

**T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE FOTOVOLTAİK DİZİLERDE
ELEKTRİKSEL ARIZA TESPİTİ**

Heybet KILIÇ

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

OCAK-2021

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana sunduğu her türlü destek ile başarıya ulaşmamı sağlayan saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ'e ve özellikle çalışma konusunu belirleme aşamasında katkı sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Musa YILMAZ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca 2214-A Doktora Sırası Yurtdışı Araştırma Bursu kapsamında, 1 yıllık Hollanda'da Delft Ünitesinde geçirmem için verdikleri maddi desteklerinden ve doktora sağladıkları katkılardan ötürü TUBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Projenin deneysel çalışmasının yapılmasına DUBAP-MÜHENDİSLİK.19.005 Nolu projeyle katkı sunan Dicle Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
ŞEKİL LİSTESİ.....	X
KISALTMA VE SİMGELER.....	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	4
1.3. Tezin Katkısı	5
1.4. Tezin Yapısı	6
2. KAYNAK ÖZETLERİ	9
2.1. Toprak Arıza Tespit Kesicileri	10
2.2. Aşırı Akım Koruma Cihazları(AAKC)	12
2.3. Hata Tespit ve Sınıflandırma Algoritmaları	13
2.4. Mevcut Arıza Koruma Çözümleri	17
3. MATERYEL ve METHOD	19
3.1. PV Sistemler ve Teknolojileri	19
3.1.1. Mevcut Durum ve Trendler	19
3.1.2. Solar Hücre Teknolojileri	21
3.1.3. Güneş Hücrelerinin Ölçeklendirilmesi	22
3.1.4. Tipik PV sistemleri	23

3.1.4.1. PV Dizisi.....	24
3.1.4.2. Baypas Diyotu	26
3.1.4.3. Şebeke-Bağlı İnverter	26
3.1.4.4. PV Sistemlerde Topraklama Sorunları	25
3.1.4.5. Toprak Arıza Tespit Kesicileri (TATK).....	28
3.1.4.6. Aşırı Akım Koruma Cihazları (AAKC)).....	29
3.1.4.7. Maksimum Güç Noktası İzleyici (MPPT).....	29
3.1.5. PV Dizilerinde Arıza Analizinin Zorlukları.....	30
3.2. PV Modüllerinin Modellenmesi ve Simülasyonu	31
3.2.1. Solar Hücre Modeli.....	31
3.2.2. Modelleme Algoritması.....	33
3.2.3. PSCAD ile Simülasyon.....	35
3.2.4. Tek kristalli silikon PV modül.....	37
3.2.5. Tek kristalli silikon PV sistemi.....	38
3.3. Deneysel Kurulum.....	39
3.4. Arıza Tespiti için Veriye Dayalı Bir Yaklaşım: RVFL Ağı ve EKK-SVM	41
3.4.1. Var Olan Yöntemlerin Limitleri	41
3.4.2. Elde Edilen Araştırma Katkıları	42
3.4.3. Veri Ön İşleme.....	43
3.4.3.1. Verilerin toplanması	43
3.4.3.2. Özelliklerin Elde Edilmesi.....	44
3.4.3.2. KKA ile Özellik Çıkarma.....	46
3.4.4. RVFL ağ modelinin oluşturulması.....	46
3.4.4.1. Seyrek-Düzenlenmiş RVFL Ağı.....	48
3.4.4.2. Gürbüz-Seyrek-Düzenlenmiş RVFL	50
3.4.4.3. Çevrimiçi Gürbüz-Seyrek-Düzenlenmiş RVFL	53
3.4.5. En Küçük Karaler-Destek Vektör Makinesi(EKK-SVM).....	56

4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	59
4.1.	KD ve AD Arızalarının Simülasyonu	59
4.1.1.	I-V Karakteristik Analizi	61
4.1.2.	KD Arızası ve Analizi	63
4.1.3.	KD Arızalarının Simülasyon Sonuçları	63
4.1.3.1.	Düşük PV Modül Uyumsuzluğuna Sahip KD Arızası	63
4.1.3.2.	Yüksek PV Modül Uyumsuzluğuna Sahip KD Arızası	65
4.1.4.	AD Arızası ve Analizleri	67
4.2.	KD ve AD Arızalarının Deneysel Çıktıları	69
4.3.	Arıza Tespit Metodunun Simulasyon Sonuçları ile Doğrulanması	72
4.3.1.	KD Arızaları	72
4.3.2.	AD Arızaları	72
4.3.3.	Normal Çalışma Koşulları	73
4.4.	Simulasyon Sonuçları	73
4.4.1.	Bloklama Diyotlu Kısa Devre Arıza Durumları	77
4.4.2.	Işınım veya Sıcaklık Değişikliğinden Kaynaklanan Durumlar	78
4.4.3.	Kısmi Gölgeleme Koşullarından Kaynaklanan Problemler	79
4.4.4.	Gürültülü Ölçümlerle KD-AD Hataları	79
4.4.5.	Hesaplamalı Verimlilik Karşılaştırması	80
4.4.6.	Önceki Çalışmalarla Karşılaştırma	80
4.5.	Yöntemin Deneysel Olarak Doğrulanması	81
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	83
6.	KAYNAKLAR	87
	ÖZGEÇMİŞ	93

ÖZET

MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE FOTOVOLTAİK DİZİLERDE

ELEKTRİKSEL ARIZA TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

Heybet KILIÇ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2020

Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK), artan talep ve küresel çevre problemleri dikkate alındığında sürdürülebilir enerji üretimine önemli ölçüde katkı sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi, teknik, ekonomik ve çevresel faydalarından dolayı en ilgi çekici güç kaynaklarından biridir. Fotovoltaik (PV) sistemlerinin artan kullanımı, PV endüstrisi tarafından bilinmeyen veya öngörülemeyen çeşitli teknik sorunları ortaya çıkarmıştır. PV dizisi kısa devre ve açık devre hataları, PV arızasına ve daha düşük sistem verimliliğine neden olabilecek sorunlardan biridir. Bu arızalar, düşük ışıyım koşullarında veya arızaya yakın elektrik potansiyeline sahip noktalar arasında olması halinde, yani düşük uyumsuzluk oranında meydana geldiğinde neredeyse hiç tespit edilemez. Ayrıca, maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmaları, farklı çalışma koşulları altında bir PV dizisinin güç çıkışını optimize ederken, bu tür arızaları tespit etme zorluğunu daha da artırabilmektedir. Belirtilen nedenlerden ötürü, PV sistemin sabit ve maksimum verimle çalışabilmesi için bu tür arızaların tespit edilmesi hayati önem arz etmektedir.

Bu tezde, PV dizilerde arıza tespiti için gürbüz bir veri odaklı yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, ayar yapılmadan rastgele gizli katman parametrelerini atama avantajına sahip rastgele vektör işlevsel bağlantı ağlarına (RVFLN) dayanmaktadır. Arıza tespit doğruluğunu azaltan ölçüm gürültüsü, uzun eğitim süresi ve aşırı uydurma gibi etkileri ortadan kaldırmak ve çıktı ağırlıklarını hesaplamak için, kayıp ağırlık faktörlü l_2 -norm(bu çıkış akımı ise ismi özette daha mantıklı olur) kullanan seyrek düzenleme yöntemi kullanılmıştır. Aykırı değer örneklerine karşı güçlü bir sağlamlık elde etmek için, parametrik olmayan kernel yoğunluğu tahmini, kayıp ağırlıklandırma faktörü atamak için kullanılmıştır.

Simülasyon ve deneysel çalışmalar yoluyla önerilen yöntemin performansının, yalnızca PV dizilerinin çıkış akım ve gerilim ölçümlerine dayanarak, kısa ve açık devre arızalarını tespit etmede başarılı olduğu gösterilmiştir. En küçük kare destekli vektör makinesiyle karşılaştırıldığında daha güçlü gürbüzlüğe ek olarak, önerdiğimiz yöntemin kısa devre ve açık

devre için sırasıyla% 80 ve% 100 ortalama tespit doğruluğu sağladığı da bu çalışmada gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, fotovoltaiik dizi, kısa devre arızası, açık devre arızası, arıza tespiti, rasgele vektör-bağlantı ağı, seyrek düzenleme



ABSTRACT

MACHINE LEARNING BASED FAULT DETECTION IN PV ARRAYS

PhD Thesis

Heybet KILIÇ

UNIVERSITY OF DICLE
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

2020

Renewable Energy Resources (RES) contribute significantly to sustainable energy generation given the increasing demand and global environmental degradation. Among various RES, solar energy is one of the most attractive power sources due to its technical, economic and environmental benefits. The increasing use of photovoltaic (PV) systems poses various technical problems previously unknown to the PV industry. PV array short circuit and open circuit faults are one of the problems that can cause PV failure and lower system efficiency. These faults are hardly detectable at low irradiance conditions or when the fault occurs between points with near electrical potential, i.e. low mismatch faults. Moreover, maximum power point tracking (MPPT) schemes can further increase the difficulty of detecting such faults while optimizing the power output of a PV array under different operating conditions. Due to the stated reasons, it is vital to detect such faults in order for the PV system to operate stably and with maximum efficiency.

In this thesis, a robust data-driven method is proposed for fault detection in PV arrays. Our method is based on random vector functional link networks (RVFLN) that have the advantage of randomly assigning hidden layer parameters without adjustment. The sparse regulation method using l_2 -norm with loss weight factor was used to eliminate the effects such as measurement noise, long training time and overfitting, which reduce fault detection accuracy, and to calculate output weights. To obtain a strong robustness against outliers samples, the non-parametric kernel density estimation was used to assign a loss weighting factor.

Through simulation and experimental studies, the performance of our proposed method has been shown to be successful in detecting short and open circuit faults based solely on the output current and voltage measurements of PV arrays. In addition to the stronger robustness compared to the smallest square support vector machine, we have also shown that the method we propose provides an average detection accuracy of 80% and 100% for short circuit and open circuit, respectively.

Keywords: Renewable energy resources, photovoltaic array, short circuit faults, open circuits faults, fault detection, random vector-link network, sparse-regularization.



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. İzin verilen maksimum toprak akımı algılama ayarları	11
Çizelge 2.2. Mevcut PV arıza tespiti yöntemleri	13
Çizelge 2.3. Mevcut PV arıza korumasının yöntemleri	17
Çizelge 3.1. Solar teknolojilerinin özeti	21
Çizelge 3.2. Tek kristalli PV modül parametreleri	38
Çizelge 3.3. 5kW tek kristalli silikon PV sistemindeki ana bileşenlerin parametreleri	39
Çizelge 3.4. Deneysel PV bileşenleri	41
Çizelge 4.1. Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip KD arızaları için simülasyon sonuçları	64
Çizelge 4.2. Yüksek PV modül uyumsuzluğu KD arızasının simülasyon sonuçları	65
Çizelge 4.3. STK'de açık devre arızasının simülasyon sonuçları	68
Çizelge 4.4. Deneysel sonuçların özeti	72
Çizelge 4.5. Simüle edilmiş KD arızaları için simülasyon sonuçları	75
Çizelge 4.6. Simüle edilmiş AD arızaları için simülasyon sonuçları	75
Çizelge 4.7. Bloklama Diyotlu KD arızaları için simülasyon sonuçları	78
Çizelge 4.8. Gürültülü ölçüm ile KD-AD arıza algılama doğruluğu	80
Çizelge 4.9. Hesaplamalı verimliliğin karşılaştırılması	80
Çizelge 4.10. KD Arızaları için deneysel sonuçlar	82
Çizelge 4.11. AD Arızaları için deneysel sonuçlar	82

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1.	Bakersfield, California güneş santrelinde arıza nedeniyle oluşan yangın sonucunda oluşan tahribat	2
Şekil 1.2.	Mount Holly, North Carolina, yangın felaketi	3
Şekil 1.3.	PV sisteminin izleme ekipmanları	4
Şekil 2.1.	PV dizilerindeki yaygın arızalar	9
Şekil 2.2.	PV dizilerindeki topraklama arızaları	10
Şekil 2.3.	Sigorta erime eğrisi	12
Şekil 2.4.	I-V karakteristik	14
Şekil 2.5.	PV alanında zaman alanı reflektometrisi kurulumu için şematik diyagram	15
Şekil 2.6.	PV dizi kabloşuna adım girişi ve yansıyan dalga formları	15
Şekil 2.7.	Bir PV modülü için tek diyotlu modelin eşdeğer devresi	16
Şekil 3.1.	Hücre verimliliği iyileştirmeleri	19
Şekil 3.2.	Maliyet eğilimleri	20
Şekil 3.3.	Şebeke pariteleri ve yıllık \$ bazlı güneş enerji yıllık maliyet	21
Şekil 3.4.	PV sistem elemanları: hücre, modül ve dizi	22
Şekil 3.5.	Bir PV modülünün I-V eğrisi	23
Şekil 3.6.	Fotovoltaik sistem bileşenleri	23
Şekil 3.7.	Seri olarak m modüllü bir PV dizisinin I-V eğrisi	24
Şekil 3.8.	Paralel olarak n modüllü bir PV dizisinin I-V eğrisi	25
Şekil 3.9.	Birleştirilmiş seri ve paralelleme modüllerine sahip bir PV dizisinin I-V eğrisi	26
Şekil 3.10.	Tipik bir PV dizisi için P&O MPPT algoritması için P-V eğrisi	30
Şekil 3.11.	Tek diyot modeli için eşdeğer devre	31
Şekil 3.12.	Çift diyot modeli için eşdeğer devre	31
Şekil 3.13.	Bir PV modülü için tek diyot eşdeğer devre modeli	33
Şekil 3.14.	Bir PV modülü için tek diyot sayısal model	34

Şekil 3.15.	PSCAD PV sistem simülasyon kütüphanesi	36
Şekil 3.16.	MPPT algoritmali DA-DA dönüştürücü	36
Şekil 3.17.	Şebeke bağlı PV sistemin PSCAD’de hazırlanmış simülasyon modeli	37
Şekil 3.18.	10x10 PV modülden oluşan PV dizisi	38
Şekil 3.19.	STK'de bir PV dizisi ve PV modülünün I-V eğrileri	39
Şekil 3.20.	Deneysel kurulum için şebekeye bağlı PV dizisi: (1) PV dizisi, (2) invertör, (3) veri toplama ve işleme donanımı, (4) arıza empedansı ve (5) ısınım için referans modülü	40
Şekil 3.21.	KKA ile birlikte RVFL ağ modeli	47
Şekil 3.22.	SVM işleminin gösterimi	57
Şekil 4.1.	Güç sistemlerinde üç arıza evrimi durumu	60
Şekil 4.2.	Merkezi eviricili bir PV dizisindeki hat-hat KD ve AD arızaları	61
Şekil 4.3.	Açık bir günde arıza altında dizinin I-V özellikleri	62
Şekil 4.4.	Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizisinin simüle edilmiş çıkış güç, akım ve gerilim sonuçları	64
Şekil 4.5.	Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip arıza altında PV dizisinin I-V özellikleri	65
Şekil 4.6.	Yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizilerinde çıkış güç akım ve gerilim	66
Şekil 4.7.	Yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizilerinde KD arızası I-V grafiği	67
Şekil 4.8.	Açık devre arızası altında tüm PV dizisinin simülasyon sonuçları	68
Şekil 4.9.	Açık devre arızası altında tüm PV dizisinin simülasyon sonuçları	69
Şekil 4.10.	KD-1 arızasında osiloskop tarafından yakalanan geçici davranış (Gerilim=50V, Akım=20mA)	70
Şekil 4.11.	KD-3 arızasında osiloskop tarafından yakalanan geçici davranış (Gerilim=50V, Akım=20mA)	71
Şekil 4.12.	KD-6 arızasında osiloskop tarafından yakalanan geçici davranış(Gerilim=50V, Akım=20mA)	71
Şekil 4.13.	Simülasyon veri örnekleri dağıtımı	74
Şekil 4.14.	KD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı modül uyumsuzluk yüzdesi)	76

Şekil 4.15. KD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı kısa devre arıza direnci)	76
Şekil 4.16. AD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı sıcaklık değerleri).	77
Şekil 4.17. AD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı ısıma değerleri)	77
Şekil 4.18. Deneysel veri örnekleri dağıtımı	81



KISALTMA VE SİMGELER

AAKC	:Aşırı Akım Koruma Cihazları
AA	:Alternatif Akım
AD	:Açık Devre
ÇGSD	:Çevrimiçi Gürbüz Seyrek Düzenlenmiş
DA	:Doğru Akım
EKK	:En Küçük Kareler
GSD	:Gürbüz Seyrek Düzenlenmiş
IR	:Infrared
KD	:Kısa Devre
KKA	:Kanonik Korelasyon Analizi
KKT	:Karush-Kuhn-Tucker
MPPT	:Maksimum Power Point Tracking
NEC	:Ulusal Elektrik Kodu
NKDE	:Non-Parameteric Kernel Density Estimation
PV	:Photovoltaic
YEK	:Yenilenebilir Enerji Kaynakları
RVFL	:Random Vector Functional Link
SD	:Seyrek Düzenlenmiş
SSTDR	:Spread-Spectrum Time-Domain Reflectometry
STK	:Standart Test Koşulları
SVM	:Support Vector Machine
TATK	:Toprak Arıza Tespit Kesicileri
TDR	:Time-Domain Reflectometry

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyon

Çevre kirliliğine ilişkin artan endişe ve fosil yakıtlardaki azalma, çevre üzerinde daha düşük olumsuz etkiye sahip alternatif enerji kaynakları arayışını motive etmiştir. Bu kaynaklar arasında güneş, sınırsız miktarlarda ve elektrik enerjisine dönüşüm için hareketli parçalara ihtiyaç duymamakla birlikte, kısa kurulum süresi ve düşük bakım maliyeti gibi avantajlı özelliklere de sahiptir. Ayrıca, toplam kurulu fotovoltaik (PV) güç kapasitesi, PV modüllerinin fiyatındaki düşüş ve cazip devlet sübvansiyonları sayesinde sürekli artmaktadır. Türkiye'nin de üyesi olduğu Uluslararası Enerji Ajansı(IEA) 2020 verilerine göre; küresel enerji piyasasında, PV santral kurulu gücü 2017 yılında 102GW, 2018 yılında 103GW artmış, buna ek olarak 2019 yılında önceki yıla göre %12 artarak 115GW olmasıyla birlikte dünya genelinde toplamda 627GW ulaşmıştır.

Öte yandan, PV deki bu hızlı gelişmeler çözülmediği takdirde, ekonomik ve çevresel faydalarının tam olarak gerçekleştirilmesini engelleyebilecek bazı teknik sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunlar arasında modül arızaları, hatlar arası arızalar ve PV dizilerindeki toprak arızaları yer alır. Bunlarda, uygun koruma şemaları uygulanmazsa panellere zarar verebilir. Ayrıca, yangın riskleri ile birlikte ark tehlikelerine neden olarak hem enerji hem de elektrik gelirlerindede beklenmedik kayıplara neden olabilir. Belirtilen nedenlerden ötürü PV sistemlerinde beklenmedik olayları önlemek için arıza analizi, tespiti ve koruması çok önemlidir. PV sistemler, hareketli parçaları olmamasına ve genellikle az bakım gerektirmesine rağmen, PV dizileri, güç düzenleme üniteleri, bataryalar, kablolar ve şebeke bağlantılarından ötürü çeşitli hata veya arızalara maruz kalırlar (Kılıç ve ark. 2020, Zhao ve ark. 2013).

Güneş ışınması altında, PV dizileri enerji ürettiklerinden, arıza sırasında PV modüllerini tamamen devre dışı bırakmak oldukça güçtür. Ayrıca, PV santralleri çok sayıda PV modülünün elektriksel olarak seri ve paralel bağlanmasıyla oluşmasından dolayı, aralarındaki elektriksel bağlantılardaki herhangi bir arıza tüm sistem performansını etkileyebilir. Bu durum, PV sisteminin yalnızca en zayıf halkası (örneğin arızalı PV bileşenleri) kadar sağlam olduğu anlamına gelir. Büyük bir PV dizisinde, tüm sistem bozulana kadar PV sisteminde gizli kalabilen bir arızayı doğru şekilde tespit etmek veya tanımlamak zor olabilir. Buna ek olarak, geleneksel seri-paralel PV

1. GİRİŞ

konfigürasyonları, gerilim ve akımı artırarak daha yüksek arıza akımları veya DA ark riskine yol açarlar.

PV dizilerinde meydana gelen arızalar nedeniyle PV santral kurulumlarında birçok tehlike rapor edilmiştir. Şekil 1.1, 2009'da Kaliforniya'daki Bakersfield güneş santralindeki 383 kW'lık bir PV santralindeki arıza kaynaklı yangın sonuçlarını göstermektedir (Jackson 2009).



Şekil 1.1. Bakersfield, California güneş santrelinde arıza nedeniyle oluşan yangın sonucunda oluşan tahribat.

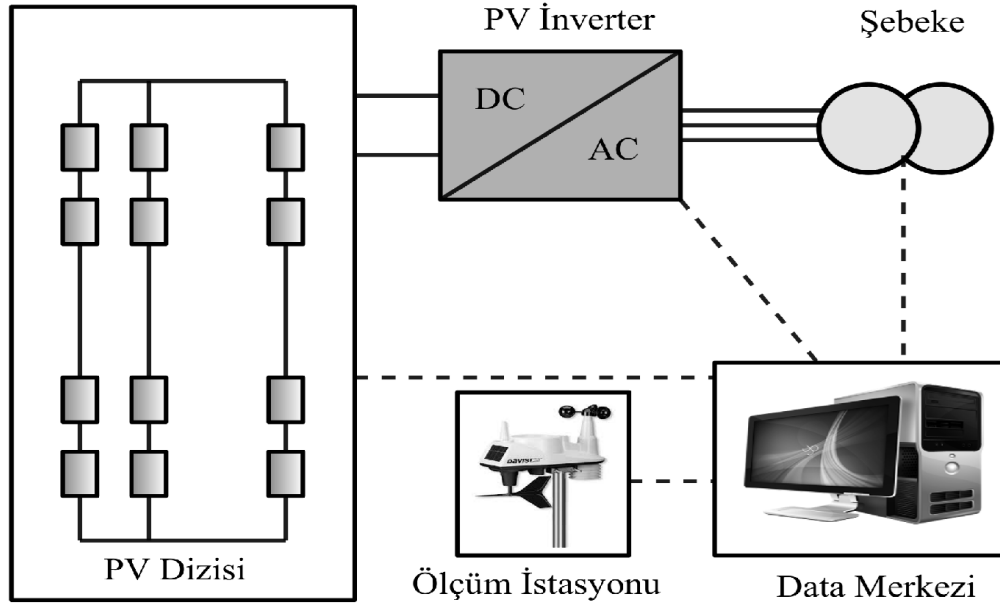
2011 yılında Kuzey Karolina'daki Mount Holly'deki 1 MW'lık bir PV enerji santralinde elektriksel arıza nedeniyle meydana gelen yangın sonucu oluşan tahribat, Şekil 1.2 'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Mount Holly, North Carolina, yangın felaketi.

Yukarıda resimlerde gösterilen örneklerde, elektriksel arıza bir yangın felaketine neden olana kadar fark edilmeden sistemde gizli kalmıştır. Bu tür tehlikeler, yalnızca PV dizilerindeki geleneksel arıza tespiti ve koruma düzenlerindeki zayıflığı göstermekle kalmaz, aynı zamanda bu tür sorunları önlemek için daha iyi bir çözüm yolunun acil ihtiyacını da ortaya çıkarır.

Günümüzde, PV sistemlerinin artan kapasitesi nedeniyle, PV kurulumlarına güç dönüştürme üniteleri, izleme sistemleri, koruma cihazları ve iletişim ekipmanları eklenmiştir. Sonuç olarak, PV verileri hem anlık olarak hem de geçmişe yönelik olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Örneğin, Şekil 1.3'de gösterildiği gibi tipik bir şebekeye bağlı PV sisteminde çeşitli PV verileri meteoroloji istasyonundan, PV dizilerinden, PV eviricilerinden ve elektrik şebekesinden elde edilebilir. Bu PV verileri, esas olarak PV sistem performansını değerlendirmek ve uzun süreler boyunca enerji kayıplarını hesaplamak için kullanılır. Geleneksel arıza tespit yöntemleri geçmiş PV verileri kullanılarak geliştirilmiş olsa da, arıza tespit yanıtını ve etkinliğini engelleyebilecek uzun bir işlem süresi (en az birkaç saat veya gün) gerektirir. Bu nedenle, kolayca elde edilebilen PV verilerinden daha iyi yararlanabilen daha duyarlı arıza algılama algoritmaları geliştirmek gereklidir.



Şekil 1.3. PV sisteminin izleme ekipmanları

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Arıza tespiti, PV sistemlerinin etkinliği, performansı ve güvenilirliği için önemlidir. PV sistemlerinin hareketli parçaları olmamasına ve genellikle az bakım gerektirmesine rağmen, yine de çeşitli çevresel koşullara tabidirler. Özellikle PV dizileri için (DA tarafı), gündüz vakti güneş ışığından her zaman enerji aldıklarından, arızalar sırasında PV modüllerini tamamen kapatmak zordur.

Bu tezde, PV dizilerindeki mevcut arıza tespiti ve koruma çözümlerinin zorlukları ve sınırlamaları gözden geçirilmektedir. Öncelikle PV sisteminde meydana gelen bir arızanın koruma cihazları tarafından algılanamayacağı gösterilmiştir. Bu amaçla 240Wp ticari olmayan, test amaçlı bir PV dizisi, gerçek çalışma koşulları altında, arızaları incelemek ve geleneksel arıza koruma şemalarındaki eksiklikleri belirlemek için tasarlanmıştır. Özellikle bazı Kısa devre(KD) ve Açık Devre(AD) arızalarının belirli koşullar altında geleneksel aşırı akım koruma cihazları (AAKC) tarafından tespit edilemeyebileceği gösterilmiştir. Bu nedenle, arızalar giderilmeden sistemde kalabilmektedir.

PV sistemlerinde meydana gelen arızaların geleneksel koruma cihazları ile tespit edilememesinin gösterilmesinin ardından, bu tür arızaları tespit edecek yöntemler

araştırılmış ve arıza tespiti için yöntem önerilmiştir. Koruma cihazlarının tespit etmekte yetersiz kaldığı arıza tipleri için, PV dizisi izleme sistemlerinde Rastgele Vektör Fonksiyonel Bağlantı (RVFL) ağı önerilmiştir. RVFL kullanarak arıza türlerini (arıza sınıflandırması) daha iyi tanımlamak için, PV dizilerinde makine öğrenme algoritmaları, matematiksel model bazlı yöntemler ve ölçüm temelli yaklaşımlar incelenmiştir. Bu yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek için de RVFL ağı geliştirilerek daha gürbüz hale getirilmiştir. Tezde önerilen yöntemin, en küçük kareler-destek vektör makinesi (EK-SVM) ile de karşılaştırılarak arıza tespit etkinliği gösterilmiştir.

1.3. Tezin Katkısı

Bu tez, yapılmış birçok önemli araştırma incelenerek literatüre katkı sağlamış ve mevcut çözümler üzerindeki bilimsel ilerlemeleri ortaya koymaya çalışmıştır.. Bunlar şu şekilde özetlenebilir.

Katkı 1: Literatürde PV dizilerindeki arıza tespit yöntemleri sadece bir veya birkaç parametreyi değişken kabul edip diğer parametreleri sabit olarak kullanırken (örneğin sadece güneş ışıması değişken; KD arıza direnci sabit, sıcaklık sabit), bu tezde güneş ışıması (W/m^2), sıcaklık ($^{\circ}C$), KD direnci (Ω), modül uyumsuzluk oranı (%) gibi arızanın karakteristiğini etkileyen tüm parametreler değişken olarak kabul edilmiştir.

Katkı 2: Literatür incelenmiş ve tespit edilmesi zor olan (yüksek KD direnci ve düşük modül uyumsuzluğu) arızalarda tespit doğruluk oranı %20-%30 iken, bu tezde önerilen yöntem ile bu oran %50'nin üzerine çıkartılmıştır.

Katkı 3: Önerilen yöntem, ayar yapılmadan rastgele gizli katman parametrelerini atama avantajına sahip RVFL yöntemi kullanıldığı için, geleneksel makine öğrenme yöntemlerine kıyasla tespit doğruluğunu artırırken, eğitim süresini ciddi oranda azaltmaktadır.

Katkı 4: Bu tezde önerilen yöntemde, RVFL ağının ağırlıkları, seyrek-düzenlenmiş şekilde hesaplandığı için, bu durum yalnızca arıza tespit doğruluğunu arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda aşırı uydurma, ölçüm gürültüsü ve geleneksel yöntemlerde de eksik olan sensör ve ölçüm hatalarından kaynaklı aykırı örneklerle karşı sağlamlığı da artırmıştır.

1. GİRİŞ

Katkı 5: Arıza algılama yöntemleri, mevcut PV eviricilerin kontrolörüne dahil edilmek üzere tasarlanmıştır. Yaklaşım, herhangi bir PV evirici topolojisiyle çalışabilmekte ve mevcut PV sistemlerinde kolayca bulunabilen ölçümlerden yararlanabilmektedir.

1.4. Tezin Yapısı

Daha önce tartışılan araştırma problemlerinin ışığında oluşturulan bu tez, geleneksel AAKC'lerin sınırlamalarını analiz etmeyi, açıklamayı, yeni arıza tespit ve yöntemlerini önermeyi, PV dizilerindeki arıza tespiti konusunda mevcut boşluğu ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Tez özellikle şu şekilde düzenlenmiştir:

Literatür taramasının sonuçları Bölüm 2'de sunulmaktadır. Bölüm 3, önerilen arıza tespit yöntemi RVFL ağına odaklanmaktadır. Bölüm 4'de, simülasyon ve PV deney setinin ayrıntıları, önerilen yöntemin hem simülasyon hem deneysel olarak test edilmesi ve sonucunda elde edilen bulgular sunulmuştur. Bölüm 5'te, tezin ve araştırma sonuçlarının bir özeti sunulmakta; ayrıca gelecekteki araştırma çalışmaları ele alınmaktadır.

Bölüm 2: Literatür incelemesi

- PV dizileri için mevcut arıza tespiti ve sınıflandırma çözümleri incelenmiştir.
- Mevcut yaklaşımların avantaj ve dezavantajları araştırılıp, karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3: Arıza tespiti için RVFL ağının geliştirilmesi

- PV Sistemler ile ilgili temel bilgilere yer verilmiştir.
- PV teknolojilerinden bahsedilmiştir.
- Simülasyon ve deney hakkında detaylar verilmiştir.
- Önerilen RVFL ağının teorik detayları verilmiştir.
- RVFL ağının eğitim süresini kısaltmak için seyrek-düzenleme yaklaşımının ağı entegre edilmesi ve detayları sunulmuştur.
- RVFL ağının gürültülere, aşırı benzetim gibi sorunlara karşı gürbüzleştirilmesi için online ayırık-düzenleme yöntemi geliştirilip ağı

uygulanma detayları verilmiştir.

- Karşılaştırma için SVM yönteminin teorik detayları verilmiştir.

Bölüm 4: Simülasyon ve deney seti, sonuç ve bulgularının değerlendirilmesi

- KD ve AD arızaları hakkında bilgi verilmiştir.
- KD ve AD arızalarının analiz yöntemi hakkında bilgilendirme yapılmıştır.
- KD ve AD arızalarına ait güç, akım ve voltaj grafikleri verilmiş ve analiz edilmiştir.
- AAKC tarafından arıza gidermenin hangi durumlarda başarılı ve başarısız olduğu analiz edilmiştir.
- Arıza tespiti ve korumadaki zorluklar ve bunların kör noktaları sunulmuştur.
- Önerilen yöntem simülasyon değerlendirilme sonuçları verilmiştir.
- Önerilen yöntemin arıza tespit etkinliği simülasyon ve deneysel olarak doğrulanmıştır.

Bölüm 5: Sonuç ve Gelecek Araştırmalar

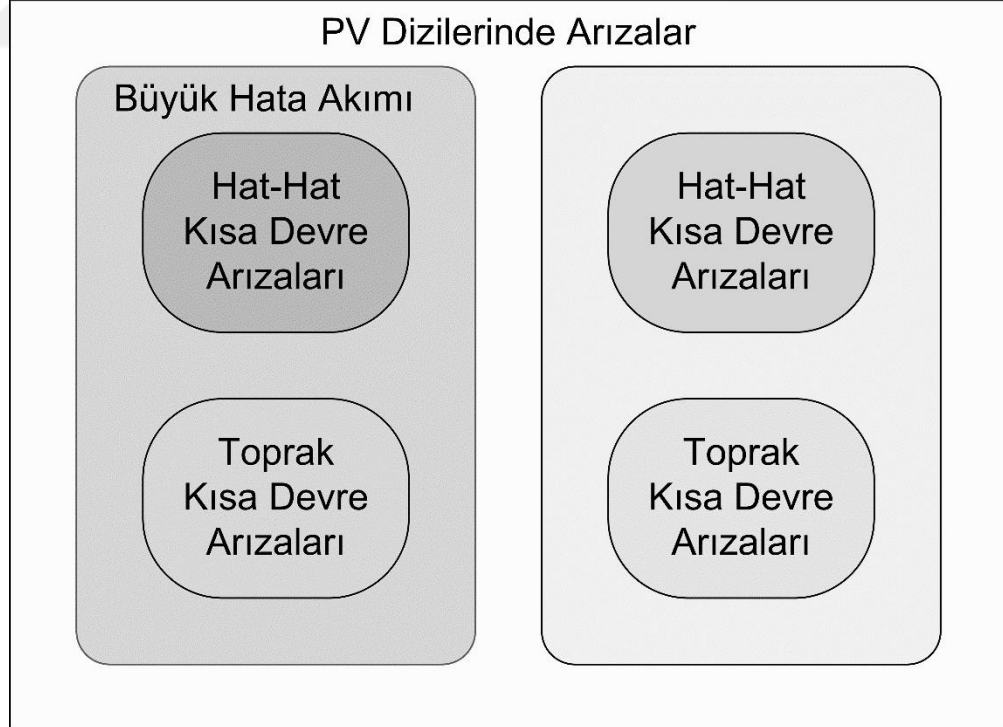
- Sonuçlar ve gelecekteki araştırmalar sunulmuştur.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölüm, güneş PV dizilerindeki çeşitli arıza türlerinin, geleneksel çözümlerin ve koruma açıklarının yanı sıra, mevcut arıza tespiti, sınıflandırma, koruma çözümleri yaklaşımlarının literatür incelemesini sunmaktadır. Ayrıca, bu mevcut yaklaşımların yararları ve sınırlamaları da sunulmuştur.

Bir PV sistemi, PV dizisi, güç elektroniği üniteleri ve ana şebekeye bağlantılar dahil olmak üzere çeşitli arızalara maruz kalabilir. Bu tez, diğer geleneksel DA veya AA güç kaynaklarından farklı olan doğrusal olmayan ve sınırlı akım-gerilim (I-V) özellikleri sergileyen PV dizilerine odaklanmaktadır. Bu nedenle, PV dizilerindeki arızalar dikkatli ve özel bir değerlendirme gerektirir. Şekil 2.1'te gösterildiği gibi, PV dizisi içinde yaygın olarak çeşitli arızalar bulunur. Bu tezde, çoğu PV eviricisi, PV dizileri ve şebeke arasında galvanik izolasyon sağladığından, PV dizisinin tek arıza akımı kaynağı olduğu düşünülmektedir. Bu arızalar arasında, KD arızaları (toprak arızaları ve hat-hat arızaları) büyük arıza akımına neden olma potansiyeline sahiptirler (Kılıç ve ark. 2020, Alam ve ark. 2015, Yuventi 2014, Spooner ve Wilmot 2008).



Şekil 2.1. PV dizilerindeki arızalar.

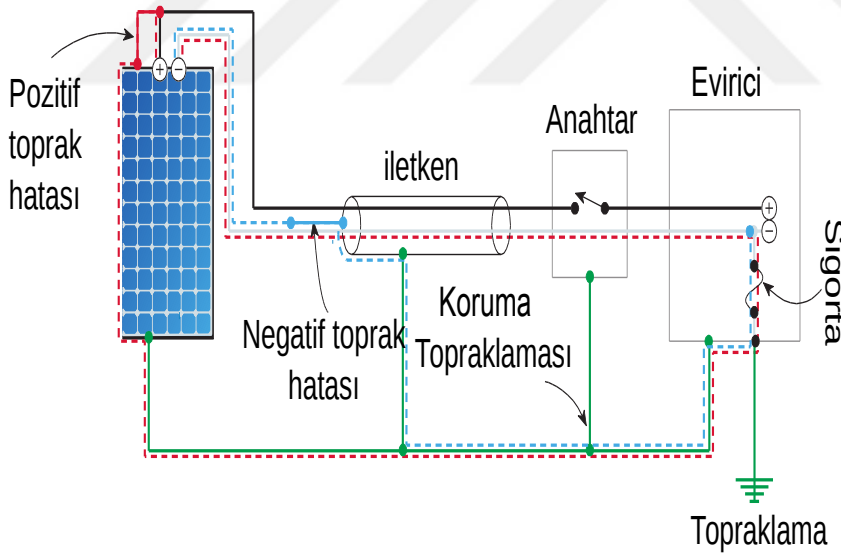
Uygun arıza tespiti veya koruma olmadan, PV dizisinde DA arklar gibi ciddi

2. KAYNAK ÖZETLERİ

sorunlara ve hatta yangın gibi tehlikelere neden olabilirler (Wiles 2008). Ek olarak, bu dört arıza kategorisinde seri veya paralel DA arklar meydana gelebilir (Wiles 2012). Özellikle seri arklar, değişken direnç benzer davrandıklarından, tanımlanması veya söndürülmesi zor olabilir (Flicker ve Johnson 2013). Geleneksel olarak arıza tespiti ve koruma; Ulusal Elektrik Kodu (NEC) uyarınca toprak arıza tespit kesicileri (TATK) ve aşırı akım koruma cihazlarını (AAKC) kullanılarak yapılır (Zhao 2010). Bu cihazların temel işlevleri ve sınırlamaları aşağıdaki gibi tanıtılmıştır.

2.1. Toprak Arıza Tespit Kesicileri

Toprak arızası algılama kesicileri (TATK), topraklanmış PV sistemlerindeki PV dizilerindeki toprak arızalarını tespit etmek ve kesmek için geleneksel bir çözümdür. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, negatif iletkenler topraklandığı için PV sistemi sistem topraklıdır (Harb ve Balog 2013). Şekil 2.2'deki diğer bir topraklamaya ekipman topraklaması denir: metalik modül çerçeveleri, ekipman ve iletken muhafazaları gibi akım taşımayan iletken parçalar topraklanmalıdır (Ladd ve ark. 2011).



Şekil 2.2. PV dizilerindeki Topraklama arızaları.

Küçük bir sigorta (örneğin, 1A), toprak arızası kaçak akımını algılayarak toprak arızalarını tespit etmek için genellikle PV eviricilerinin içine entegre edilmektedir. UL 1741 standardı, Çizelge 2.1'de verilen TATK ayarlarının yapılmasını gerektirir (Standard 2010).

Çizelge 2.1. İzin verilen maksimum toprak akımı algılama ayarları

Cihaz DA değerleri(kW)	Maksimum toprak arızası akımı algılama ayarı (Amper)
0-25	1
25-50	2
50-100	3
100-250	4
>250	5

Şekil 2.1'de, pozitif toprak arızası (kırmızı) veya negatif toprak arızası (mavi), kapalı arıza yolundaki toprak arıza akımı her zaman TATK üzerinden geri dönecektir. Arıza akımı yeterince büyük olduğunda, TATK (örneğin sigorta) devreyi açmak suretiyle akım geçişini akım geçişini engeller. Daha sonra PV eviricisi kapanacak ve PV dizisinin gücü açık devre koşullarında kesilecektir.

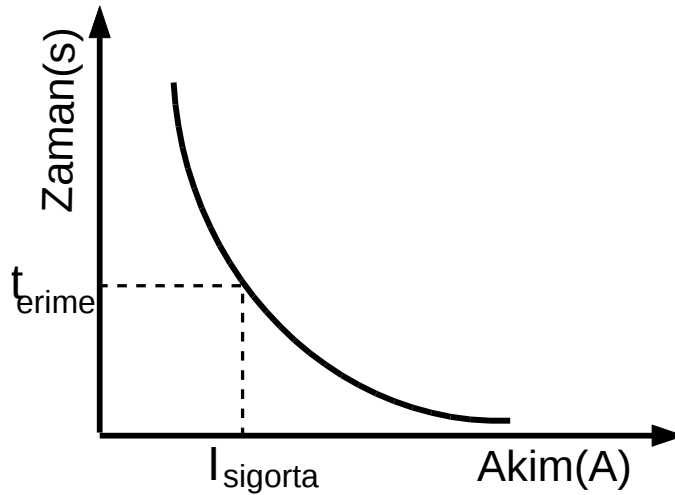
Bununla birlikte, (Ball ve ark. 2013) çift zeminli bir arıza durumunda TATK'nin kör noktaları keşfedilmiştir; bu durumun, (Brooks 2011)'de rapor edilen Bakersfield PV yangınının nedeni olduğuna inanılır. Bakersfield yangınındaki çift toprak arızasında birbirini ardına iki topraklama arızası meydana gelmiştir. İlk topraklama, Şekil 2.1'de böyle bir durum toprak ile negatif iletken arasında gerçekleşmiştir. Arıza akımı, TATK'nın ayarından daha küçük kalmış, böylece arıza PV sisteminde gizlenmiştir. Şekil 2.1'de, ikinci toprak arızası, topraklanmamış akım taşıyan iletken (yani pozitif iletken) ve ekipman topraklama iletkeni arasında meydana gelmiştir. Bu, yüksek büyüklükte bir toprak arıza akımına neden olmuş, böylece TATK sigortası eviricide hızlıca devreyi açar ve akım geçişini engeller. Ne yazık ki, birinci ve ikinci toprak arıza noktaları kapalı bir iletim döngüsüne neden olmuş, böylece yüksek büyüklükte arıza akımı kesintisiz olarak sürekli olarak bu döngüde akmıştır. Arıza akımı, iletkenlerin mevcut değerinden çok daha yüksek olduğu için, arıza akımı iletkende aşırı ısı oluşturarak iletken yalıtımının bozulmasına ve yangın tehlikesine yol açmaktadır. Çift toprak arızalarının tehlikeli arıza senaryosu, 2011'de Kuzey Karolina'daki Mount Holly'deki PV santralindeki diğer yangının nedeni olarak bulunmuştur(Energy 2011). Bu durumda, mevcut arıza akımı seviyesi TATK'nin değerinden çok daha düşük olduğu için ilk toprak arızası tespit edilmeden sistemde kalmıştır. Bununla birlikte, toprak arıza akımı, kapalı arıza yolunda

sürekli olarak aktığı ve toprak arızası da giderilemediği için zamanla yangın çıkmıştır

2.2. Aşırı Akım Koruma Cihazları(AAKC)

ABD Ulusal Elektrik Yasası (NEC), modülleri ve kabloları, arızanın neden olduğu aşırı akımdan korumak için aşırı akım koruma cihazlarının (AAKC) (örn. Sigorta) her PV dizisiyle seri olarak bağlanmasını gerekli kılmıştır (Pillai 2019). AAKC'nin (I_n) anma akımı, standart test koşulunda (STK) (1000 W/m^2 , 25°C) PV modüllerinin anma kısa devre akımının (I_{SC}) %156'sından az olmamalıdır (Bower 1999). Ayrıca I_n , hem UL standardı 2579 [17] hem de Avrupa IEC standardı 60269-6 ile uyumlu olmalıdır (Fuses 2010). PV sigortanın akımı (I_{nf}), IEC standardı 60269-6 [18] uyarınca $1.13 \times I_n$ (en az $1.76 I_{SC}$) olması gerekir. PV sigorta seçimi ile ilgili NEC, IEC ve UL standartları arasındaki ayrıntılı karşılaştırma (Ziar ve ark. 2014)'da verilmiştir.

Ek olarak, sigortanın mevcut karakteristiklere göre (bkz. Şekil 2.3) doğrusal olmayan belirli bir erime süresi (sigorta elemanlarını eritmek için gereken süre) vardır. Genel olarak, I_{nf} üzerindeki daha büyük bir akım genellikle daha kısa bir erime süresi gerektirir. Örneğin, akım I_{nf} 'ın biraz üzerinde ise sigorta bileşenlerinden iletken teli eritmesi için birkaç saat gerekebilir. PV arıza akımı I_{nf} altında kalırsa, sigortanın iletken teli erimez ve bu nedenle sigorta koruma boşluğu oluşur.



Şekil 2.3. Sigorta Erime eğrisi.

PV dizilerinde düşük güneş ışınımı, maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT), yüksek kısa devre arıza direnci veya düşük PV modül uyumsuzluğu gibi durumlar, daha düşük bir geri besleme akımı (I_{back}) neden oldukları için, arıza akımı I_{nf} altında kalır ve sigorta gerekli korumayı sağlayamaz. Bu durumda arızanın tespiti sistem performansı

açısından büyük önem arz etmektedir.

2.3. Arıza Tespit ve Sınıflandırma Algoritmaları

Yukarıda da belirtildiği gibi, sistemde belirli arıza senaryoları meydana geldiğinde TATK ve AAKC gibi koruma ekipmanlarının sistemde mevcut olmasına rağmen arıza başarılı bir şekilde temizlenemeyebilir ve tüm sistemde bir felakete neden olana kadar (örn. yangın tehlikesi) PV sisteminde tespit edilmeden kalabilir. Geleneksel arıza tespit ve koruma cihazlarının koruma boşluğunu doldurmak için, farklı teknikler kullanılarak çeşitli çözümler önerilmiştir.

Arıza tespiti, izlenen sistemde (Thomas 2002) bir şeylerin ters gittiğinin göstergesi olarak tanımlanır. Arıza tespitine ek olarak, arıza sınıflandırması arıza tipini otomatik olarak belirleyebilir. Bu nedenle, güneş PV sistemlerinde beklenmeyen sorunları izlemek ve tanımlamak için arıza tespiti ve sınıflandırma gereklidir. Mevcut çözümler aşağıda kısaca tartışılmış ve Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

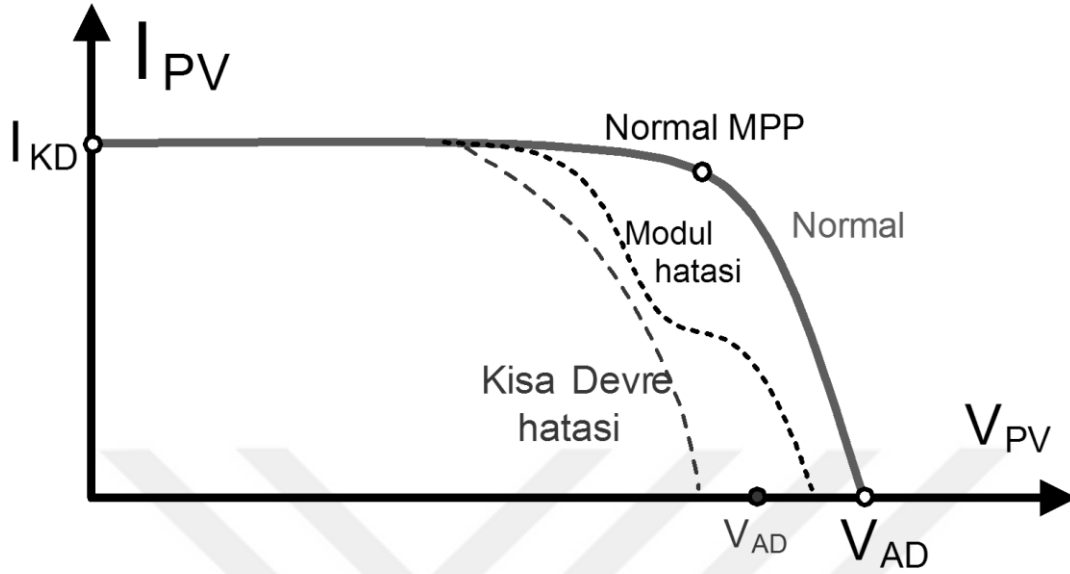
Çizelge 2.2. Mevcut PV arıza tespiti yöntemleri

Method	Toprak KD Arızaları	KD Arızaları	AD Arızaları	Yüksek Direnç KD Arızaları	Düşük PV modül Uyuşmasızlığı
TATK	✓	X	X	X	X
AAKC	X	✓	X	X	X
TDR	✓	✓	✓	X	X
SSTD	✓	✓	✓	X	X
İstatiksel Yöntemler	✓	✓	✓	X	X
Infrared Görüntüleme	X	X	X	X	✓
Diyot model Yaklaşımları	✓	✓	✓	X	X
Mevcut Makine Öğrenme Yöntemleri	✓	✓	✓	X	X

Akım-gerilim (I-V) eğrisi, bir PV modülünün, veya dizisinin çalışma noktaları hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, I-V eğrisi göze çarpan PV özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, I-V eğrileri kullanılarak seri kayıplar, şönt kayıpları, uyumsuzluk kayıpları, düşük akım ve düşük gerilim gibi durumlar tespit

2. KAYNAK ÖZETLERİ

edilebilmektedir (Abete ve ark. 2010, Hernday 2012, Miwa ve ark. 2006, Stellbogen 1993).

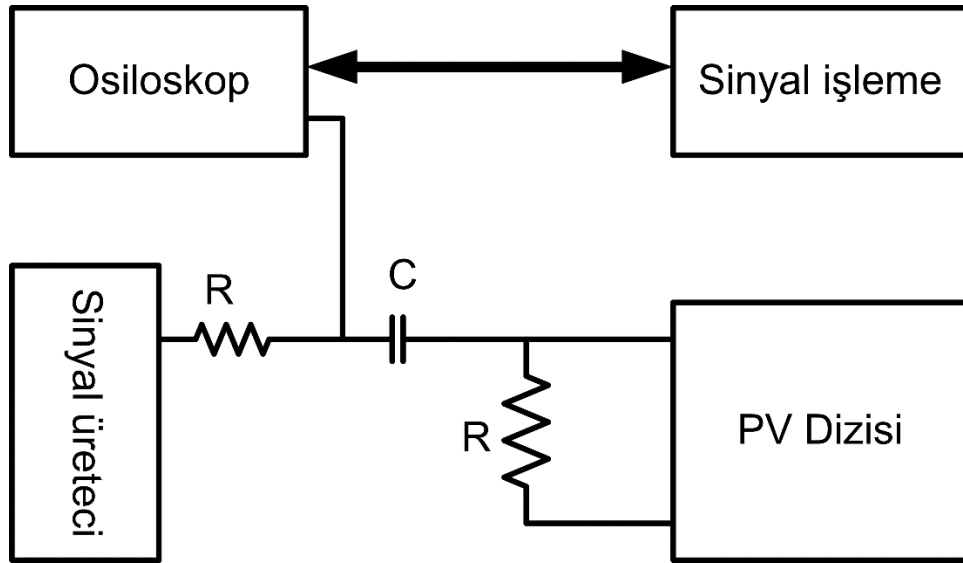


Şekil 2.4. I-V karakteristik.

Enerji üretimine dayalı PV sistemlerindeki anormalliği tespit etmek için istatistiksel yöntemler önerilmektedir (Vergure ve ark. 2008). Bir PV tesisinin her bir alt dizisinin ölçülen enerji üretimini açıklayıcı ve çıkarımsal istatistikler uygulanır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin 22 normal panelden tek bir PV panelinde bir kablolama arızasını başarıyla tespit edebildiğini göstermektedir.

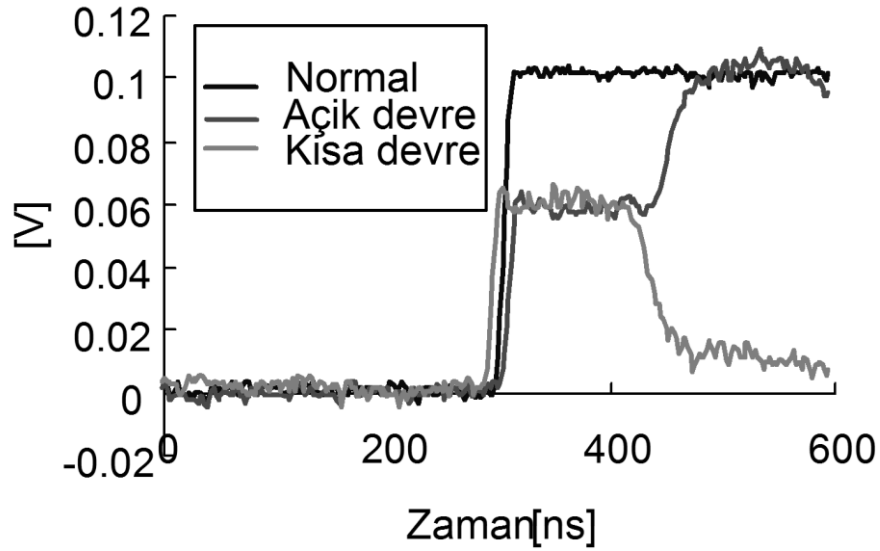
Kısmi gölgeleme (Nguyen ve ark. 2009), PV sağlık durumu izleme (Riley ve ark. 2012) ve PV dizilerinde kısa devre arıza tespiti PV performans değerlendirmesine bağlı olarak önerilmiştir (Karatepe ve Hiyama 2011). Bayesian Neural Network (BNN) ve regresyon polinom modelleri, büyük ölçekli PV dizileri üzerindeki kirlenme etkilerini tahmin etmek için önerilmiştir (Pavan ve ark. 2013). PV arıza tespiti ve sınıflandırması, (Zaho ve ark. 2012)'ta K-en yakın komşu ve (Hu 2012)'de destek vektör makinesi (SVM)'deki karar ağacı modelleri kullanılmıştır.

PV dizilerinde arıza konumu için (Schirone ve ark. 1994, Takashima ve ark. 2006, Takashima ve ark. 2009) zaman alanı reflektometrisi (TDR) önerilmiştir. Şematik diyagram Şekil 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. PV alanında zaman alanı reflektometrisi kurulumu için şematik diyagram.

Örneğin, Şekil 2.6, bir PV dizisine ve onun yansıyan dalga biçimlerine bir adım girdisini gösterir. Dalga biçimleri, açık devre arızası, kısa devre arızası ve direnç yükü gibi koşulların türüne göre farklılık gösterir.



Şekil 2.6. PV dizi kablosuna adım girişi ve yansıyan dalga formları.

Bununla birlikte, TDR'nin birkaç dezavantajı vardır. İlk olarak, test edilen PV sistemi çevrimdışı olmalıdır ve bu da enerji verimini etkileyecektir. İkincisi, yansıyan dalga biçimlerini gözlemlemek ve öğrenmek için insan girdisi (işgücü maliyeti)

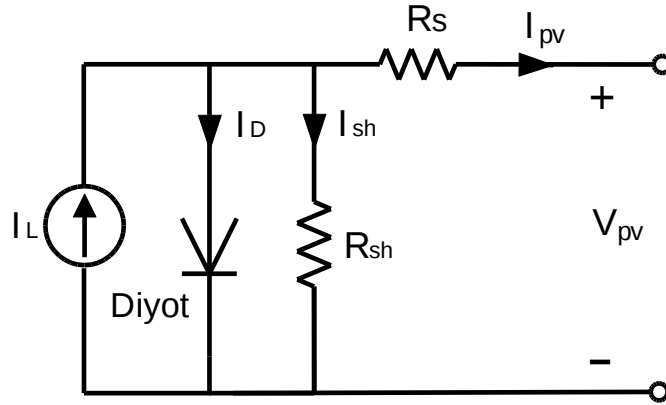
2. KAYNAK ÖZETLERİ

gerektirir, bu da otomatik arıza tespitinin etkinliğini engeller.

TDR'nin geliştirilmiş bir versiyonu olarak, uçak kablolama arızalarını tespit etmek için ticari olarak yayılmış spektrum zaman etki alanı reflektometrisi (SSTDR) önerilmiştir (Smith ve ark. 2005,). SSTDR, düşük test sinyali seviyelerine ve yüksek gürültü bağışıklığına sahiptir, bu da onu canlı kablo arızalarını (enerjili sistemlerde) tespit etmek için uygun bir çözüm haline getirir. PV toprak arızası tespiti için, toprak arızası durumunda SSTDR tarafından üretilen otokorelasyon zirveleri, normal olandan önemli ölçüde daha yüksektir. Buna göre (Alam ve ark. 2013)'da bir arıza tespit algoritması önerilmiştir. Ancak, SSTDR arıza yeri veya sınıflandırması için önerilmemiştir.

Kızılötesi (IR) termografi, PV modüllerinde geri dönüşü olmayan hasara ve güç kaybına neden olabilecek, PV modüllerindeki sıcak noktalar gibi, belirli uyumsuzluk arızalarını tanımlamak için kullanılmıştır (Munoz ve ark. 2008, Ancuta ve Cepisca 2011). IR denetimi periyodik ve tekrarlı olduğu için, PV bakım personeline ihtiyaç duyulması halinde, kullanım ömrü boyunca PV modülleri boyunca artan işçilik maliyetleri maliyetli olabilir.

Dahili seri direnç, arıza tespiti ve sınıflandırması için başka bir yaklaşımdır. Yaygın olarak kullanılan tek diyot modelinin şematik diyagramı Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Bir PV modülü için tek diyotlu modelin eşdeğer devresi.

Burada I_{pv} , PV modülünün çıkış akımıdır, I_L ışık üreten akımdır, I_s diyotun doygunluk akımıdır, V_{pv} modül gerilimidir. R_s , modülün eşdeğer dahili seri direncidir. R_{sh} , eşdeğer şönt direncidir. PV modüllerinin dahili seri direnci (R_s), PV modülleri içindeki bozulma tespiti için kullanılabilir. Gerçek R_s , I-V eğri analizi (Kunz ve Wagner 2004) veya açık devre gerilimi (Sera ve ark. 2008) etrafındaki ölçüm kullanılarak tahmin

edilebilir. Arıza tespiti için yararlı bir özellik sağlayan normal R_s ile karşılaştırıldığında, bozulmuş PV modüllerine ait R_s daha yüksektir.

2.4. Mevcut Arıza Koruma Çözümleri

Arıza tespit edildiğinde, bir arıza sinyali, PV bileşenlerinin hasar görmesini önlemek için arızayı kesmek için arıza koruma cihazlarını etkinleştirebilir. Sistem korumasının temel amacı, güç sistemindeki sorunlu bir alanın hızlı bir şekilde izole edilmesini sağlamaktır, böylece sistemin geri kalanına uygulanan şok en aza indirilir ve mümkün olduğunca sağlam bırakılır (Blackburn ve Domin 2015). Arıza koruması, arıza giderme veya arıza kesintisi olarak da adlandırılabilir.

PV uygulamalarında, güneş PV dizilerindeki arıza alanı, PV sisteminin geri kalanına olan etkinin en aza indirilmesi için izole edilmelidir. PV dizileri için mevcut arıza koruma yöntemleri Çizelge 2.3'te özetlenmiştir. Toprak arıza tespit kesicileri (TATK), aşırı akım koruma cihazları (AAKC) veya engelleme diyotları kullanır. Öte yandan, aktif yöntemler, arızayı tespit etmek için daha karmaşık algılama devreleri kullanır ve etkilenen PV bileşenlerinin enerjisini kesmek ve izole etmek için aktif devre elemanları olan kesicilere, kontaktörlere veya yarı iletken anahtarlara göre daha güvenilirlerdir (Luebke ve ark. 2011)

Çizelge 2.3. Mevcut PV arıza korumasının yöntemleri

Method	Maliyet	Karmaşıklık	Limitler
TATK (NEC standardı)	Düşük	Düşük	Yetersiz
AAKC (NEC standardı)	Düşük	Düşük	Yetersiz
Bloklama Diyotu (NEC standart dışı)	Düşük	Düşük	Güvensiz ve standart dışı
yarı iletken anahtarlar	Düşük	Orta	PV Modül düzeyinde
Koruma Röleleri	Yüksek	Orta	Yetersiz

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Pasif arıza koruma elemanları olan TATK ve AAKC'nin gibi koruma cihazlarının bariz sınırlamaları vardır ve bunlar daha önce tartışılmıştır. Ayrıca, bloke diyotlar AAKC'nin yerini almaz ve AAKC'nin normal çalışmasını önleyebilirler. Arıza korumasını iyileştirmek için aktif arıza koruma cihazları geliştirilmiş ve gösterilmiştir. Bu cihazların pasif olanlara göre avantajları bulunmaktadır. Ancak bunlar büyük ölçüde arıza tespit yöntemlerine (yani karar verme algoritmalarına) bağlıdır. Bu nedenle, aktif koruma cihazlarına duyarlı ve güvenilir açma sinyali sağlayabilen arıza tespit yöntemlerine hala büyük bir ihtiyaç vardır.

Bu bölümde, PV dizileri (DA tarafı) için mevcut arıza tespiti, sınıflandırma, konum ve koruma çözümlerinin literatür incelemesini sunulmuştur. Ayrıca, mevcut yaklaşımların yararları ve dezavantajları araştırılıp, karşılaştırılmıştır. Genel olarak, arıza tespiti, sınıflandırma ve konum yöntemleri, model tabanlı yöntemler, süreç geçmiş tabanlı yöntemler ve sinyal işleme tabanlı yöntemler olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. NEC tarafından gerekli kılınan TATK ve AAKC, PV dizilerinde arıza koruması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, daha önce bildirilen tehlikelere yol açabilecek zayıf yönleri ve sınırlamaları keşfedilmiştir.

Bu sorunu çözmek için, farklı teknikler kullanılarak çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ancak, gerçek zamanlı PV uygulamasında etkinliklerini engelleyebilecek sınırlamalar vardır. Bu nedenle, PV sistemlerini arıza tehlikelerinden korumak için daha iyi arıza tespit yöntemlerine acil ihtiyaç vardır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. PV Sistemler ve Teknolojileri

3.1.1. Mevcut Durum ve Trendler

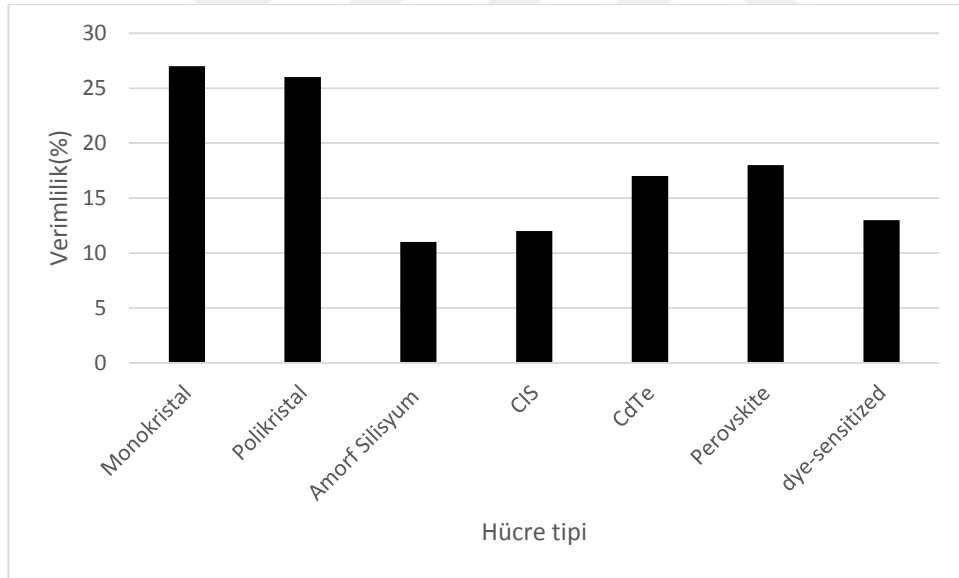
PV teknolojilerinde son yıllardaki çalışmalar üretim maliyetlerin düşürülmesi ve dönüşüm verimliliğinin artışı üzerine yoğunlaşmıştır. Bu iki temel eğilimde yaşanan gelişmeler PV teknolojilerin elektrik üretim şebeklerinde kullanımlarını artırmıştır.

Teknolojik gelişmeler nedeniyle, kristal bazlı silisyum modüller için ortalama hücre verimliliği her iki yılda ortalama % 1 artmaktadır. Teorik olarak bir silisyum hücrenin verimi maksimum% 33 civarlarındadır.

Şekil 3.1’de (IEA, 2019) de görüleceği üzere, kristal silisyum ve yerleşik ince film teknolojilerindeki gelişmelerin yanı sıra, yeni PV malzemeleri geliştirilmiştir, örneğin:

-Perovskite hücreleri: yüksek verimli hibrit organik - inorganik materyal

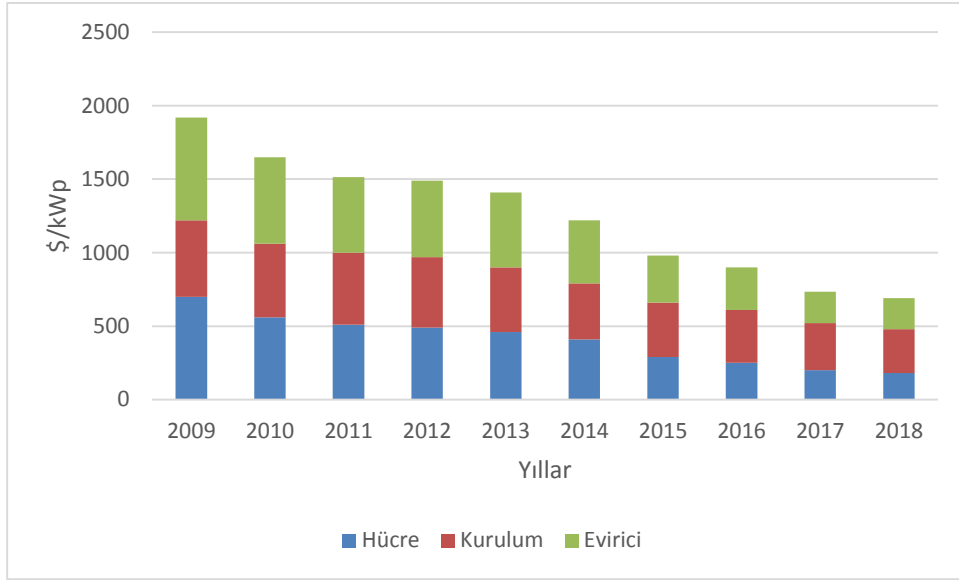
-Dye-sensitized hücre: Çok düşük maliyetli olmasına rağmen nispeten orta düzeyde verime sahip organik malzemeler.



Şekil 3.1. Hücre Verimliliği İyileştirmeleri.

Hücre teknolojilerindeki verim artırma çalışmalarına paralel olarak, hücre maliyetleri de sürekli düşmektedir. Şekil 3.2’de(IEA, 2019) de görüleceği ilginç olan şey, değer zincirinde maliyetlerin azalmasıdır, sadece ekipman değil, aynı zamanda kurulum ve yardımcı maliyetler de azalmaktadır.

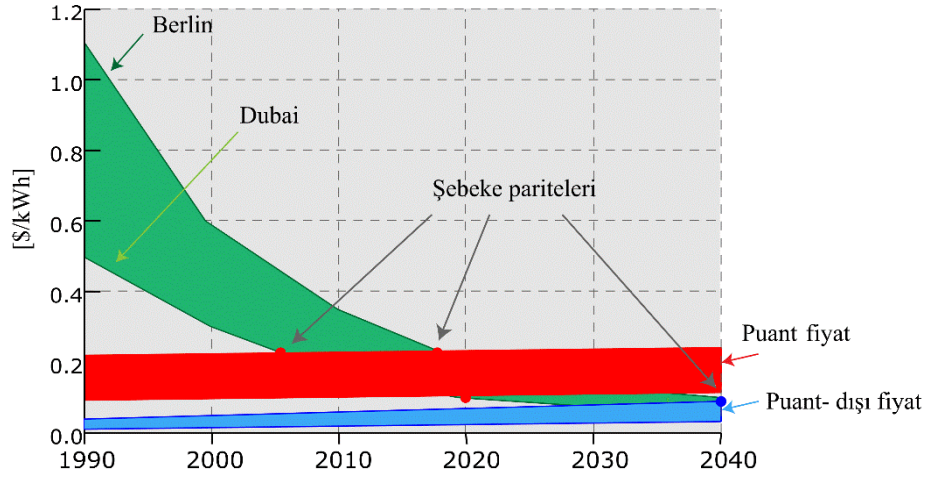
3. MATERYEL VE METOT



Şekil 3.2. Maliyet Eğilimleri.

Bir PV modülü tarafından üretilen enerjinin maliyeti, sadece sistemin boyutuna (nominal güç) değil, aynı zamanda kurulduğu yere de bağlıdır. Aynı sistem çoğu durumda aynı sermaye yatırımı için farklı miktarlarda yıllık enerji sağlayacaktır.

Örneğin Şekil 3.3'te(IEA, 2019) verildiği üzere, Berlin'de bir sistemin enerji verimi yaklaşık 900KWh / kWp iken Dubai 1.800kWh / kWp alır. Dolayısıyla, güneş enerjisinin "şebeke paritesine" ulaşabileceği tek bir nokta yoktur. Ayrıca, elektrik piyasaları temel olarak iki fiyat noktasına dayanmaktadırlar. Bunlar; tepe(puant) ve tepe noktası olmayan(puant-dışı), tepe noktası temel yükten önemli ölçüde daha pahalıdır. Sonuç olarak önümüzdeki yıllarda güneş enerjisi tepe nokta paritesine yaklaştıkça talep artışın mevcut artış oranının üzerine çıkacağından bahsedebiliriz. Mevcut eğilimler göz önüne alındığında, güneş enerjisinin 2040 yılına kadar dünyanın çoğu yerinde hem zirve hem de tepe dışı şebeke paritesine ulaşacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 3.3. Şebeke pariteleri ve yıllık \$ bazlı güneş enerji maliyet.

3.1.2. Solar Hücre Teknolojileri

PV hücreler ve modüller, temel malzemeleri, çıktı verimliliği ve maliyetleri bakımından farklılık gösterir. Aşağıdaki Çizelge 3.1, mevcut güneş hücresi teknolojilerinin bir karşılaştırmasını özetlemektedir.

Çizelge 3.1. Solar teknolojilerinin özeti

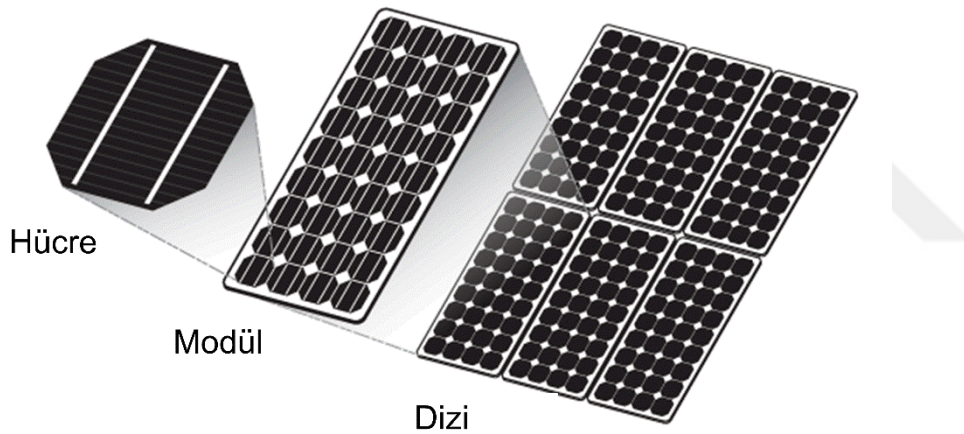
	Kristal Silisyum	İnce Film
Modül türleri ve modül verimliliği	Monokristal Silisyum (%25-27) Polikristalin Silisyum (%20-26)	Amorf Silisyum (% 8-11) Copper Indium Diselenide (CIS) (% 10-12) Kadmiyum Tellurid (CdTe) (% 14-17)
Avantajları	Daha verimli Daha az alan gerektirir	Daha az üretim maliyeti Çok yönlü Daha fazla gölge toleransı Daha az sıcaklığa duyarlı
Dezavantajları	Pahalı Sınırlı uygulamalar Gölge toleransı az Sıcaklığa duyarlı	Daha düşük modül verimliliği Daha fazla alan gerektirir
Uygulamalar	Şebekeye bağlı PV sistemleri Bağımsız PV sistemleri (şebekeden bağımsız)	Daha çok bağımsız PV sistemlerinde kullanılır, taşınabilir solar şarj cihazları gibi
Pazar payı	78 - 80%	18 - 20%

Bu araştırma, temel olarak normal ve arızalı çalışma koşulları altında PV modüllerinin elektriksel özelliklerine ve ara bağlantı çalışmalarına odaklanmaktadır. Hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda mono-kristal silisyum tipi solar hücre teknoloji kullanılmıştır.

3.1.3. Güneş Hücrelerinin Ölçeklendirilmesi

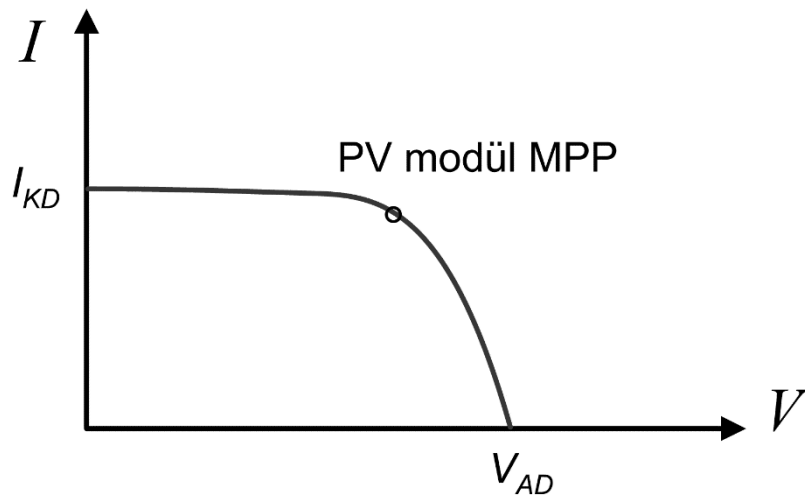
PV teknolojileri çok yönlüdür ve küçük güç seviyelerinde büyük güç seviyelerine kadar birçok uygulamada elektrik üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bireysel solar hücreler, elektronik hesap makineleri, şarj aletleri gibi küçük cihazlara güç sağlamak için kullanılır. PV santralleri gibi ana şebekesine güç üretmek için büyük PV dizileri kullanılır.

Şekil 3.4'te gösterilen Temel PV sistem elemanları elektriksel olarak bağlanır ve koruyucu bir laminat içinde kapsüllenirler.



Şekil 3.4. PV sistem elemanları: hücre, modül ve dizi.

Güneş hücreleri genellikle PV modüllerinde seri olarak bağlanarak gerilimin artırılması sağlanır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bir PV modülü, kendisiyle birlikte tüm olası çalışma noktalarını içeren doğrusal olmayan bir akım-gerilim (I-V) eğrisine sahiptir. IV eğrisinde, sırasıyla mümkün olan maksimum akımı, mümkün olan maksimum gerilimi ve mümkün olan maksimum gücü temsil eden kısa devre akımı (I_{KD}), açık devre gerilimi (V_{AD}) ve maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılan üç önemli nokta vardır.

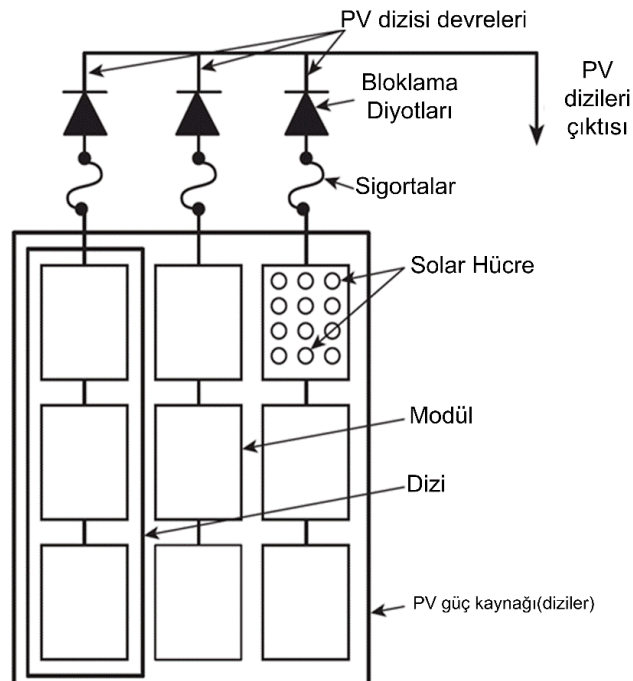


Şekil 3.5. Bir PV modülünün I-V eğrisi.

3.1.4. Tipik PV sistemleri

Tipik bir şebekeye bağlı PV sistemi, temelde baypas diyotlu bir PV dizisi, şebekeye bağlı bir inverter, bağlantı kabloları ve AAKC ve TATK koruma cihazlarından oluşur.

PV sistemlerindeki ana bileşenler ise Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

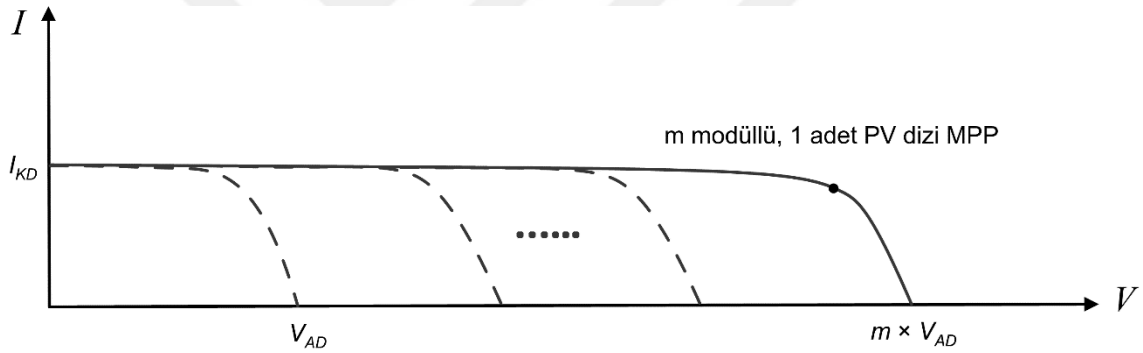


Şekil 3.6. Fotovoltaik sistem bileşenleri.

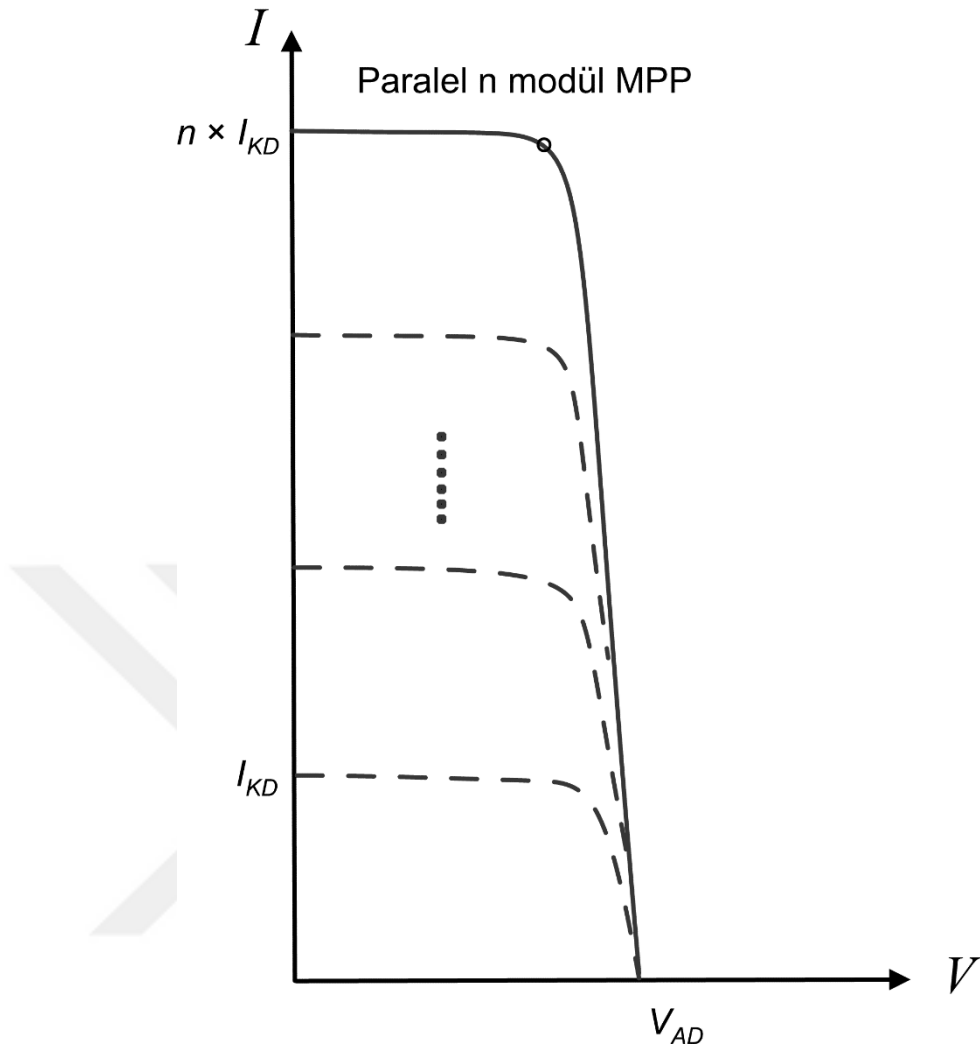
3.1.4.1. PV Dizisi

Bir PV dizisi, bir sistemin gerektirdiği belirli gerilim ve akımı sağlamak için seri ve / veya paralel olarak bağlanan herhangi bir sayıda PV modülünden oluşan bir DA güç üretim birimidir. Dizi, birkaç modül kadar küçük veya bir PV elektrik santral tesisi gibi dönümleri kaplayacak kadar büyük olabilir.

PV teknolojisi, artan elektrik güç taleplerini karşılamak için aşamalı olarak oluşturulabilen modüler ile ölçeklendirilebilir. PV sistemlerinin temel yapı taşı olan PV modülleri, bir PV dizisi oluşturmak için seri ve / veya paralel olarak monte edilebilir. Örneğin, her bir PV modülünün bir kısa devre akımı (I_{KD}) ve bir açık devre gerilimi (V_{AD}) vardır. Şekil 3.7'da, m modüllerin seri bağlanması, daha yüksek açık devre gerilimine ($m \times V_{AD}$) sahip bir PV dizisi oluşturacaktır. Şekil 3.8'de, n diziyi paralel olarak koymak, daha büyük bir kısa devre akımına ($n \times I_{KD}$) sahip bir PV dizisi oluşturacaktır.

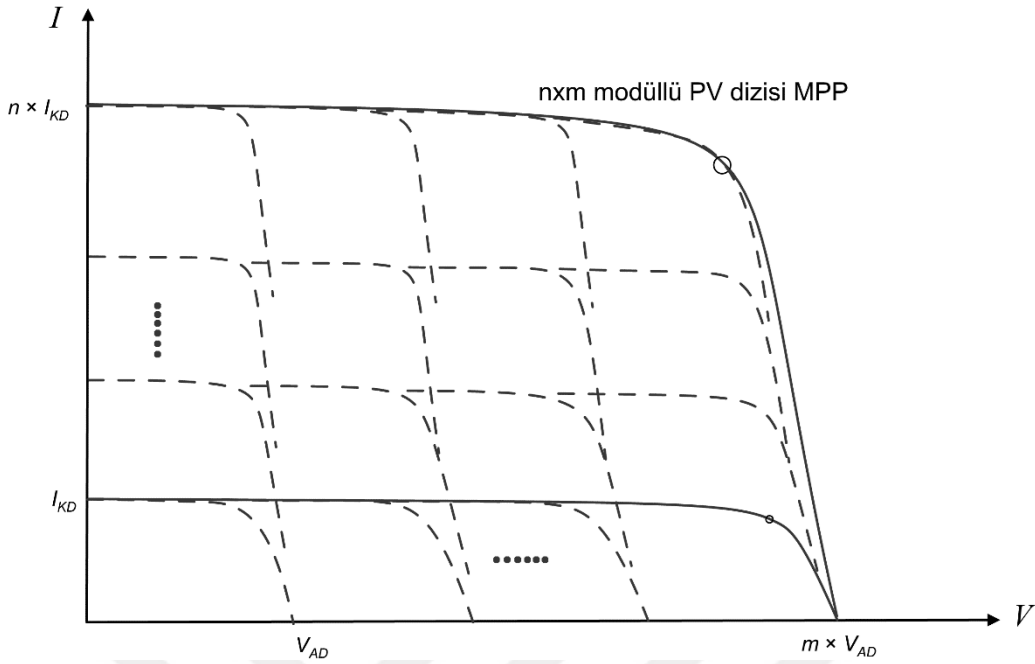


Şekil 3.7. Seri olarak m modüllü bir PV dizisinin I-V eğrisi.



Şekil 3.8. Paralel olarak n modüllü bir PV dizisinin I-V eğrisi.

Ayrıca, yukarıda gösterilen topolojik yöntemler kullanılarak büyük bir PV dizisi geliştirilebilir. Bir dizide m adet özdeş modül varsa, $(n \times m)$ PV modülleri içeren bir PV dizisi oluşturmak için n adet özdeş PV dizisi paralel olabilir. Bu durumda, Şekil 3.9’da gösterildiği gibi PV dizisi kısa devre akımı $n \times I_{KD}$ ve açık devre gerilimi $m \times V_{AD}$ olacaktır.



Şekil 3.9. Birleştirilmiş seri ve paralelleme modüllerine sahip bir PV dizisinin I-V eğrisi.

3.1.4.2. Baypas Diyotu

Genellikle her bir PV modülü, tek tip olmayan ışınım, güneş hücrelerinin özelliklerinin uyumsuzluğu veya diğer arıza türlerinin neden olduğu sıcak nokta ısıtmanın yıkıcı etkilerinden kaçınmak için baypas diyot(lar)ı ile donatılır. Bir baypas diyotu, PV modülü içindeki bir dizi güneş hücresi (genellikle 18-24 hücre) ile paralel ancak ters polaritede bağlanır. Normal çalışma koşulları altında, her bir güneş hücresi doğru polarlı olacak ve bu nedenle baypas diyotu ters taraflı olacaktır. Ancak güneş hücreleri, PV modülleri arasındaki uyumsuzluğa bağlı olarak ters taraflıysa, o zaman baypas diyotu iletimde olacaktır ve böylece sağlam solar hücreden gelen ekstra akımın bozuk hücrelere yönlendirmek yerine harici devrede akmasına izin verir.

3.1.4.3. Şebeke-Bağlı İnverter

Şebekeye bağlı inverter, PV'den elde edilen DA formundaki giriş elektrik enerjisini, AA formundaki elektrik şebekesine aktarmak için kullanılan güç çeviricisi ekipmanıdır. PV sistemlerinde PV sistemin şebeke bağlantısı bu inverterler aracılığıyla yapıldığından bu tür inverterler Şebekeye bağlı inverterler veya solar inverterler olarak

adlandırılmaktadırlar. Bu tür inverteler genellikle, PV dizisinden maksimum çıkış gücünü elde edebilen maksimum güç noktası izleyici (MPPT) kontrol algoritmasıyla kontrol edilebilen bir yapıya sahiptir. Ayrıca şebeke ile senkronizasyonu sağlayacak ve adalanma modunda çalışmayı engelleyebilecek bazı donanımlar ve kontrol mekanizmaları ile donatılmışlardır.

3.1.4.4. PV Sistemlerde Topraklama Sorunları

Topraklama, bir elektrik devresi veya ekipman ile toprak veya topraklayıcı arasında kasıtlı, iletken bir bağlantıdır. Topraklamanın genel amacı, elektrik çarpması tehlikelerini en aza indirmek, arızalardan kaynaklanan yangın tehlikelerini en aza indirmek, ekipmanları arızalardan ve indüklenen dalgalanmalardan korumak ve elektromanyetik girişim etkilerini azaltmaktır (Verhoeven 2008). PV sistemlerinin bazı topraklama sorunları özel dikkat gerektirir, çünkü PV sistemleri geleneksel güç kaynağından çok farklıdır ve bazen PV arıza akımları geleneksel koruma cihazları tarafından düzgün bir şekilde temizlenemeyebilir.

PV sistemlerinde iki tür topraklama vardır:

- İşletme (sistem) topraklaması: 2 telli bir PV sisteminin akım taşıyan bir iletkeninin (genellikle negatif iletken) bazı noktaları veya iki kutuplu bir PV sisteminin referans (orta kademe) iletkeninin kasıtlı olarak toprağa bağlanması gerekir;
- Ekipman (Koruma) topraklaması: Metalik modül çerçeveleri, ekipman ve iletken muhafazaları gibi açıkta kalan, akım taşımayan iletken parçalar topraklanmalıdır. Tüm ülkelerde koruma topraklaması gereklidir. Bununla birlikte, işletme topraklaması, farklı ülkelerdeki uygulamaya göre büyük ölçüde değişir.
- Topraklanmış sistem: ABD Ulusal Elektrik Yasası (NEC) 50V üzerindeki PV sistem geriliminin işletme topraklamasına sahip olmasını gerektirmektedir.
- Topraklanmamış sistem: Avrupa ve Japon yasaları, PV sistemlerin DA tarafında topraklanmış akım taşıyan iletkenler olmadığı için, PV kurulumlarında işletme topraklamasını zorunlu kılmamıştır.

Hat KD arızasıyla ilgili olarak (gerilim farkına sahip akım taşıyan iletkenler arasında kısa devre arızası), arıza analizi yaklaşımı, topraklanmış ve topraklanmamış sistemlerde aynıdır. Çünkü arıza herhangi bir toprak noktası içermemektedir. Ancak işletme topraklı ve topraksız sistemler, toprak kısa devre arızalarında farklılık göstermektedir. Örneğin, tek bir toprak kısa devre arızası, işletme topraklanması olan bir sistemde arıza akımlarına yol açabilir, ancak işletme topraklaması olmayan bir sistemde herhangi bir arıza akımına yol açamaz. Özellikle, işletme topraklaması olmayan bir sistemde toprak arıza akımına neden olmak için birden fazla toprak kısa devre arızasına ihtiyaç vardır.

Bu tez, ABD standartlarına göre işletme topraklanmasına sahip sistemlerde görülen PV arızalarını tartışmakla birlikte, bu tezdeki simülasyon platformları ve arıza analizi yaklaşımları, Avrupa ülkeleri ve Japonya'daki işletme topraklamasız sistemlerde de uygulanabilir. Örneğin, işletme topraklamasız bir sistemdeki iki toprak arızası, işletme topraklamalı bir sistemdekilerle aynı arıza özelliklerine sahiptir.

3.1.4.5. Toprak Arıza Tespit Kesicileri (TATK)

TATK, PV sistemlerinde yangın tehlikesini önlemeyi sağlar. TATK, ABD Ulusal Elektrik Yasasına (NEC) göre toprak arızası tespiti, arıza akımı kesintisi ve arıza gösterimi yapabilmelidir. Uygulamada, bu TATK'lar (inverterin içinde veya harici olarak monte edilmiş) gerçekte negatif akım taşıyan iletken ile sistem işletme topraklama noktası arasına monte edilir. Normal koşullar altında, negatif iletken sadece bir noktada toprağa bağlandığından, akım negatif iletkende akacak, ancak sistem işletme topraklamasının hiçbirinde akmayacaktır. Bir topraklama arızası durumunda (pozitif iletken yanlışlıkla toprağa değdiğinde), topraklama arızası akımı, toprak arızası noktasından PV dizisine giderken TATK üzerinden akacaktır. TATK genellikle bir devre kesici veya anma akımı 0.5A olan bir sigortadır. TATK'dan geçen topraklama arıza akımı 0.5A'yı aşarsa, devre kesici /sigorta açılabilir veya eriyebilir böylelikle toprak arızasını giderebilir.

3.1.4.6. Aşırı Akım Koruma Cihazları (AAKC)

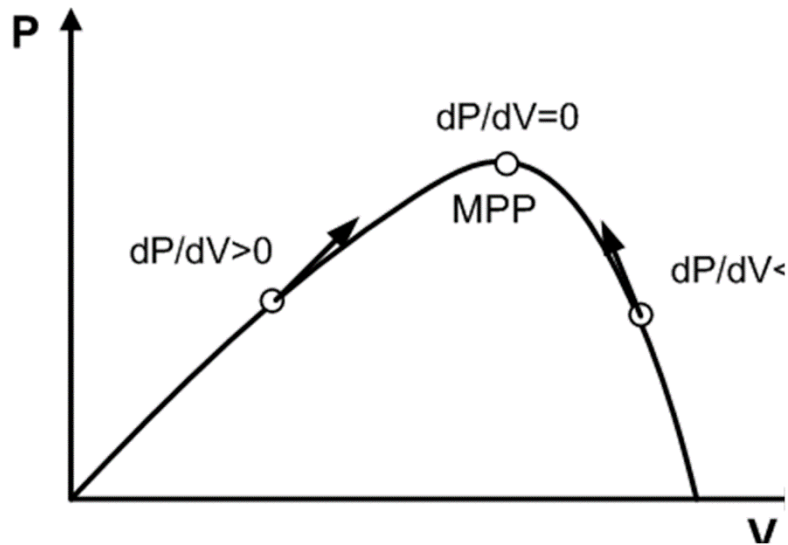
Sigortalar, genellikle PV sistemlerinde modüller ve iletkenler için aşırı akım koruma cihazları olarak kullanılır. ABD'de NEC, iki veya daha fazla modülün seri bağlı dizilerde tek bir aşırı akım koruma cihazının kullanılmasını gerektirir. Aşırı akım

cihazlarının anma akımı, modül anma kısa devre akımının (I_{sc}) % 156'sından az olmayacaktır.

3.1.4.7. Maksimum Güç Noktası İzleyici (MPPT)

MPPT, PV dizilerinin maksimum çıkış gücünü toplamak için genellikle DA-AA dönüştürücü (veya DA-DA dönüştürücü) ile entegre edilen bir algoritmadır. MPPT, belirli çevresel koşullar ve dizi konfigürasyonları (normal veya arızalı) için bir PV dizisinin (sistem) çıkış gücünü optimize etmeye devam ettiğinden, MPPT normal akımın yanı sıra arıza akımının belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

En yaygın kullanılan MPPT algoritması, bu çalışmada kullanılan Değiştir ve Gözle (Perturb and Observe (P&O)) yöntemidir. Şekil 3.10'da, maksimum güç noktasına (MPP) sahip bir PV dizisinin doğrusal olmayan güç-gerilim (P-V) eğrisini göstermektedir. P&O, bir dizinin çalışma gerilimini belirli bir yönde bozar ve çıkış gücündeki değişiklikleri gözlemler. Şekil 3.9'da, güç değişiminin aynı gerilim değişimi yönünde olması durumunda ($dP / dV > 0$), MPP'ye ulaşmak için çalışma geriliminin artması gerektiği görülebilir. Güç değişimi gerilim değişiminin tersi yönündeysse ($dP / dV < 0$), o zaman çalışma noktası MPP'nin sağındadır ve MPP'ye yaklaşmak için çalışma gerilimi azalmalıdır. Bu P&O algoritması, MPP'ye ulaşılan kadar yinelemeli olarak işlenir ve ardından, PV dizisi, kararlı durum işleminde mevcut MPP'si etrafında salınır.



Şekil 3.10. Tipik bir PV dizisinin P&O MPPT algoritması için P-V eğrisi

3.1.5. PV Dizilerinde Arıza Analizinin Zorlukları

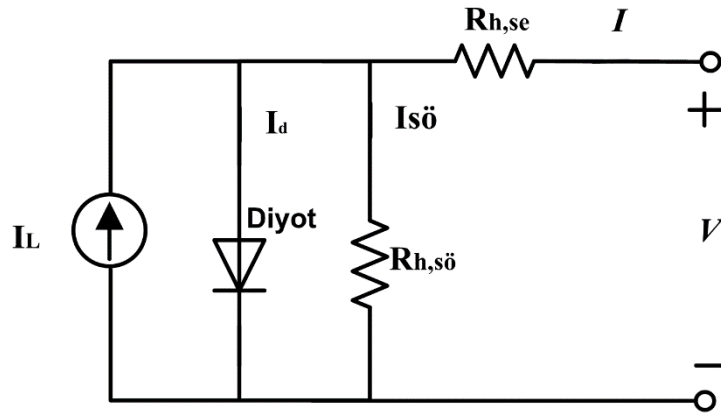
PV dizilerindeki arızalar çıkış gücü performansını etkiler ve kritik ve muhtemelen tehlikeli durumlara yol açar. Bu tezde, PV dizisinin arıza akımının tek kaynağı olduğu düşünülmektedir. Bir PV dizisinde arıza tespiti ve koruma için, genellikle PV bileşenleri ile seri olarak sigortalar veya devre kesiciler eklemek geleneksel yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Bu koruma cihazları, yalnızca büyük arıza akımı taşıyorlarsa arızaları temizleyebilir ve arızalı devreleri izole edebilir. Örneğin, ABD elektrik standardı NEC'ye göre, PV modül seri sigortaların nominal akımları, PV modüllerinin kısa devre akımının (I_{sc}) 1.56 katından daha az olmamalıdır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan I-V karakteristikleri ve PV dizilerinin akım sınırlayıcı doğası nedeniyle, arızalar önemli aşırı akıma neden olmayabilir. Ek olarak, PV'deki arıza analizi aşağıdaki faktörlerden dolayı daha karmaşık hale gelebilir:

- PV dizisinde değişen ışık seviyesi ve sıcaklık gibi çevresel koşullar;
- Arıza türleri, güneş PV modüllerinin sayısına, PV dizisi yapılandırmalarına ve arıza konumlarına göre farklılık gösterebilir;
- PV dizisindeki yaşlanma, sıcak nokta ve diğer uyumsuzluk arızaları PV teknolojisine özgüdür;
- PV inverterin MPPT etkileri, arıza akımlarını etkileyebilir. Bu faktörler, arıza akımlarının beklenenden daha düşük olmasına neden olabilir. Bu nedenle, geleneksel koruma cihazları arızaları doğru bir şekilde temizleyemeyebilir.

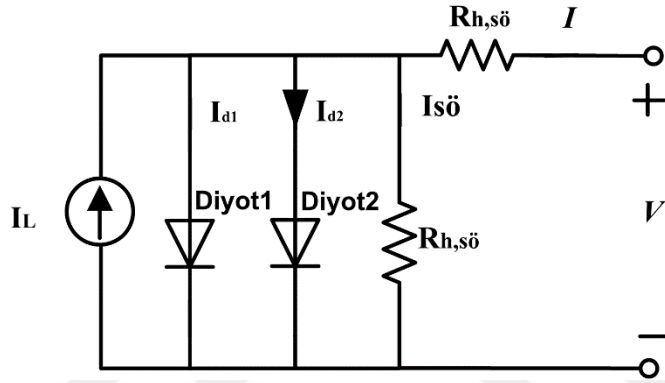
3.2. PV Modüllerinin Modellenmesi ve Simülasyonu

3.2.1. Solar Hücre Modeli

Solar hücrelerin doğrusal olmayan I-V özelliklerinden dolayı, onları sabit bir gerilim kaynağı veya sabit bir akım kaynağı olarak basitçe modellemek uygun değildir. Solar hücrelerin elektriksel davranışlarını tanımlamak için en çok kullanılan modeller tek diyot ve çift diyot modelleridir (Gow ve Manning 1999). Tek diyot modeli ve çift diyot modeli için eşdeğer devreler sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Tek diyot modeli için eşdeğer devre.



Şekil 3.12. Çift diyot modeli için eşdeğer devre.

Şekil 3.11'daki tek diyotlu model ait akım denklemi şu şekildedir:

$$I = I_L - I_{doy} \left[\exp \left(\frac{V + IR_{h,se}}{AkT} \cdot q \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_{h,se}}{R_{h,sö}} \quad (3.1)$$

Burada

I = güneş hücresi akımı (A)

V = güneş hücresi gerilimi (V)

I_L = ışık kaynaklı akım (A)

I_d = diyot akımı (A)

$I_{sö}$ = şönt direnç akımı (A)

3. MATERYEL VE METOT

I_{doy} = diyotun doyma akımı (A)

$R_{h,se}$ = güneş hücresi seri direnci (ohm)

$R_{h,sö}$ = güneş hücresi şönt direnci (ohm)

q = elektron yükü = 1.6×10^{-19} C

k = Boltzmann sabiti = 1.38×10^{-23} J / K

A = diyot ideal faktörü ($1 \leq A \leq 2$)

T = ortam sıcaklığı (K)

Şekil 3.12'deki çift diyot modeli için akım denklemi ise:

$$I = I_L - I_{doy1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_{h,se}}{kT} \cdot q \right) - 1 \right] - I_{doy2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_{h,se}}{R_{h,sö}} \cdot q \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_{h,se}}{R_{h,sö}} \quad (3.2)$$

Burada,

I_{doy1} = diyot1 (A) için doyma akımı

I_{doy2} = diyot2 (A) için doyma akımı

I_{d1} = diyot1 akımı (A)

I_{d2} = diyot2 akımı (A)

Bu çalışmada, simülasyon yapılırken aşağıdaki avantajlarından ötürü solar hücre için tek diyot modeli kullanılmıştır:

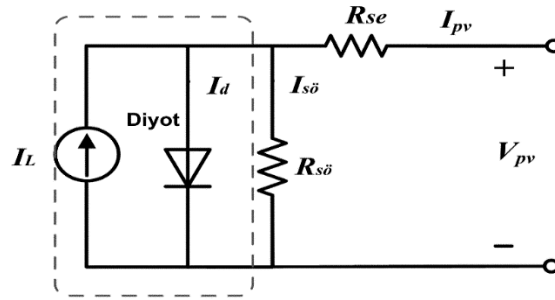
-Tek diyot modeli, sistem düzeyinde PV modülleri için kararlı durum ve arıza analizi için yeterince doğrudur;

- Tek diyotlu model için sayısal yöntem, simülasyon ortamında çift diyotlu modelden daha hızlı yakınsar;

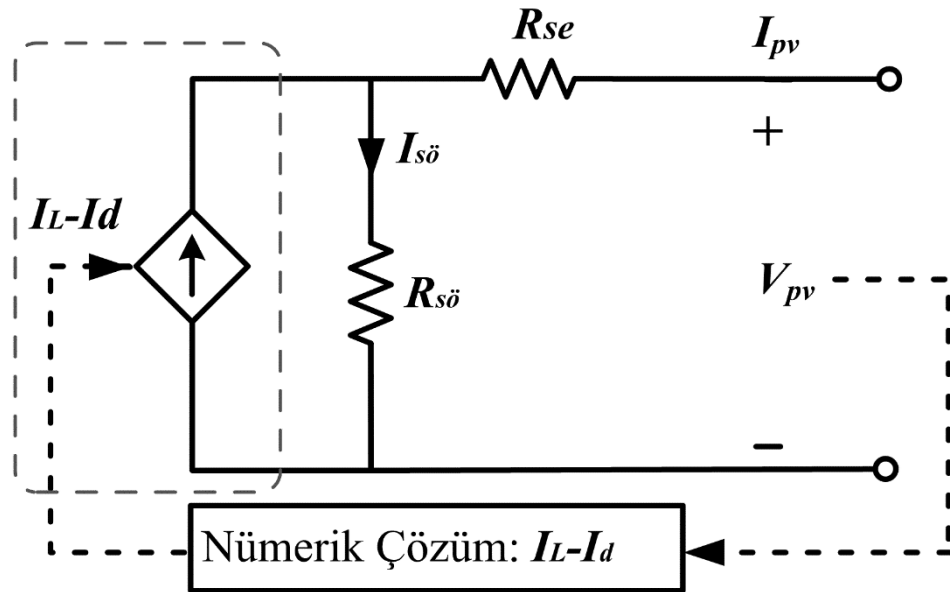
-Piyasadaki çoğu PV modülü için tek diyotlu modelin ayrıntılı parametreleri mevcuttur.

3.2.2. Modelleme Algoritması

Bir PV dizisini modellemek için dizideki her güneş hücresini simüle etmek gerçekçi değildir. Dahası, PV üreticileri genellikle son kullanıcılara toplu halde güneş hücreleri yerine tam ve çevresel olarak korunan modüller sağlar. Ek olarak, gerçek çalışma koşullarında, aynı modül içinde paketlenmiş güneş hücreleri genellikle neredeyse aynı ışık koşullarına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı, her bir PV modülündeki tüm güneş hücrelerinin aynı özelliklere ve çalışma koşullarına sahip olduğunu varsayabiliriz. Bu nedenle, bir PV modülü, aynı güneş hücrelerinden oluşan temel bir birim olarak görülebilir. Bu nedenle, PV modüllerinin modellenmesi ve simülasyonu, PV sistemi normal ve arıza analizi için önemli adımlar haline gelir. PV modülleri için simülasyon modeli aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir. Şekil 3.13’de gösterilen PV modüllerinin tek diyotlu modeline göre, V_{pv} gerilimini bir giriş parametresi olarak kullanarak, I_{pv} modül akımı iteratif olarak çözülebilir.



Şekil 3.13. Bir PV modülü için tek diyot eşdeğer devre modeli.



3. MATERYEL VE METOT

Şekil 3.14. Bir PV modülü için tek diyot sayısal model.

Tek diyotlu modelden geliştirilen bir PV modül modeline göre I_{pv} akımı şu şekilde yazılabilir:

$$I_{pv} = I_L - I_{doy} \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_{se}}{AkT \cdot N_{\#}} \cdot q \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_{se}}{R_{sö}} \quad (3.3)$$

Burada

$N_{\#}$ = bir PV modülü için seri halindeki güneş hücrelerinin sayısı

I_{pv} = PV modül akımı

V_{pv} = PV modül gerilimi

R_{se} = PV modül seri direnci

$R_{sö}$ = PV modülü şönt direnci

Güneş ışınımına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak, üretilen ışık akımı I_L şu şekilde tanımlanır:

$$I_L = \frac{H}{H_{ref}} \cdot [I_{Lref} + \xi(T - T_{ref})] \quad (3.4)$$

bu denklemde:

H = güneş ışınımı (W / m^2)

H_{ref} = referans güneş ışınımı (W / m^2)

I_{Lref} = referans ışık tarafından üretilen akım (A)

T_{ref} = referans sıcaklık (K)

ξ = üretilen ışığın sıcaklık katsayısı (A / K)

Sıcaklığa bağlı olarak, diyotun doyma akımı I_{doy} ise şu şekilde tanımlanır:

$$I_{doy} = I_{doy-ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_b}{Ak} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.5)$$

Silisyum için bant aralığı enerjisinin (E_b) sıcaklık bağımlılığı şu şekilde ifade edilebilir:

$$E_b = 1.170 - \frac{4.73 \times 10^{-4} T^2}{T + 636} \text{ eV} \quad (3.6)$$

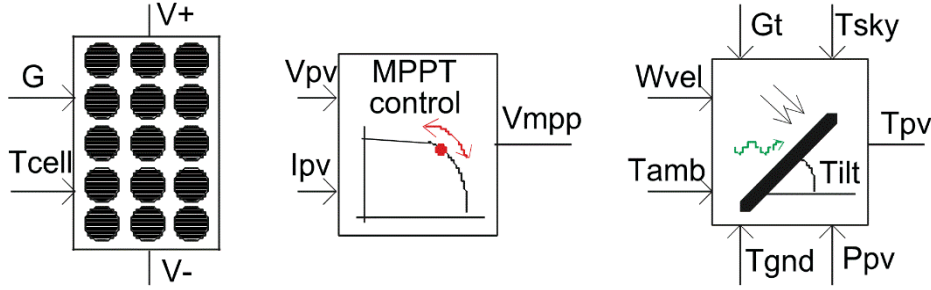
Burada

Elektron volt (eV) = 1.6×10^{-19} J' dür.

3.2.3. PSCAD ile Simülasyon

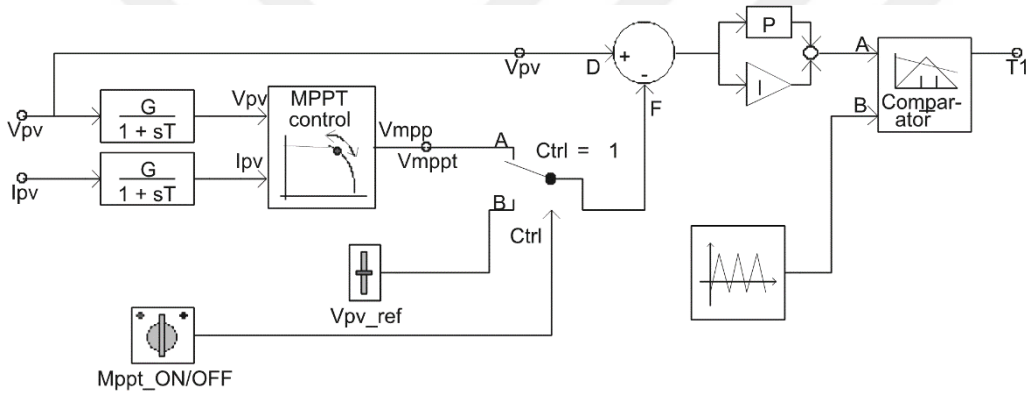
Büyük PV kurulumu tasarlandığında, kurulumun şebekeye entegrasyonunun etkisini incelemek için güç sistemi düzeyinde çalışmalar yapılması gerekir. Güç sistemlerinde herhangi bir arıza durumunda (elektriksel arıza), sistemin minimum hasar ve minimum performans düşüklüğüyle çalışması için kullanılacak sistemlerin dizayn edilebilmesi için kullanılan simülasyonun da mümkün oldukça gerçeğe yakın olması gerekmektedir. Mevcut simülasyon programları içinde özellikle yaygın olarak kullanılan MATLAB/Simulink yazılımıyla karşılaştırıldığında, PSCAD sadece güç sistemleri için tasarlandığı için, güç sistemlerin modellemesinde, hem hız hem de model doğruluğu açısından bir çok avantaj sunmaktadır. Bahsedilen bu özelliklerinde ötürü bu çalışmada, simülasyon için PSCAD programı kullanılmıştır.

PSCAD yazılımında denklem (3.1)-(3.6) kullanılarak solar hücre ve PV modülü oluşturulmuştur. Şekil 3.15'te PSCAD kütüphanesinde tanımlanmış parametrelerini değiştirebileceğiniz solar ışıma modeli, MPPT modülü ve solar hücre modülleri gösterilmiştir. Bu çalışmada Şekil 3.15'teki PSCAD kütüphanesindeki elemanlar kullanılmıştır.



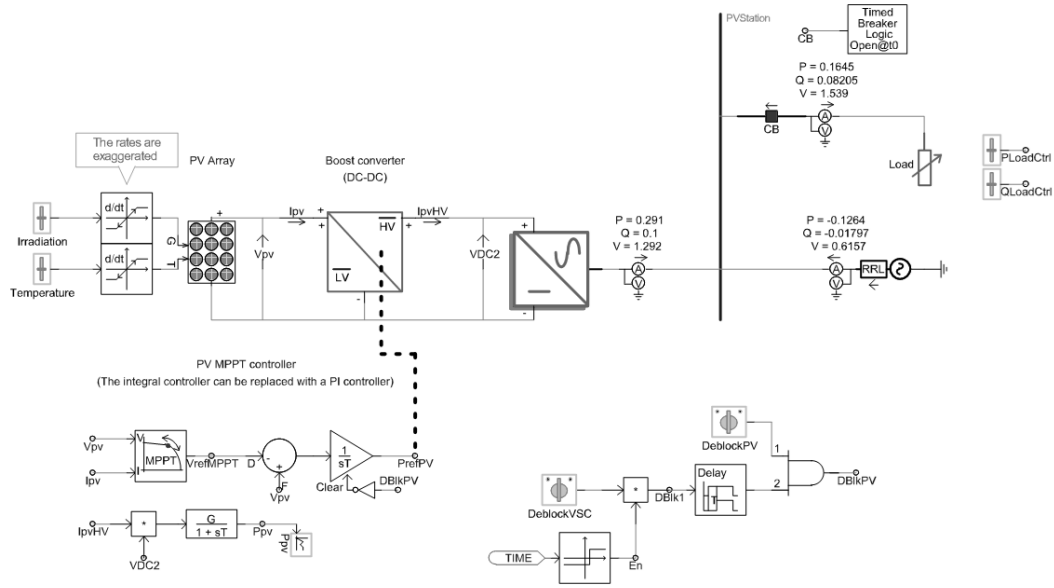
Şekil 3.15. PSCAD PV sistem simülasyon kütüphanesi.

Şekil 3.16’te P&O algoritmasını baz alan MPPT modüllü bir DA-DA dönüştürücü simülasyonu verilmiştir. Bu block PV modülü ile şebekeye bağlı inverter arasına konulmuştur. DA-DA dönüştürücünün kullanılmasının amacı MPPT’in aktif durumunda arıza tespiti için algoritmayı güçlendirmektir.



Şekil 3.16. MPPT algoritmalı DA-DA dönüştürücü.

Şekil 3.17’de şebekeye bağlı 100 PV modülden oluşan PV dizisinin simülasyonu verilmiştir. Bu simülasyon bir PV santralının gerçeğe yakın benzetmesidir. PV dizisinde olması gereken sigorta, AAKC, TATK, DA-DA dönüştürücü, inverter gibi tüm ekipmanları içeren ayrıntılı bir simülasyon modelidir.



Şekil 3.17. Şebeke bağlı PV sistemin PSCAD’de hazırlanmış simülasyon modeli.

3.2.4. Tek kristalli Silisyum PV Modül

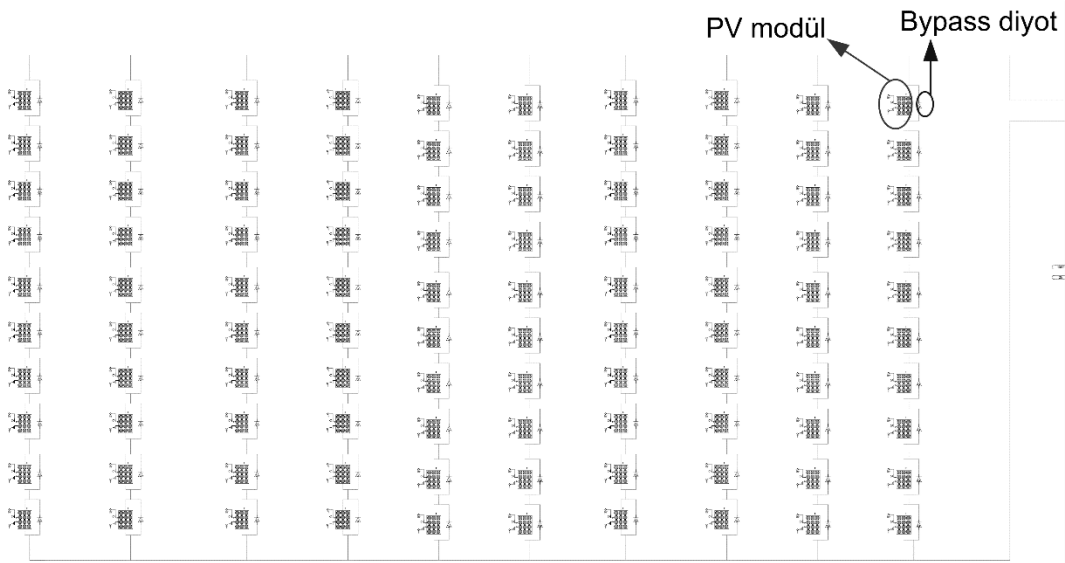
Daha önce bahsedildiği gibi bu çalışmada simülasyon için tek kristal silisyum PV modülü tercih edilmiştir. Bu tek kristalli silisyum modül için ana parametreler Çizelge 3.2’de listelenmiştir. PV modülünde seri bağlı 72 güneş hücresi bulunur ve her güneş hücresi yaklaşık 0,5 V gerilim üretir. Modülün dikey yöneliminde 6 sütun güneş hücresi bulunmaktadır. Sıcak nokta önleme için, her iki bitişik hücre sütununa bir baypas diyotu bağlanmıştır.

Çizelge 3.2. Tek kristalli silisyum PV modül parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Maksimum Güç	P_{mp}	172	W
Hücre konfigürasyonu	N_{se}	72	-
Açık devre gerilimi	V_{AD}	42.3	V
Maksimum Güç Gerilimi	V_{MP}	36	V
Kısa devre akımı	I_{KD}	5.2	A
Maksimum Güç Akımı	I_{MP}	4.8	A
Seri direnç	R_{se}	0.425	Ω
Şönt direnci	$R_{s\phi}$	440	Ω
doğruluk akımı	I_{doy}	49	nA
İdeallik faktörü	A	1.45	-
I_L Sıcaklık Katsayısı	ζ	2.53	mA/°C

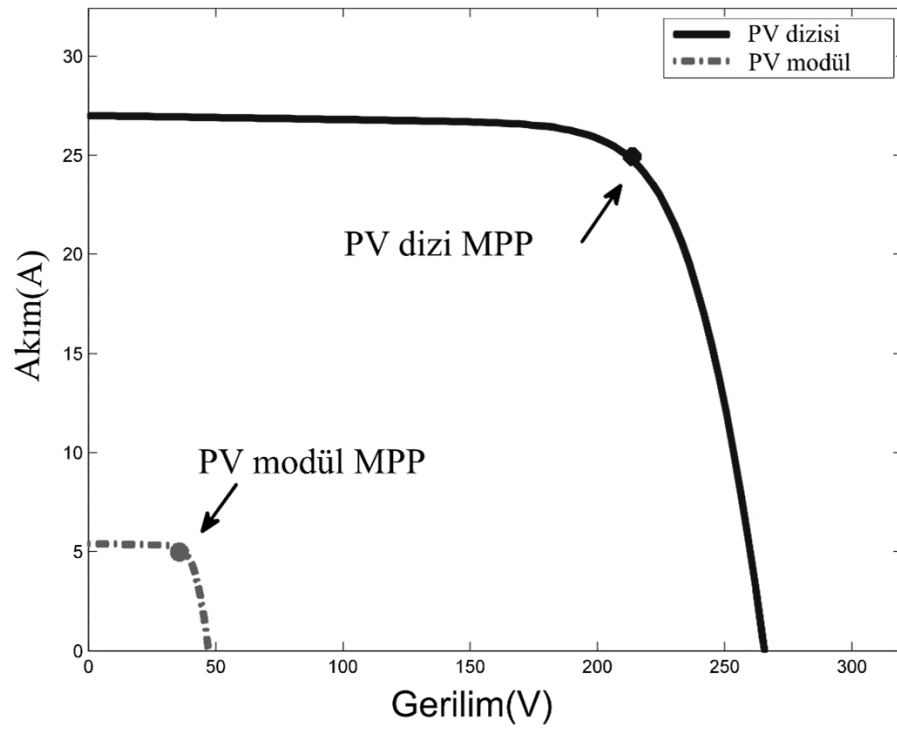
3.2.5. Tek kristalli Silisyum PV Sistemi

Şekilde 3.18’de verilen PV dizisi, PSCAD yazılımında oluşturulmuştur. Simülasyonlarda her bir PV modeli, modüler ve ölçeklenebilir bir PV modülünü temsil eder. Model, her modülün kendi sıcaklık ve ışıınım koşullarına sahip olabilmeleri için birbirlerinden bağımsız giriş değişkenlerinden oluşmaktadır. Bir PV dizisi oluşturmak için, PV modülleri genellikle belirli seri ve / veya paralel konfigürasyonlara yerleştirilir. Daha da önemlisi, genel sistem performansı büyük ölçüde birbiriyle bağlantılı modüllere bağlıdır.



Şekil 3.18. 10x10 PV modülden oluşan PV dizisi.

Standard test koşulları (STK) altında PV dizisinin tamamı ve her PV modülü için karşılık gelen I-V eğrisi Şekil 3.19’de gösterilmektedir.



Şekil 3.19. STK'de bir PV dizisi ve PV modülünün I-V eğrileri.

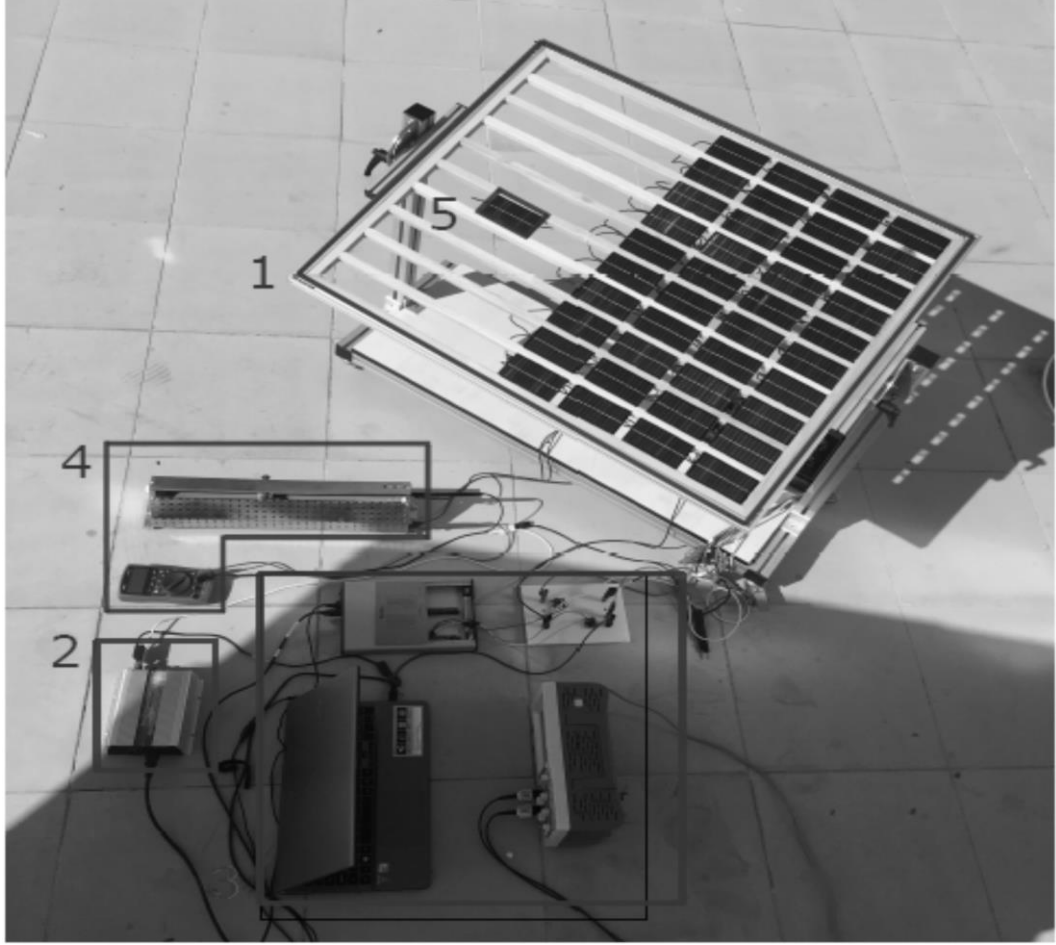
Çizelge 3.3. 5kW tek kristalli silisyum PV sistemindeki ana bileşenlerin parametreleri

Ekipman	Parametreler	
	Tipi	Detaylı Parametreler
PV modül	Tek-kristal silisyum	STK: $V_{AD}=42V$, $I_{KD}=4.5A$, $V_{MPP}=34.5V$, $I_{MPP}=4.57A$, $P_{MMP}=172W$
PV dizisi	10x10 modül	STK: $P_{sis}=5kW$, $V_{sis}=210V$, $I_{sis}=23A$
İnverter	5kW	Çalışma gerilim aralığı: 60-260V

Yukarıda tanımlanan elemanlardan oluşan simülasyon moedeli PSCAD'de oluşturularak, çalışmada kullanılmıştır. Böylelikle sistemde meydana gelen arızaların etkilerinin simülasyonu gerçekçi olarak yapılabilmektedir.

3.3. DeneySEL Kurulum

Değişen ışık şiddeti ve sıcaklık gibi gerçek çalışma koşulları altında hem normal hem de arızalı durumlar oluşturmak ve veri almak için küçük ölçekli bir şebekeye bağlı PV sistemi inşa edilmiştir. Şekil 3.20'da bu amaçla kurulan deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Deneysel kurulum için şebekeye bağlı PV dizisi: (1) PV dizisi, (2) invertör, (3) veri toplama ve işleme donanımı, (4) arıza empedansı ve (5) ısıtım için referans modülü.

Deneysel PV sistemi paralel olarak 4 PV dizisinden oluşur ve her dizide seri olarak 10 modül bulunur. PV bileşenlerinin ayrıntılı parametreleri Çizelge 3.4'da verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneysel PV Bileşenleri

Ekipman	Parametreler	
	Tip	Detaylar
PV modül	Silisyum	STK: $V_{oc}=18V$, $I_{sc}=0.9$, $V_{mpp}=14V$, $I_{mpp}=0.75A$, $P_{mpp}=10.5W$
PV dizisi	4X10 modüllü konfigürasyon	STK: $P_{mpp}=190W$, $V_{mpp}=28V$, $I_{mpp}=6A$
Inverter	Enphase M190	Mak. çıkış gücü= 190W, Min. gerilim=28V, MPPT gerilim aralığı=22-40V

3.4. Arıza Tespiti için Veriye Dayalı Bir Yaklaşım: RVFL Ağı ve EKK-SVM

Bu tez, PV sistemlerinde koruma yöntemlerine ek bir başka yararlı özellik olarak arıza sınıflandırması yöntemini önermektedir. Arıza sınıflandırması, arızanın türünü gösterebilir ve ayrıca bakım personelinin sistemin kurtarılmasını hızlandırmasına yardımcı olabilir. Sistemlerin önceki bilgilerine dayalı olarak, makine öğrenme algoritmaları genellikle otomatik arıza sınıflandırması elde etmek için kullanılır. Bu bölüm, arıza tespit yöntemlerinin eksiklerini inceleyip ve PV arıza tespiti için çevrimiçi-gümbüz-seyrete-düzenlenmiş (ÇGSD) bir RVFL ağına odaklanmaktadır.

3.4.1. Var Olan Yöntemlerin Limitleri

Literatürde kullanılan yöntemlerin dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- PV sistemler doğaları gereği dış ortamda çalışmalarından ötürü mevsim değişimleri, sıcaklık değişimleri, yağmur ve tozlanma gibi bir çok dış etkene maruz kalarak çalışmak zorundadırlar. Buradaki zorluk, ortam değiştikçe veya güneş hücreleri bozulduğunda büyük ölçüde değişen PV dizisinin (DA tarafı) doğrusal olmayan çalışma noktasında yatmaktadır. Bu, yazın eğitilmiş bir modelin (yüksek ışık şiddeti, yüksek sıcaklık), kış aylarında normal PV çalışmasını yanlışlıkla bir arıza olarak sınıflandırabileceği anlamına gelir (düşük ışınlım, düşük sıcaklık). Bu nedenle, eğitilen modelin zaman içinde sürekli olarak güncellenmesi gerekir. Literatürde var olan çalışmalar bir parametreyi değişken

kabul edip (örneğin sıcaklık ya da ısıma) diğerlerini sabit tuttukları için önerilen algoritmalar değişik koşullar dışında çalışmamaktadır.

- PV dizilerin çok farklı koşullar altında çalışmasından ötürü, makine öğrenme yöntemlerinin, etkinliklerini engelleyebilecek büyük miktarda eğitim verisi gerektirebilir. Büyük miktarda eğitim verisi önerilen metodun eğitim süresini ciddi oranda artırırken, eğitimi de zorlaştırmaktadır.
- PV dizileri için önerilen yöntemlerdeki diğer bir dezavantaj ise ölçüm hataları ve gürültü problemlerini dikkate almamaktır. PV sistemlerde ölçümler gerçek zamanlı oldukları için, elde edilen veriler farklı nedenler dolayısıyla gürültüye maruz kalmaktadır.

3.4.2. Elde Edilen Araştırma Katkıları

Yukarıdaki sorunları ele almak için, bu tez, PV dizilerinde arıza tespiti için ÇGSD bir RVFL ağı önermektedir. Önerilen yöntem, geleneksel AAKC veya TATK tarafından fark edilemeyen arızaları tespit edebilir. Önerilen yöntemde, ek algılama devresi yerine, yalnızca PV dizi gerilimi ve dizi akımı (genellikle PV invertörlerinde MPPT için kullanılır), PV çalışma sıcaklığı ve güneş ışınımı (genellikle hava durumu istasyonlarında bulunur) gibi kolayca bulunabilen ölçümleri kullanmaktadır. Bu nedenle önerilen yöntem, geleneksel PV sistemlerinde algılama devreleri için ek donanım kurulumunun veya ekstra işçilik maliyetinin önüne geçmektedir.

Bu bölüm, geleneksel AAKC tarafından tespit edilmesi veya giderilmesi zor olabilecek iki yaygın arıza kategorisine odaklanmaktadır. Bunlar:

- 1) Farklı potansiyellere sahip dizideki iki nokta arasında kazara kısa devre olarak tanımlanan KD arızası. Bu durum, iki farklı nokta arasındaki bir kısa devre arızasından veya PV alanlarında bir çift toprak arızasından kaynaklanabilir.
- 2) Normal bir akım taşıyan iletkende kazara bağlantı kesilmesi olarak tanımlanan açık devre arızası. Bu durum PV hücrelerinin veya modüllerinin çatlaması, gevşek dizi bağlantıları veya yanmış PV sigortaları nedeniyle oluşabilir.

Özet olarak, bu bölüm aşağıdaki araştırma katkılarını sunmaktadır:

- Literatürde daha önce tespit edilemeyen arızaları algılanmasına olanak tanıyan, ölçülen verilerden yeni özellikler temelli veriye dayılı, yeni bir yöntem / yeni algoritma sunulmuştur.
- İlk kez, güneş PV dizilerinde arıza tespiti ve sınıflandırma için bir kanonik korelasyon analizi (KKA) modeli geliştirilmiştir. Model, önceden bildirilen çözümlere göre, düşük model eğitim maliyeti, lineer sınıflandırmaya olanak tanıma ve daha iyi veri görselleştirme gibi çeşitli avantajlara sahiptir.
- Önerilen RVFL ağı, büyük ölçekli gerçek zamanlı verileri işler ve literatürde bildirilen geleneksel yöntemlerden daha hızlı bir öğrenme prosedürü gösterir.
- RVFL ağının ağırlıkları, yalnızca arıza tespit doğruluğunu arttırmakla kalmayan, aynı zamanda aşırı uydurma, ölçüm gürültüsü ve geleneksel yöntemlerin çoğunda eksik olan sensör ve ölçüm hatalarından kaynaklanan aykırı örneklerle karşı sağlamlığını da güçlendiren seyrek-düzenlenme kullanılarak hesaplanmaktadır.

3.4.3. Veri Ön İşleme

3.4.3.1. Verilerin toplanması

2250 KD arızası farklı koşullar altında simüle edilmiştir. Bu koşullar, farklı çalışma sıcaklıklarının (10, 20, 30, 40 ve 50°C), farklı ışık seviyelerinin (200, 400, 600, 800, 1000 W / m²), aynı hatta, farklı hat arızaları ve toprak arızaları, uyumsuzluk yüzdesi (% 10'luk bir artışla % 10'dan% 60'a), arıza empedansları (0, 5, 15 ve 25) ve pozitif ve negatif tepe noktaları dahil olmak üzere farklı arıza başlangıç anları şebeke faz-A voltajı ve sıfır geçişlerini(negatiften pozitif) kapsamaktadır. Diğer taraftan 150 farklı AD arızası simüle edilmiştir. Bu koşullar, (10, 20, 30, 40 ve 50°C) ve farklı ışık seviyeleri (200, 400, 600, 800, 1000 W / m²) şeklindedir.

KD ve AD arıza verilerini topladıktan sonra, farklı sıcaklıklar altında 80 ışık değişimi vakasının verisi toplanır. Bu durumlarda, ışık şiddeti değişiklikleri -5°C ila 35°C sıcaklıklarda 5°C artışla ± 800 , ± 600 , ± 400 ve ± 200 W/m²'dir. Benzer şekilde, farklı ışıyım düzeylerinde (200 W / m² artışla 200 ila 1200 W/m²) 120 sıcaklık değişikliği vakası ± 10 , ± 8 , ± 6 , ± 4 ve ± 2 °C değişikliklerle elde edilmiştir. Ek olarak,% 10,% 20

kombinasyonları ile 20 kısmi gölgeleme durumu elde edilmiştir. PV dizisindeki panellerin %50'si ve ani ışınlmaları 1000 W / m²'den 800/m², 600 W /m², 400W/m² ve 200 W/m²'ye değiştirilmiştir.

Tüm 2250 simüle edilmiş arıza ve 220 normal olaydan, şebeke faz-A geriliminin pozitif tepe noktasında meydana gelen 100 KD ve 54 AD arızası ile 30 normal olay durumu, karar verme aşamasını ayarlamak için kullanılmıştır. Bu amaçla toplanan sinyaller gerekli özellikler çıkarıldıktan sonra eğitim setine RVFL ağı Matlab yardımı ile uygulanmıştır(L 1000 örnek seçilmiştir ve örnekleme hızı 5 kHz'dir).

3.4.3.2. Özelliklerin Elde Edilmesi

PV dizisinde meydana gelen arızaları tespit etmek ve bunları normal sistem çalışmasından ayırt etmek için, özellik vektörlerinin, ölçülen çıkış akımı ve geriliminden oluşturulması gerekir. Farklı arızaları kapsamak için 10 özellik vektörü oluşturulmaktadır. Özellik vektörlerinden ilk ikisi (F_1 ve F_2), önerilen algoritmanın çeşitli büyüklükteki PV sistemlerine uygulanabilirliğini sağlamak ve parametrelerin yeniden ayarlanmasını önlemek için ölçülen akım ve gerilimin normalleştirilmesiyle elde edilir.

$$F_1 = I_{norm} = \frac{I_{MPP}}{I_{SC-dizi}} \quad (3.7)$$

$$F_2 = V_{norm} = \frac{V_{MPP}}{V_{OC-dizi}} \quad (3.8)$$

Bu eşitliklerde I_{MPP} ve V_{MPP} sırasıyla maksimum akım ve gerilimidir ve $I_{SC-dizi}$ ve $V_{OC-dizi}$ sırasıyla kısa devre akımını ve açık devre gerilimini gösterir.

Üçüncü özellik (F_3), PV dizisi tarafından sağlanacak maksimum normalleştirilmiş gücü gösteren doldurma faktörüdür. Hem ışıma değişimi hem de arızalar dolgu faktörünü değiştirse de sistemdeki arızalar ışıma göre daha ani değişikliklere neden olur. Bu nedenle, doldurma faktörünün kullanılması kısa devre arızalarının tespitinde etkilidir. I - V eğrisinin şekli kısmi gölgelemeden önemli ölçüde etkilendiğinden, eğrinin altındaki alana atıfta bulunan dördüncü özellik (F_4), arızaları normal çalışma koşullarında meydana gelen kısmi gölgelemeden ayırmak için kullanılır.

$$F_3 = FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3.9)$$

$$F_4 = A_{egri} = \int_0^{V_{OC}} Idl \quad (3.10)$$

Beşinci özellik (F_5), iletkenliğin değişimini ifade eder ve altıncı özellik (F_6), ısımadaki herhangi bir değişiklik olarak, ısımanın iletkenlik üzerindeki etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. F_6 'daki *irr* anlık ısıtım değerini ifade etmektedir.

$$F_5 = X_s = \frac{dI}{dV} \quad (3.11)$$

$$F_6 = X_{s-ısıma} = \frac{I_{norm}}{V_{norm} * irr} \quad (3.12)$$

Yedinci özellik (F_7), yani V_{OC} 'deki iletkenlik değişim hızı ve sekizinci özellik (F_8), V_{OC} ve maksimum güç noktaları arasındaki orta noktada iletkenlik değişim oranını ifade eden mV_{OC} 'dir. Bu özellikler, normal çalışma koşullarına yakın düşük modül uyumsuzluk ve yüksek empedans altında meydana gelen KD arızalarını tespit etmek için oluşturulmuştur.

$$F_7 = \Delta X_s \Big|_{V_{OC}} = \frac{dI}{dV} \Big|_{V_{OC}} \quad (3.13)$$

$$F_8 = \Delta X_s \Big|_{mV_{OC}} = \frac{dI}{dV} \Big|_{mV_{OC}} \quad (3.14)$$

Normal çalışma koşullarına yakın AD arızalarının tespitinde avantaj sağlayan son iki özellik (F_9 ve F_{10}), sırasıyla KD noktasındaki iletkenlik değişim oranını ve KD noktasında maksimum güç noktaları arasındaki orta noktayı ifade eder.

$$F_9 = \Delta X_s \Big|_{I_{SC}} = \frac{dI}{dV} \Big|_{I_{SC}} \quad (3.15)$$

$$F_{10} = \Delta X_s \Big|_{mI_{SC}} = \frac{dI}{dV} \Big|_{mI_{SC}} \quad (3.16)$$

3.4.3.3. Konikal Korelasyon Analiz(KKA) ile Özellik Çıkarma

Arıza algılama algoritmasında tüm özellik vektörleri kullanılırsa, hesaplama karmaşıklığı kritik bir şekilde artacak ve algoritmanın verimliliğini ve doğruluğunu

etkileyecektir. Bu nedenle, KKA yöntemi, yüksek boyutlu korelasyonlu özelliklerden bir dizi özelliği çıkarmak için kullanılmıştır. KKA, iki maksimum korelasyonlu yüksek boyutlu rastgele vektörün düşük boyutlu doğrusal projeksiyonlarını bulmak için kullanılan istatistiksel bir tekniktir (Shen ve ark. 2014, Zuobin ve ark. 2018).

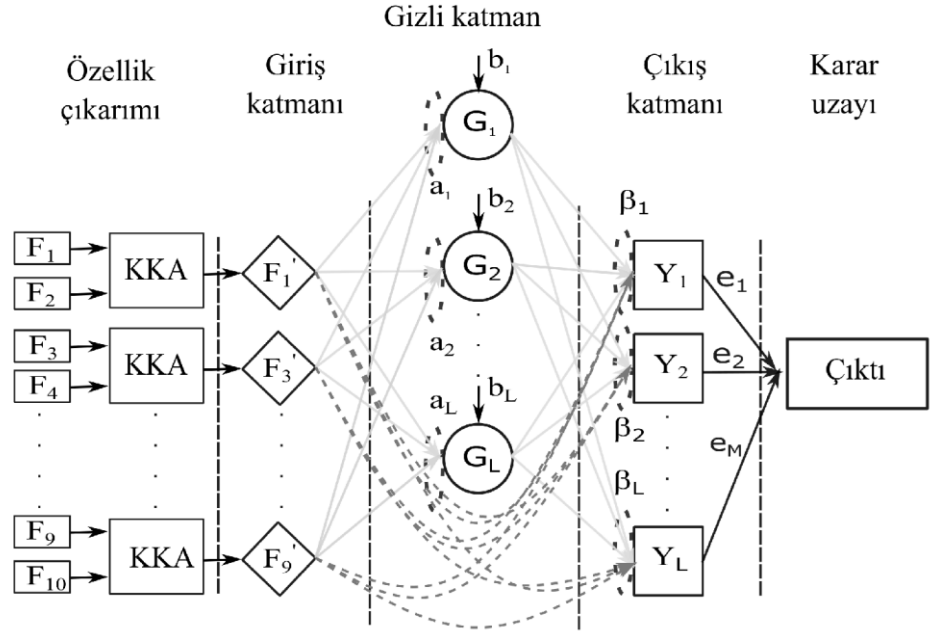
$F_i = [F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{iN}]^T \in R^n$, özellik vektörü ve Y , sınıf etiketidir. F_1 ana özelliği ve N boyutlu F_2 yardımcı özelliği ve $(F_1, F_2, Y) \sim F_{F_1, F_2, Y}$ çiftini sağlayan $c: R^n \rightarrow \{1, \dots, M\}$ M sınıfı sınıflandırıcı varsa, bu durumda KKA, F_1 ve yardımcı F_2 özellikleri temel alan projeksiyon A 'yı türetmek için (F_1, F_2) çiftine uygulanabilir. KKA projeksiyonunun tanımlanması $A = A(F_1, F_2)$, her $i, j = 1, 2, \dots, r$ için $a_i' F_1$ ve $a_j' F_2$ arasındaki korelasyonu en üst düzeye çıkarmak için $\{a_i\}$ ve $\{a_j\}$ kanonik vektörlerinin iki setini bulma sorunu olarak ele alınabilir. F_1 için boyut küçültme, bir sınıflandırma işleminden önce R^n 'den R^r 'ye elde edilir ($n > r$). Daha sonra aşağıdaki gibi bir çift konik vektör kümesi tanımlanır.

$$\{a_i, a_j\} = \arg \min \frac{a_i' \sum F_1 F_2 a_j'}{\sqrt{a_i' \sum F_1 a_i} \sqrt{a_j' \sum F_2 a_j}} \quad (3.17)$$

Bir matris, F_1 için KKA projeksiyon matrisi olarak tanımlanır ve $F_1^p = A' F_1 \in R^r$, yansıtılan özellik vektörüdür. Burada $A' = [a_1, \dots, a_r]$ dir. Özellikler $(F_1, F_3, F_5, F_7, F_9)$ ve $(F_2, F_4, F_6, F_8, F_{10})$ sırasıyla ana ve yardımcı özellikler olarak belirlenir.

3.4.4. RVFL ağ modelinin oluşturulması

Yapısı Şekil 3.21'de sunulan RVFL ağı, tek bir gizli katmanlı ileri beslemeli ağlar olarak geliştirilmiştir (Pao ve Takefuji 1992). RVFL ağı, geliştirilmesinden bu yana regresyon ve sınıflandırma amacıyla çeşitli mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmıştır (Sahani ve Dash 2019, Zhou ve ark. 2017, Katuwal ve ark. 2018, Dai ve ark. 2017). RVFL ağının avantajı, giriş katmanı ile gizli katman arasında ağırlıkların rastgele atanması ve ayarlama ihtiyacının olmamasıdır. Çıkış ağırlıkları en küçük kareler (EKK) algoritması ile hesaplanır. Pratik olarak, öğrenme parametrelerinin önceden tanımlanmasını gerektiren gradyan tabanlı öğrenme tekniklerinin aksine ve yakınsamayı sağlamak için eğitim birkaç dakika ila birkaç saat sürebilir, RVFL ağı çoğu mühendislik uygulamasında verileri gerçek zamanlı olarak işleyebilir.



Şekil 3.21. KKA ile birlikte RVFL ağ modeli

Eğitim örnekleri çifti için verilen bir veri seti dikkate alındığında, $\{(x_i, y_i) | i=1, \dots, N\}$ $CR^v \times R$, RVFL ağı, aşağıdaki gibi M gizli düğümleri olan özel bir Aşırı öğrenme makinesi (ELM) türü olarak tanımlanabilir.

$$f(x) = \sum_{j=1}^M \beta_j g_j(a_j, b_j, x) \quad (3.18)$$

a_j ve b_j , sırasıyla girdi ağırlığını ve gizli düğüm parametreleri olarak adlandırılan gizli katman düğüm eğilimini temsil eder; β_j , j . gizli katman düğümü ile çıkış düğümü arasındaki çıktı ağırlığıdır ve g_j , etkinleştirme işlevidir. Genel olarak, aşağıdaki radyal temel fonksiyonu g_j için kullanılabilir.

$$g_j = g\left(\frac{\|x - a_j\|}{b_j}\right), a_j \in R^v, b_j \in R^+ \quad (3.19)$$

Burada $\|\cdot\|$ l_2 normunu ifade eder.

N örnek (x_i, y_i) $R^v \times R$ için, arıza arın karelerinin toplamı bir maliyet fonksiyonu olarak kullanılır.

$$J = \sum_{i=1}^N \left\| \sum_{j=1}^M \beta_j g_j(a_j, b_j, x_i) - y_i \right\|^2 \quad (3.20)$$

RVFL ağında, gizli düğüm parametreleri (a_j ve b_j) rastgele atanabilir, ağ yaklaştırma performansını sağlamak için yalnızca çıktı katmanının doğrusal parametrelerinin analitik olarak hesaplanması gerekir. Böylece (3.20) aşağıdaki ikinci dereceden optimizasyon problemi olarak oluşturulabilir.

$$\arg \min_{\beta} \|G\beta - Y\|^2 \quad (3.21)$$

Burada

$$G = \begin{bmatrix} g(a_1, b_1, x_1) & \cdots & g(v_M, b_M, x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(v_1, b_1, x_N) & \cdots & g(v_M, b_M, x_N) \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (3.22)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_M \end{bmatrix}_{M \times 1}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (3.23)$$

G , gizli katman çıktısını belirtir; Y ve β sırasıyla örneklenmiş çıktı ve çıktı ağırlığıdır. Genel olarak, optimal çıktı ağırlığı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\beta = G^+ Y \quad (3.24)$$

G^+ , G 'nin Moore-Penrose'a göre genelleştirilmiş tersidir.

3.4.4.1. Seyrek-Düzenlenmiş RVFL Ağı

Geleneksel RVFL ağı ile karşılaştırıldığında, seyrek-düzenlenmiş(SD)-RVFL ağı, yalnızca modelin aşırı benzetimini etkili bir şekilde önlemekle kalmaz, aynı zamanda çıktı ağırlığının büyüklüğünü azaltarak model karmaşıklığını da azaltır. Bu nedenle, bu yaklaşımın metodolojisi ve değerlendirmesi, bilim adamları tarafından son zamanlarda önemli ölçüde ilgi görmüştür.

Normal düzenlenmiş RVFL ağı, fonksiyonuna düzenlenmiş terim (l_2 - norm) ekleyen sırt regresyon yöntemi (Huynh ve Won 2017) kullanılarak oluşturulabilir. Belirli bir N farklı numune için (x_i, y_i) , l_2 normlu SD-RVFL ağı şu şekilde temsil edilebilir:

$$\min : J = \frac{1}{2} \|\beta\|_2^2 + \frac{Q}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2, \quad s.t : g(x_i)\beta = y_i - \varepsilon_i \quad (3.25)$$

burada Q , eğitim hatasını ve çıktı ağırlığı normunu dengeleyen düzenleştirme parametresidir; $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2$ ve $\|\beta\|_2^2$ sırasıyla ampirik ve yapısal kayıplardır. Düzenlenmiş en küçük kareler algoritmasına göre çözüm şu şekilde ifade edilebilir:

$$\beta = \begin{cases} \left(G^T G + \frac{1}{Q}\right)^{-1} G^T Y, & N \geq M \\ G^T (GG^T + \frac{1}{Q})^{-1} Y, & N < M \end{cases} \quad (3.26)$$

(3.26) eşitliği, SD-RVFL ağının öğrenme formu olarak adlandırılır. (Hoerl ve Kennard 1970)'e göre, çevrimiçi öğrenme formu, aşağıdaki açık formülasyonları kabul eden özyinelemeli bir çözüme atıfta bulunur.

$$\begin{cases} J_k = J_{k-1} + G_k^T G_k \\ \beta_k = \beta_{k-1} + J_k^{-1} G_k^T (Y_k - G_k \beta_{k-1}) \end{cases} \quad (3.27)$$

burada G_k , k 'ninci örnek blok için oluşturulmuş gizli katman çıktısıdır. Modelin başlangıç değerleri açıkça şu şekilde verilmiştir:

$$\begin{cases} J_0 = G_0^T G_0 + \frac{1}{Q} \\ \beta_0 = J_0^{-1} G_0^T Y_0 \end{cases} \quad (3.28)$$

Başlatma aşamasında gizli düğümlerin sayısından daha fazla sayıda örnek gerektiren geleneksel çevrimiçi RVFL ağı ile karşılaştırıldığında, çevrimiçi seyrek-düzenlenmiş RVFL ağı, küçük bir miktar örnek kullanarak modeli başlatabilir. Ayrıca, çevrimiçi seyrek-düzenlenmiş RVFL ağının çıktı ağırlığı normu nispeten küçüktür, bu nedenle modelin genelleme performansı daha iyidir. Bununla birlikte, aykırı değerlerle kirlenmiş verilere geldiğinde, çevrimiçi olarak seyrek-düzenlenmiş RVFL ağının kalitesi bozulabilir. Dahası, çevrimiçi öğrenme çözümü, C düzenleştirme parametresini tam olarak kullanmaz, bu da model uyumsuzluğuna neden olabilir. Bu nedenle, RVFL ağını iyileştirmek hala gereklidir.

3.4.4.2. Gürbüz-Seyrek-Düzenlenmiş RVFL

RVFL ağının sağlamlık sorununu ele almak için, parametrik olmayan kernel yoğunluğu tahmini (NKDE) yöntemi (Hansen 1998) ve ağırlıklı ampirik kayıplı ridge-tip düzenlenmiş RVFL ağı araştırmaya dahil edilmiştir. Gürbüz-seyrek-düzenlenmiş(GSD)-RVFL ağı olarak adlandırılan bu yeni RVFL ağında, deneysel kayıp ağırlıkları, NKDE yöntemi ile tahmin edilen örnek güvenilirliğine göre atanır. Düşük ve yüksek güvenilirlikli numunelerin ampirik kayıp ağırlıklarının azaltılması ve büyütülmesi, aykırı değerlerin etkisini hafifletebilir ve hatta ortadan kaldırabilir. Bunun nedeni, yüksek güvenilirliğe sahip örneklerin muhtemelen işlem davranışını temsil eden normal veriler olması, düşük güvenilirliğe sahip örneklerin ise genellikle girişimleri barındıran aykırı değerlerden şüphelenilmesidir.

Optimizasyon bakış açısından bakıldığında, GSD-RVFL ağının formülü, belirli bir N farklı numune (x_i, y_i) için aşağıdaki gibi matematiksel olarak formüle edilebilir.

$$\min : \frac{1}{2} \|\beta\|_2^2 + \frac{Q}{2} \sum_{i=1}^N p_i \|\varepsilon_i\|_2^2, \quad s.t : g(x_i)\beta = y_i - \varepsilon_i \quad (3.29)$$

p_i , i 'inci örneğin ampirik kayıp ağırlığıdır.

Karush-Kuhn-Tucker (KKT) teoremine göre, yukarıdaki optimizasyon problemi aşağıdaki ikili optimizasyon problemine eşdeğerdir.

$$J_{l_2}(\beta, \varepsilon, \alpha) = \frac{1}{2} \|\beta\|_2^2 + \frac{1}{2} Q \sum_{i=1}^N p_i \varepsilon_i^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i (g(x_i)\beta - y_i + \varepsilon_i) \quad (3.30)$$

burada α_i , i 'inci giriş örneğine karşılık gelen Lagrange çarpanıdır. Bu dışbükey ikinci dereceden optimizasyon problemi için, sıfırın kısmi türevini β , ε ve α 'ya göre karşılaması gereken benzersiz bir optimal çözüm vardır. Bu nedenle, şu türetilir:

$$\frac{\partial J_{l_2}}{\partial \beta} = 0 \rightarrow \beta = G^T \alpha \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial J_{l_2}}{\partial \varepsilon} = 0 \rightarrow \alpha = QP\varepsilon \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial J_{l_2}}{\partial \alpha} = 0 \rightarrow G\beta - Y + \varepsilon = 0 \quad (3.33)$$

burada $\mathbf{P} = \text{diag}\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ampirik kayıp ağırlık matrisidir. Farklı boyutlardaki eğitim numune setlerindeki verimlilik endişelerine dayanarak, yukarıdaki KKT koşullarına farklı çözümler elde edilebilir. Eğer $N < M$ ise (3.22) kullanarak, aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$PG\beta - PY + P\varepsilon = 0 \quad (3.34)$$

(3.24) ve (3.25) 'i (3.27) yerine koyarsak,

$$\left(\frac{1}{Q} + PGG^T \right) \alpha = PY \quad (3.35)$$

(3.28) 'i (3.24)' e koyarsak,

$$\beta = G^T \left(\frac{1}{Q} + PGG^T \right)^{-1} PY \quad (3.36)$$

Eğer $N < M$ ise bu durumda, (3.30) ve (3.31) 'ten, şu sonuca varılır:

$$\beta = G^T QP\varepsilon \quad (3.37)$$

$$P\varepsilon = \frac{1}{Q} (G^T)^+ \beta \quad (3.38)$$

(3.31) 'i (3.27)' ye değiştirerek elde edebiliriz

$$PG\beta - PY + \frac{1}{Q} (G^T)^+ \beta = 0 \quad (3.39)$$

Böylece

$$G^T PG\beta - G^T PY + \frac{1}{Q} \beta = 0 \quad (3.40)$$

Yukarıdaki denklemden, bu durumda sonucu alabiliriz.

$$\beta = \left(\frac{1}{Q} + G^T PG \right)^{-1} G^T PY \quad (3.41)$$

Bu nedenle, çıktı ağırlıklarının farklı biçimleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

$$\beta = \begin{cases} G^T \left(\frac{1}{Q} + PGG^T \right)^{-1} PY, & N < M \\ \left(\frac{1}{Q} + G^T PG \right)^{-1} GPY, & N \geq M \end{cases} \quad (3.42)$$

Yukarıdaki formüllerden görülebileceği gibi, ampirik kayıp ağırlıkları p_i , $i = 1, \dots, N$, Morozov'un tutarsızlık ilkesi, genelleştirilmiş gibi araçlarla seçilebilen Q düzenleştirme parametresi hariç, β 'nin çözümü için çapraz doğrulama ve L eğrisi önemli parametrelerdir (Cox 1999). Bu tezde model sağlamlığının iyileştirilmesi esas olarak numunelerin çözüme katkılarını temsil eden p_i 'nin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Hedefe ulaşmak için, katkının örneklemin güvenilirliğine yakından karşılık gelmesine izin verilmiştir. Aykırı değerden etkilenen kalıntının her zaman toplam artık dağıtım merkezinden uzakta olması ve düşük yoğunlukta olması nedeniyle, numunenin güvenilirliği bir NKDE yöntemi kullanılarak artıkların olasılık yoğunluk fonksiyonu ile tahmin edilebilir. Bu şekilde, düşük yoğunluklu aykırı değerler çözüme küçük veya hatta sıfır katkıya ayarlanacaktır.

GSD-RVFL ağındaki kalıntıların olasılık dağılımını elde etmek için, P 'yi bir kimlik matrisi olarak ayarlayabilir ve ardından orijinal modelin standart kalıntılarını hesaplayabiliriz, yani,

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^M \beta_i g_i(a_i, b_i, x_j) - y_j, j = 1, 2, \dots, N \quad (3.43)$$

Ardından, kalıntıların olasılık yoğunluk fonksiyonu NKDE yöntemi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$f(x) = \frac{1}{gN} \sum_{j=1}^N \phi\left(\frac{x - \varepsilon_j}{g}\right) \quad (3.44)$$

Burada $h = 1.06\sigma N^{-1/5}$ tahmin edilen pencerenin genişliğidir, σ artıkların standart sapmasıdır, ϕ aşağıdaki gibi Gauss kernel fonksiyonudur:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (3.45)$$

(3.33) kullanılarak, her bir ε_i kalıntısının olasılığı $f(\varepsilon_i)$ elde edilebilir. Açıktır ki, $f(\varepsilon_i)$ ne kadar büyükse, numunenin güvenilirliği o kadar yüksek olur ve bunun tersi de geçerlidir. Bu nedenle, p_i ağırlığı, doğrudan $f(\varepsilon_i)$ 'ye göre ayarlanabilir. Çıktı ağırlığı hesaplama denklemi (3.31) ve örnek ağırlık değerlendirme denklemi (3.33) arasındaki yinelemeli değişimin, yüksek kaliteli bir model elde etmek için daha doğru örnek güvenilirliği elde edeceğini belirtmekte fayda var. Ancak kapsamlı deneyler, yinelemeli yöntemin biraz daha iyi doğruluk elde edebileceğini, ancak yinelemesiz yöntemle göre daha yüksek hesaplama yüküne sahip olduğunu göstermektedir.

3.4.4.3. Çevrimiçi Gürbüz-Seyrek-Düzenlenmiş RVFL

Açıktır ki, GSD-RVFL ağının, tahmin hatasını azaltmada ve aykırı değerlerden kaçınmada RVFL ağından üstündür. Bu üstünlükler, yukarıdaki GSD-RVFL ağının zaman tüketimi ve hesaplama maliyeti ek zorluklar getirmektedir. Bu bölümde, çevrimiçi-gürbüz-seyrek-düzenlenmiş(ÇGSD)-RVFL ağı adı verilen özyinelemeli formül geliştirilerek, hem öğrenme zamanı olarak hem de hesap maliyeti açısından RVFL ağını daha avantajlı hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Toplu öğrenme yöntemine benzer şekilde, özyinelemeli formül türetmek için farklı boyutlarda çevrimiçi numuneler tam olarak dikkate alınır. $N < M$, durumları için (3.31) kullanılarak ilk modeli oluşturmak için küçük bir veri yığını kullanılır.

Sırasıyla ilk gizli katman çıktısı ve çıktı ağırlığı olarak G_0 ve β_0 'ı belirlenir ve ilk P_0 'ı bir birim matrisi olarak ayarlanır. k 'inci numune bloğu geldiğinde:

$$\beta_k = G_k^T \left(\frac{1}{Q} + P_k G_k G_k^T \right)^{-1} P_k Y_k \quad (3.46)$$

olacaktır. Burada

$$G_k = \begin{bmatrix} G_{k-1} \\ \delta H_k \end{bmatrix} \text{ ve } P_k = \begin{pmatrix} P_{k-1} & 0 \\ 0 & \delta P_k \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

δH_k ve δP_k sırasıyla gizli katman çıktısı ve yeni örneklerin ampirik kayıp ağırlığı anlamına gelirken, P_k yeni ampirik kayıp ağırlığını ifade eder.

Bu durumda,

$$S_k^{-1} = \left(\frac{1}{Q} + P_k G_k G_k^T \right)^{-1} = \begin{pmatrix} P_{k-1} G_{k-1} G_{k-1}^T + \frac{1}{Q} & P_{k-1} G_{k-1} \delta G_k^T \\ \delta P_k \delta G_k G_{k-1}^T & \delta P_k \delta G_k \delta G_k^T + \frac{1}{Q} \end{pmatrix}^{-1} \quad (3.48)$$

Düzenli hale getirme parametresi Q nedeniyle, S_k her zaman tersine çevrilebilir ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$S_k^{-1} = \begin{pmatrix} U & W \\ Q & Z \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

(3.31) ve (3.32) 'yi birleştirerek,

$$\begin{cases} U = S_{k-1}^{-1} + S_{k-1}^{-1} P_{k-1} G_{k-1} \delta G_k^T K_k^{-1} \delta P_k \delta G_k G_{k-1}^T S_{k-1}^{-1} \\ W = -S_{k-1}^{-1} P_{k-1} G_{k-1} \delta G_k^T K_k^{-1} \\ Q = -K_k^{-1} \delta P_k \delta G_k G_{k-1}^T \\ Z = -K_k^{-1} \end{cases} \quad (3.50)$$

Burada

$$K_k = \delta P_k \delta G_k \delta G_k^T + \frac{1}{Q} - \delta P_k \delta G_k G_{k-1}^T S_{k-1}^{-1} P_{k-1} G_{k-1} \delta G_k^T \quad (3.51)$$

olarak tanımlanmaktadır. (3.29) 'dan (3.34) 'e çıktı ağırlığı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\beta_k = G_k^T G_k^{-1} P_k Y_k \quad (3.52)$$

Burada $Y_k = [Y_{k-1}, \delta Y_k]$.

$N < M$ durumunda, (3.30) - (3.35) eşitlikleri, k 'inci veri bloğu geldiğinde güncelleme algoritmasını ifade eder. Bu durumda, sağlamlık ve genellemenin model performansını iyileştirdiği kabul edilir, ancak G_k önceki örnekleri içerir. Bu nedenle örneklerin birikmesi ile öğrenme süresinin ve hesaplama maliyetinin artması gibi bir sorun vardır. Bu nedenle, örneklerin boyutu N ($N > L$) olarak toplandığında, yukarıdaki çevrimiçi öğrenme formu yerine aşağıdaki özyinelemeli algoritma kullanılır.

$N > M$ durumlarında ise, (3.25) 'e göre k 'inci veri bloğu geldiğinde,

$$\beta_k = \left(G_k^T P_k H_k + \frac{1}{Q} \right)^{-1} G_k P_k Y_k \quad (3.53)$$

Burada $S_k^{-1} = \left(G_k^T P_k G_k + \frac{1}{Q} \right)^{-1}$ dir.

Yeni veri bloğu geldiğinde, yeni P_k ve G_k (3.30) ile aynıdır. Bu nedenle eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} S_{k-1}^{-1} &= \left(G_{k-1}^T P_{k-1} G_{k-1} + \frac{1}{Q} \right)^{-1} \\ &= \left(\begin{bmatrix} G_{k-1}^T & \delta G_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{k-1} & 0 \\ 0 & \delta P_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{k-1} \\ \delta G_k \end{bmatrix} + \frac{1}{Q} \right)^{-1} \\ &= \left(G_{k-1}^T P_{k-1} G_{k-1} + \delta G_k^T \delta P_k \delta G_k + \frac{1}{Q} \right)^{-1} \\ &= \left(S_{k-1} + \delta G_k^T \delta P_k \delta G_k \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Sherman-Morrison-Woodbury formülüne göre,

$$(U + WQZ)^{-1} = U^{-1} - U^{-1}W(Q^{-1} + ZU^{-1}W)^{-1}ZU^{-1} \quad (3.55)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu formülün kullanılmasıyla, S_k^{-1} şu şekilde tanımlanabilir

$$S_k^{-1} = (I - C_k \delta G_k) S_{k-1}^{-1} \quad (3.56)$$

Burada,

$$C_k = S_{k-1}^{-1} \delta G_k^T (\delta P_k^{-1} + \delta G_k G_{k-1}^{-1} \delta G_k^T)^{-1} \quad (3.57)$$

Bu durumda

$$\begin{bmatrix} G_{k-1} \\ \delta G_k \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{k-1} & 0 \\ 0 & \delta P_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{k-1} \\ \delta Y_k \end{bmatrix} = G_{k-1}^T P_{k-1} Y_{k-1} + \delta G_k^T \delta P_k \delta Y_k \quad (3.58)$$

Böylece

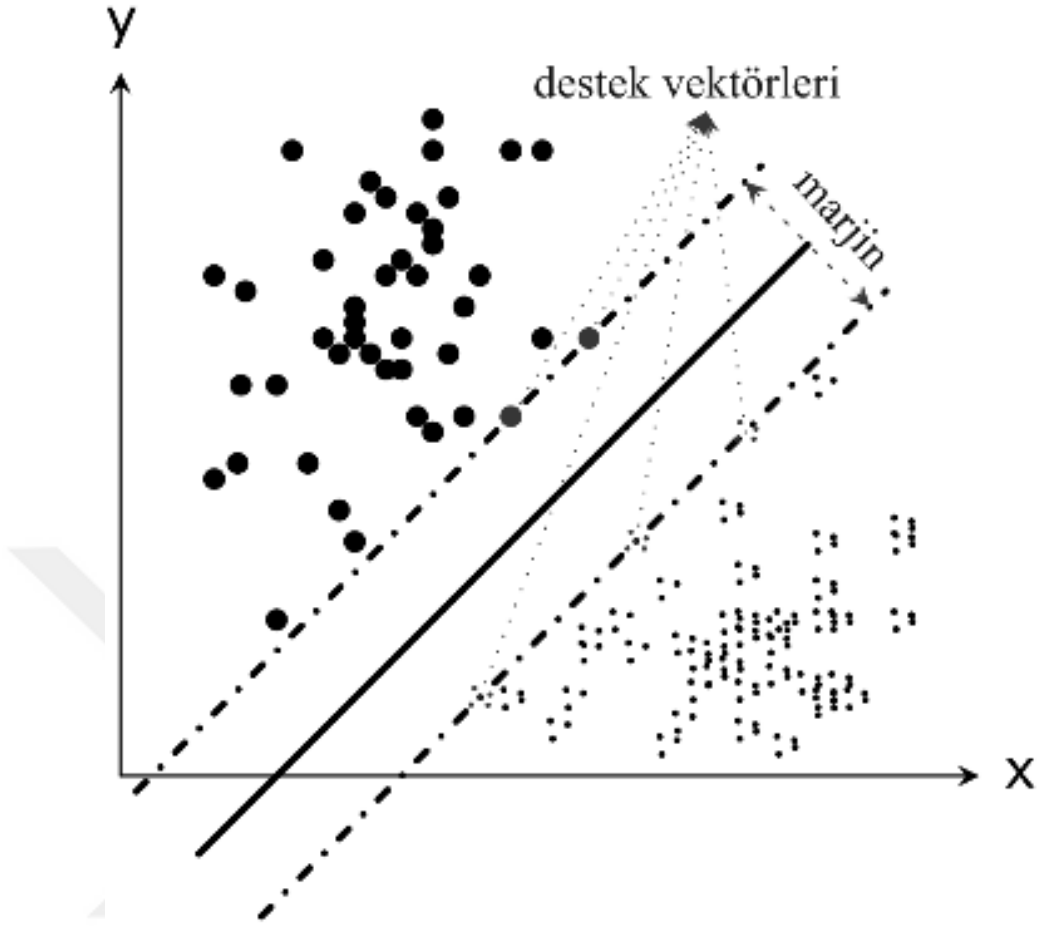
$$\begin{aligned}
\beta_k &= S_k^{-1} G_k^T P_k Y_k \\
&= S_{k-1}^{-1} (G_{k-1}^T P_{k-1} Y_{k-1} + \delta G_k^T \delta P_k \delta Y_k) \\
&= (I - C_k \delta G_k) S_{k-1}^{-1} G_{k-1}^T P_{k-1} Y_{k-1} \\
&\quad + (I - C_k \delta G_k) S_{k-1}^{-1} \delta G_k^T \delta P_k Y_k \\
&= \beta_{k-1} - C_k \delta G_k \beta_{k-1} + C_k \delta P_k^{-1} \delta P_k \delta Y_k \\
&= \beta_{k-1} + C_k (\delta Y_k - \delta G_k \beta_{k-1})
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Önceki bağımsız değişkenleri genelleştiren, çıktı ağırlığı şu şekilde güncellenebilir:

$$\begin{aligned}
\beta_k &= \beta_{k-1} + C_k (\delta Y_k - \delta G_k \beta_{k-1}) \\
C_k &= S_{k-1}^{-1} \delta G_k^T (\delta P_k^{-1} + \delta G_k S_{k-1}^{-1} \delta G_k^T)^{-1} \\
S_k^{-1} &= (I - C_k \delta G_k) S_{k-1}^{-1}
\end{aligned} \tag{3.60}$$

3.3.5. En Küçük Kareler-Destek Vektör Makinesi(EKK-SVM)

Bu bölümün amacı RVFL ağı ile karşılaştırma için kullanılacak destek vektör makinesi (SVM) yönteminin teorik olarak detaylandırılmasıdır. SVM yöntemi karar verme aşamasında, PV ve güç sistemlerinde arıza tespiti için kullanılan yöntemlerden birisidir (Jiang ve ark. 2011, Moravej ve ark. 2014, Yi, ve Etemadi 2017). Özellikle ikili sınıflandırma problemlerini hızlı bir şekilde çözmek için bir makine öğrenimi tekniği olarak ortaya çıkmış ve daha sonra PV ve güç sistemleri arızalarını tespit etmek için kullanılmıştır. SVM yöntemi, özellik uzayındaki veri bulutlarını, verileri her iki taraf için maksimize edilmiş kenar boşluklarıyla ayıran bir hiper düzlemle ayırt eder. Özellik uzayında hiper düzleme en yakın veri örnekleri "destek vektörleri" olarak adlandırılır. Şekil 3.22, iki boyutlu bir özellik uzayında iki veri bulutunu ayıran doğrusal bir SVM'nin temel mekanizmasını gösterir, burada iki boyutlu uzaydaki hiper düzlem bir çizgi olmaktadır.



Şekil 3.22. SVM işleminin gösterimi

N veri noktasından oluşan bir eğitim seti verildiğinde $\{(x_i, y_i) \mid i=1, \dots, N\} \in \mathbb{R}^n$. SVM yöntemi yaklaşımı, şu şekilde tanımlanır:

$$y(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \Phi(x, y_i) + \beta \right] \quad (3.61)$$

Burada α_i pozitif gerçek sabit ve β gerçek sabittir. $\Phi()$ ise SVM fonksiyonudur. Buradan, sınıflandırma problemini Eşitlik 3.62’de gösterildiği şekilde formüle ederek SVM sınıflandırıcısına en küçük kareler versiyonunu elde etmiş oluruz.

$$\min \left(\frac{1}{2} w^T w + F \sum_{i=1}^N \gamma_i \right) \quad \text{s.t.} \quad y_i (w^T \xi w + \beta) \geq 1 - \gamma_i \quad (3.62)$$

3. MATERYEL VE METOT

Bu eşitlikte; w , SVM ayırma marjı ile ters orantılıdır, ζ orijinal özellik uzayından daha yüksek boyutlu uzaya dönüşümdür, i mevcut numuneyi belirtir, F eğitim numunelerini yanlış sınıflandırmanın cezasıdır, γ gevşek değişkendir (Yi ve Etemadi, 2017).



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. KD ve AD Arızalarının Simülasyonu

Bir PV dizisi genellikle birden çok paralel PV dizisine sahiptir ve her dizinin seri olarak bir dizi modülü vardır. Her, dizi modül ve tüm dizi, ister normal ister arızalı durumda olsun, kendi I-V özelliklerine ve benzersiz maksimum güç noktasına (MPP) sahiptir. PV modülleri birbirine bağlandığında, toplam I-V eğrisi aralarındaki etkileşimler tarafından belirlenir. Bu nedenle, PV modülleri, yalnızca en zayıf halkanın güçlü olduğu kadar bir zincir gibi birlikte çalışır. Bir PV dizisinin performansı için en zayıf halka, normal koşullar altında en zayıf performans gösteren modül veya dizidir.

PV dizilerindeki arızalar, PV modüllerine ve kablolarına zarar verir ve ayrıca elektrik çarpması tehlikelerine ve yangın riskine yol açar. Örneğin, PV dizilerindeki sırasıyla toprak arızaları ve hat hattı arızalarının neden olduğu iki PV enerji santralinin yangından ötürü zarar görmesine bu çalışmanın ilk bölümünde değinilmiştir. Ayrıca, PV dizilerindeki arızalar büyük miktarda enerji kaybına neden olabilir. Örneğin, Birleşik Krallık yerel PV sistemlerinde, PV sistemlerindeki arızalardan kaynaklanan yıllık enerji kaybının% 18.9'a kadar çıktığı tahmin edilmektedir (Firth ve ark. 2010). Bu nedenle, bir PV dizisi için arıza analizi, sistem verimliliği ve güvenilirlik analizi için önemli bir görevdir.

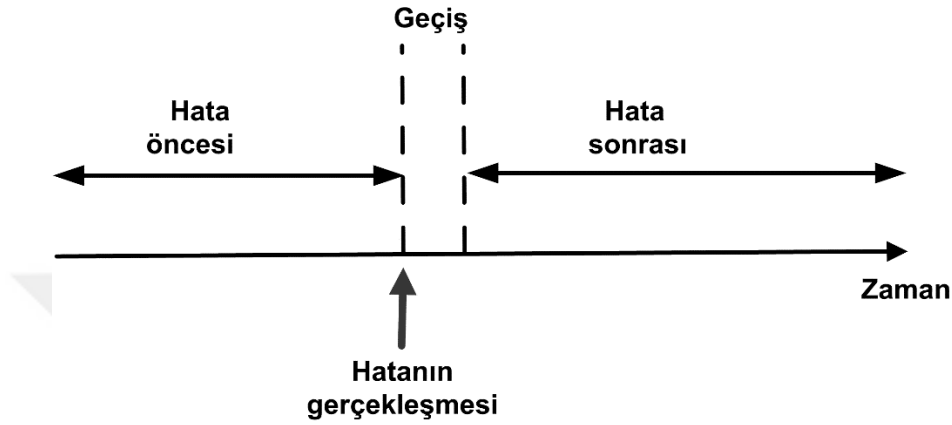
Bölüm 3'deki geliştirilmiş simülasyon modeline dayalı olarak, bu başlıkta, MPPT algoritmasının etkileri de dahil olmak üzere, PV dizilerindeki çeşitli arıza türlerinin yüksek ışık seviyesi altında simülasyonu ve deneylerini incelenmektedir. Arıza analizinin temel yaklaşımları, I-V karakteristik analizinin anlaşılmasına dayalı olarak özetlenecektir.

Araştırmamızda bazı özel hususlar ve varsayımlar mevcuttur. PV dizisinin arıza akımının tek kaynağı olduğu düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, herhangi bir yardımcı eviriciden, bataryadan, yıldırım çarpmasından veya harici kaynaklardan aşırı akım veya aşırı gerilim olmadığı varsayılmaktadır.

Şekil 4.1'de gösterildiği üzere arıza akımı davranışlarına göre, güç sistemlerindeki arızalar (PV sistemleri dahil) genellikle üç duruma sahiptir: arıza öncesi sabit durum, geçici durumlar ve arıza sonrası kararlı durum. Bununla birlikte, bu tez arıza analizinde

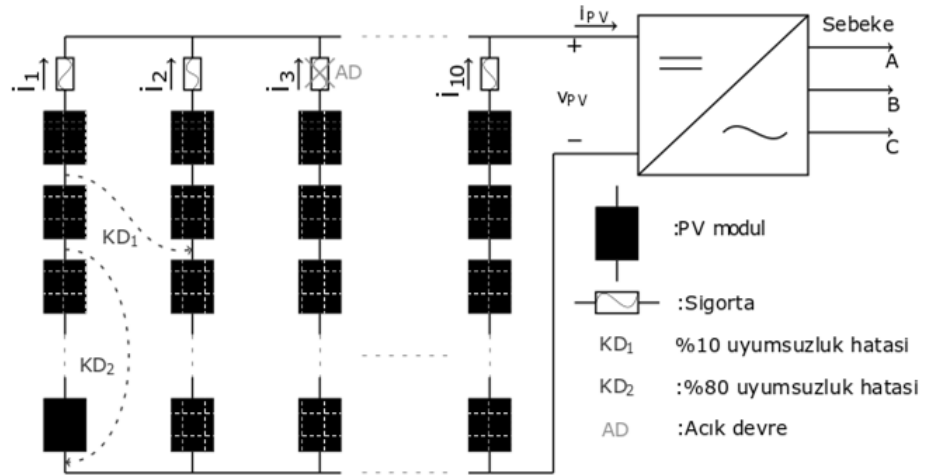
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

geçici durumu hesaba katmaz çünkü arıza akımı yerleşme süresi ihmal edilebilir düzeydedir (örneğin, kısa devre arızası kristal silisyum PV modülü için 0.1 ms'den azdır) ve geçici akımların etkileri yoktur. Bu nedenle, bu tez yalnızca arıza öncesi kararlı duruma (normal koşullar olarak adlandırılır) ve arıza sonrası kararlı duruma (arıza koşulları olarak adlandırılır) odaklanır.



Şekil 4.1. Güç sistemlerinde üç arıza evrimi durumu.

Tipik bir şebekeye bağlı PV sistemi, bir PV dizisi $M \times N$ modüllü (her dizide M serisi modül sayısı ve N sayıda paralel PV dizisi), MPPT'li merkezi bir PV inverteri, AAKC ve TATK'den oluşmaktadır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, PV dizileri içinde KD ve AÇ arızaları meydana gelebilir ve bunlar potansiyel olarak büyük arıza akımı veya DA arklarına sebep olabilmektedirler. Bu araştırma, dizideki farklı potansiyellere sahip iki nokta arasında kazara KD olarak tanımlanan hat-hat ve AD arızalarına odaklanmaktadır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, bir hat-hat arızası, iki farklı nokta arasındaki bir kısa devre arızasından kaynaklanabilir.



Şekil 4.2. Merkezi eviricili bir PV dizisindeki hat-hat KD ve AD arızaları.

4.1.1. I-V Karakteristik Analizi

I-V özelliği, PV dizilerinin davranışlarını tanımlar ve normal ve arıza analizi için temel bir araçtır. Seri paralel konfigürasyona sahip arızalı bir PV dizisinde, normal kısım ve arızalı kısım aynı çalışma gerilimini paylaşır. PV dizileri ve dizi çalışma gerilimi için verilen I-V özelliklerine göre, dizinin normal ve arızalı parçalarının çalışma noktalarını türetmek mümkündür.

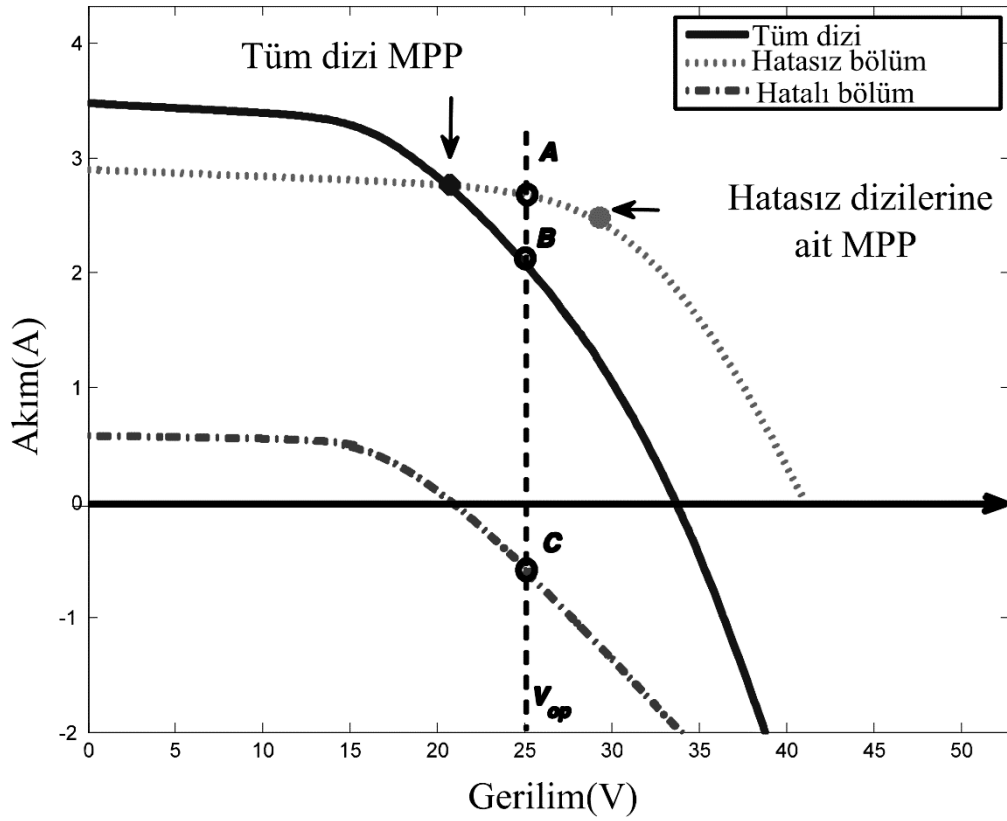
Genel olarak, PV dizilerindeki arızalar, PV dizileri arasında gerilim değişikliklerine ve dengesiz akımlara neden olur. Bazen dengesiz akımlar, PV modüllerinde veya ara bağlantı iletkenlerinde hasara neden olarak arızalı diziyi geri besleyebilir. Şekil 4.3, tüm dizinin, dizinin normal kısmının ve dizinin arızalı kısmının I-V eğrilerinin önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Arızalı kısım ve dizinin normal kısmı, birbirine paralel olduklarından aynı gerilimde çalışmalıdır. Ancak artık aynı MPP'ye sahip değildir.

Örneğin, Şekil 4.3'teki, I-V eğrisindeki çalışma gerilimi V_{op} 'ta, normal bölümün, tüm dizinin ve arızalı parçanın çalışma noktaları sırasıyla A, B ve C noktalarında bulunabilir. Ayrıca, sistemin arıza olmayan normal kısmının arıza durumunda bile pozitif akıma sahip olacağı, ancak dizinin arızalı kısmının negatif akıma (geri beslemeli akım)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

sahip olacağı göz önüne alındığında, bu akımın PV modüllerine ve kablolarına zarar verme olasılığı bulunmaktadır.

Arıza akımının ana nedeni, arızalı dizinin I-V eğrisinin daha düşük bir açık devre gerilimine (V_{AD}) dönüşmesidir. Ancak, inverterdeki MPPT arızaya kıyasla nispeten yavaş yanıt verdiğinden, dizinin çalışma gerilimi arızadan hemen sonra değişmez. Bu nedenle, MPPT, arızadan hemen sonra sistem gerilimini nispeten sabit tutmaktadır. Arıza ışımanın yüksek olduğu bir günde meydana gelirse, geri beslenen akımın yeterince yüksek olması muhtemeldir ve arızalı PV dizisi ile seri olarak bağlanan AAKC açılacaktır. Bununla birlikte, arıza bulutlu bir günde veya gece meydana gelirse, geri beslenen akımın AAKC'yi tetikleyecek kadar yüksek olmaması muhtemeldir.



Şekil 4.3. Açık bir günde arıza altında dizinin I-V özellikleri.

4.1.2. KD Arızası ve Analizi

KD arızası, bir elektrik şebekesinde veya sistemde farklı potansiyele sahip iki nokta arasında kazara oluşan düşük dirençli bir bağlantıdır. PV sistemleri için, bir KD arızası genellikle PV modülleri veya farklı potansiyele sahip dizi kabloları arasındaki devre arızası olarak tanımlanır. Hat-hat arıza akımının büyüklüğü aynı zamanda arıza tiplerine ve çevresel faktörlere bağlıdır. KD arızasının ana nedenleri aşağıdaki gibi olabilir

- Akım taşıyan iletkenler arasında tesadüfi kısa devre, yani korumasız kablolardan geçen bir çivi;
- Kabloların yalıtım arızası, yani kablo yalıtımını çiğneyen ve hat arızasına neden olan bir hayvan;
- DC bağlantı kutusundaki hat hattı arızaları, yani mekanik hasar, su girişi ve korozyon.

4.1.3. KD Arızalarının Simülasyon Sonuçları

KD arızaları, STK altında 5kW kristal silisyum PV sistemde simüle edilmiştir. Simülasyonlarda, KD arızaları, hemen meydana gelen katı arızalardır. Arıza akımlarının evrimini tam olarak anlamak için, aşırı akım koruma cihazları dikkate alınmamıştır, böylece simülasyonda arıza giderebilecek mekanizma bulunmamaktadır. Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip KD arızası ve yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip KD arızası olmak üzere tür KD arızası incelenmiştir.

4.1.3.1. Düşük PV Modül Uyumsuzluğuna Sahip KD Arızası

Şekil 4.2'de, KD1 arızası 1. Dizi ve 2. Diziler arasında meydana gelmiştir. 10%'luk bir PV uyumsuzluğuna sahiptir. KD arızaları dizinin arızalı ve normal (arızasız) kısımları arasında gerilim farkına neden olur ve bu da PV dizisi arasında dengesiz akımlara yol açar.

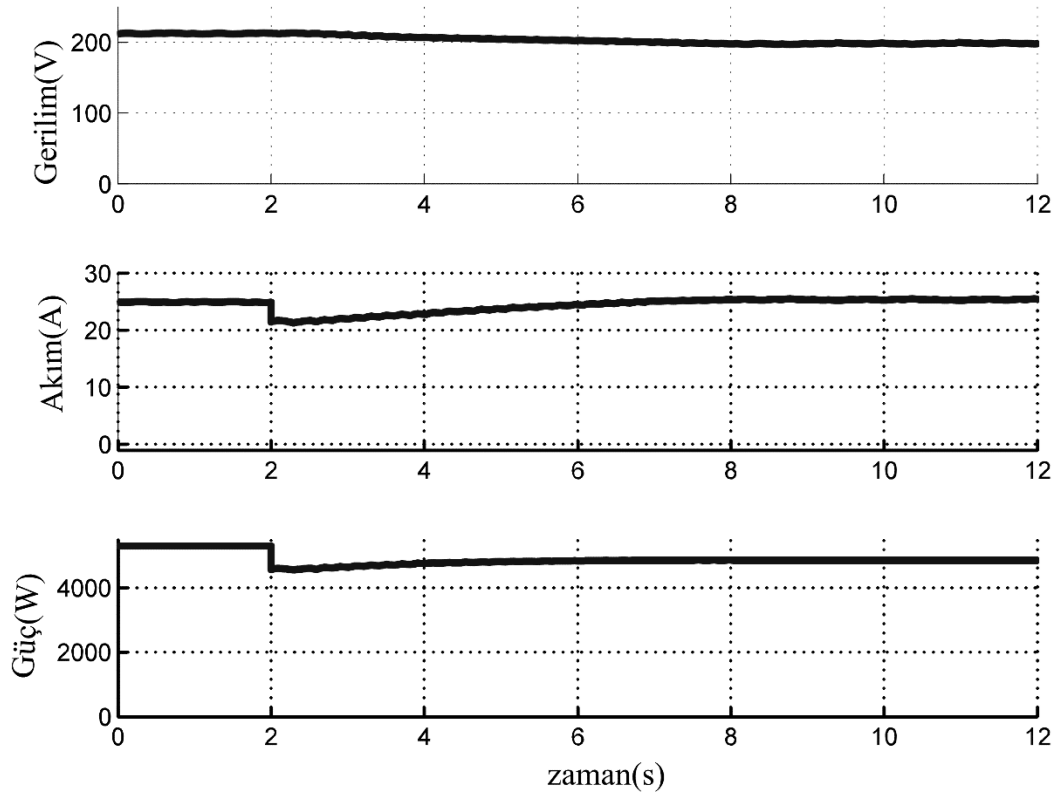
KD1 arızasından sonra, PV dizisi arızalı kısım ve normal kısım olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Dizinin her bir parçası, devre analizinde bir düğüm olarak görülebilir. KD

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

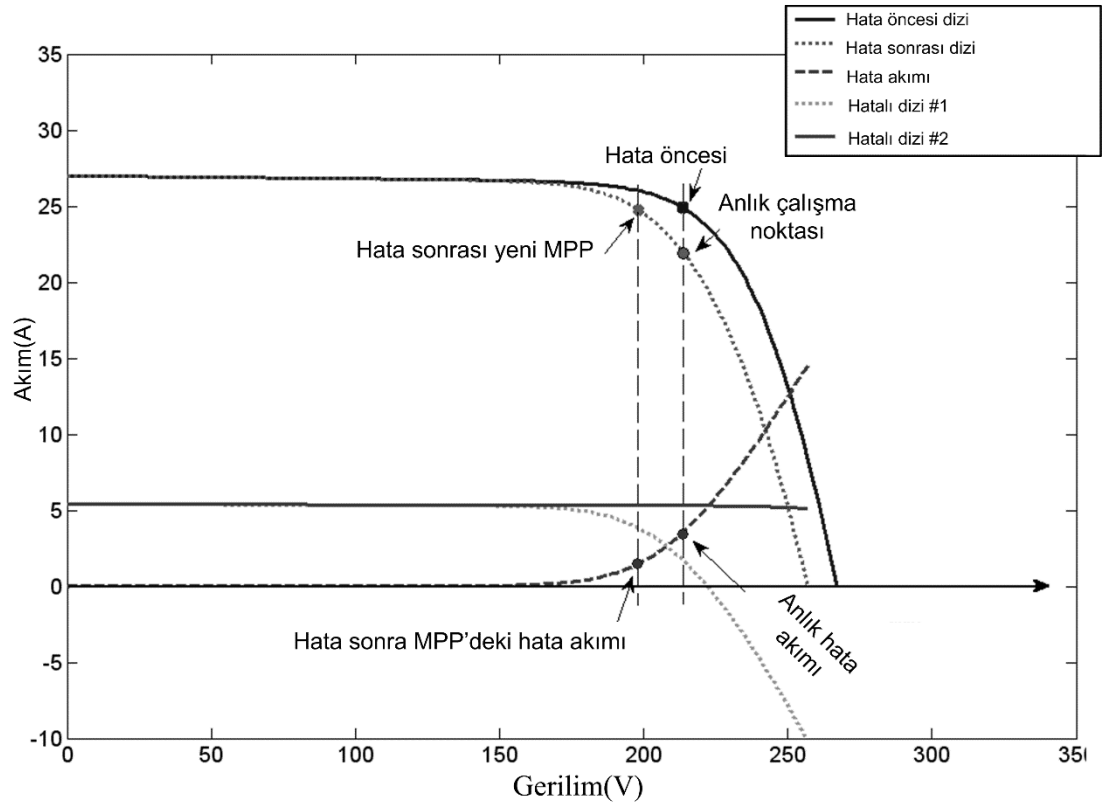
arızası, arızalı kısmın içindedir. Simülasyon sonuçları Çizelge 4.1'te özetlenmiş ve Şekil 4.4. ve Şekil 4.5’de, sırasıyla çıkış güç, akım, gerilim ve I-V grafikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip KD Arızaları için Simülasyon Sonuçları

KD arızas	Arıza akımı	Dizi çalışma noktası	Sistem verimliliği
Arıza gerçekleştiğinde	3.4A (0.63I _{sc})	212V, 20,8A, 4.63kW	88.4%
Arıza gerçekleştikten sonra	1.5A (0.26I _{sc})	196V, 24.3A, 5kW	92.3%



Şekil 4.4. Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizisinin simüle edilmiş çıkış güç, akım ve gerilim sonuçları.



Şekil 4.5. Düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip arıza altında PV dizisinin I-V özellikleri.

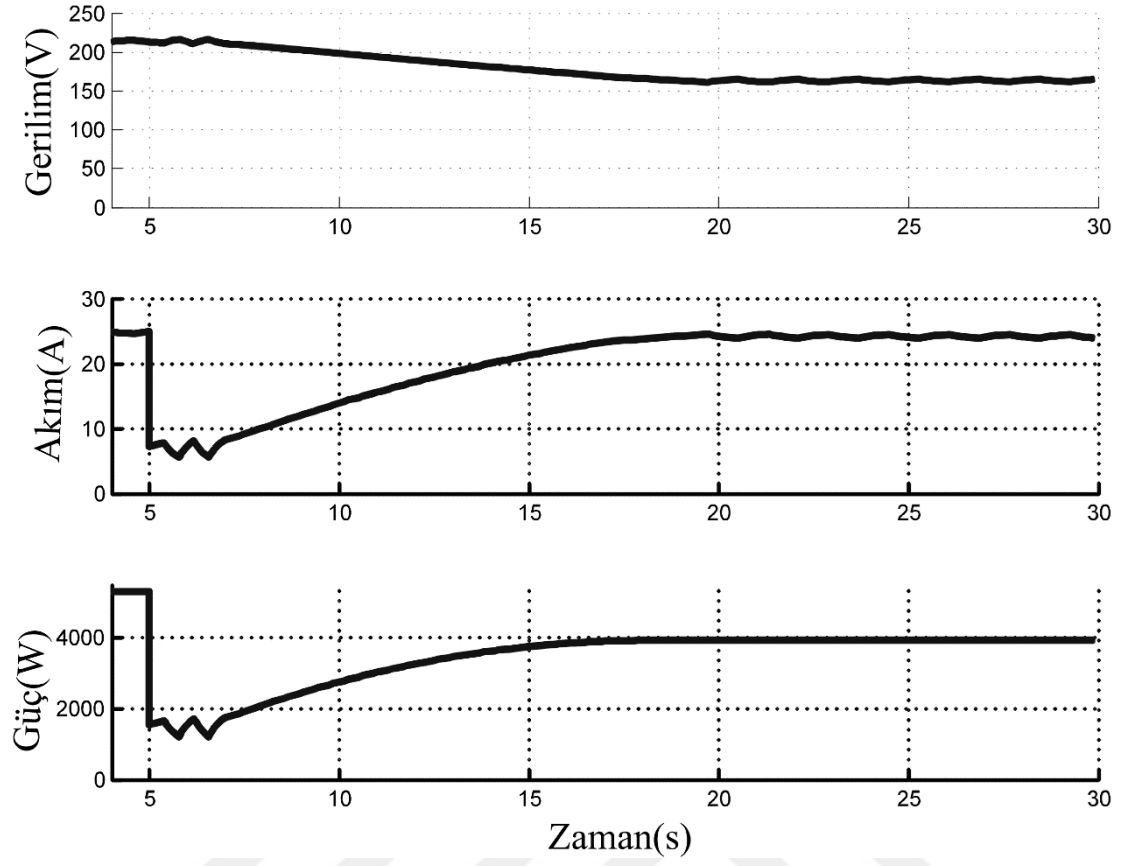
4.1.3.2. Yüksek PV Modül Uyumsuzluğuna Sahip KD Arızası

Şekil 4.2'de, 1. Dizi ve 2. Dizi arasındaki KD2 arızası incelenmiştir. Bu arıza, dizinin arızalı ve normal kısımları arasında büyük gerilim farkına da neden olacak ve PV dizisi arasında dengesiz akıma yol açacaktır. Simülasyon sonuçları Çizelge 4.2'de özetlenmiş ve Şekil 4.6. - Şekil 4.7'de, sırasıyla çıkış güç, akım, gerilim ve I-V grafikleri verilmiştir.

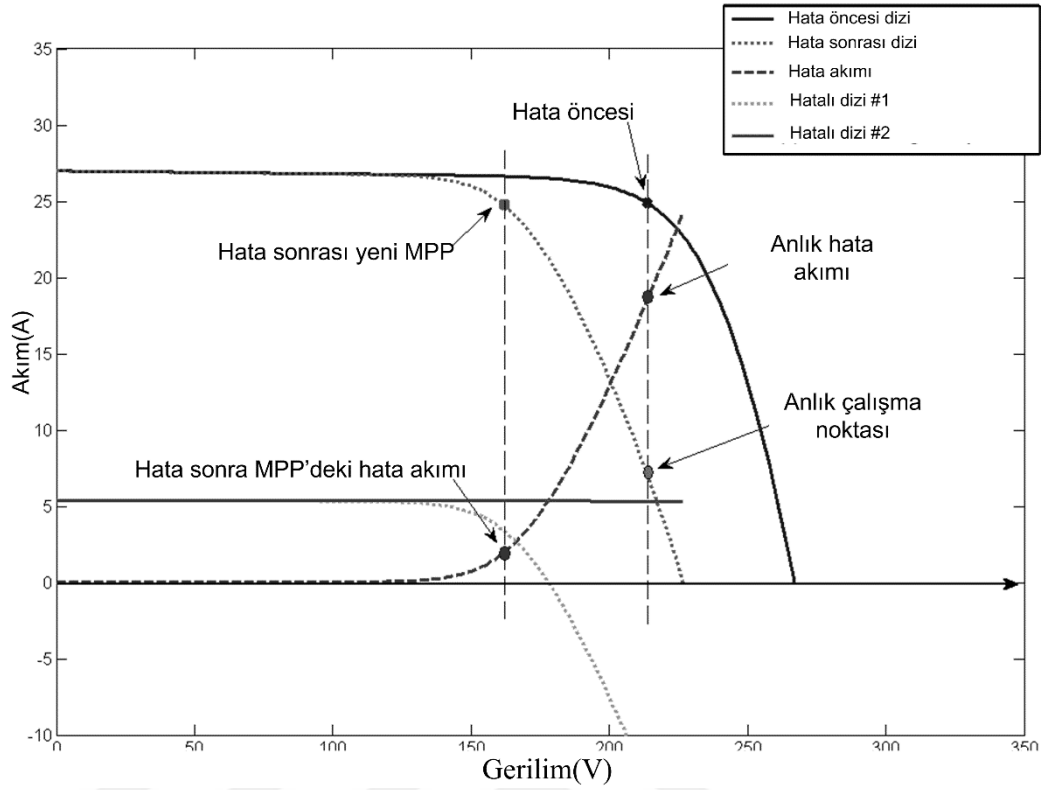
Çizelge 4.2. Yüksek PV modül uyumsuzluğu KD arızasının simülasyon sonuçları

KD arızası	Arıza akımı	Dizi çalışma noktası	Sistem verimliliği
Arıza gerçekleştiğinde	17.34A (3.6Isc)	214V, 8,8A, 1.63kW	28.4%
Arıza gerçekleştikten sonra	2.1A (0.42Isc)	162V, 22.1A, 4.1kW	76.2%

4. ARAŞTIRMA BULGULARI



Şekil 4.6. Yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizilerinde çıkış güç akım ve gerilim.



Şekil 4.7. Yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip PV dizilerinde KD arızası I-V grafiği

4.1.4. AD Arızası ve Analizleri

Açık devre arızası, normal akım taşıyan bir iletkende kazara bağlantının kesilmesidir. Örneğin, Şekil 4.2’de bir açık devre arızası AD olarak verilmiştir. Bu arıza, PV hücrelerinin / modüllerinin çatlamasından dolayı modül ara bağlantıları arasında, tipik olarak bağlantı kablolarında veya bağlantı kutusunda meydana gelebilir. Bu arızalara şunlar neden olabilir:

- Döngüsel termal stres;
- Dolu veya rüzgar yükü;
- İşleme ve montaj sırasında verilen hasarlar.

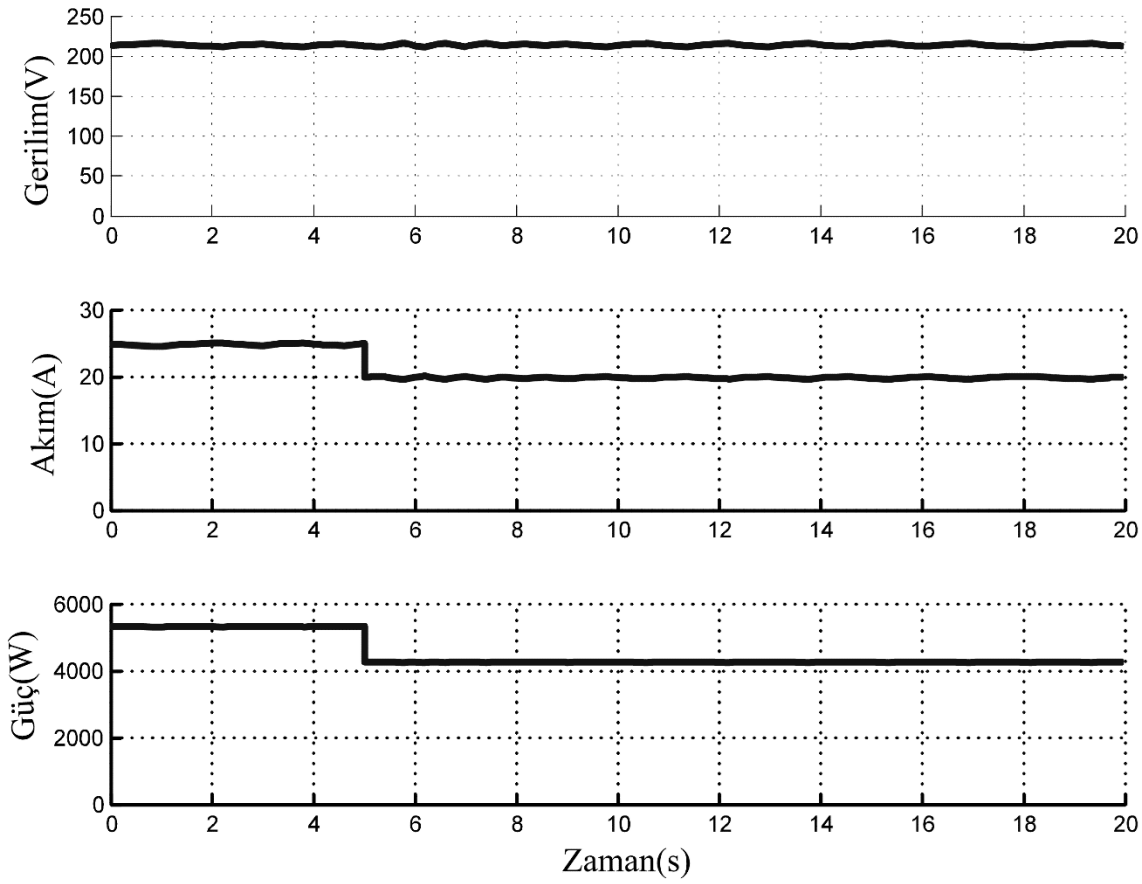
Şekilde 4.2’de verilen AD arızası 3. Dizide meydana gelmiştir. Simülasyon sonuçları Çizelge 4.3’de özetlenmiş ve Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 ’de arıza sonuçlarının grafikleri verilmiştir. Açık devre arızasının herhangi bir büyük arıza akımı oluşturmayacağı tespit

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

edilmiştir. Arızada 10 diziden birinin bağlantısı kesildiği için, büyük miktarda güç (nominal gücün yaklaşık % 10'u) kaybedilecektir. Çizelge 4.3'te, arıza ve arıza sonrası işletim gerilimlerinin hemen hemen aynı olduğu ($\sim 212,7V$) tespit edilmiştir. Sonuç olarak, arızalı PV dizisi, arızanın hemen ardından optimum seviyeye ulaşmıştır.

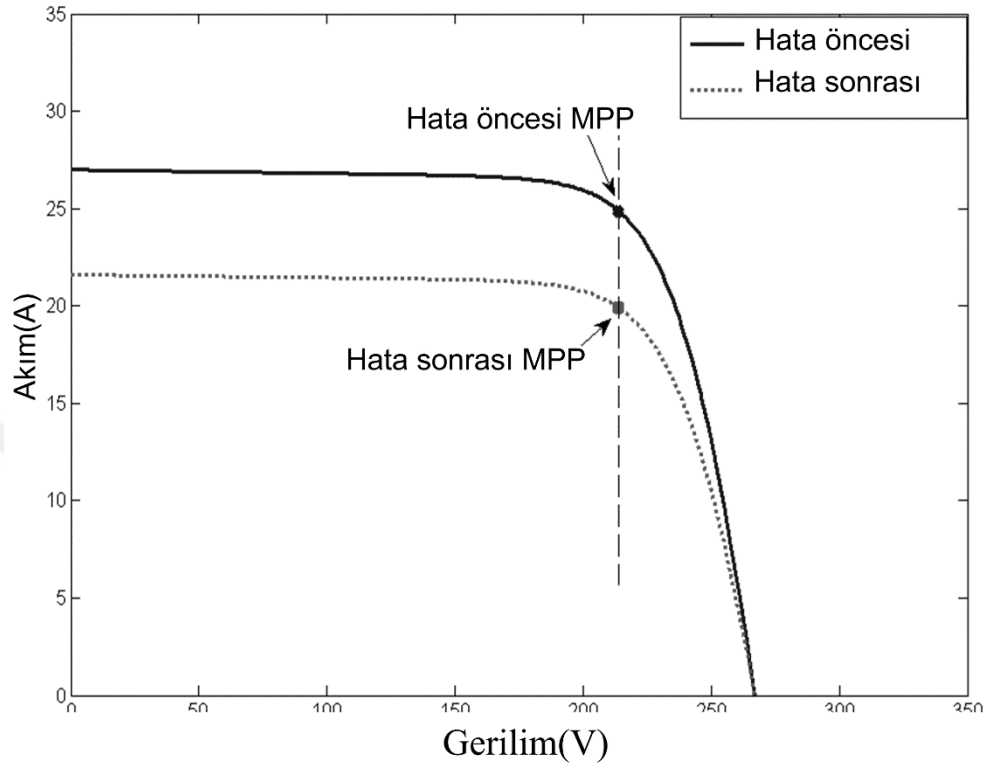
Çizelge 4.3. STK'de açık devre arızasının simülasyon sonuçları

AD arızası	Arıza akımı	Çalışma noktası	Verimlilik
Arıza olduğunda	0	212.7V, 18.85A, 4.18kW	80%
Arıza sonrası	0	212.7V, 18.85A, 4.18kW	80%



Şekil 4.8. Açık devre arızası altında tüm PV dizisinin simülasyon sonuçları

Şekil 4.9'deki I-V eğrisi analizi göstermektedir ki, PV dizisindeki açık devre arızasında iki MPP vardır: arıza öncesi ve arıza sonrası olmak üzere.



Şekil 4.9. Açık devre arızası altında tüm PV dizisinin simülasyon sonuçları

4.2. KD ve AD Arızalarının Deneysel Çıktıları

Deneylerde, çeşitli sayıda PV modülü ile ilgili KD ve AD arızaları, gerçek çalışma koşulları altında deney setine uygulanmıştır. Normal ve arızalı PV sistemin davranışları analiz edilmiştir.

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, 1 modülün kısa devre olduğu KD arızası, KD-1 olarak tanımlanmıştır. Arızalı dizideki arıza noktaları arasında bir modül uyumsuzluğu içerdiğinden % 10 modül uyumsuzluğuna sahiptir. Benzer şekilde, 3 modül ve 6 modülün kısa devre olduğu durumlar KD-3 arızası, KD-6 olarak tanımlanmış ve sırasıyla % 30 ve %60 uyumsuzluklara sahiptirler. Önceki simülasyon sonuçlarında öngörüldüğü gibi, arızalı PV dizisi PV inverterin çalışma koşullarını sürdürebildiği sürece, inverterin

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

MPPT'si hala çalışır durumdadır. Sonuç olarak, MPPT, PV dizi gerilimini düşürerek arızalı dizi akımını kademeli olarak artırma eğilimindedir.

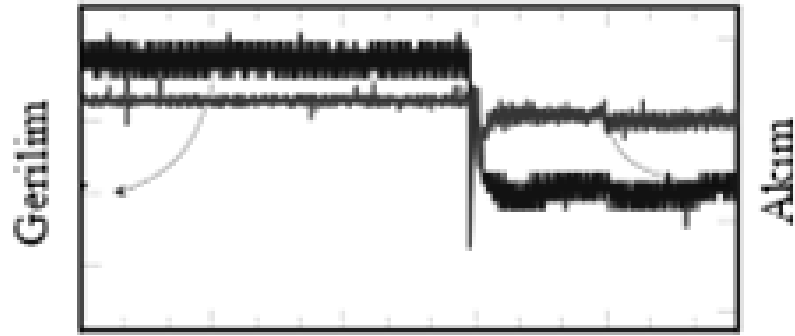
Özetle, deneysel sonuçlar önceki araştırma bulgularımızı ve simülasyon sonuçlarımızı doğrulamıştır.

- 1) KD-1 arızasında, arızalı dizi hala pozitif bir akıma sahip olduğundan, diğer normal çalışma dizilerinden ayırt edilmesi zor olacak, sigorta tarafından tespit edilemeden kalacaktır. Bu durum, PV sistemine arıza tespiti ve koruma zorluğunu getirmektedir.



Şekil 4.10. KD-1 arızasında osiloskop tarafından yakalanan geçici davranış (Gerilim=50V, Akım=20mV).

- 2) Şekil 4.11’de KD-3, KD-1 göre daha fazla modül uyumsuzluğuna sahip bir KD arızasıdır ve bu durumun arızanın sigortalar tarafından temizlenebilme olasılığını artırdığı gösterilmiştir. Örneğimizde özel olarak, 3 veya daha az modüllü KD arızaları sigortalar tarafından temizlenemeyebilir.



Şekil 4.11. KD-3 arızasında osiloskop tarafından yakalanan geçici davranış
(Gerilim=50V, Akım=20mV).

- 3) Şekil 4.12’de. KD-6 arızasında, diğer normal PV dizilerinden arızalı dizgiye doğru akan büyük bir ters akıma neden olur. Bu büyük akım, sigorta tarafından derhal temizlenmektedir.



Şekil 4.12. KD-6 arızasında osiloskop tarafından yakalanan
geçici davranış(Gerilim=50V, Akım=20mV).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Diğer deneysel sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir. PV arızaları farklı güneş ışınlama seviyelerinde meydana geldiğinden, arızalı dizinin arıza öncesi akımı değişir. Ancak, arızaya daha fazla modül dahil edildiğinde arızalı dizi akımının azaldığı sonucunu etkilemez. Ek olarak, PV dizisindeki normal diziler, arızalı diziye ters akıma katkıda bulunur.

Çizelge 4.4. Deneysel Sonuçların Özeti

Arıza tipi	Arıza öncesi	Geçiş	Arıza sonrası	AAKC ile algılanması
KD-1	4.2A	Ters akım yok	3.3A	X
KD-3	6.4A	Küçük ters akım=2.5A	3.5A	X
KD-6	5A	Büyük ters akım=-42A	0	✓

4.3. Arıza Tespit Metodunun Simülasyon Sonuçları ile Doğrulanması

Bu bölümde, PV sistemlerde önerilen arıza tespit algoritmasının çevrimiçi-gürbüz-seyrekle-düzenlenmiş (ÇGSD)-RVFL ağı arıza bulma performansının bulunması için yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Bunun yanında önerilen yöntem EKK-SVM ve EKK-RVFL yöntemleriyle de karşılaştırılmıştır. Farklı ışıma, sıcaklık, uyumsuzluk yüzdesi ve arıza empedansları için oluşturulan arıza durum senaryoları ele alınmıştır.

4.3.1. KD Arızaları

2250 farklı koşulda meydana gelen hat-hat arızalarıdır. Koşullar, farklı ışınlama seviyeleri (200, 400, 600, 800, 1000) [W/m²], farklı uyumsuzluk yüzdeleri (10, 20, 30, 40, 50, 60)%, farklı sıcaklıklar (10, 20, 30, 40, 50) [C] ve farklı arıza empedansları (0, 5, 15, 25) [Ω] olmak üzere arıza senaryolarının bir kombinasyonunu içermektedir.

4.3.2. AD Arızaları

Bu arızalar, KD arızalarına benzer koşullar altında 150 farklı senaryo için simüle edilmiştir. AD arızaları Grup1 ve Grup2 olarak iki gruba ayrılır. İlki, bir anda yalnızca bir dizinin arızalı olduğu normal çalışma koşullarına yakın AD arızalarını içerir. Öte yandan, Grup2, birden çok dizinin arızalı olduğu normal çalışma koşullarına yakın olmayan AD arızalarını içermektedir.

4.3.3. Normal Çalışma Koşulları

KD ve AD arızalarını normal çalışma koşullarından ayırmak için, PV sistemi farklı sıcaklıklar, uyumsuzluk yüzdeleri, arıza empedansı ve ışınlama koşulları altında 600 farklı normal çalışma senaryosu ile simüle edilmiştir. Eğitim veri seti, sırasıyla KD arızaları, AD arızaları ve normal çalışma koşulları için 280, 20 ve 75 senaryo içerir.

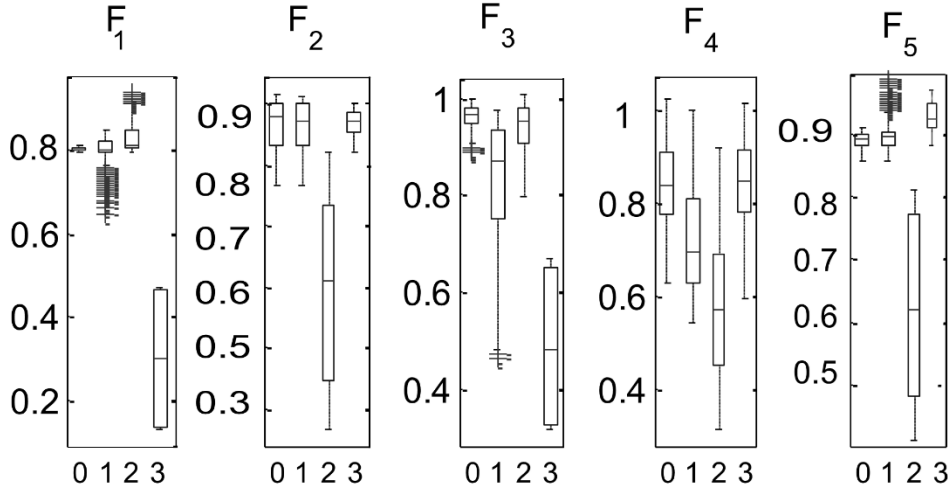
4.4. Simulasyon Sonuçları

Şekil 4.12’de gösterildiği gibi simülasyon veri örneklerinin istatistiksel dağılımı kutu grafiği şeklinde gösterilmektedir. Her veri örneğinde önceki bölümde elde edilen 5 özellik (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5) bulunur ve her özellik değişkeninin kutu grafiği ayrı olarak verilmiştir. Yatay etiket, PV dizisinin çalışma durumunu temsil eder. Bu etiketlerden:

- 0: normal çalışma durumunu,
- 1: düşük PV modül uyumsuzluğuna sahip KD çalışma durumunu,
- 2: yüksek PV modül uyumsuzluğuna sahip KD çalışma durumunu,
- 3: AD çalışma durumunu,

ifade etmektedir.

Şekil 4.11’den şunlar gözlemlenebilir. Açık devre arızasının F_1 değeri, diğer dört koşuldan açıkça daha azdır. KD arızalarında F_2 ve F_3 değerleri diğer dört koşuldan önemli ölçüde daha azdır. AD arızalarında F_5 , KD ve normal çalışma durumlarında daha yüksektir.



Şekil 4.13. Simülasyon veri örnekleri dağıtımı

Önerilen arıza tespit yönteminin performansını göstermek için, farklı uyumsuzluk yüzdesi seviyeleri, hava sıcaklıkları, ışınlama değerleri ve arıza durumları ve empedansları dahil olmak üzere çeşitli işletim ve ortam senaryoları için simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Simüle edilmiş senaryolar için ayrıntılar aşağıda detaylandırılmıştır.

Her veri seti %75 eğitim veri seti ve %25 test veri setine bölünmüştür. Ek olarak, modellerin sağlam performansını doğrulamak için eğitim veri setine yapay olarak gürültü eklenir. Her veri seti için %30 eğitim örneği rastgele seçilir ve boyutu maksimum çıktı değerinin %50'sinden küçük olan bir gürültü eklenir. Arıza tespit algoritması olarak kullanılan RVFL ağı simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın yüksek doğruluğunu göstermektedir. Tespit doğruluğu Eşitlik (4.1)'de tanımlanmıştır. Sonuçlar, KD arızaları için Çizelge 4.5'de sunulmaktadır.

$$\text{Tespit Doğruluğu} = \text{Doğru tespit} \# / \text{Toplam tespit} \# \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5. Simüle Edilmiş KD Arızaları için Simülasyon Sonuçları

	Tespit Doğruluğu (%)				
Modül Uyumsuzluk Yüzdesi(%)	Arıza Direnci (Ω)				Ortalama Tespit Doğruluğu(%)
	0	5	15	25	
60	100	100	96.7	91.5	97.1
50	100	98.9	92	90.3	95.3
40	97	95.4	76	74.2	85.7
30	92.4	88.2	70.5	74.2	77.8
20	88.8	73.7	52.2	47.3	65.5
10	74.3	53.5	46.6	40.3	53.6

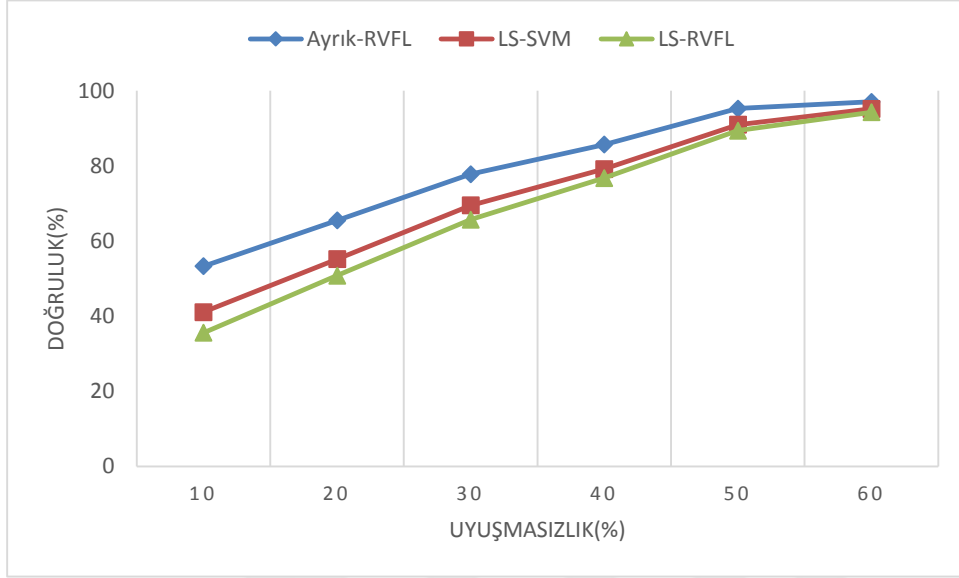
Önerilen yöntem, KD arızaları için tüm arıza empedanslarında %50 veya daha yüksek uyumsuzluk durumlarında %95'in üzerinde arıza algılama doğruluğuna sahiptir. Arıza empedansı arttıkça ve uyumsuzluk yüzdesi azaldıkça, normal çalışma koşullarına yakın oldukları için arızaları tespit etmek oldukça zordur. Örneğin, %30'dan az uyumsuzluğa ve 15'ten fazla arıza empedansına sahip KD arızaları durumunda, algoritma %55'in üzerinde bir arıza tespit doğruluğuna sahiptir. Öte yandan, algoritma, KD arızalarına ve normal çalışma koşullarına yakın olan AD arızaları (örneğin, bir dizide AD arızası) ve birden çok dizide meydana gelen AD arızaları için %100 arıza algılama doğruluğuna sahiptir. AD arıza senaryolarında arıza tespit doğruluğu değerlendirmesinin sonuçları Çizelge 4.6'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Simüle Edilmiş AD Arızaları için Simülasyon Sonuçları

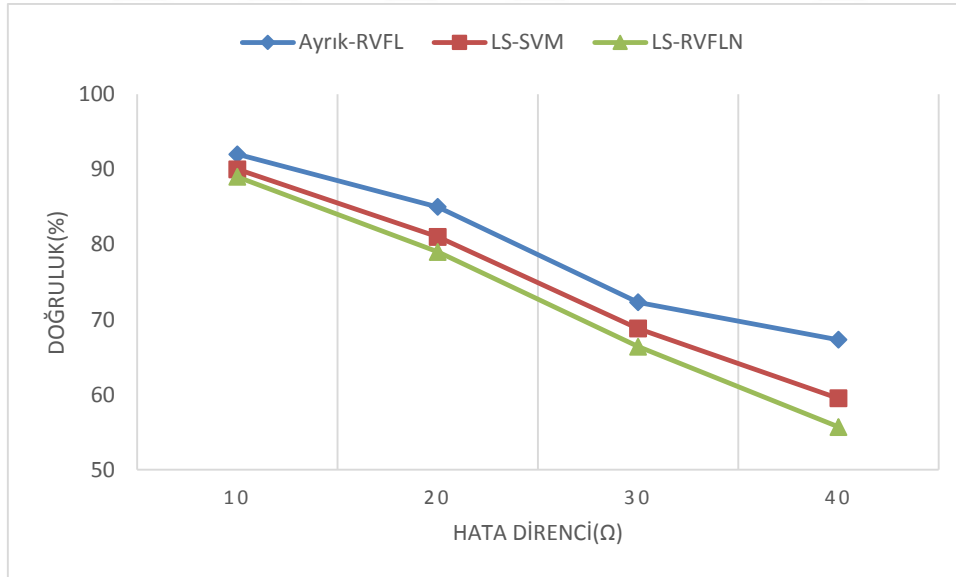
		Tespit Doğruluğu (%)					
Grup#	Sıcaklık[°C]	Işıma[W/m²]					Ortalama Tespit Doğruluğu(%)
		200	400	600	800	1000	
1	10	100	100	100	100	100	100
	20	100	100	100	100	100	100
	30	100	100	100	100	100	100
	40	100	100	100	100	100	100
	50	100	100	100	100	100	100
	60	100	100	100	100	100	100
2	10	100	100	100	100	100	100
	20	100	100	100	100	100	100
	30	100	100	100	100	100	100
	40	100	100	100	100	100	100
	50	100	100	100	100	100	100
	60	100	100	100	100	100	100

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Şekil. 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17 EKK-SVM ve EKK-RVFL ağı yöntemlerine kıyasla önerilen ÇGSD-RFVL yönteminin KD ve AD arıza algılama doğruluğunu göstermektedir.

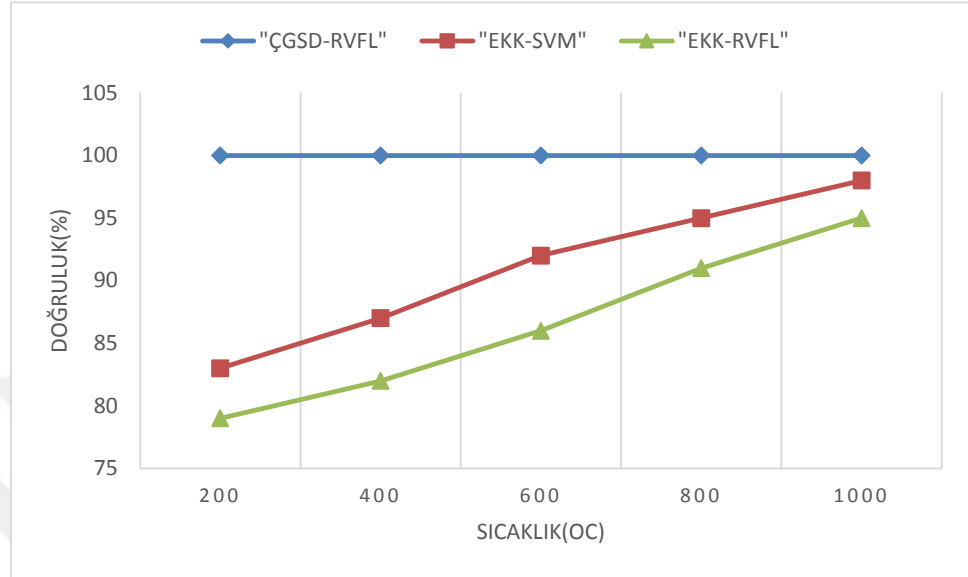


Şekil 4.14. KD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması(farklı modül uyumsuzluk yüzdesi).

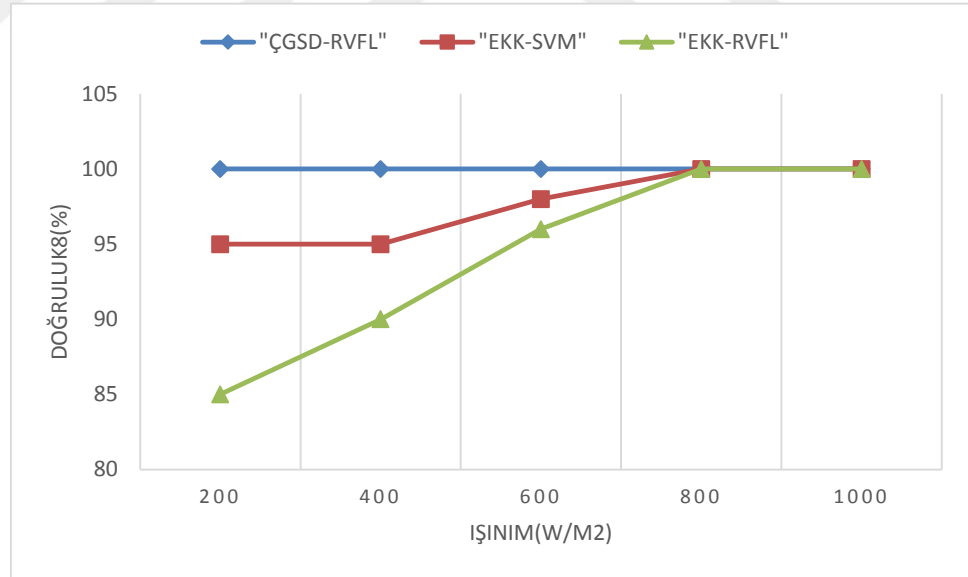


Şekil 4.15. KD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması(farklı kısa devre arıza direnci).

Sonuçlara göre, ÇGSD-RVFL ağı, RVFL ağının çıktı ağırlıklarının seyrek tahmin yöntemi ile hesaplanması sayesinde, hem KD hem de AD arızaları için daha iyi bir algılama doğruluğuna sahiptir.



Şekil 4.16. AD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı sıcaklık değerleri).



Şekil 4.17. AD arıza algılama doğruluğunun karşılaştırılması (farklı ısıma değerleri).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.4.1. Bloklama Diyotlu KD Arıza Durumları

Önerilen arıza tespit algoritmasının performansı, her dizide bir bloklama diyotu bulunan bir PV dizisindeki KD arızalarını tespit etmek için ayrıca doğrulanmıştır. PV sistemi önceki testlerle aynı parametreleri kullanır. PV dizisine, farklı ışık şiddeti kombinasyonları (300, 500, 800, 1000 ve 1200 W/m²), farklı uyumsuzluk yüzdesi (10, 20, 30, 40, 50 ve 60%) ve farklı arıza empedansı (0, 5, 15 ve 25 Ω) altında 120 ek KD arızasına ait veri alınmıştır. Çizelge 4.3'te verilen sonuçlar, önerilen algoritmanın %30'dan fazla uyumsuzluğa ve 15'ten az arıza empedansına sahip tüm KD arızalarını tespit ettiğini göstermektedir. Sonuçlar, bloklama diyotlarının kullanılması önerilen yöntemin performansını etkilemediğini kanıtlamaktadır. Önerilen yöntem, dizi bloklama diyotlarına sahip PV sistemlerinde KD arızalarını yüksek bir doğrulukla tespit edebilir. Bunun başlıca nedeni, özelliklerin (F_1 , F_2 ve F_3) dizi gerilimi ve akımının değişim hızına göre çıkarılmasıdır.

Çizelge 4.7. Bloklama Diyotlu KD Arızaları için Simülasyon Sonuçları

Arıza Tipi	Uyumsuzluk Yüzdesi[%]	Arıza direnci[Ω]			
		0	5	15	25
KD Arızaları	60	✓	✓	✓	X
	50	✓	✓	X	X
	40	✓	✓	X	X
	30	✓	X	X	X
	20	✓	X	X	X
	10	✓	X	X	X

4.4.2. Işınım veya Sıcaklık Değişikliğinden Kaynaklanan Durumlar

Işınım ve sıcaklık dalgalanmaları gibi hava koşulları, PV sistemlerinde sıklıkla meydana gelen geçici durumlardır. Bunlar aynı zamanda çalışma noktasında parazitlere neden olabileceğinden, arıza algılama yöntemleri bunlarla gerçek KD ve AD arızaları arasında ayırım yapabilmelidir. Bunu doğrulamak için önerilen yöntem aşağıdaki durumlarda daha fazla test edilmiştir:

- 1) Sıcaklık (10, 25 ve 40°C) ve ışımadaki değişim (± 200 , ± 400 , ± 600 ve ± 800 W/m²) kombinasyonlarıyla birlikte 24 ışınlım dalgalanması durumu;
- 2) Işınım (200, 400, 600, 800 ve 1000 W/m²) ve sıcaklık değişiminin (± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 ve ± 10 °C) kombinasyonlarıyla 50 sıcaklık dalgalanması durumu.

Bu değişikliklerin her geçişi 2 saniye içinde tamamlanmıştır. Tespit sonuçları, önerilen arıza tespit şemasının, yukarıda bahsedilen rahatsızlık durumlarının hiçbirine herhangi bir yanlış pozitif yanıt göstermediğini göstermektedir. Bir PV dizisinin karakteristik eğrileri ve çalışma noktası, ani bir parlaklık veya sıcaklık dalgalanmasıyla değişse de, bu değişikliklerin neden olduğu geçişler KD ve AD arızalarından farklıdır. KD ve AD arızalarından kaynaklanan etkiler ile geçici bir bozulma arasındaki farklardan biri, dizi geriliminin ve akımının değişim hızıdır.

4.4.3. Kısmi Gölgeleme Koşullarından Kaynaklanan Problemler

Kısmi gölgeleme koşulu, önerilen yöntemin karıştırabileceği başka bir zorluktur, çünkü bir PV dizisinin özellikleri ve çalışma noktası, KD arızalarına kıyasla benzer şekilde etkilenir. Sıcak noktaları önlemek için, bir PV panelinin dc bağlantı kutusuna baypas diyotları takılır. Normal durumlarda, baypas diyotları ters eğilimlidir. Bir panel gölgelendiğinde, gölgeli paneli korumak için bypass diyotları sağlıklı panellerden geçen akımı üzerinden geçirir. Önerilen algoritmanın kısmi gölgeleme koşullarında performansını doğrulamak için, dizideki gölgeli alan kombinasyonları (%5'lik artışlarla %5-50) kullanılmış ve ışınlam (200, 400, 600 ve 800 W/m²) şeklinde değiştirilmiştir. Arızasız eğitim setine, yukarıda belirtilen testlerden beş kısmi gölgeleme örneği (% 10,% 20,% 30,% 40 ve% 50 gölgeli alan ile 400 W / m² ışınlam) örnekleri eklenmiştir. Diğer 35 kısmi gölgeleme durumu, önerilen yöntemi değerlendirmek için kullanılmıştır.

Sonuçlar, önerilen yöntemin KD ve OD arızalarını kısmi gölgeleme durumundan ayırt edebildiğini göstermektedir. 35 kısmi gölgeleme durumunun hiçbirisi arızalı bir şekilde KD ve OD arızasız olarak sınıflandırılmamıştır.

4.4.4. Gürültülü Ölçümlerle KD-AD Arızaları

Önerilen yöntemin gürültülü ölçümlere karşı sağlamlığını test etmek için, numuneler eğitim veri setinden %5, %15, %25, %35 ve %45 oranlarında rastgele seçilip gürültülü veri seti oluşturulmuştur. Gürültülü ölçüm dahil, tespit doğruluğu sonuçları KD ve AD arızaları için Çizelge 4.8'te verilmiştir. Sonuçlar, diğer yöntemlerin arıza algılama doğruluğunun gürültülü ölçümlerde azaldığını ÇGSD-RVFL ağının hem KD hem de AD arızaları için kabul edilebilir bir algılama doğruluğu sağladığını göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çizelge 4.8. Gürültülü ölçüm ile KD-AD Arıza Algılama Doğruluğu

Arıza Tipi	Yöntem	Ortama Tespit Doğruluğu[%]	
		Gürültülü	Gürültüsüz
KD	ÇGSD-RVFL	77.3	79.1
	EKK-RVFL	60.4	70.2
	EKK-SVM	65.7	73.6
AD	ÇGSD-RVFL	98	100
	EKK-RVFL	83	89.1
	EKK-SVM	86.2	91.4

4.4.5. Hesaplamalı Verimlilik Karşılaştırması

Girdi ağırlıklarının rastgele atanması ve geleneksel algoritmaların gerektirdiği eğitimsiz çıktı ağırlıklarının hesaplanması, ÇGSD-RVFL ağıının verileri hızlı bir şekilde işlemlerini ve öğrenmesini sağlayarak pratik uygulamalar için önerilen yöntemle avantajlar sağlamaktadır. Önerilen yöntem ile diğer geleneksel yöntemlerin karşılaştırılması Çizelge 4.9'te sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Hesaplamalı verimliliğin karşılaştırılması

Yöntem	Eğitim süresi[saniye]	Test süresi[saniye]
ÇGSD-RVFL	0.1257	0.0045
EKK-RVFL	0.0125	0.0035
EKK-SVM	0.7264	0.9345

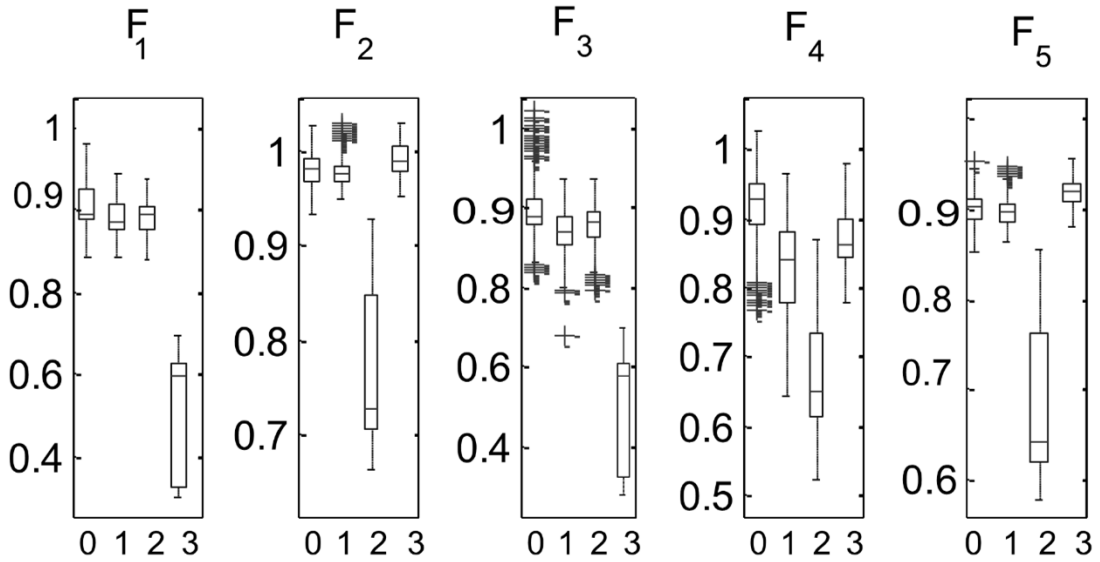
4.4.6. Önceki Çalışmalarla Karşılaştırma

Literatürde KD arızalarını tespit etme yöntemi, PV modül uyumsuzluğu, arıza empedansı, ışık şiddeti ve arızaların karakteristiğini etkileyen sıcaklık gibi parametrelerden sadece birini değişken olarak kabul ederken diğerleri sabit tutulurken, bu çalışmada uyumsuzluk yüzdesi (10, 20, 30, 40, 50, 60%), arıza empedansı (0, 5, 15, 25Ω), ısıma (200, 400, 600, 800, 1000W/m²), sıcaklık (10, 20, 30, 40, 50°C) değişken olarak kabul edilmektedir. Örneğin, (Zhao ve ark. 2014, Zhao ve ark. 2012) 'te sadece uyumsuzluk yüzdesi (%20 ve %50) ve arıza empedansı (0 ve 20 Ω) değerleri hesaba katılırken, ısıtım (1000W/m²) ve sıcaklık (25°C) sabittir. (Zhao ve ark. 2014, Zhao ve ark. 2012) ile karşılaştırıldığında bu çalışma, %20 uyumsuzluk yüzdesi ve 20 Ω arıza empedansı olan tespit edilmesi zor KD arızaları için daha yüksek bir algılama doğruluğu sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada literatürdeki değişken uyumsuzluk yüzdesi, arıza empedansı, ısıtım ve sıcaklık değerlerini dikkate alan KD arıza tespit çalışmalarından farklı olarak AD arızaları da dikkate alınmıştır. Özellikle normal çalışmaya yakın olan

bazı AD arızalarını ve %10 uyumsuzluk yüzdesi ve 25Ω arıza empedansı olan KD arızalarını tespit etmek zordur. Bu çalışma KD arızalarını dikkate almış olmasına rağmen, (Yi ve Etemadi 2016, Yi ve Etemadi 2017) ile karşılaştırıldığında düşük uyumsuzluk (% 10) ve yüksek arıza empedansı (25Ω) durumunda daha yüksek bir arıza algılama doğruluğuna sahiptir.

4.5. Yöntemin Deneysel Olarak Doğrulanması

Simülasyon veri örneklerine benzer şekilde, deneysel veri örneklerinin istatistiksel dağılımı da Şekil 4.18’de gösterildiği gibi kutu grafiği şeklinde gösterilmektedir. Şekil 4.18’den simülasyon ve deneysel veri örneklerinin statik olarak dağılımının çok yakın olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca deneysel veri örneklerinin beş özellik değişkeninin sınıflandırma üzerindeki etkisinin simülasyon veri örneklerindekiyle tamamen aynı olduğu açıktır. Bu sonuç aynı zamanda PSCAD PV modelinin doğruluğunu da doğrulamaktadır.



Şekil 4.18. Deneysel veri örnekleri dağıtımı

Farklı sıcaklıklar, ışınlamalar, arıza empedansları (0, 5, 15, 25Ω) ve uyumsuzluk yüzdesi (10, 30, 60 %) dahil olmak üzere toplam 240 farklı durum için KD arızalarının deneysel sonuçları alınmıştır. Öte yandan AD arızaları için 60 farklı durum deneysel

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

olarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11, sırasıyla KD ve AD arızalarının tespit doğruluğunu göstermektedir.

Çizelge 4.10. KD Arızaları için DeneySEL Sonuçlar

	Tespit Doğruluğu				Ortalama Tespit Doğruluğu[%]
Uyumsuzluk Yüzdesi[%]	Arıza Direnci[Ω]				
	0	5	15	25	
60	20/20	20/20	19/20	18/20	96.5
30	18/20	17/20	14/20	12/20	77.5
10	14/20	10/20	9/20	8/20	51.3

Elde edilen sonuçlara göre, algoritma, tüm arıza empedansları için %30 uyumsuzlukla 20 KD arızadan en az 12'sini ve %30'dan fazla uyumsuzluğun olduğu durumlarda 20 KD arızasından en az 18'ini tespit edebilmektedir. Öte yandan Grup1 için normal çalışma koşullarına yakın AD arızalarında 30 arızadan 30'unu, Grup2 AD arızalarında 30 arızadan 30'unu tespit etmektedir.

Çizelge 4.11. AD Arızaları için DeneySEL Sonuçlar

Grup	Sıcaklık[°C]	Işıma[W/m ²]			Ortalama Tespit Doğruluğu[%]
		200-300	300-400	500-600	
1	30-45	10/10	10/10	10/10	100
2	30-45	10/10	10/10	10/10	100

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bazı PV dizi arızaları, düşük ışıyım koşulları ve aktif MPPT nedeniyle küçük bir arıza akımına sahiptirler, bu nedenle aşırı akım koruma cihazları tarafından tespit edilemeyebilirler. Bu tür arızalar PV sistemde gizli kalabilir ve bu da potansiyel tehlikelere (performans düşüşü, yangın tehlikesi vb.) yol açabilir. Bu koşullar altında KD ve AD arızalarını tanımlamak için ilk kez yeni bir ÇGSD-RVFL ağı yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemle PV dizisinin güvenliğini ve güvenilirliğini artırmak amaçlanmaktadır. ÇGSD-RVFL ağını uygulamak için, boyut alanını düşürmek ve düşük uyumsuzluk, yüksek empedans ve aktif MPPT gibi tespit edilmesi zor arıza koşullarında arıza algılama doğruluğunu iyileştirmek için KKA yardımıyla yeni özellikler oluşturmuştur. Ayrıca, RVFL ağının çıktı ağırlıklarını hesaplamak, ölçüm gürültüsünün ve aşırı uyumun algılama doğruluğu üzerindeki etkisini en aza indirmek için seyrek düzenleme kullanılmıştır. Ayrıca, PV dizileri, gerçek zamanlı uygulamalarda farklı evirici türleri ve topolojilerine sahiptir, önerilen yöntem, yöntemde kullanılan ölçümler (akım, gerilim ve ışıyım) nedeniyle evirici türü ve topolojisine bakılmaksızın herhangi bir PV dizisine kolayca uygulanabilir. Önerilen yöntem tüm evirici tipleri için mevcut ölçümleri kullandığı için ek donanım kurulumu gerektirmez.

Önerilen yöntemin performansı hem simülasyon hem de deneysel olarak doğrulanmıştır. Normal çalışma koşullarına yakın düşük uyumsuzluk ve yüksek empedans arızası içeren KD arıza senaryolarında önerilen yöntem, %30'dan düşük uyumsuzluk ve tüm arıza empedansları için minimum %77,5 arıza tespit doğruluğu sağlarken, tüm AD arıza senaryolarında %100 arıza tespiti sağlamaktadır. Önerilen ÇGSD-RVFL ağı yöntemi de geleneksel RVFL ve EKK-SVM ile karşılaştırılmıştır. Özellikle gürültülü ölçümlerde, ÇGSD-RVFL ağı performansını düşürmezken EKK-SVM ve RVFL'nin arıza tespit doğruluğu düşmektedir. Ayrıca, ÇGSD-RVFL ağı, geleneksel RVFL ve EKK-SVM'den daha yüksek bir hesaplama verimliliğine sahiptir.

Bu tezde elde edilen tespitler, sonuçları ve önemli araştırma katkıları aşağıda sunulmuştur:

- Arıza tespiti, sınıflandırma ve konum çözümleri ile ilgili literatür incelemesi sonucunda çözümler, model tabanlı çözümler, süreç geçmişi tabanlı çözümler ve

sinyal işleme tabanlı çözümler gibi üç kategoride sunulmuştur. Bu yöntemlerin avantajları ve sınırlamaları karşılaştırılıp ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

- Bu çözümler arasında, TATK ve AAKC koruma elemanları ABD PV standartlarının gerektirmesi nedeniyle ABD PV pazarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, TATK ve AAKC'deki koruma boşlukları, belirli koşullar altında mevcut olabilir ve bu da literatürde rapor edilen tehlikelere yol açabilir. TATK koruma elemanı ile korunan sistemlerin, PV dizilerinde çift toprak arızasına karşı savunmasız olabileceği gösterilmiş ve bunun da ABD'de daha önce rapor edilen tehlikelere yol açtığı rapor edilmiştir. Özellikle, negatif iletken ile toprak arasında ilk toprak arızası meydana geldiğinde, TATK toprak arıza akımı nispeten düşük olduğu için arızayı tespit edebilir veya temizleyebilir. Bundan sonra, ikinci toprak arızası topraklanmamış akım taşıyan iletken (yani pozitif iletken) ile toprak arasında meydana gelirse, bu arıza yüksek büyüklükte bir toprak arıza akımı oluşturulacak ve muhtemelen TATK'yi (örneğin sigortalar) patlatacaktır.
- AAKC'nin eksiklikleri bu tezde tartışılmıştır. Özellikle standartlara göre AAKC, PV modüllerinin maksimum akım değerine göre belirlenmektedir. Bununla birlikte, güneş PV dizileri akımla sınırlı güç kaynakları olduğundan ve çıkış özellikleri büyük ölçüde güneş ışınlam seviyesine ve arıza yerlerine bağlı olduğundan, arıza akımı AAKC'nin değerinin altına düşebilir. Bu nedenle, arızalar temizlenmeden PV sisteminde kalabilir ve sistem verimliliği, güvenilirliği ve güvenliği açısından bir sorun haline gelebilir. Bu nedenle, bu sorunları çözmek için acil bir arıza tespit çözümlerine ihtiyaç vardır.
- Simülasyon sonuçlarını kanıtlamak için, 240W nominal çıkış gücüne sahip deneysel bir şebekeye bağlı PV sisteminde KD ve AD arıza deneyleri analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, simülasyon sonuçlarını doğrulamakta ve küçük uyumsuzluğa sahip KD arızalarının geleneksel çözümlerle (yani AAKC) başarıyla tespit edilemeyeceği veya temizlenemeyeceğini göstermiştir. Bu nedenle, tüm sistem arızalanana kadar, KD arızası PV sisteminde kesintisiz kalabilir. Öte yandan, deneysel sonuçlar, KD arızasının büyük modül uyumsuzluğu içermesi durumunda, AAKC'nin arızayı temizleme şansının daha yüksek olduğunu da göstermektedir.

- Literatürde incelenmiş ve tespit edilmesi zor olan (yüksek kısa devre direnci ve düşük modül uyumsuzluğu) arızalarda tespit doğruluk oranı %20-%30 iken, bu tezde önerilen yöntem ile bu oran %50'nin üzerine çıkartılmıştır.
- Önerilen yöntemde, ayar yapılmadan rastgele gizli katman parametrelerini atama avantajına sahip RVFL ağlarına dayandığı için, geleneksel makine öğrenme yöntemlerine kıyasla tespit doğruluğunu artırırken, eğitim süresini ciddi oranda azaltmaktadır.
- Bu tezde önerilen yöntem, RVFL ağının ağırlıkları, ayrık-düzenlenmiş, şekilde hesaplandığı için bu durum yalnızca arıza tespit doğruluğunu arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda aşırı uydurma, ölçüm gürültüsü ve geleneksel yöntemlerde eksik olan sensör ve ölçüm hatalarından kaynaklanan aykırı örneklerle karşı sağlamlığını da artırmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar, arızanın aktif, duyarlı ve güvenli bir şekilde nasıl temizleneceği gibi yeni aktif arıza koruma çözümleri üzerine yoğunlaşabilir. Önerilen yöntemlerden üretilen açma sinyaline bağlı olarak, aktif arıza koruma çözümü, sistem verimliliğini, güvenilirliğini, güvenliğini ve arızaya karşı toleransı artırmak için kullanılabilir. Bu nedenle, aktif arıza koruma yaklaşımlarının önerilen yöntemlerle entegrasyonu, gelecekte güzel bir araştırma konusu olacaktır.

PV penetrasyon seviyesi daha yaygın hale geldikçe, PV eviricilerin yalnızca güç dönüşümlerinde ve maksimum güç noktası izlemede değil, aynı zamanda hata algılama ve korumada da giderek daha fazla sorumluluk almaları gerekecektir. PV sistemindeki en akıllı bileşen olarak, PV eviricileri daha fazla güvenlik özelliği sağlama potansiyeline sahiptir. Örneğin, yeni PV eviricileri, toprak arızası algılama, DA ark arızası algılama, topraklamasız PV dizilerinde yalıtım algılama ve artık akım algılama gibi birkaç farklı arıza algılama çözümü ile donatılması için araştırmaların yoğunlaşması da gelecek çalışmalar arasında gösterilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abete, A., Barbisio, E., Cane, F., & Demartini, P., 1990. Analysis of photovoltaic modules with protection diodes in presence of mismatching. In IEEE Conference on Photovoltaic Specialists (pp. 1005-1010). IEEE.
- Alam, M. K., Khan, F., Johnson, J., & Flicker, J., 2013. PV ground-fault detection using spread spectrum time domain reflectometry (SSTD). IEEE energy conversion congress and exposition (pp. 1015-102). IEEE.
- Alam, M. K., Khan, F., Johnson, J., & Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: types, detection, and mitigation techniques. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 5(3), 982-997.
- Ancuta, F., & Cepisca, C., 2011. Failure analysis capabilities for PV systems. Recent Res. Energy, Environ. Entrep. Innov, 109-115.
- Ball, G., Brooks, B., Flicker, J., Johnson, J., Rosenthal, A., Wiles, J. C., & Sherwood, L., 2013. Inverter ground-fault detection ‘blind spot’ and mitigation methods. Solar American Board for Codes and Standards.
- Blackburn, J. L., & Domin, T. J., 2015. Protective relaying: principles and applications. CRC press.
- Bower, W., & Deblasio, R., 1999. Code requirements and standards for installations of photovoltaic systems in the US. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 7(3), 155-164.
- Brooks, B., 2011. The bakersfield fire: a lesson in ground-fault protection. SolarPro Mag, 62.
- Cox, D. D., 1999. Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion. Journal of the American Statistical Association, 94(448), 1388-1388.
- Dai, W., Chen, Q., Chu, F., Ma, X., & Chai, T., 2017. Robust regularized random vector functional link network and its industrial application. **IEEE Access**, 5, 16162-16172.
- Energy, D., 2011. Commercial Rooftop PV Fires Webinar—NC PV DG Program SEPA Presentation. Solar ABCs.
- Firth, S. K., Lomas, K. J., & Rees, S. J. (2010). A simple model of PV system performance and its use in fault detection. **Solar energy**, 84(4), 624-635.

- Flicker, J., & Johnson, J., 2013. Analysis of fuses for blind spot ground fault detection in photovoltaic power systems. Sandia National Laboratories Report.
- Fuses—Part, L. V., 2010. 6: Supplementary Requirements for Fuse-Links for the Protection of Solar Photovoltaic Energy Systems.
- Gow, J. A., & Manning, C. D. , 1999. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 146(2), 193-200.
- IEA, PVPS snapshot of global PV markets, 2019.
- H. Kiliç, B. Khaki, B. Gümüş, M. Yilmaz and P. Palensky, 2020. Fault Detection in Photovoltaic Arrays via Sparse Representation Classifier, *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Delft, Netherlands, pp. 1015-1021, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152421.
- Hansen, P. C., 1998. Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Harb, S., & Balog, R. S., 2012. Reliability of candidate photovoltaic module-integrated-inverter (PV-MII) topologies—A usage model approach. **IEEE transactions on power electronics**, 28(6), 3019-3027.
- Hernday, P., 2012. Field applications of IV curve tracers in the solar PV industry. In *Proceedings of IEEE Silicon Valley Photovoltaics Society (SVPVS) Meeting*, Santa Clara, CA, USA (Vol. 14).
- Hoerl, A. E., & Kennard, R. W., 1970. Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. **Technometrics**, 12(1), 55-67.
- Hu, B., 2012. Solar panel anomaly detection and classification (Master's thesis, University of Waterloo).
- Huynh, H. T., & Won, Y., 2011. Regularized online sequential learning algorithm for single-hidden layer feedforward neural networks. **Pattern Recognition Letters**, 32(14), 1930-1935.
- Jackson, P., 2009. Target roof PV fire of 4-5-09. City of Bakersfield, California.
- Jiang, J. A., Chuang, C. L., Wang, Y. C., Hung, C. H., Wang, J. Y., Lee, C. H., & Hsiao, Y. T. (2011). A hybrid framework for fault detection, classification, and location—part II: implementation and test results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 26(3), 1999-2008.

- Karatepe, E., & Hiyama, T. , 2011. Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of photovoltaic array. 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (pp. 1-6). IEEE.
- Katuwal, R., Suganthan, P. N., & Zhang, L., 2018. An ensemble of decision trees with random vector functional link networks for multi-class classification. **Applied Soft Computing**, 70, 1146-1153.
- Kilic, H., Gumus, B., & Yilmaz, M., 2020. Fault detection in photovoltaic arrays: a robust regularized machine learning approach. **DYNA-Ingeniería e Industria**, 95(6).
- Kunz, G., & Wagner, A., 2004. Internal series resistance determined of only one IV-curve under illumination. In 19th Photovoltaic Solar Energy Conference Paris.
- Ladd, C., Taylor, J., Whitley, J. R., Cowperthwaite, C., & Leegard, R., 2011. Improving the safety and reliability of commercial solar electric systems. A Technical Paper by Southern Energy Management, 1-12.
- Luebke, C. J., Hastings, J. K., Pahl, B., Zuercher, J. C., & Yanniello, R., 2011. U.S. Patent Application No. 12/582,367.
- Miwa, M., Yamanaka, S., Kawamura, H., Ohno, H., & Kawamura, H., 2006. Diagnosis of a power output lowering of PV array with a $(-dI/dV)$ -V characteristic. In 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference (Vol. 2, pp. 2442-2445). IEEE.
- Moravej, Z., Pazoki, M., & Khederzadeh, M. (2014). New pattern-recognition method for fault analysis in transmission line with UPFC. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 30(3), 1231-1242.
- Muñoz, J., Lorenzo, E., Martínez-Moreno, F., Marroyo, L., & García, M., 2008. An investigation into hot-spots in two large grid-connected PV plants. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 16(8), 693-701.
- Nguyen, D. D., Lehman, B., & Kamarthi, S., 2009. Performance evaluation of solar photovoltaic arrays including shadow effects using neural network. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 3357-3362). IEEE.
- Pao, Y. H., & Takefuji, Y., 1992. Functional-link net computing: theory, system architecture, and functionalities. *Computer*, 25(5), 76-79.
- Pavan, A. M., Mellit, A., De Pieri, D., & Kalogirou, S. A., 2013. A comparison between BNN and regression polynomial methods for the evaluation of the effect of soiling in large scale photovoltaic plants. **Applied energy**, 108, 392-401.

- Pillai, D. S., & Natarajan, R., 2019. A Compatibility Analysis on NEC, IEC, and UL Standards for Protection Against Line–Line and Line–Ground Faults in PV Arrays. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 9(3), 864-871.
- Riley, D., & Johnson, J., 2012. Photovoltaic prognostics and health management using learning algorithms. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 001535-001539). IEEE.
- Sahani, M., & Dash, P. K., 2019. FPGA-based online power quality disturbances monitoring using reduced-sample HHT and class-specific weighted RVFLN. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 15(8), 4614-4623.
- Schirone, L., Califano, F. P., Moschella, U., & Rocca, U., 1994. Fault finding in a 1 MW photovoltaic plant by reflectometry. In Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC) (Vol. 1, pp. 846-849). IEEE.
- Sera, D., Teodorescu, R., & Rodriguez, P., 2008. Photovoltaic module diagnostics by series resistance monitoring and temperature and rated power estimation. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 2195-2199.
- Shen, C., Sun, M., Tang, M., & Priebe, C. E., 2014. Generalized canonical correlation analysis for classification. *Journal of Multivariate Analysis*, 130, 310-322.
- Smith, P., Furse, C., & Gunther, J., 2005. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location. **IEEE sensors journal**, 5(6), 1469-1478.
- Spooner, E. D., & Wilmot, N., 2008. Safety issues, arcing and fusing in PV arrays.
- Standard, U., 2010. Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources.
- Stellbogen, D., 1993. Use of PV circuit simulation for fault detection in PV array fields. In Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1993 (Cat. No. 93CH3283-9) (pp. 1302-1307). IEEE.
- Takashima, T., Yamaguchi, J., Otani, K., Kato, K., & Ishida, M., 2006. Experimental studies of failure detection methods in PV module strings. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference (Vol. 2, pp. 2227-2230). IEEE.
- Takashima, T., Yamaguchi, J., Otani, K., Oozeki, T., Kato, K., & Ishida, M., 2009. Experimental studies of fault location in PV module strings. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 93(6-7), 1079-1082.

- Thomas, P., 2002. Fault detection and diagnosis in engineering systems-Janos J. Gertler; Marcel Dekker Inc., New York, 1998, ISBN 0-8247-9427-3. Control Engineering Practice, 9(10), 1037-1038.
- Vergura, S., Acciani, G., Amoroso, V., Patrono, G. E., & Vacca, F., 2008. Descriptive and inferential statistics for supervising and monitoring the operation of PV plants. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 56(11), 4456-4464
- Verhoeven, B., 1998. Utility aspects of grid connected photovoltaic power systems. International Energy Agency.
- Wiles, J. C., 2012. Photovoltaic system grounding. Solar America Board for Codes and Standards Report.
- Wiles, J., 2008. Ground-fault protection is expanding. Home Power.
- Yi, Z., & Etemadi, A. H., 2016. Fault detection for photovoltaic systems based on multi-resolution signal decomposition and fuzzy inference systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 8(3), 1274-1283.
- Yi, Z., & Etemadi, A. H., 2017. Line-to-line fault detection for photovoltaic arrays based on multiresolution signal decomposition and two-stage support vector machine. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 64(11), 8546-8556.
- Yuventi, J., 2013. DC electric arc-flash hazard-risk evaluations for photovoltaic systems. **IEEE transactions on power delivery**, 29(1), 161-167.
- Zhao, Y., 2010. Fault analysis in solar photovoltaic arrays. Master tezi, Northeastern Üniversitesi, Boston, Massachusetts.136.
- Zhao, Y., 2015. Fault Detection, Classification and Protection in Solar Photovoltaic Arrays. Doktora tezi, Northeastern Üniversitesi, Boston, Massachusetts.173.
- Zhao, Y., Ball, R., Mosesian, J., de Palma, J. F., & Lehman, B., 2014. Graph-based semi-supervised learning for fault detection and classification in solar photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30(5), 2848-2858.
- Zhao, Y., De Palma, J. F., Mosesian, J., Lyons, R., & Lehman, B., 2012. Line-line fault analysis and protection challenges in solar photovoltaic arrays. **IEEE transactions on Industrial Electronics**, 60(9), 3784-3795.

Zhao, Y., Yang, L., Lehman, B., de Palma, J. F., Mosesian, J., & Lyons, R., 2012. Decision tree-based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays. Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 93-99). IEEE.

Zhou, P., Lv, Y., Wang, H., & Chai, T., 2017. Data-driven robust RVFLNs modeling of a blast furnace iron-making process using Cauchy distribution weighted M-estimation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 64(9), 7141-7151.

Ziar, H., Farhangi, S., & Asaei, B., 2014. Modification to wiring and protection standards of photovoltaic systems. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 4(6), 1603-1609.

Zuobin, W., Kezhi, M., & Ng, G. W., 2018. Feature regrouping for cca-based feature fusion and extraction through normalized cut. 21st International Conference on Information Fusion (FUSION) (pp. 2275-2282). IEEE.