler, güçlerine göre; *Mikro Evirici* (Micro Inverter), *Dizi Evirici* (String Inverter) ve *Merkezi Evirici* (Central Inverter) olarak üç ana sınıfta değerlendirilir. Mikro Eviriciler (Şekil 3.9), tek bir FV modüle bağlanır ve genellikle birkaç kilowattlık konut uygulamalarında tercih edilir. Her bir modül bağımsız eviricilere tesis edildiğinden bu tür bir sistemde enerji dönüşüm verimliliği daha yüksek olacaktır. Ayrıca, herhangi bir evirici arıza yaptığında sadece o eviriciye bağlı FV modülün enerji üretimi duracaktır. Bununla birlikte, ilk yatırım ve kurulum maliyetleri watt başına maliyetler göz önüne alındığında diğer evirici tiplerine göre yüksektir.



Şekil 3.9: Mikro evirici (Hua Hin, 2018)

Dizi Eviriciler (Şekil 3.10), genellikle 1.2 kW ile 120 kW (monofaze 1.2 kW – 6 kW, trifaze 10 kW – 120 kW) arasında üretilirler. En büyük avantajları, büyük güçlü santrallerde FV modüllerin gruplanarak tesis edilmesi, arızalı dizi durumunda sadece o dizinin devre dışı kalması, böylelikle santralin tamamen enerji üretemez konuma geçmesinin önlenmesidir.





Şekil 3.10: Şebeke bağlantılı dizi evirici (ABB, 2018<sup>a</sup>)

Merkezi Eviriciler (Şekil 3.11), genellikle 0.5 kW ile 2.3 MW arasında üretilirler Özellikle birkaç megawattlık büyük güçlü santrallerde kullanım için tasarlanmışlardır. En önemli avantajları, evirici arıza tespitinin ve arızaya müdahalenin hızlı yapılabilmesidir. Böylelikle santral görece kısa sürede devreye alınabilmekte ve üretim kayıpları minimuma indirilebilmektedir.



Şekil 3.11: Merkezi evirici (ABB, 2018<sup>a</sup>)

### 3.3.4 Diğer Sistem Bileşenleri

FV sistemlerin en önemli ekipmanını FV modüller, şarj regülatörleri, aküler ve eviriciler oluşturmakla birlikte, bu ekipmanın tamamlayıcısı nitelikteki diğer malzemelerden de bahsetmekte fayda vardır.



Bunlar; FV santrali yüksek gerilim enterkonnekte şebekeye entegre etmek için kullanılan (şebeke bağlantılı sistemlerde) yükseltici (step-up) tip transformatörler, santral ekipmanını korumaya yönelik devre kesiciler, kaçak akım röleleri, sigortalar, parafudrlar, güç şalterleri gibi şalt ekipmanı, santralin kan damarları niteliğindeki kablo ve iletkenler, enerji ölçüm analizörleri ile tek ve çift yönlü elektrik sayaçları şeklinde sıralanabilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Fotovoltaik sistemlerde kullanılan diğer ekipmanlar (South China Electric (Xiamen) Co., Ltd, 2018, Siemens AG, 2018, Ege Kablo, 2011, Köhler, 2018)

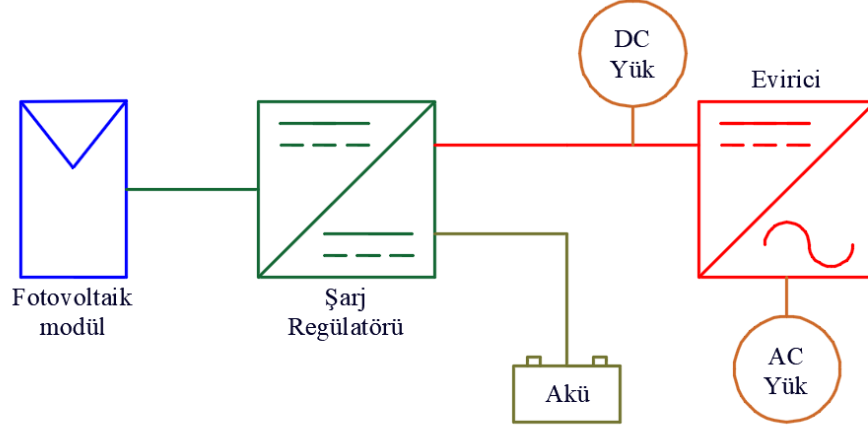
### 3.4 Fotovoltaik Sistem Tipleri

FV sistemler, Ulusal Enterkonnekte Şebeke`ye bağlantı durumuna göre ikiye ayrılırlar. Ulusal Enterkonnekte Şebeke`den bağımsız çalışan sistemlere *Şebekeden Bağımsız FV Sistemler* (Off-Grid veya Stand-Alone PV System), Ulusal Enterkonnekte Şebeke`ye bağlı çalışan sistemlere de *Şebeke Bağlantılı FV Sistemler* (On-Grid veya Grid-Tie PV System) adı verilir.

#### 3.4.1 Şebekeden Bağımsız Sistemler

Şekil 3.13`ten de görüldüğü üzere, Şebekeden Bağımsız Sistemler`de FV modüle ilave olarak, DC beslemeli yükler için şarj regülatörü ve akü grupları, AC beslemeli yükler içinse evirici bulunur. Bu ekipman ile ilgili bilgiler Bölüm 3.3`te

sunulmuştu. Eğer AC şebeke entegrasyonu söz konusu ise, o zaman akü kullanımı gerekli değildir. Bununla birlikte, son zamanlarda, AC şebeke entegrasyonlu ve akü destekli eviriciler de kullanılmaktadır.



Şekil 3.13: Şebekeden bağımsız FV sistem temel prensip şeması

Şebekeden bağımsız FV sistemler, özellikle şebekenin ulaşamadığı, kır evi, baz istasyonu, aydınlatma direği (Şekil 3.14), su pompa istasyonu gibi noktalardaki enerji ihtiyacını karşılamak üzere tesis edilirler.

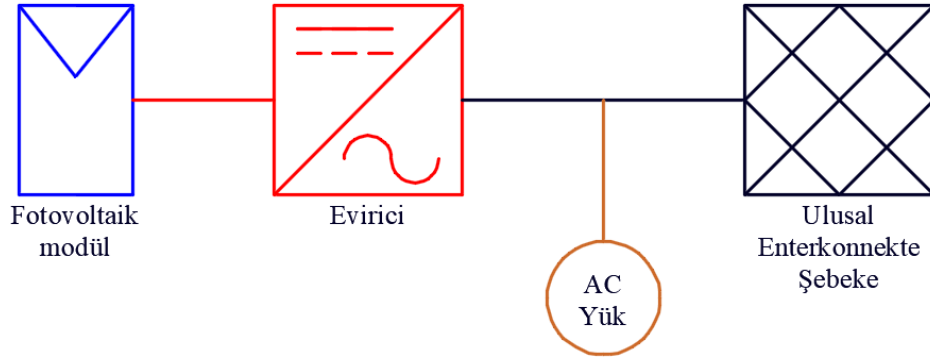


Şekil 3.14: PAÜ TEE solar aydınlatma direği

### 3.4.2 Şebeke Bağlantılı Sistemler

Şebeke Bağlantılı FV Sistemler, FV santralde üretilen elektrik enerjisinin evirici üzerinden ya doğrudan ya da evirici çıkışına bağlanacak yükseltici tip

transformatör ile yüksek gerilim seviyesine (15 kV, 31,5 kV, 34,5 kV veya 154 kV) çıkarılarak Ulusal Enterkonekte Şebeke`ye aktarılması prensibi ile çalışır. Şekil 3.15`te, temel bir Şebeke Bağlantılı FV Sistem prensip şeması sunulmuştur. Şebeke bağlantılı örnek bir uygulama olarak ise, Denizli-DESKİ GES-1 FV santral görünümü Şekil 3.16`da verilmiştir.



Şekil 3.15: Şebeke bağlantılı FV sistem temel prensip şeması



Şekil 3.16: Şebeke bağlantılı DESKİ GES-1 FV santrali (Çetin ve Yilanci, 2016)

Şebeke bağlantılı FV santraller, FV modül ve eviriciden (gerekli ise yükseltici tip transformatörlü) ibarettir. Bu tür sistemlerde, özellikle de konut uygulamaları dışında kalan endüstriyel büyük saha uygulamalarına yönelik santrallerde, akü ile enerji depolaması ihtiyacı yoktur. Ancak Bölüm 3.4.1`de

bahsedildiği üzere, konut tipi şebeke entegrasyon uygulamalarında enerji depolama amaçlı akü destekli şebeke bağlantılı eviriciler de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Şebeke bağlantılı akü depolamalı evirici (ABB, 2018<sup>b</sup>)

## 4. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SANTRALİN TASARIM AŞAMALARI

### 4.1 Evirici Seçimi ve Fotovoltaik Modül – Evirici Uyumunun Kontrolü

Şebekeden bağımsız FV santralin tasarım ve kurulum aşamalarının tamamı, Üniversitemiz Temiz Enerji Evi'nde (Şekil 4.1) kurulu olan 2,5 kW DC güce sahip FV sistem baz alınarak yapılmıştır. Hali hazırdaki sistem, şebekeden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Mevcut tesisin çatısında, yirmi adet polikristal tip her biri 125 W gücünde Kyocera KC125GHT-2 (Şekil 4.2) model FV modül yer almaktadır. FV modüle ait teknik veriler, Tablo 4.1`de sunulmuştur.



Şekil 4.1: PAÜ Temiz Enerji Evi



Şekil 4.2: Kyocera KC125GHT-2 FV modül genel görünümü (Kyocera 2018)

Tablo 4.1: Kyocera KC125GHT-2 FV modülünün elektriksel verileri (Kyocera 2018)

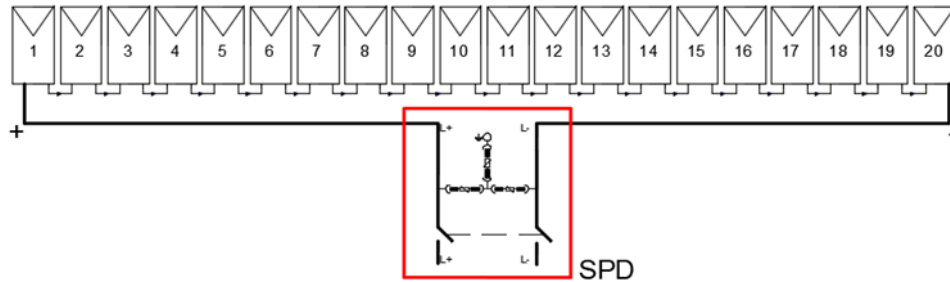
Nominal Güç (W)	Maksimum Güç Gerilimi (V)	Maksimum Güç Akımı (A)	Açık Devre Gerilimi (V)	Kısa Devre Akımı (A)
125	17,40	7,20	21,70	8,0

Tablo 4.1`de sunulan elektriksel verilerden; açık devre gerilimi ( $U_{oc}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), maksimum güç gerilimi ( $U_{mpp}$ ), maksimum güç akımı ( $I_{mpp}$ ) ve nominal güç ( $P$ ) değeri sistemin tasarlanması aşamasında önem arz eden değerlerdir. Gerek sistemin enerji üretim kapasitesi gerekse diğer tüm sistem bileşenleri (kablo kesitleri, koruma ekipmanları v.b.) bu veriler dikkate alınarak boyutlandırılır.

Hali hazırda kurulu olan sistem, yirmi adet FV modül içermektedir. Tasarımı ve kurulumu yapılan mikro ölçekli FV santral, bu mevcut durum göz önüne alınarak hayata geçirilmiştir. Mevcut olan FV modül grubunun fiili görünümü Şekil 4.3`te, elektriksel bağlantı şeması ise (SPD koruma kutusu ile birlikte) Şekil 4.4`te verilmiştir.



Şekil 4.3: Fotovoltaik dizi grubunun genel görünümü



Şekil 4.4: FV dizi elektriksel bağlantı şeması



Şekil 4.4`te görüldüğü üzere, tüm FV modüller seri bağlanarak FV panel (dizi) oluşturulmuştur. Oluşan FV panelin pozitif ve negatif hattı, yıldırım darbesine karşı koruma sağlayan *alçak gerilim parafudruna* (SPD; Surge Protection Device, Şekil 4.5) bağlanmıştır. Phoenix FV-SET 2ST/1000DC-SPD-SD-SC – 2801318 model SPD; 3,5 kV / 15 kA deşarj değerlerine sahiptir. Aynı zamanda, bir adet DC switch de (1.000 V izolasyon gerilim düzeyine uygun) ünite içerisinde bulunmaktadır (Phoenix 2018).



Şekil 4.5: FV panel grubu çıkışındaki SPD kutusu

Temiz Enerji Evi`nde yer alan şebekeden bağımsız FV sistem, toplamda 5 kW DC güce sahiptir. Yapılan bu çalışmada, mevcut sistemin 2,5 kW`lık çatı montajlı bölümü kullanılmıştır. Dolayısıyla, bu DC güce uygun bir evirici ünitesi seçilmesi icap etmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde, ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB (Şekil 4.6) model eviricinin sisteme entegrasyonu noktasında karar kılınmıştır. Seçilen ABB evirici, 230 V / 50 Hz monofaze çıkış verebilen, 2 telli (2W + PE; L + N + PE) bir eviricidir (ABB 2018). ABB eviricinin DC teknik özellikleri Tablo 4.2`de, AC teknik özellikleri ise Tablo 4.3`te sunulmuştur.



Şekil 4.6: ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB model evirici (ABB 2018<sup>c</sup>)

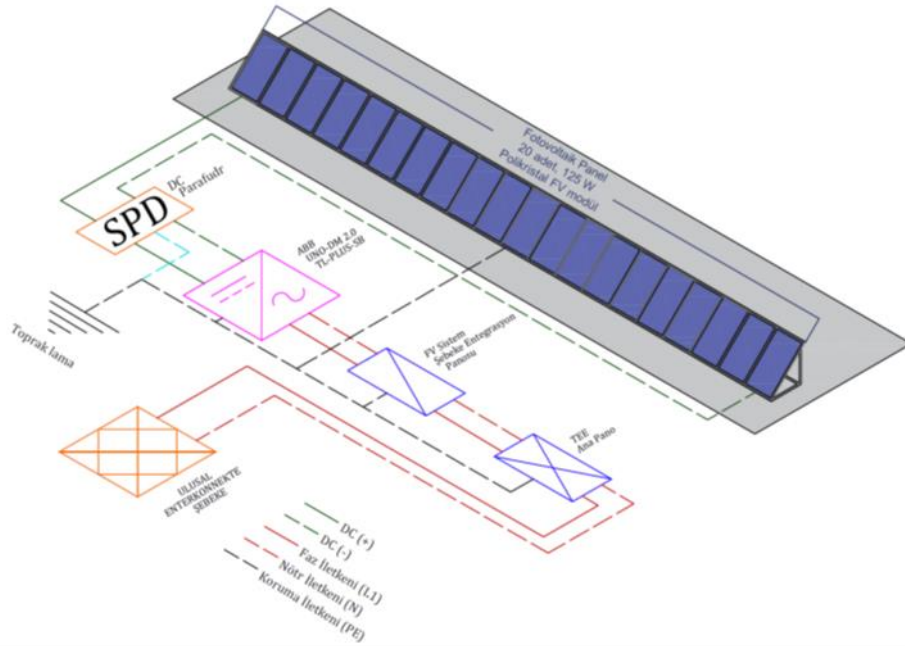
Tablo 4.2: ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB evirici DC elektriksel özellikleri (ABB 2018<sup>c</sup>)

MPPT Giriş Sayısı	MPPT Başına Dizi Sayısı	MPPT Başına Maks. Giriş Gücü (W)	Nominal DC Giriş Gerilimi (V)	Nominal Çalışma DC Giriş Gerilim Aralığı (V)	Maks. DC Giriş Gerilimi (V)	MPPT Başına Maks. Giriş Akımı (A)	MPPT Başına Maks. Kısa Devre Akımı (A)
1	1	2.500	300	210 - 530	600	10	12,5

Tablo 4.3: ABB UNO-DM-2.0-TL-PLUS-SB evirici AC elektriksel özellikleri (ABB 2018<sup>c</sup>)

Şebeke Bağlantı Tipi	cosφ=1 İçin Nominal Çıkış Gücü (W)	cosφ =1 İçin Maksimum Çıkış Gücü (W)	Nominal Şebeke Voltajı (V)	Maksimum AC Çıkış Akımı (A)	Nominal Güç Faktörü	Nominal Çıkış Frekansı (Hz)
L + N + PE	2.000	2.000	230	10 (12)	>0.995	50

ABB eviricinin DC girişinde; ters polarite koruması, MPPT giriş varistorü, yerel standartlara uygun izolasyon koruması ile 25 A / 600 V DC şalter (opsiyonel) yer almaktadır. AC çıkış tarafında ise sadece varistör (2 <L – N / L – PE>) yer almakta olup, üretici tarafından AC çıkışa 16 A MCB tesisi önerilmektedir (ABB 2018). FV sistem tarafından üretilecek elektrik enerjisi, Şekil 4.7’de görüldüğü üzere, ulusal enterkonnekte şebekeye aktarılacaktır.



Şekil 4.7: Temiz Enerji Evi FV sistem şebeke entegrasyonu prensip şeması



Şekil 4.7'ye göre; mevcutta yer alan 2,5 kW gücündeki FV panel ile onun çıkışındaki SPD kutusuna, çalışma kapsamında temini yapılacak evirici tesis edilecek, nihai sistem de FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu ve TEE Ana Pano üzerinden Ulusal Enterkonnekte Şebeke'ye irtibatlanacaktır. Bu noktada yapılması gereken hem manuel hesaplama yolu ile hem de web tabanlı çalışan ABB Sizing Tool ile, seçilen FV modüllerin ve eviricinin uyumunun kontrolüdür.

Hesaplama yolu ile kontrolde, öncelikle FV paneli (veya burada tek bir hat olduğu için diziyi) oluşturan yapının akım ve gerilim yönünden analizinin yapılması gerekir.

Nominal şartlar altında, Tablo 4.2'ye göre FV modül açık devre gerilimi 21,70 V, Maximum Power Point (MPP) gerilimi ise 17,40 V'tur. Sistemdeki tek mevcut dizi de de yirmi adet modül bulunduğuna göre, Denklem 4.1 kullanılarak dizi açık devre gerilimi;

$$U_{OC-dizi} = n \times U_{OC-modül} \quad (4.1)$$

$$U_{OC-dizi} = 20 \times 21.70 = 434 \text{ V}$$

olarak elde edilir. Bu değer, Tablo 4.2'de yer alan maksimum DC giriş gerilim değerinin (600 V) altında olduğundan uygundur. Bu noktada FV dizi MPP gerilimi de;

$$U_{mpp-dizi} = n \times U_{mpp-modül} \quad (4.2)$$

$$U_{mpp-dizi} = 20 \times 17.40 = 348 \text{ V}$$

şeklinde elde edilir. Yine bu değer de, Tablo 4.2'deki nominal çalışma DC giriş gerilim aralığı (210 – 530 V) içerisindedir ve de uygundur.

Ekipman uyumluluğu, akım yönünden de kontrol edilmelidir. Dizi kısa devre akımı, Tablo 4.1'e göre 8 A, MPP akımı ise 7,20 A'dir.

Tablo 4.2'ye göre; MPP başına maksimum giriş akım değeri olan 10 A değeri dizi MPP akımından, MPP başına maksimum kısa devre akım değeri olan

12,50 A değeri de dizi kısa devre akım değerinden büyük olduğundan, FV panel – evirici uyumu da akım kontrolü yönünden şartları sağlamaktadır diyebiliriz.

Yapılan bu kontrolün, ABB Sizing Tool ile de desteklenmesi yerinde olacaktır. ABB Sizing Tool, <http://stringtool.power-one.com/> web adresinde, ABB tarafından web tabanlı olarak hizmete sunulmuş bir yazılımdır. Yazılım, ABB solar eviricilerinin seçimi için kullanılmaktadır.

Yazılım bünyesinde, dünyanın çeşitli ülkelerinin ve şehirlerinin meteorolojik verileri yer almaktadır. Öncelikle yazılımda bu bölüm seçilmelidir. Türkiye`de yalnızca Ankara`ya ait meteorolojik veriler mevcuttur (Şekil 4.8). O yüzden Denizli için bu veriler kullanılarak benzetim yapılabilmıştır. Yazılım, bu verileri baz alarak FV modüllerce üretilecek enerjiyi belirler ve evirici seçiminde bu veriyi dikkate alır. Montaj yeri olarak ise *flush on roof* (çatı) seçeneği seçilmiştir.

OFFERINGS | MEDIA | CAREERS | INVESTORS | ABOUT | CONVERSATIONS

ABB

Project reset

Save the project

View: User friendly version

Contact us

Comments and suggestions to improve the product

Load Project

### 1 - LOCATION

Language: English | Continent: Europe | Country: Turkey | Location: Ankara

To request a new location click the "Get location" and send us a request

Request location

Optimal installation conditions

Azimuth (orientation)	32°
Azimuth-South	

Geographic co-ordinates

40 N
33 E

Show Irradiation

### 2 - TEMPERATURE

Temperature unit selection: C

Mounting method selection: Flush on roof

ΔT between ambient e cell temperature: +35°C

Ambient temperature selection

Default values are provided only for reference

Minimum	-11°C	12°F
Average	25°C	77°F
Maximum	28°C	82°F

Cell temperature values used for calculation

-11°C	12°F
60°C	140°F
63°C	145°F

Şekil 4.8: ABB sizing tool lokasyon seçim ekranı

Şekil 4.9`da FV modül seçim ekranı verilmiştir. Sistemde kullanılan FV modül (Kyocera KC125GHT-2) bu bölümde seçilerek tüm modül elektriksel verileri, benzetim için yazılım tarafından otomatik olarak yüklenir.

Bu noktadan sonra, evirici seçimi aşamasına geçilir. Şekil 4.10`da evirici seçim ekranı görülmektedir. Sisteme öncelikle *grid standartı* girilir. Ülkemiz için *Turkey Grid Standart* ibaresi seçilmelidir. Sonrasında ABB evirici modeli sisteme

girilir. Cihaz topraklaması standart olarak *unground* seçilir. Seçim sonrası ekranda cihaza ait tüm elektriksel veriler görüntülenir.

**3 - PV PANEL SELECTION**
Help ?

**Manufacturer:** Kyocera

**Model:** KC125G-2

Can not find the panel you're looking for?  
Tell us about the missing panel!

PV PANEL DATA	
Verify the specifications of the panel in the database and compare them with the correct data sheet If your panel is not present, you can manually edit the specifications ("Edit" button) to complete the configuration and the amendment of the panel is not saved in the database, but it is valid only for the session in progress.	
<b>Manufacturer:</b> Kyocera <input type="button" value="Edit"/>	
<b>Model:</b> KC125G-2	
<b>Nominal Power [W]:</b> 125	<b>Grounding:</b> N/D
<b>Open Circuit Voltage - Voc [V]:</b> 21.7	<b>Short Circuit Current - Isc [A]:</b> 8
<b>Max Power Voltage - Vmp [V]:</b> 17.4	<b>Max Power Current - Imp [A]:</b> 7.2
<b>Temperature coeff. Voc [V/°C]:</b> -0.084	<b>Temperature coeff. Isc [mA/°C]:</b> 8.6
<b>Temperature coeff. Voc [%/°C]:</b> -0.387	<b>Temperature coeff. Isc [%/°C]:</b> 0.108
<b>Max.Sys.Volt (IEC) [V]:</b> 750	<b>Temperature coeff. Pmax [%/°K]:</b> -0.47
<b>Max.Sys.Volt (UL) [V]:</b> N/A	<b>Connector type:</b> N/A
<b>Panel length [mm]:</b> 1425	<b>Panel width [mm]:</b> 652

Please check on the PV Panel data sheet about the Connector.

Şekil 4.9: ABB sizing tool FV modül seçim ekranı


**4 - INVERTER SELECTION**
Help ?

Grid: 
Model: 
-SB
Grounding:

[Link to website product page](#)

The selected inverter don't have string protection fuses on board. If it is proposed to design a photovoltaic generator in a group of three strings or more groups of three parallel strings, assess the inclusion of protection fuses of suitable size.

INVERTER DATA	
INPUT	OUTPUT
<b>Nominal input Power (P<sub>DC,i</sub>) [W]:</b> 2500	<b>Rated active power (P<sub>AC,r</sub>) [W]:</b> 2000
<b>Maximum power input (P<sub>DC,max</sub>) [W]:</b> 2500	<b>Maximum active power (P<sub>AC,max@cosφ=1</sub>) [W]:</b> 2000
<b>Maximum power MPPT (P<sub>MPPT,max</sub>) [W]:</b> 2500	<b>Maximum apparent power (S<sub>max</sub>) [VA]:</b> 2000
<b>Maximum input voltage (V<sub>IN,max(ABS)</sub>) [V]:</b> 600	<b>Rated voltage (V<sub>AC,r</sub>) [V]:</b> 230
<b>Min input voltage for MPPT operation (V<sub>in,min(mppt)</sub>) [V]:</b> 70% V <sub>start</sub>	<b>Nominal frequency (f<sub>i</sub>) [Hz]:</b> 50
<b>Max input voltage for MPPT operation (V<sub>in,max(mppt)</sub>) [V]:</b> 580	<b>Number of phases (n<sub>p</sub>):</b> 1
<b>Start voltage (default) (V<sub>start,def</sub>) [V]:</b> 150	<b>Maximum current (I<sub>AC,max</sub>) [A]:</b> 5.5
<b>Start voltage (range) (V<sub>start,range</sub>) [V]:</b> 100 ~ 150	<b>Rated Power Factor (cosφ):</b> 1.00
<b>Number MPPT (N<sub>MPPT</sub>):</b> 2	<b>Power Factor (range) (cosφ<sub>range</sub>):</b> -0.80 ~ 0.80
<b>Maximum current MPPT (I<sub>MPPT,max</sub>) [A]:</b> 10.0	
<b>Short circuit current MPPT (I<sub>SC,max</sub>) [A]:</b> 12.5	



Şekil 4.10: ABB sizing tool evirici seçim ekranı

Eviricinin de seçilmesiyle birlikte, yazılım, otomatik olarak FV modül konfigürasyonlarını kullanıcıya sunar (Şekil 4.11). Kullanıcı en kötüden en iyi konfigürasyona doğru tüm olasılıkları inceleyerek seçim yapabilir. Şekil 4.11`den de görüldüğü üzere, TEE çatısında yer alan yirmi adet FV modül, seçilen eviriciye göre en uygun konfigürasyondur. Şekil 4.11`de, koyu yeşil ile yazılımın yaptığı öneri, mevcut FV modül konfigürasyonu ile birebir örtüşmektedir.

ABB Sizing Tool, seçim sonrası, Şekil 4.12 ve 4.13`te görüldüğü üzere raporlama da yapmaktadır. Şekil 4.12`de, raporun ekipman teknik özelliklerinin bulunduğu bölümü görülmektedir. Şekil 4.13`te ise, FV modül – evirici uyum kontrolü sonrası elde edilen elektriksel veriler görülmektedir.


5 - RESULTS - All results shown are allowed configurations, please select the box with desired string configuration																								Help ?
PARALLEL MPPT																								
Number of independent MPPT: 1																								
Single MPPT	Strings in parallel	PV Panels/string																						
		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
	1			1125 (9)	1250 (10)	1375 (11)	1500 (12)	1625 (13)	1750 (14)	1875 (15)	2000 (16)	2125 (17)	2250 (18)	2375 (19)	2500 (20)									
	Notes	- Number of parallel strings compatible with inverter connections.																						
Number of panels: 20												DC Installed Power: 2500												

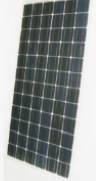
Şekil 4.11: ABB sizing tool FV modül konfigürasyon ekranı

ABB

ABB Stringsizer - Configuration Report

<b>Location</b>	<b>Temperature (°C) Amb Cell</b>	<b>Mounting method</b>
CONTINENT Europe	Minimum -11°C -11°C	Flush on roof
COUNTRY Turkey	Average 25°C 60°C	
LOCATION Ankara	Maximum 28°C 63°C	

Inverter Model UNO-DM-2.0-TL-PLUS -SB	
Rated AC Power [kW]/ Rated AC Voltage [V] 2000 / 230	
Mppt Configuration PARALLEL MPPT (Num. MPPT ind.: 1)	
Total number of PV modules 20	
Installed DC Power (STC) [kW] 2500	
<b>Notes</b> The selected inverter don't have string protection fuses on board. If it is proposed to design a photovoltaic generator in a group of three strings or more groups of three parallel strings, assess the inclusion of protection fuses of suitable size.	

PV Panel (manufacturer / model) Kyocera / KC125G-2	
Technology poly	
STC Rated Power [W] 125	
Open Circuit Voltage - Voc [V] 21.7	
Short Circuit Current - Isc [A] 8	
Maximum Power Voltage - Vmp [V] 17.4	
Maximum Power Current - Imp [A] 7.2	
Temperature Coefficient - Voc [V/°C] -0.084	
Temperature Coefficient - Isc [mA/°C] 8.6	

Şekil 4.12: ABB sizing tool çıktısına ait ekipman bilgi ekranı

	MPPT1	MPPT2
PV Panels/String	20	n/a
Number of Parallel Strings	1	n/a
Total number of PV modules	20	n/a
Notes	1	n/a
Installed DC Power (STC) [kW]	2.50	n/a
Maximum Power/MPPT [kW]	2.50	n/a
PPV(INST)/MPPT/PMPPTMAX	100.0%	n/a
PPV(inst)/PACR	125.0%	n/a
PPV(inst)/PACMAX	125.0%	n/a
PV Panel Max System Voltage [Vdc]	750	n/a
Inverter Maximum Input Voltage [Vdc]	600	n/a
String Open Circuit Voltage @-11°C [Vdc]	494.5	n/a
String Open Circuit Voltage @63°C [Vdc]	370.2	n/a
Inverter Activation Voltage (default) [Vdc]	150	n/a
Inverter Recommended Activation Voltage [Vdc]	Default (150)	n/a
String Max Power Voltage @-11°C [Vdc]	397.0	n/a
String Max Power Voltage @60°C [Vdc]	300.4	n/a
String Max Power Voltage @63°C [Vdc]	296.3	n/a
Inverter MPP Operating Range* [Vdc]	105 - 580	n/a
PV Array Max Short Circuit Curr. @63°C [Adc]	8.3	n/a
Inverter Max Short Circuit Current/MPPT [Adc]	12.5	n/a
PV Array MPP Current @63°C [Adc]	7.5	n/a
Inverter Max MPPT Input Current [Adc]	10	n/a
<b>Notes legend</b>	*) Range for MPPT operation considering the voltage default activation; 1)- Number of parallel strings compatible with inverter connections.	

Şekil 4.13: ABB sizing tool çıktısına ait MPP bilgi ekranı

## 4.2 Şalt Ekipmanı Seçimi

Kurulumu yapılacak olan şebekeden bağımsız FV sistem, sadece FV modüller ve eviriciden oluşmayacaktır. Bu iki bileşen sistemin temel elemanları olmakla birlikte, bu elemanları koruyacak devre kesicilere, kaçak akım rölelerine, üretilen elektrik enerjisini ulusal enterkonnekte şebekeye aktaracak kablolarla, üretilen enerjiyi ölçecek sayaçlara ihtiyaç duyulur. Bu bölümde, tüm bu ekipmana dair seçim kriterleri ele alınmıştır.

Kablo seçiminde dikkat edilmesi gereken iki önemli husus vardır; gerilim düşümü ve kablonun akım taşıma kapasitesi. Gerilim düşümü hesabı, sistemde DC ve AC enerji aynı anda bulunacağından, her iki durum için ayrı ayrı yapılır. Şekil 4.7 göz önüne alındığında, FV modüllerle evirici arasında DC, evirici sonrası ise AC gerilim düşümü hesabı yapılır. DC gerilim düşümü hesabı;

$$\%e_{DC} = \frac{2 \times l \times t \times I_{mpp}}{k_{CU} \times s \times U_{mpp-dizi}} \times \%100 \quad (4.3)$$

denklemleri kullanılarak yapılır ve en fazla %1 olabilir. Formülde;  $l$  hat uzunluğunu (m),  $t$  sıcaklık katsayısını,  $I_{mpp}$  dizi maksimum güç akımını (A),  $k$  iletkenlik katsayısını (bakır için  $56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ),  $s$  kablo kesitini ( $\text{mm}^2$ ) ve  $U_{mpp-dizi}$  dizi maksimum güç gerilimini (V) ifade eder. Sıcaklık katsayısı ise;

$$t = 1 + 0,004 \times (T - 20^\circ\text{C}) \quad (4.4)$$

ile formülize edilir. Burada  $T$ , gerilim düşümü hesabı için  $50^\circ\text{C}$  alınırsa,  $t$  hesaplama sonucu 1,12 olarak elde edilir.

Dizi MPP gerilimi 348 V, dizi MPP akımı da 7,20 A olduğuna göre, 20 m DC kablolama ve  $6 \text{ mm}^2$  solar kablo için DC gerilim düşümü;

$$\%e_{DC} = \frac{2 \times 20 \times 1,12 \times 7,20}{56 \times 6 \times 348} \times \%100 = \%0,28$$

olarak elde edilir ki bu değer, % 1`den küçük olduğu için uygundur.

Aynı kablo, akım taşıma kapasitesi yönünden de kontrol edilmelidir. DC hat kısa devre akımı, Tablo 4.1'e göre 8,0 A'dır. Tablo 4.4'teki verilere göre, 6 mm<sup>2</sup> H1Z2Z2-K halogen-free solar kablo (Şekil 4.14) en kötü durumda 57 A akım taşıyabildiğinden, seçilen kesit akım taşıma kapasitesi yönünden de uygundur diyebiliriz.

Tablo 4.4: 6 mm<sup>2</sup> H1Z2Z2-K solar kablo teknik özellikleri (Seval Kablo)

Yaklaşık Dış Çap (mm)	Yaklaşık Net Ağırlık (kg/km)	İletken Direnci Maks. Ω/km (20 °C)	Kablo Havadayken Akım Taşıma Kap. (A)	Kablo Yüzey Üzerindeyken Akım Taşıma Kap. (A)	İki Kablo Birbirine Dokunurken Akım Taşıma Kap. (A)
7,7	101	3,39	70	67	57



Şekil 4.14: 6 mm<sup>2</sup> H1Z2Z2-K solar kablo (Seval Kablo 2018)

DC kablo için yapılan kontrol, evirici ile Ana Dağıtım Panosu (ADP) arası AC hat için de yapılmalıdır. Evirici ile ADP arasında, Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu yer almaktadır. Evirici panosu (EP) – FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu arası 1 m, FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu – ADP arası ise 10 m'dir. ADP'den sonraki bağlantı, yaklaşık 200 m ileride yer alan Fen-Edebiyat Fakültesi B-Blok'taki Dağıtım Panosu'nadır.

Evirici – FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu arasına 4 mm<sup>2</sup> (Evirici AC çıkış soketi 0.75 mm<sup>2</sup> ile 4 mm<sup>2</sup> arası kablo kesitine müsade eder), FV Sistem Şebeke Entegrasyon Panosu – ADP arasına yine 4 mm<sup>2</sup> kablo tesis edilecektir. Her iki hat da monofazedir ve toplam hat uzunluğu 11 m'dir. Halihazırda ADP – Fen-Edebiyat Fakültesi Dağıtım Panosu (FDP) arasında 200 m trifaze 16 mm<sup>2</sup> kablo mevcuttur. Tüm bu veriler ışığında toplam AC gerilim düşümü şu şekilde elde edilir;

$$\%e_{AC1} = \% \frac{t \times 200 \times P \times l}{k_{CU} \times s \times U^2} \quad (4.5)$$

$$\%e_{AC1} = \% \frac{1.12 \times 200 \times 2000 \times 11}{56 \times 4 \times 230^2} = \% 0.42$$

$$\%e_{AC2} = \% \frac{t \times 100 \times P \times l}{k_{CU} \times s \times U^2} \quad (4.6)$$

$$\%e_{AC2} = \% \frac{1.12 \times 100 \times 2000 \times 200}{56 \times 16 \times 400^2} = \% 0.31$$

$$\%e_{ACT} = \%e_{AC1} + \%e_{AC2} = \%0.42 + \%0.31 = \%0.73$$

Elde edilen bu değer, % 1,5`lik sınır değerinin altında olduğu için uygundur.

AC kablolar, akım taşıma kapasitesi yönünden de kontrol edilmelidir. Burada monofaze ve trifaze AC hat akımları hesaplanmalıdır.

$$P_{1\sim} = U \times I_{1\sim} \times \cos\varphi \quad (4.7)$$

$$P_{3\sim} = \sqrt{3} \times U \times I_{3\sim} \times \cos\varphi \quad (4.8)$$

Denklem 4.7 ve 4.8`de yer alan  $\cos\varphi$  değeri, Tablo 4.3`e göre 0,995 alınır. O halde, monofaze hat için (Evirici – ADP arası) AC hat akımı, Denklem 4.7`ye göre şu şekilde elde edilir;

$$2.000 = 230 \times I_{1\sim} \times 0,995$$

$$I_{1\sim} = 8,74 \text{ A}$$

Aynı şekilde trifaze hat için de (ADP – Fen Edebiyat DP arasında) AC hat akımını Denklem 4.8`e göre şu şekilde elde edilir;

$$2.000 = \sqrt{3} \times 400 \times I_{3\sim} \times 0,995$$

$$I_{3\sim} = 2,90 \text{ A}$$

Yapılan hesaplamalara göre, Evirici – ADP arasına tesis edilecek 3 x 4 mm<sup>2</sup> kesitli monofaze kablo, 8,74 A akım taşıyacaktır. Tablo 4.5`e göre ise bu kablo, 30 A akım taşıyabileceğinden yapılan hesaba göre seçilen kablo kesiti uygundur.

ADP – Fen Edebiyat DP arasında halihazırda bulunan 4 x 16 mm<sup>2</sup> kesitli trifaze kablo, yine yapılan hesaba göre 2,90 A taşımaktadır ki bu değer, Tablo 4.5`e göre aynı kablo için verilen 69 A`lik sınır değerinin altında kaldığı için seçilen kablo kesiti yine uygun olacaktır.

Seçilen her iki kablo kesiti için verilen ortak temsili görünüm, Şekil 4.15`te sunulmuştur.

Tablo 4.5: NVV (NYM) 05VV-U / 05VV-R kablo teknik özellikleri (Seval Kablo 2018)

Kesit (mm <sup>2</sup> )	Yaklaşık Dış Çap (mm)	Yaklaşık Net Ağırlık (kg/km)	İletken Direnci Maks. Ω/km (20 °C)	Kablo Havadayken Akım Taşıma Kap. (A)
3 x 4	11,4	254	4,61	30
4 x 16	20,9	1106	1,15	69



Şekil 4.15: NVV (NYM) 05VV-U / 05VV-R kablo (Seval Kablo 2018)

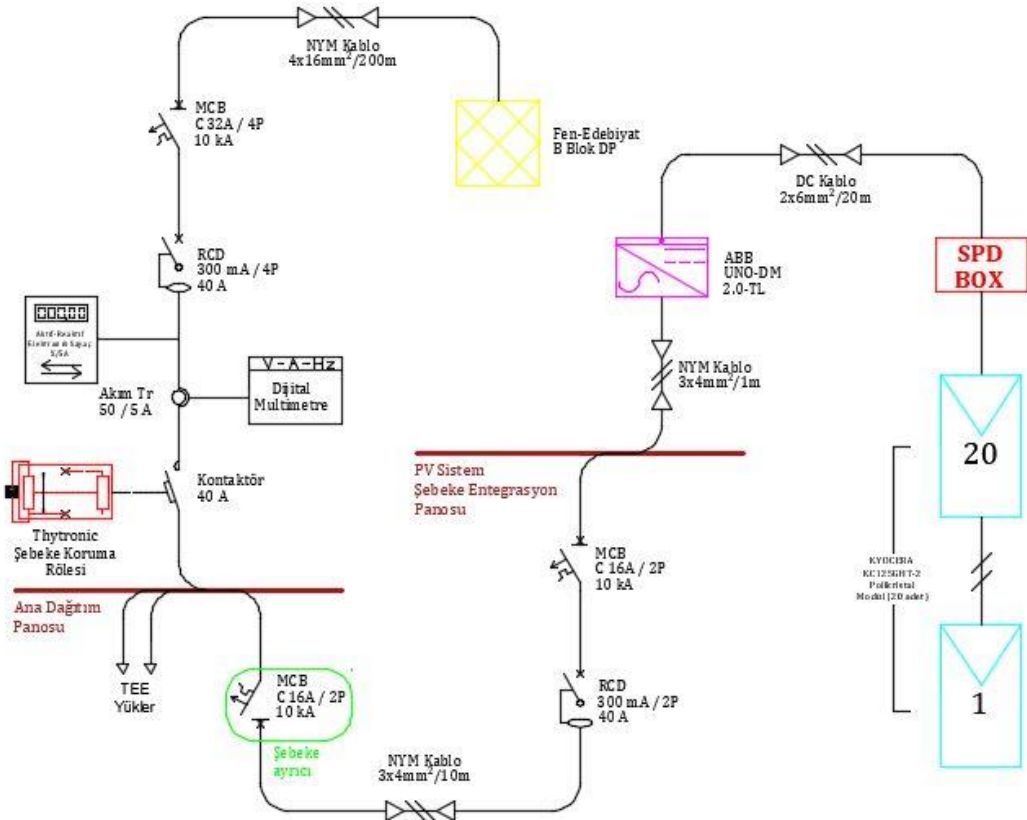
Evirici ile EP arasındaki koruma elemanlarının seçimi de sistem için önemlidir. Bu noktada hem evirici çıkışı için hesaplanan AC çıkış akım değeri hem de evirici üreticisinin önerdiği koruma ekipmanı değeri dikkate alınmalıdır. Evirici AC çıkış akımı, 8,74 A olarak hesaplanmıştır.

Bu değer elbette 230 V AC çıkış gerilimi ve  $\cos \varphi$ 'nin 0,995 olduğu değer içindir. Çıkış geriliminin 230 V olduğu ve de Tablo 4.3`e göre  $\cos \varphi$ 'nin 1 olduğu durum için çıkış akımı, Denklem 4.7 ile 8,70 A olarak hesaplanır. Bu durumda, 10 A değerli MCB (Miniature Circuit Breaker; Minyatür Devre Kesici) seçimi yapılması, sınır değeri olması itibariyle uygun olmayabilir. Yapılması gereken, bir üst değer olan 16 A değerli bir MCB`nin seçimidir. Evirici kataloğunda da cihaz çıkışına tesis edilebilecek MCB değeri en fazla 16 A olarak verilmiştir (ABB 2018). Bu noktada, evirici çıkışına; çift kutuplu, C karakteristikli (B tip temin edilemediği için), 10 kA değerli bir MCB tesis edilecektir.



Eviricinin hemen arkasına; çift kutuplu, 300 mA değerli bir RCD (Residual Current Device; Kaçak Akım Rölesi) tesis edilecektir. RCD nominal akım değeri, MCB nominal akım değerinden küçük olamayacağından, 16 A MCB değerine uygun olarak en az 25 A değerli bir RCD tesis edilmelidir. Mevcut imkanlar dahilinde 40 A değerli bir RCD tesisi yoluna gidilecektir.

Bütün bu ekipman seçimi sonucunda oluşan elektrik tek hat şeması, Şekil 4.16'da sunulmuştur.

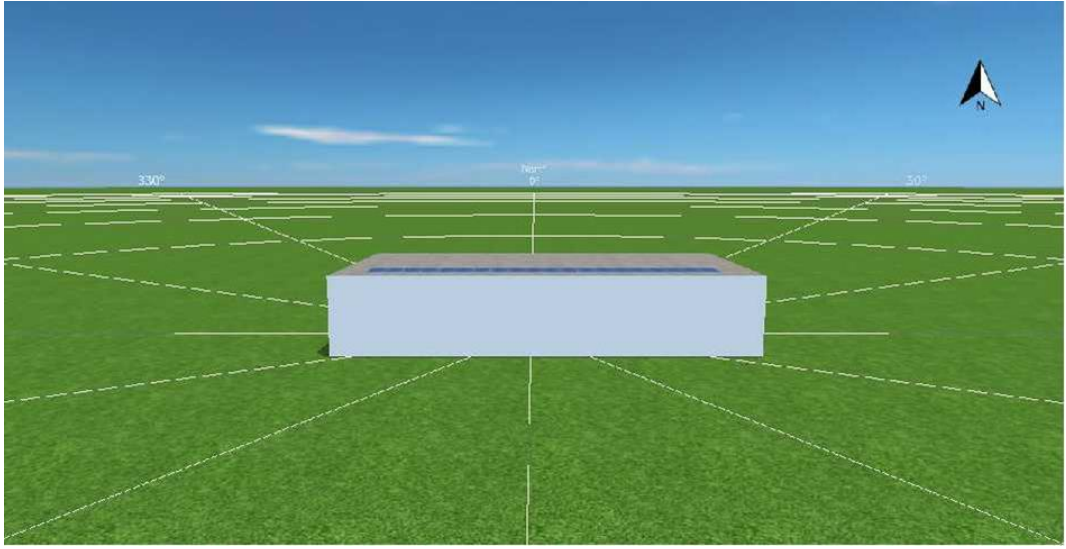


Şekil 4.16: Sistemin tek hat şeması

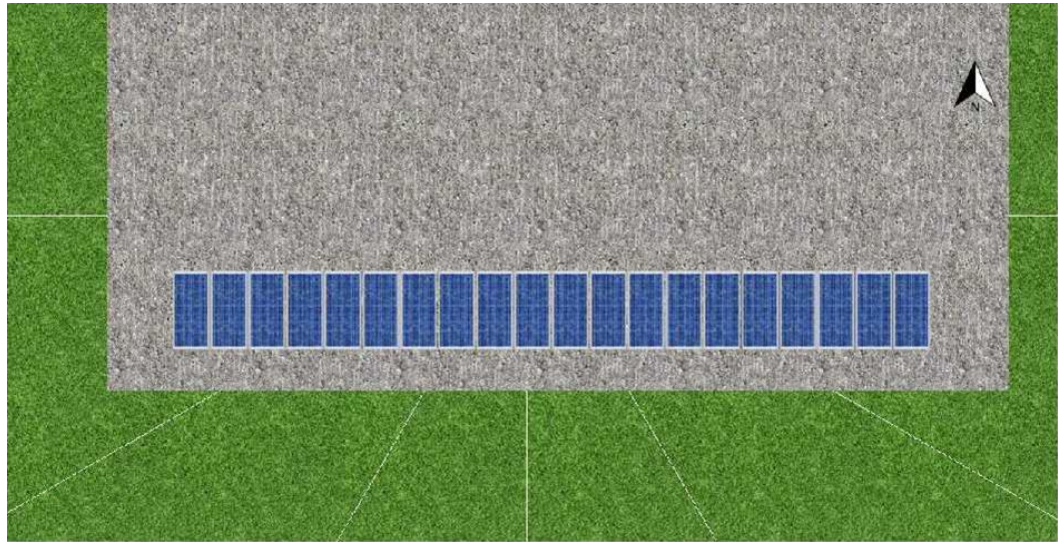
### 4.3 Sistemin PVSOL Benzetimi

Santralin özellikle FV modül yerleşimi ve gölgeleme analizlerini yapabilmek için, bu tür benzetimlere yönelik hazırlanmış yazılımların kullanılması uygun olur. Belirtilen benzetimlerle yanı sıra, karşılaşılabilecek teknik sorunlar (özellikle gölgeleme gibi) santral kurulmadan önce tespit edilerek olası üretim kayıplarının önüne geçilmiş olunur.

Şekil 4.17`de, şebekeden bağımsız FV santralin tesis edildiği PAÜ Temiz Enerji Evi modeli verilmiştir. Temiz Enerji Evi`nin 16 m x 8 m boyutlarında kapladığı alan, benzetime yansıtılmıştır. Şekil 4.18`de ise, Temiz Enerji Evi`nin kuşbakışı görünümü verilmiştir. PAÜ Temiz Enerji Evi`nin halihazırdaki durumuna birebir benzer şekilde, PVSOL benzetiminde de FV modüllerin tamamı, tesisin güneye bakan bölümüne yerleştirilmiştir. PVSOL benzetiminde, FV modüllerin fiziksel boyutları (1425 mm x 652 mm x 56 mm) doğrudan yazılıma girilmiştir. Yazılımda, bu reel ölçülerde yirmi adet FV modülü, PAÜ Temiz Enerji Evi`nin güney bölümüne, tek sıra olacak şekilde yerleştirilmiştir.

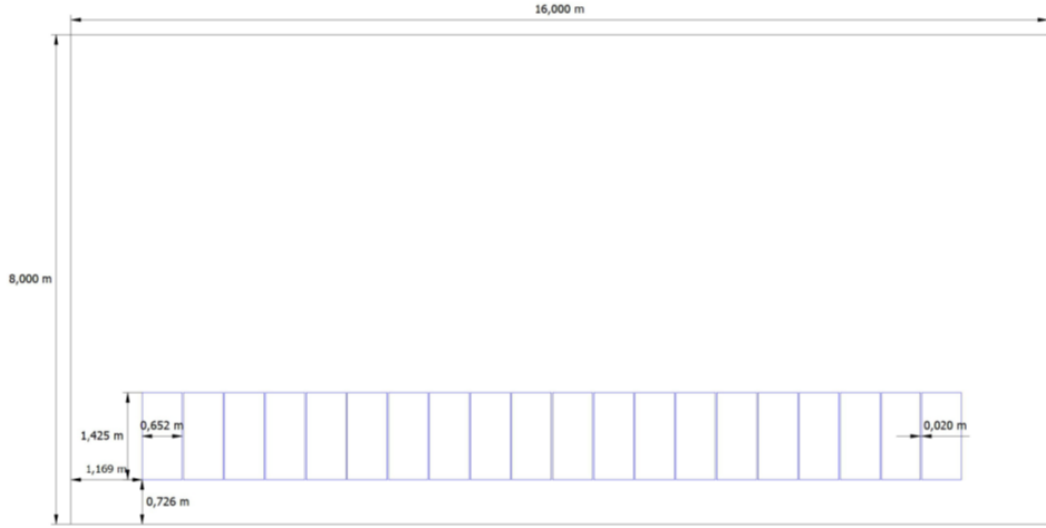


Şekil 4.17: PAÜ Temiz Enerji Evi modeli

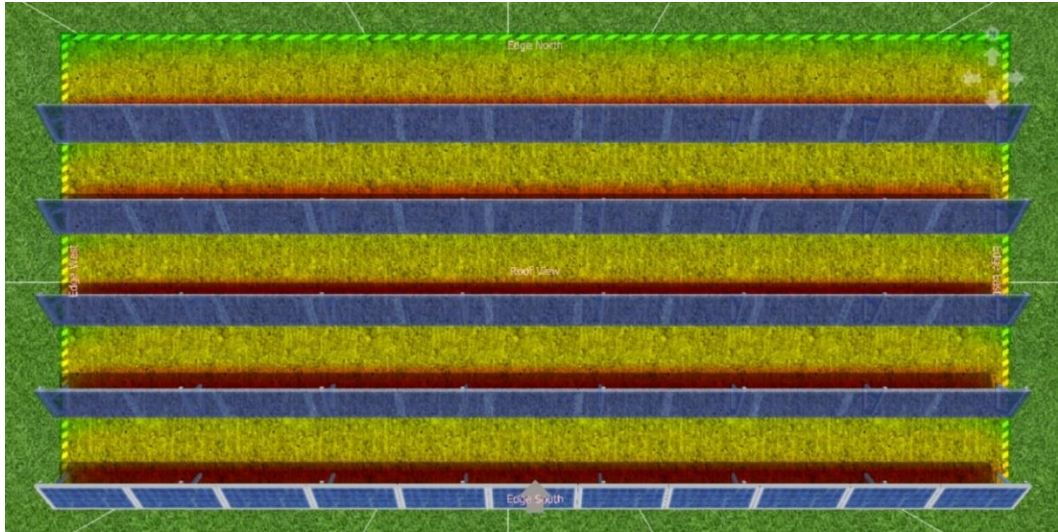


Şekil 4.18: PAÜ Temiz Enerji Evi PVSOL modeli kuşbakışı görünümü

Şekil 4.19`da FV modül yerleşim ölçüleri verilmiştir. Şekil 4.20`de ise, PAÜ Temiz Enerji Evi`nin çatısında yer alan solar-termal kolektörlerin, güneye bakan bölümde en önde bulunan FV modüllerce gölgelenme durumları gösterilmiştir. FV modüllerle solar-termal kolektörler arasında mesafe de benzetime yansıtılmıştır. PVSOL analiz sonucuna göre, FV modüllerin solar-termal kolektörleri gölgeleme durumu söz konusu değildir.



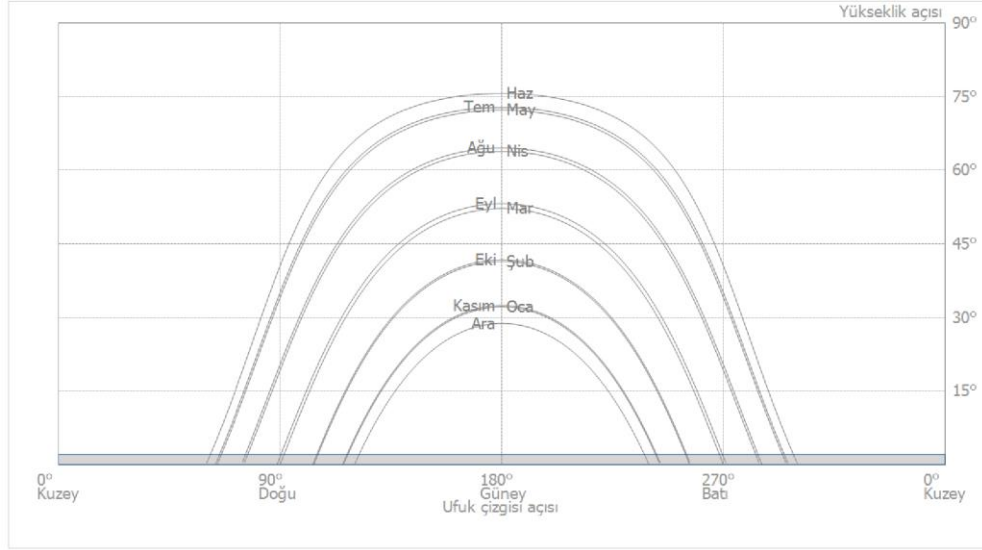
Şekil 4.19: PAÜ Temiz Enerji Evi çatısındaki FV modüllerin yerleşim ölçüleri



Şekil 4.20: PAÜ Temiz Enerji Evi çatısındaki FV modüllerin solar-kolektörler üzerindeki gölgeleme etkisinin PVSOL benzetimi

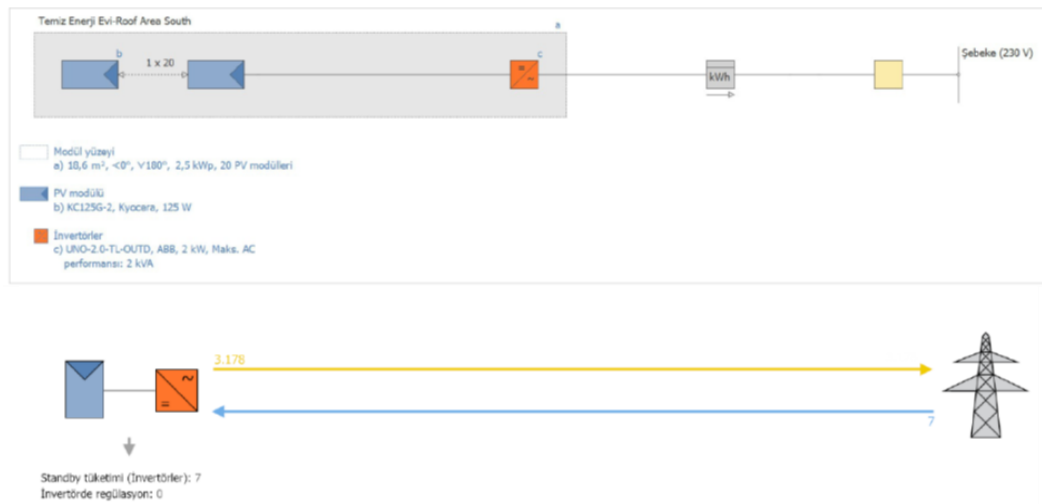
Sistemin gölgelenme benzetimlerinin, güneşin aylara göre hangi konumları için yapıldığı, Denizli meteorolojik şartları dikkate alınarak yazılım tarafından

belirlenir. Güneşten gelen ışınımın FV modüllerin üzerine düşüş açıları, aylara göre Şekil 4.21`de sunulmuştur. İlgili şekil incelendiğinde, güney ufuk çizgisine göre en yüksek açının  $75^{\circ}$  ile Haziran ayında, en düşük açının ise  $28^{\circ}$  ile Aralık ayında olacağı öngörülmüştür.



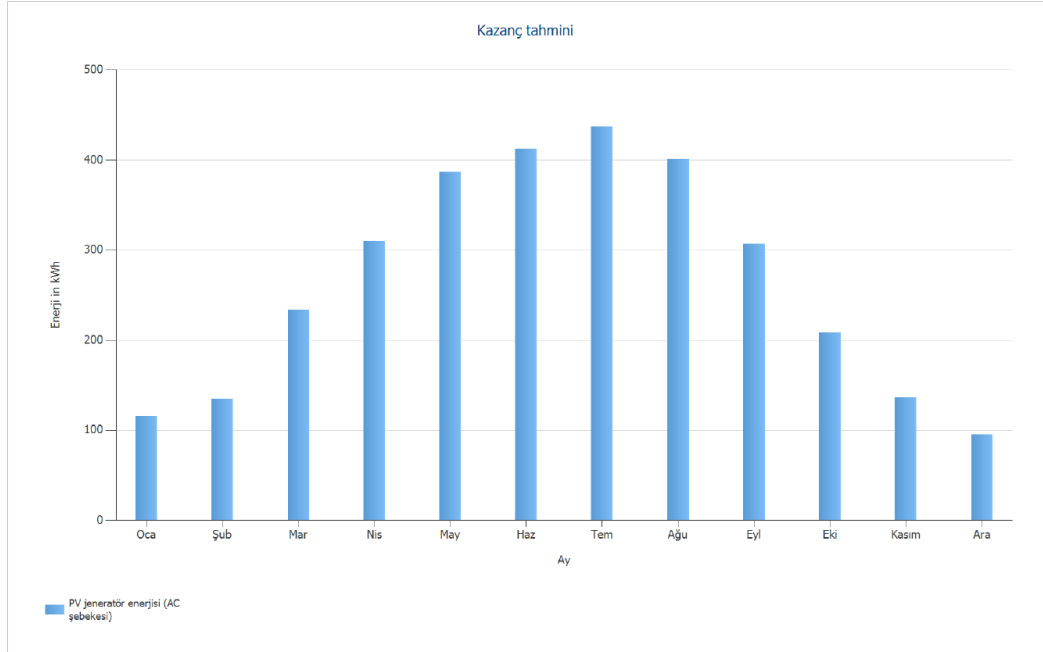
Şekil 4.21: Işınım geliş açısı grafiği

Şekil 4.22`de, FV sistem bileşenlerinin (FV modüller ve evirici) PVSOL tarafından oluşturulan benzetim modeli verilmiştir. PVSOL`e girilen FV modül ve evirici elektriksel verilerine göre, yazılım tarafından bir elektriksel sistem modeli oluşturulur. Tüm sistem analizleri, bu elektriksel verilere dayanılarak PVSOL yazılımınca gerçekleştirilir.



Şekil 4.22: Sistemin PVSOL elektriksel modeli

Şekil 4.23`te, FV sistemce üretilen elektrik enerjisi miktarının değişimi aylara göre sunulmuştur. Grafik, sistem evirici çıkışı baz alınarak elde edilmiştir. Buna göre; en yüksek enerji üretimi 440 kWh ile Temmuz ayı için, en düşük enerji üretimi ise 95 kWh ile Aralık ayı için tahmin edilmiştir.



Şekil 4.23: Evirici çıkışı için aylara göre enerji üretiminin tahmin edilmesi

Sistemin genel performansı (FV jeneratör performansı, sistem kullanım oranı, gölgeleme kaybı v.b.) ve sistemden elde edilen enerji miktarı (şebeke besleme, bekleme koşullarındaki enerji tüketimi, standart test koşullarındaki dönüştürme v.b.) Tablo 4.6 – 4.8`de sunulmuştur.

Tablo 4.6: Sistem PVSOL benzetim sonuçları

<b>Benzetim sonuçları</b>	
<b>FV sistem</b>	
FV jeneratör performansı	2,5 kW <sub>s</sub>
Özel yıllık gelir	1.271,06 kW <sub>s</sub> / kW <sub>p</sub>
Sistem kullanım oranı	80.3 %
Şebeke besleme	3.178 kW <sub>s</sub> / yıl
Standby tüketimi	7 kW <sub>s</sub> / yıl
Kaçınılan CO <sub>2</sub> emisyonu	1.907 kg / yıl
Gölgelenmeden oluşan kazanç kaybı	0,0 % / yıl

Tablo 4.7: Modül alanı başına PVSOL benzetim sonuçları

<b>Modül alanı başına sonuçlar</b>	
<b>Temiz Enerji Evi – Roof Area South</b>	
FV jeneratör performansı	2,5 kW <sub>s</sub>
FV jeneratör yüzeyi	18,6 m <sup>2</sup>
Modül üzerine toplam ışın	1579,9 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
FV jeneratör enerjisi (AC şebekesi)	3177,6 kW <sub>s</sub> / yıl
Özel yıllık gelir	1271,1 kW <sub>s</sub> / kW <sub>p</sub>
Sistem kullanım oranı	80.3 %

Tablo 4.8: FV sistem PVSOL benzetimi enerji bilançosu

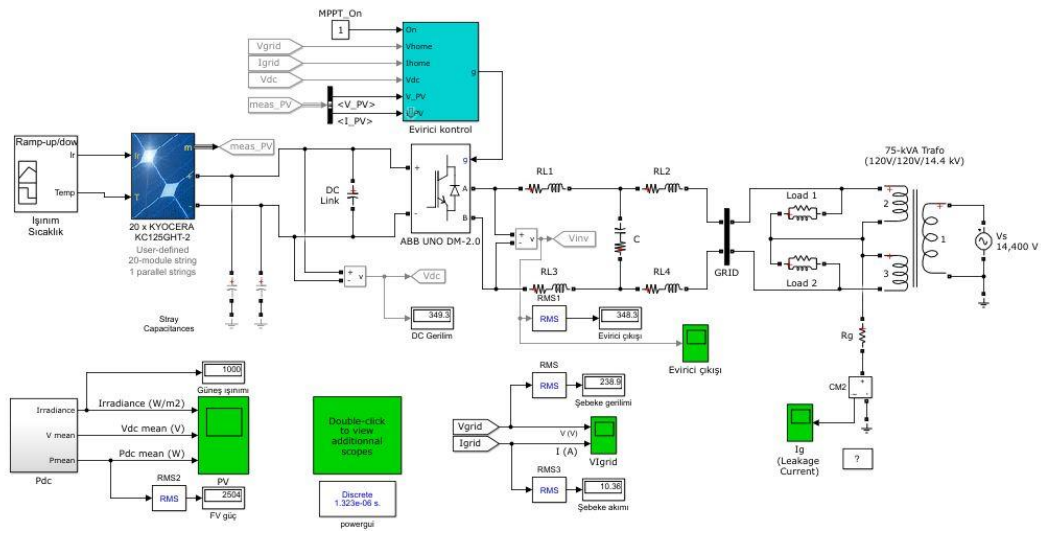
<b>Toplam yatay ışın</b>	<b>1.595,5 kW<sub>s</sub> / m<sup>2</sup></b>
Standart spektrumdan sarpma	-15,96 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
Toprak yansıtma (Albedo)	0 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	0 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
Modülden bağımsız gölgelenme	0 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
Modül yüzeyine yansıma	-90,41 kW <sub>s</sub> / m <sup>2</sup>
<b>Modül yüzeyine toplam ışın</b>	<b>1.489,5 kW<sub>s</sub> / m<sup>2</sup></b> <b>18,58 m<sup>2</sup> x 1.489,5 kW<sub>s</sub> / m<sup>2</sup> = 27.678 kW<sub>s</sub></b>
<b>FV toplam ışın</b>	<b>27.678 kW<sub>s</sub></b>
Kirlenme	0 kW <sub>s</sub>
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 13,49 %)	-23.945,24 kW <sub>s</sub>
<b>FV nominal enerji</b>	<b>3.732,7 kW<sub>s</sub></b>
Düşük ışık davranışı	-131,70 kW <sub>s</sub>
Nominal modül ısısından sapma	-217,77 kW <sub>s</sub>
Diyotlar	0 kW <sub>s</sub>
<b>İnverter düzenleyici olmadan FV enerji (DC)</b>	<b>3.312,0 kW<sub>s</sub></b>
DC başlangıç performansının alması	-1,13 kW <sub>s</sub>
MPP gerilim alanı sebebiyle düzenleme	0 kW <sub>s</sub>
<b>FV enerji (DC)</b>	<b>3.292,9 kW<sub>s</sub></b>
DC/AC dönüşümü	-102,98 kW <sub>s</sub>
AC hattı	-1,52 kW <sub>s</sub>
<b>Şebeke besleme</b>	<b>3.177,6 kW<sub>s</sub></b>



#### 4.4 Sistemin MATLAB Simulink Benzetimi

Kurulması planlanan, şebekeden bağımsız FV sistemin MATLAB Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları, Şekil 4.24`de verilen yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sunulan yapı, MATLAB Simulink kütüphanesi içerisinde yer alan hazır modüller kullanılarak oluşturulmuştur.

Sunulan MATLAB Simulink modelinde; değişik değerlerdeki sıcaklık ve ışınım verilerinin girilmesi için bir modül, FV panel elektriksel karakteristiğinin girilmesi için bir modül, evirici için bir modül ve santralin şebeke entegrasyonunun benzetimi için yine bir modül yer almaktadır.



Şekil 4.24: Şebeke bağlantılı FV santralin MATLAB Simulink modeli

FV santralin güneşten gelen ışınım ve modül sıcaklığı gibi parametreleri, *Global Değerler* adı altında verilen bölümden benzetim modeline girilmektedir. Şekil 4.25`te, ışınım ve sıcaklık verilerinin değişimi, grafiksel olarak sunulmuştur. İlgili şekildeki değerler, standart test koşulları için (ışınım için  $1.000 \text{ W/m}^2$ , sıcaklık için  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) baz alınarak oluşturulmuştur. Bu veriler, istenilen ışınım ve sıcaklık değerlerine göre, manuel olarak operatör tarafından değiştirilebilir.

Sıcaklık ve ışınım verilerinin tamamı, seri bağlı yirmi adet Kyocera KC125GHT-2 model FV modülün yer aldığı FV Panel başlıklı modül içerisinde kullanılmaktadır. Bu modül, değişken global ışınım ve sıcaklık değerlerine göre, yine değişken bir DC çıkış gerilimi üretir. Şekil 4.26`da FV panel elektriksel

verilerinin girildiği parametre giriş ekranı gösterilmiştir. FV dizi bir adet olup, dizide toplamda yirmi adet FV modül kullanılmıştır. Bu ekrana, FV modüllere ait; açık devre gerilimi, kısa devre akımı, MPP gerilimi ve MPP akımı gibi değerler girilebilmektedir.



Şekil 4.25: Benzetim için kullanılan ışıma ve sıcaklık grafiği

Block Parameters: PV modül

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m<sup>2</sup>, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module: **User-defined**

Maximum Power (W)  Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)  Short-circuit current Isc (A)

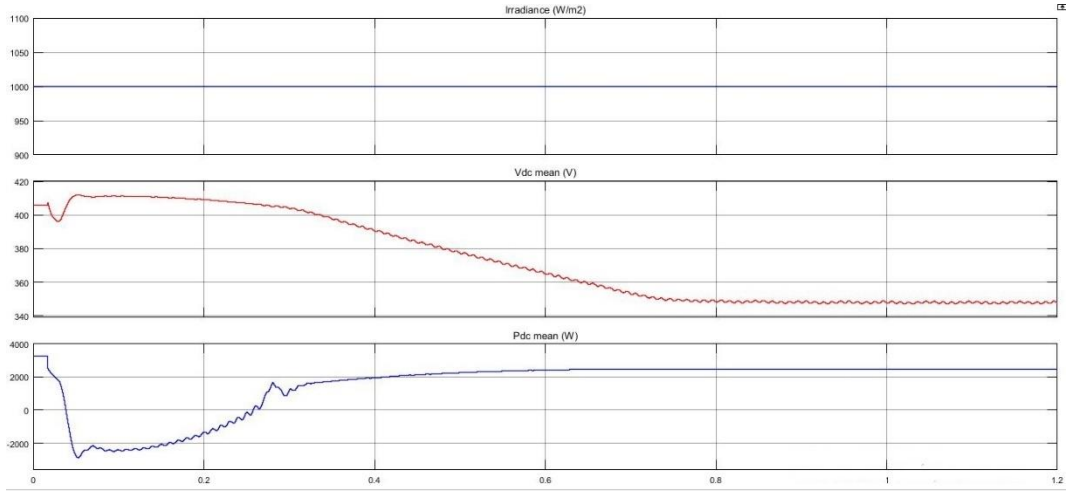
Voltage at maximum power point Vmp (V)  Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)  Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Şekil 4.26: MATLAB Simulink FV panel elektriksel veri giriş ekranı

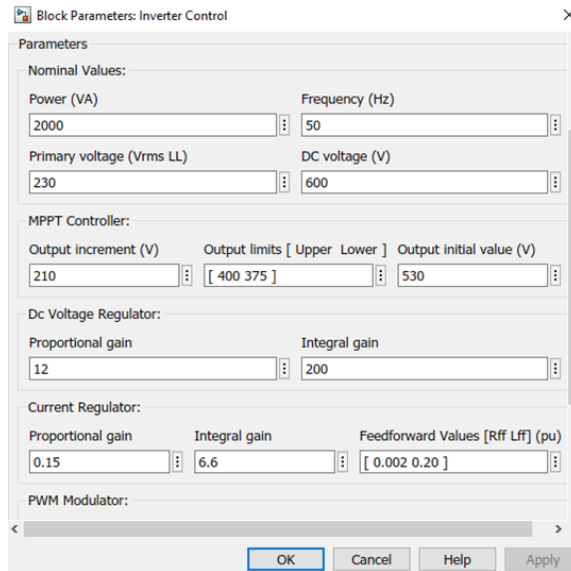
Şekil 4.27`de, FV panel DC çıkış gerilim grafiği verilmiştir. DC çıkış gerilim grafiği incelendiğinde, FV panel çıkış gerilimin yaklaşık 350 V DC (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C standart test koşulları için) olduğu görülebilir. Buradan, 348 V`luk FV panel MPP geriliminin, DC link kondansatörü ile sabitlendiği anlamı çıkarılır. Elde edilen bu gerilim, ABB UNO evirici modülünün girişine uygulanarak istenilen AC gerilim (230 V / 50 Hz) elde edilir.





Şekil 4.27: FV panel 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım değeri için, DC çıkış gerilimi (kırmızı eğri) ve güç grafiği (mavi eğri)

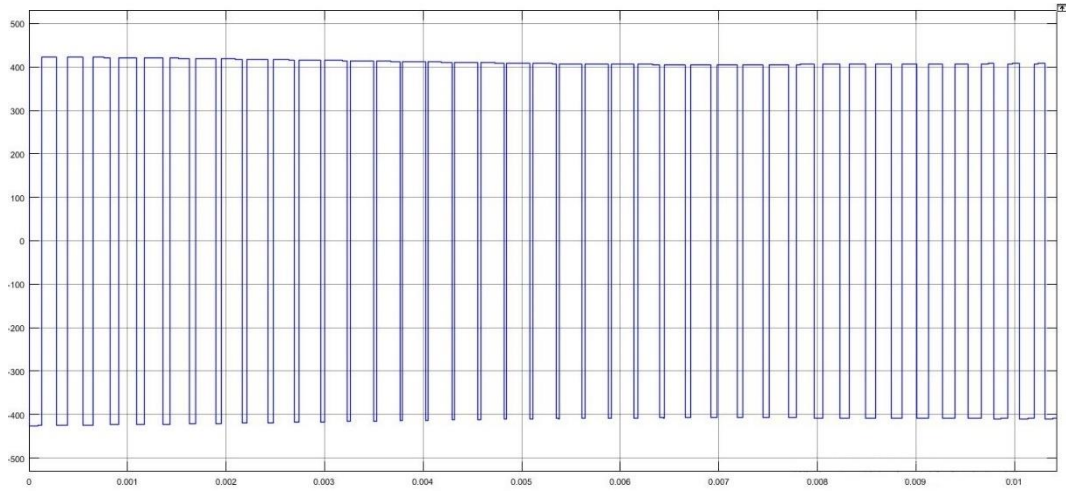
Sistemde kullanılan ABB eviricinin MATLAB Simulink benzetimi için, modelde yer alan evirici bloğu kullanılmıştır. Eviriciye ait parametre ekranı, Şekil 4.28'de gösterilmiştir. İlgili evirici, Tablo 4.2'ye göre, 210 – 530 V DC gerilim aralığında çalıştığından, oluşturulan modelde evirici girişi, bu aralığın dışında bir DC gerilim olur ise, evirici herhangi bir çıkış vermeyecektir.



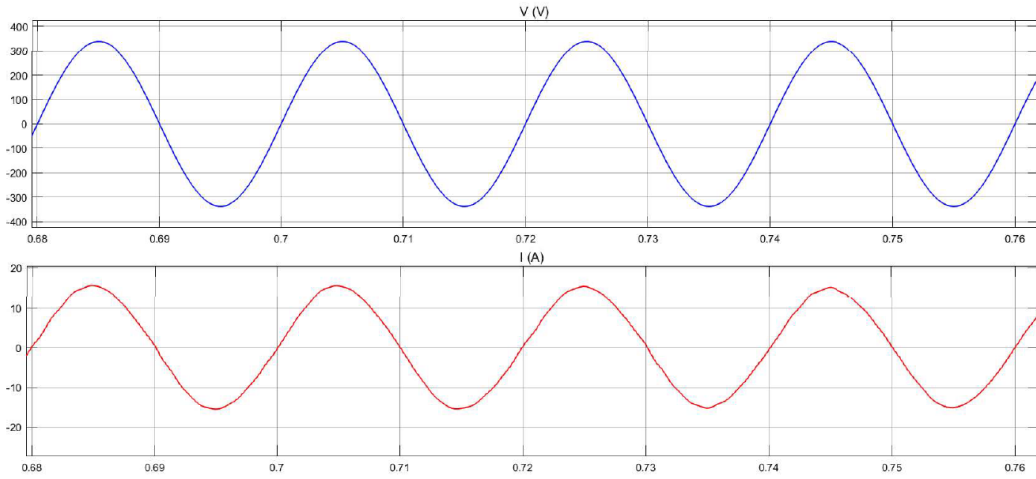
Şekil 4.28: Evirici parametre ekranı

Eviricinin çıkışından alınan ve de harmonik içeren AC gerilim (Şekil 4.29), modelde yer alan fitre ünitesi ile 230 V / 50 Hz değeri elde edilecek şekilde işlenmektedir. Şekil 4.30'da, şebeke beslemesi yapılan AC sinüsoidal dalga şekli

görülmektedir. Şekil incelediğinde; gerilim tepe değerinin yaklaşık 325 V olduğu görülebilir.



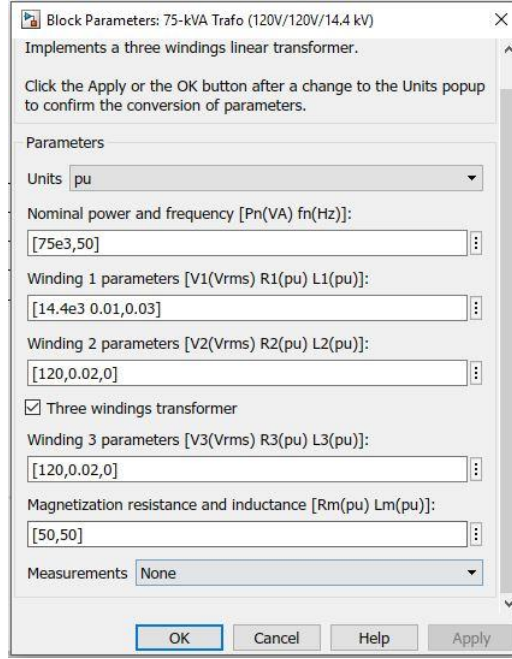
Şekil 4.29: Evirici çıkışı harmonikli gerilim dalga şekli



Şekil 4.30: Filtre edilmiş AC şebeke gerilim ve akım dalga şekli

Tüm bu benzetim çalışması neticesinde, eviricinin entegre edildiği şebeke verilerine ait parametre giriş ekranı da Şekil 4.31`de sunulmuştur. İlgili şekil incelendiğinde, benzetimin yapılabilmesi için sistemde 75 kVA`lık bir transformatör ünitesi kullanıldığı görülebilir. Transformatör ünitesinin primer sargıları çift olarak (2 x 120 V) dizayn edilmiş olup, primer sargılarındaki *Load* birimlerinin parametreleri değiştirilmek sureti ile evirici çıkış akımı sınırlandırılabilir. Benzetim çalışmasında transformatör sekonder terminal gerilimi 14,4 kV olarak tayin edilmiş olup, istenilen yüksek gerilim seviyesine göre *Load* birimlerinin değerleri üzerinde değişiklik yapılması gerekmektedir. Bu

durum, evirici çıkış akımını katalog değeri olan 10 A`de sabitleyebilmek için lüzumludur.



Şekil 4.31: MATLAB Simulink benzetimde kullanılan şebeke parametreleri

## 5. SANTRALİN KURULUMU, İŞLETMEYE ALINMASI VE TEST- ÖLÇÜM İŞLEMLERİ

### 5.1 Santralin Kurulumu ve İşletmeye Alınması

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, santralin FV modülleri ve DC parafudr panosu, Temiz Enerji Evi çatısında hali hazırda mevcut idi. Mevcut sistemin şebekeye bağlantısı için ise, Şekil 4.16`da verilen elektrik tek hat şemasına uygun olarak seçilen ve detayları Tablo 5.1`de verilen ekipmanın temini yapılmıştır.

Tablo 5.1: FV santral şebeke entegrasyon ekipmanı

Malzeme Adı	Kullanım Amacı	Adedi
Dağıtım Panosu	FV sistem şebeke entegrasyon ekipmanının muhafazası	1
Thytronic Şebeke Koruma Rölesi	Koruma amaçlı	1
Pako Şalter	Anahtarlama	1
Zaman Rölesi	Eviricinin devreye alınma süresini ayarlama	1
Minyatür Devre Kesici	Kısa devre koruması	10
Kaçak Akım Rölesi	L-PE, N-PE temas koruması	2
Acil Stop Butonu	Acil durum sistem kesmesi	1
Dijital Multimetre	Akım, gerilim, frekans ölçümü	1
Çift Yönlü Elo. Elk. Sayacı	Üretim-tüketim miktarının ölçülmesi	1
Kontaktör	Ana hat anahtarlama	1
Akım Trafosu	Multimetre için akım girişi	3

Şekil 5.1`de, FV santrale ait şebeke entegrasyon panosu sunulmuştur. Şebeke entegrasyon panosunun ön bölümünde; şebeke koruma rölesi, pano tipi dijital multimetre ve şebeke koruma rölesi-manuel geçiş kontrolü için bir adet 0-1 pako şalter yer almaktadır. Şebeke koruma rölesi, pako şalterin “0” konumunda devrededir. Şebeke koruma rölesi, şebekede enerji kesintisi halinde, ana hat üzerinde tesis edilen ve kesinti halinde açık konuma geçen ana hat kontaktörüne tekrar kapama sinyalini, ancak şebeke gerilimi ve frekansı, evirici şebeke gerilimi ve frekansı ile senkronize olunca gönderir. Bu sinyal, enerji kesintisi sonrası

enerjinin tekrar mevcudiyeti ile birlikte, ayarlanan bir süre sonunda eğer şebeke gerilimi halen sistem üzerinde var ise gönderilir.

Pako şalter ise, bakım-onarım gibi şebeke koruma rölesinin devre dışı bırakılması ihtiyacında “1” konumuna alınarak sistemin manuel olarak devreye girmesini sağlar.



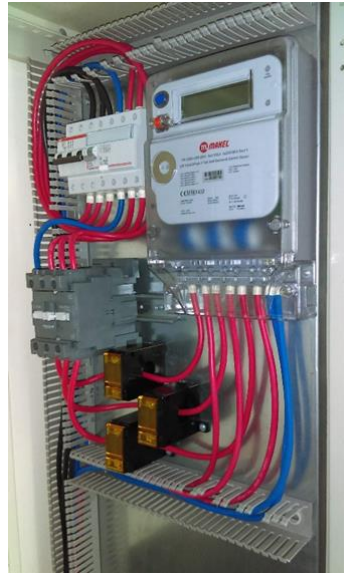
Şekil 5.1: FV santral evirici ünitesi ve şebeke entegrasyon panosu

Şebeke entegrasyon panosu içerisinde ise, Şekil 5.2`de görüldüğü üzere; multimetre faz gerilimi örnekleme hattı devre kesicileri, şebeke koruma rölesi faz gerilimi örnekleme hattı devre kesicileri, evirici çıkış hattı devre kesicisi ile kaçak akım koruma rölesi, ayrıca şebeke koruma rölesi tekrar kapama gecikmesi için zaman rölesi de yer almaktadır.



Şekil 5.2: FV santral şebeke entegrasyon panosu iç donanımı

FV sistem şebeke entegrasyon panosunun, Temiz Enerji Evi ana dağıtım panosuna irtibatı için bazı düzenlemelerin yapılması icap etmiştir. Temiz enerji evi mevcut dağıtım panosunda, çift yönlü elektronik elektrik sayacı yer almamaktadır. Çift yönlü elektronik elektrik sayacı, FV sistem tarafından üretilip ulusal enterkonnekte şebekeye gönderilen elektrik enerjisi ile, şebekeden çekilen ve Temiz Enerji Evi iç ihtiyacı dahilinde tüketilen elektrik enerjisinin kayıt edilmesi amacıyla kullanılacaktır. Elektronik elektrik sayacının tesisine yönelik kurulumu yapılan tesisat, Şekil 5.3`te sunulmuştur. Sistemde; Temiz Enerji Evi`ne yer altı kablosu ile gelen elektrik enerjisi; minyatür devre kesici, kaçak akım rölesi, hat kontaktörü, akım trafoları (multimetre için; 50/5 A) ve çift yönlü elektronik elektrik sayacı üzerinden geçerek dağıtım panosuna giriş yapmaktadır. Evirici enerji kabloları ise, sayaç panosunun dağıtım panosuna bağlandığı noktaya tesis edilmiştir.



Şekil 5.3: Çift yönlü elektronik elektrik sayacı tesis görünümü

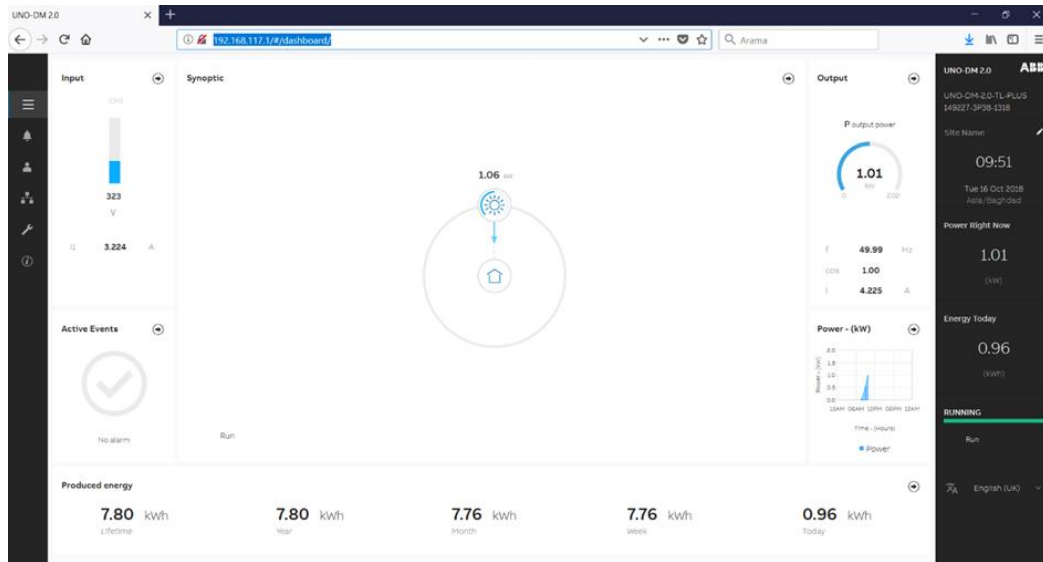
Yukarıda bahsi geçen kurulum aşamaları sonrası, FV santralin şebeke entegrasyonu için manuel devreye alma aşamasına geçilmiştir. Öncelikle, çift yönlü elektronik elektrik sayacı girişinde yer alan minyatür devre kesici ile kaçak akım rölesi sırasıyla devreye alınmıştır. Temiz Enerji Evi dağıtım panosu üzerinde gerilim kontrolü yapıp gerilim seviyelerinin uygunluğu (L1-L2, L1-L3 ve L2-L3; 400 V ve L1-N, L2-N, L3-N; 230 V) görüldükten sonra evirici şebeke entegrasyon panosu içerisindeki minyatür devre kesici ve kaçak akım rölesi

devreye alınmıştır. Türkiye şebeke standartlarına uygunlaştırma ayarları manuel olarak yazılım üzerinden yapılan evirici, çıkışından şebeke gerilimini (230 V) ve frekansını (50 Hz) alması neticesinde yaklaşık 1 dk içerisinde devreye girmiş ve enerji üretimine başlamıştır.

## 5.2 Test ve Ölçüm

### 5.2.1 ABB Aurora İzleme Sistemi

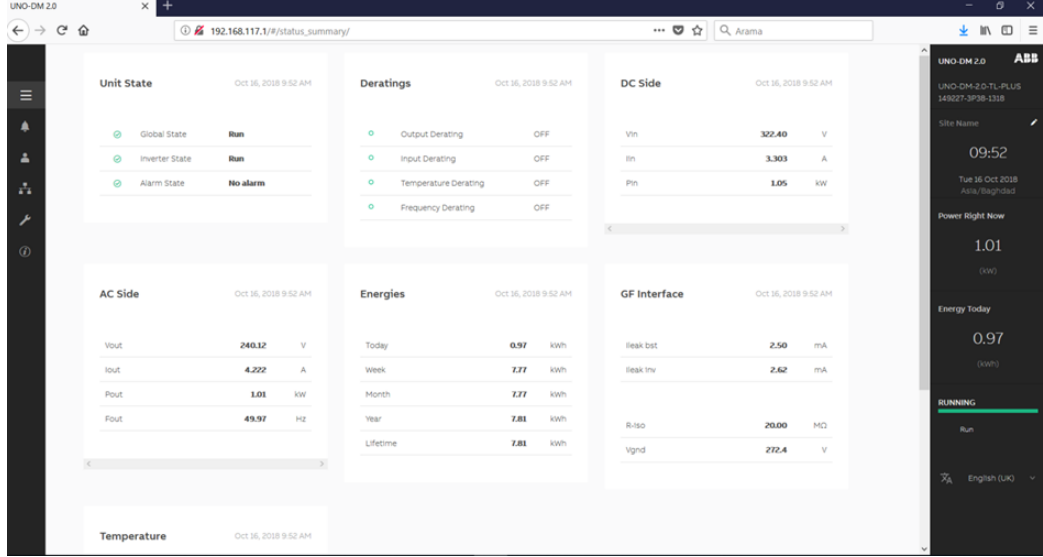
Eviricinin Türkiye şebeke standartlarına göre ayarlanması ve devreye alınması sonrası, tüm elektriksel veriler bilgisayar üzerinden izlenebilir hale gelmektedir. Şekil 5.4`te, ABB Dashboard ana ekran görüntüsü sunulmuştur. Ana ekranda ortada ev ikonu halinde gösterilen simge, FV modüllerce üretilen elektrik enerjisini vermektedir. Ayrıca ana ekranda; evirici DC giriş gerilim değeri, üretilen enerji miktarı (günlük, aylık, yıllık ve tüm çalışma süresi boyunca), güç eğrisi, AC çıkış gücü ile eviricinin faal olup olmadığı da izlenebilmektedir.



Şekil 5.4: ABB dashboard ana ekran görüntüsü

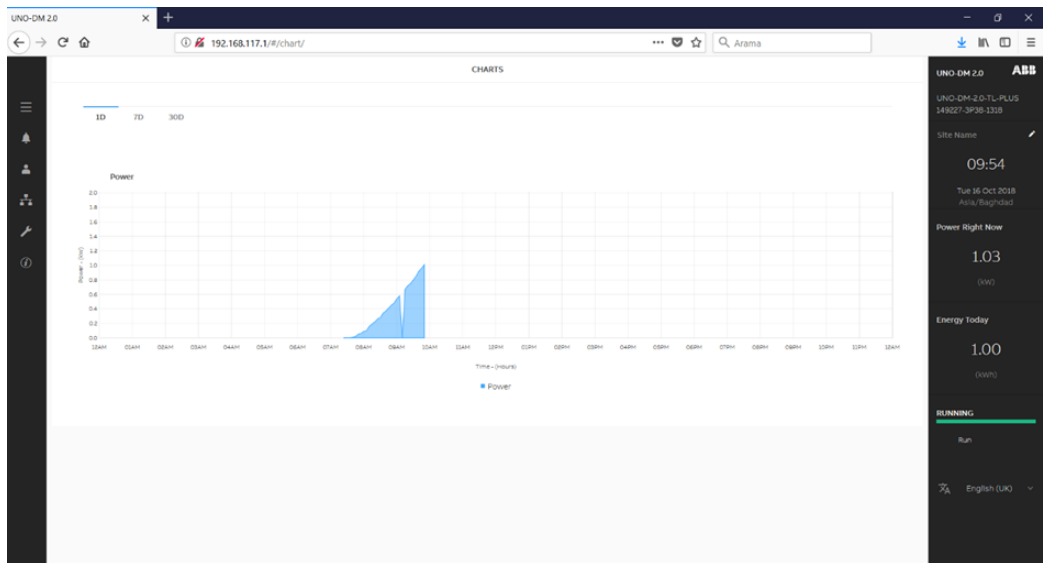
Şekil 5.5`te, ABB Dashboard üzerinden erişimi olan, eviriciye ait tüm elektriksel verilerin yer aldığı, veri ekranı sunulmuştur. Bu ekranda; eviricinin çalışma durumu, frekans, sıcaklık, giriş ve çıkış kaybı, DC giriş akım, gerilim ve

güç değerleri, AC çıkış akım, gerilim, güç ve frekans değerleri, günlük, haftalık, aylık, yıllık ve tüm çalışma ömrüncü enerji üretimi, izolasyon direnci ( $R_{iso}$ ), kaçak akım değerleri ile L-PE gerilim değeri yer almaktadır.



Şekil 5.5: ABB Dashboard`da sistemin toplam çıkış gücü ekran görünümü

Şekil 5.6`da ise; 1 - 7 - 30 günlük periyotlar halinde, sistemin toplam çıkış gücündeki değişim görülmektedir. Grafikten, sistemin örneğin 1 gün boyunca ürettiği toplam çıkış gücündeki dalgalanma, güç çıkışında kesinti oldu ise bu kesintinin süresi tespit edilebildiği gibi, bu verilerin kullanılmasıyla kesinti nedeniyle oluşan ekonomik kayıplar da belirlenebilmektedir.



Şekil 5.6: ABB Dashboard`da sistemin toplam çıkış gücü eğrisi



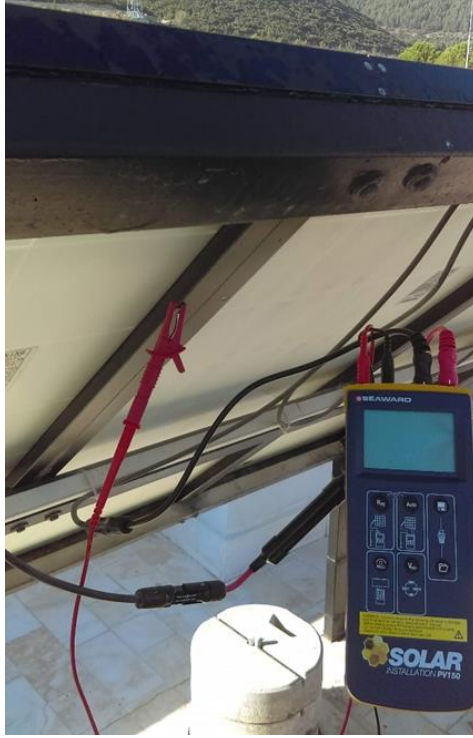
## 5.2.2 Solar Test Cihazı Ölçümleri

Şebeke bağlantılı mikro FV sistemin FV modül – evirici arasındaki bölümü, Seaward Solar Test Cihazı ile test edilmiştir. İlgili cihaz ile; FV modül toprak geçiş direnci, FV dizi açık devre gerilimi, FV dizi kısa devre akımı ve FV hücre – modül çerçeve arası izolasyon direnci ölçümü yapılabildiği gibi, ölçüm setinde yer alan Solar Survey 200R cihazı ile de; FV modül üzerine düşen güneş ışınımı, FV modül ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık değerleri, FV modülün yer düzlemi ile yaptığı açı ve FV modülün doğu – batı doğrultusundaki konumu belirlenebilmektedir.

Şekil 5.7’de, FV modül çerçevesi toprak geçiş direnci, Şekil 5.8’de ise; FV dizi açık devre gerilimi, FV dizi kısa devre akımı ve FV hücre – çerçeve arası izolasyon direnci ölçümü için kurulan ölçüm sistemi görülmektedir. Ölçüm için Seaward Solar Test Cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.9’deki ölçüm sonuçlarına göre; FV modül çerçevesi toprak geçiş direnci  $0,19 \Omega$ , FV modül açık devre gerilimi 394 V (FV modül katalog değeri 434 V), FV modül kısa devre akımı 5,09 A (FV modül katalog değeri 7,20 A) ve FV hücre – modül çerçevesi arası izolasyon direnci ise  $159 M\Omega$  (500 V DC test gerilimi için) olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.7: FV modül çerçevesi toprak geçiş direnci ölçümü için kurulan sistem



Şekil 5.8: FV dizi açık devre gerilimi, FV dizi kısa devre akımı ve FV hücre – çerçeve arası izolasyon direnci ölçümü için kurulan sistem



Şekil 5.9: Çerçeve toprak geçiş direnci, dizi açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve izolasyon direnci ölçüm sonuçları

Solar test cihazı kullanılarak, FV modül üzerine düşen güneş ışıınımlı ile, FV modül ön ve arka yüzeyindeki sıcaklık değerleri de ölçülmüştür. Şekil 5.10`da, bu ölçümlerin yapıldığı Seaward Solar Survey 200R cihazı görülmektedir. Şekil 5.10`da yapılan ölçümler anlık olup; güneş ışıınımlı 585 W/m<sup>2</sup>, FV modül ön yüz sıcaklığı ( $T_A$ ; ortam sıcaklığı) 31 °C, FV modül arka yüz sıcaklığı ( $T_{PV}$ ; FV modül arka yüz sıcaklığı) ise 35 °C olarak elde edilmiştir.



a)



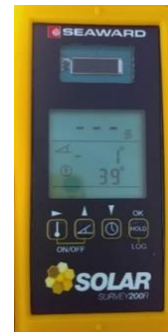
b)

Şekil 5.10: Solar Survey ışınım ve sıcaklık ölçümleri, a) FV modül ön yüzünde yapılan güneş ışınımı ve sıcaklık ölçümü, b) FV modül arka yüzünde yapılan sıcaklık ölçümü prob bağlantısı

FV modül üzerine düşen güneş ışınımı, FV modül ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık değerleri, FV modülün yer düzlemi ile yaptığı açı ve FV modülün doğu – batı doğrultusundaki konumunu belirlemek üzere, yine Seaward Solar Survey 200R cihazından faydalanılmıştır. Şekil 5.11 a`da, FV modülün ve de üzerinde yer aldığı sehpanın yer düzlemi ile yapmış olduğu açının ölçümüne dair görüntü sunulmuştur. Ölçüm sonucunda, modüllerin yer düzlemi ile  $40^{\circ}$  lik açı yapacak şekilde monte edildiği görülmüştür (Denizli için bu değer  $30^{\circ}$  olmalıdır). Şekil 5.11 b`de ise, FV modüllerin doğu-batı doğrultusundaki konumunun tespitine dair ölçüm sonucu verilmiştir. Elde edilen veriye göre FV modüller, doğu-batı doğrultusundan saat yönünün tersi yönde  $39^{\circ}$  lik bir sapma ile konumlandırılmıştır. FV modüller, Temiz Enerji Evi çatısına, bina ile paralel olacak şekilde yerleştirildiğinden, aslında bu durum, binanın doğu-batı doğrultusundan saat yönünün tersi yönde  $39^{\circ}$  lik bir sapma ile konumlandırıldığını göstermektedir.



a)



b)

Şekil 5.11: Solar Survey açı ve konum ölçümleri, a) FV modül-yer düzlemi arasındaki açının ölçümü, b) FV modül doğu-batı doğrultusundaki konumuna dair ölçüm

### 5.2.3 Elektriksel Test Cihazı ile Yapılan Test ve Ölçümler

Tasarlanan ve kurulumu yapılan FV sistem, Temiz Enerji Evi ana panosu üzerinden ulusal enterkonnekte şebekeye entegre olmaktadır. Bu nedenle, tesisin bütünü göz önüne alınarak elektriksel tesisat testlerinin yapılması gerekir. Bu testlerden ilki, kaçak akım rölesi testidir. Şekil 5.12`de, kaçak akım rölesi testi için tesis edilen Fluke 1653B elektriksel tesisat test cihazı görülmektedir.



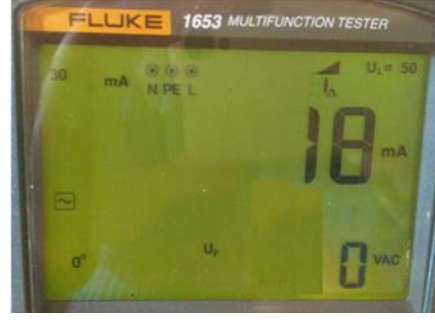
Şekil 5.12: Kaçak akım rölesi testi için elektriksel tesisat test cihazının tesisi

Şekil 5.12`de görülen kaçak akım rölesi test sistemi ile, öncelikle Temiz Enerji Evi ana panosu üzerinde mevcut kaçak akım rölesinin açma süresi test edilmiştir. Mevcut kaçak akım rölesi, 30 mA / 40 A değerlidir ve dört kutupludur.

Yapılan teste göre (Şekil 5.13.a) kaçak akım rölesi açma süresi 31,4 ms olarak elde edilmiştir ki bu süre, TT sistemlerdeki 200 ms`lik açma süresinin çok altında olduğu için uygun bulunmuştur. Şekil 5.13.b`de yapılan ölçüm ile de, 30 mA`lik kaçak akım rölesinin 18 mA`da açma yaptığı görülmüştür ki bu değer de, 30 mA`nın altında olduğu için uygun bulunmuştur.



a)



b)

Şekil 5.13: Kaçak akım rölesi testleri, a) Kaçak akım rölesi açma süresi test sonucu, b) Kaçak akım rölesi açma akımı test sonucu

Şekil 5.14`te, evirici çıkışında yer alan B16 A / 2P minyatür devre kesicinin (MCB) uygunluk testi için kurulan düzenek sunulmuştur. İlgili test, Fluke 1653B çevrim empedansı kademesine ( $Z_L$ ; loop) alınarak yapılmıştır. Test sonucu, Şekil 5.15`te sunulmuştur. Buna göre; L-PE hatası durumundaki çevrim empedansı 12,05  $\Omega$ , kısa devre akımı ise 20 A`dir. Bu durumda, evirici çıkışına tesis edilen C16 A MCB, L-PE hatası halinde 160 A`de açma yapacağından, oluşacak kısa devre akımını MCB kısa devre akımı olarak değil, aşırı yük olarak algılayacak ve ani açma yapmayacaktır. 20 A`lik kısa devre akımında açma yapılabilmesi için, en fazla B 2A MCB tesisi gerekir ki bu da, evirici maksimum çıkış akımının (10 A) altında kalacağından uygulanabilir bir durum değildir. Önerilen; Temiz Enerji Evi`nin TN sistem şeklinde yeniden planlanmasıdır.



Şekil 5.14: L-PE çevrim empedansı ölçüm düzeneği



Şekil 5.15: L-PE çevrim empedansı ölçüm sonucu

#### 5.2.4 Evirici Çıkışında Yapılan Ölçümler

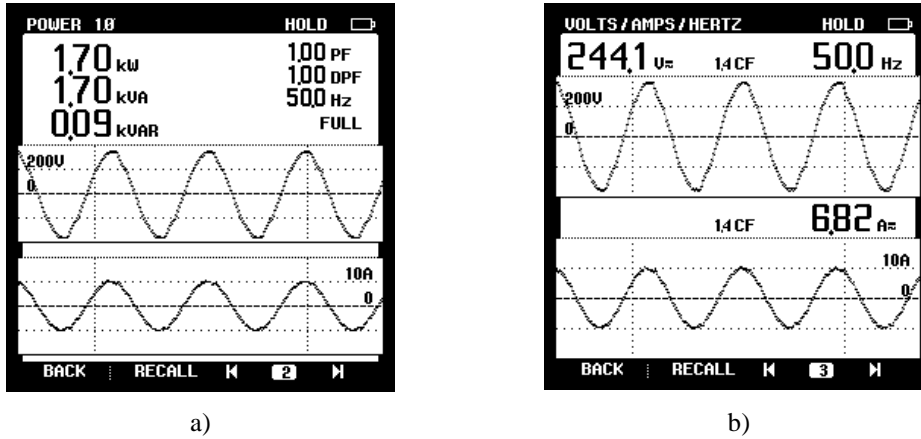
Şebeke bağlantılı FV santralde yer alan 2,0 kW AC çıkışlı eviricinin şebekeye entegre olduğu noktada, yani çıkışında, Fluke 43B güç kalitesi analizörü ile ölçümler yapılmıştır. Şekil 5.16`da, ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 5.16: Evirici çıkışı için güç kalitesi ölçüm düzeneği

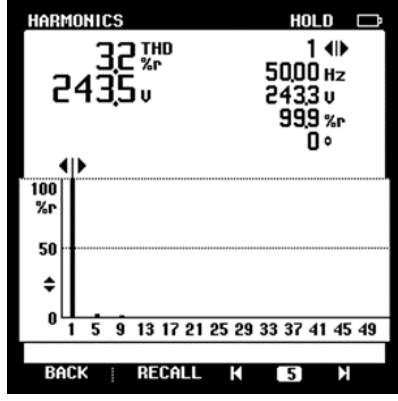


Evirici çıkışında ölçülen güç değeri ile gerilim ve akım değerleri Şekil 5.17.a ve b`de verilmiştir. Aynı şekillerde gerilim ve akım dalga şekilleri de sunulmuştur. Şekil 5.17.a, evirici devredeyken ve şebeke entegrasyonu mevcut iken, eviriciden elde edilen gücü vermektedir. Ölçüm yapılan an itibariyle, 2 kW nominal çıkışlı eviriciden 1,70 kW güç çıkışı elde edilmiştir. Bu durumdaki güç faktörü (PF) 1 olup, eviricinin güç faktörü katalog değerini (>0.995) sağladığı görülmüştür. Şekil 5.17.b`de ise, evirici çıkış terminallerindeki gerilim ve eviriciden çekilen akım dalga şekilleri ve bu işaretlerin efektif değerleri verilmiştir. Şekil 5.17.b`ye göre; evirici çıkış gerilim değeri 244,10 V / 50 Hz, eviriciden çekilen akım ise 6,82 A`dir. Şekil 5.17.a ve b incelendiğinde, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüsoidal olduğu, dalga şekillerinde herhangi bir bozulmanın olmadığı görülebilir.

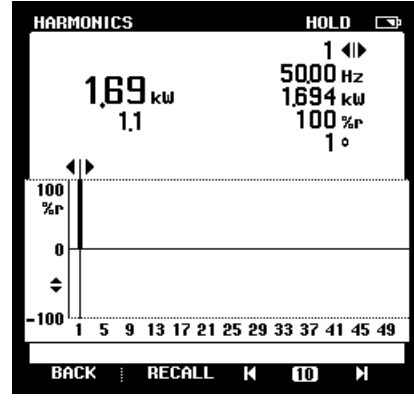


Şekil 5.17: Evirici çıkışı ölçüm değerleri a) Güç değeri ile gerilim ve akım dalga şekilleri, b) Gerilim ve akım dalga şekilleri ve değerleri

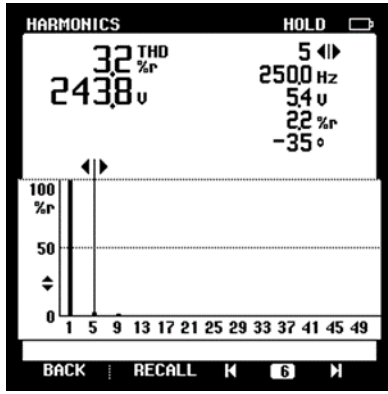
Kurulan FV santralde, evirici çıkışındaki harmonikler de incelenmiştir. İnceleme, tesisteki tüm yükler devre dışı iken yapılmıştır (Şekil 5.18). IEC 61000-2-4`e göre (compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances); faz başına 16 A ve daha düşük akım değerine sahip alçak gerilim elektrik şebekelerinde (Class II) Toplam Harmonik Bozulma (THD-Total Harmonic Distortion) değeri %8 ile sınırlandırılmıştır (Boksberger, 2018). Şekil 5.18.a incelendiğinde, THD değerinin %3,2 olduğu ve bu değer, limit değer altında kaldığı görülebilir. Şekil 5.18.b`de de, harmonik ölçümünün yapıldığı andaki evirici çıkış gücü değeri (1,69 kW) verilmiştir.



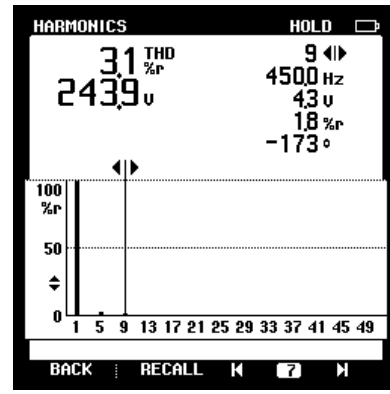
a)



b)



c)



d)

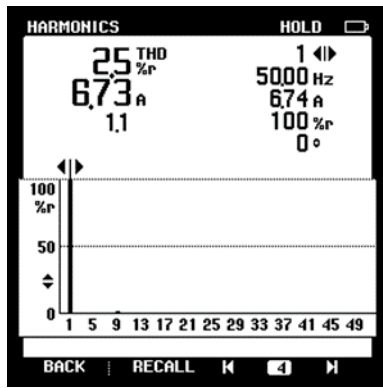
Şekil 5.18: Evirici çıkışı gerilim harmoniği ölçümleri a) Gerilim harmoniği THD ölçümü, b) Harmonik ölçümü sırasındaki güç değeri, c) Gerilim harmoniği ölçümü (5. harmonik), d) Gerilim harmoniği ölçümü (9. harmonik)

Şekil 5.18.c'de, evirici çıkışında gözlemlenen 5 no'lu gerilim harmoniği verilmiştir. Burada 5 no'lu gerilim harmoniği, %2,2 olarak gözlemlenmiştir. Şekil 5.13.d'de görüldüğü üzere ise, 9 no'lu gerilim harmoniği %1,8 olarak ölçülmüştür. IEC 61000-2-2'ye göre (Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems); 5 no'lu gerilim harmoniğinin en büyük değeri %6, 9 no'lu gerilim harmoniğinin en büyük değeri ise %1,5 olmalıdır (Boksberger, 2018). Burada limit değer in 9 no'lu harmonik için aşıldığı görülmüştür. Bu durumun, özellikle şebekeden gelen ve monofaze yüklerce üretilen harmoniklerden kaynaklı olması muhtemeldir.

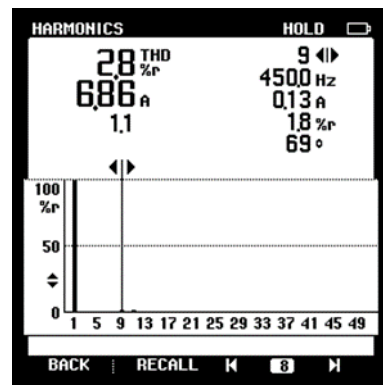
Şekil 5.19'da, evirici çıkış hattı üzerinde ölçülen akım harmoniklerine ait grafikler ve ölçüm sonuçları verilmiştir. IEC 61000-3-4'e (Limitations of emissions of harmonic currents in LV power supply systems for equipment rated



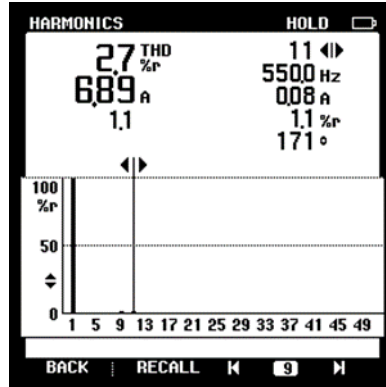
>16A) göre; ilgili harmonik derecesindeki akımın değeri, temel bileşene oranlandığında; 9. Harmonik için %3,8'i, 11. Harmonik için ise %3,1'i geçmemelidir (Boksberger, 2018). Şekil 5.19.a`da akımın temel bileşeni, Şekil 5.19.b`de sistemde ölçülen 9 no`lu harmonik akımı (0,13 A) ve Şekil 5.19.c`de, yine sistemde ölçülen 11 no`lu harmonik akımı (0,08 A) görülmektedir. 9 no`lu harmonik akımı temel bileşene oranlandığında %1,9, 11 no`lu harmonik akımı temel bileşene oranlandığında ise %1,18 değeri elde edilir ki bu değerler, yukarıda bahsi geçen limit değerlerin altındadır. Akım harmonikleri için THD değeri ise <%3,5 olmalıdır. Şekil 5.19.a`ya göre bu durum da sağlanmaktadır (THD=%2,5).



a)



b)



c)

Şekil 5.19: Evirici çıkışı akım harmoniği ölçümleri a) Akım harmoniği THD ölçümü, b) Akım harmoniği ölçümü (9. harmonik), c) Akım harmoniği ölçümü (11. harmonik)

## 5.2.5 Yük Bankı Deneyleri

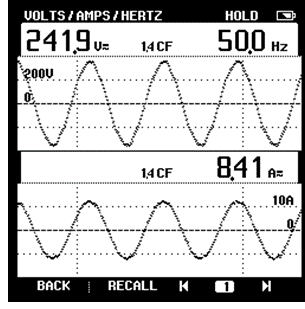
Kurulan mikro FV sistem, evirici çıkışına tesis edilen 2,5 kW gücündeki rezistif yük bankı ile de test edilmiştir. Şekil 5.20`de, test düzeneği görülmektedir.



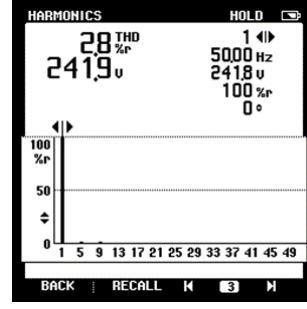
Şekil 5.20: Evirici çıkışı rezistif yük bankı test düzeneği

Test için kullanılan yük bankı, pako şalter ile manuel olarak kontrol edilen beş kademedan oluşmaktadır. Her bir kademe de, kendi içinde her biri 100 W değerinde beş kademe ihtiva etmektedir. Kademe yüklemelerindeki elektriksel verileri toplayabilmek maksadıyla, Şekil 5.20`de görülen Fluke 43B güç kalitesi analizöründen faydalanılmıştır.

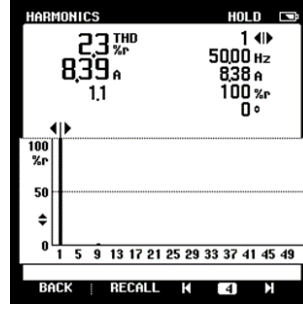
Sistem; 500 W ve 2.500 W`lık iki kademede yüklenmiş olup, her iki ölçüm sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.21 ve Şekil 5.22`de sunulmuştur. Her iki yük için yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde, evirici çıkışının yük değişimlerinden etkilenmediği, sadece 2.500 W`lık yük devredeyken evirici çıkış gerilimindeki artış nedeniyle (241,9 V`tan 243,8 V`a) gerilim için THD değerinde bir artış (%2,8`den %3,2`ye) meydana geldiği görülmüştür. Rezistif yük bankı kademeleri sıfır pozisyonuna alındığında ve sadece yük bankı soğutma fanı devredeyken ise, Şekil 5.23`te görüldüğü üzere, çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri ile gerilim ve akım harmoniklerinde kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



a)

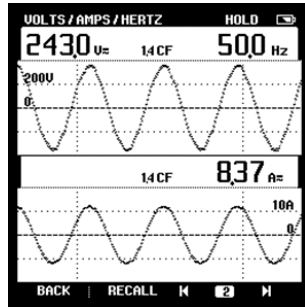


b)

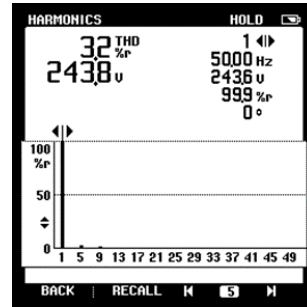


c)

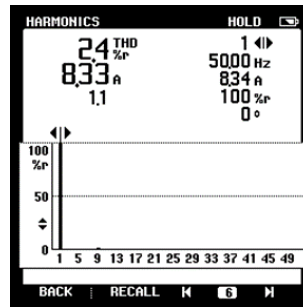
Şekil 5.21: 500 W'lık rezistif yük için evirici çıkış değerleri a) Gerilim ve akım dalga şekilleri, b) Gerilim harmonikleri, c) Akım harmonikleri



a)

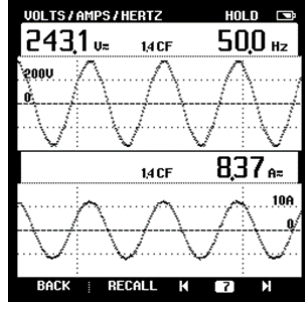


b)

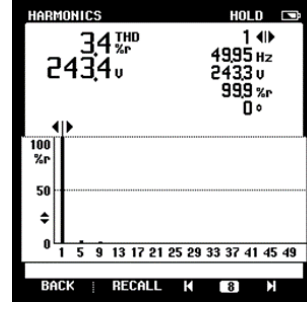


c)

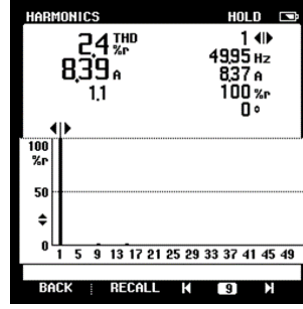
Şekil 5.22: 2.500 W'lık rezistif yük için evirici çıkış değerleri a) Gerilim ve akım dalga şekilleri, b) Gerilim harmonikleri, c) Akım harmonikleri



a)



b)



c)

Şekil 5.23: Yük kademeleri sıfır pozisyonu için evirici çıkış değerleri a) Gerilim ve akım dalga şekilleri, b) Gerilim harmonikleri, c) Akım harmonikleri

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ülkemizde ve dünyada, sürekli olarak yaygınlaşan FV sistemler üzerine yapılan bu çalışmada, piyasa yoğunluğu oldukça fazla olan şebeke bağlantılı FV sistemler ele alınmıştır. Bu kapsamda, Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi çatısında kurulu 2,5 kW gücünde FV santralin, ulusal enterkonnekte şebekeye entegrasyonu amaçlı yapılan tasarım faaliyetleri ve kurulum çalışmalarının yanı sıra, santralin işletme altındaki durumu da ele alınmıştır.

Tüm bu çalışmaların ışığı altında, özellikle bu güçteki mikro santral diye tabir edilen FV santral kurulumlarının; kolay kurulum, hızlı devreye alma, şebekeye dair güç kalitesi üzerinde olumsuz etkilerinin olmaması gibi nedenlerle, ayrıca küçük ölçekte olmaları sebebiyle, şebeke üzerinde, devreye girme ve devreden çıkma anında yıkıcı etki yaratmamaları da dikkate alındığında, teşvik edilmeleri ve sayılarının artırılması noktasında pozitif bir kanaat elde edildiği rahatlıkla söylenebilir. Özellikle klima yüklerinin de devreye girmesi ile birlikte, yaz aylarında artan enerji talebine, tüm bu hususlar dikkate alınarak mikro ölçekli şebeke bağlantılı FV santrallerin cevap verebileceği ortadadır. Üretim-tüketim ilişkisinde, enerji mahsuplaşılması yoluna gidilmesi de, artı bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

2018 yılı Ekim ayı itibariyle, ülkemizde yaklaşık 7.000 MW seviyesine ulaşan şebeke bağlantılı FV santrallerin, bu çalışmada bahsi geçen hususlar da bütünüyle değerlendirildiğinde, yakın gelecekte ülkemiz enerji sektöründe hatırı sayılır bir yer edineceği rahatlıkla öngörülebilir.

## 7. KAYNAKLAR

Afework B., Hanania J., Stenhouse K., Yyelland B., Donev J., “*Solar Cell Efficiency, Types of PV Cells*” University of Calgary, June 25, (2018).

ABB PVS, “PVS800 central inverters [online]”, (Ekim 2018<sup>a</sup>)  
<https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/central/FVs800>

ABB TRIO, “TRIO-50.0/60.0-TL-OUTD [online]”, (Ekim 2018<sup>b</sup>)  
<https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/string/three-phase/trio-50-0kw>

ABB, REACT-3.6/4.6-TL [online]”, PDF version (Ekim 2018<sup>c</sup>)  
[https://library.e.abb.com/public/5818839539a04d4faea3c8842a20a288/REACT-3.6-4.6\\_BCD.00386\\_EN\\_RevH.pdf](https://library.e.abb.com/public/5818839539a04d4faea3c8842a20a288/REACT-3.6-4.6_BCD.00386_EN_RevH.pdf)

ABB, String inveter “UNO-DM-1.2/2.0/3.0-TL-PLUS 1.2 to 3.0 kW” PDF Version, p.4 2018

Alkan, S., Öztürk, A., Zavrak, S., Tosun, S. ve Avcı, E., “Bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacak fotovoltaik sistemin kurulumu”, *Elektrik–Elektronik–Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Eleco 2014*, 78-82, Bursa, 27-29 Kasım (2014).

Ayompe L., Duffy A., McCormack S. and Conlon M., “Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland”, *Energy Conversion and Management*, 52 (2) 816-825, (2011).

Boksberger H.U., “Electrical network and power converters” PDF Version, pp. (347-362), Paul Scherrer Institute (2018).

Boukebbous, S. E., Khelif, M., Kerdoun, D., “Voltage Control of Stand alone Photovoltaic System”, *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(3), 668-704, (2014).

Cetin E. and Yilanci A., 2016, Design criteria of ground mounted photovoltaic power plants: a sample for 441,60 kW power plant, Book Chapter (Developments in Science and Engineering), St. Kliment Ohridski University Press, ISBN 978-954-07-4137-6

Drif M., Pérez P.J., Aguilera J. and Aguilar J.D., "A new estimation method of irradiance on a partially shaded FV generator in grid-connected photovoltaic systems, *Renewable Energy*, 33 (9), 2048-2056, (2008).

Ege Kablo 2001 "PV1-F SOLAR KABLO" [online], <http://www.egekablo.com/?C=Details&ID=116>

Ellabban O., "Profitability Analysis for a Distributed Grid Connected Photovoltaic System in Qatar", *Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings*, (2018).

Eltawil M. A. and Zhao Z., "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems-A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 112-129, (2010).

EPDK., "2018 yılı Mayıs Ayı Elektrik Piyasası Sektör Raporu [online]", (Mayıs 2018) <https://www.epdk.org.tr/Detay/DownloadDocument?id=nKA4fFVVyEs>, (2018).

Gold Light, "12V 100AH Solar Battery GEL Battery [online]", (Ekim 2018) <http://www.goldlightpower.com/solar-gel-battery/6v-12v-standard-gel-solar-battery/china-good-price-12v100ah-solar-battery-gel.html>

Halabi L. M. and Mekhilef S., "Performance Analysis of Multi-Photovoltaic (FV)-Grid Tied Plant in Malaysia", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 164(1), 1-5, (2018).

Hua Hin, "Micro Inverter DXM300 [online]", (Ekim 2018) <http://www.huahinsolar.com/product/micro-inverter-dxm300/>

Jones-Albertus R., Cole W., Denholm P., Feldman D., Woodhouse M. and Margolis R., "Solar on the rise: How cost declines and grid integration shape

solar's growth potential in the United States". *MRS Energy & Sustainability*, Vol. 5, Page 1-14, (2018).

Kjaer S. B., Pedersen J. K. and Blaabjerg F., "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1292-1306, (2005).

Kohler A.Ş bir ALTO Holding "KOHLER AEL.MF.03" [online], <http://www.tuncsanelektrik.com/resources/pdf/kohler/kohlerelektronikkatalog.pdf>

Kyocera "KC125GHT-2 DATASHEET" PDF Version, p.2, (2018).

Lagorse, J., Paire, D., and Abdellatif, M., "Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, FV and battery", *Renewable Energy*, 34, 683-691, (2009).

Laib I., Hamidat A., Haddadi M., Ramzan N., Olabi A.G., "Study and simulation of the energy performances of a grid-connected FV system supplying a residential house in north of Algeria", *Energy*, 152, 445-454, (2018).

Li Y., Zhao B.Y., Zhao Z.G., Taylor R.A., Wang R.Z., "Performance study of a grid-connected photovoltaic powered central air conditioner in the South China climate", *Renewable Energy*, 126, 1113-1125, (2018).

Mondol J. D., Yohanis Y. G. and Norton B., "Comparison of measured and predicted long term performance of grid a connected photovoltaic system", *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1065-1080, (2007).

Nayan F., Ullah S., "Modelling of Solar Cell Characteristics Considering the Effect of Electrical and Environmental Parameters" *3rd International Conference on Green Energy and Technology · ICGET 2015* (2015).

Oktik, Ş., "Güneş-Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri", *Temiz Enerji Vakfı Yayınları*, Ankara. (2001).



Perlin J., “National Center for Photovoltaics; the National Renewable Energy Laboratory” produced this brochure as *NREL Report No. BR-520-33947*. August (2004).

Phoenix Contact, “PV-SET 2ST/1000DC/2MPP-SPDSC – 2801317” PDF Version p.5 (2013).

Photonic, “High Efficiency 40A MPPT Solar Charge Controller [online]”, (Ekim 2018) <https://www.photonicuniverse.com/en/catalog/full/200-High-efficiency-40A-MPPT-solar-charge-controller-with-LCD-display-and-5m-cable-for-solar-panels-up-to-520W-12V--1040W-24V-up-to-150V.html>

Ranabhat K., Patrikeev L., Revina A. A., Andrianov K., Lapshinsky V., Sofronova E., “An Introduction To Solar Cell Technology”, *Peoples` Friendship University of Russia*, Paper number: 14(4), 405, 481 – 491 (2016).

Ropp M. E. and Gonzalez S.,”Development of a MATLAB/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Page(s): 195-202, 24(1), (2009).

Rüther R., Zilles R.,”Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil”, *Energy Policy*, 39(3),1027-1030, (2011).

Seval Kablo ürün kataloğu [online]”, PDF Version (Kasım 2018), [http://www.sevalkablo.com/upload/catalog/seval\\_catalog.pdf](http://www.sevalkablo.com/upload/catalog/seval_catalog.pdf)

Siemens AG 2018 “MCB MODEL No: 5SJ4101-7HG40” [online], <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/5SJ4101-7HG40>

Siemens AG 2018 “RCD MODEL No: 5SM2121-6” [online], <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/de/Catalog/Product/5SM2121-6>

Skoplaki E. and Palyvos J.A.,”On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations”, *Solar Energy*, 83(5), 614-624, (2009).

South China Electric (Xiamen) Co., Ltd, "SZ-1250" [online], <https://south-china-electric.en.made-in-china.com/product/WXtmaVvTsAhc/China-1250kVA-Oil-Immersed-Distribution-Transformer-with-Onan.html> (2018).

Woyte A., Van Thong V., Belmans R. and Nijs J., "Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(1), 202-209, (2006).

Yang Y., Ruan G., Xiang C., Wang G., Tour James M., "Flexible Three-Dimensional Nanoporous Metal-Based Energy Devices". *Journal of the American*, 136 (17), 6187–619 (2014).

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nurlan MAJİDZADE

Doğum Yeri ve Tarihi : Lankaran / Azərbaycan, 22.02.1994

Lisans / Üniversite : Güç Sistemleri Mühendisliği,  
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye  
Universiteti

Elektronik posta : nurlanmajidzade@gmail.com

İletişim Adresi : Bakü/AZERBAJYCAN

### **Yayın Listesi:**

• Majidzade N., Köroğlu S., Çetin E., “Design procedure of 2 kWp on-grid photovoltaic power plant”, *SOLARTR 2018 - Solar Conference & Exhibition*, İstanbul, Türkiye, Kasım 29-30 (2018).