



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GÜNEŞ PİLİ KAYNAKLI HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMİ İÇİN
YAPAY SİNİR AĞLARI DENETİMLİ DA-DA ÇEVİRİCİ
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ercan AKIN

**Danışman
Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN**

**RİZE
2025**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN danışmanlığında, Ercan AKIN tarafından hazırlanan *Güneş Pili Kaynaklı Hidrojen Üretim Sistemi için Yapay Sinir Ağları Denetimli DA-DA Çevirici Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi* adlı bu tez çalışması, 16/07/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ	
Üye	: Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Yasin KARAN	

ETİK BEYAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Güneş Pili Kaynaklı Hidrojen Üretim Sistemi için Yapay Sinir Ağları Denetimli DA-DA Çevirici Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

16/07/2025

Ercan AKIN

ÖN SÖZ

Tez çalışmam süresince yalnızca akademik bilgisiyle değil, aynı zamanda rehberliği, yönlendirmeleri, sabrı ve kendi girişimleri ile oluşturduğu güç elektroniği laboratuvarının kullanımımıza sunulması ile bu çalışmanın her aşamasında büyük emekleri ve katkıları olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN'e, ders döneminde bilgileriyle ve kariyerleriyle bize örnek teşkil eden bütün saygıdeğer hocalarıma, eğitim sürecinde bana destek olan çalışma arkadaşlarıma ve son olarak eğitimim süresince bana sürekli destek veren, her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim. Onların anlayışı, sabrı ve bana duydukları güven, bu süreçteki en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Onların fedakârlıkları ve cesaretleri olmadan, bu çalışmanın tamamlanması mümkün olamazdı.

Ercan AKIN

RİZE / 2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR TARAMASI	6
2. FOTOVOLTAİK KAYNAKLI HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMİ.....	20
2.1. Güneş Enerjisi	20
2.2. Fotovoltaik (PV) Sistemler	23
2.2.1. Fotovoltaik Panel Yapısı ve Çalışma Prensibi	24
2.2.2. Fotovoltaik Panellerin Elektriksel ve Matematiksel Modeli.....	25
2.2.3. Fotovoltaik Panelleri Etkileyen Çevresel Faktörler	27
2.3. MPPT Sistemi ve Algoritmaları	28
2.3.1. Tepe Tırmanışı Algoritması.....	29
2.3.2. Değiştir ve Gözlemle Algoritması.....	30
2.3.3. Artırımlı İletkenlik Algoritması	31
2.3.4. Sabit Gerilim Algoritması	32
2.3.5. Kesirli Açık Devre Gerilim Algoritması	33
2.3.6. Yapay Sinir Ağları Algoritması	34
2.3.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritması	36
2.3.8. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması	37
2.3.9. Kayan Kipli Kontrol Algoritması.....	38
2.3.10. Ekstremum Arama Kontrol Algoritması	39
2.4. DA-DA Dönüştürücüler	40
2.4.1. DA-DA Düşüren Dönüştürücü ve Çalışma Prensibi.....	42
2.4.2. DA-DA Düşüren Dönüştürücünün Küçük İşaret Analizi.....	46
2.5. Elektroliz Sistemi	57

2.5.1. Elektroliz Olayı	59
2.5.2. Aşırı Gerilim	59
2.5.3. Ayrışma Gerilimi	60
2.5.4. Anot ve Katot Uçları	62
2.5.5. Ayırıcılar	63
2.5.6. Hidrojen Enerjisi	63
3. BENZETİM VE ANALİZLER	65
3.1. Veri Toplama ve Eğitim Süreci	65
3.2. YSA Kontrol Modeli ve DA-DA Düşüren Dönüştürücü Benzetimi	68
4. SİSTEM TASARIMI VE KONTROL YÖNTEMLERİ	71
4.1. PV Panel Analizi	72
4.2. Yapay Sinir Ağları MPPT Sistemi Tasarımı	81
4.3. DA-DA Dönüştürücü Tasarımı	84
4.3.1. MOSFET ve Sürücü Devresinin Tasarımı	86
4.3.2. Bobin Tasarımı	89
4.3.3. Kondansatör Hesabı ve İşlevi	95
4.4. Elektroliz Sisteminin Tasarımı	96
5. DENEYSEL BULGULAR	99
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	105
KAYNAKÇA	106
EKLER	115

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN

Hazırlayan : Ercan AKIN

Yıl : 2025

Sayfa Sayısı : 115

ÖZET

GÜNEŞ PİLİ KAYNAKLI HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMİ İÇİN YAPAY SİNİR AĞLARI DENETİMLİ DA-DA ÇEVİRİCİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemi kullanılarak alternatif bir enerji kaynağı olan hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin tasarım ve kontrolü için yapay sinir ağları (YSA) destekli DA-DA düşüren dönüştürücü ve elektroliz sistemi kullanılmıştır. YSA destekli DA-DA düşüren dönüştürücü istenilen çıkış gerilimini elde etmek için tasarlanmıştır. Elektroliz sistemi ise hidrojen gazı elde etmek için tasarlanmış ve uygulaması yapılmıştır.

Fotovoltaik (PV) panel olarak 545 W'lık model kullanılmıştır. Panel maksimum gerilimi 41,80 Volt ve maksimum güç akımı 13,93 amperdir. PV panel kontrol sistemi, panelden anlık olarak ölçülen panel gerilimi ve panel akımına karşılık gelen güç ve doluluk oranı değerlerinin, Espressif ESP32 S3 işlemcisi kullanılarak, yapay sinir ağları algoritması ile eğitilerek anlık olarak istenilen PWM sinyali üretmekte ve DA-DA düşüren dönüştürücü sisteminin sürülmesini sağlamaktadır. DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış değerleri 156 W sistem için teorik olarak 6,25 V ve 25 A olarak düşünülmüştür. Bu değerlerin seçilmesinin nedeni elektroliz sisteminin yüksek akım ve düşük gerilim değerlerinde verimli çalışmasıdır. Son olarak da elektroliz sistemi düşük iç direnç değerlerinde olması için paslanmaz çelik plaka ve Potasyum Hidroksit (KOH) çözeltisinden oluşturulmuş ve hidrojen gazı üretilmesi amaçlanmıştır.

Bahsedilen devre öncelikle MATLAB/Simulink, LTspice ve Arduino IDE uygulamalarında test edilmiştir. Daha sonra sistem tasarımı ve gerçekleştirilmesi fiziki ortamda denenmiştir. Sonuç olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi sistemi kullanılarak çevresel değişimlere karşı yapay sinir ağları ile bütünleşik bir şekilde çalışan DA-DA düşüren dönüştürücü ve hidrojen üretimi gerçekleştirilmesi için proton değişim membranlı (PEM) elektroliz sistemi tasarımı yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Güneş Enerjisi, MPPT, Yapay Sinir Ağları, DA-DA Düşüren Dönüştürücü, Elektroliz

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Electrical and Electronics Engineering
Thesis Type : Master Thesis
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN
Author : Ercan AKIN
Year : 2025
Pages : 115

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK CONTROLLED DC-DC CONVERTER FOR SOLAR CELL-BASED HYDROGEN PRODUCTION SYSTEM

In this study, hydrogen production, an alternative energy source, was achieved using a solar energy system. An artificial neural network (ANN) assisted DC-DC buck converter and electrolysis system were used for the design and control of this system. The ANN assisted DC-DC buck converter was designed to achieve the desired output voltage. The electrolysis system was designed and implemented to produce hydrogen gas.

A 545 W model was used as the photovoltaic (PV) panel. The maximum panel voltage was 41.80 volts, and the maximum power current was 13.93 amps. The PV panel control system uses the Espressif ESP32 S3 processor, trained with an artificial neural network algorithm, to instantly generate the desired PWM signal and drive the DC-DC buck converter system. The theoretical DC-DC buck converter output values for a 156 W system are 6.25 V and 25 A. These values were chosen to ensure the electrolysis system operates efficiently at high current and low voltage. Finally, the electrolysis system was constructed from stainless steel plates and a potassium hydroxide (KOH) solution to maintain low internal resistance, aiming to produce hydrogen gas.

The circuit was first tested in MATLAB/Simulink, LTspice, and the Arduino IDE. The system design and implementation were then tested in a physical environment. Consequently, a DC-DC buck converter integrated with artificial neural networks to respond to environmental changes using renewable energy sources, including solar energy, and a proton exchange membrane (PEM) electrolysis system for hydrogen production were designed and the results were obtained.

Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, MPPT, Artificial Neural Networks, DC-DC Buck Converter, Electrolysis

KISALTMALAR

AEM	:	Anyon Değişim Membran Elektrolizi
AI	:	Yapay Zekâ
D	:	Doluluk Oranı
DA	:	Doğru Akım
DL	:	Derin Öğrenme
FLC	:	Bulanık Mantık Kontrol
HC	:	Tepe Tırmanış
HO	:	Yüksek Taraf Kapı Sürücü Çıkışı
I	:	Akım
Ir	:	Işınım
INC	:	Artırımlı İletkenlik
LO	:	Alçak Taraf Kapı Sürücü Çıkışı
MPPT	:	Maksimum Güç Noktası İzleme
P	:	Güç
PEC	:	Foto Elektro Kimyasal
PEM	:	Polimer Elektrolit Membran
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PV	:	Fotovoltaik
PWM	:	Darbe Genlik Modülasyonu
P&Q	:	Değiştir ve Gözle
SA	:	Sabit Akım
SEOC	:	Katı Oksit Elektroliz
SM	:	Kayan Mod
T	:	Sıcaklık
V	:	Gerilim
YSA	:	Yapay Sinir Ağı

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. Literatür taraması özeti	17
Tablo 2. DA-DA dönüştürücü çeşitleri.....	41
Tablo 3. DA-DA düşüren dönüştürücü devre formülleri.....	44
Tablo 4. Elektroliz sistemlerinin karşılaştırılması.....	57
Tablo 5. Hidrojen üretim sistemlerinin karşılaştırılması.....	64
Tablo 6. Benzetimde anlık toplanan veriler	66
Tablo 7. SIRIUS marka güneş paneli etiket bilgileri	73
Tablo 8. 830 W/m ² ışınım değeri ve ortalama 34 °C sıcaklıkta ki panel gerilim ve panel akım değerleri	77
Tablo 9. Farklı ışınım değerlerine göre ölçülen panel gerilim ve akım değerleri	79
Tablo 10. Farklı ışınım değerlerine göre ölçülen panel gerilim ve güç değerleri	79
Tablo 11. IRFP064N kodlu MOSFET'in özellikleri	88
Tablo 12. DA-DA düşüren dönüştürücü sisteminde kullanılacak değerler	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri örnek resmi	1
Şekil 2. Türkiye geneli potansiyel güneş radyasyonu haritası.....	2
Şekil 3. Hidrojen enerjisi üretim ve kullanım sistemi	3
Şekil 4. PV panel ve YSA algoritması denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü kullanılarak oluşturulan sistem tasarımı	5
Şekil 5. 31 Mayıs 2025 tarihi itibariyle kaynaklara göre enerji santral adetleri.....	21
Şekil 6. 31 Mayıs 2025 tarihi itibariyle kaynaklara göre kurulu güç değerleri	21
Şekil 7. 31 Mayıs 2025 tarihi itibari ile yenilenebilir enerji kaynakları ve termik sistemlerin kurulu güç değerleri.....	22
Şekil 8. 2025 yılı itibari ile dünyada güneş enerjisi kurulu güç değerleri	22
Şekil 9. Fotovoltaik hücresinin yapısı	24
Şekil 10. Güneş pili hücresinin çalışma prensibi.....	25
Şekil 11. Güneş pili elektriksel eşdeğer devresi	25
Şekil 12. Güneş pili akım/gerilim (I-V) karakteristiği	26
Şekil 13. Güneş paneli güç-gerilim grafiği; (a) ışıınım ve (b) sıcaklık değerlerine göre	27
Şekil 14. PV-MPPT sistem tasarımı	29
Şekil 15. Tepe tırmanış algoritması	30
Şekil 16. Değiştir ve gözlemle MPPT algoritması	31
Şekil 17. Artırımlı iletkenli algoritması.....	32
Şekil 18. Sabit gerilim algoritması	33
Şekil 19. (a) Kesirli açık devre gerilim ve (b) Kesirli kısa devre akım algoritması..	34
Şekil 20. MPPT-YSA algoritması ile PV sistem tasarımı ve kontrolü	35
Şekil 21. Bulanık mantık kontrol algoritması.....	36
Şekil 22. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması.....	38
Şekil 23. Kayan kipli kontrol algoritması.....	39
Şekil 24. DA-DA dönüştürücü çeşitleri	40
Şekil 25. DA-DA düşüren dönüştürücü devresi	42
Şekil 26. MOSFET iletimde olduğu durumda devre şeması	42
Şekil 27. MOSFET iletimde olmadığı zaman devre şeması.....	43

Şekil 28. DA-DA düşüren dönüştürücünün anahtar durumuna göre giriş-çıkış gerilimleri ve bobin akım dalga şekilleri	43
Şekil 29. Yapılarına göre anahtarlama elemanı çeşitleri.....	44
Şekil 30. (a) N-Kanal, (b) P-Kanal MOSFET'in iç yapısı	45
Şekil 31. (a) Azaltan kanallı ve (b) Çoğaltan kanallı N-tipi MOSFET'lere ait transfer ve çıkış karakteristiği	45
Şekil 32. Anahtarın kapalı olduğu durum.....	46
Şekil 33. Anahtarın açık olduğu durum.....	49
Şekil 34. Transfer fonksiyonu bode diyagramı.....	56
Şekil 35. Temel su elektroliz sistemi	58
Şekil 36. Su elektrolizi için potansiyel-pH grafiği	61
Şekil 37. MATLAB/Simulink veri toplama modeli.....	65
Şekil 38. Benzetim sonucu elde edilen gerçek ve tahmin değerleri	66
Şekil 39. (a) 28.06 V ve 9.7 A, (b) 20.18 V ve 6.84 A ve (c) 33.52 V ve 11.43 A, panel değerlerine göre PWM sinyali ve doluluk oranı	67
Şekil 40. YSA denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü	68
Şekil 41. YSA denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü benzetim sonuçları; (a) ışınlım-zaman grafiği, (b) sıcaklık-zaman grafiği, (c) doluluk oranı-zaman grafiği, (d) gerilim-zaman grafiği, (e) akım-zaman grafiği ve (f) güç zaman grafiği	69
Şekil 42. LTspice uygulamasında IR2110 ile tasarlanan DA-DA düşüren dönüştürücü sürücü devresi	70
Şekil 43. HO, LO ve PWM sinyali benzetim sonuç grafikleri	70
Şekil 44. Güneş pili kaynaklı hidrojen üretim sistemi için YSA denetimli DA-DA çevirici tasarım şeması	71
Şekil 45. Çatıya monte edilen, her biri 545 W'lık, güneş panelleri.....	72
Şekil 46. Işınım değişimine göre güneş paneli (a) I-V ve (b) P-V grafikleri	74
Şekil 47. Sıcaklık değişimine göre güneş paneli (a) I-V ve (b) P-V grafikleri	74
Şekil 48. (a) Işınım, (b) Ortam sıcaklık ve (c) Panel sıcaklık değerleri	75
Şekil 49. Anlık ışınlım ve sıcaklık ölçme devre tasarımı	76
Şekil 50. Güneş paneli maksimum güç noktası tespit uygulama devresi	77
Şekil 51. 830 W/m ² ışınlım ve ortalama 34 °C sıcaklıkta ki panel I-V grafiği.....	78
Şekil 52. 830 W/m ² ışınlım ve ortalama 34 °C sıcaklıkta ki panel P-V grafiği.....	78

Şekil 53. Farklı ışıınım değerleri için panel I-V eğrisi	79
Şekil 54. Farklı ışıınım değerleri için panel P-V eğrisi	80
Şekil 55. YSA-MPPT algoritması modeli	81
Şekil 56. Modelin eğitim ve doğrulama kaybının gelişimi	82
Şekil 57. Gerçek ve tahmin edilen doluluk oranı değerleri	82
Şekil 58. YSA-MPPT algoritması ile tasarlanan PWM sinyal üretici	83
Şekil 59. (a) IR2110 MOSFET sürücü ve (b) DA-DA düşüren dönüştürücü devresi	84
Şekil 60. (a) Baskı devre ve (b) lehim aşamaları.....	84
Şekil 61. Devrede kullanılan malzemelerin gösterimi.....	85
Şekil 62. Yüksek ve alçak taraf anahtarlama	86
Şekil 63. Tasarlanan IR2110 sürücü devresi elemanları	87
Şekil 64. (a) IRFP064N MOSFET ve (b) IRFP064N MOSFET'in iç yapısı	88
Şekil 65. DA-DA düşüren dönüştürücü devresi	89
Şekil 66. Bobin, direnç ve kondansatör akım grafikleri	89
Şekil 67. Anahtarlama elemanının tam açık ve tam kapalı durumlarında sürekli modda oluşan bobin gerilim ve akım grafiği	90
Şekil 68. Hanna eğrisi.....	93
Şekil 69. EE70 ferrit nüve özellikleri	93
Şekil 70. Litz teli kesiti; (a) yüksek frekanslı alternatif akım geçtiği zaman, (b) düşük frekanslı alternatif akım geçtiği zaman ve (c) doğru akım geçtiği zaman akımın kablodaki dağılımı.....	94
Şekil 71. Litz teli ile sarılmış EE 70 tip ferrit nüveli bobin.....	94
Şekil 72. Çıkış dalga grafiği	95
Şekil 73. Alkali elektroliz sistem ön tasarımı	96
Şekil 74. Elektroliz tasarımı	97
Şekil 75. Fotovoltaik kaynaklı hidrojen üretim sisteminin deney düzeneği.....	99
Şekil 76. ESP32 S3 ile tasarlanan YSA tabanlı sistemin anlık veri takibi	100
Şekil 77. ESP32 S3'ten üretilen PWM sinyali	101
Şekil 78. HO, LO ve PWM sinyalinin sonuç grafikleri.....	101
Şekil 79. HO ve LO anahtarlama anında meydana gelen ölü zaman	102
Şekil 80. Devrede ölçülen PWM sinyali, bobin akımı ve gerilimi	102
Şekil 81. Panelden elde edilen gerilim ve akım değerleri	103

Şekil 82. DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış gerilimi ve akım değerleri.....	103
Şekil 83. Anlık olarak ölçülen hidrojen konsantrasyon değer grafiği	104



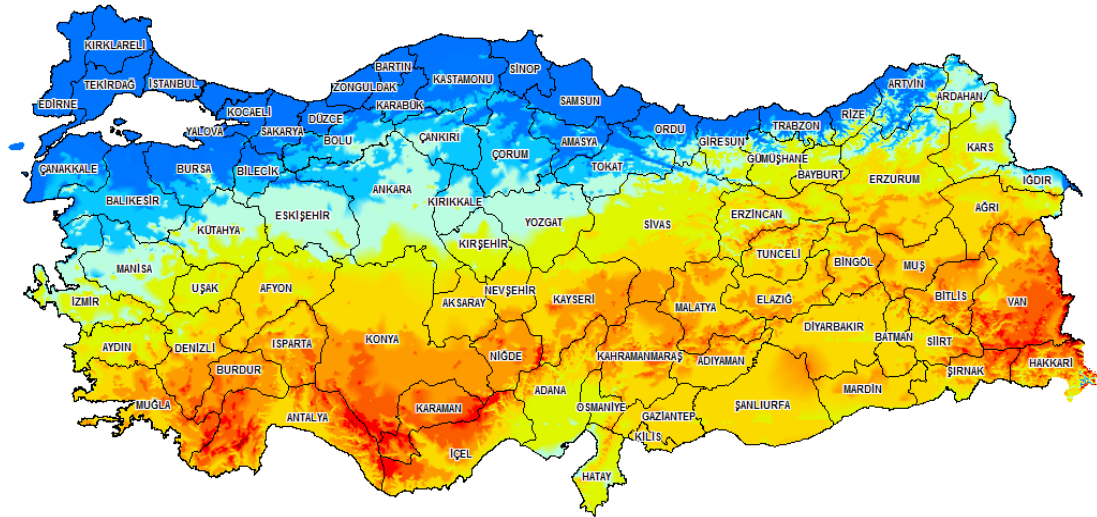
GİRİŞ

Geleneksel fosil yakıtları hem kısıtlı bir kullanım imkânları olması hem de çevreye verdikleri zarar nedeniyle günümüz dünyasında ilerisi için sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun ortadan tamamen kaldırılması ve çevre dostu kaynakların kullanımının teşvik edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yapılan çalışmalar ve teşvikler ile çok önemli bir yol almıştır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir kaynakların üretimi ve kullanımı hem zararsız hem de sınırsız bir kaynak oldukları için artmıştır. Bu kaynakların kullanım ve üretim aşamalarındaki gelişmeler bu enerjilerin evlere, sanayi tesislerine, araçlara vb. birçok ihtiyaç dâhilinde kullanıma kolaylık sağlamaktadır. Son 50 yılda meydana gelen nüfus artışı, gelişen teknolojiyle birlikte fosil yakıtlara olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu kaynakların bilinçsizce kullanılması ve tüketilmesi geriye azalan kaynaklardan dolayı bir alternatif enerji kaynağı arayışı ve çevreye verdiği zarardan dolayı dünyamızı kurtarmaya yönelik birtakım çalışmaları bırakmıştır. Özellikle çevre ile ilgili konularda yapılan 1997 Kyoto ve 2015 Paris İklim Antlaşması gibi küresel müzakereler ile Şekil 1’de (URL-1) gösterilen güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları kullanımı ve gelecek nesillere yeşil bir dünya bırakma arayışları gündemde tutulmuştur (Usman vd., 2022).



Şekil 1. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri örnek resmi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş fotovoltaik panel sistemlerinin kullanımı da yukarda bahsedilen nedenlerden dolayı son yıllarda artmıştır. Gerek iklimsel şartlar gerekse arazi yapısının elverişliliği bu yöntemin ülkemizde ilk sıralarda tercih edilmesinde etkili olmuştur. Şekil 2’de Türkiye geneli potansiyel güneş radyasyon haritası gösterilmiştir (URL-2).



Toplam Güneş Radyasyonu									
KWh/m ² -yıl									
1400-1450	1450-1500	1500-1550	1550-1600	1600-1650	1650-1700	1700-1750	1750-1800	1800-2000	

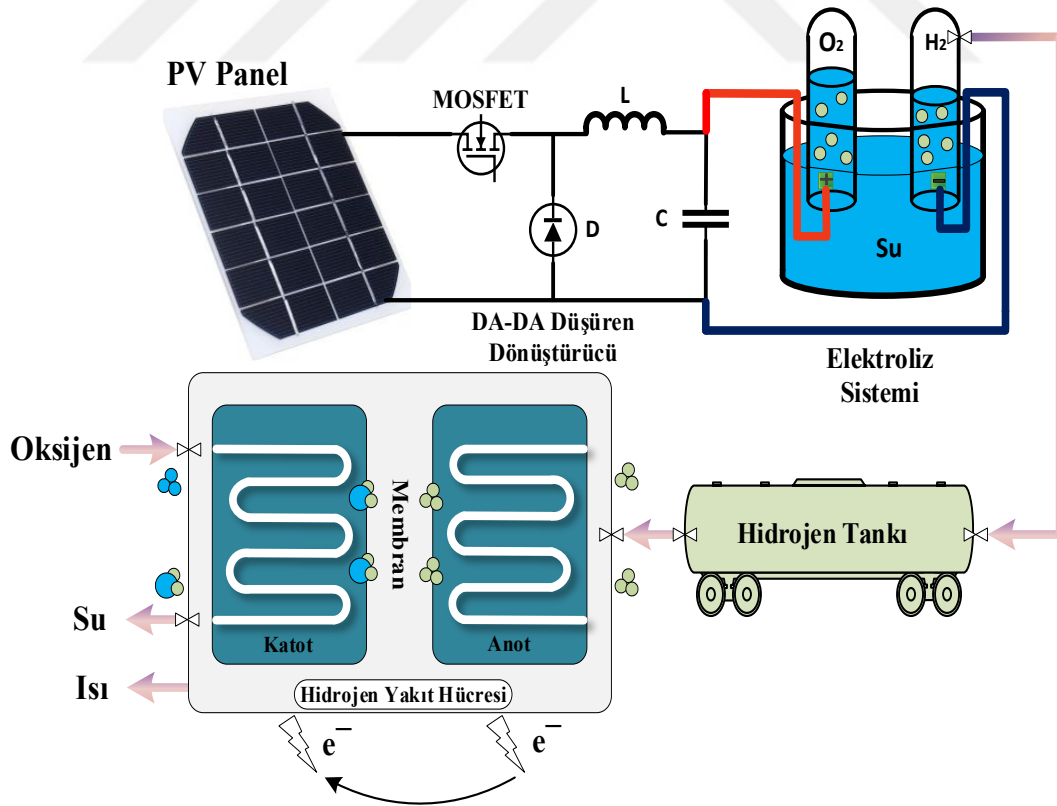
Şekil 2. Türkiye geneli potansiyel güneş radyasyonu haritası

PV sistemler DA-DA dönüştürücü ve DA-AA evirici kullanılarak direk şebekeye bağlanabilmektedir. Bu durum kullanım alanlarını genişletmekte ve her alanda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Gerek panel yapısı gerekse çevresel koşulların etkilediği bu sistemlerde en önemli konu verimliliklerdir. Sistemin maksimum güç noktasında çalışması ve bunun sürdürülebilir olması sistemden alınan verimi maksimum seviyelere çıkarmaktadır. Sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası takip algoritmaları, çevresel koşullara bağlı olarak değişen uygun değer çalışma noktasını sürekli takip ederek güneş panellerinden maksimum miktarda güç elde etmek için kullanılmaktadır. MPPT algoritmaları sistemin yapısı ve çevresel koşullara göre birçok metot kullanılarak tasarlanabilmektedir. Değişen hava koşullarına tepki hızı, kısmi gölgelenmelere karşı tutarlılık, maksimum güç noktasındaki dalgalanmaları minimum seviyeye indirme, maliyet ve yüksek verimlilik kullanılacak bu algoritmaların başlıca karşılaştırılma nedenleridir (Mao vd., 2020).

Güneş enerjisi gibi sürdürülebilir ve temiz enerji kaynakları direk olarak kullanılabilirdiği gibi depolanıp kullanabilme imkânı da vardır. En kullanışlı depolama yöntemi bataryaya dolun şekli olsa bile günümüzde bu metoda alternatif olarak hidrojen gazı şeklinde depolamada tercih edilebilmektedir. Gerek yakıt olarak

kullanılabilmesi gerekse depolanabilmesi açısından hidrojen gazının birçok avantajı bulunmaktadır. Doğada bulunan elementler içinde en temel elementlerden biri olan hidrojen, serbest bir şekilde bulunmamaktadır. Doğada genellikle suyun bir birleşeni olarak bildiğimiz hidrojen bu bağlamda dünyamızda çokça bulunmaktadır. Hidrojen enerji üretimi için suyun bileşenlerine ayrıştırılması işlemi elektroliz yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Elektroliz sisteminde dışardan uygulanan gerilim ile anot ve katot potansiyelleri denge potansiyellerinden daha yüksek bir değere çıkarılarak kimyasal reaksiyon oluşması sağlanır ve su bileşenlerine ayrıştırılır (Şahin vd., 2014). Elektrik enerjisi depolama ve kullanmada hidrojen gazı kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Fakat çok hafif bir element olduğundan dolayı depolanması aşamasında sıkıştırma işlemi çok yüksek basınçlar ve çok büyük hacimli tanklar kullanımının gerekliliği bu enerji üretim sisteminin en büyük dezavantajı olarak bilinmektedir.

Şekil 3'te hidrojen enerjisinin fotovoltaik (PV) sistemden üretilip depolandığı ve tekrar dönüştürülerek kullanıldığı bir tasarım gösterilmiştir.



Şekil 3. Hidrojen enerjisi üretim ve kullanım sistemi

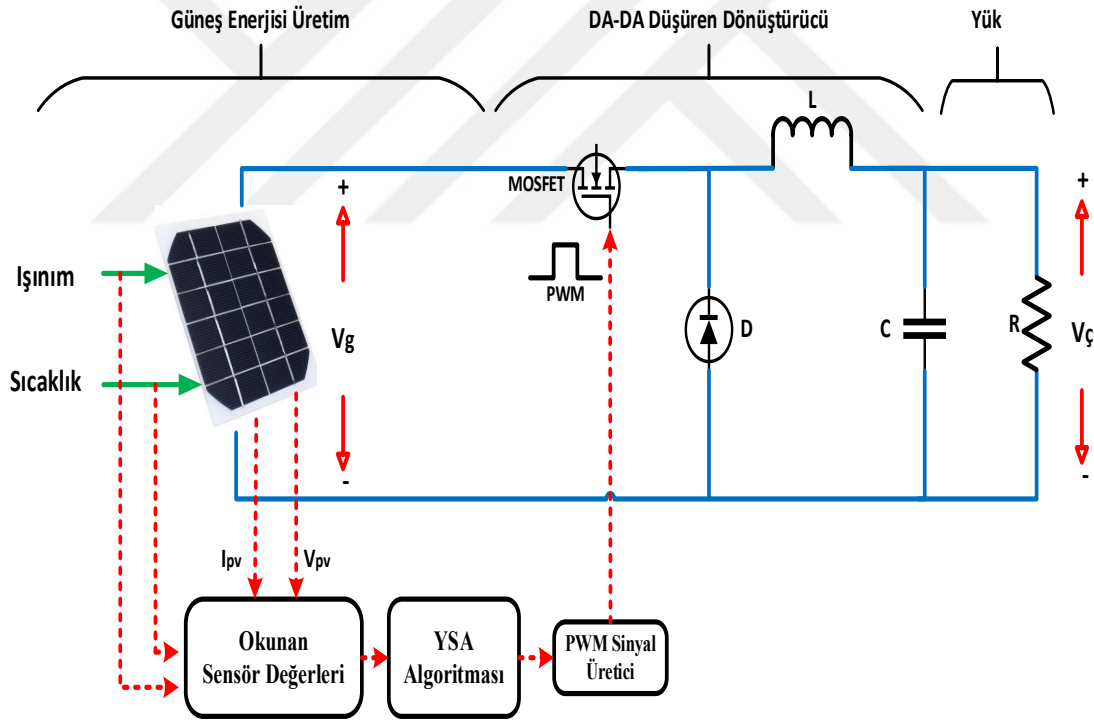
Bu sistemde güneş panelinden elde edilen enerji DA-DA düşüren dönüştürücü kullanılarak elektroliz için gerekli akım ve gerilim değerlerine dönüştürülmüştür. Elektroliz sisteminin çalıştırılması sonucu sisteme giren su, oksijen ve hidrojen olarak ayrıştırılmıştır. Oksijen doğrudan atmosfere verilirken hidrojen yakıt enerjisi olarak kullanılmak için belli bir basınç altında depolanmıştır. Bu depolama işlemi hidrojen atomunun çok küçük olmasından ve 1 gram hidrojenin yaklaşık 10 litre hacim kaplamasından dolayı bu sistemdeki en zor kısım olarak ele alınmaktadır. Bu dezavantajı giderebilmek için fiziksel, kimyasal ve hibrit sistemler gibi birçok depolama işlemleri yapılmaktadır (Koşar, 2021). Şekildeki sistemde fiziksel olarak depolama işlemi gerçekleştirilmiştir. Depolanan hidrojen daha sonra yakıt hücrelerinde yakılarak tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmüştür.

Bu bilgiler ışığında çalışmada güneş enerjisi üretim sistemi olarak bir PV sistem tasarlanmıştır. Elektroliz sisteminin çalışması için gerekli olan akım ve gerilim değerlerinin elde edilebilmesi için DA-DA azaltan dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu dönüştürücünün maksimum verimlilikte çalışabilmesi için MPPT kontrol algoritması olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli kullanılarak PV panelden ölçülen anlık gerilim ve akım değerlerine göre bir PWM sinyali oluşturulmuştur. Bu PWM sinyali ile DA-DA düşüren dönüştürücü sisteminde bulunan sistemin açılıp kapanmasını sağlayan anahtarlama elemanının sürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistem öncelikli olarak MATLAB/Simulink, LTspice ve Arduino IDE uygulamasında tasarlanıp test edilmiştir. MPPT sisteminin tasarımı ve PWM sinyalinin kontrolü ESP32 S3 (Ek-7) mikro denetleyicisi üzerinden fiziki olarak tasarlanmış ve sisteme dâhil edilmiştir.

Bu çalışmada ilk bölümde sistemin gerekliliği ve önemi vurgulanmış, konu hakkında detaylı bir literatür taraması yapılarak çalışmalar kısaca özetlenmiştir. İkinci bölümde fotovoltaiik paneller, dönüştürücüler, MPPT sistemleri ve algoritmaları, elektroliz gibi sistemler teorik olarak detaylandırılarak çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları, uygulama alanları gibi birçok konu bakımından geniş bir inceleme yapılmıştır. Üçüncü bölümde teorik olarak ele alınan sistemin tasarımı, benzetimi, fiziki olarak devrelerinin kurulması ve test edilmesi aşamaları ele alınmıştır. Son bölümde ise sistem çıktıları, bulgular ve benzetim sonuçları karşılaştırılarak detaylı bir değerlendirme yapılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada anlık olarak değişen ışıınım ve sıcaklık gibi çevresel koşullar sonucu PV panelin ürettiği anlık akım ve gerilim değerlerine karşılık gelen güç ve doluluk oranı değerlerinin YSA algoritması ile kontrolü gerçekleştirilmiş ve hem sistemin MPPT noktasının takibi yapılmış hem de DA-DA düşüren dönüştürücü kontrolü için PWM sinyali oluşturulmuştur. YSA denetimli DA-DA düşüren dönüştürücünün çıkışında bulunan elektroliz sistemi kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. ESP32 S3 mikro denetleyicisi ile bütünleşik bir şekilde sistemin fiziki olarak kurulumu gerçekleştirilmiş ve sistem çalıştırılarak istenilen sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca tüm bu sistemlerin matematiksel formülleri ve çalışma prensipleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Şekil 4'te YSA algoritması denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü sisteminin tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 4. PV panel ve YSA algoritması denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü kullanılarak oluşturulan sistem tasarımı

1. LİTERATÜR TARAMASI

Birçok araştırmacı, fotovoltaik (PV) sistemlerde enerji üretim ve verimlilik konularında birçok yönteme başvurmuşlardır. Bu yöntemlerle üretilen elektrik enerjisi şebeke bağlantılı (On-Grid), şebeke bağlantısız (Off-Grid), batarya dolum ve hidrojen üretim sistemleri gibi sistemlerde tercih edilmektedir. Bu denli farklı uygulama ve modelleme yöntemleri olan bu sistemlerin tasarımları, işleyişleri, kullanma amaçları, çevresel etkileri, sistemlere uygunlukları, verime etkileri, avantajları ve dezavantajları gibi birçok konu irdelenerek en verimli ve en sürdürülebilir PV sistemleri hakkında çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak akademik çalışmalardan faydalanan bu kısımda PV paneller DA-DA dönüştürücüler, MPPT algoritmaları ve elektroliz sistemi hakkında teorik bilgiler vurgulanmıştır.

Noman vd. (2012), maksimum güç noktası takibini (MPPT) yapmak için bulanık mantık denetleyicisinin sisteme uygulanmasını amaçlamıştır. Fotovoltaik panel girdileri olan sıcaklık ve ışıınım değerlerinin hava koşullarına bağlı olarak sürekli değişiklik göstermesi sistemden alınan verimi etkilemektedir. Bu durumdan dolayı bulanık mantık tabanlı MPPT sistemi, MPP'deki salınımları azaltması için tercih edilmiştir. Bulanık mantık ile değiştir ve gözlemle (P&Q) algoritmalarının karşılaştırıldığı bu sistemde bulanık mantık algoritmasının geleneksel P&Q algoritmasından daha yüksek verimlilikte ve hızlı çalıştığı sonucuna varılmıştır (Noman vd., 2012).

Gupta vd. (2014), yapay zekâ tabanlı MPPT algoritmaları ile geleneksel MPPT algoritmalarının karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları modelleri MATLAB ortamında test edilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Geleneksel yöntemlere göre daha verimli olan bu sistemlerin maksimum güç noktasını etkili bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir. Yapay sinir ağlarının da bulanık mantığa göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir (Gupta vd., 2014).

Şahin vd. (2014), yayınladıkları makale ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjiyi kullanarak elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için kullanılabilecek DA-DA düşüren dönüştürücünün tasarımı amaçlamıştır. Güneş pilleri ve şarjlı piller gibi kaynakların çıkış gerilimleri genellikle 12 V olmaktadır. Elektroliz sistemi için ise 2 V gerilim gerekmektedir. Bu çalışmada istenilen değeri elde edebilmek için

eşzamanlı DA-DA düşüren dönüştürücü tasarlanmıştır. Sistem iki farklı elektrolit ile 25 A çıkış akımında test edilmiştir. Doğrusal olmayan elektroliz sistemi yükünün kararlılık analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan elektroliz sistemi için 50 W gücünde dönüştürücü tasarlanmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üretilen hidrojen gazı miktarı, elektroliz sisteminin farklı yük koşulları için hesaplanmıştır. Sonuç olarak benzetimler ve deneysel sonuçlar iyi bir uyum göstermiştir. Paralel olarak birden fazla hücre veya kimyasal çözeltinin iletkenliğini arttırıcı maddelerin kullanılması üretilen hidrojen gazı miktarını arttıracığı tespit edilmiştir (Şahin vd., 2014).

Kumar vd. (2015), güneş PV sisteminin verimliliğini optimize etmek için iki akıllı kontrol yöntemi olan Artımlı İletkenlik (IC) algoritması ve Bulanık Mantık Denetleyicisi (FLC) algoritması arasındaki karşılaştırmalı bir çalışmayı amaçlamıştır. Arttıran dönüştürücü, çıkış gerilimini artırmak için kullanılır ve önerilen MPPT algoritmaları güneş panelinin maksimum gücünü izlemek için DA-DA dönüştürücü anahtarının görev döngüsünü ayarlar. İki yöntemin benzetimi ve analizi MATLAB/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak değişken hava koşullarında FLC yöntemi; çıkış gücünü artırması, dalgalanmaları azaltması ve değişikliklere hızlı yanıt vermesi nedeniyle IC yöntemine kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca FLC yönteminin, maliyetleri düşürmede ve bu sistemlerden değişen hava koşullarında performans olarak maksimum düzeyde verim elde edilmesinde ilk tercihlerden biri olabileceği sonucuna varılmıştır (Kumar vd., 2015).

Haji (2016), PV beslemeli DA-DA yükselten dönüştürücü için Neural-Fuzzy hibrit MPPT algoritmasının tasarımı ve uygulamasını amaçlamıştır. YSA ve FLC'nin birleştirilmesiyle hibrit bir MPPT tekniği tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistem benzetim ortamında değişkenler değiştirilerek sürekli bir teste tabi tutulmuştur. Uyarlamalı Neural-Fuzzy sisteminde (ANFS) gauss üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu sistem daha hızlı ve enerji verimliliği yönünden daha iyi sonuçlar vermiştir (Haji, 2016).

Ahmed vd. (2018), R, RL, RC ve RLC gibi yük özelliklerinin maksimum güç takip sistemi kontrollü fotovoltaiik güneş sistemi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Farklı yük ve ışıyım değerleri kullanılarak sistem test edilmiştir. Çalışma düzeyi en üst seviyeye çıkması için P&Q MPPT algoritması kullanılmıştır. Güç, akım ve gerilim

farklı yüklerle karşı grafikleri analiz edilmiştir. Tekniklerin güneş ışıını ve yükteki değişime tepkilerini incelemek için benzetim modelleri bağımsız PV sistemlerinde test edilmiştir. R ve RC yükleri, maksimum güç noktası (MPP) etrafında salınım yapmazken RL ve RLC yüklerinin, endüktif bileşenlerin etkisiyle MPP etrafında salınımlar yaptığı gözlemlenmiştir (Ahmed vd., 2019).

Çelik (2019), elektrikli bisiklet ve uzun mesafeli seyahatlerde kullanılan yük taşıma araçlarının ihtiyaç duydukları enerjiyi DA-DA yükselten dönüştürücü ve MPPT algoritması kullanarak tasarlanan PV sistemlerinden elde edilebilmesini amaçlamıştır. Lityum-İyon bataryaların şarj karakteristikleri ele alınmış ve güneş panellerinin elektriksel modelleri incelenmiştir. PV, DA-DA yükselten dönüştürücü ve P&Q algoritması kullanılarak sistem tasarımı yapılmıştır. Güvenli ve verimli şarj dolumu yapılması için gerekli hesaplamalar yapılmış ve batarya yönetim sistemi (BMS) kullanılmıştır. Sonuç olarak MPPT sisteminden %96 verim elde edilmiştir. Sistemde eşzamanlı çevirici kullanılarak diyottan kaynaklı iletim kayıplarından %1 daha verim kazancı elde edilebileceği belirtilmiştir (Çelik, 2019).

Gül ve Akyüz (2020), yaptıkları çalışma ile küçük ölçekli bir fotovoltaik termal (PV-T) sistemi kullanarak güneş enerjisinden hidrojen üretimini amaçlamışlardır. Balıkesir de 30° eğim açısına sahip iki düz levha PV-T panel ve PEM elektrolizörü sistemi kurulmuştur. Termodinamik ve ekonomik açıdan sistem analizi yapılmıştır. Sistemin yıllık elektrik-ısı enerjisi ve hidrojen üretimi hesaplanmıştır. Hem PV-T hem de proton değişim membranı (PEM) elektrolizi için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak PV-T ve PEM enerji-ekserji değerleri sırasıyla %35-60; %13,7-15,8 ve %57-69,59; %54,3-%60,7 verimlilikleri elde edilmiştir. Sistem 556,8 kWh elektrik enerjisi, 1912 kWh ısı enerjisi ve 4.491 kg/yıl hidrojen üretmiştir. Hidrojen üretiminin maliyeti 5,61 \$/kg bulunmuştur. Ek olarak PV-T sisteminin PV sistemi karşılaştırılması yapılmıştır (M. Gül ve Akyüz, 2020).

Grimm vd. (2020), foto elektrokimyasal (PEC) ve fotovoltaik elektroliz (PV-E) sistemlerinin hidrojen üretim teknolojilerini karşılaştıran bir tekno-ekonomik analiz amaçlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucu PV-E sistemi için maliyetin 6,62 \$/kg ve PEC sistemi içinde maliyetin 8,42 \$/kg olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar PEC sistemlerinin maliyeti fazla olsa da halen gelecekte hidrojen üretimi için geleneksel

sistemle rekabet edebilecek potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır (Grimm vd., 2020).

Şahin (2020), MPPT kontrollü PV sisteme bağlı çalışan bir elektroliz dönüştürücü sisteminin tasarımını ve uygulamasını amaçlamıştır. PV panellerin her zaman maksimum güç notasında çalışmasını sağlamak için P&Q MPPT algoritması uygulanmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu sistemin, evlerde ve arabalarda kullanılması-depolanması gibi şebeke elektriğine erişim olmadan potansiyel kullanım durumları ele alınmıştır. Sonuç olarak PV sistemlerde MPPT kullanımının elektroliz sisteminin verimini arttırdığı ve daha sürdürülebilir olduğu vurgulanmıştır (Şahin, 2020).

Mao vd. (2020), hem geleneksel hem de akıllı kontrol algoritmalarına odaklanan fotovoltaik sistemlerinde MPPT tekniklerinin bir incelemesi amaçlamıştır. MPPT teknikleri sınıflandırılarak özetlenmiş ve her yaklaşımın avantajları ve dezavantajları vurgulanarak performans karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma hem donanım tabanlı hem de yazılım tabanlı MPPT algoritmalarını kapsamaktadır. Bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi akıllı kontrol algoritmalarının kullanımı detaylandırılmıştır. Sonuç olarak fotovoltaik MPPT tekniklerinin karmaşıklık, izleme hızı, maliyet, verimlilik, doğruluk ve donanım uygulama gibi kategorilerde kapsamlı bir genel karşılaştırılması yapılmıştır (Mao vd., 2020).

Hajihosseini vd. (2020), dinamik yüklere maruz kalan güç elektroniği sistemleri (DA-DA dönüştürücüler) sınıfının kararlılık problemini çözmek için derin makine öğrenmesi tabanlı sistemlerin geliştirilmesini amaçlamıştır. Derin pekiştirmeli öğrenmenin (DRL) uyarlanabilir özelliği kullanılarak sistemin, referans gerilim değişkenliklerine maruz kaldığında kontrol güç yüklerinin (CPL) yıkıcı etkilerini bastırmak için yeni bir uyarlanabilir modelden bağımsız ultra yerel model (ULM) denetleyici tabanlı kayan mod (SM) gözlemcisi geliştirilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan şema ULM denetleyici kazançlarını uyarlamalı olarak ayarlayarak, CPL'nin eş zamanlı etkileri ve referans gerilimi değişiklikleri için güç elektroniği sisteminin kararlılığı sağlanmıştır (Hajihosseini vd., 2020a).

Ali vd. (2020), PV sistemlerinde kullanılan MPPT tekniklerinin kapsamlı bir gözden geçirilmesini amaçlamıştır. Farklı MPPT teknikleri ve özellikleri arasında değiştir ve gözle (P&Q), artan iletkenlik (IncCon) ve kontrol arayışı (ESC) de dâhil

olmak üzere MPPT tekniklerinin özelliklerine değinilmiştir. Tekdüze ve tekdüze olmayan güneş radyasyon koşulları altında bu MPPT tekniklerinin performansları araştırılmıştır. Sonuç olarak MPPT tekniği seçiminin PV sisteminin belirli gereksinimlerine bağlı olarak belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. MPPT tasarımları ve uygulaması hakkında detaylı bilgiler verilmiştir (Ali vd., 2020).

Yap vd. (2020), MPPT'nin PV sistemlerdeki önemi ve yapay zekâ tabanlı tekniklerin geleneksel yöntemler ile kıyaslanması hakkında bir çalışma amaçlamıştır. P&Q, artan iletkenli (IncCon) gibi geleneksel teknikler ile YSA, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi yapay zekâ tabanlı algoritmaların MPPT'de ki verimlilikleri araştırılmıştır. Bu sistemlerin avantajları ve dezavantajları vurgulanmıştır. Sonuç olarak sistem kararlılığı, hesaplama gereksinimleri ve doğruluk gibi faktörlere dayalı olarak seçilen yapay zekâ tabanlı algoritmaların geleneksel algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır (Yap vd., 2020).

Çandır (2021), PV sistemlerinde kullanılan MPPT algoritmalarının sistemden maksimum verim alınmasını sağladığını fakat %98 civarında olan bu verimin daha da artırılması için sıralı dönüştürücü kullanımının gerekli olduğuna dair bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada MPPT için dört katlı sıralı arttıran dönüştürücü dizayn edilmiştir. Sistemde P&Q ve kısa devre akım metotları ile tasarlanan karma bir MPPT algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak sıralı dönüştürücü sistemi kritik akım durumunda sıfır akımda anahtarlama yaptığından dolayı kayıplarda azalma sağlanmıştır. Çalıştırılan sistemde MPPT verimi %98 olarak elde edilmiştir. Dört katlı kritik modda çalışan sıralı dönüştürücü sistemi ile tek katlı geleneksel arttıran dönüştürücünün panelden çektiği akımdaki dalgalanma değerleri karşılaştırılmıştır. Dört katlı sıralı dönüştürücü sisteminde her katta 1 mH bobin bulunduğu dalgalanma 0.07 A iken bu değeri geleneksel sistemde elde edebilmek için tek katta 11,4 mH bobin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Çandır, 2021).

Rizzo ve Scelba (2021), fotovoltaik sistemlerde küresel maksimum güç noktası takibi (GMPPT) için uygun maliyetli ve kullanımı kolay iki aşamalı bir algoritmanın tasarlanmasını ve uygulanmasını amaçlamıştır. Algoritmada, optimum çalışma koşullarını tahmin etmek için iki farklı yöntem olan YSA ve yokuş tırmanma (HC) yöntemi kullanılmıştır. Çalışma, bölümlene tabanlı bir yöntem ile yapay sinir ağı kombinasyonunun, çevresel koşulların sıklıkla değiştiği uygulamalarda mükemmel

performansa yol açtığını tespit etmiştir. Gelecekteki araştırmaların MPP'nin izlenmesi sırasındaki enerji kaybının azalmasını sağlayacağı ve önerilen yöntemin, hızla değişen düzensiz gölgeleme koşullarının meydana getirdiği senaryolarda kısmen uygulanabileceği belirtilmiştir (Rizzo ve Scelba, 2021).

Karabinaoğlu vd. (2022), enerji üretim süreçlerinde yüksek verim elde etmek için güneş enerjisi sistemlerinin ve fotovoltaik modüllerin maksimum güç noktalarında çalıştırılmasının önemini vurgulamayı amaçlamıştır. Akım ve gerilim sensörlerini kullanan geleneksel MPPT uygulamaları, değişen atmosferik koşullar altında PV sisteminin küresel maksimum güç noktasını takip edemeyebilir ve bu durumda yerel MPP etrafında salınma yol açmaktadır. Makale, çevresel parametreler ve yapay zekâ algoritmaları kullanarak PV modülünün çıkış direncini tahmin eden MPPT için yenilikçi bir çözüm olarak makine öğrenimi ve derin öğrenme tabanlı uzun-kısa süreli bellek (LSTM) modeli önermektedir. Sonuç olarak LSTM modeli yapay sinir ağları ve regresyon yöntemleri ile karşılaştırılmış ve MSE, RMSE ve MAE parametreleri açısından LSTM modelinin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. LSTM modelinin MPPT performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğu ve gelecekteki çalışmaların yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemleri geleneksel yöntemlerle birleştiren veya MPPT çalışmaları için farklı yapay zekâ algoritmaları kullanan hibrit yöntemler ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır (Karabinaoğlu vd., 2022).

Rasheed (2022), yapay sinir ağları kontrollü DA-DA geri beslemeli dönüştürücü ile kullanılan fotovoltaik sistemi için kullanılacak MPPT sisteminin incelenmesini amaçlamıştır. MPPT sistemi YSA algoritması ile tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistem geleneksel değiştir ve gözlemle algoritması ile karşılaştırılmıştır. Değişken hava koşullarında daha iyi bir performans gösteren YSA-MPPT sisteminin geleneksel algoritmalara göre daha verimli, hızlı ve düşük güç dalgalanmalarına sahip olduğu görülmüştür (Rasheed, 2022).

Muhida vd. (2022), hidrojen üretmek için tasarlanan fotovoltaik-katı polimer elektroliz (SPE) sisteminde maksimum güç noktası takip algoritması kullanarak sistemin ve MPPT algoritmasının analizinin yapılmasını amaçlamıştır. İhtiyaç duyulan gerilimi elde etmek için PWM ve DA-DA düşüren dönüştürücü tasarlanmıştır. PV-SPE sistem tasarımı; güneş ışığının, güneş pili sıcaklığının ve bağlı yük durumunun

etkileri dikkate alınarak yapılmıştır. PV panelinin her zaman maksimum güç noktasında çalışması için MPPT tasarlanmıştır. PV-SPE sistemi MPPT algoritması ile kullanılarak test edilmiştir. MPPT hidrojen üretim hızını arttırmada başarılı olmuştur (Muhida vd., 2022).

Efendi (2022), gerilim kontrollü DA-DA düşüren dönüştürücü ve Arduino UNO'ya dayalı sensörler kullanan bir elektroliz cihazının tasarımını amaçlamıştır. Düşüren dönüştürücü gerilim kontrolünün hidrojen üretimi üzerindeki etkisini belirlemek için Arduino UNO kullanılarak otomatik veri toplama için bir takip sistem cihazı geliştirmiştir. İzleme cihazında MQ-8 gaz sensörü, 25 V DC gerilim sensörü, AC5712 akım sensörü ve DS18620 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sonuç olarak gerilim, akım, gaz ve sıcaklık sensörlerinin doğrulanması her sensörün küçük bir hata değerine ve %95 üzerinde doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Suyun elektrolizinde 12 V kullanımının 6 V ve 9 V'a kıyasla en yüksek konsantrasyonda hidrojen gazı ürettiği tespit edilmiştir (Efendi, 2022).

Ahmad (2023), farklı çalışma koşullarında güneş ve rüzgâr sistemlerinde kullanılabilecek MPPT tekniklerinin sınıflandırılması ve karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Güneş ve rüzgâr sistemleri için detaylı literatür taramaları yapılmış ve MPPT sistemleri; basit, yapay zekâ ve karma olarak üç kategoriye ayrılmıştır. Her bir sistem ve MPPT algoritması MATLAB programında simüle edilmiştir. Sonuç olarak güneş sistemlerinde yapay zekâ tabanlı algoritmaların, rüzgâr sistemlerinde ise basit ve yapay zekâ birleşimi karma bir algoritmanın en iyi sonucu verdiği görülmüştür (Ahmad, 2023).

Talaat vd. (2023), hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının mikro şebeke entegrasyonu ve yönetimi için yapay zekâ tekniklerini kullanma potansiyelinin incelemesini amaçlamıştır. Mikro şebeke teknolojilerine, yenilenebilir enerji kaynaklarına (RES) ve enerji depolama sistemlerine (ESS) genel bir bakış sunulmuştur. Makine öğrenimi, sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritmalar dâhil olmak üzere mikro şebeke yönetimindeki yapay zekâ (AI) uygulamaları hakkındaki en son araştırmalar gözden geçirilmiş ve mikro şebeke sistemlerinin kararlılığını, güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için AI tabanlı yaklaşımların avantajları vurgulanmıştır. Yenilenebilir kaynakların şebekeyle birleştirilmesi ile ilgili zorlukları ve AI tekniklerinin bunların üstesinden gelme potansiyelleri ele alınmıştır.

Sonuç olarak, bütünleşik sistemin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için YSA, genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) birleştiren hibrit bir optimizasyon modeli kullanan bir durum çalışması yapılmıştır. YSA-PSO modelinin en düşük hesaplama süresine ve en düşük normalleştirilmiş ortalama kare hatası (NMSE) yüzdesine sahip olduğu bulunmuştur (Talaat vd., 2023).

Sabareesh vd. (2023), PV sistemin, hava durumuna ve yüke göre LSTM-YSA algoritması kullanarak bataryayı gelecekteki kullanıma hazırlamak için bir tahmin modelini tasarlamayı amaçlamıştır. LSTM tahmin algoritmasında girdi verileri olarak sıcaklık ve ışıınım değerleri kullanılmıştır. PV sistemin MPP'de çalışabilmesi için artırılmış iletkenlik MPPT algoritması kullanılmıştır. Benzetimdeki her saniye bir saat olarak kabul edilip işlemler yapılmış ve grafikler elde edilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan tahmin sistemi için %98 verimlilik elde edilmiştir (Sabareesh vd., 2023).

Younas vd. (2023), artan enerji talebini ve geleneksel enerjiyle ilgili zorlukları karşılamak için bol, temiz, çevre dostu, gürültüsüz ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılan LSTM tabanlı MPPT kontrollü PV panelinin tasarımını amaçlamıştır. PV panelin çıkış gücü, değişken sıcaklık ve ışıınım dalgalanmaları nedeniyle tahmin edilemez olduğundan panelden maksimum güç elde etmek için 100 kW'lık şebekeye bağlı bir PV dizisi için LSTM tabanlı bir MPPT algoritması kullanılmıştır. Kullanılan LSTM denetleyici, MATLAB/Simulink 'deki ileri beslemeli yapay ağ (FFNN) ve P&O MPPT algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak LSTM tabanlı denetleyicinin, FFNN'den beş kat ve P&Q'dan 10 kat, daha yüksek maksimum güç çıkışına ve daha az tahmin hatasına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca LSTM'nin eğitim süresini azaltmaya yönelik araştırmaların halen devam ettiği ve derin öğrenme (DL) modellerinin eğitim sürelerini kısaltmak için GPU'lar veya TPU'lar gibi donanım hızlandırıcıların kullanılabileceği vurgulanmıştır (Younas, 2023).

Bhattacharjee vd. (2014), üç temel dönüştürücü olan düşüren, yükselten ve düşüren-yükselten modellerinin değişken hava koşulları altında maksimum güç noktası uygulaması ile olan ilişkilerini ele almıştır. Farklı yükler altında da bu değişimler incelenerek yük sınırlamaları olan düşüren ve yükselten dönüştürücülere karşı düşüren-yükselten dönüştürücünün bu tarz sınırlamalara karşı daha verimli

çalıştığı ve gelişmiş bir takip sistemine daha uygun olduğu vurgulanmıştır (Bhattacharjee ve Saharia, 2014).

Nasser vd. (2022), çeşitli su elektrolizörleri kullanarak güneş ve rüzgâr enerjisinden hidrojen üretim sistemlerinin teknolojik bir incelemesini ve ele alınan yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet karşılaştırmalarının yapılmasını amaçlamıştır. Sonuç olarak düşük sıcaklıklı elektrolizörler ve yüksek sıcaklıklı elektrolizörler karşılaştırılmış ve düşük sıcaklıklı elektrolizörlerin (PEM) düşük başlatma süresi ve dalgalanmalara karşı daha dirençli olma özelliğinden dolayı daha verimli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca Güneş/H₂ ve Rüzgâr/H₂ sistemlerinin yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerine göre herhangi bir çeviriciye ihtiyaç duymadan çalıştıklarından maliyet olarak daha uygun olduğu belirtilmiştir (Nasser vd., 2022).

Şahin (2019), güneş enerjisinden faydalanmak ve onu hidrojen olarak depolamak ve depolanan enerjiyi tekrar kullanmak için iki farklı senaryoyu incelemiştir. Çalışmada elektroliz işlemi için gerekli gerilim ve akım değerlerinin elde edilebilmesi için DA-DA dönüştürücü ve sistemin verimliliğini arttırmak içinde kayan tip kontrolör kullanılmıştır. Sonuç olarak kayan tip kontrolörün çeşitli koşullar altında maksimum güç noktası takip sistemleri için verimli bir şekilde çalıştığı ortaya konulmuştur (Şahin, 2019).

Gündoğdu ve Çelikel (2020), yapay sinir ağı tabanlı bir maksimum güç noktası izleme yöntemini ele almıştır. Ele alınan bu yöntemde yapay sinir ağının girişleri sıcaklık ve gerilim, çıkışı ise referans gerilim olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu referans gerilim bir PI kontrolör tarafından kontrol edilerek sistemin değişken atmosferik koşullarda maksimum güç üretmesi sağlanmıştır. Geleneksel yöntemler ile önerilen yöntem MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin üstünlüğü, sıcaklık ve radyasyonun sürekli değiştiği zorlayıcı bir senaryo üzerinde gösterilmiştir (Gündoğdu ve Çelikel, 2020).

Yılmaz ve Çorapsız (2021), fotovoltaik panellerden elde edilen verim değerleri için P&Q ve artırılmış iletkenlik (INC) gibi geleneksel MPPT yöntemleri ile yapay zekâ tabanlı yapay sinir ağı algoritmalarını karşılaştırmıştır. Sistem DA-DA yükselten dönüştürücü ile tasarlanmıştır. Sonuç olarak değişen çevre koşullarına göre (ışınım,

sıcaklık, kısmi gölgelenme) YSA tabanlı MPPT sisteminin daha yüksek verimde çalıştığı gözlemlenmiştir (Yılmaz ve Corapsız, 2022).

Elobaid vd. (2015), PV panellerin verimlilik konusunu üzerinde son zamanlarda artan araştırmalara farklı bir boyut getirerek YSA algoritmalarının sıcaklık, ışıınım, panel gerilimi, panel akımı, panel gücü, zaman, kısmi gölgelenme gibi farklı giriş değerlerini kombine ederek farklı MPPT teknikleri üzerinde durmuştur. Daha önceki çalışmalara karşın daha detaylı ve çeşitli bir YSA analizi yapılmıştır. Kontrolör yapısı ve giriş değişkenlerine dayalı olarak ele alınan YSA temelli PV MPPT teknikleri ile deneysel doğrulama ve geçici/durağan durum performanslarını da kapsayan karşılaştırmalar vurgulanmıştır (Elobaid vd., 2015).

Shekardasht (2016), yenilenebilir güneş enerjisi sisteminden elde ettiği elektrik enerjisini kullanarak elektroliz yöntemiyle hidrojen üretmiş ve bu hidrojenin depolanması ve tekrar kullanılmasına yönelik bir matematiksel modelleme ve sayısal analiz yapmıştır. Koordinat olarak Konya ili seçilmiş ve buranın çevresel şartları göz önünde bulundurularak MATLAB/Simulink de modelleme hazırlanmıştır. Sonuç olarak iki aşamalı bir durum analizi yapılmış ve yakıt hücresinden elde edilen enerji yoğunluğunun sistemde kullanılan hidrojen miktarı, hücre basıncı, membran yapısı ve membran kalitesi ile ilişkili olduğu ortaya konulmuştur (Shekardasht, 2016).

Elyaqouti vd. (2017), Arduino Mega kullanarak sabit P&Q ve çift P&Q algoritmalarının maksimum güç noktası takip sistemlerinde ki zaman tepkisi ve salınımlar açısından karşılaştırılmasını ele almıştır. Arduino Mega kartı ile MATLAB/Simulink uygulaması üzerinden kontrol edilen sistemde sonuç olarak çift değişken P&Q komutunun daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir (Elyaqouti vd., 2017).

Turgut vd. (2019), hava parametrelerinin tahmini için sıcaklık, nem, rüzgâr şiddeti, rüzgâr yönü vb. giriş verileri sensörler yardımıyla analog bilgiler şeklinde elde ederek Arduino kartı üzerinden veri toplamayı ve toplanan bu verileri YSA modelleri olan K-Nearest Neighbors (K-NN) ve Random Forest (RF) algoritmaları ile işleyerek ağ modelleri oluşturmayı amaçlamıştır. Sonuç olarak tasarlanan sistemden hava sıcaklığının doğru tahmin edilme oranı %87 olarak bulunmuştur (Turgut vd., 2019).

Aden (2018), fotovoltaiik kaynaktan beslenen, izole edilmemiş tek girişli-çok çıkışlı bir DA-DA düşüren dönüştürücü tasarlamış ve gerçekleştirmiştir. Önerilen

dönüştürücü için denetim stratejileri geliştirilerek küçük işaret modellemesi yapılmıştır. Sistemin benzetimi MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Aden, 2018).

Şahin ve Blaabjerg (2021), farklı anahtarlama güç dönüşüm uygulamalarındaki güç MOSFET kapı sürücülerinin gereksinimlerine odaklanmıştır. Çalışma da başlangıçta MOSFET sürücülerini üzerine detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. MOSFET'lerin ana sistemine ve anahtarlama prensibine genel bir bakışı sunulmuş ve kapı sürücülerinin tasarım prensipleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca farklı güç dönüştürücüleri için çeşitli öneriler ve uygulamalar tartışılmış ve örneklerle açıklanmıştır. Ek olarak sürücüler detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve çeşitli yönlerden çıkarımlar yapılmıştır (Şahin ve Blaabjerg, 2021).

Sonuç olarak birçok araştırmacı tarafından Tablo 1'de vurgulandığı üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi sisteminin kullanım amaçlarına uygun ve en iyi verimi alabilecekleri şekilde çalışmalar yapılmıştır. Sistemlerde kullanılan kontrolörler, dönüştürücüler ve üretim şekilleri farklı durumlarda farklı ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tasarlanmış ve tüm bu sistemler hakkında geliştirilebilir bilgi verme amaçlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada öncelikli olarak güneş enerjisi sisteminden anlık olarak alınacak panel gerilim ve akım değerlerinin ESP32 S3 mikro denetleyicisi üzerinden veri havuzuna yönlendirilip YSA denetimli bir kontrol sistemi oluşturulacaktır. Oluşturulacak bu YSA algoritması sistemi ile DA-DA düşüren dönüştürücü sistemi kontrol edilerek elektroliz işlemi için gerekli gerilim-akım değerleri elde edilip hidrojen üretiminin kontrol ve tasarımını yapılacaktır.

Tablo 1. Literatür taraması özeti

Referans	Amaç	Anahtar Kelimeler
(Noman vd., 2012)	Bulanık mantık denetleyicisinin sisteme entegrasi ve değiştir-gözlemle algoritması ile karşılaştırılması	PV, MPPT, FLC, P&Q
(Gupta vd., 2014)	Yapay zekâ tabanlı MPPT algoritması ile bulanık mantık denetleyicisinin karşılaştırılmasını	PV, MPPT, DA-DA Yükselten, FLC, ANN
(şahin vd., 2014)	Güneř enerjisi ve DA-DA dūřüren eřzamanlı dönüřtürücü kullanarak elektroliz sistemi ile hidrojen üretimi	DA-DA Dūřüren, PV, MPPT, Elektroliz, Hidrojen Üretimi
(Kumar vd., 2015)	Artırımlı iletkenlik MPPT algoritması ile bulanık mantık denetleyicisinin karşılaştırılmasını	PV, MPPT, IC, FLC, MPPT
(Haji, 2016)	Yapay sinir ağları ve FLC algoritmalarından oluşan hibrit bir algoritmanın tasarlanması	YSA, FLC, Neural Fuzzy Sistem (ANFS)
(Ahmed vd., 2019)	Farklı yük özelliklerinin MPPT kontrollü fotovoltaiik sistemi üzerindeki etkisi	PV, MPPT, P&Q, Yük Karakteriştiği DA-DA Dönüştürücü
(Çelik, 2019)	Lityum-İyon bataryalar için MPPT algoritması kullanılarak DA-DA arttıran dönüştürücü tasarımı	Yenilenebilir Enerji, Lityum-İyon Pil, MPPT
(M. Gül ve Akyüz, 2020)	Fotovoltaiik termal (PV-T) sistemi kullanarak güneş enerjisinden hidrojen üretimi	PV-T, PV, hidrojen Üretimi, PEM
(Grimm vd., 2020)	Foto elektrokimyasal ve fotovoltaiik elektroliz (PV-E) sistemlerinin hidrojen üretim teknolojisini karşılaştıran bir tekno-ekonomik analiz	PEC, PV-E, Yenilenebilir Enerji, Hidrojen Üretimi
(şahin, 2020)	MPPT kontrollü PV sistemine bağlı elektroliz dönüştürücü tasarımı	Hidrojen Üretimi, Elektroliz DA-DA Dūřüren, P&Q
(Mao vd., 2020)	Geleneksel ve akıllı kontrol algoritmalarının karşılaştırılması	Güneş Enerjisi, MPPT
(Hajihosseini vd., 2020b)	Dinamik yüklere maruz kalan güç elektroniği sistemleri (DA-DA dönüştürücüler) sınıfının istikrar problemini çözmek için bu sistemlere derin makine öğrenmesi tabanlı sistemlerin geliştirilmesini	Derin Pekiştirmeli Öğrenme, Kontrol Güç Yükleri, Ultra Yerel Model, Dönüştürücü, SM

Tablo 1 (Devam). Literatür taraması özeti

Referans	Amaç	Anahtar Kelimeler
(Ali vd., 2020)	Detaylı MPPT algoritmalarının incelenmesi	PV, MPPT
(Yap vd., 2020)	Geleneksel ve akıllı kontrol algoritmalarının karşılaştırılması	MPPT, AI, FLC, YSA, GA
(Çandır, 2021)	Değiştir ve gözlemle (P&Q) algoritması ile kısa devre akım metodu (SCCM) algoritmasından oluşan hibrit bir MPPT algoritmasının tasarımı	Aralıklı Yükselten Dönüştürücü, Kritik Akım Modu, MPPT, PV
(Rizzo ve Scelba, 2021)	YSA ve yokuş tırmanma (HC) algoritmalarından oluşan bir MPPT algoritmasının tasarımı	YSA, MPPT, HC, Elektrikli Araç, Gölgeleme, PV
(Karabinaoğlu vd., 2022)	Uzun-kısa süreli bellek (LSTM) modellemeli yapay sinir algoritması tabanlı MPPT algoritmasının önemi ve avantajları	MPPT, Derin Öğrenme, YSA, LSTM
(Rasheed, 2022)	Yapay zekâ tabanlı MPPT algoritması ile değiştir ve gözlemle algoritmalarının karşılaştırılması	MPPT, YSA, DA-DA Geri Dönüş Dönüştürücü
(Muhida vd., 2022)	Fotovoltaik– katı polimer elektroliz sisteminde MPPT algoritması kullanılarak sistem analizi	DA-DA Düşüren, PV-Katı Polimer, Hidrojen Üretimi,
(Efendi, 2022)	Gerilim kontrollü DA-DA düşüren dönüştürücü ve Arduino UNO'ya dayalı sensörler kullanan bir elektroliz cihazının tasarımını	DA-DA Düşüren, Elektroliz, Arduino, Hidrojen Üretimi
(Ahmad, 2023)	Güneş ve rüzgâr sistemlerinde kullanılabilecek basit ve yapay zekâ tabanlı MPPT algoritmalarının analizi	MPPT, Yapay Zekâ, Güneş ve Rüzgâr Enerjisi
(Talaat vd., 2023)	YSA, genetik algoritma (GA), PSO oluşan hibrit bir MPPT algoritmasının tasarımı ve analizi	Yenilenebilir enerji, Enerji Yönetimi, YSA, Optimizasyon Teknikleri
(Sabareesh vd., 2023)	Değişen hava durumu ve yüke göre derin öğrenme metodu kullanarak giriş verilerinin belirlenmesi ve artırılmış iletkenlik (IC) MPPT algoritmasının sisteme entegrasi	PV, MPPT, IC, LSTM
(Younas, 2023)	İleri beslemeli yapay ağ (FFNN) ile değiştir ve gözlemle (P&Q) algoritmasının karşılaştırılması	LSTM, FFNN, PV, MPPT

Tablo 1 (Devam). Literatür taraması özeti

Referans	Amaç	Anahtar Kelimeler
(Nasser vd., 2022)	Çeşitli su elektrolizleri kullanarak güneş ve rüzgâr enerjisinden hidrojen üretim sistemlerinin incelenmesi ve ele alınan yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet karşılaştırılmalarının yapılması	Yenilenebilir Enerji, Hidrojen Üretimi ve Ekonomisi, Düşük/Yüksek Sıcaklık Elektroliz
(Şahin, 2019)	Güneş enerjisinden faydalanmak ve onu hidrojen olarak depolamak ve depolanan enerjiyi tekrar kullanmak için 2 farklı senaryonun incelenmesi	Hidrojen Enerjisi, Kayan Tip Kontrol, DA-DA Düşüren Dönüştürücü
(Gündoğdu ve Çelikel, 2020)	YSA tabanlı bir maksimum güç noktası izleme yönteminin tasarımı	PV, ANN, DA-DA Yükselten, MPPT
(Elobaid vd., 2015)	PV panellerin verimlilik konusunu üzerinde son zamanlarda artan araştırmalara farklı bir boyut getirerek YSA algoritmalarının farklı giriş değerlerini kombine ederek farklı kontrolör modelleri ile MPPT tekniklerinin incelenmesi	YSA, MPPT, DA-DA Dönüştürücü, Kontrolör
(Shekardasht, 2016)	Yenilenebilir güneş enerjisi sisteminden elde edilen elektrik enerjisi kullanılarak elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi ve bu hidrojenin depolanması	Hidrojen Üretimi, Elektroliz, PEM Yakıt Pili, Solar Hücreler, PV
(Elyaqouti vd., 2017)	Arduino Mega kullanarak sabit P&Q ve değişken çift P&Q algoritmalarının MPPT sistemlerinde ki zaman tepkisi ve salınımlar açısından karşılaştırılması	DA-DA Yükselten Dönüştürücü, MPPT, P&Q, PV
(Turgut vd., 2019)	Hava durumu tahmini için gerekli parametrelerin sensörler ile okunması ve Arduino üzerinden bilgisayara aktarılması ve toplanan verilerin eğitilerek ağ modelinin oluşturulması	YSA, K-Nearest Neighbors, Random Forest, MATLAB, Arduino
(Aden, 2018)	Fotovoltaik kaynaktan beslenen, izole edilmemiş tek girişli-çok çıkışlı bir DA-DA düşüren dönüştürücünün tasarlanması ve gerçekleştirilmesi	DA-DA Düşüren Dönüştürücü, PI Kontrolör, Küçük İşaret Analizi,
(Şahin ve Blaabjerg, 2021)	Güç dönüşüm uygulamalarında anahtarlama işlemleri için kullanılan MOSFET elemanlarını sürme tekniklerinin incelenmesi	MOSFET, Sürücü Devreleri

2. FOTOVOLTAİK KAYNAKLI HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMİ

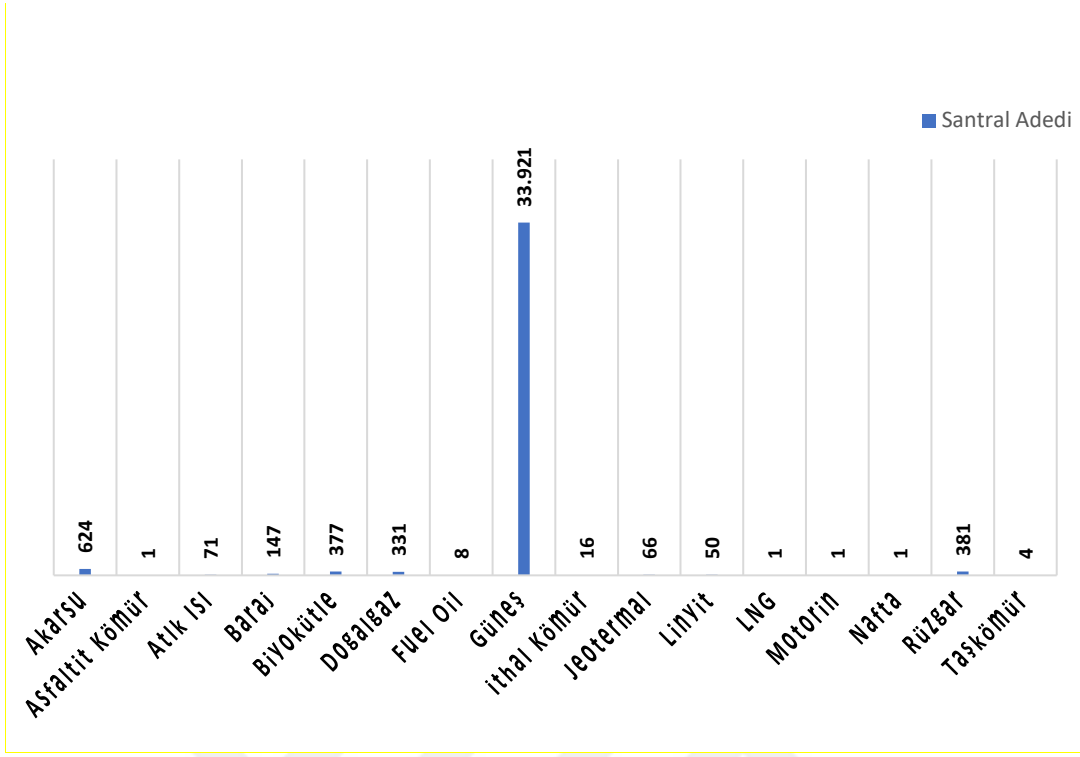
2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, Güneş'in çekirdeğinde meydana gelen termonükleer füzyon tepkimeleri sonucu oluşarak güneşten evrene ısı ve ışık olarak yayılan bir enerji türüdür. Bu enerji türü dünyamızda tükenmekte olan fosil yakıtların yerini alabilecek en önemli yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır.

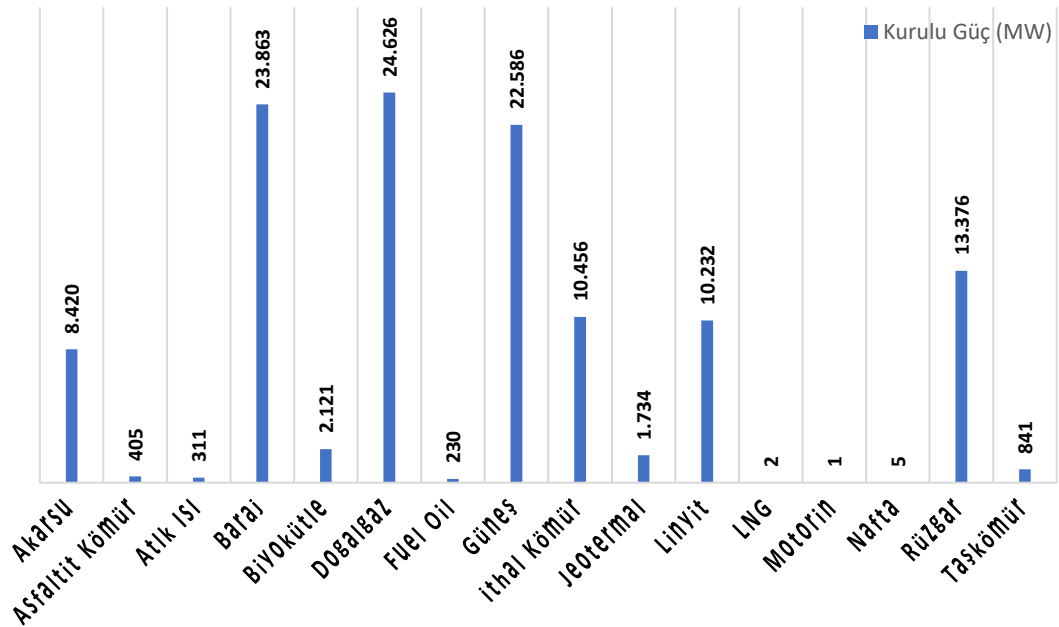
Güneş enerjisi direk olarak doğa ve canlılar için bir yaşam kaynağı olsa bile bu enerjinin dönüştürülebilir olması ve farklı alanlarda kullanılabilme fırsatının olması bu enerjinin insanlık için daha önemli bir noktaya gelmesini sağlamıştır. Gerek fotovoltaik paneller yardımıyla gerekse termal sistemler aracılığıyla ısınma, aydınlatma, ulaşım, yenilenebilir enerji, tarımsal faaliyetler ve daha birçok alanda kullanım imkânı oluşturulmuştur (Karamanav, 2007).

Türkiye'nin konumu nedeniyle güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli çok yüksektir. Son yıllarda yapılan yatırımlar ve hedeflenen projeler ile birlikte büyük şirketler ve bireysel kullanıcılar bu enerjiyi elde etmek ve ihtiyaçları doğrultusunda kullanmak için geniş arazilere ve çatılara güneş panelleri sistemleri kurmaktadır. 2025 yılı itibarıyla Türkiye'de güneş enerjisi kurulu gücü yaklaşık 23 bin MW'tır. Bu değer toplam yenilenebilir enerji kurulu gücün (69.979 MW) %32'sine ve toplam kurulu gücün (119.209) %19'una denk gelmektedir (TEİAŞ, 2025).

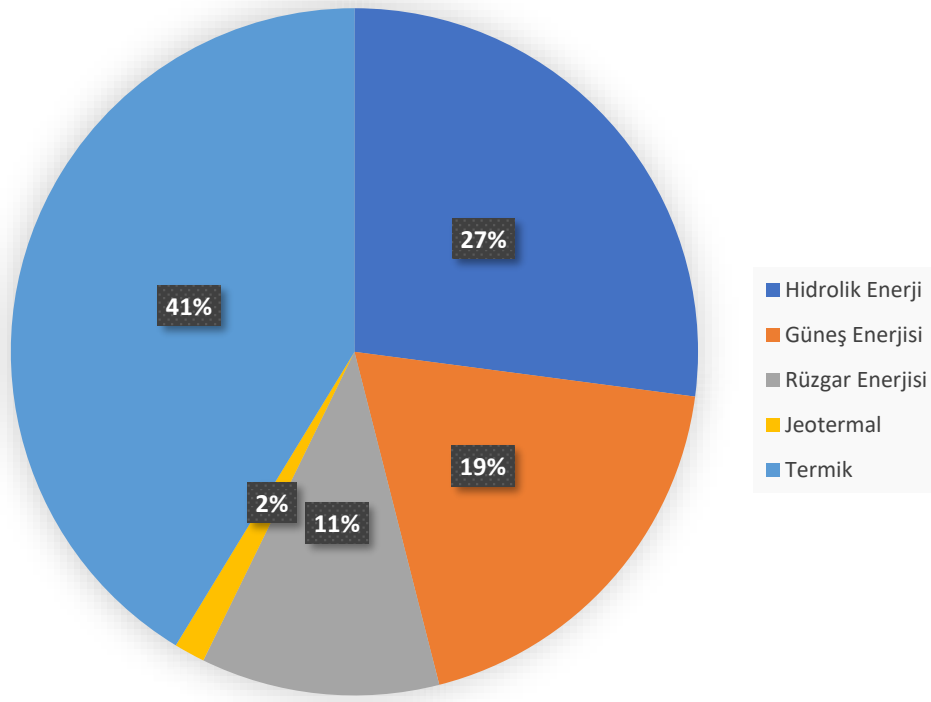
Şekil 5'te 31.05.2025 tarihi itibarı ile ülkemizde bulunan EÜAŞ, işletme hakkı devredilen, lisanssız, serbest üretim şirketi ve yap işlet devret gibi kurumlara ait santrallerin sayısı enerji kaynaklarına göre verilmiştir (TEİAŞ, 2025). Aynı şekilde Şekil 6'da bu kurumlara ait santrallerdeki kurulu güç değerleri verilmiştir (TEİAŞ, 2025). Şekil 7'de ise ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarına ait kurulu güç değerlerini gösteren bir grafik verilmiştir (TEİAŞ, 2025). Son olarak ise Şekil 8'de dünyada güneş enerjisi alanında ilk 10 da yer alan ülkelerin ve ülkemizin 2025 tarihi itibarı ile kurulu güneş enerjisi güçleri belirtilmiştir (Anonim, 2025).



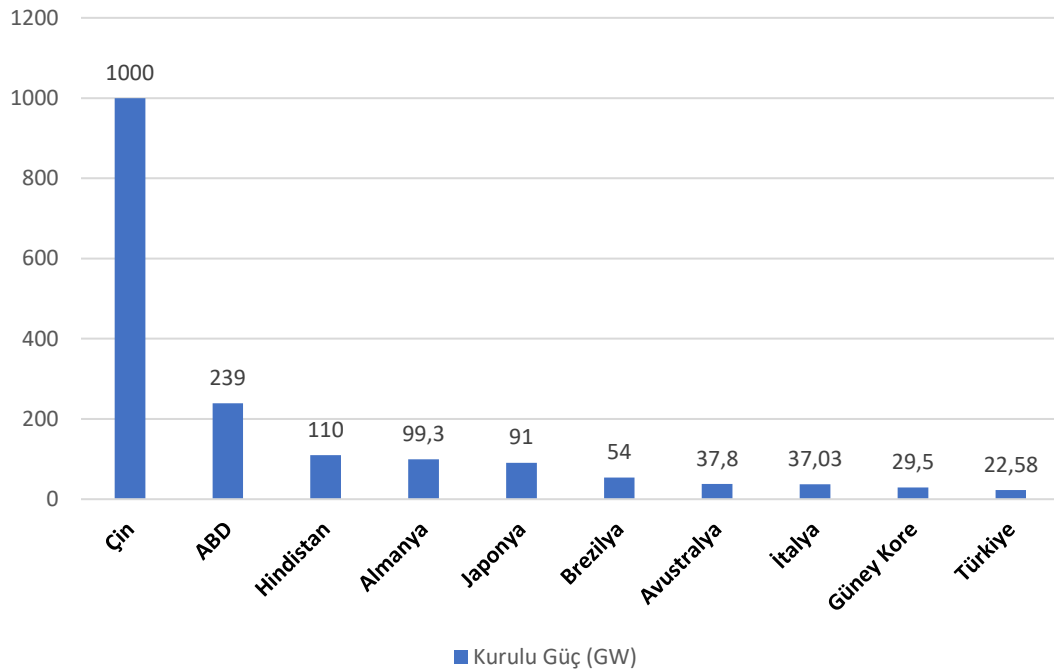
Şekil 5. 31 Mayıs 2025 tarihi itibariyle kaynaklara göre enerji santral adetleri



Şekil 6. 31 Mayıs 2025 tarihi itibariyle kaynaklara göre kurulu güç değerleri



Şekil 7. 31 Mayıs 2025 tarihi itibarı ile yenilenebilir enerji kaynakları ve termik sistemlerin kurulu güç değerleri



Şekil 8. 2025 yılı itibarı ile dünyada güneş enerjisi kurulu güç değerleri

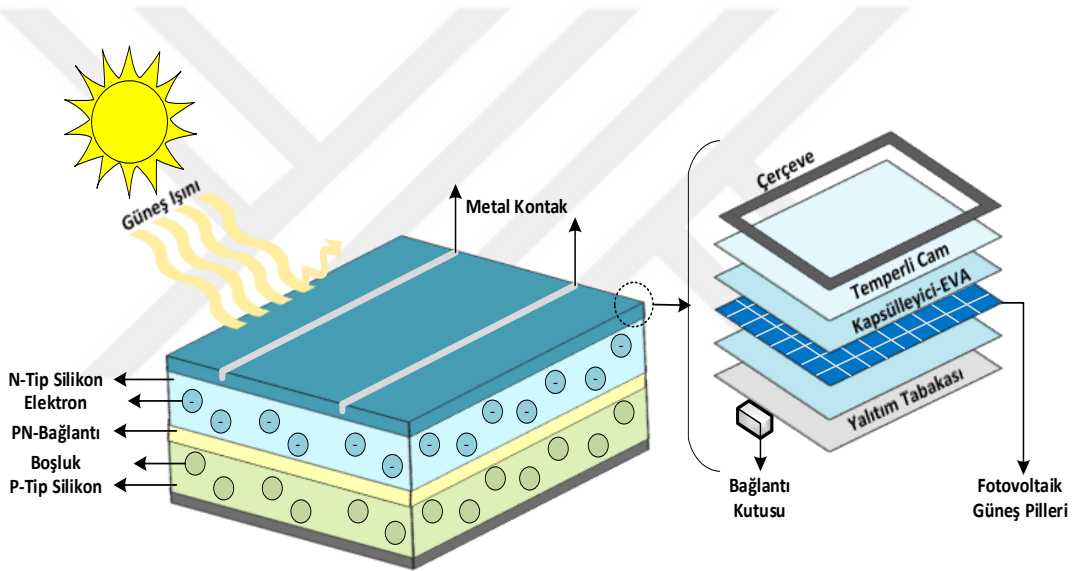
2.2. Fotovoltaik (PV) Sistemler

Fotovoltaik etki ilk kez 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından, elektrokimyasal deneyler yaparken güneş ışığına maruz kalan gümüş ve platin elektrotlarda elektrik akımının meydana gelmesinin fark edilmesiyle, keşfedilmiştir (Lameirinhas vd., 2022). 1883 yılında Charles Fritts, güneş ışığını elektriğe çeviren selenyum üzerine ince bir altın tabaka konularak oluşturulan ve düşük verimlilikte çalışan ilk fotovoltaik hücreyi oluşturmuştur (Wikipedia, 2023). 1939 yılında Russell Ohl tarafından p ve n tip katmanlar ile p-n bağlantı noktasında fotovoltaik etkinin keşfedilmesi, 1950 yılında BELL laboratuvarını tarafından modern ilk silikon güneş pilinin tasarlanmasına yol açmıştır (Lameirinhas vd., 2022; Ohl, 1946). 1958 yılında ilk olarak NASA Vanguard-1 ve ardından Rusya Sputnik-3 uzay araçlarında güneş panelleri kullanarak kısmen yakıt elde etmeyi amaçlamıştır (Alagöz, 2019). 1980-2000 yılları arasında verimlilik artışı ve maliyetlerdeki düşüş, güneş panellerinin çeşitli teknolojik ürünlerde kullanılmasına yol açmıştır. Günümüzde ise küresel ısınma ve fosil yakıtlarının rezervlerinin azalmasından dolayı özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler geniş alanlarda ve bina çatılarında enerji üretim sistemleri kurarak hem ülke ekonomilerine katkıda bulunmayı hem de çevresel sorunları önlemeyi amaçlamaktadır (Richardson, 2023).

Fotovoltaik sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bu sistemler genel olarak şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız sistemler olarak kullanılmaktadır. Şebekeye bağlı sistemler de üretilen elektrik doğrudan kullanabildiği gibi fazla enerji de şebekeye iletebilmektedir. Üretim olmadığı zamanlarda ise şebekeden enerji alabilmektedir. Şebekeden bağımsız sistemler de ise üretilen elektrik enerjisi bataryalar yardımıyla depolanarak ihtiyaç halinde kullanılır. (Gökdoğan, 2023). Fotovoltaik sistemler genel olarak güneş paneli, dönüştürücü, montaj sistemi ve kablo bağlantısı gibi malzemelerin birbirleriyle bütünleştirilmesiyle oluşturulur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan fotovoltaik sistemler; ekonomik, çevre dostu ve maliyetini kısa zamanda amorti ederek kullanıcıyı kâra geçirmesinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tarz sistemlerin uygun coğrafi bölgelere kurulması verimlilik açısından çok önemlidir. Çünkü bu sistemlerin güneş ışını ile doğrudan etkileşim kurması, gölgelenmelerden ve yağıştan oldukça uzak durması gerekmektedir.

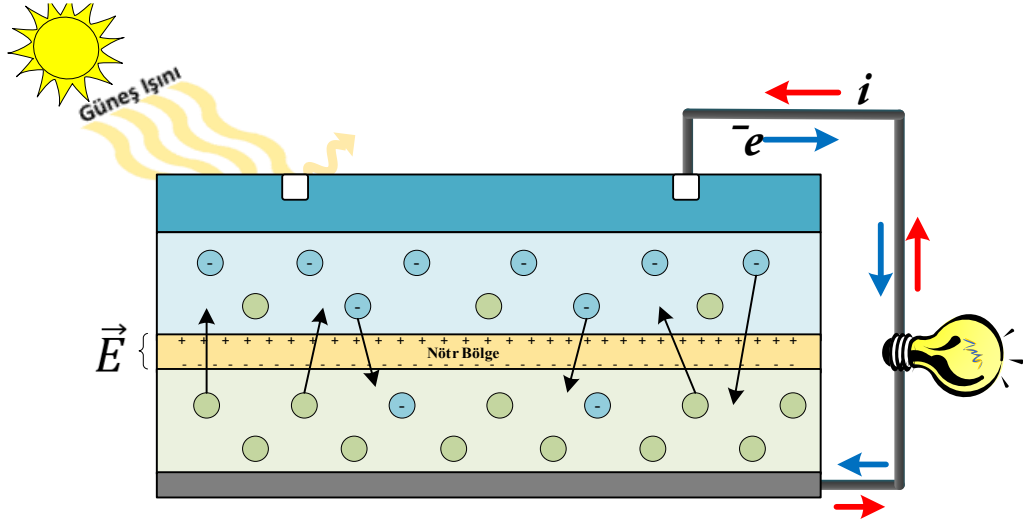
2.2.1. Fotovoltaik Panel Yapısı ve Çalışma Prensibi

Fotovoltaik paneller, silikon malzemeden üretilen ve p-n yarı iletken katmanlarından oluşan güneş pil hücrelerinden, güneş pil hücrelerinin daha fazla ışınım almasını ve sistemin korunmasını sağlayan cam tabakadan, sistemi nem ve su gibi çevresel koşullardan koruyan kaplama tabakasından, katmanları koruyan ve parçaların birbirlerine yapışmasını sağlayan Etilen-Vinil Asetat (EVA) kapsülleyicisinden, sistem bütünlüğünü ve dayanıklılığını sağlayan çerçeveden ve üretilen enerjiyi dış ortama aktarılmasını sağlayan kablo ve bağlantı kutusundan oluşan sistemlerdir. Şekil 9’da yukarda bahsedilen tüm sistemler ve katmanlar gösterilmiştir.



Şekil 9. Fotovoltaik hücrenin yapısı

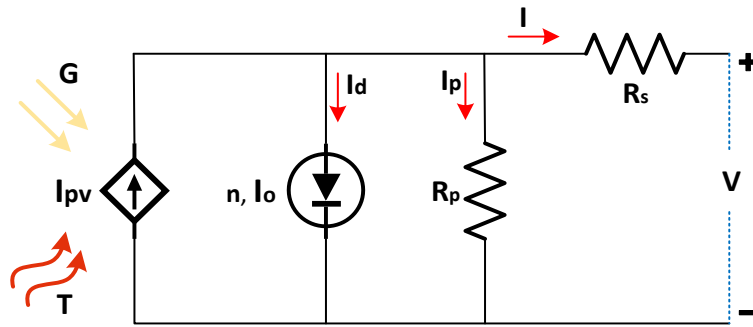
N-tip malzemeler fosfor katkısından dolayı serbest elektronlar barındırır. Aynı şekilde bor katkısından dolayı P-tip malzemelerde de oyuklar bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki elektronlar ve oyuklar birbirlerine doğru hareket ederek orta kısımda nötr bölgenin oluşmasını sağlar. Oluşan nötr bölgeye güneş ışınının gelmesiyle fotoelektrik olay gerçekleşir ve nötr bölgeden elektron kopması ile boşluklar oluşur. Oluşan elektronlar N-tip bölgesine, oyuklar ise P-tip bölgesine doğru hareket eder. N-tip bölgenin eksi (-) P-tip bölgenin ise boşluk (+) ile yüklenmesiyle bir potansiyel fark oluşur. Oluşan bu potansiyel fark sonucu Şekil 10’da gösterildiği gibi akım ve elektron akışı gerçekleşerek DC bir çıkış gerilimi oluşur (Anonim, 2020; Gökdoğan, 2023).



Şekil 10. Güneş pili hücresinin çalışma prensibi

2.2.2. Fotovoltaik Panellerin Elektriksel ve Matematiksel Modeli

Güneş pillerinin elektriksel eşdeğer devresi; sisteme etki eden ışınlam, sıcaklık ve sistem içyapısındaki değişkenlere bağlı olarak sistem çalışmasını ve çıkış değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle sistem I - V grafiğinin elde edilmesinde ve bu grafiğin analiz edilerek güneş pili yapısının incelenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 11’de belirtilen güneş pili elektriksel eşdeğer devresi; güneş ışınlamı (G), sıcaklık (T), diyot akımı (I_d), diyot ters ön gerilim doyma akımı (I_o), paralel direnç (R_p), seri direnç (R_s), yük gerilimi (V), çıkış akımı (I) ve ışığın emilimi sonucu oluşan güneş pili akımı (I_{pv}) değerlerinden oluşmaktadır (Şahin ve Okumuş, 2013).



Şekil 11. Güneş pili elektriksel eşdeğer devresi

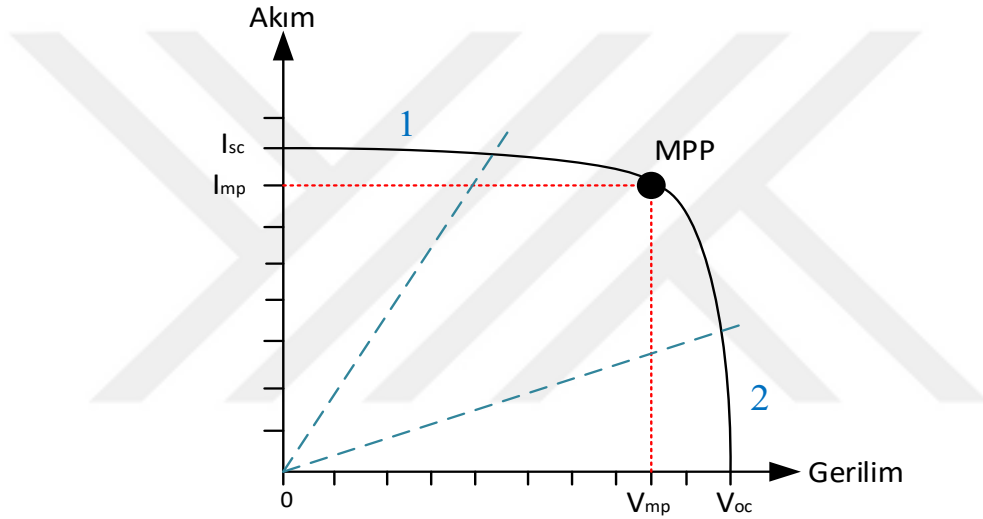
Şekil 11’de belirtilen eşdeğer devrenin akım ve gerilim matematiksel modellemeleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’ de belirtilmiştir (Hernández-Callejo vd., 2019; Lameirinhas vd., 2022; Şahin ve Okumuş, 2013).

$$I = I_{pv} - I_o \left[\left(e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{n.k.T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (1)$$

$$V = \frac{n.k.T}{q} \ln \left[\frac{I_{pv} - I_o - I}{I_o} \right] - R_s I \quad (2)$$

Bu denklemlerde diyot ideallik faktörü (n), Boltzmann sabiti (k) ve elektron yükü (q) değerleri de belirtilmiştir.

Eşitlik 1 ve 2’de belirtilen denklemler kullanılarak sabit sıcaklık ve ışıyım değerleri altında Şekil 12’de gösterilen I-V grafiği modellenmektedir. Bu grafikte kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç noktasındaki akım (I_{mp}) ve gerilim (V_{mp}) değerleri belirtilmiştir.



Şekil 12. Güneş pili akım/gerilim (I-V) karakteristiği

Devrede bulunan yük direnci çok küçük seçilirse devre Şekil 12’de gösterilen 1. bölgede bir akım kaynağı olarak çalışacaktır. Tam tersi çok büyük seçildiği zaman ise devre 2. bölgede sabit bir gerilim kaynağı görevi görecektir. Devrenin maksimum güç noktasında (MPP) çalışması için en uygun değer seçilmeli ve bu değer Eşitlik 3’te belirtilen denkleme göre maksimum güç değerinin elde edilmesini sağlamalıdır (Şahin ve Okumuş, 2013). Sistemin bu noktada çalışmasının sağlanması Eşitlik 4’te belirtilen verimlilik değerinin de maksimum olmasını sağlayacaktır.

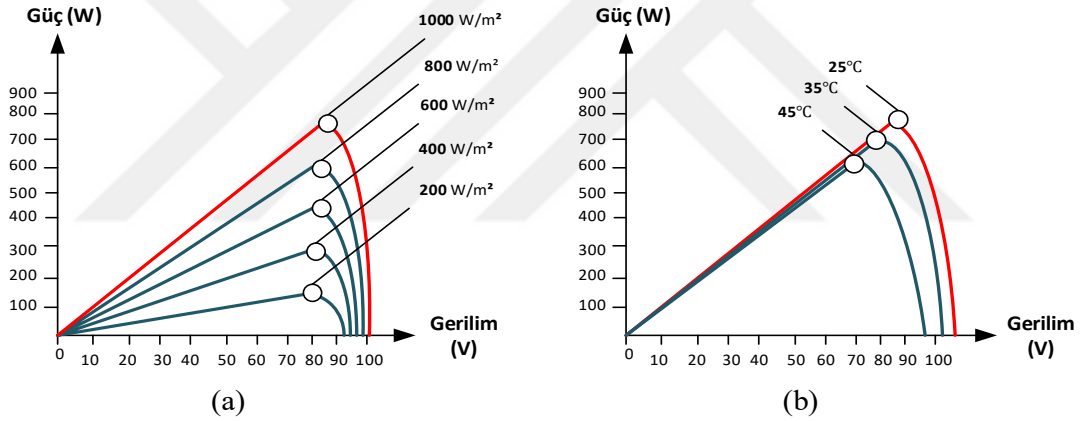
$$P_{max} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{giriş}} \quad (4)$$

2.2.3. Fotovoltaik Panelleri Etkileyen Çevresel Faktörler

Fotovoltaik paneller ışınım, sıcaklık, kısmi gölgelenme, rüzgâr hızı, kar ve yağmur yağışı gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu durumlar sistemden alınan verimi olumsuz olarak etkilemektedir.

Panellerin, Şekil 13b’de gösterildiği gibi belirli bir sıcaklıktan sonra güneş pili yapısının etkilenmesi nedeniyle verimleri düşmektedir. Yine Şekil 13a’da gösterildiği gibi güneş ışınları güneş pilinin gücüyle doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenebilmektedir. Kısmi gölgelenme (Akyürek vd., 2020), kar ve yağmur yağışı panellerin güneş ışınımı almasını engelleyeceğinden ve kirlenmesine neden olacağından dolayı olumsuz bir durum olarak ele alınmaktadır. Rüzgâr hızı ise panellerin soğuması için olumlu bir etken olduğundan dolayı rüzgâr hızının artması istenilen bir durumdur (Akal ve Akan, 2022).



Şekil 13. Güneş paneli güç-gerilim grafiği; (a) ışınım ve (b) sıcaklık değerlerine göre

PV sistemlerin verimini etkileyen çevresel faktörlere karşı aşağıda belirtilen tedbirlerin alınması üretim ve verimliliğin sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

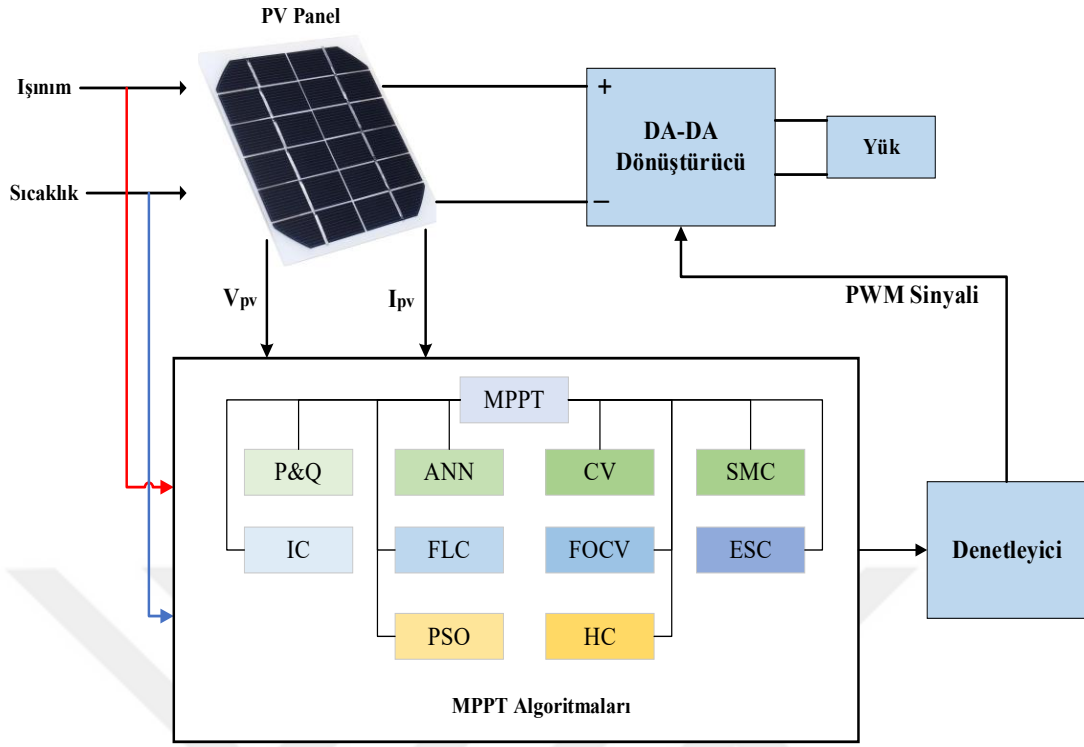
- Sıcak havalarda sistem ısınmasını engellemek için soğutma sistemleri ve panel yapısının aşırı ısınmasını engellemek için ısıya dayanıklı malzeme seçimi
- Kısmi gölgelenme sorunu yaşamamak için analizi iyi yapılmış bir yerleşim yeri ve mevsim şartlarına ayak uydurabilecek ayarlanabilir montaj sistemi
- Kar, yağmur, kir ve toz gibi durumlara karşı temizleme sistemi ve koruyucu kaplama seçimi
- Fiziki zorlanmalara karşı dayanıklı iskelet sistemi

2.3. MPPT Sistemi ve Algoritmaları

Maksimum güç noktası takip sistemleri enerji kaynağının ürettiği gücü sürekli takip ederek sistemin verimliliğinin maksimum düzeyde kalmasını sağlayan ve genel olarak güç elektroniği tabanlı sistemlerde (dönüştürücüler, motor kontrol devreleri, makine otomasyonları, güç kaynakları ve kontrol sistemleri, iklimlendirme, enerji üretim ve iletim sistemleri, vb.) tercih edilen sistemlerdir (Akın ve Şahin, 2024).

MPPT, güneş panellerinin güç çıkışını optimize etmek için fotovoltaiik (PV) sistemlerde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Sıcaklık ve ışıınım gibi çevresel değışikliklerin kontrolünü sağlayarak sistemin maksimum güç noktasında (MPP) çalışmasını sağlamaktadır. DA-DA dönüştürücülerin görev döngüsü sinyalinin kontrolünü sağlayan bu sistem PV sisteminin maksimum verimlilikte çalışmasını sağlamaktadır. Kullanılan algoritma ve malzeme yapısına bağılı olarak standart bir MPPT sistemi güç çıkışını 30%'a kadar arttırılabilmektedir. Düşük ışık koşulları altında çalışan sistemlerin performansını arttırmaktadır. Sisteme bağılı bataryaların maksimum verimlilikte şarj edilmesini sağlayarak bataryaların ömrünü uzatmaktadır. Dezavantajları olarak maliyet, kurulum aşamasındaki ince işçilik, kısmi gölgelemeye karşı anlık tepki verdiği için hızlı tepki sonucu dalgalanma, elektromanyetik parazitten dolayı sistemin elektronik olması kaynaklı dalgalanma ve yüksek sıcaklık koşullarında meydana gelen verim düşüklüğü gösterilebilir.

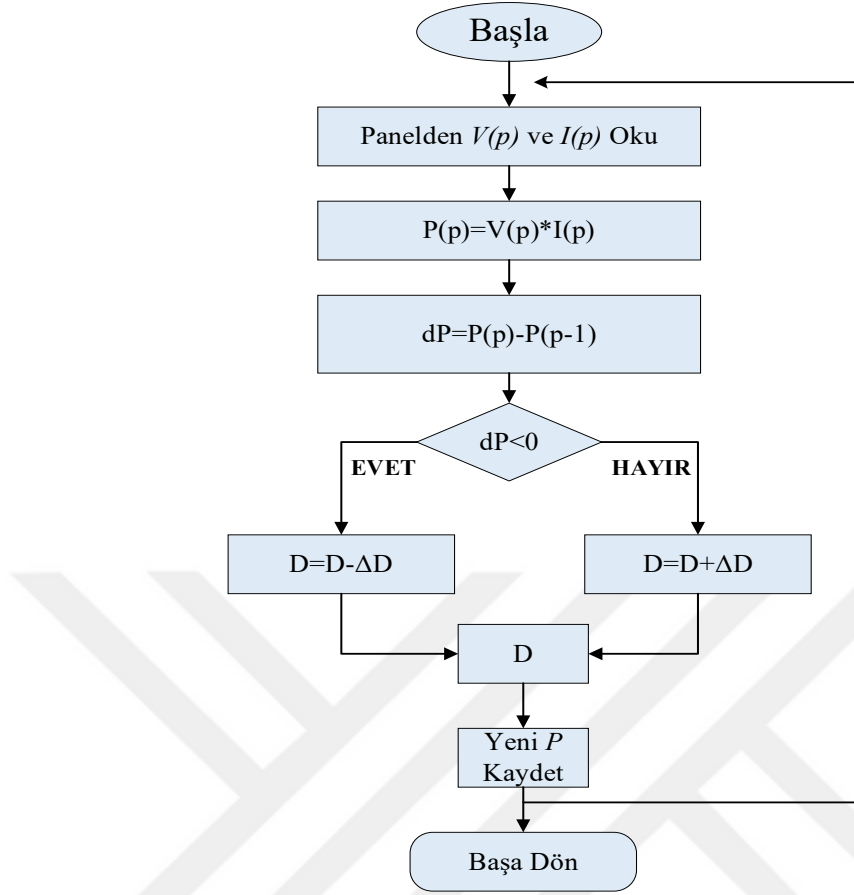
PV sisteminin yapısına ve çevresel etkilere göre tasarlanabilen ve kullanılan birçok MPPT algoritması mevcuttur. Bunları geleneksel, yapay zekâ destekli ve hibrit modeller olarak ayırabiliriz. Tüm algoritmaların belirli avantajları ve dezavantajları mevcut olmasına rağmen sistemdeki verim artışını sağladıkları için genel olarak kullanımları yaygındır. Çalışmada istenilen durumlara göre tasarlanabilen ve uyarlanabilen tepe tırmanış (HC), değıştir ve gözlemle (P&Q), artırımıli iletkenli (IC), sabit gerilim (CV), kesirli açık devre gerilim (FOCV), yapay sinir ağıları (YSA), uç nokta arama kontrolü (ESC), kayan kip kontrolü (SMC), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve bulanık mantık kontrolü (FLC) algoritmalarının genel tanımları, işleyişleri ve farkındalıkları hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. Şekil 14'te PV-MPPT sisteminin klasik tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 14. PV-MPPT sistem tasarımı

2.3.1. Tepe Tırmanış Algoritması

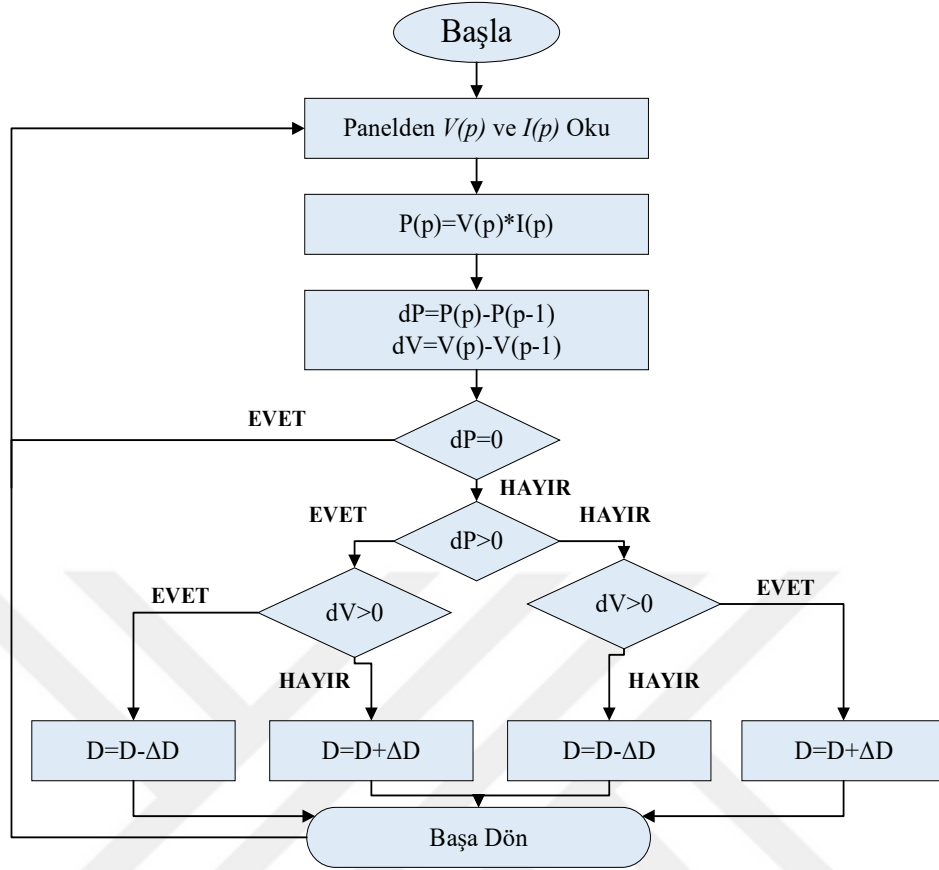
Tepe tırmanış algoritması (HC), PV sistemlerde kullanılan geleneksel maksimum güç noktası takibi algoritmasıdır. PV panelin çıkış gücünü farklı gerilim veya akım değerleri için değerlendirir ve güç çıkışını en üst düzeye çıkaran değeri seçer. Algoritma daha sonra panelin gerilimini veya akımını buna göre ayarlar ve maksimum güç noktasına (MPP) ulaşılan kadar işlemi tekrarlar. Bu işlemler sırasında DA-DA dönüştürücünün kontrolünü görev döngüsü ile sağlar. Şekil 15'te tepe tırmanış algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Bahari vd., 2016). P&Q ve IC algoritmaları tepe tırmanış algoritmasının alt dallarıdır. HC algoritmasında yapılan değişiklikler sonucu oluşmuşlardır (Jatelly vd., 2021).



Şekil 15. Tepe tırmanış algoritması

2.3.2. Değiştir ve Gözlemle Algoritması

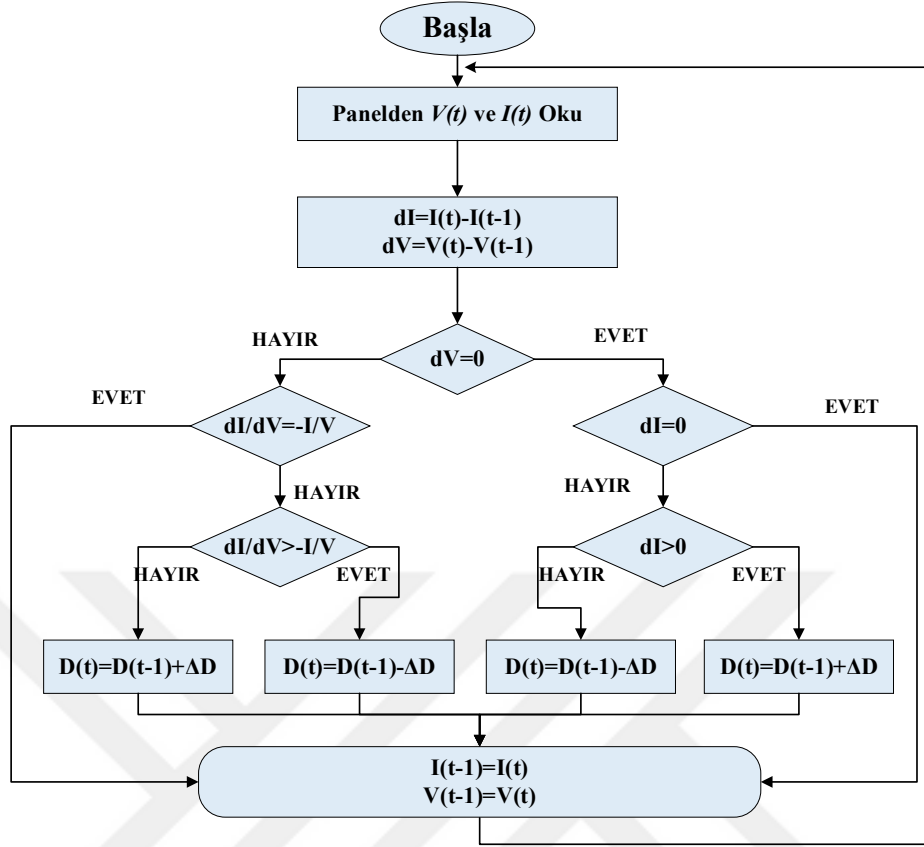
Değiştir ve gözlemle (P&Q) algoritması, PV sistemler için basit ve yaygın olarak kullanılan bir MPPT algoritmasıdır (Drir vd., 2014). PV panelin genel özellikleri P&Q algoritmasını etkilemez. Geleneksel algoritmaların hepsinde genel olarak meydana gelen MPP etrafındaki salınımlar bu algorithmada da MPPT verimliliğini çok az miktarda etkileyebilmektedir. P&Q algoritmasının genel çalışma prensibi, PV modülünün gerilimini veya akımını bozarak ve ortaya çıkan güç üzerindeki değişimleri inceleyerek sistemin MPP noktasında çalışmasını sağlamaktır. Gerilim veya akımı arttırabilmek veya azaltabilmek için bir önceki adımın gücü bir sonraki adımın gücüyle karşılaştırılır. Bu şekilde ilk başta sabit bir değer seçilen gerilim ve akım referans değerleri değiştirilir. Süreç işledikçe yani akım ve gerilim arttırılıp azaltıldıkça periyodik olarak maksimum güç noktasına ulaşılır. Şekil 16'da P&Q algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Attou vd., 2015).



Şekil 16. Değiştir ve gözlemle MPPT algoritması

2.3.3. Artırımlı İletkenlik Algoritması

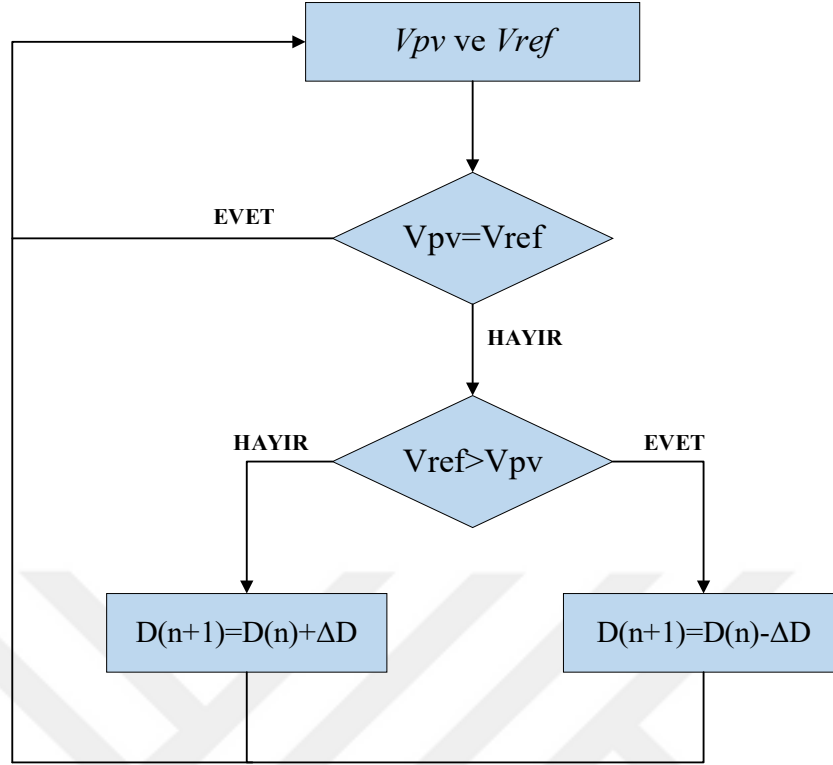
Artırımlı iletkenlik (IC) algoritması yakınsama hızı ve sabit durum hatası gibi P&Q yönteminin bazı sınırlamalarının üstesinden gelmek için önerilen bir MPPT algoritmasıdır (Hussein vd., 1995). P&Q algoritması gibi PV panelin özelliklerinden ve çevre koşullarından bağımsız olarak çalışır. P&Q algoritmasına göre daha gelişmiş daha hızlı ve daha verimli bir algoritmadır. Prensip olarak IC algoritması, PV panelden elde edilen anlık gerilim ve akım değerlerini önceden ölçülen değerlerle karşılaştırarak çalışır. Algoritma bu karşılaştırmayı temel alarak, PV panelin güç- gerilim (PV) eğrisinin eğimini hesaplar. Şayet hesaplanan eğim sıfırsa sistem mevcut hali ile Maksimum güç noktasında (MPP) çalışıyordur ve sistem bu çalışma noktasını korumaya devam eder. Fakat eğim pozitif veya negatif ise algoritma, PV panelin çalışma noktasını MPP' ye ulaşacak şekilde ayarlar. Şekil 17'de IC algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (EL vd., 2016).



Şekil 17. Artırımlı iletkenli algoritması

2.3.4. Sabit Gerilim Algoritması

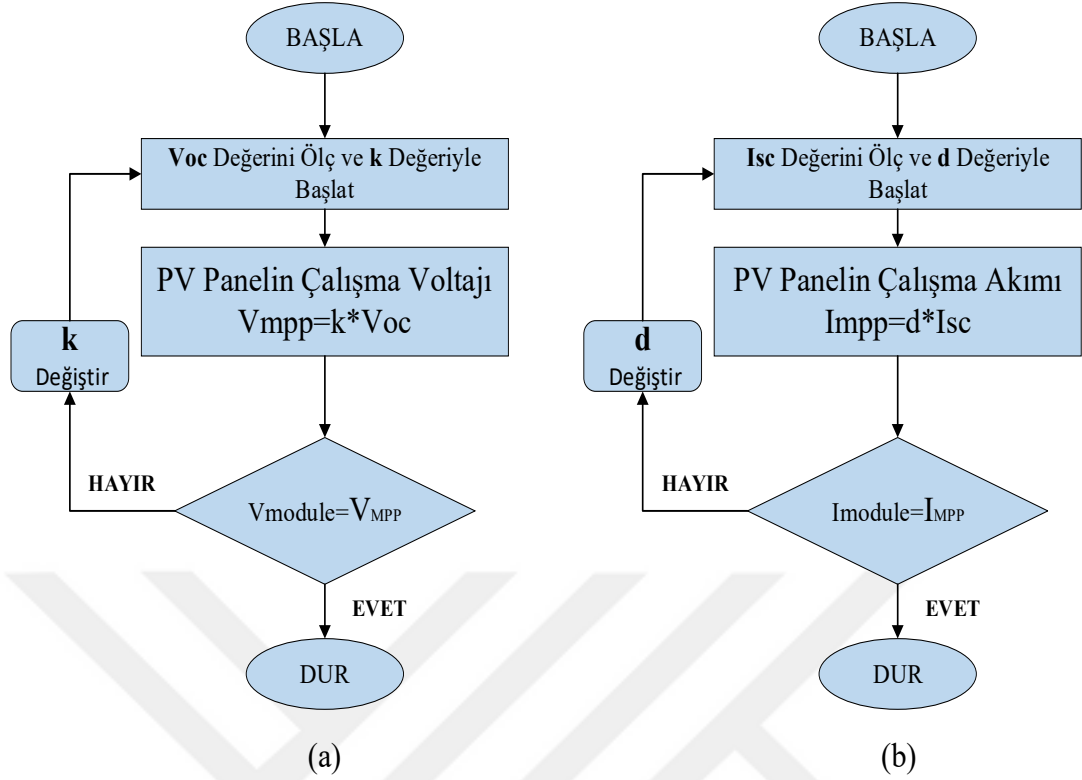
Sabit gerilim (CV) algoritması sıcaklık ve ışıınımdan bağımsız olarak maksimum güç noktasını sabit bir gerilimde dengelemeyi sağlayan bir algoritmadır. Çalışma prensibi bakımından sıcaklık ve ışıınımdan bağımsız olduğu için değişen çevre koşullarına göre P&Q ve IC algoritmaları kadar verimli olamayabilir. Bu dezavantaja rağmen avantajlı kısmı ise nispetten basit yapılı olması ve yalnızca birkaç sensör kullanarak gerilim ve akım değerlerine göre çalışmasıdır. Genel çalışma prensibi; PV panelin çıkışından elde ettiği gerilim değerini sabit tutarak sistemin MPP’de çalışması için panelin çıkış akım değerini ölçer ve istenilen durum için akım değerini arttırıp azaltarak sistemin görev döngüsünü (duty cycle) ayarlar. DA-DA dönüştürücüye bağlı olan görev döngüsü ise dönüştürücünün açılıp kapanma süresini kontrol ederek PV panel üzerindeki akım kontrolünü sağlar. Şekil 18’de sabit gerilim algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Liu vd., 2014).



Şekil 18. Sabit gerilim algoritması

2.3.5. Kesirli Açık Devre Gerilim Algoritması

Sabit gerilim algoritmasının bir uzantısı olan kesirli açık devre gerilim algoritması (FOCV) bilinen en basit maksimum güç noktası takip algoritması olarak kabul edilir. Fotovoltaik panelin özellikleri ve çevre koşullarından etkilenir. PV panelin açık devre gerilimi (V_{oc}) ışınım değeriyle doğru sıcaklıkla ters orantılı olarak ölçülen bir değerdir. Bu değer yaygın olarak kullanılan $k=0,76\%$ (k değeri 70-80% arasında değişiklik gösterebilmektedir) değeriyle çarpılması sonucu maksimum güç noktası değerine karşılık gelen gerilim değeri bulunur. Bu değer modül değeriyle karşılaştırılarak istenilen şartların oluşması durumunda DA-DA dönüştürücü panelin çalışma noktasını MPP gerilimine göre ayarlar. Şekil 19(a)'da FOCV, Şekil 19(b)'de kesirli kısa devre akım (FSCC) algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Kumari vd., 2011).



Şekil 19. (a) Kesirli açık devre gerilim ve (b) Kesirli kısa devre akım algoritması

2.3.6. Yapay Sinir Ağları Algoritması

Yapay sinir ağları modelleri (YSA) insan beyninin fonksiyonel işlevlerinden esinlenerek oluşturulmuştur. Öğrenebilen bir yapısı olan bu modeller algılama, kontrol ve analiz yapma, verileri saklama ve bu verilerden çıkarım yapabilme gibi birçok yeteneğe sahiptir. En genel tanımıyla ele aldığımız bu sistem günlük yaşamda birçok yerde kullanıldığı gibi PV panellerin maksimum güç noktası takip sistemlerinde de kullanılmaktadır. YSA algoritması giriş akımı, giriş gerilimi, ışınlam ve sıcaklık gibi giriş verilerini kullanarak sürekli bir şekilde PV sisteminin davranışını inceler ve sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlar. Bu algoritmanın hızlı ve verimli çalışabilmesi çok fazla miktarda girdi değerleriyle ilgili veri setleri olmalıdır. Bu veri setleri YSA algoritmasının genel çalışma prensibine uygun olarak eğitilmeli ve sistemin ihtiyacına göre tasarlanan algoritma işleyişi içerisinde test verileri kullanılarak test edilmelidir. Hata hesaplaması ve geri besleme düzeltmesi olarak kare hata algoritması kullanılmaktadır (Chtouki vd., 2018).

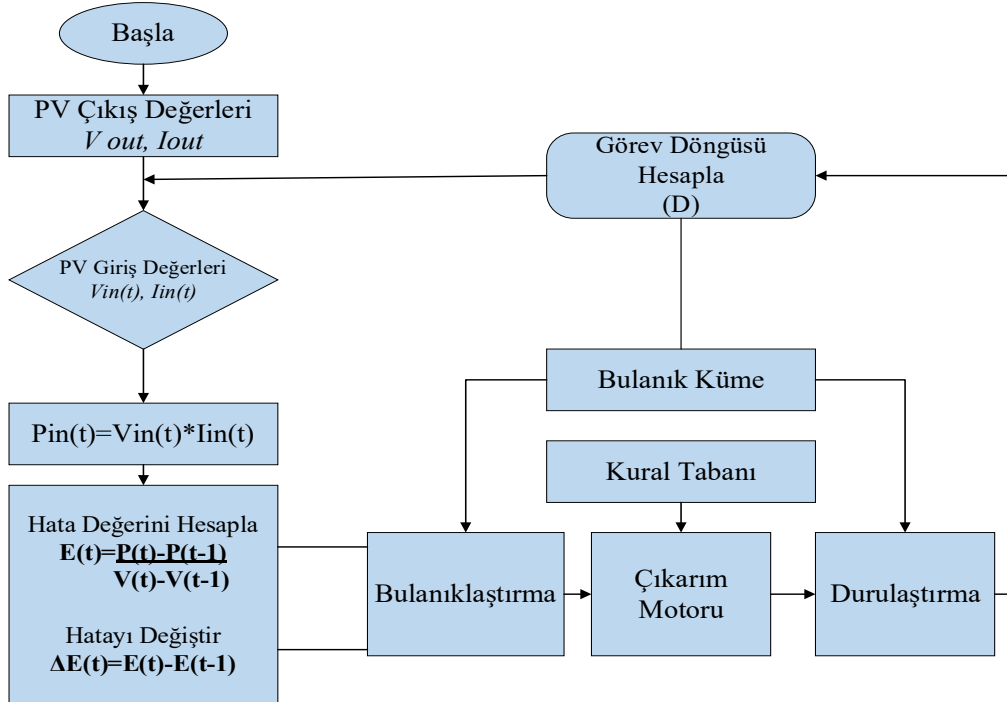
Şekil 20’de gösterilen YSA-MPPT algoritması tasarımında da görüldüğü gibi belirli katmanlar mevcuttur. Girdi katmanı, gizli katman, aktivasyon katmanı ve çıktı

katmanı olarak ayrılırlar. Bu katmanlardan gizli katmandaki düğümler (nöronlar); giriş ve çıkış düğümlerinden, eğitim algoritmasından, ağ yapısından ve aktivasyon fonksiyonunun türünden etkilenir (Alsugair ve Al-Qudrah, 1998). Verinin büyüklüğü ve çıktı değerinin doğruluk değerinin daha iyi olması bu katmanların sayısını değiştirebilmektedir. YSA algoritması doğrusal olmayan modellerde geleneksel sistemlere göre yüksek doğruluk, verimlilik, az dalgalanma ve daha iyi tepki süresine ulaşabilmektedir. Sürekli değişen çevre koşullarına daha iyi yanıt vermektedir.

Şekil 20. MPPT-YSA algoritması ile PV sistem tasarımı ve kontrolü

2.3.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritması

Bulanık mantık kontrolü (FLC), matematiksel olarak modellenmesi zor olan karmaşık sistemleri kontrol etmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Birçok uygulama alanı olduğu gibi PV sistemlerin maksimum güç noktasını izleme işlemi olan, PV sistemlerdeki, maksimum güç noktası takibinde de kullanılmaktadır. PV panelin gerilim ve akım değerlerinin girdi olarak kullanan sistem çıktı olarak DA-DA dönüştürücüleri kontrol etmek için kullanılan görev döngüsü (duty cycle) değerini oluşturabilir. Çevresel koşullardan, panel yapısından ve kendi iç tasarım parametrelerinden etkilenen FLC sistemi üç ana basamaktan oluşmaktadır. Bunlar; bulanıklaştırma (fuzzication), kural tabanı değerlendirme (rule base) ve durulaştırma (defuzzication) basamaklarıdır. Bulanıklaştırma basamağında giriş değerleri üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık kümelerle eşleştirilir. Bulanık kural tabanı, kontrol edilen parametreler için bulanıklaştırılmış tüm girdiler için kullanılan "Eğer ... o zaman ..." fonksiyonlarının bir kombinasyonudur (Kumar vd., 2015). Durulaştırma birimi ise DA-DA dönüştürücü kontrolü için gerekli görev döngüsünü değeri için net bir çıktının olduğu basamaktır. Şekil 21’de MPPT tabanlı bulanık mantık algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Baramadeh vd., 2021).



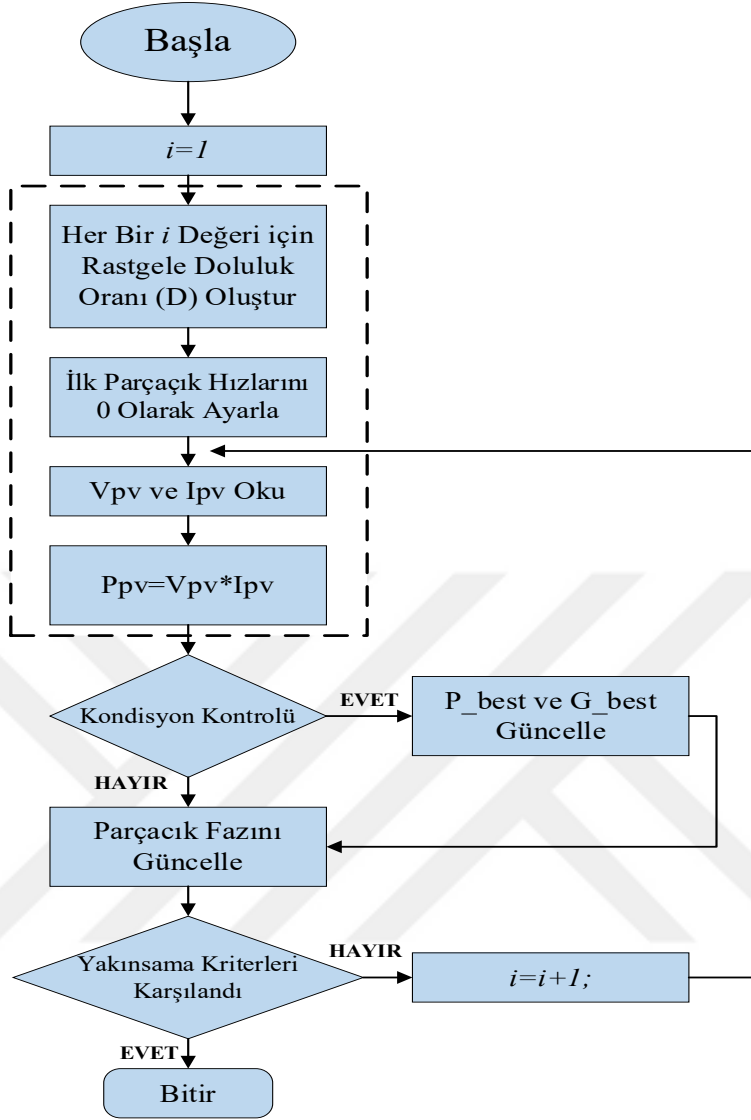
Şekil 21. Bulanık mantık kontrol algoritması

2.3.8. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), kuş sürüleri ve balık sürüleri gibi sosyal hayvanların toplu davranışlarından ilham alan popülasyon tabanlı ve birçok yerel optimal noktaya sahip çok değişkenli bir fonksiyon optimizasyonuna uygulanabilen basit ve etkili bir meta sezgisel yaklaşımdır (Miyatake vd., 2011).

Optimum çözüme ve çözüm uzayına ulaşmak için her bir parçacık popülasyonu kullanılır ve her parçacık, problemin potansiyel bir çözümünü temsil eder. Çözüm uzayındaki parçacığın konumu, bir dizi parametre değerine karşılık gelir. Parçacığın hızı, çözüm uzayındaki hareketinin yönünü ve hızını belirler. Her yinelemede, her bir parçacığın uygunluğu, optimize edilen fonksiyon olan amaç fonksiyonuna dayalı olarak değerlendirilir. Parçacıklar konumlarını ve hızlarını kendi deneyimlerine ve sürüdeki diğer parçacıkların deneyimlerine göre günceller (Kalaiarasi vd., 2018). Bu süreç, maksimum yineleme sayısı veya amaç fonksiyonunda minimum iyileştirme gibi bir durdurma kriteri karşılanana kadar devam eder.

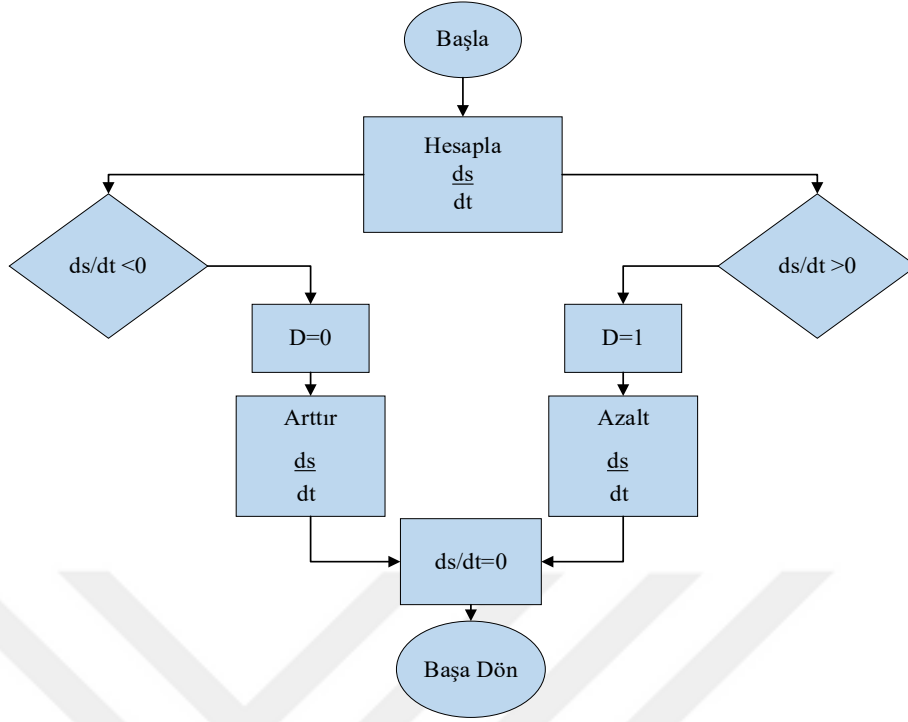
Genel çalışma şekli kısaca belirtilen PSO, PV sistemlerde maksimum güç noktasını aramak için DA-DA dönüştürücünün görev döngüsünü optimize ederek sistemin maksimum güç noktasında kalmasını da sağlamaktadır (Ishaque vd., 2012). Sistemdeki görev döngüsü PSO’da optimize edilen parametredir ve bu değer parçacıkların konumuna ve hızına göre sürekli değişmektedir. PSO ‘u diğer MPPT algoritmaları ile kıyasladığımızda basitlik, hız, ölçeklenebilirlik, sağlamlık, daha az hesaplama ve sağlamlık gibi konularda belirli avantajları bulunmaktadır (Belghith vd., 2016). Şekil 22’de PSO algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Da Rocha vd., 2019).



Şekil 22. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması

2.3.9. Kayan Kipli Kontrol Algoritması

Kayan kipli kontrol (SMC) algoritması, fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleme için kullanılabilen kontrol algoritmalarındandır. SMC, PV güç çıkışı ile MPP arasındaki farkı temsil eden bir kayma değeri hesaplar (Şahin, 2019). Bu değer DA-DA dönüştürücünün görev döngüsünü ayarlayarak kayma değerini sıfıra eşitlemeye zorlar. SMC, kararlılık, parametre değişimlerine karşı sağlamlık, hızlı dinamik yanıt ve uygulanmasında basitlik gibi önemli avantajları vardır (Prabhakaran ve Mathew, 2016). Şekil 23'te kayan mod kontrolü algoritmasının genel akış şeması gösterilmiştir (Mostafa vd., 2020).



Şekil 23. Kayan kipli kontrol algoritması

2.3.10. Ekstremum Arama Kontrol Algoritması

PV sistemlerinde maksimum güç noktası için kullanılan MPPT uygulamalarından biriside uç nokta arama kontrolü (ESC)' dür. ESC algoritması dinamik sistemlerin gerçek zamanlı optimizasyonu ve sistemlerin uç noktalarının (maksimum-minimum) takibinde kullanılmaktadır (Silveira vd., 2021). Genel olarak, ESC'nin iki temel prensibi vardır: Birincisi, bilinmeyen fonksiyonun en uç noktasını arar; ve ikincisi, sistemi kontrol edebilmeli ve dengeleyebilmelidir (Luo vd., 2014). Bu amaçla, ESC'ye odaklanan algoritmalar, harici bir bozulma sinyali seçilir ve kontrol eylemini çıkış sistemi yanıtının bir fonksiyonu olarak kullanır (Luo vd., 2014). Genel olarak, sinüzoidal sinyal, ESC tasarımında bir bozulma olarak seçilir ve bu bozulmanın genliği, çıkış yanıtı etrafındaki doğruluk, hız, yakınsama alanı ve salınım ile ilgilidir (Atta vd., 2017).

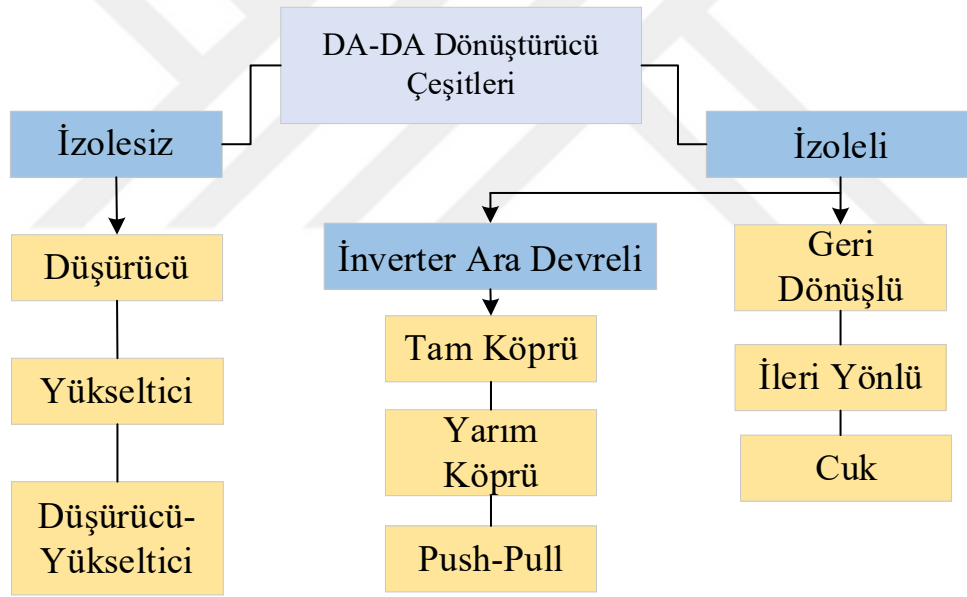
ESC algoritması, PV sistemlerinde ölçülen gücü kullanarak değişken bozulma sinyal genliği elde etmek için bir döngü kullanır. Bu döngü sayesinde sistemin görev döngüsünü kontrol eder ve sistemin maksimum güç noktasında kalmasını sağlar (Bizon, 2016).

2.4. DA-DA Dönüştürücüler

DA-DA dönüştürücü, doğru akım elektrik enerjisini bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine dönüştüren elektronik bir cihaz veya devrelere verilen genel bir addır. DA-DA dönüştürücülerin genel amacı gerilim seviyesini artırarak veya azaltarak giriş gücünün, dönüşüm esnasında meydana gelen kayıplar hariç, çıkış gücüne yaklaşık olarak eşit olmasını sağlamaktır.

Dönüştürücüler genel olarak elektronik cihazlarda, elektrikli araçlarda, yenilenebilir enerji sistemlerinde ve endüstriyel ekipmanlarda enerjiyi verimli bir şekilde yönetmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

DA-DA dönüştürücüler temel olarak endüktanslı (izolasyonsuz, tek çıkışlı) ve transformatörlü (izolasyonlu, tek veya çok çıkışlı) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Bodur, 2010). Şekil 24'te DA-DA dönüştürücü çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 24. DA-DA dönüştürücü çeşitleri

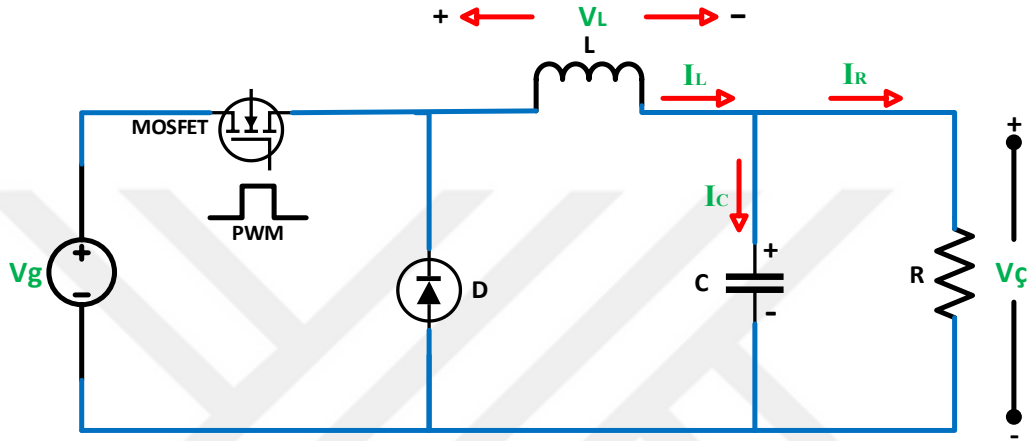
DA-DA dönüştürücüler, farklı güç uygulamaları ve verimlilik gereksinimleri göz önüne alındığında Tablo 2’de belirtildiği üzere birçok çeşidi mevcuttur. Tablo 2’de bu dönüştürücülerin tanımları, önemli formülleri ve kullanım alanları belirtilmiştir.

Tablo 2. DA-DA dönüştürücü çeşitleri

Dönüştürücü Çeşidi	Tanım	Formül	Kullanım Alanları
DA-DA Düşüren Dönüştürücü	Bir transistör (anahtar görevi gören), bir diyot, bir indüktör ve bir kapasitörden oluşan giriş gerilimini daha düşük gerilimlere düşüren dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o}{V_{in}}$ $\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \times \frac{D \cdot T}{L}$ $\eta = \frac{P_o}{P_{in}}$	Pil ömrünü uzatmak için pille çalışan cihazlar Dizüstü bilgisayarlar PC'ler ve düşük güçlü cihazlar için güç kaynakları Otomotiv uygulamalarında gerilim regülasyonu
DA-DA Yükselten Dönüştürücü	Enerjiyi bir indüktörde depolayarak bir anahtar ve bir diyot tarafından kontrol edilen giriş gerilimini daha yüksek gerilimlere yükselten dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o}$ $\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} \times \frac{D \cdot T}{L}$ $\eta = \frac{P_o}{P_{in}}$	Daha yüksek gerilim gereksinimleri için LED sürücüleri Çıkışın akü gerilimini üzerinde ayarlanması gereken aküyle çalışan sistemler Gerilim çıkışını artırmak için fotovoltaik sistemler gibi yenilenebilir enerji uygulamaları
DA-DA Düşüren-Yükselten Dönüştürücü	Hem düşürücü hem de yükseltici dönüştürücülerin çalışma prensiplerini barındıran ve çıkış gerilimini polaritesini tersine çevirebilen dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o}{V_o - V_{in}}$ $\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} \times \frac{D \cdot T}{L}$	Akü geriliminin gerekli gerilimin üstünde veya altında olabileceği, pille çalışan elektronik cihazlar Ters gerilim gerektiren cihazlar için güç kaynağı Bir aracın elektrik sistemindeki gerilimleri düzenlemek için otomotiv güç sistemleri
Cuk Dönüştürücü	İki indüktör, iki kapasitör, bir anahtar ve bir diyottan oluşan, enerjiyi ortadaki kapasitör aracılığıyla aktararak daha düzgün bir çıkış elde edilmesini sağlayan dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o}{V_o - V_{in}}$ $\Delta I_{L1} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L_1}$ $\Delta I_{L2} = \frac{V_o \cdot (1 - D) \cdot T}{L_2}$	Yüksek verimlilik ve düzgün gerilim regülasyonu gerektiren uygulamalar Gürültünün en aza indirilmesinin kritik olduğu güç kaynakları Elektrikli araçlarda rejeneratif fren sistemleri
Geri Dönürlü Dönüştürücü	Anahtarlama döngüsünün kapalı süresi boyunca enerjiyi girişten çıkışa aktarmak ve izolasyon sağlamak için bir transformatör kullanan giriş gerilimini arttırabilen ve düşürebilen yalıtılmış bir dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o}{V_{in}} \times \frac{N_p}{N_s} \times \frac{1}{\eta}$ $\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L}$	Anahtarlama mod güç kaynakları (SMPS) Pil şarj cihazları ve adaptörler Galvanik izolasyon gerektiren güç kaynakları
İleri Yönlü Dönüştürücü	Anahtarın açık olduğu süre boyunca enerjiyi transformatör aracılığıyla doğrudan çıkışa aktaran ve galvanik izolasyon sağlayan daha yüksek güç seviyeleri için tercih edilen bir dönüştürücü çeşididir.	$D = \frac{V_o}{V_{in}} \times \frac{N_p}{N_s}$ $\Delta I_L = \frac{n \cdot V_{in} \cdot D \cdot T}{L}$	Geri dönüş dönüştürücülerden daha yüksek güç uygulamaları Endüstriyel güç kaynakları Telekomünikasyon ekipmanı güç kaynakları

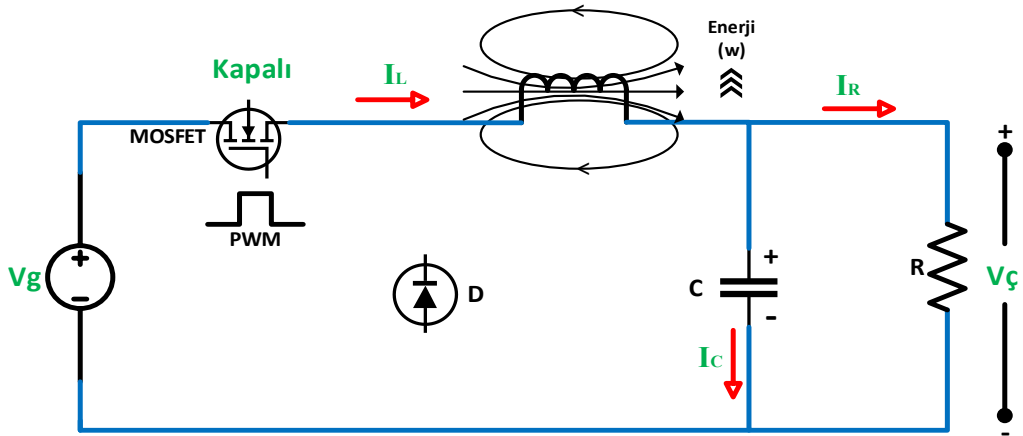
2.4.1. DA-DA Düşüren Dönüştürücü ve Çalışma Prensipleri

DA-DA düşüren dönüştürücü temel olarak Şekil 25'te gösterildiği gibi bir MOSFET (anahtarlama elemanı olarak), bir diyot, bir bobin ve yüke paralel bağlanan bir kapasitörden oluşmaktadır. Sistemin amacı giriş gerilimini minimum kayıp ile istenilen daha küçük çıkış gerilim değerine düşürmektir. Bu sistemler anahtarlama elemanının açık veya kapalı olması durumuna göre çalışmaktadır.



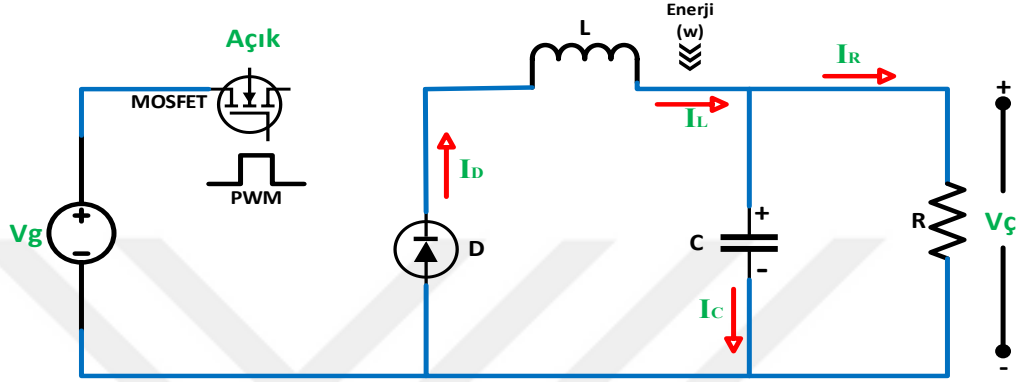
Şekil 25. DA-DA düşüren dönüştürücü devresi

Anahtarlama elemanı kapandığı zaman bobin üzerinde ki akım lineer olarak artar ve bobin üzerinde manyetik enerji birikimi meydana gelir. Şekil 26'da gösterildiği gibi diyot kesimde olduğu için çıkışta bulunan direnç ve kondansatör bobinde biriken bu enerji ile beslenir. Devrede bulunan kapasitör çıkış gerilimini düzeltir.



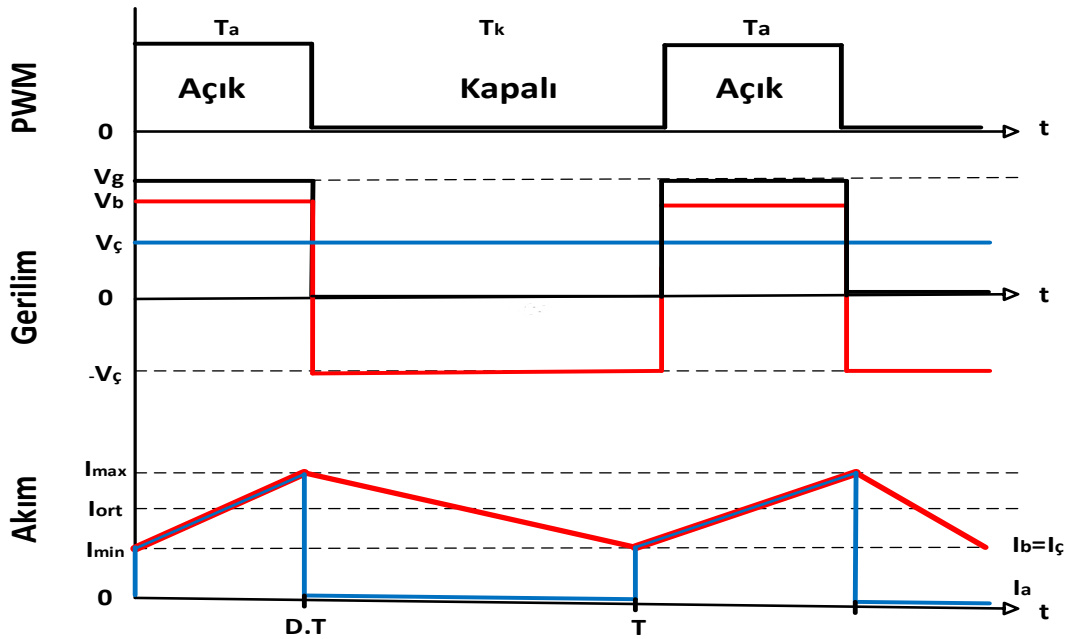
Şekil 26. MOSFET iletimde olduğu durumda devre şeması

Anahtarlama elemanı açıldığı zaman bobin üzerinde biriken manyetik enerji aniden boşalmaz. Depolanan enerji sayesinde devrenin diyot üzerinden tamamlanması sağlanır ve bobin enerjisi kondansatör ve direnç üzerine aktarılır. Bu durum çıkış geriliminin sabit kalmasını sağlamaktadır. Şekil 27’de anahtarlama elemanının açık olduğu durum gösterilmiştir.



Şekil 27. MOSFET iletimde olmadığı zaman devre şeması

Devrede bulunan anahtarlama elemanının açık ve kapalı olduğu durumlarda sistemde meydana gelen bobin gerilimi (V_b), bobin akımı (I_b), giriş gerilimi (V_g), çıkış gerilimi ($V_ç$) ve ana akım (I_a) dalga şekilleri Şekil 28’de gösterilmiştir.



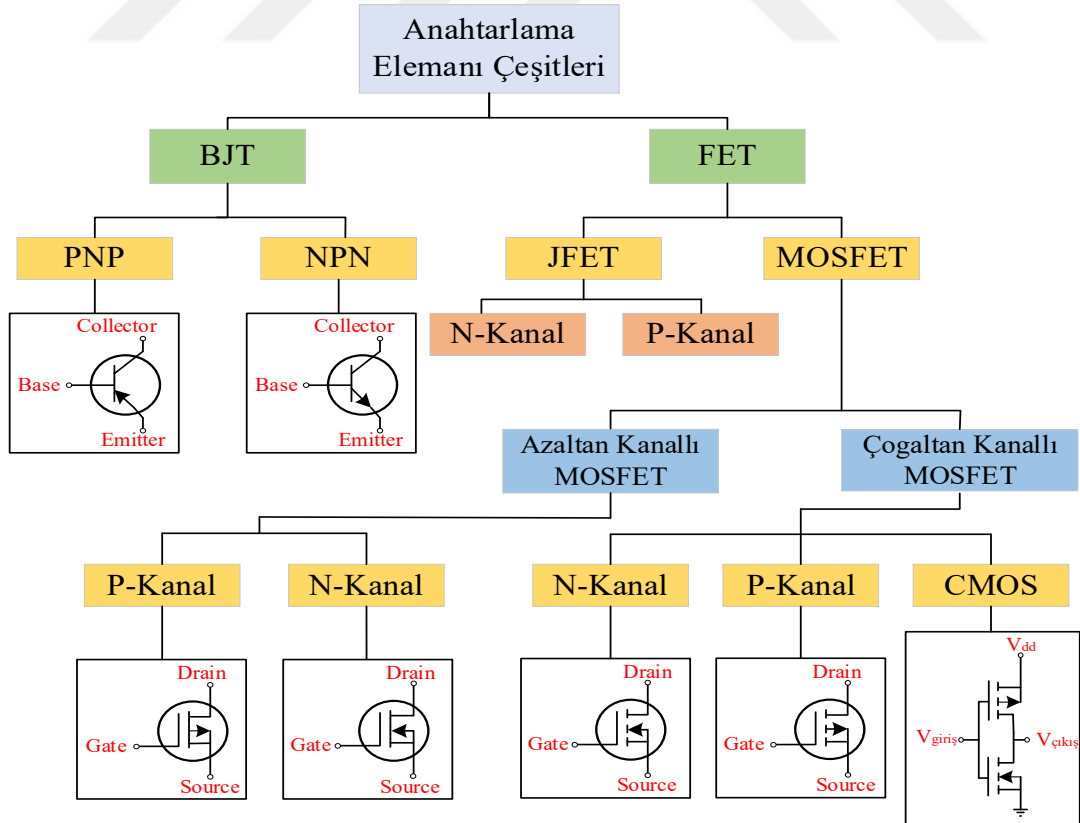
Şekil 28. DA-DA düşüren dönüştürücünün anahtar durumuna göre giriş-çıkış gerilimleri ve bobin akım dalga şekilleri

Tablo 3’te DA-DA düşüren dönüştürücü devresinde kullanılan temel formüller belirtilmiştir.

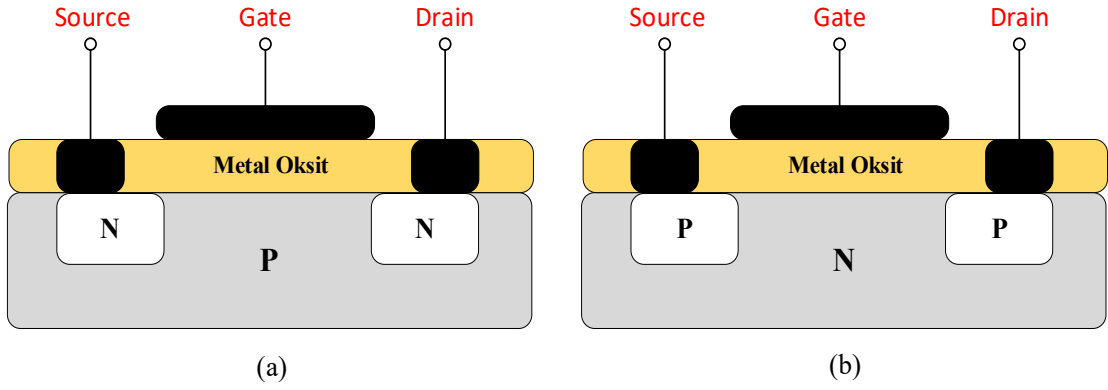
Tablo 3. DA-DA düşüren dönüştürücü devre formülleri

	D	L	C	I _L
Formül	$D = \frac{V_o}{V_{in}}$	$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f}$	$C = \frac{(1-D)V_o}{8Lf^2\Delta V_o}$	$\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \times \frac{D \cdot T}{L}$
D= Doluluk oranı V _o = Çıkış gerilimi V _{in} = Giriş gerilimi L= Bobin değeri C= Kondansatör değeri R= Direnç değeri f= Frekans T= Periyot V _o /ΔV _o = Çıkış gerilimindeki dalgalanma				

Bu tarz devrelerde anahtarlama elemanı sistemden en iyi sonucu elde etmek için belirlenen frekansta anahtarlama yapmak zorundadır. Yüksek frekanslarda çalışan bu devre elemanları anlık olarak ilettime ve kesime girerek bir nevi anahtarlama görevi görmektedir. DA-DA dönüştürücülerde bu anahtarlama görevi için genellikle yüksek frekans, düşük iç direnç ve gerilim kontrollü yapısı nedeniyle MOSFET’ler tercih edilmektedir. Şekil 29’da temel anahtarlama elemanlarının çeşitleri, Şekil 30’da NPN – PNP tipi MOSFET yapıları gösterilmiştir (Anonim, 2016; Şahin ve Blaabjerg, 2021).

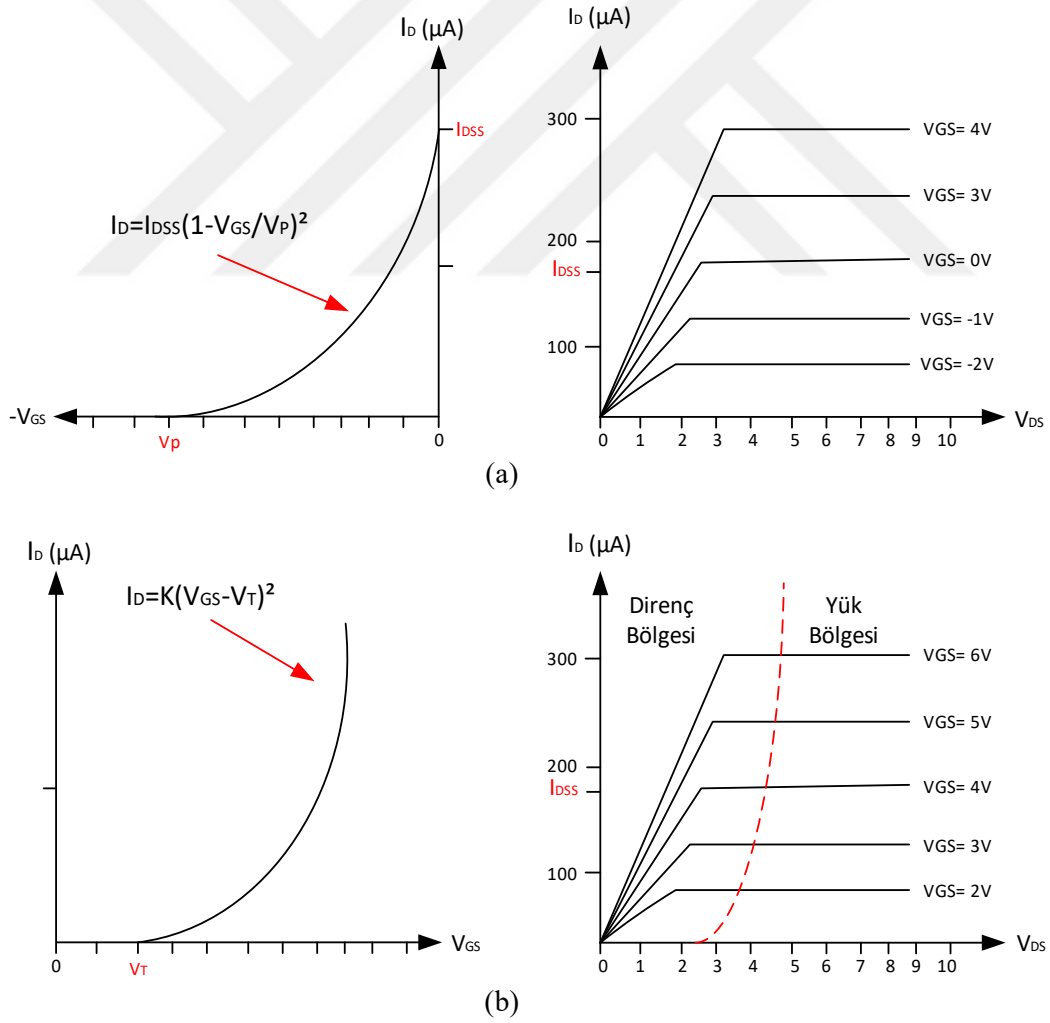


Şekil 29. Yapılarına göre anahtarlama elemanı çeşitleri



Şekil 30. (a) N-Kanal, (b) P-Kanal MOSFET'in iç yapısı

Şekil 31'de azaltan ve çoğaltan N-tipi MOSFET'lere ait transfer ve çıkış karakteristiği grafikleri gösterilmiştir (Şahin ve Blaabjerg, 2021).

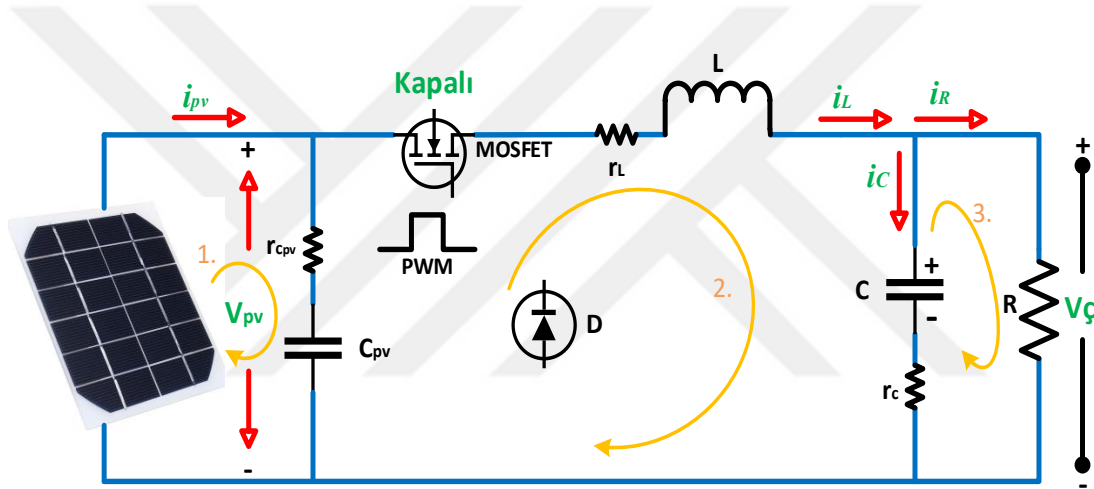


Şekil 31. (a) Azaltan kanallı ve (b) Çoğaltan kanallı N-tipi MOSFET'lere ait transfer ve çıkış karakteristiği

2.4.2. DA-DA Düşüren Dönüştürücünün Küçük İşaret Analizi

Karmaşık elektronik devrelerde bulunan, transistör ve yarı iletken malzemeler gibi doğrusal olmayan aktif bileşenlerin davranışını daha basite indirgeyerek doğrusal ve yönetilebilir modeller aracılığıyla incelenmesini sağlayan analiz sistemine küçük işaret analiz sistemi denir.

DA-DA düşüren dönüştürücü devrelerinde küçük sinyal analizi iki durum için ele alınmaktadır. Bunlardan biri anahtarlama elemanının kapalı olduğu durum ve diğeri anahtarlama elemanının açık olduğu durum içindir. Her iki durum içinde denklemler çıkartılarak transfer fonksiyonu elde edilir (Katti vd., 2020; Kılıç vd., 2019; Kökçam, 2018; Şahin, 2006).



Şekil 32. Anahtarın kapalı olduğu durum

Anahtar iletim durumuna geçtiği zaman diyot, üzerinden akım akmasına izin vermez ve ters yönde gerilim uygulanır. Bu durumda bobin akımı direk anahtar üzerinden akarak devreyi tamamlar. Şekil 32'de gösterilen devrede bobin, çıkış kondansatörü ve panel kondansatörü olmak üzere üç adet enerji depolayan devre elemanı olduğu için sistemin analizi yapılırken üç adet durum değişkeni belirlenmiştir. Bu değişkenler Eşitlik 5'te belirtilen bobin akımı, çıkış kondansatör ve panel kondansatör gerilimidir. Bu değişkenlere ait bobin akımı, çıkış kondansatör ve panel kondansatör diferansiyel eşitlikleri de Eşitlik 6'da belirtilmiştir.

$$i_L = x_1 \quad , \quad V_c = x_2 \quad , \quad V_{cpv} = x_3 \quad (5)$$

$$d \frac{i_L}{dt} = \dot{x}_1 \quad , \quad d \frac{V_c}{dt} = \dot{x}_2 \quad , \quad d \frac{V_{cpv}}{dt} = \dot{x}_3 \quad (6)$$

Şekil 32'de gösterilen devrenin 2. gözüne Kirchhoff gerilim ve akım metotları uygulanarak Eşitlik 12'de belirtilen durum denklemleri elde edilir.

$$L \cdot d \frac{i_L}{dt} = V_{pv} - i_L \cdot r_L - i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) - V_\zeta \quad (7)$$

$$V_\zeta = \left(i_L - C \cdot d \frac{V_c}{dt} \right) R \quad (8)$$

$$C \cdot d \frac{V_c}{dt} = \frac{V_\zeta - V_c}{r_c} \quad (9)$$

$$V_\zeta = i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + V_c \left(\frac{R}{R + r_c} \right) \quad (10)$$

$$L \cdot d \frac{i_L}{dt} = V_{pv} - i_L \cdot r_L - i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) - V_c \left(\frac{R}{R + r_c} \right) \quad (11)$$

$$\dot{x}_1 = x_1 \left(\frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} \right) + x_2 \left(\frac{-R}{L(R + r_c)} \right) + \frac{V_{pv}}{L} \quad (12)$$

Şekil 32'de gösterilen devrenin 3. gözüne Kirchhoff gerilim ve akım metotları uygulanarak Eşitlik 13 ve 14'te belirtilen durum denklemleri elde edilir.

$$V_\zeta = C \cdot d \frac{V_c}{dt} \cdot r_c + V_c = C \cdot r_c \cdot \dot{x}_2 + x_2 \quad (13)$$

$$V_\zeta = \left(i_L - C \cdot d \frac{V_c}{dt} \right) R = R \cdot x_1 - R \cdot C \cdot \dot{x}_2 \quad (14)$$

Eşitlik 13 ve Eşitlik 14 birbirlerine eşitlenerek Eşitlik 15 elde edilir.

$$\dot{x}_2 = x_1 \left(\frac{R}{C(R + r_c)} \right) + x_2 \left(\frac{-1}{C(R + r_c)} \right) \quad (15)$$

Panel girişinde kullanılan kondansatör de sinyal analizinde dikkate alınmıştır. Şekil 32’de gösterilen devrenin 1. gözüne Kirchhoff akım metodu uygulanarak Eşitlik 20 elde edilir.

$$i_{pv} = i_L + i_{cpv} \quad (16)$$

$$i_{pv} = \frac{V_{pv} - V_{cpv}}{r_{cpv}} \quad (17)$$

$$i_{cpv} = C_{pv} \cdot d \frac{V_c}{dt} \quad (18)$$

$$C_{pv} \cdot d \frac{V_c}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{cpv}}{r_{cpv}} \quad (19)$$

$$d \frac{V_c}{dt} = \frac{V_{pv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} - \frac{V_{cpv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} = \dot{x}_3 = \frac{V_{pv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} - \frac{x_3}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \quad (20)$$

Eşitlik 12, Eşitlik 15 ve Eşitlik 20’de elde edilen durum denklemlerinin matris formunda yazılımı Eşitlik 21’de belirtilmiştir. Burada belirtilen matris formunun genel durum denklemi Eşitlik 22’de belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} & \frac{-R}{L(R + r_c)} & 0 \\ \frac{R}{C(R + r_c)} & \frac{-1}{C(R + r_c)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pv} \\ V_d \\ d \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{x} = A_1 X + B_1 u \quad (22)$$

Eşitlik 22 de belirtilen durum denkleminde ait katsayı matrisleri Eşitlik 23 ve 24’te belirtilmiştir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} & \frac{-R}{L(R + r_c)} & 0 \\ \frac{R}{C(R + r_c)} & \frac{-1}{C(R + r_c)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

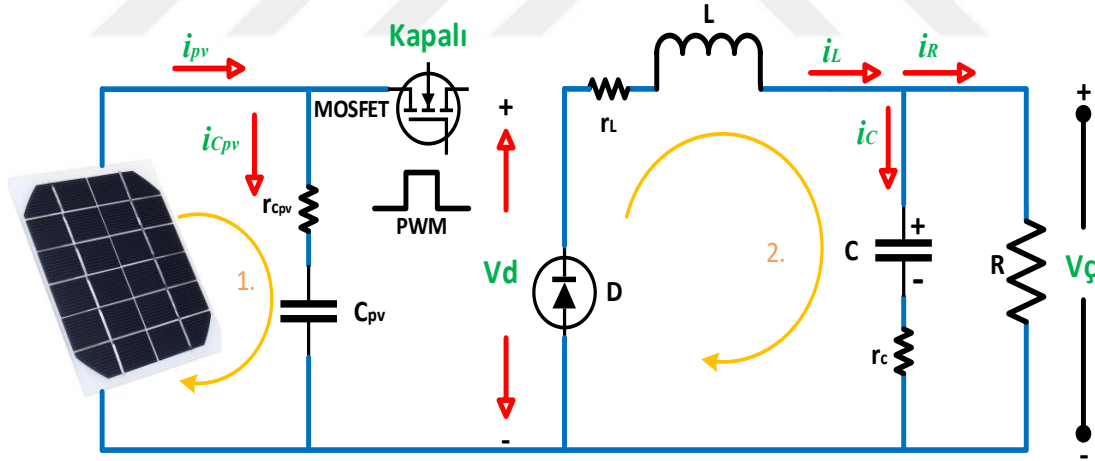
Eşitlik 25 de sistemin genel çıkış durum denklemi belirtilmiştir. Eşitlik 27 de bu durum denkleminin matris formunda gösterimi ve Eşitlik 28’de katsayı matrisleri belirtilmiştir.

$$y_1 = C_1 X + F_1 u \quad (25)$$

$$V_\zeta = i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + V_c \left(\frac{R}{R + r_c} \right) = x_1 \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + x_2 \left(\frac{R}{R + r_c} \right) \quad (26)$$

$$V_\zeta = y_1 = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} & \frac{R}{R + r_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pv} \\ V_d \\ d \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} & \frac{R}{R + r_c} & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$



Şekil 33. Anahtarın açık olduğu durum

Anahtar kesim durumuna geçtiği zaman diyot üzerinden akım akar ve diyot ileri yönde gerilim uygular. Bu durumda bobin akımı kondansatör ve diyot üzerinden akarak devreyi tamamlar.

Şekil 33'te gösterilen devrenin 2. gözüne Kirchhoff gerilim ve akım metotları uygulanarak Eşitlik 32 denklemi elde edilir.

$$i_L \cdot r_L + L \cdot d \frac{i_L}{dt} + V_\zeta + V_d = 0 \quad (29)$$

$$V_\zeta = i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + V_c \left(\frac{R}{(R + r_c)} \right) \quad (30)$$

$$L \cdot d \frac{i_L}{dt} = -i_L \cdot r_L - i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) - V_c \left(\frac{R}{(R + r_c)} \right) - V_d \quad (31)$$

$$\dot{x}_1 = x_1 \left(\frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} \right) + x_2 \left(\frac{-R}{L(R + r_c)} \right) - \frac{V_d}{L} \quad (32)$$

Şekil 33'te gösterilen devrenin 2. gözüne Kirchhoff akım ve gerilim metotları uygulanarak Eşitlik 33 ve 34 denklemleri elde edilir.

$$i_L = \frac{V_\zeta}{R} + C \cdot d \frac{V_c}{dt} \quad (33)$$

$$i_L = \frac{V_\zeta}{R} + C \cdot \dot{x}_2$$

$$V_\zeta = C \cdot d \frac{V_c}{dt} \cdot r_c + V_c \quad (34)$$

$$V_\zeta = C \cdot r_c \cdot \dot{x}_2 + x_2$$

Eşitlik 33 ve Eşitlik 34 denklemleri çözümlenerek Eşitlik 35 elde edilir

$$\dot{x}_2 = x_1 \left(\frac{R}{C(R + r_c)} \right) + x_2 \left(\frac{-1}{C(R + r_c)} \right) \quad (35)$$

Panel girişinde kullanılan kondansatör de sinyal analizinde dikkate alınmıştır. Şekil 33'te gösterilen devrenin 1. gözüne Kirchhoff akım metodu uygulanarak Eşitlik 40 elde edilir.

$$i_{pv} = i_{cpv} \quad (36)$$

$$i_{pv} = \frac{V_{pv} - V_{cpv}}{r_{cpv}} \quad (37)$$

$$i_{cpv} = C_{pv} \cdot d \frac{V_{cpv}}{dt} \quad (38)$$

$$C_{pv} \cdot d \frac{V_{cpv}}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{cpv}}{r_{cpv}} \quad (39)$$

$$d \frac{V_{cpv}}{dt} = \frac{V_{pv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} - \frac{V_{cpv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} = \dot{x}_3 = \frac{V_{pv}}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} - \frac{x_3}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \quad (40)$$

Eşitlik 32, Eşitlik 35 ve Eşitlik 40'da elde edilen diferansiyel durum denklemlerinin matris formunda yazılımı Eşitlik 41 'de belirtilmiştir. Burada belirtilen matris formunun genel durum denklemine göre yazılımı Eşitlik 42'de belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} & \frac{-R}{L(R + r_c)} & 0 \\ \frac{R}{C(R + r_c)} & \frac{-1}{C(R + r_c)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pv} \\ V_d \\ d \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\dot{x} = A_2 X + B_2 u \quad (42)$$

Eşitlik 42 de belirtilen durum denklemine ait katsayı matrisleri Eşitlik 43 ve 44'te belirtilmiştir.

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{-(R \cdot r_c + R \cdot r_L + r_c \cdot r_L)}{L(R + r_c)} & \frac{-R}{L(R + r_c)} & 0 \\ \frac{R}{C(R + r_c)} & \frac{-1}{C(R + r_c)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Eşitlik 45 de sistemin genel çıkış durum denklemini belirtilmiştir. Eşitlik 47 de bu durum denkleminin matris formunda gösterimi ve Eşitlik 48'de katsayı matrisi belirtilmiştir.

$$y_2 = C_2 X + F_2 u \quad (45)$$

$$V_\zeta = i_L \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + V_c \left(\frac{R}{(R + r_c)} \right) = x_1 \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) + x_2 \left(\frac{R}{(R + r_c)} \right) \quad (46)$$

$$V_\zeta = y_2 = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} & \frac{R}{(R + r_c)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} V_{pv} \\ V_d \\ d \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} & \frac{R}{(R + r_c)} & 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

İki durum içinde geçerli olan genel çıkış durum denklemi Eşitlik 49'da belirtilmiştir. Belirtilen bu eşitliğe göre y_1 ve y_2 çıkış durum denklemleri Eşitlik 50'de belirtildiği gibi birbirine eşittir.

$$y = CX + Fu \quad (49)$$

$$y_1 = y_2 = y = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} & \frac{R}{(R + r_c)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} V_{pv} \\ V_d \\ d \end{bmatrix} \quad (50)$$

Genel denklemler sonucuna göre elde edilen matris formlarında $A_1=A_2$ ve $C_1 = C_2$ durumu oluşmaktadır. Bu matris değerlerindeki r_c ve r_L iç direnç değerleri çıkış yük değeri olan R direncine göre çok küçük olduklarından dolayı A katsayı matrisi Eşitlik 51'de belirtildiği gibi tekrar düzenlenebilmektedir. Aynı şekilde çıkış gerilim durum matrisinde de bu sadeleştirme yapılırsa Eşitlik 52 elde edilir.

$$A_1 = A_2 = A = \begin{bmatrix} \frac{-(r_c + r_L)}{L} & -1/L & 0 \\ 1/C & -1/RC & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$C_1 = C_2 = [r_c \quad 1 \quad 0] \quad (52)$$

Şekil 32 ve Şekil 33’te belirtilen iki ayrı devre için yazılan matris bağlantıları Eşitlik 53’te belirtilen denkleme göre çalışma aralıklarına denk gelen görev süreleri ile ayrı ayrı çarpılarak toplanır ve ortalamaları alınırsa Eşitlik 54’te belirlenen ortalama durum uzay denklemi elde edilir.

$$x = D.A_1.X + (1 - D).A_2.X + D.B_1.u + (1 - D).B_2.u \quad (53)$$

$$x = A.X + D.B_1.u + (1 - D).B_2.u \quad (54)$$

Eşitlik 54’te elde edilen denklemde, Eşitlik 27 ve Eşitlik 51’de elde edilen A , B_1 ve B_2 matrisleri yerine konulduğu zaman sonuç olarak Eşitlik 57’de belirtilen ortalama durum uzay matris modeli elde edilir.

$$x = \begin{bmatrix} \frac{-(r_c + r_L)}{L} & -1/L & 0 \\ 1/C & -1/RC & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} X + D \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} u + (1 - D) \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (55)$$

$$x = \begin{bmatrix} \frac{-(r_c + r_L)}{L} & -1/L & 0 \\ 1/C & -1/RC & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{D}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (56)$$

$$x = \begin{bmatrix} \frac{-(r_c + r_L)}{L} & -1/L & 0 \\ 1/C & -1/RC & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} & \frac{D-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (57)$$

DA-DA düşüren dönüştürücü sistemlerinde görev süresi çıkış gerilimi ve giriş gerilimi oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişimin ortalama durum uzay denklemleri ile elde edilmesi Eşitlik 58’de gösterilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonu çıkış gerilimi ve giriş gerilimi arasındaki bağıntıya göre ele alınmaktadır.

$$y = C.X = C.A^{-1}.Bu \quad (58)$$

$$\frac{V_{\zeta}}{V_{pv}} = [r_c \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \frac{-L}{r_c + r_L + R} & \frac{R}{r_c + r_L + R} & 0 \\ \frac{-(LR)}{r_c + r_L + R} & \frac{-(r_c + r_L)RC}{r_c + r_L + R} & 0 \\ 0 & 0 & -C_{pv} \cdot r_{cpv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{D}{L} & \frac{D-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$\frac{V_{\zeta}}{V_{pv}} = [D-1 \quad D] \cdot \frac{R + r_c}{R + r_c + r_L} \approx [D-1 \quad D] \quad (60)$$

Durum uzay eşitliklerini kullanarak transfer fonksiyonunu hesaplamak için Eşitlik 61’de belirtilen denklem kullanılır.

$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_{\zeta}(s)}{\tilde{d}(s)} = C \cdot [S.I - A]^{-1} \cdot [A_1 - A_2] \cdot x + (B_1 - B_2) \cdot V_{pv} + (C_1 - C_2) \cdot x \quad (61)$$

$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_{\zeta}(s)}{\tilde{d}(s)} = C \cdot [S.I - A]^{-1} \cdot (B_1 - B_2) \cdot V_{pv} \quad (62)$$

C, A ve B_1, B_2 matrisleri Eşitlik 62’de yerine yazılırsa aşağıda belirtilen Eşitlik 63 elde edilir.

$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_{\zeta}(s)}{\tilde{d}(s)} = [r_c \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} s + \frac{(r_c + r_L)}{L} & 1/L & 0 \\ -1/C & S + 1/RC & 0 \\ 0 & 0 & s + \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (63)$$

Eşitlik 63’de elde edilen denklem Eşitlik 64 ve 65’te belirtilen şekilde düzenlenerek Eşitlik 66’da belirtildiği şekilde determinant ve tersleme işlemleri gerçekleştirilir ve sonuç olarak Eşitlik 70 elde edilir (R direnç değeri çok büyük, r_c ve r_L iç direnç değerleri çok küçük seçilir) .

$$|S.I - A| = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$G = \begin{bmatrix} s + \frac{(r_c + r_L)}{L} & 1/L \\ -1/C & S + 1/RC \end{bmatrix} \quad H = \left[s + \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}} \right] \quad (65)$$

$$(66)$$

$$G^{-1} = \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{RC(r_c + r_L) + L}{RLC} \right) + \frac{R + r_c + r_L}{RLC}} \cdot \begin{bmatrix} S + 1/RC & -1/L \\ 1/C & s + \frac{(r_c + r_L)}{L} \end{bmatrix}$$

$$H^{-1} = \frac{1}{s + \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}}} \quad (67)$$

$$|S.I - A|^{-1} = \begin{bmatrix} G^{-1} & 0 \\ 0 & H^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S + 1/RC}{\det(G)} & \frac{-1}{L \cdot \det(G)} & 0 \\ \frac{1}{C \cdot \det(G)} & \frac{s + \frac{(r_c + r_L)}{L}}{\det(G)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s + \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}}} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_c(s)}{\tilde{d}(s)} = [r_c \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \frac{S + 1/RC}{\det(G)} & \frac{-1}{L \cdot \det(G)} & 0 \\ \frac{1}{C \cdot \det(G)} & \frac{s + \frac{(r_c + r_L)}{L}}{\det(G)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s + \frac{1}{C_{pv} \cdot r_{cpv}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (69)$$

$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_c(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\frac{V_{pv}}{L} \left(s \cdot r_c + \frac{1}{C} + \frac{r_c}{RC} \right)}{s^2 + s \left(\frac{r_c + r_L}{L} + \frac{1}{RC} \right) + \frac{1}{RC}} \quad (70)$$

Transfer fonksiyonu çıkarılan sistemde panel girişinde bulunan C_{pv} ve r_{cpv} değerlerinin sisteme etkisinin olmadığı sadece filtrelemede görev aldığı belirlenmiştir. Devrede kullanılan $V_{pv}=43$ V, $L=1$ mH, $R=0.25$ Ω , $C=3300$ uF, $V_c=6.25$ V, $r_c= 0.03$ Ω ve $r_L= 0.3$ Ω değerleri kullanılarak bode genlik ve faz diyagramları MATLAB’da çizdirilmiştir. Eşitlik 71’e göre çizdirilen bode genlik ve faz grafiği Şekil 34’te gösterilmiştir.

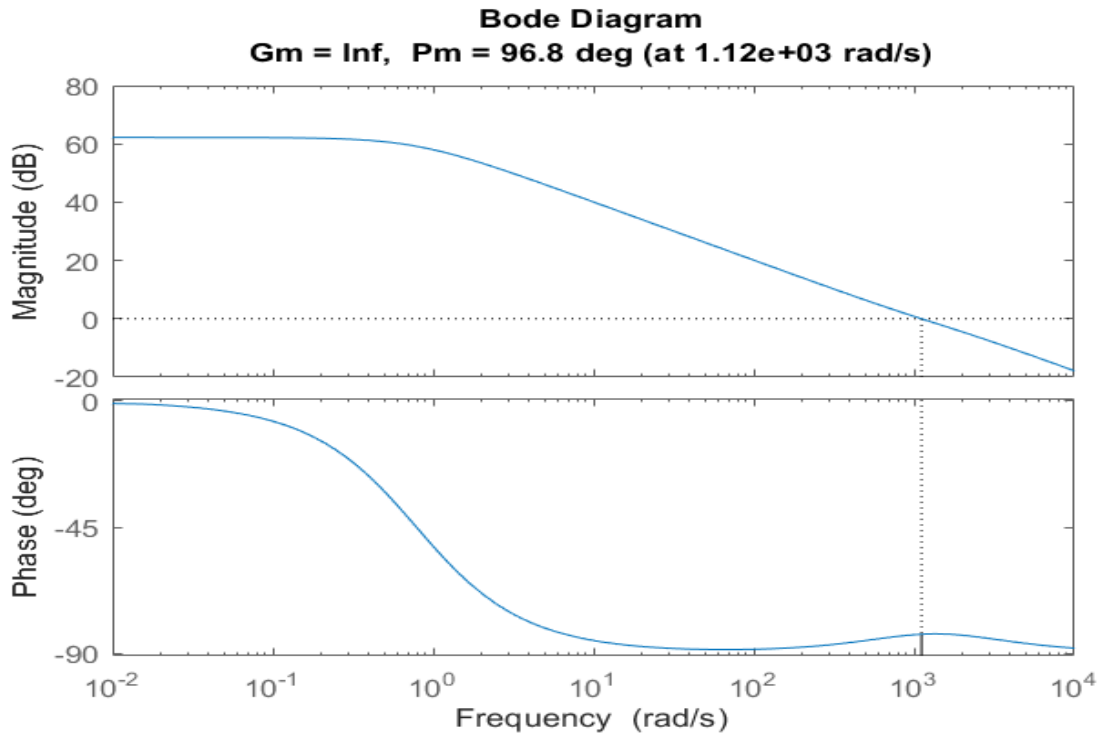
$$T_p(s) = \frac{d\tilde{V}_c(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{(1290s + 1560000)}{s^2 + s(1542) + 1212} \quad (71)$$

Bode genlik ve faz grafiği incelendiğinde 0 dB genlik değerinin faz grafiğini 10^3 Hz’de kestiği ve bu noktanın yaklaşık -83° faz açısına denk geldiği görülmektedir. Eşitlik 72’de faz marjının faz değeri ile olan matematiksel ilişkisi gösterilmiştir.

$$P_m = 180 + P_{deg} \quad (72)$$

Bu denkleme göre faz marjı $P_m=97^\circ$ bulunur. $P_m>0$ ise sistem kararlıdır.

Genlik değeri 1 Hz den önceki değerlerde yaklaşık 60 dB değerinde sabit konumda ve kazan tayken 1 Hz den sonra genlik azalmaya başlamaktadır. Bu azalış 0 dB de -87° faz açısına ve 1 kHz frekans değerlerine denk gelmektedir. -20 dB değerinde -90° faz kayması olan bölgede sistem negatif değerde olduğundan sistem kararlılık göstermektedir ve bu kararlılık genlik değerinin azalmasına rağmen faz açısının -90° civarında sabitlenmesinden dolayı değişkenlik göstermemektedir. Faz açısının -90° bölgesinde sabitlenmesi ve -180° değerine ulaşmaması bu sistemin genlik marjının sonsuz değer olmasına neden olmaktadır.



şekil 34. Transfer fonksiyonu bode diyagramı

2.5. Elektroliz Sistemi

Sıvı ya da iyonik iletkenliğe sahip maddelerde kimyasal değişiklik meydana getirmek için elektrik enerjisini kullanan sistemlere elektroliz sistemi denir. Elektroliz genellikle metal üretimi, su elektrolizi, klor ve sodyum hidroksit üretimi, galvanik kaplama, elektrolitik saflaştırma ve elektro kazanım, piller, yakıt hücreleri, analiz ve test, atık su arıtma, elektrolit kapasitörler ve elektrolitik dağlama gibi sistemlerde tercih edilmektedir.

Bu sistemlerden su elektrolizi ise suyun hidrojen ve oksijen gazı olarak ayrıştırılması prensibine dayanmaktadır. Elde edilen hidrojen, yenilenebilir enerji bağlamında temiz ve sürdürülebilir bir yakıt kaynağı olarak kullanılabilir.

Su elektroliz sistemi; alkali, polimer elektrolit membran (PEM), katı oksit elektroliz (SOEC) ve anyon değişim membran elektrolizi (AEM) sistemleri dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu tekniklerin her birinin kendine özgü artıları ve eksileri bulunmaktadır. Genel olarak gelişmiş, karmaşık olmayan ve diğer yöntemlere göre verimliliği ve ticari olarak hidrojen üretimine en uygun olan alkali elektroliz sistemi tercih edilmektedir (Buttler ve Spliethoff, 2018; Chi ve Yu, 2018; Nacar ve Öncü, 2022; Stofen, 2010). Tablo 4'te bu dört elektroliz yönteminin karşılaştırılması yapılmıştır (Carmo vd., 2013; Şahin, 2024)

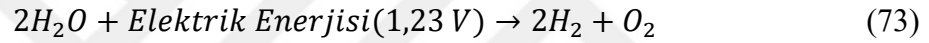
Tablo 4. Elektroliz sistemlerinin karşılaştırılması

Alkali Elektroliz	PEM Elektroliz	Katı Oksit Elektroliz	AEM Elektroliz
Avantajları			
İyi kurulmuş teknoloji	Yüksek akım yoğunlukları	Verimlilik =100% (Isısal denge ile)	Verimlilik =57-69%
Asil olmayan katalizörler	Yüksek gerilim verimliliği	Verimlilik >100% (Sıcak buharla)	Düşük Maliyet
Uzun vadeli istikrar	İyi kısmi yük aralığı	Asil olmayan katalizörler	Yüksek basınçlı çalışma
Nispeten düşük maliyet	Hızlı sistem yanıtı	Yüksek basınçlı çalışma	Esnek yapı
MW aralığındaki yığınlar	Kompakt sistem tasarımı	Yüksek gaz saflığı	Yüksek iyon iletkenliği
Uygun maliyetli		Dinamik çalışma	

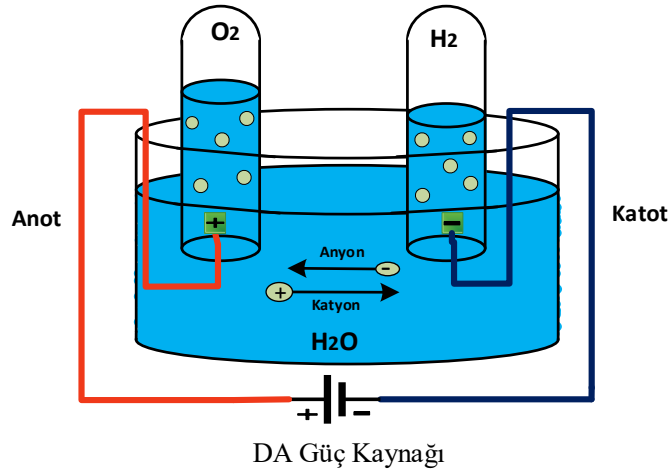
Tablo 4 (Devam). Elektroliz sistemlerinin karşılaştırılması

Alkali Elektroliz	PEM Elektroliz	Katı Oksit Elektroliz	AEM Elektroliz
Dezavantajlar			
Düşük akım Düşük kısmi yük aralığı Düşük çalışma basınçları Aşındırıcılık	Yüksek maliyeti Asidik aşındırıcı ortam Düşük dayanıklılık MW aralığının altındaki yığınlar	Laboratuvar aşaması Hacimli sistem tasarımı Dayanıklılık Maliyet	Bakım maliyeti Teknolojik gelişim Verimlilik

Suyun elektrolizi, bir kap içerisinde bulunan suya elektrot yardımıyla bir elektrik akımının uygulanması ve oluşan kimyasal reaksiyon sonucu su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayrışmasıyla gerçekleşmektedir. Eşitlik 73'te bu reaksiyonun denklemi gösterilmiştir.



Bu işlem sonucu üretilen hidrojen; yakıt hücresi, ulaşım ve endüstriyel uygulamalar dahil birçok sistemde temiz enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Şekil 35'te gösterildiği gibi basit bir elektroliz sistemi; su, çözelti, iki adet elektrot, deney tüpü ve DA güç kaynağından meydana gelmektedir. Burada su, bileşenlerine ayrıştırılacak madde; çözelti, iyi bir iletken olmayan suyun iletkenliğini arttırmaya yarayan kimyasal madde; elektrot, güç kaynağından çekilecek akımı sisteme aktaracak krom veya diğer iletken maddelerden üretilmiş malzeme ve son olarak tüpler, reaksiyon sonucu oluşacak gazların toplandığı yer olarak tanımlanmaktadır.

**Şekil 35.** Temel su elektroliz sistemi

2.5.1. Elektroliz Olayı

Elektrotların uçlarına güç kaynağı bağlandığında anot ucuna anyonlar katot ucuna katyonlar toplanır. Bu toplanma sonucu katyonlar kendini nötrlemek için elektron alırken anoda varan anyonlar nötrlenmek için elektron verir.

Elektroliz olayının çalışma prensibi şu şekilde sıralanabilir (Bilhan, 2024; Shekardasht, 2016; Shen vd., 2011);

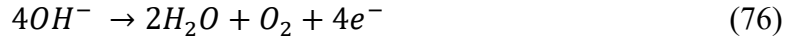
İlk olarak katot etrafında bulunan su molekülleri reaksiyona girerek OH⁻ ve H⁺ iyonlarını oluşturur.



Oluşan bu iyonlardan OH⁻ anoda doğru hareket ederken H⁺ iyonu katottan bir elektron alarak nötrleşir ve başka bir nötr H molekülü ile tepkimeye girerek H₂ gazı oluşur ve tüpün üst kısmında birikmeye başlar.



Anoda gelen OH⁻ iyonları tepkimeye girerek su molekülü ve oksijen gazı meydana getirirler. Tepkime sonucu oluşan oksijen gazı tüpün üst kısmında birikmeye başlar.



2.5.2. Aşırı Gerilim

Elektrotların sistemde akım yokken yani sistem denge durumundayken ölçülen potansiyelinin (E_o) ve akım varken ölçülen potansiyelinin (E_i) farkına aşırı gerilim (η) denilmektedir. Aşırı gerilimler elektroliz sisteminde istenmeyen durumu ifade etmektedir. Bu durumun oluşması hem sistemin verimliliğini azaltmakta hem de maliyeti arttırmaktadır. Bu nedenle aşırı gerilimi kontrol altında tutmak için sistemlere uygun elektrotlar ve çalışma koşulları seçilmelidir (Kardaş vd., 2010).

$$\eta = E_i - E_o \quad (77)$$

Teorik olarak elektroliz sisteminde oksijen ve hidrojen gazının oluşabilmesi için sisteme en az 1,23 V potansiyel gerilim uygulanması gerekmektedir.

$$\eta = E_i - 1,23 \text{ V} \quad (78)$$

Elektroliz sistemlerinde istenmeyen durumlar sonucu birçok aşırı gerilim durumu oluşmaktadır. Bunlar; elektrotlarda meydana gelen tepkime hızının sistemden geçen akım hızından düşük olması durumunda oluşan aktivasyon aşırı gerilimi (η_A), çözeltinin elektrotta birikmesi sonucu oluşan direnç aşırı gerilimi (η_Ω), iyonların elektrot yüzeyine gelememesi veya elektrotlar arasında ki mesafenin artması durumunda oluşan difüzyon aşırı gerilimi (η_D), istenmeyen kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan reaksiyon aşırı gerilimi (η_R) ve tepkime sürecinde elektrot yüzeyinden ayrılarak oluşmuş yeni maddelerin ortamdaki iyon konsantrasyonunu azaltması sonucu meydana gelen aşırı gerilim ise konsantrasyon aşırı gerilimi (η_K) olarak tanımlanır (Şahin, 2006). Bu durumlar sonucunda artan aşırı gerilim değeri nedeniyle teorik sınır değerinden daha fazla potansiyel gerilim sisteme uygulanmalıdır.

2.5.3. Ayrışma Gerilimi

Elektroliz tepkimesini başlatmak için denge durumundaki sisteme uygulanması gereken minimum gerilime ayrışma gerilimi denir. Teorik olarak anot ve katodun, denge durumunda meydana gelen, potansiyellerinin Nernst denklemi ile hesaplanıp farklarının alınmasıyla elde edilir (Maden ve Şahin, 2019).

$$E_{hücre} = E_{hücre}^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q_R \quad (79)$$

Burada $E_{hücre}^0$, maddesinin standart indirgeme potansiyelini, (n) reaksiyonda alınıp verilen elektron sayısını, (F) Faraday sabitini, (R) evrensel gaz sabitini, (T) sıcaklığı ve son olarak (Q) hücre reaksiyon katsayısını ifade etmektedir.

Hidrojen elektrot potansiyeli Eşitlik 80’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$E_{H^+/H_2} = E_{H^+/H_2}^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_{H_2}}{[H^+]^2} \quad (80)$$

$p_{H_2}=1 \text{ atm}$ ve $pH=-\log[H^+]$ olarak denklemde yerine yazılırsa;

$$E_{H^+/H_2} = 0,0 - (0,059)(pH) \text{ elde edilir.} \quad (81)$$

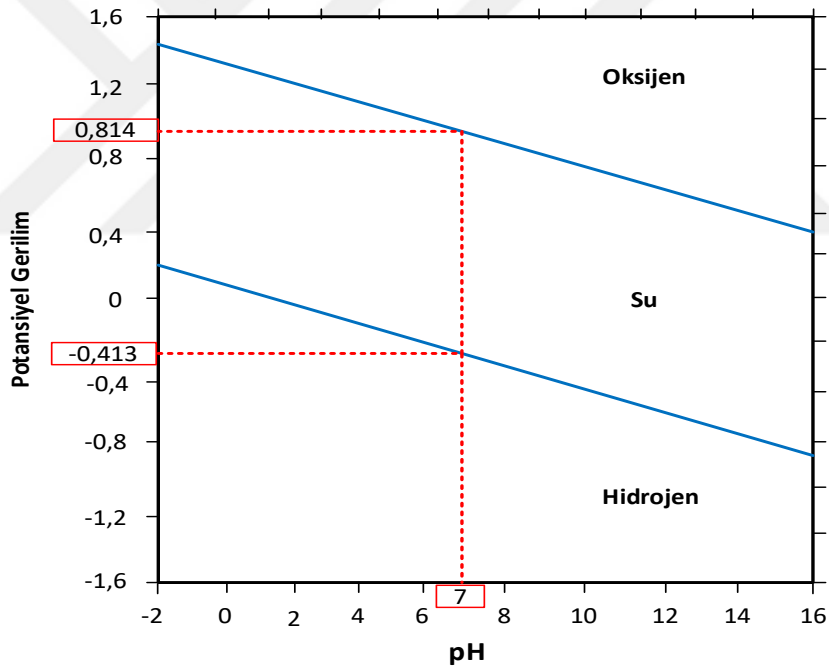
Oksijen oluşum denge potansiyeli Eşitlik 82’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$E_{OH^-/O_2} = E_{OH^-/O_2}^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{pO_2}{[OH^-]^2} \quad (82)$$

$pO_2=1$ atm ve $pH=-\log[OH^-]$ olarak denklemde yerine yazılırsa;

$$E_{OH^-/O_2} = 1,227 - (0,059)(pH) \text{ elde edilir.} \quad (83)$$

Yukardaki hesaplamaların grafiksel karşılığı Şekil 36’da gösterilmiştir (Shekardasht, 2016). Grafikten de anlaşılacağı gibi hesaplamalar sonucu bulduğumuz değerler $pH=7$ için elde edilen değerlerdir. Ortamın asitlik ve bazlık durumuna göre bu değerler değişmektedir ve bunun sonucunda da ayrışma gerilimi de değişmektedir.

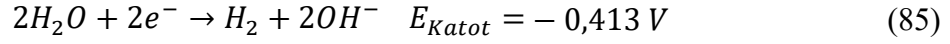


Şekil 36. Su elektrolizi için potansiyel-pH grafiği

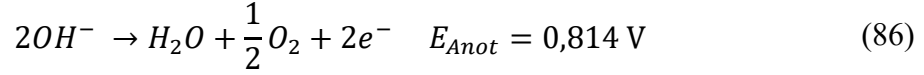
Ayrışma gerilimi katot ve anot için Nernst denklemi kullanılarak hesaplanan elektrot potansiyellerinin farkına eşittir.

$$E_{AG} = E_{Katot} - E_{Anot} \quad (84)$$

Katot Tepkimesi;



Anot Tepkimesi;



Sonuç Tepkimesi;



$$E_{AG} = -0,413 - (0,814) = -1,227 \text{ V} \quad (88)$$

Elde edilen değer standart koşullardaki nötral (pH=7) bir suyun teorik ayrışma gerilimini ifade etmektedir. Fakat bu değer de aşırı gerilim etkisi olmadığından dolayı gerçek deneysel ortamlarda su elektroliz olayının gerçekleşebilmesi için 1,7 V'tan daha yüksek ayrışma gerilimine ihtiyaç duyulmaktadır (Yazici vd., 1995).

2.5.4. Anot ve Katot Uçları

Alkali su elektrolizinde anot malzemelerinin seçimi, elektroliz işleminin verimliliği ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir. Alkali su elektrolizinde anot malzemelerinin seçimi için temel kriterler şunlardır: korozyon direnci, iletkenlik, katalitik aktivite, dayanıklılık, maliyet ve elektrolite uyumluluktur.

Su elektroliz sistemlerinde genel olarak anot olarak nikel-krom (NiCr), nikel-demir (NiFe) gibi nikel (Ni) alaşımlı malzemeler tercih edilmektedir. Çünkü alkali elektroliz bazik bir ortamda çalıştığı için nikel ve alaşımları bu ortamlarda daha iyi iletkenlik, korozyon direnci ve dayanıklılık gösterebilmektedir.

Katot malzemelerin seçimine oksijen evrim reaksiyonu direnci yukarda sayılan özelliklere ek olarak belirtilebilir. Çünkü birincil amacı hidrojen üretmek olan katodun aynı zamanda istenmeyen yan reaksiyonlar ile oksijen oluşumunu engellenmesi beklenmektedir. Bu tarz sistemler genel olarak, bazik bir ortam olduğundan dolayı, katot seçiminde nikel, paslanmaz çelik ve platin grubu metalleri tercih edilmektedir.

2.5.5. Ayırıcılar

Elektroliz sistemlerinde üretilen oksijen ve hidrojen gazlarının karışmasını engelleyen ve iyonların geçişine izin veren yapılara ayırıcılar denilmektedir (Gül, 2008). Fiziksel bir bariyer görevi gören bu malzemenin birçok çeşidi de bulunmaktadır. Bunlar;

Diyafram: Asbest veya sentetik polimerlerden üretilen gözenekli bir yapıya sahip gaz geçişini engelleyen iyon geçişine izin veren yapılardır.

İyon Değişim Membranı: İyon geçişinde seçici davranan ve gaz geçişine izin vermeyen yaygın kullanılan bir iyon değişim membranıdır. Nafion yaygın olarak kullanılan malzeme çeşididir.

Hidrofobik Özellikli Ayırıcılar: Hidrofobik malzemeler suyu iten malzemelerdir. Elektroliz bağlamında hidrofobik ayırıcılar, suyun elektroliz hücresinin belirli bölgelerine, özellikle de hidrojen ve oksijen üreten elektrotlara, girmesini engelleyecek şekilde tasarlanan ayırıcı çeşididir. Bu özellik sayesinde, elektrotların suyla dolması veya doygunluğa ulaşmasının önüne geçilmektedir.

2.5.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen periyodik tabloda ilk sırada bulunan ve standart koşullarda (25 °C ve 1 atm basınç) renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı olan bir gazdır. Bu özelliklerine ek olarak evrendeki en hafif, en küçük ve en bol bulunan elementtir. Doğada serbest formda nadir olarak bulunan hidrojen genellikle H_2 ve H_2O formunda bulunmaktadır.

Bu denli fazla bulunan bir elementin varlığı ve petrol, doğalgaz, kömür gibi yenilenemez enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması hidrojenden enerji üretim fikrini giderek yaygınlaştırmaktadır. Kolay ve hızlı tepkimeye girmesi ve hızlı yanıcı özelliğinin olması ısı enerjisi bakımından kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Yeşil enerji kategorisinde değerlendirilebilecek bir enerji üretim sistemidir. Tüm bu saydığımız özellikler genel avantajları olarak ele alınsa bile göz ardı edilemeyecek maliyet, depolama ve dağıtım zorluğu gibi birçok dezavantajda bulunmaktadır. Tablo 5'te hidrojen üretim sistemlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 5. Hidrojen üretim sistemlerinin karşılaştırılması

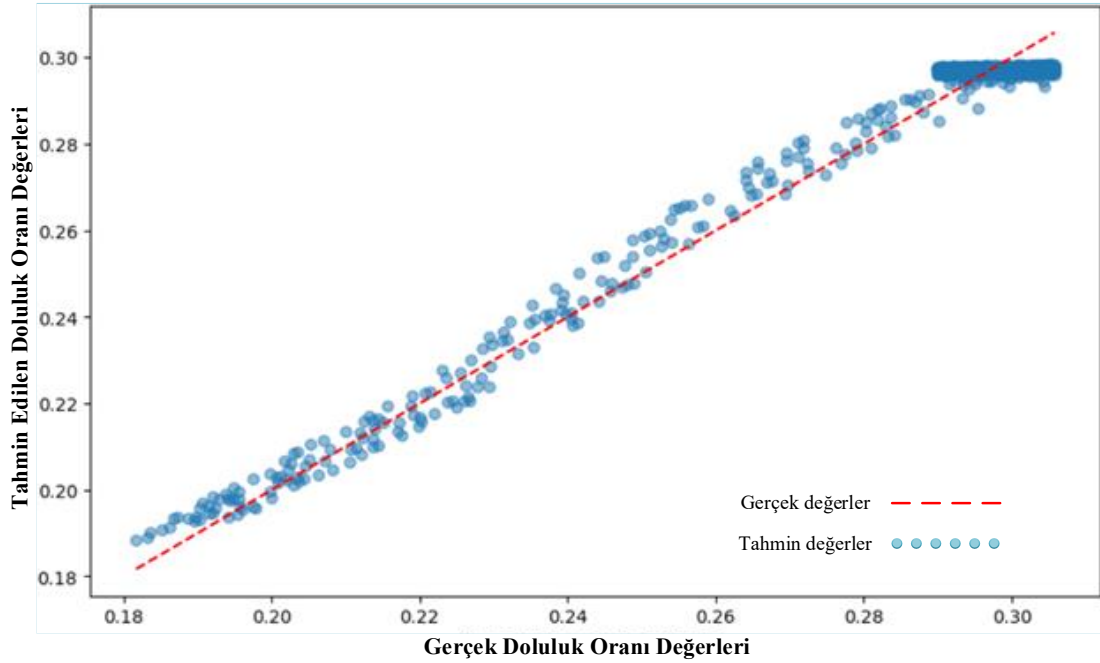
Hidrojen Üretim Sistemi	Tanımı	Avantajları	Dezavantajları
Buhar Metan Reformu (BMR)	Bu yöntem küresel hidrojen üretiminin çoğunu oluşturan en yaygın yöntemdir. Doğal gazı (metanı) buharla reaksiyona sokarak hidrojen ve karbon dioksit üretir.	Uygun maliyet	Karbon dioksit oluşumu
Su Elektrolizi	Elektrolizde su (H_2O), bir elektrik akımı kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrılır. Elektroliz, alkalın elektroliz, proton değişim membranı (PEM) elektroliz ve katı oksit elektrolizi gibi farklı sistemlerle gerçekleştirilebilir.	Temiz, sürdürülebilir	Yüksek maliyet, depolama, taşıma
Doğal Gazın Kısmi Oksidasyonu	Kısmi oksidasyon, doğal gazın sınırlı miktarda oksijenle reaksiyona sokulmasıyla hidrojen, karbon monoksit ve su üretilmesi işlemidir.	BMR'ye kıyasla enerji verimliliği daha yüksek, hidrojen açısından zengin bir gaz üretir	Karbon monoksit üretir, belirli uygulamalar için ek işleme ihtiyacı duyabilir
Ototermal Reformu	Kısmi oksidasyon ve buhar reformun bir kombinasyonu olan Ototermal üretim; hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksit üretimi arasında bir denge sağlar.	BMR'ye kıyasla enerji verimliliği daha fazladır	Karbon dioksit üretir
Biyokütle Gazlaştırma	Odun veya tarım artıkları gibi biyokütle malzemeleri, daha sonra hidrojen elde etmek üzere işlenebilen bir sentez gazı (hidrojen, karbon monoksit ve metan karışımı) üretmek üzere gaza dönüştürülür.	Yenilenebilir kaynaklar kullanılır, karbon nötr olma potansiyeli vardır	Teknik zorluklar, sınırlı ölçeklenebilirlik
Termokimyasal Su Bölünmesi	Bu yöntem, suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için nükleer veya güneş ısısı gibi yüksek sıcaklıktaki işlemlerden elde edilen ısıнын kullanılmasını içerir.	Temiz ve etkili hidrojen üretme potansiyeli	Teknik ve ekonomik zorluklar

3132 adet veri, Tablo 6’da bir kısmı gösterildiği gibi, .csv formatında kaydedilmiştir.

Tablo 6. Benzetimde anlık toplanan veriler

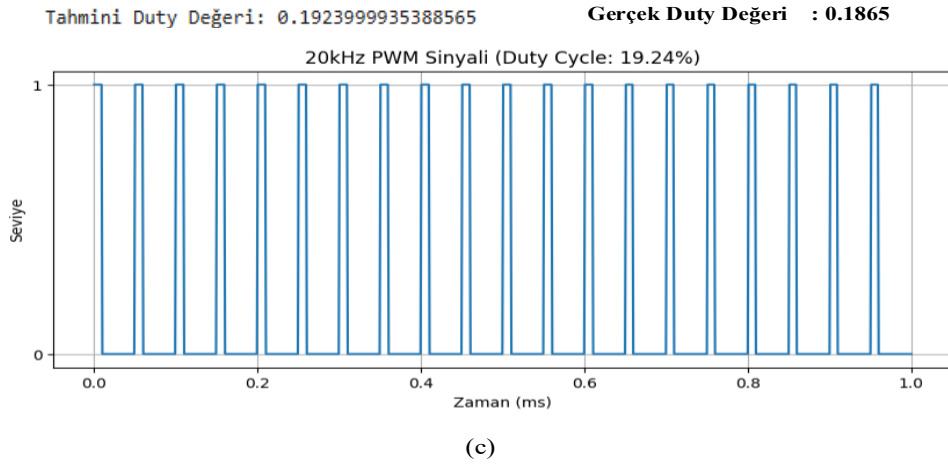
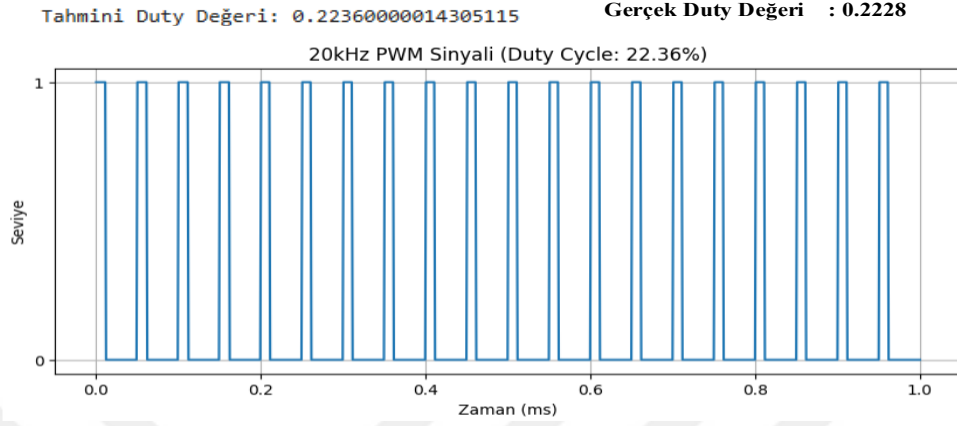
Sıcaklık (°C)	Işınım (W/m ²)	Vp (V)	Ip (A)	Pp (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)	Doluluk Oranı
15	0	0	0	0	0	0	0	0
15	10	0,35	0,12	0,04	0,1	0,4	0,04	0,29
15	20	0,69	0,23	0,16	0,2	0,8	0,16	0,29
15	30	1,04	0,35	0,36	0,3	1,2	0,36	0,29
15	40	1,38	0,47	0,64	0,4	1,61	0,64	0,29
15	50	1,73	0,58	1,01	0,5	2,01	1,01	0,29
15	60	2,08	0,7	1,45	0,6	2,41	1,45	0,29
15	7	2,42	0,81	1,97	0,7	2,81	1,97	0,29
15	80	2,77	0,93	2,58	0,8	3,21	2,58	0,29
15	90	3,11	1,05	3,26	0,9	3,61	3,26	0,29
15	100	3,46	1,16	4,03	1	4,01	4,03	0,29
:	:	:	:	:	:	:	:	:
45	980	30,95	11,58	358,45	6,25	25	156,25	0,20
45	990	31,27	11,7	365,8	6,25	25	156,25	0,19
45	100	0,69	11,82	373,23	6,25	25	156,25	0,19

Elde edilen bu veriler daha sonra Python programında eğitilmiştir. Eğitim sonucu doğruluk oranı 98 % olarak elde edilmiştir. Şekil 38’de gerçek ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 38. Benzetim sonucu elde edilen gerçek ve tahmin değerleri

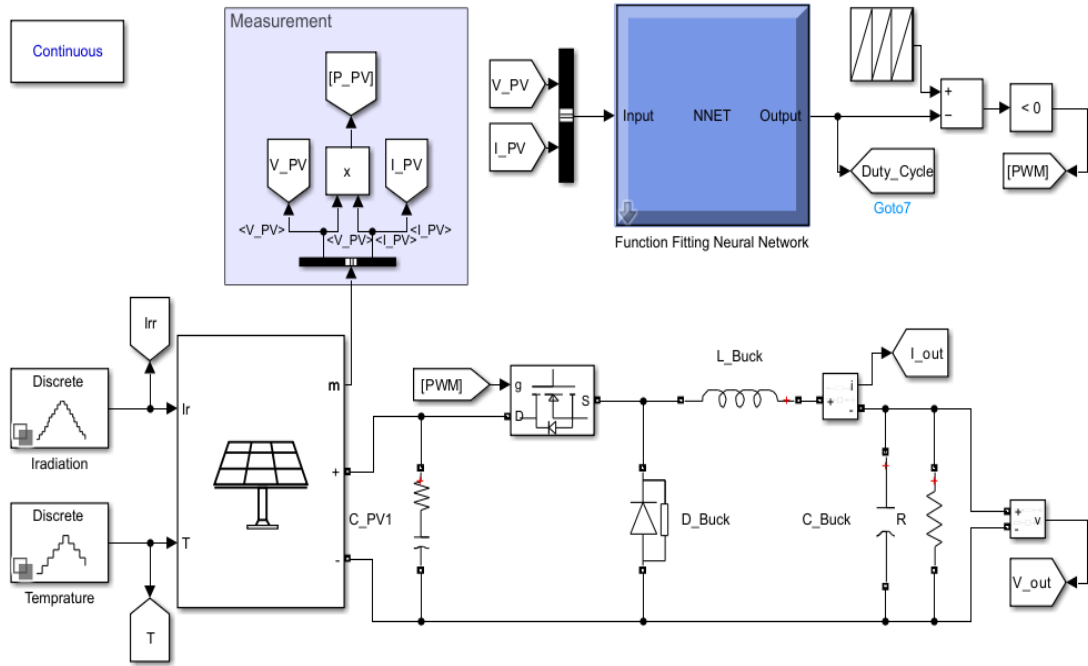
Şekil 39’da eğitim sonucunun test edilmesi amacıyla panel akımı ve gerilimine göre tahmin edilen doluluk oranı değerleri ve üretilen PWM sinyalleri gösterilmiştir.



Şekil 39. (a) 28.06 V ve 9.7 A, (b) 20.18 V ve 6.84 A ve (c) 33.52 V ve 11.43 A, panel değerlerine göre PWM sinyali ve doluluk oranı

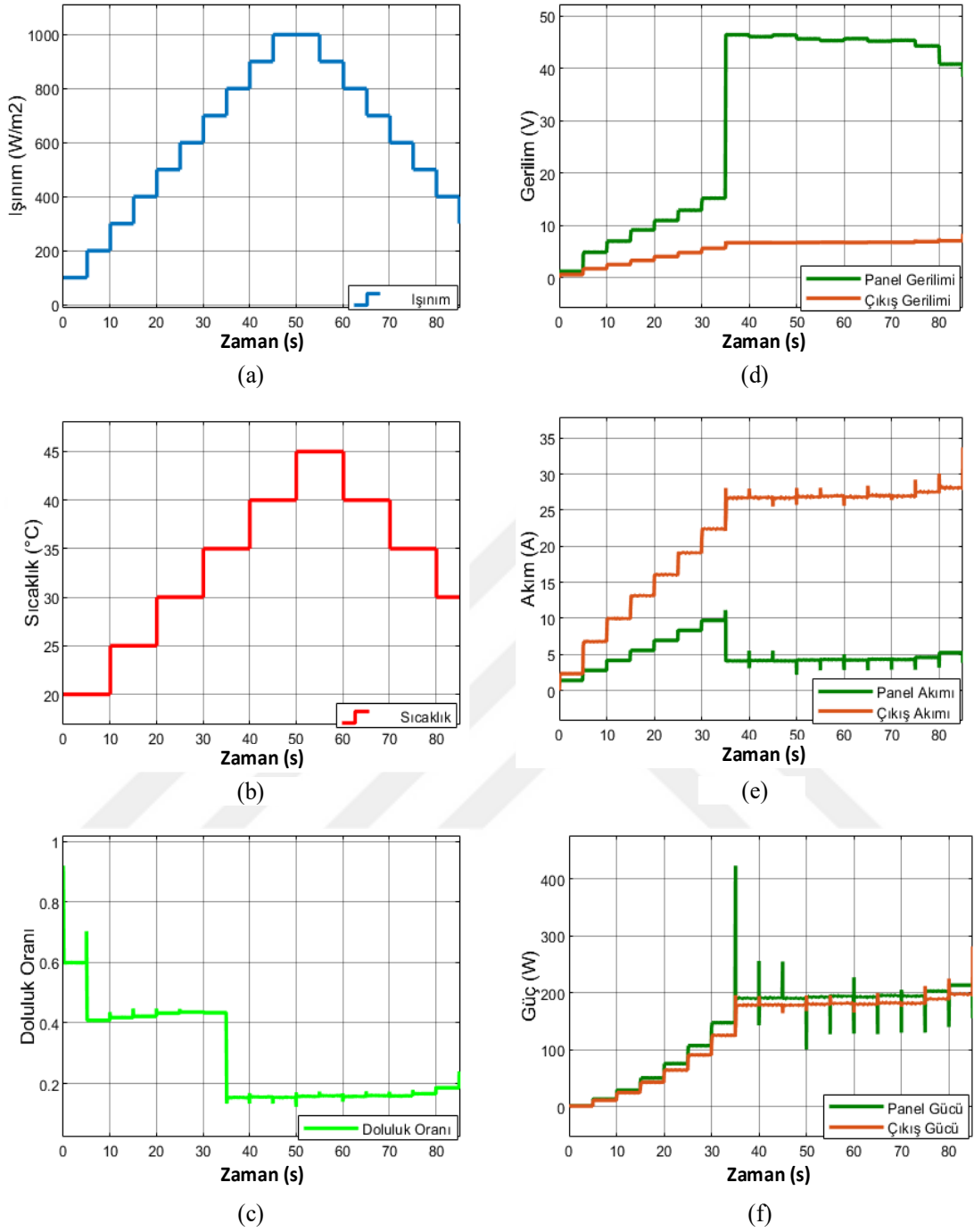
3.2. YSA Kontrol Modeli ve DA-DA Düşüren Dönüştürücü Benzetimi

Şekil 40'ta YSA algoritması ile çalışan bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Bu sisteme MATLAB/Neural Network Fitting uygulaması yardımı ile oluşturulan Function Neural Network Fitting blogu eklenerek panel gerilimi ve akımını giriş verisi olarak kullanıp çıkışta doluluk oranı tahmini gerçekleştirilmiştir. Elde edilen doluluk oranı daha sonra MOSFET'i sürmek için bir PWM sinyaline dönüştürülmüştür. Bu sinyal ise DA-DA düşüren dönüştürücünün istenilen şekilde çalışmasını sağlamakta ve istenilen çıkış değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.



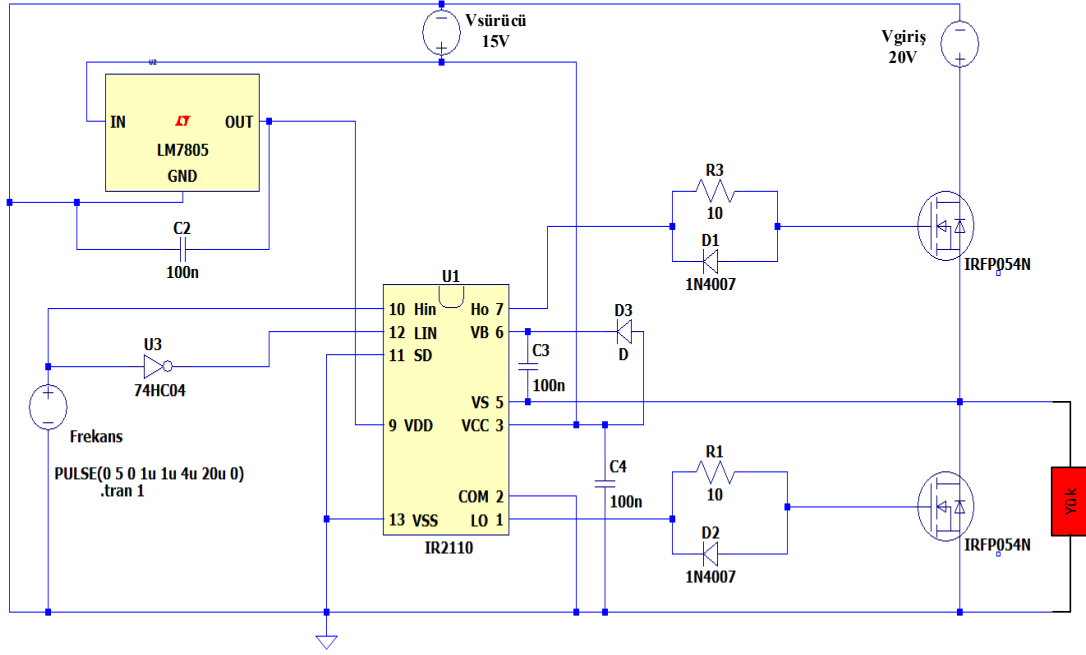
Şekil 40. YSA denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü

Şekil 41'de Şekil 40'tan elde edilen ışınlam, sıcaklık, panel gerilim ve akım değerine göre tahmin edilen doluluk oranı, panel gerilimi ve çıkış gerilimi, panel akımı ve çıkış akımı ve son olarak panel gücü ve çıkış gücü değerleri gösterilmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere ışınlam ve sıcaklık değeri arttıkça panelin ürettiği gerilim ve akım değeri de artmaktadır. Çıkışta sabit bir yük ($0,25 \Omega$) ve sınırlandırılmış bir akım (25 ± 3 A) değeri olduğu için panel gücü de 200 ± 20 W değerine sınırlanmıştır. Panel gerilimi arttıkça doluluk oranı değeri azalmakta ve çıkışta sabit ve dengeli bir akım değeri elde edilmektedir.



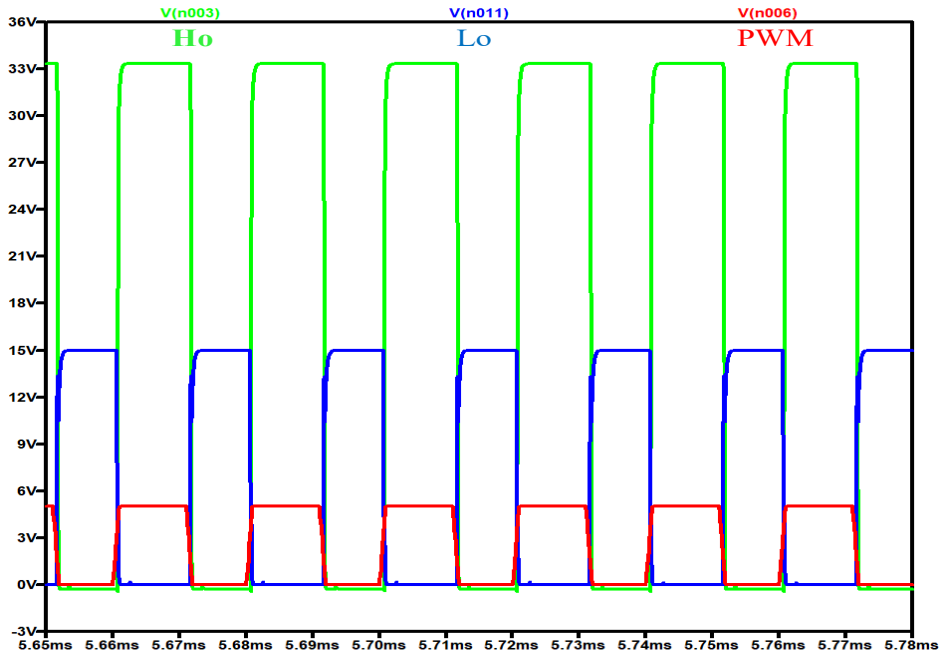
Şekil 41. YSA denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü benzetim sonuçları; (a) ışınlım-zaman grafiği, (b) sıcaklık-zaman grafiği, (c) doluluk oranı-zaman grafiği, (d) gerilim-zaman grafiği, (e) akım-zaman grafiği ve (f) güç zaman grafiği

MATLAB/Simulink uygulamasında bloklar ile oluşturulan PWM sinyali, devre tasarımında IR2110 entegresi kullanılarak tasarlanacağı için Şekil 42’de LTspice uygulaması üzerinden tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 42. LTspice uygulamasında IR2110 ile tasarlanan DA-DA düşüren dönüştürücü sürücü devresi

Devrenin benzetim sonuçları Şekil 43'te gösterilmiştir. Benzetim sonucu PWM sinyali, yüksek taraf çıkış (HO) ve düşük taraf çıkış (LO) elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere +5 V PWM sinyali, +15 V sürücü gerilimine eşit olan LO çıkışı ve son olarak sürücü gerilimi ve giriş geriliminin toplamına eşit olan HO çıkışıdır.



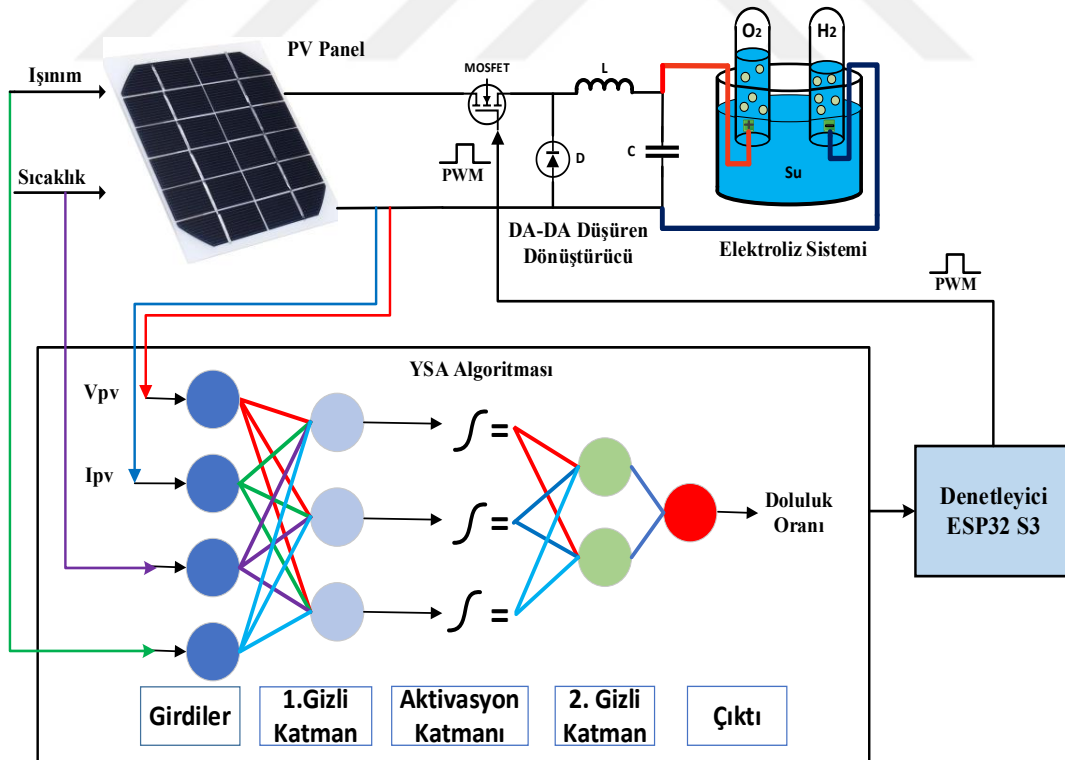
Şekil 43. HO, LO ve PWM sinyali benzetim sonuç grafikleri

4. SİSTEM TASARIMI VE KONTROL YÖNTEMLERİ

Bu sistemde, güneş panelleri kullanılarak hidrojen üretimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda sistem PV panel, YSA algoritması, DA-DA düşüren dönüştürücü ve elektroliz sisteminden oluşmuştur.

PV panel, elde edilen elektrik enerjisinin çevresel koşullardan etkilenmemesi ve panelden maksimum verim elde edebilmek için MPPT algoritması ile kontrol edilmiştir. Bu şekilde panelin maksimum çalışma noktasında sürekli çalışma sağlanarak verimliliğin artırılması amaçlanmıştır. Çıkışta kullanılan elektroliz sisteminin verimli şekilde çalışması için gerekli olan gerilim ve akım değerlerini elde edebilmek amacıyla YSA algoritması denetimli DA-DA düşüren dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu dönüştürücü sayesinde çıkış gerilimi ve akımı kontrol edilebilmektedir.

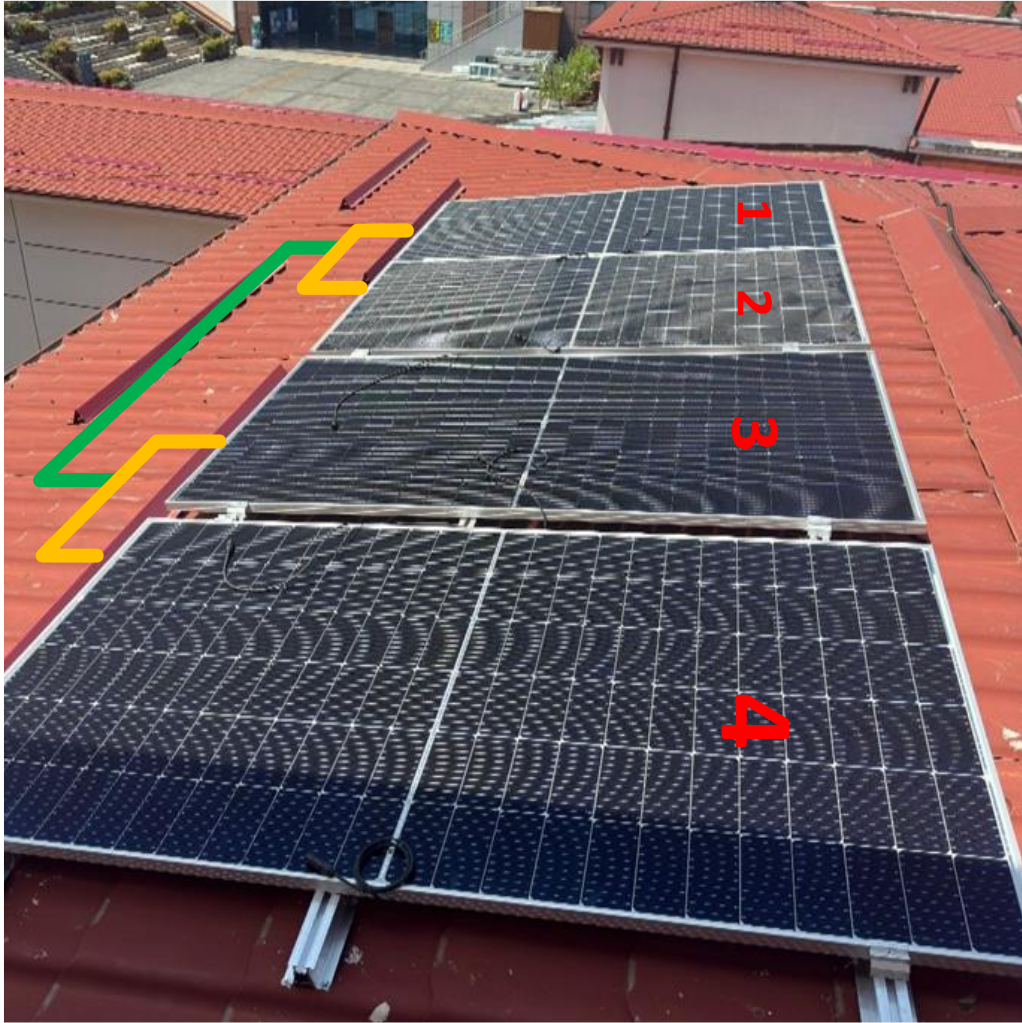
Son olarak ise hidrojen üretimi için paslanmaz çelik plakalar ve elektrolit çözeltisi kullanılarak elektroliz sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 44. Güneş pili kaynaklı hidrojen üretim sistemi için YSA denetimli DA-DA çevirici tasarım şeması

4.1. PV Panel Analizi

Sistem tasarımı için dört adet Sirius marka 545 W gücünde güneş paneli kullanılmıştır. Rize ilinde kullanılacak bu panellerin montajı için eğim hesaplaması teorik olarak yapılmıştır. 41° kuzey enleminde bulunan Rize ili için mevsimsel olarak panel açıları kış ayları 55° , sonbahar-ilkbahar ayları 41° ve yaz ayları için yaklaşık 26° derece kabul edilmiştir (Dal, 2021). Panellerin montajı bu değerlere göre çatıya yapılmıştır. Şekil 45'te montajı yapılan dört adet PV panel gösterilmiştir. Bu paneller seri olarak bağlanmıştır. Her bir panel 545 W maksimum çıkış gücüne sahip olup yaklaşık toplam 2.2 kW'lık bir sistem kurulmuştur. Kurulan bu sistem deneysel çalışmalar haricinde 3 kW'lık MPPT şarj kontrollü bir invertör ile kullanılarak hem bataryayı şarj etmekte hem de aydınlatma, iklimlendirme ve prizleri beslemektedir.



Şekil 45. Çatıya monte edilen, her biri 545 W'lık, güneş panelleri

Güneş panellerinin etiket bilgileri Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. SIRIUS marka güneş paneli etiket bilgileri

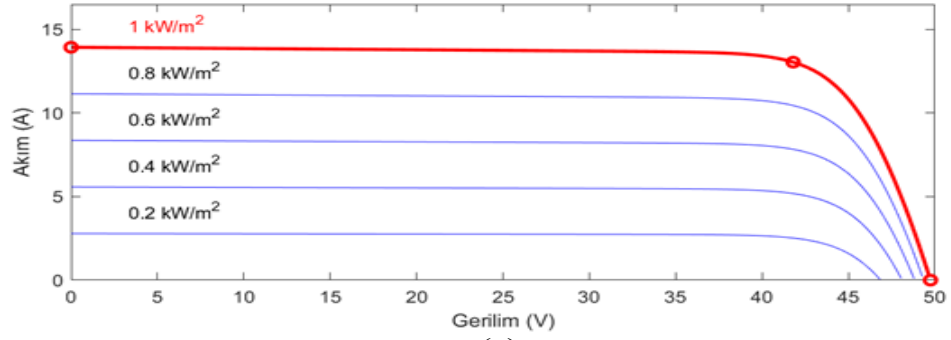
Parametreler	Değerler
Model Tipi	ELNSM72M-HC-HV-545
Maksimum Güç	545 W
Açık devre gerilimi (V_{oc})	49.75 $\pm 3\%$ V
Kısa devre akımı (I_{sc})	133.93 $\pm 5\%$ A
Maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{mp})	41.8 V
Maksimum güç noktasındaki akım (I_{mp})	13.04 A
V_{oc} ‘nin sıcaklık katsayısı (%/deg.c)	-0.2727
I_{oc} ‘nin sıcaklık katsayısı (%/deg.c)	0.061743

PV paneller farklı koşullar altında farklı karakteristik özellikler gösterirler. Bu bağlamda sıcaklık ve ışıınım gibi çevresel faktörler panel karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Bu etki PV panelin gün içerisinde ürettiği akımı ve gerilimi değiştirmektedir. Eşitlik 89’da panel geriliminin sıcaklık ve ışıınımına bağlı formülü; Eşitlik 90’da panel akımının sıcaklık ve ışıınımına bağlı formülü verilmiştir. Bu formülde panel açık devre gerilimi (V_{oc}), panel kısa devre akımı (I_{sc}), anlık ışıınım (G), standart ışıınım ($G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$), açık devre sıcaklık katsayısı ($\alpha = -0.27 \text{ \%/}^\circ\text{C}$), kısa devre sıcaklık katsayısı ($\beta = +0.06 \text{ \%/}^\circ\text{C}$)(Sirius, 2022), anlık sıcaklık (T) ve standart sıcaklık ($T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) değerleri kullanılmaktadır (Şahin, 2020; Şentürk ve Coşkun, 2023)

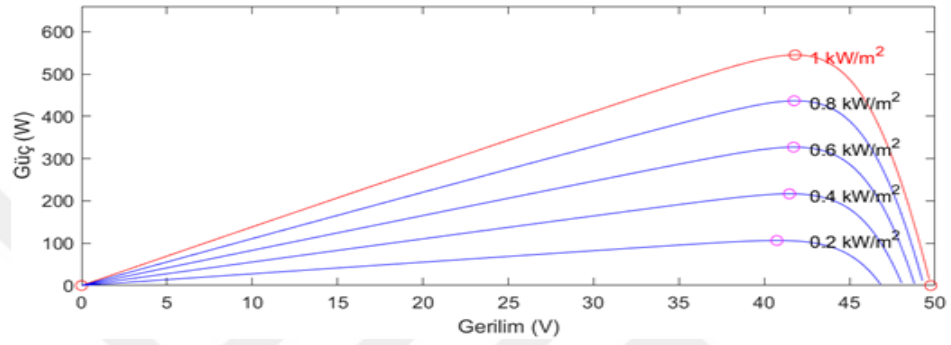
$$V = V_{oc} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (1 + \alpha(T - T_{ref})) \quad (89)$$

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (1 + \beta(T - T_{ref})) \quad (90)$$

PV panelin standart test koşullarında (1000 W/m^2 ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$) ışıınım ve sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V); güç-gerilim (P-V) grafikleri Şekil 46 ve 47’de gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere sıcaklık akım ile doğru gerilimle ters orantılıdır. Çok yüksek sıcaklıklarda panel gerilimi düşüşe geçerken panel akımı en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Işıınım ise hem akımla hem de gerilimle doğru orantılıdır.

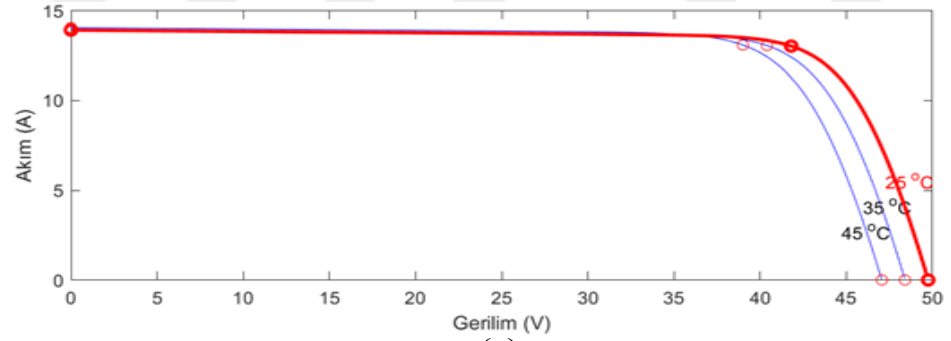


(a)

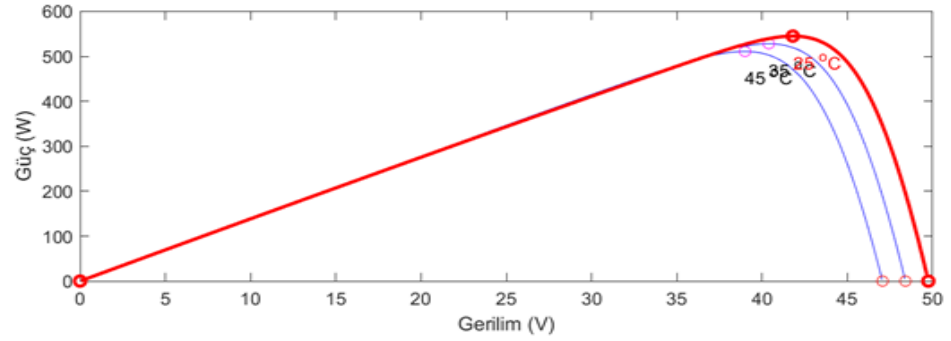


(b)

Şekil 46. Işınım değişimine göre güneş paneli (a) I-V ve (b) P-V grafikleri



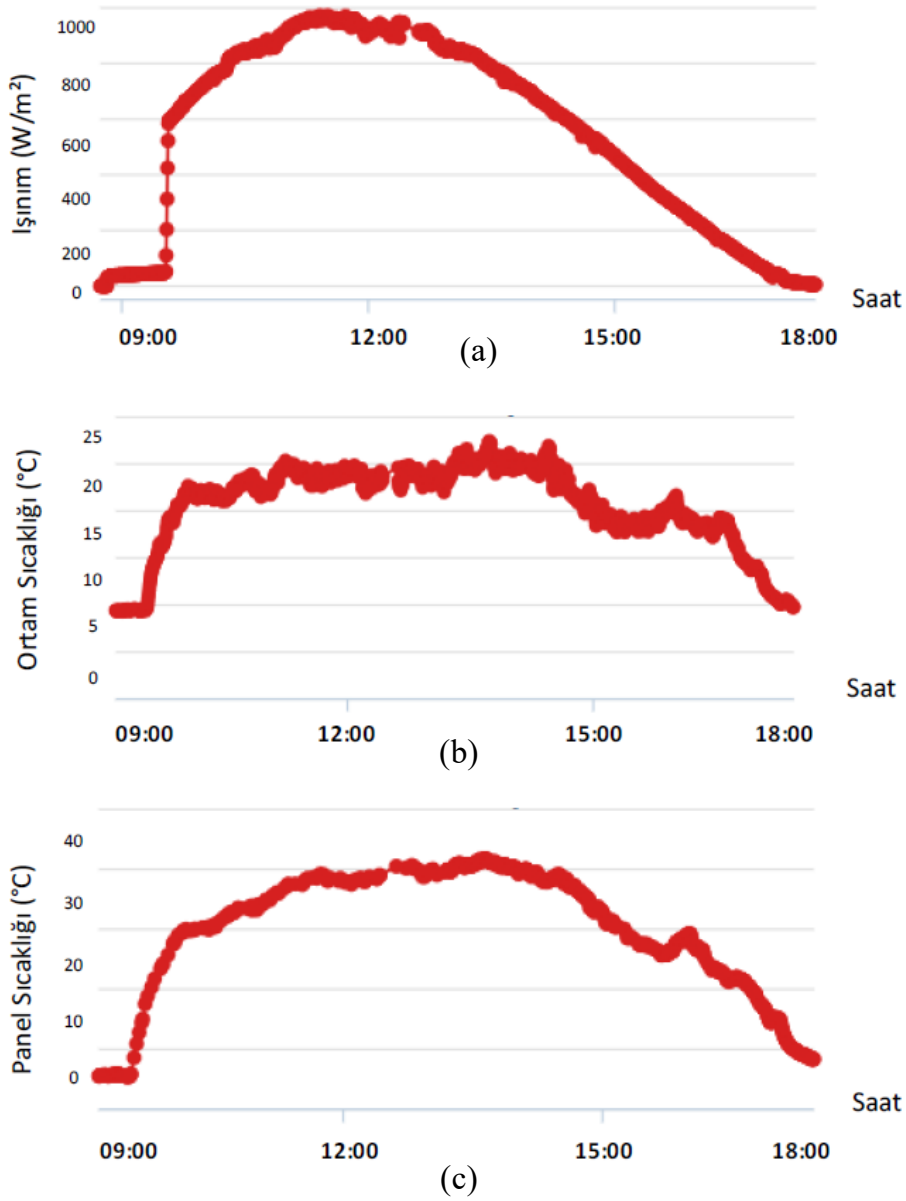
(a)



(b)

Şekil 47. Sıcaklık değişimine göre güneş paneli (a) I-V ve (b) P-V grafikleri

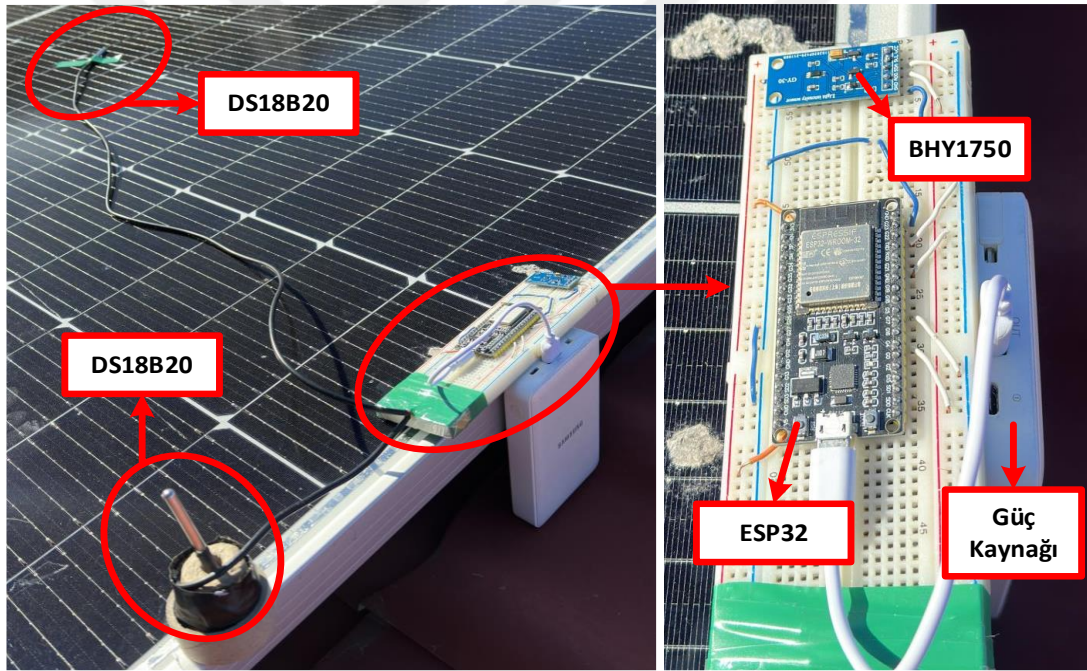
Panelin ocak ayı içerisinde ışıınıma bağılı ölçümleri yapılmıştır. Havanın güneşli olduğı bir gün seçilmiştir. Hava sıcaklığı kış dönemi olduğı için gün boyu 5- 20 °C arasında değışmiştir. Panel sıcaklığı da 25- 35 °C arasında değışiklik göstermiştir. Şekil 48’de 30 Ocak gününde yapılan ölçüme ait ışıınım ve sıcaklık sensörlerine ait değıerler gösterilmiştir. Işıınım değıerinin 200 W/m² ile 600 W/m² arasında ani yükselmesinin sebebi panel çevresinde bulunan ve ışıınımı engelleyen binalardır.



Şekil 48. (a) Işıınım, (b) Ortam sıcaklık ve (c) Panel sıcaklık değıerleri

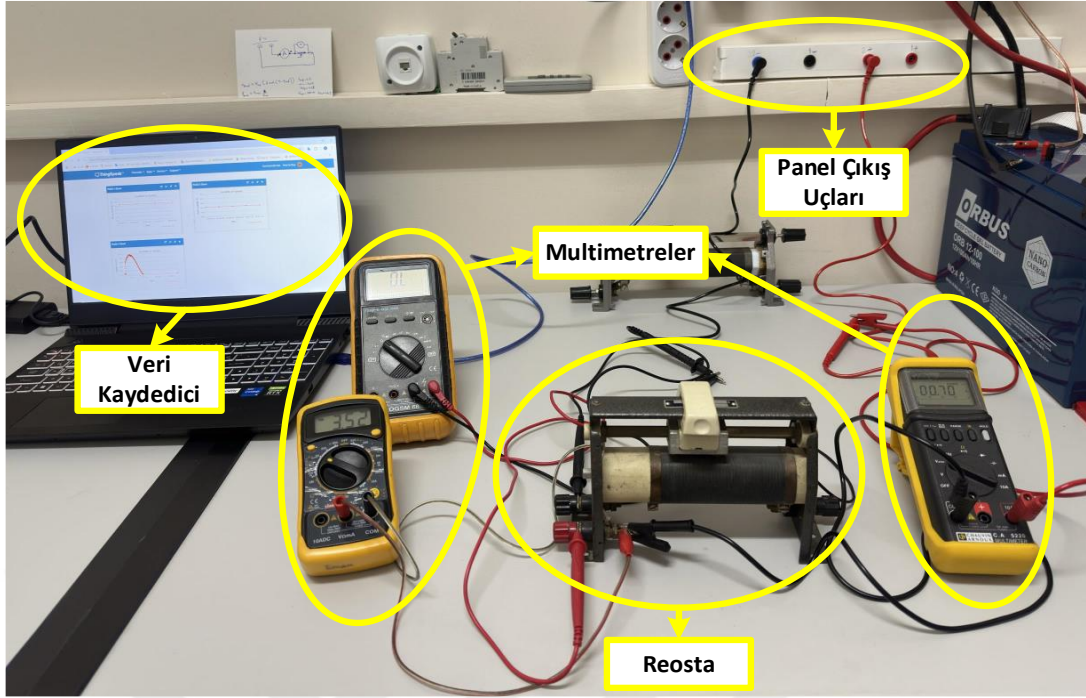
Panelde ortam sıcaklığını ve panel yüzey sıcaklığını ölçmek için iki adet DS18B20 sıcaklık sensörü, güneş ışıınım değerini ölçmek için bir adet BH1750 ışıınım sensörü ve elde edilen verilerin kablosuz bağlantı üzerinden internet ortamına (ThingSpeak) aktarılmasını sağlamak amacıyla bir adet ESP32 mikrodnetleyici modülü kullanılmıştır.

ThingSpeak, nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarında kullanılan bir veri toplama (data logger) platformudur. Bu platform sayesinde internet ortamına aktarılan veriler sisteme kaydedilerek anlık olarak uzaktan takip edilebilmekte ve elde edilen bu veriler direk olarak MATLAB/Simulink uygulamasına aktarılabilir. Şekil 49’da panelden anlık olarak sıcaklık ve ışıınım değerlerini almamızı sağlayan devre tasarımı ve kullanılan bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 49. Anlık ışıınım ve sıcaklık ölçme devre tasarımı

Panel sıcaklık ve ışıınım ölçümleri yapıldığı an eş zamanlı olarak panel verim hesaplaması için anlık sıcaklık ve ışıınıma göre panel gerilim ve akım değeri de ölçülmüştür. Bu ölçüm işlemi için Şekil 50’de gösterildiği üzere bir adet 10 Ω , 150 W sürgülü reosta, üç adet multimetre, panel çıkış uçları, bağlantı kabloları ve veri kaydedici kullanılmıştır.



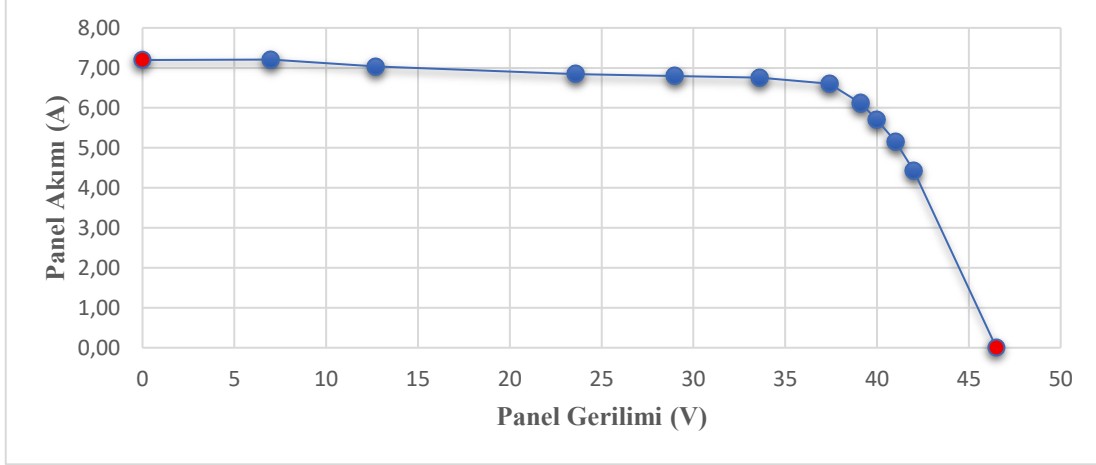
Şekil 50. Güneş paneli maksimum güç noktası tespit uygulama devresi

Panel çıkışına bağlanan sürgülü reosta direnci 0-10 Ω arasında hareket ettirilerek anlık ışınım ve sıcaklık değerine karşılık gelen maksimum güç noktası tespit edilmiştir. Tablo 8’de 830 W/m² ışınım değeri ve ortalama 34 °C sıcaklıkta ki panel gerilim ve panel akım değerleri değişen yüke göre ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Tabloda sarı renkle belirtilen satır maksimum güç noktasındaki değerleri belirtmektedir.

Tablo 8. 830 W/m² ışınım değeri ve ortalama 34 °C sıcaklıkta ki panel gerilim ve panel akım değerleri

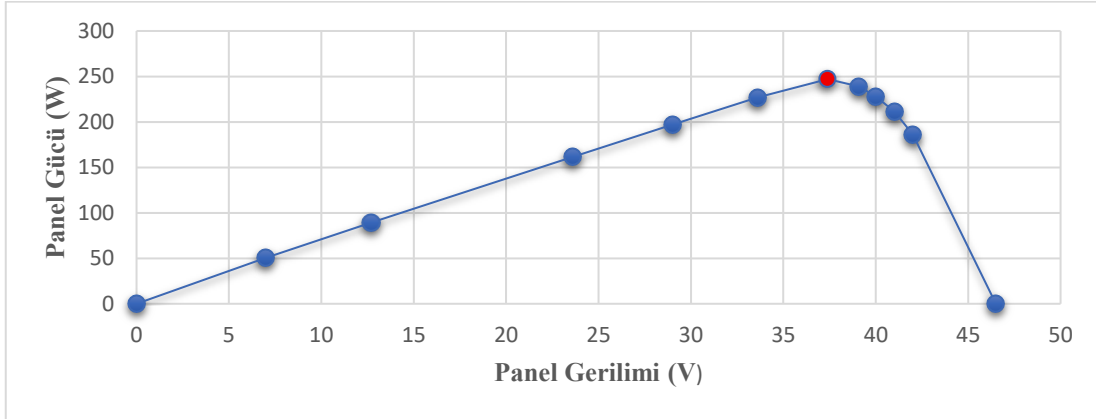
Işınım (W/m ²)	Panel Sıcaklığı (°C)	V _p (V)	I _p (I)	R (Ω)	P (W)
830	35,06	0	7,20	0	0
830	34,44	7	7,21	1	50
830	34,31	12,7	7,03	2	89
830	34,31	23,6	6,85	3	162
830	34,5	29	6,80	4	197
830	34,5	33,6	6,76	5	227
830	34,5	37,4	6,61	6	247
830	34,5	39,1	6,11	7	239
830	34,5	40	5,70	8	228
830	34,5	41	5,15	9	211
830	34,5	42	4,43	10	186
830	35	46,5	0	∞	0

Şekil 51’de Tablo 8’de verilen değerlerin I-V grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğe göre panelimizin 830 W/m^2 ışınlım değeri ve ortalama $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ki açık devre gerilimi $46,5 \text{ V}$ ve kısa devre akımı $6,6 \text{ A}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 51. 830 W/m^2 ışınlım ve ortalama $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ki panel I-V grafiği

Şekil 52’de Tablo 8’de verilen değerlerin P-V grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğe göre panelimizin 830 W/m^2 ışınlım değeri ve ortalama $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ki MPP değeri 247 W olarak ölçülmüştür.



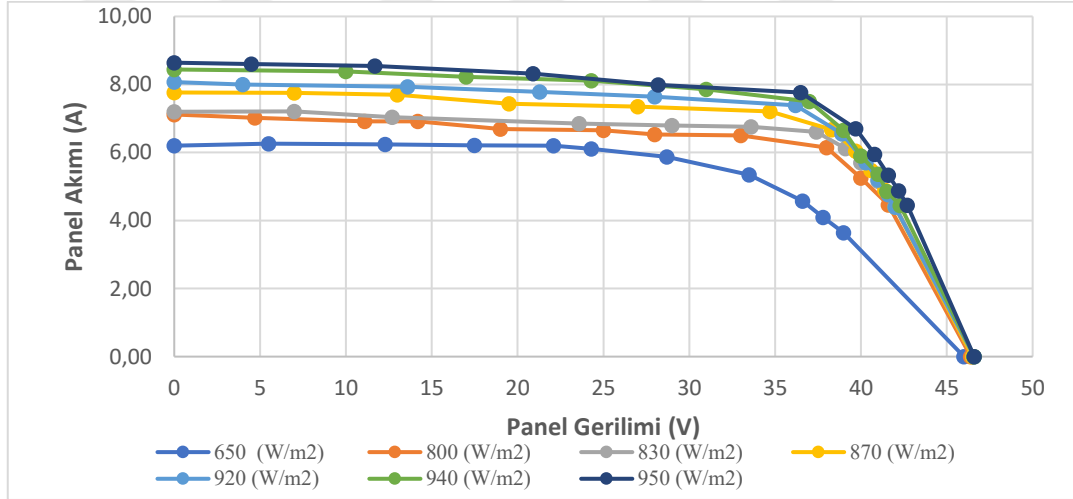
Şekil 52. 830 W/m^2 ışınlım ve ortalama $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ki panel P-V grafiği

Ölçüm işlemleri belirli ışınlım ve sıcaklık değerlerinde de yapılarak panelin maksimum gerilim, maksimum akım ve maksimum güç değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Tablo 9 ve Tablo 10’da gösterilmiş ve maksimum gerilim, akım ve güç değerleri vurgulanmıştır.

Tablo 9. Farklı ışıınım değerlerine göre ölçülen panel gerilim ve akım değerleri

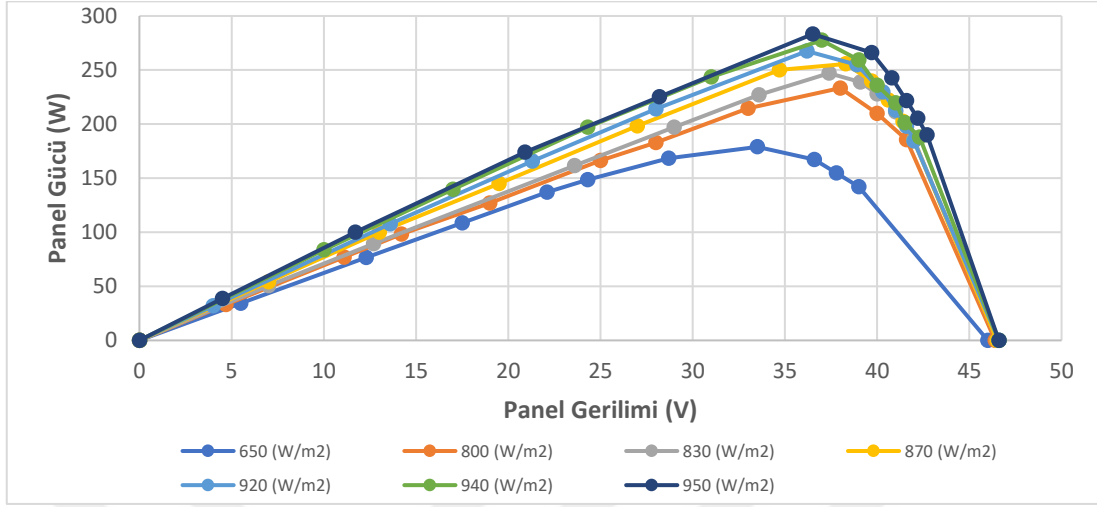
650 (W/m ²)		800 (W/m ²)		830 (W/m ²)		870 (W/m ²)		920 (W/m ²)		940 (W/m ²)		950 (W/m ²)	
V _p	I _p	V _p	I _p	V _p	I _p	V _p	I _p	V _p	I _p	V _p	I _p	V _p	I _p
0	6,20	0	7,12	0	7,20	0	7,76	0	8,07	0	8,44	0	8,64
5,5	6,26	4,7	7,02	7	7,21	7	7,75	4	8	10	8,38	4,5	8,6
12,3	6,24	11,1	6,92	12,7	7,03	13	7,69	13,6	7,93	17	8,22	11,7	8,54
17,5	6,21	14,2	6,92	23,6	6,85	19,5	7,43	21,3	7,78	24,3	8,11	20,9	8,32
22,1	6,20	19	6,69	29	6,80	27	7,35	28	7,64	31	7,86	28,2	7,99
24,3	6,11	25	6,65	33,6	6,76	34,7	7,21	36,2	7,39	37	7,5	36,5	7,76
28,7	5,87	28	6,53	37,4	6,61	38,3	6,67	38,9	6,55	39	6,65	39,7	6,7
33,5	5,34	33	6,50	39,1	6,11	39,7	6,04	40,3	5,7	40	5,9	40,8	5,95
36,6	4,57	38	6,14	40	5,70	40,6	5,48	41	5,19	41	5,36	41,6	5,33
37,8	4,09	40	5,25	41	5,15	41,4	4,89	41,6	4,76	41,5	4,85	42,2	4,87
39	3,64	41,6	4,46	42	4,43	42	4,39	42	4,39	42,3	4,44	42,7	4,45
46	0	46,4	0	46,5	0	46,5	0	46,6	0	46,6	0	46,6	0

Şekil 53'te Tablo 9'da ölçülen değerlere göre panel I-V eğrisi çıkartılmıştır.

**Şekil 53.** Farklı ışıınım değerleri için panel I-V eğrisi**Tablo 10.** Farklı ışıınım değerlerine göre ölçülen panel gerilim ve güç değerleri

650 (W/m ²)		800 (W/m ²)		830 (W/m ²)		870 (W/m ²)		920 (W/m ²)		940 (W/m ²)		950 (W/m ²)	
V _p	P	V _p	P	V _p	P	V _p	P	V _p	P	V _p	P	V _p	P
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,5	34	4,7	33	7	50	7	54	4	32	10	84	4,5	39
12,3	77	11,1	77	12,7	89	13	100	13,6	108	17	140	11,7	100
17,5	109	14,2	98	23,6	162	19,5	145	21,3	166	24,3	197	20,9	174
22,1	137	19	127	29	197	27	198	28	214	31	244	28,2	225
24,3	148	25	166	33,6	227	34,7	250	36,2	268	37	278	36,5	283
28,7	168	28	183	37,4	247	38,3	256	38,9	255	39	259	39,7	266
33,5	179	33	215	39,1	239	39,7	240	40,3	230	40	236	40,8	243
36,6	167	38	233	40	228	40,6	222	41	213	41	220	41,6	222
37,8	155	40	210	41	211	41,4	202	41,6	198	41,5	201	42,2	206
39	142	41,6	186	42	186	42	185	42	184	42,3	188	42,7	190
46	0	46,4	0	46,5	0	46,5	0	46,6	0	46,6	0	46,6	0

Şekil 54'te Tablo 10'da ölçülen değerlere göre panel P-V eğrisi çıkartılmıştır.



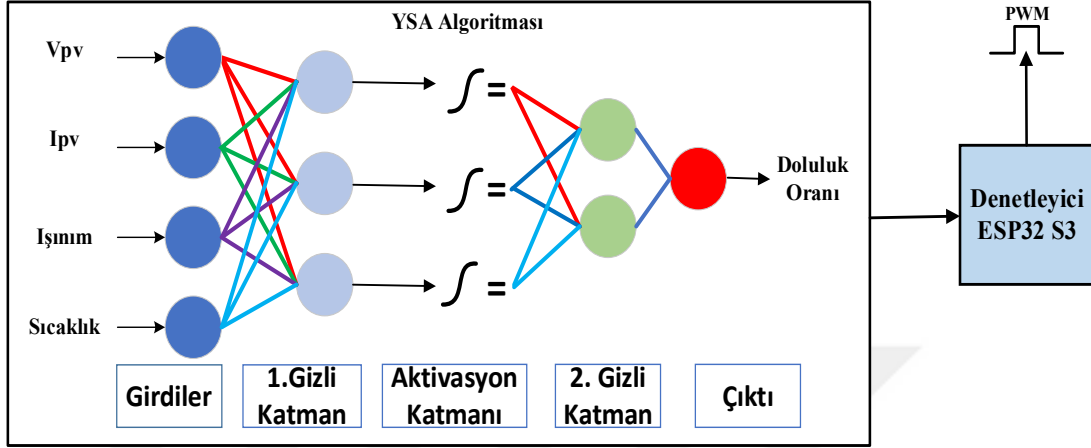
Şekil 54. Farklı ışınlam değerleri için panel P-V eğrisi

Bu ölçümler sonucunda bir adet panelin maksimum güç noktasının 950 W/m^2 ve 35°C de yaklaşık 300 W olduğu gözlemlenmiştir. Panel gücünün etiket değerinden düşük ölçülmesinin başlıca nedenleri şu şekilde olabileceği düşünülmektedir;

- Etiket değeri 1000 W/m^2 değerine göre belirlenmektedir. Kullanılan ışınlam sensörü sanayi tipi gelişmiş bir sensör olmadığından dolayı ve panel eğiminin tam ayarlanmamış olmasından dolayı ölçülen ışınlam değeri anlık gerçek değeri yansıtmamış olabilir.
- Panel sıcaklığı gerilimle ters orantılı olduğu için sıcaklık arttığı zaman gerilim düşümü yaşanmış ve panel gücü düşmüş olabilir.
- Panelin belirli bir kısmında kısmi gölgelenme meydana gelmesinden dolayı verim düşümü yaşanabilmektedir.
- Uygulamada kullanılan reosta 150 W değere sahiptir. Ölçüm esnasında aşırı ısınması panel verimliliğini etkileyebilmektedir.
- Kullanılan bağlantı elemanlarının iç dirençlerinin düşük olması ve panelden devreye çekilen hattın yaklaşık 20 metre olması panel verimini etkilemektedir.
- Kullanılan panelin panel hücrelerinde etiket ömrünü tamamlamış pasif hücreler olabileceğinden verim düşümü yaşanması muhtemeldir.

4.2. Yapay Sinir Ağları MPPT Sistemi Tasarımı

Yapay sinir ağları algoritması kullanılarak tasarlanacak MPPT sistemi için öncelikli olarak bir modelleme çıkartılmıştır. Bu modelleme Şekil 55'te gösterilmiştir.

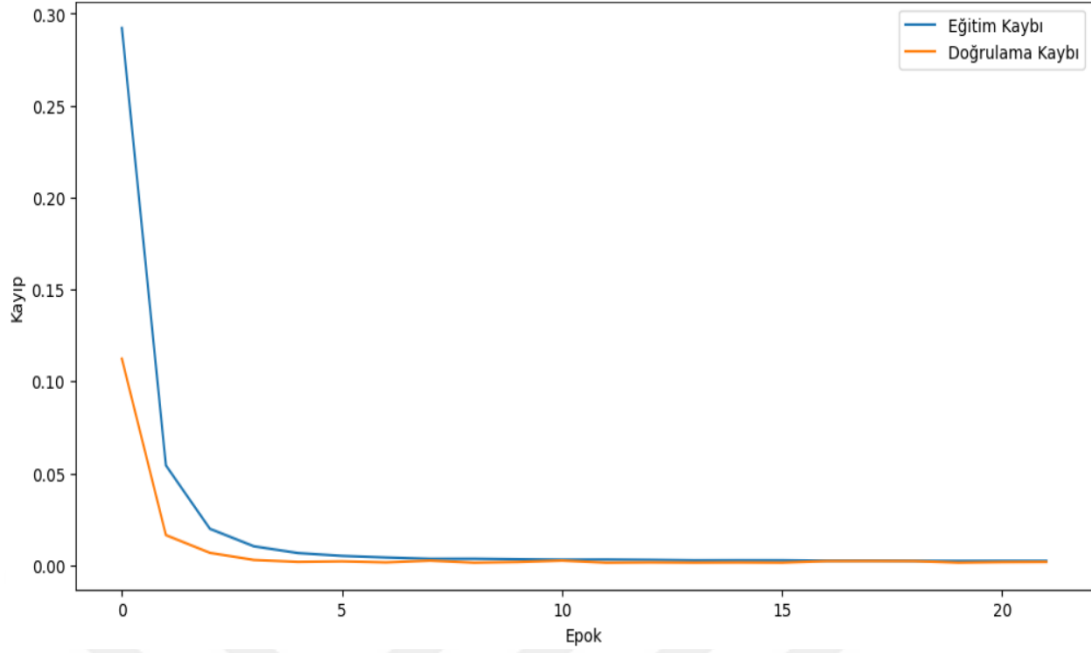


Şekil 55. YSA-MPPT algoritması modeli

YSA-MPPT algoritmasını tasarlayabilmek için öncelikle YSA algoritması için bir veri havuzu hazırlanmıştır. Bu veri havuzu, sistem çalıştırılarak, gün boyu anlık olarak panel gerilimi, panel akımı ve doluluk oranının kaydedilmesi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan veri havuzundaki anlık panel gerilimi ve panel akımı verileri giriş veri seti olarak seçilmiştir. Aynı şekilde veri havuzundaki doluluk oranı verileri çıkış veri seti olarak seçilmiştir. Bu veri havuzunda giriş veri setine ekstra olarak ışıınım ve sıcaklık değerleri de eklenebilecektir.

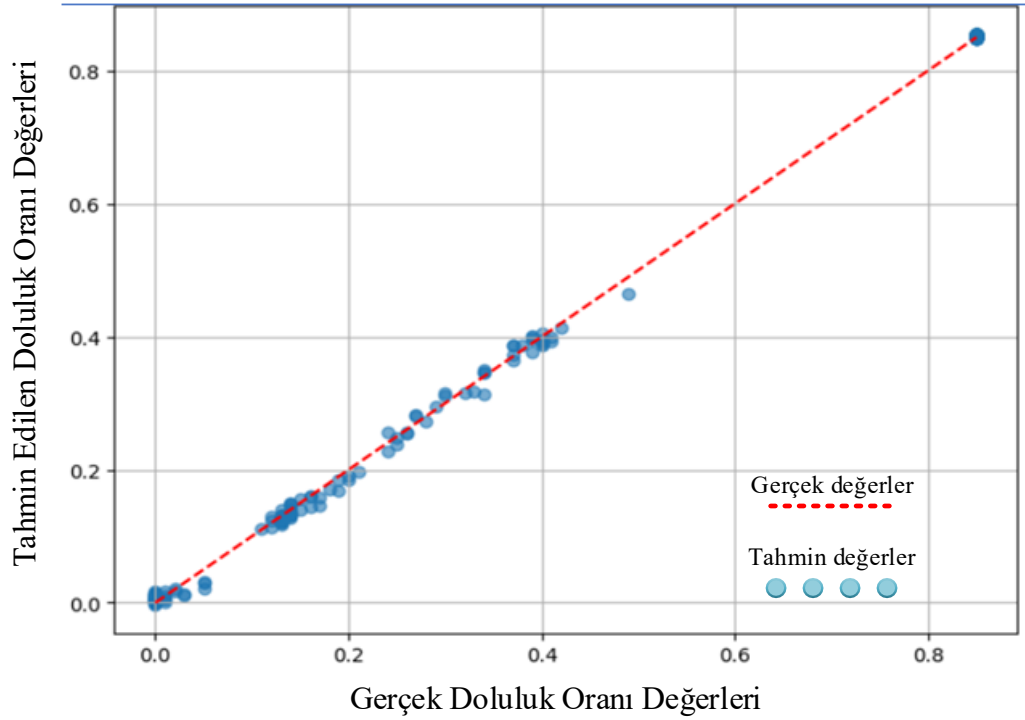
Hazırlanan veri setlerinin veri ön işleme, model oluşumu, eğitimi ve değerlendirme sonucuna göre kaydedilme işlemi Python Jupyter Notebook derleyicisi kullanılarak yapılmıştır (Ek-6). Veri seti %80 eğitim ve %20 test verisi olarak ayrılmıştır. Eğitim sonucu dosyası ESP32 S3 mikrodeneleyicisinin çalışma formatına göre direk olarak .h formatında oluşturulmuştur fakat bu dosya türü Arduino IDE programlayıcısında çalışmadığı için tensor flow little (.tflite) formatına dönüştürülmüştür.

Eğitim sonucu elde edilen model kaybı gelişimi grafiği Şekil 56'da gösterilmiştir. Model kaybı grafiğinde eğitim kaybı ve doğrulama kaybı azalıp sabitlendiği için modelin eğitiminin başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Epok tüm veri setinin bir defa modelden geçirilme sürecidir (Eser Erdek, 2023).



Şekil 56. Modelin eğitim ve doğrulama kaybının gelişimi

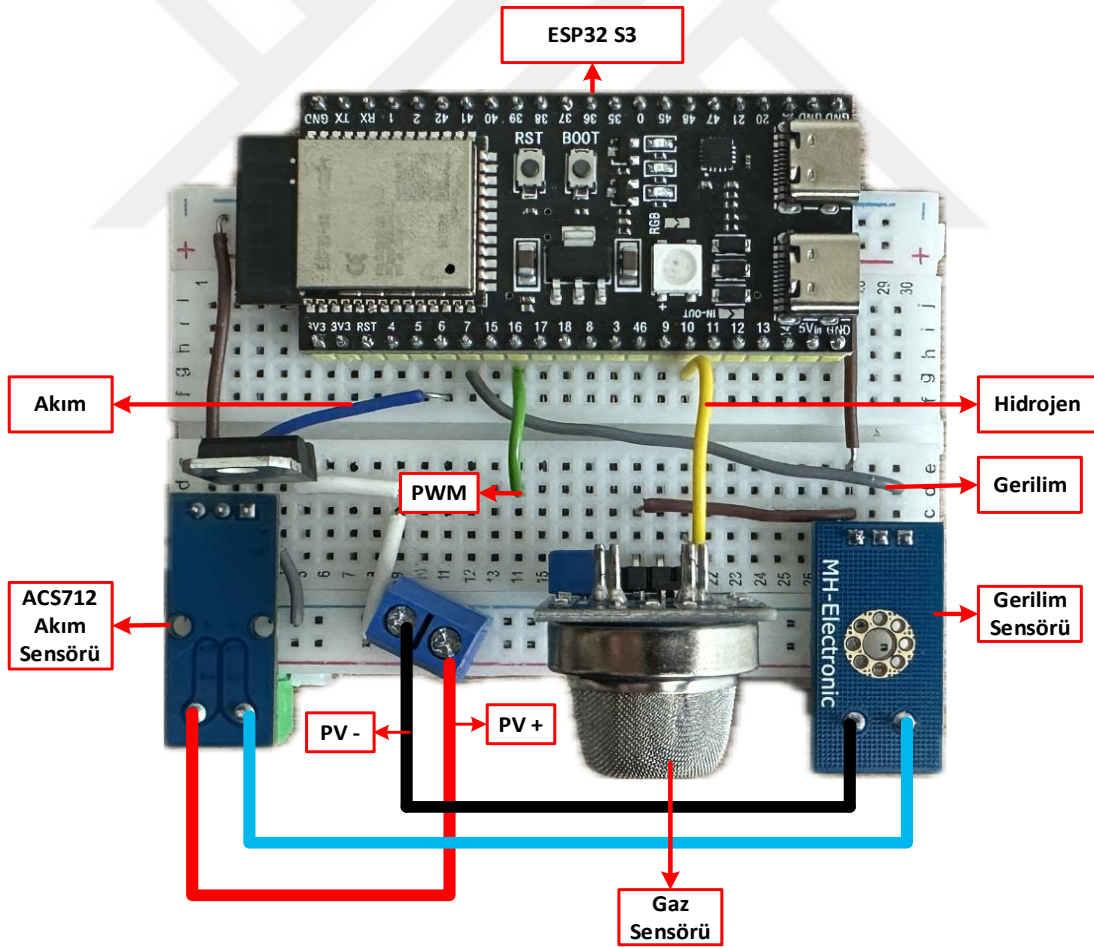
Eğitim sonucu elde edilen gerçek ve tahmin edilen değerler Şekil 57’de gösterilmiştir. Modellemenin determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0.9754 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç modelin yüksek doğrulukta çalıştığını göstermektedir.



Şekil 57. Gerçek ve tahmin edilen doluluk oranı değerleri

Eğitilen ve Arduino IDE programlayıcısı için tensor flow little (.tflite) formatına dönüştürülen eğitilmiş veri seti dosyamız ESP32 S3 mikrodenetleyici kartına yüklenmiştir. ESP32 S3 kartı yüksek frekanslarda PWM sinyali üretebilme ve yapay zekâ algoritmalarını çalıştırabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Karta yüklenen yazılım ile anlık olarak dışardan ölçeceğimiz panel gerilimi ve panel akımına karşılık bir doluluk oranı tahmin etmektedir ve bu doluluk oranını 20 kHz frekansta çalışan bir PWM sinyaline dönüştürmektedir. Elde edilen PWM sinyali devrede bulunan MOSFET'leri sürmektedir. Anlık olarak değişen değerlere göre doluluk oranımız kontrol edilerek çıkışta maksimum akım elde edilmesi sağlanmıştır.

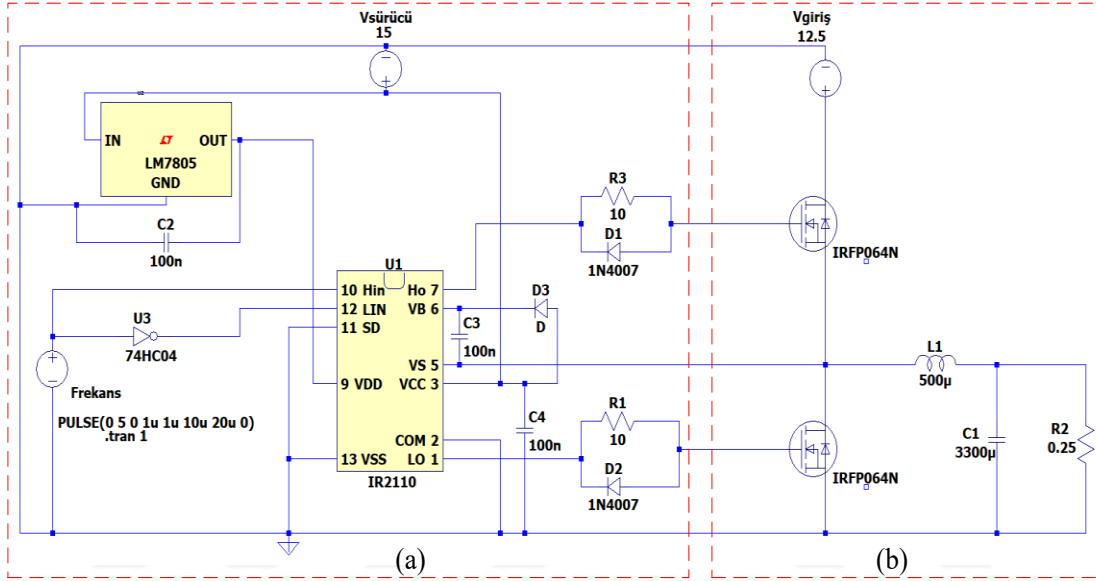
Şekil 58'de akım sensörü, gerilim sensörü ve ESP32 S3 programlama kartı kullanılarak tasarlanan YSA-MPPT algoritma tabanlı PWM sinyal üretici devresi gösterilmiştir.



Şekil 58. YSA-MPPT algoritması ile tasarlanan PWM sinyal üretici

4.3. DA-DA Dönüştürücü Tasarımı

Devre için düşüren dönüştürücü modeli tasarlanmıştır. Bu dönüştürücü ile panelden elde edilen giriş gerilimi istenilen gerilim değerine düşürülecek ve çıkıştaki elektroliz sistemi çalıştırılacaktır. Şekil 59(a)'da LTspice uygulaması kullanılarak yapılan IR2110 sürücü devresinin ve Şekil 59(b)'de LTspice uygulaması kullanılarak yapılan düşüren dönüştürücü devresinin tasarımı gösterilmiştir.

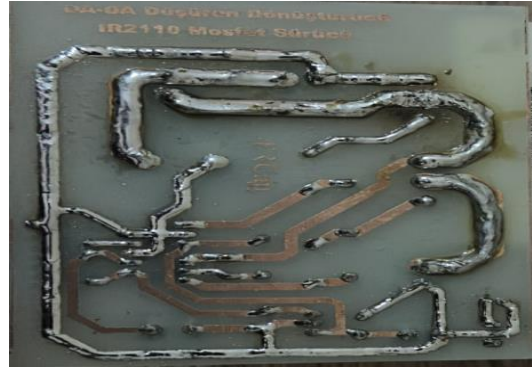


Şekil 59. (a) IR2110 MOSFET sürücü ve (b) DA-DA düşüren dönüştürücü devresi

Devre bir güç elektroniği devresi olduğu için kullanılan malzemeler yüksek akımlara ve gerilimlere dayanıklı olarak seçilmiştir. Bu seçimler her bir ürün için gerekli hesaplamalar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Devre tasarımı Şekil 60(b)'de gösterildiği gibi sistemin ortalama 25 A akım taşıyacağı şekilde yapılmıştır.

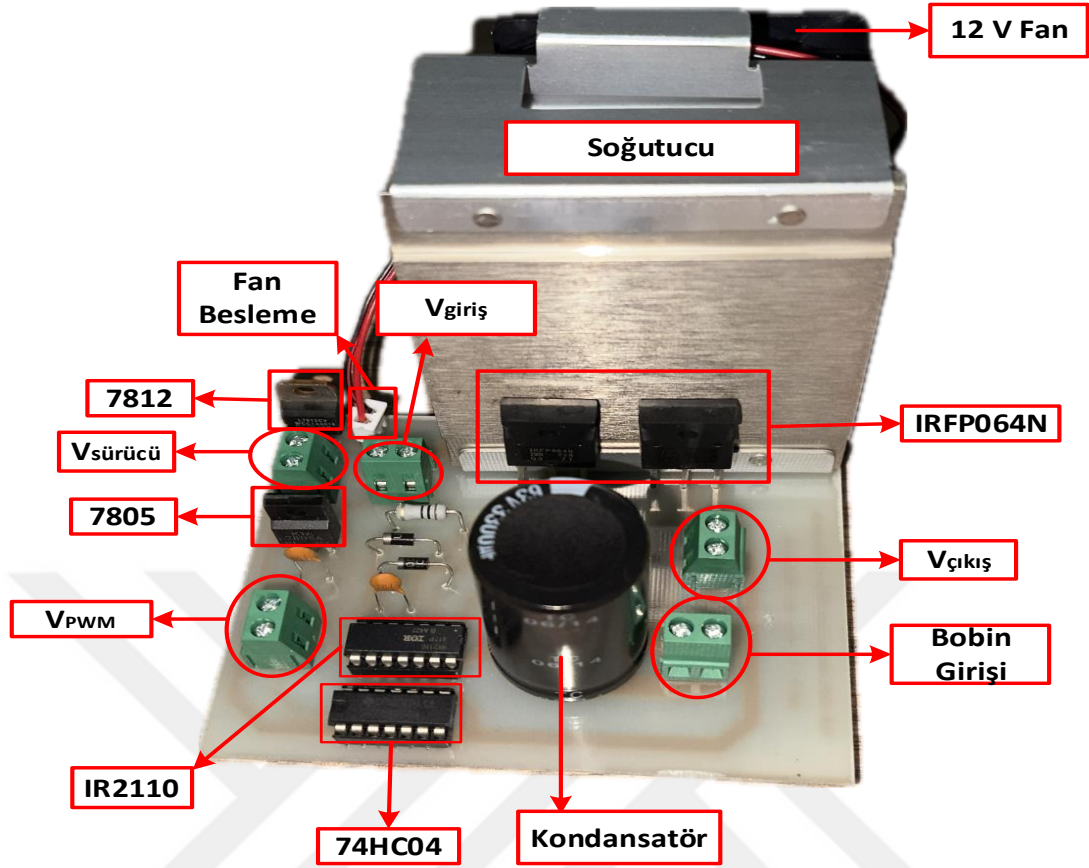


(a)



(b)

Şekil 60. (a) Baskı devre ve (b) lehim aşamaları



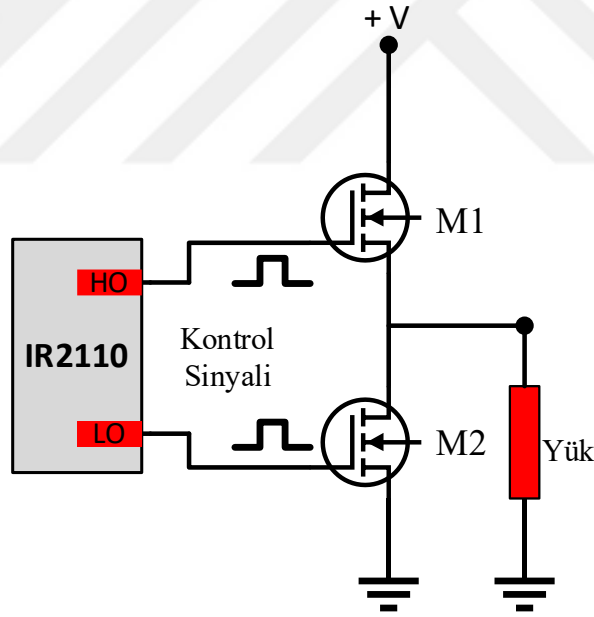
Şekil 61. Devrede kullanılan malzemelerin gösterimi

Devrede beş adet iki pin klemens bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla PWM sinyali, sürücü besleme, giriş besleme, çıkış ve bobin klemensleridir. 12 V fan beslemesi için 7812 gerilim regülatörü ve devredeki entegreleri beslemek için (+5 V) 7805 gerilim regülatörü kullanılmıştır. MOSFET'leri yüksek ve düşük taraf olarak aynı anda sürmek için IR2110 (Ek-4) entegresi kullanılmıştır. IR2110 entegresinin giriş pinleri olan H_{in} ve L_{in} pinlerine gerekli frekansları sağlamak için 74HC04N kullanılmıştır. MOSFET gate bacaklarına giden akımları sınırlamak için UF4007 diyot ve 1 W 10 Ω direnç kullanılmıştır. Yüksek taraf MOSFET'ine gerekli gerilimin verilmesini sağlamak amacıyla 100 nF tantal bootstrap kondansatörü kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak iki adet IRFP064N (Ek-5) MOSFET kullanılmıştır. Bu MOSFET'ler aşırı ısındığı için 80x80 mm soğutucu ve bu soğutucunun devamlılığının sağlanması için fan kullanılmıştır. Devrede enerji depolayıp iletmek için bobin kullanılmıştır. Devre çıkışındaki gerilim dalgalanmalarını azaltmak ve sabit bir çıkış elde etmek için kondansatör kullanılmıştır.

4.3.1. MOSFET ve Sürücü Devresinin Tasarımı

Sürücü devreleri, MOSFET'lerin hızlı ve etkili bir şekilde anahtarlanmasını sağlayarak sistem verimliliğinin artmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda devrenin aşırı gerilim ve akım değerlerine karşı korunmasını sağlamaktadır.

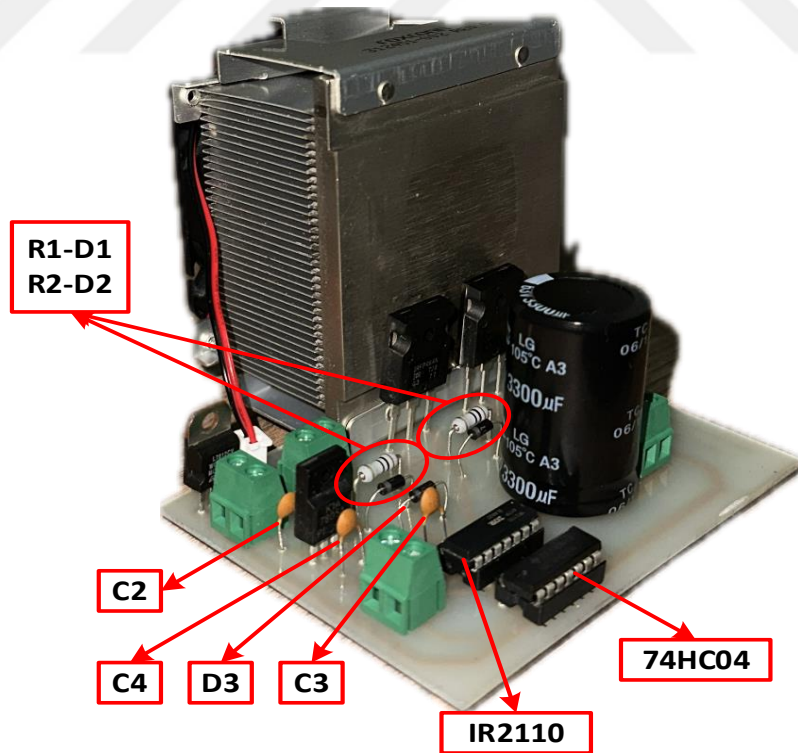
MOSFET'lerin sürülmesi için minimum bir V_{gs} değeri uygulanmalıdır. Bu değer N-kanal ve P-kanal MOSFET'lerde değişiklik göstermektedir. Bu değeri elde etmek için sürücü devreleri kullanılmaktadır. 1-5 V PWM sinyalleri, ± 20 V gerilim değerlerine dönüştürülmektedir. Bu değerleri elde etmek ve MOSFET'i sürmek için düşük taraf, yüksek taraf ve düşük-yüksek taraf anahtarlama gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Şekil 62'de gösterilen yüksek taraf (HO) ve düşük taraf (LO) anahtarlama modeli ise genellikle iki güç MOSFET'inin bulunduğu devrelerde aynı anda yüksek ve düşük taraf anahtarlama yapma olanağı sağlar. Bu şekilde sistem verimliliği artar ve anahtarlama süresi hızlanır (Trivedi, 2016).



Şekil 62. Yüksek ve alçak taraf anahtarlama

DA-DA düşüren dönüştürücü devresinde MOSFET sürme devresi olarak IR2110 entegre devresi kullanılmıştır. IR2110, mikrodenetleyici ve frekans sinyalleri gibi küçük sinyaller ile güç MOSFET'lerini sürmemizi sağlayan bir entegredir. Şekil 63'te gösterildiği şekilde devre tasarımı yapılan IR2110 devresi şu şekilde çalışmaktadır;

- Frekans üreticinin ürettiği sinyal IR2110 entegresinin H_{in} pinine, 74HC04N entegresinde terslenen frekans L_{in} pinine bağlanmaktadır.
- İlk olarak L_{in} pini aktif olduğunda yani MOSFET'in LO çıkışını sürmek için sinyal geldiği zaman düşük taraf MOSFET'i iletime geçer ve C_3 (100 nF) kondansatörü şarj olur. Bu şarj işlemi $V_{sürücü}$ gerilimi kadar olur. C_3 kondansatörü bootstrap kondansatörüdür
- L_{in} pini pasif ve H_{in} pini aktif olduğunda yani MOSFET'in HO çıkışını sürmek için sinyal geldiği zaman yüksek taraf MOSFET'i iletime geçer. Bu sırada bootstrap kondansatörü deşarj olur ve yüksek taraf MOSFET'inin source bacağı üzerinde $V_{giriş}$ gerilimine ek olarak $V_{sürücü}$ gerilimi kadar ilave gerilim oluşur.
- Bootstrap kondansatörünün değeri devreye verilen frekansın görev oranına göre seçilmelidir. Çünkü MOSFET'in iletim süresi fazla ise ve kondansatör değeri küçük ise yeterli gerilim sağlanamaz. Kondansatör değeri çok büyük de seçilmemelidir çünkü bu sefer de şarj ve deşarj süresi artacağı için MOSFET iletime geçmeyebilir. (Trivedi, 2016).



Şekil 63. Tasarlanan IR2110 sürücü devresi elemanları

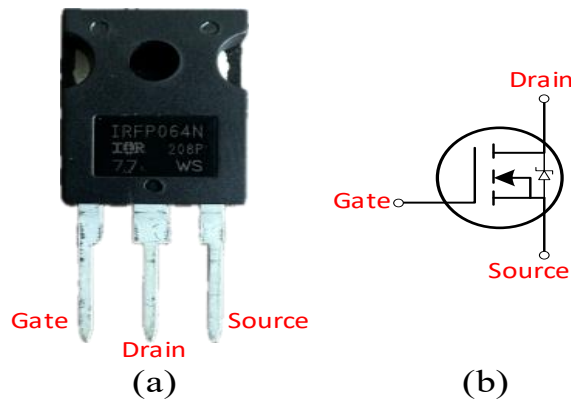
- R_1 ve R_2 ($10\ \Omega$) dirençleri; D_1 ve D_2 (1N4007) diyotları gate akımını sınırlayan devre elemanlarıdır. D_3 diyotu bootstrap kondansatörünü şarj etmek için kullanılır. 74HC04 logic tersleyen entegresidir. LM7805 gerilim düzenleyicidir. IRFP054N güç MOSFET’idir.

MOSFET’ler DA-DA düşüren dönüştürücü devrelerinde anahtarlama elemanı olarak kullanılmaktadır. Devredeki en önemli elemanlardan biriside MOSFET’tir. Uygulama bir güç uygulaması olduğu için güç MOSFET’i seçilmiştir. Bu seçim yaparken drain-source gerilimi (V_{ds}), drain akımı (I_d), R_{ds} direnci, gate eşik gerilimi ($V_{gs(th)}$) ve gate gerilimi (V_{gs}) gibi parametreler devreye uygunluğu göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Devre 43 V ve 25 A gibi yüksek gerilim ve akım değerlerinde çalışacağı için IRFP064N MOSFET’i kullanılmıştır (Aden, 2018). Tablo 11’de IRFP064N’in özellikleri belirtilmiştir ve veri sayfası Ek-5’de verilmiştir.

Tablo 11. IRFP064N kodlu MOSFET’in özellikleri

	V_{ds} (V)	I_d (A)	R_{ds} (Ω)	V_{gs} (V)	$V_{gs(th)}$ (V)	Paket	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
IRFP064N	55	110	0,008	± 20	2~ 4	TO-247	-55 ~ +175

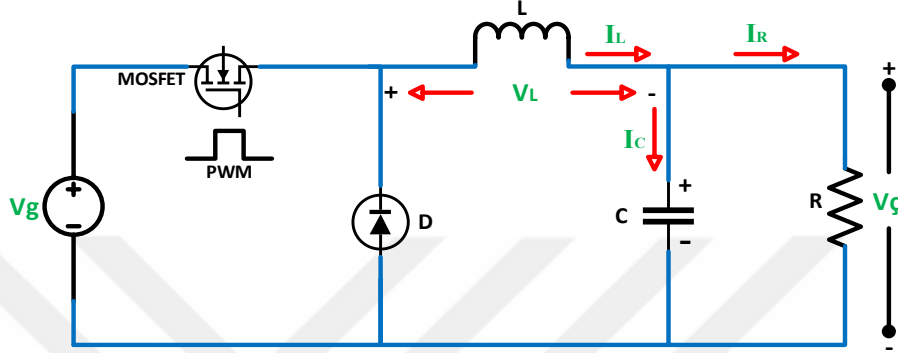
V_{ds} , MOSFET’in maksimum dayanabileceği gerilim değeridir. I_d , MOSFET’in maksimum dayanabileceği akım değeridir. R_{ds} , MOSFET iletimdeyken drain ve source uçları arasındaki direnç değeridir. Bu değer ne kadar küçükse MOSFET daha az ısınır. $V_{gs(th)}$, MOSFET’in açılması için gate kapısına uygulanması gereken minimum gerilim değeridir bir diğer adıyla eşik değeridir. V_{gs} , MOSFET’in gate ve source uçları arasındaki gerilim farkına eşittir



Şekil 64. (a) IRFP064N MOSFET ve (b) IRFP064N MOSFET’in iç yapısı

4.3.2. Bobin Tasarımı

DA-DA dönüştürücü modellerinde kullanılan en önemli devre elemanı bobindir. Çünkü bobin devrenin sürekli çalışması için gerekli enerjiyi depolayan ve anahtar açıldığında depoladığı bu enerjiyi sisteme vererek döngünün devam etmesini sağlayan bir devre elemanıdır. Şekil 65’de DA-DA düşüren dönüştürücü devresi gösterilmiştir.

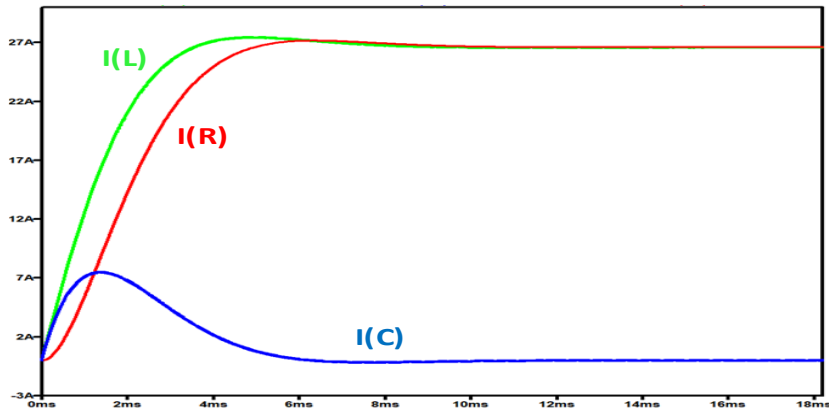


Şekil 65. DA-DA düşüren dönüştürücü devresi

Şekil 65’de görüldüğü gibi bobin üzerinde I_L akımı akmaktadır. Bu değer kondansatör ve direnç üzerinden geçen akım değerlerinin toplamına eşit olmaktadır.

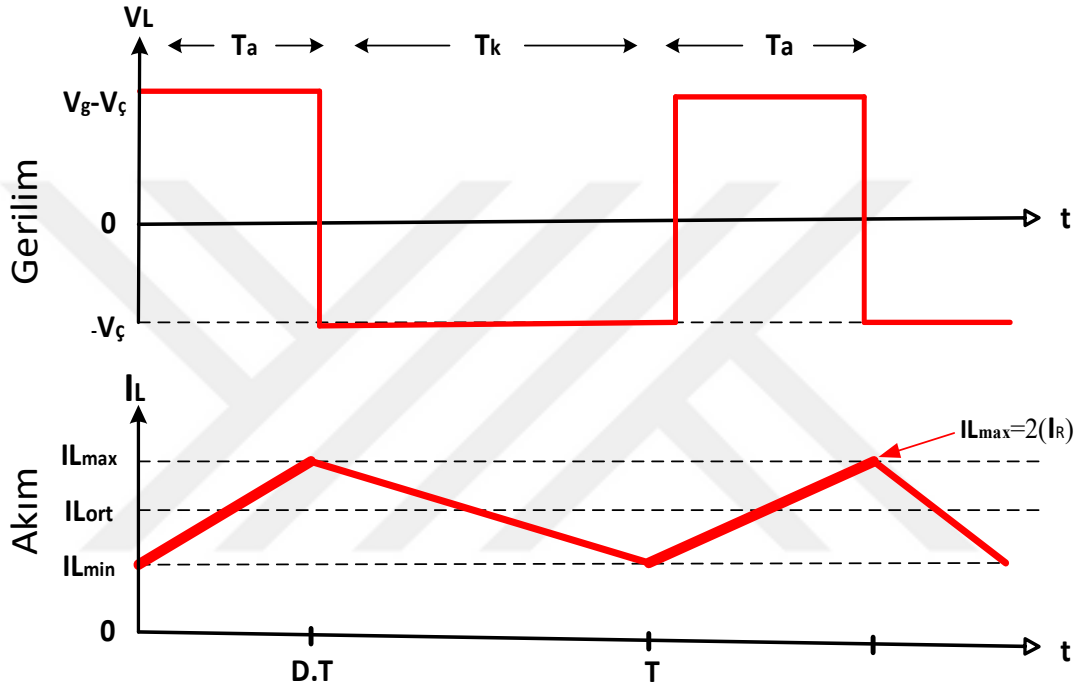
$$I_L = I_R + I_C \quad (91)$$

Benzetimden elde edilen Şekil 66’da gösterildiği üzere kondansatör DA devrelerinde açık devre özelliği göstermektedir. Sürekli bir enerji dolun boşaltım işlemi gerçekleştirdiği için üstünden geçen ortalama akım sıfır olarak kabul edilmektedir.



Şekil 66. Bobin, direnç ve kondansatör akım grafikleri

Şekil 67’de görüldüğü üzere devrede bulunan anahtarlama elemanı açık olduğu zaman bobin gerilimi giriş ve çıkış gerilim farkına eşit olmakta ve bobin üzerinde enerji depolanması dolayısıyla akımında artış yaşanmaktadır. Anahtar kapatıldığında ise bobin gerilimi negatif çıkış gerilimine eşit olmakta ve bobin üzerinde depolanan enerji devreyi beslediğinden dolayı akım azalmaktadır. Sonuç olarak bobin sürekli modda çalışmakta ve üzerindeki akım sıfırlanmamaktadır (Mohan, 2003; Sahin, 2020)



Şekil 67. Anahtarlama elemanının tam açık ve tam kapalı durumlarında sürekli modda oluşan bobin gerilim ve akım grafiği

DA-DA düşüren dönüştürücü ve diğer dönüştürücülerde bobin değerinin hesaplanması ve uygun bir değer seçilmesi devrenin sürekli, sınırlı ve süresiz iletim modunda çalışma durumunu belirlemektedir. Eşitlik 92 ve Eşitlik 93’te belirtilen denklemler yardımı ile kritik bobin değeri hesaplanmaktadır.

$$V_g - V_{\phi} = L \frac{2I_R}{D_T} \quad (92)$$

$$L = \frac{D_T (V_g - V_{\phi})}{2I_R} \quad (93)$$

Belirlenen bobin değerine göre bobin tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu tasarım aşamasında bobin denklemleri, tel yapısı, çekirdek yapısı ve güç kayıpları da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Tasarlanan DA-DA düşüren dönüştürücü devresinde bobin hesaplaması çok önemli bir yer tutmaktadır. Bobin hesabına geçmeden önce devre parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılan sistem sabit yüklü bir elektroliz sistemi olduğu için çıkış gerilimi yerine akımın ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle sistem çıkış akımı 25 A olacak şekilde sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarımda ki sabit değerler olarak panel maksimum akımı 13 A ve yük olarak kullanılan elektroliz sistemi iç direnç yaklaşık 0,25 Ω 'dur. Bu değerler sabit olduğu için diğer değerleri bu değerler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çıkış akımının 25 A olması hedeflendiği için çıkış gerilimi Eşitlik 94'te belirlenmiştir.

$$V_{\phi} = (I_{\phi}) (R) = (25)(0,25) = 6,25 \text{ V} \quad (94)$$

Çıkış gerilimi belirlendikten sonra çıkış gücü Eşitlik 95'te belirlenmiştir.

$$P_{\phi} = (V_{\phi}) (I_{\phi}) = (6,25)(25) = 156 \text{ W} \quad (95)$$

Çıkış gücü giriş gücüne eşit olduğundan dolayı panel giriş akımı Eşitlik 96'da gösterildiği gibi belirlenmiştir.

$$P_{\phi} = P_g = (V_g) (I_g) \Rightarrow 156 = (43)(I_g) \Rightarrow I_g = 3,6 \text{ A} \quad (96)$$

Tablo 12'de belirlenen tüm değerler gösterilmiştir. Belirlenen değerler dikkate alınarak bobin hesaplaması yapılmıştır.

Tablo 12. DA-DA düşüren dönüştürücü sisteminde kullanılacak değerler

$V_p=V_g$ (V)	V_{ϕ} (V)	$I_p=I_g$ (A)	I_{ϕ} (A)	$P_g=P_{\phi}$ (W)	R (Ω)	D	f (Hz)
43 $\pm$ 3	6,25	3,6	25	156	0,25	%15	20000

Hesaplanan değerlere göre minimum bobin değeri ve akım değeri hesabı yapılmıştır. Eşitlik 97 ve 98’de minimum ve maksimum görev oranı (D), Eşitlik 99’da minimum bobin değeri, Eşitlik 100’de akım dalgalanması (ΔI) ve Eşitlik 101’de bobin ve yük akımı hesapları yapılmıştır (Goldman, 2002).

$$D_{min} = \frac{V_c}{V_{g_{max}}} = \frac{6.25}{46} = 0,135 = 13,5\% \quad (97)$$

$$D_{max} = \frac{V_c}{V_{g_{min}}} = \frac{6.25}{40} = 0,156 = 15,6\% \quad (98)$$

$$L_{min} = \frac{(R)(1 - D_{min})}{2(f)} = \frac{(0,25)(1 - 0,135)}{2(20000)} = 5.4 \mu H \quad (99)$$

Bobin değeri bu hesaplamalar neticesinde 100 uH olarak sınır değerinin üstünde seçilmiştir

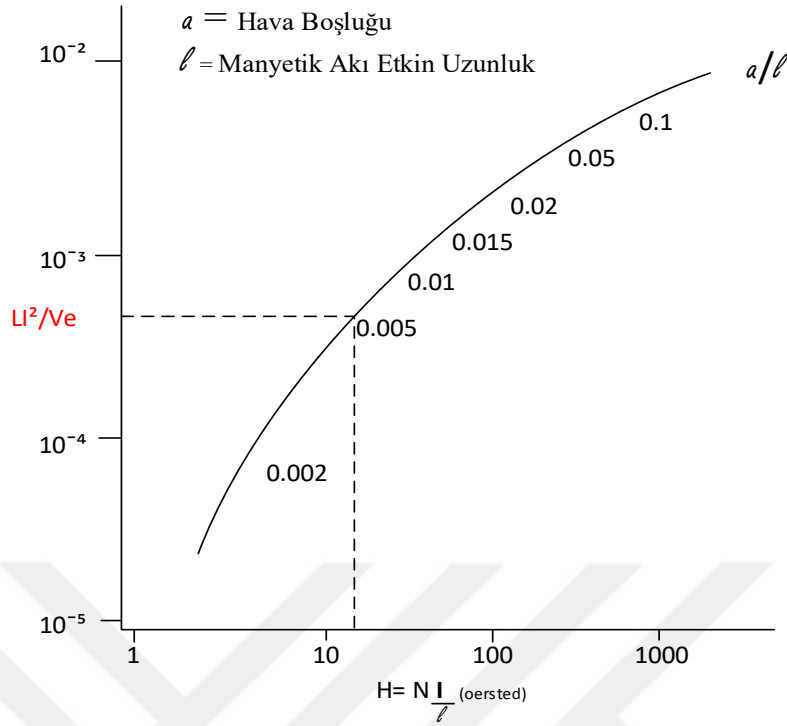
$$\Delta I = \frac{(V_{g_{max}})(D_{min})(1 - D_{min})}{f(L)} = \frac{(46)(0,135)(1 - 0,135)}{20000(100 \times 10^{-6})} = 2,68 A \quad (100)$$

$$I = \left(I_c + \frac{(\Delta I)}{2} \right) = 25 + \frac{2,68}{2} = 26,34 A \quad (101)$$

Bobin üzerinde oluşacak ve depolanacak maksimum enerji miktarı Eşitlik 102’de hesaplanmıştır.

$$LI^2 = (100 \times 10^{-6})(26,34^2) = 0,069 \text{ joule} \quad (102)$$

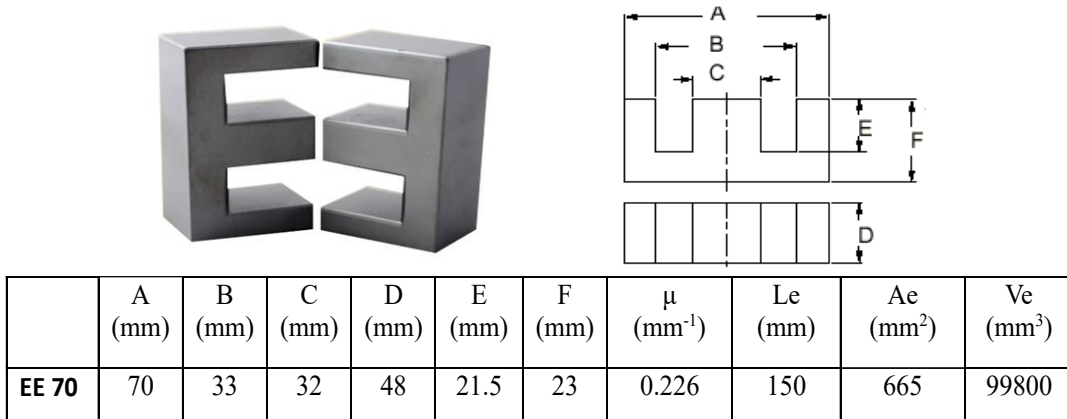
Şekil 68’de gösterilen Hanna (H) eğrisinde orta noktaya denk gelen yani maksimum enerji seviyesini gösteren nokta seçilir. Bu noktadaki değer Eşitlik 103’te gösterildiği gibi hesaplanarak bobin sarımında kullanılacak nüvenin hacmi ($V_{\text{çekirdek}}$) hesaplanmıştır (Sahin, 2020).



Şekil 68. Hanna eğrisi

$$\frac{LI^2}{V_{nüve}} = H = 5 \times 10^{-4} \quad V_{nüve} = \frac{0,069}{5 \times 10^{-4}} = 138 \text{ cm}^3 \quad (103)$$

Bulunan hacim değerlerine uygun nüve olarak EE70 kodlu nüve katalogdan seçilmiştir. Şekil 69'da EE70 ferrit nüvenin katalog özellikleri gösterilmiştir (Ek-8).

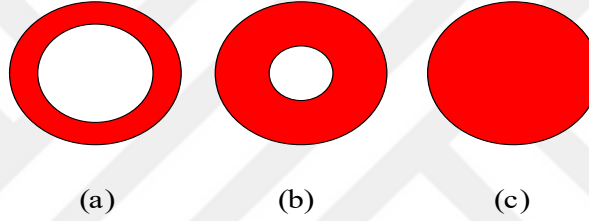


Şekil 69. EE70 ferrit nüve özellikleri

Eşitlik 104 kullanılarak sarım sayısı belirlenmiştir.

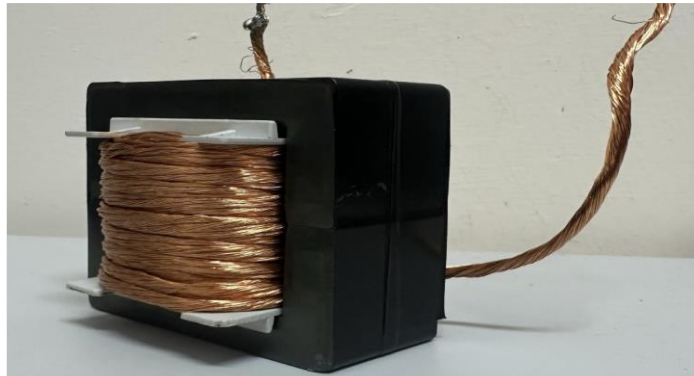
$$H = \frac{(0,4\pi)(N)(I)}{l_e} \quad N = \frac{(H)(l_e)}{(0,4\pi)(I)} = \frac{20 \times 15}{(0,4\pi)(26417)} = 10 \text{ sarım} \quad (104)$$

Sistemde bulunan bobin üzerinde her ne kadar doğru akım geçse de dalgalanmalardan kaynaklı çok az miktarda alternatif akımda meydana gelmektedir. Bu alternatif akım doğru akıma karşı girdap akımı oluşturmakta ve bir direnç etkisi göstermektedir. Devrede bu tarz kayıpların önüne geçmek için deri etkisini azaltan Litz teli tercih edilmiştir. Şekil 70(a) ve 70(b) de deri etkisinden dolayı merkezdeki akımların iletkenin yüzeyine doğru dağılımı gösterilmiştir (Zengin, 2019).



Şekil 70. Litz teli kesiti; (a) yüksek frekanslı alternatif akım geçtiği zaman, (b) düşük frekanslı alternatif akım geçtiği zaman ve (c) doğru akım geçtiği zaman akımın kablodaki dağılımı

Ayrıca Litz telleri yalıtımlı ince bakır tellerin birleşmesinden oluşan bir yapıya sahiptir. Her bir tel parçası yalıtkanlık sağlayan emaye kaplama ile kaplanmıştır. Isı dağılımını iyi yaptığından dolayı kayıplarda minimuma düşmektedir. Şekil 71’de Litz teli ve EE 70 ferrit nüve kullanılarak sarılan devre elemanı bobin gösterilmiştir.

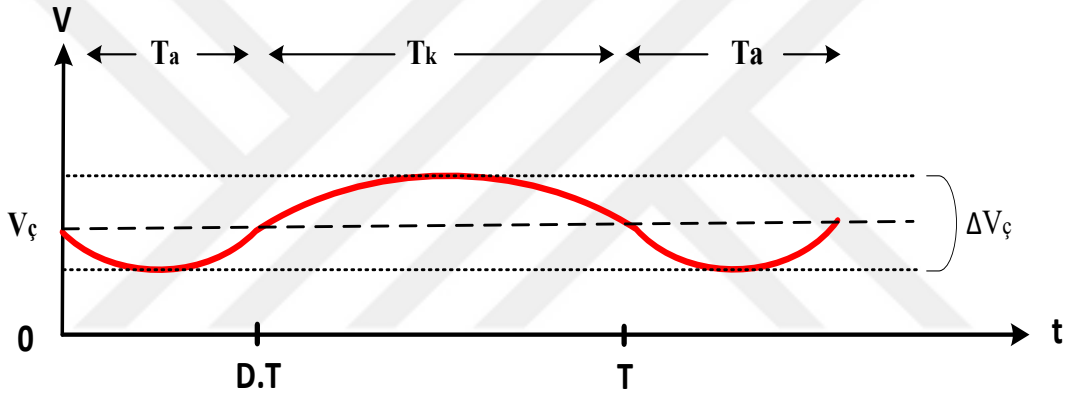


Şekil 71. Litz teli ile sarılmış EE 70 tip ferrit nüveli bobin

4.3.3. Kondansatör Hesabı ve İşlevi

Devrede oluşan elektrik enerjisini geçici olarak depolayan ve bu enerjiyi tekrar devre üzerine gönderen, çıkıştaki dalgalanmaları azaltan ve yük tarafında sabit bir çıkış elde etmeye yarayan devre elemanına kondansatör denilmektedir.

Devrede de güç MOSFET'leri bulunduğundan ve yüksek frekanslarda sürekli anahtarlama yapıldığından dolayı sistem çıkışında Şekil 72'de gösterildiği gibi dalgalanmaların oluşma ihtimali çoktur. Bu dalgalanmaları en aza indirmek ve sabit bir çıkış elde etmek için tasarlanan devrede çıkışta 3300 uF kondansatör kullanılmıştır. Eşitlik 105 ve 106'da DA-DA düşüren dönüştürücüde kullanılan kondansatör hesabı verilmiştir (Aden, 2018; Şahin, 2006).



Şekil 72. Çıkış dalga grafiği

$$C = \frac{(1 - D)V_{\phi}}{8(f^2)(L)(\Delta V_{\phi})} \quad (105)$$

$$C = \frac{(1 - 0,5)(6,25)}{8(20000^2)(L)(0,6)} = C.L = 1,62 \times 10^{-9} \quad (106)$$

L=100 uH için C=2.5uF olur.

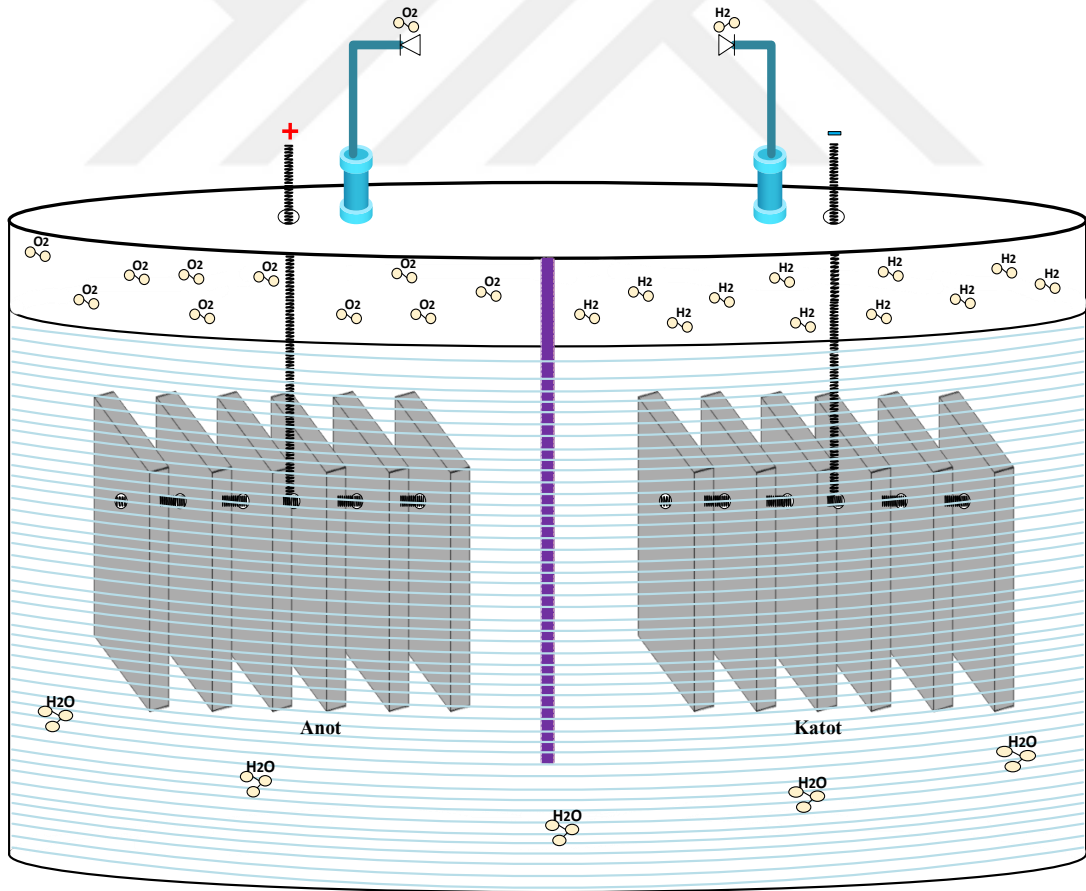
Bu hesaplamada sınır değerleri bulmak için D=0,5 alınmıştır. Bu değerler teorik minimum değerlerdir. Devrede en iyi sonucu almak için başka değerler kullanılmıştır.

4.4. Elektroliz Sisteminin Tasarımı

Sistemde yük olarak elektroliz sistemi kullanılmıştır. Bu sistem ile suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tasarımı yapılan elektroliz sisteminde öncelikli olarak şu konulara dikkat edilmiştir;

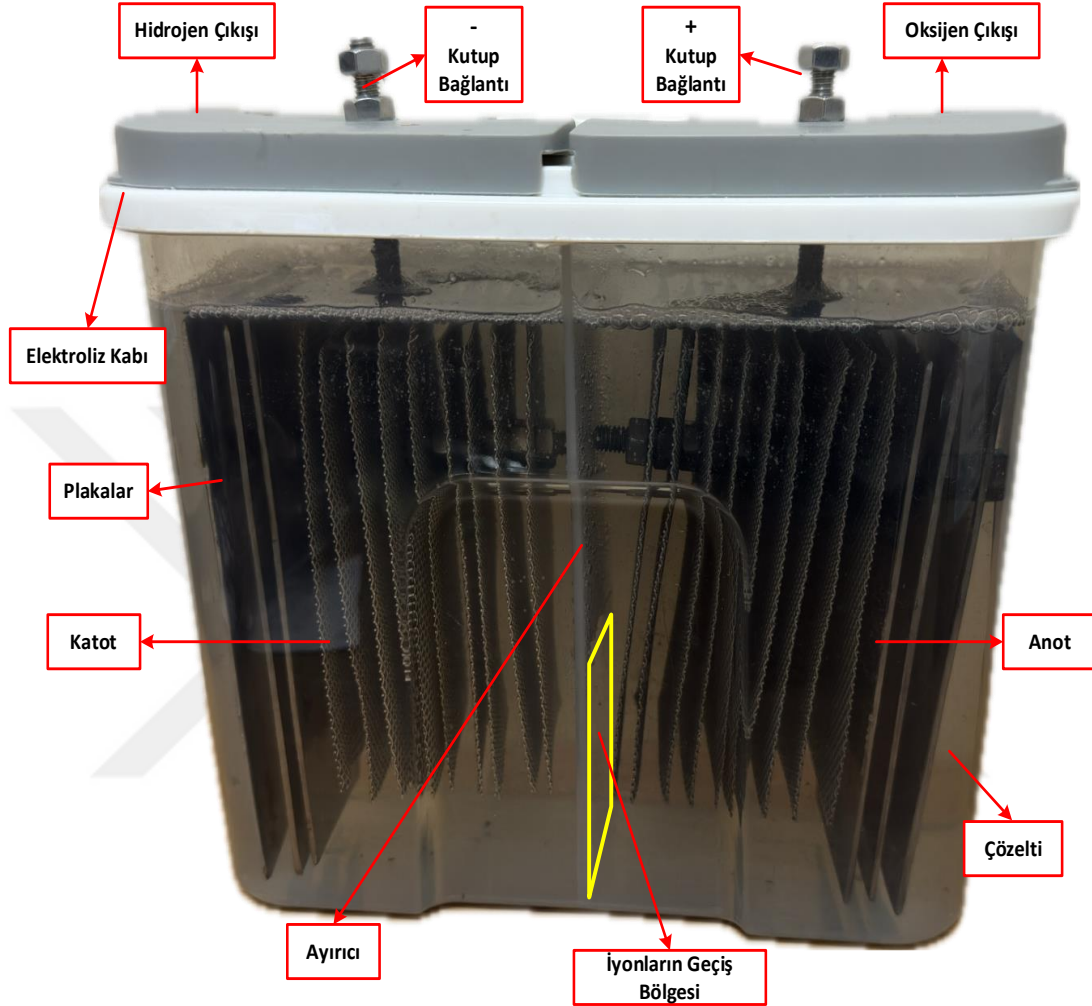
- Elektroliz sistemi tasarımında kullanılan anot ve katot malzemelerin cinsleri, boyutları ve birbirleri arasındaki mesafeleri elektroliz sisteminin verimini etkilediği için uygun metaller ve mesafeler seçilmiştir.
- Elektroliz sisteminin verimini etkileyen bir diğer önemli husus olan, elektroliz hızını etkileyen, elektrolit malzeme seçiminde de uygun kimyasallar kullanılmıştır.
- Elektroliz sisteminin dayanıklılığı ve güvenlik konuları da dikkate alınarak en uygun ve kaliteli malzemeler kullanılmıştır.

Şekil 73'te elektroliz sisteminin ön tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 73. Alkali elektroliz sistem ön tasarımı

Şekil 74'te sistemde kullanılan malzemelerin devre tasarımıdaki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 74. Elektroliz tasarımı

Tasarımda anot ve katot olarak 60 x100 mm 316L paslanmaz çelik hasır levha kullanılmıştır. Anot ve katot taraflarının her birinde bu plakalardan onar adet eklenmiştir. Plakaların birbirine bağlantısı metrik 8 mm (M8) paslanmaz çelik saplama (gijon) civata ve M8 somun kullanılarak yapılmıştır. Elektrik akımının suda geçişini ve hareketini hızlandırmak için potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılmıştır. Ölçüm olarak 1 litre çözeltide %40 KOH (400 gr.) kullanılmıştır. Oksijen ve hidrojenin karışmaması için iki bölmeli elektroliz kabı kullanılmıştır. Güvenlik önlemi olarak gaz kaçağını önlemek amacıyla elektroliz kabının etrafı ısıya dayanıklı silikon ile kapatılmıştır.

Şekil 74'te belirtilen bu sistemde üretilecek hidrojenin mol miktarı Eşitlik 107'de verilen Faraday yasasına göre hesaplanmaktadır. Formüldeki (F) Faraday sabiti ($F=96485 \text{ C/mol}$), (I) akım ve (t) zamandır.

$$n_{H_2} = \frac{I \cdot t}{2F} \quad (107)$$

Sistem yaklaşık 20 A akım değeriyle bir dakika çalıştırıldığı zaman Eşitlik 108'de belirtilen değer elde edilir.

$$n_{H_2} = \frac{I \cdot t}{2F} = \frac{(20)(60)}{2(96485)} = 0,00622 \text{ mol} \quad (108)$$

Sistemde üretilen hidrojenin hacmi Eşitlik 109'da verilen denkleme göre hesaplanmaktadır. Denklemden verilen 22,4 değeri ideal gazların standart sıcaklık ve basınçta bir molün kapladığı hacmin değeridir.

$$V_{H_2} = n_{H_2} \times 22,4 \quad (109)$$

$$V_{H_2} = 0,00622 \times 22,4 = 139 \text{ ml} \quad (110)$$

Eşitlik 110 kullanılarak 1 dakikada sistemin üretebileceği hidrojen gazı miktarı 139 ml bulunur.

Tasarlanan sistemde 500 ml şişe kullanılmıştır. Bu şişede oluşacak hidrojen konsantrasyon miktarı (ppm) Eşitlik 111'de verilen denkleme göre hesaplanmaktadır.

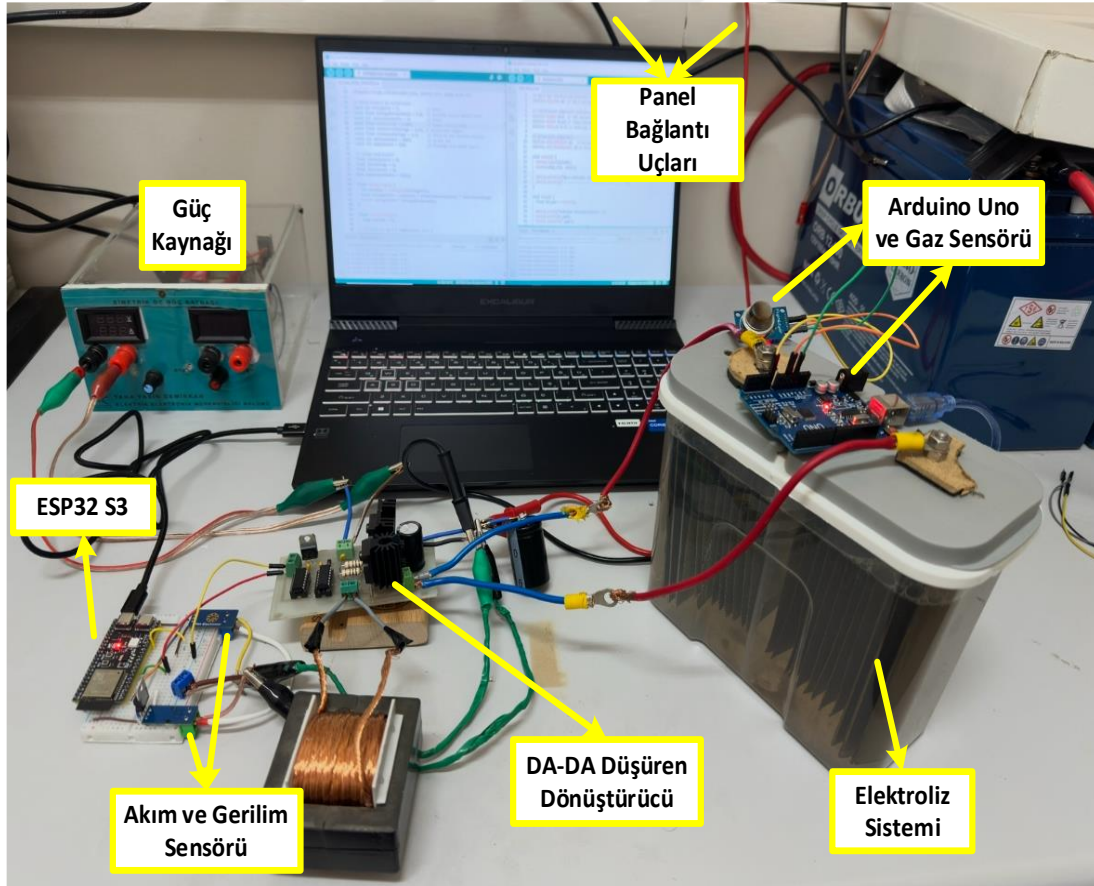
$$ppm = \frac{V_{H_2}}{V_{ortam}} \times 10^6 \quad (111)$$

$$ppm = \frac{139}{500} \times 10^6 = 278.000 \quad (112)$$

Sonuç olarak 1 litre su ve 400 gr. KOH ile hazırlanan çözeltiden elde edilmesi gereken hidrojen konsantrasyonu değeri 278.000 ppm'dir. Bu değer 500 ml kapalı bir ortam için elde edilen değerdir.

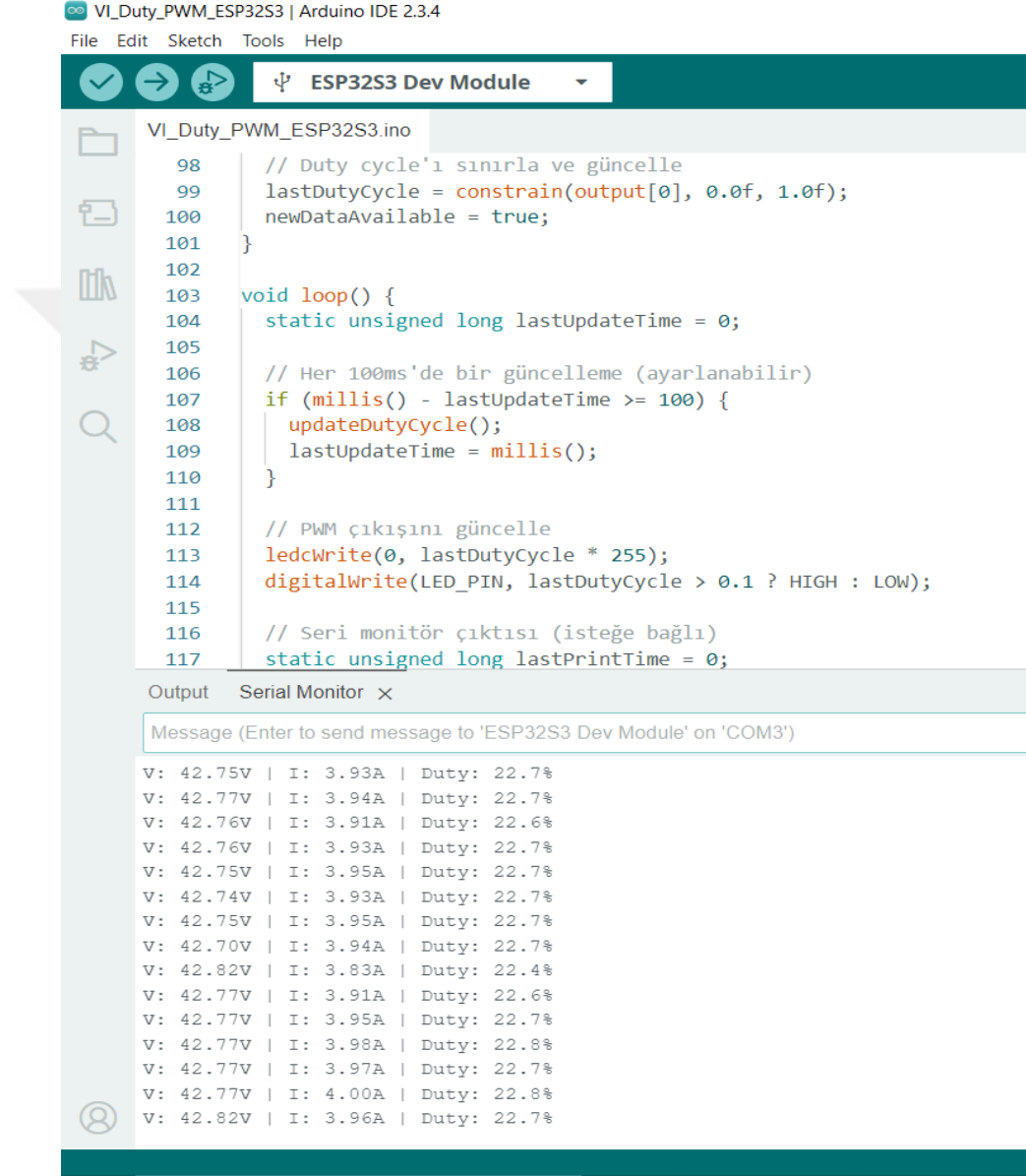
5. DENEYSEL BULGULAR

Tasarlanan sistem ilk olarak DA güç kaynağı, sinyal jeneratörü ve çıkış yükü olarak 100 W 0,5 Ω direnç kullanılarak çalıştırılmış ve test edilmiştir. Daha sonra güç kaynağı olarak 545 W PV panel, ESP32 S3 kullanılarak elde edilen PWM sinyali ve yük olarak da yaklaşık 0,25 Ω iç dirence sahip elektroliz sistemi deney düzeneğine dahil edilmiş ve bu şekilde çalıştırılmıştır. Çalıştırılan deney düzeneğinden PWM, HO, LO, anahtarlama anında meydana gelen ölü zaman, bobin akımı, bobin gerilimi, PV panel giriş akımı, PV panel giriş gerilimi, DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış akımı, DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış gerilimi ve son olarak elektroliz sisteminden ölçülen hidrojen gazı miktarları elde edilmiştir. Şekil 75'te fotovoltaiik kaynaklı hidrojen üretim sisteminin DA-DA azaltan çevirici ve YSA-MPPT sistemi ile kontrolü için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 75. Fotovoltaiik kaynaklı hidrojen üretim sisteminin deney düzeneği

Şekil 76’da YSA-MPPT sisteminden anlık olarak elde edilen görev oranı değerleri gösterilmiştir. Bu sistem ile anlık olarak panel gerilimi ve panel akımı kontrol edilerek çıkışta maksimum verim elde edebilmek için görev oranı değerini değiştirmekte ve bu görev oranına göre PWM sinyali üretmektedir.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file 'VI_Duty_PWM_ESP32S3.ino' open. The code is written in C++ and includes comments in Turkish. The serial monitor is open, displaying real-time data for voltage (V), current (I), and duty cycle (Duty).

```

98 // Duty cycle'ı sınırla ve güncelle
99 lastDutyCycle = constrain(output[0], 0.0f, 1.0f);
100 newDataAvailable = true;
101 }
102
103 void loop() {
104     static unsigned long lastUpdateTime = 0;
105
106     // Her 100ms'de bir güncelleme (ayarlanabilir)
107     if (millis() - lastUpdateTime >= 100) {
108         updateDutyCycle();
109         lastUpdateTime = millis();
110     }
111
112     // PWM çıkışını güncelle
113     ledcWrite(0, lastDutyCycle * 255);
114     digitalWrite(LED_PIN, lastDutyCycle > 0.1 ? HIGH : LOW);
115
116     // Seri monitör çıktısı (isteğe bağlı)
117     static unsigned long lastPrintTime = 0;

```

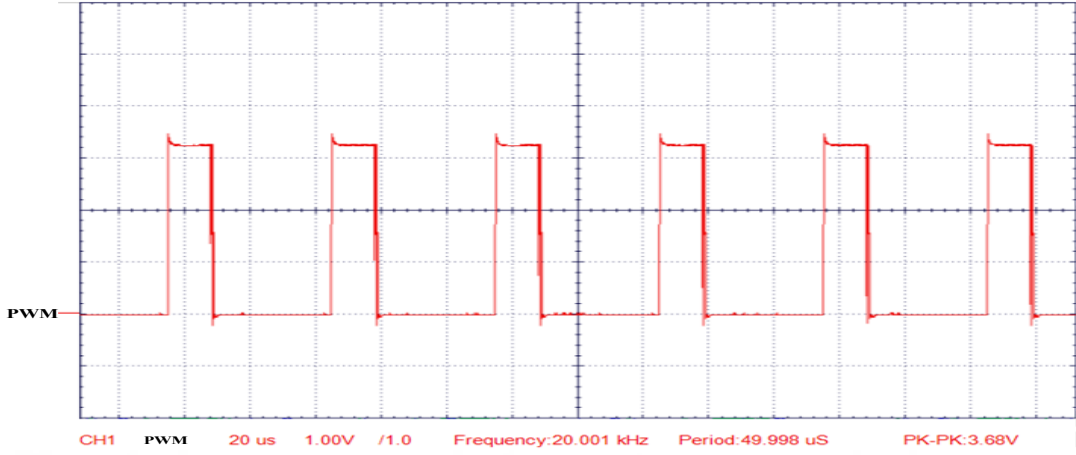
The serial monitor output shows the following data:

V	I	Duty
42.75V	3.93A	22.7%
42.77V	3.94A	22.7%
42.76V	3.91A	22.6%
42.76V	3.93A	22.7%
42.75V	3.95A	22.7%
42.74V	3.93A	22.7%
42.75V	3.95A	22.7%
42.70V	3.94A	22.7%
42.82V	3.83A	22.4%
42.77V	3.91A	22.6%
42.77V	3.95A	22.7%
42.77V	3.98A	22.8%
42.77V	3.97A	22.7%
42.77V	4.00A	22.8%
42.82V	3.96A	22.7%

Şekil 76. ESP32 S3 ile tasarlanan YSA tabanlı sistemin anlık veri takibi

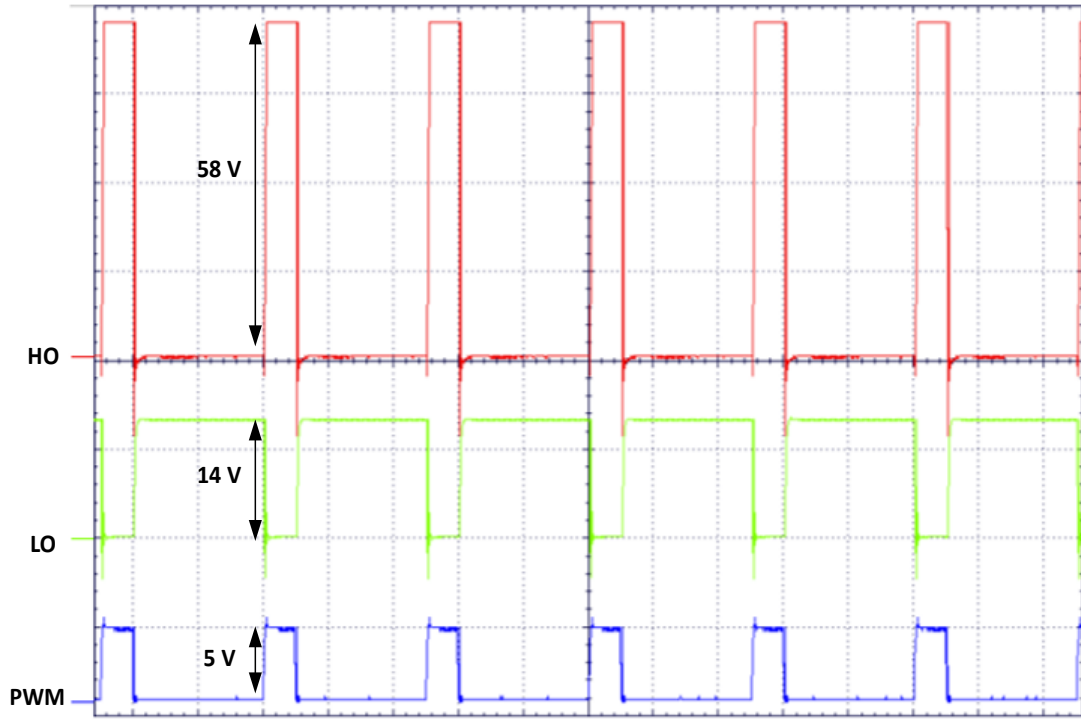
Şekilden de görüldüğü üzere anlık panel geriliminin 42,7 V ve panel akımının 3,96 A olduğu anda YSA-MPPT algoritması doluluk oranını %22,6 değerine ayarlamakta ve bu değere göre 20 kHz PWM sinyali üretmektedir.

Şekil 77’de anlık olarak üretilen PWM sinyali gösterilmiştir.



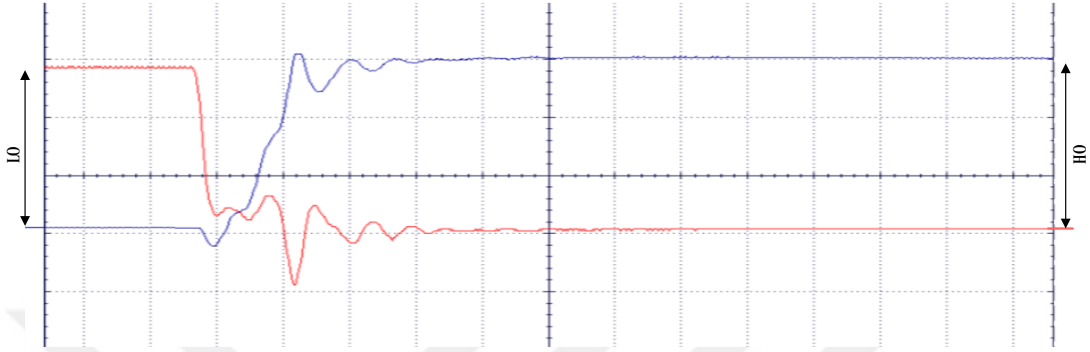
Şekil 77. ESP32 S3'ten üretilen PWM sinyali

Şekil 78’de HO, LO ve PWM sinyal değerlerinin fiziki devre üzerinden alınan grafiksel sonuçları gösterilmiştir. LO, sürücü gerilimi olan +15 V’a, PWM sinyali, 20 kHz ve +5 V kare dalgaya ve HO, giriş gerilimi (+43 V) ve sürücü geriliminin toplamı olan yaklaşık +58 V’a denk gelmektedir.



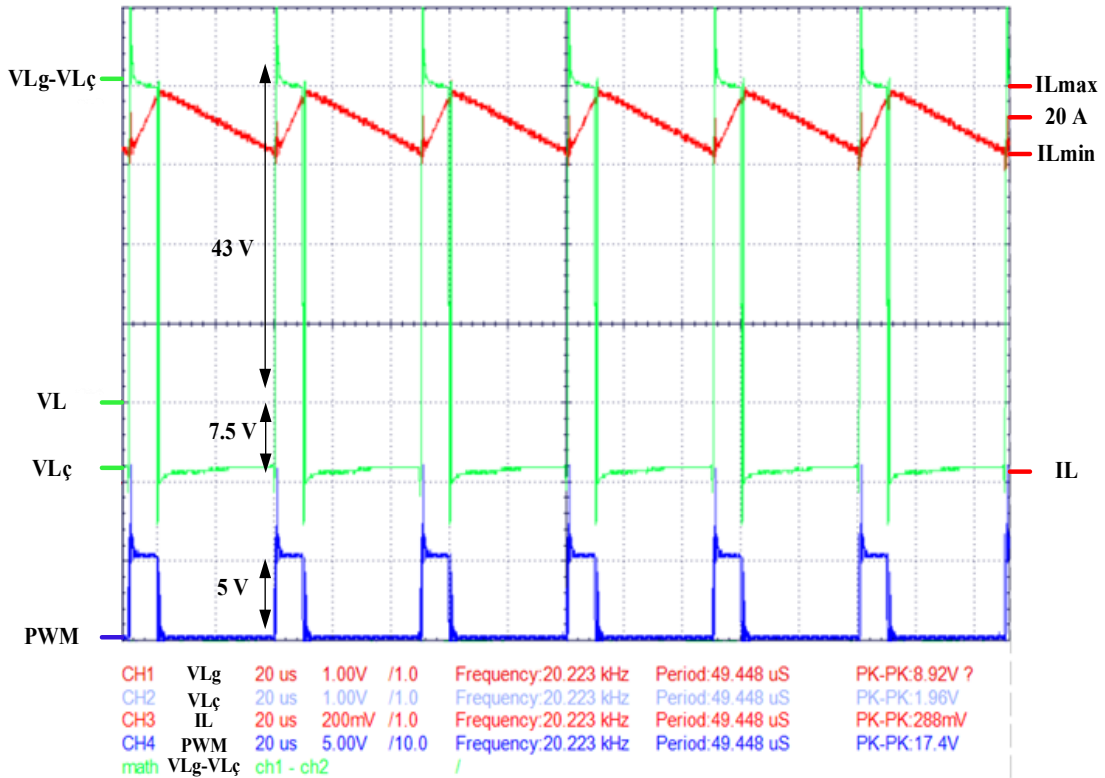
Şekil 78. HO, LO ve PWM sinyalinin sonuç grafikleri

Şekil 79’da yüksek taraf anahtarlama (HO) ve alçak taraf anahtarlama (LO) anında devrenin güvenliği için olması gereken ölü zaman grafiği gösterilmiştir. Bu ölü zaman sayesinde devrede kullanılan iki adet MOSFET’in aynı anda iletme geçmesi ve kısa devre olup zarar görmesini engellenmektedir.



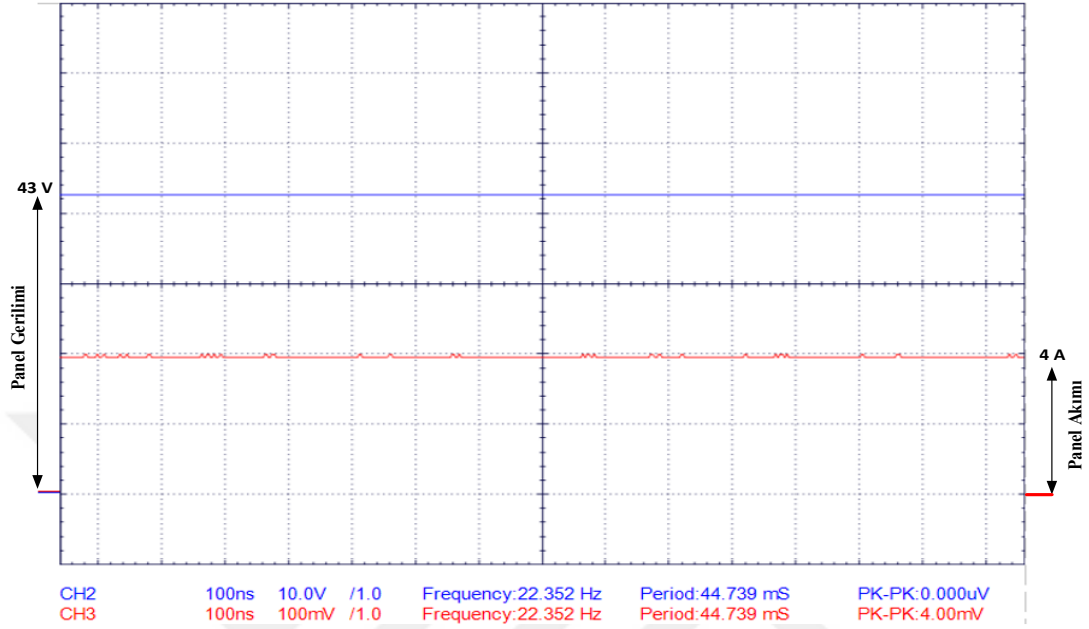
Şekil 79. HO ve LO anahtarlama anında meydana gelen ölü zaman

Şekil 80’de devreden ölçülen bobin akım, bobin gerilim ve PWM sinyal değerleri gösterilmiştir. Doluluk oranı yaklaşık %20 ayarlandığı zaman devreden çıkış gerilimi olarak + 7.5 V ve çıkış akımı olarak yaklaşık 20 A elde edilmektedir.



Şekil 80. Devrede ölçülen PWM sinyali, bobin akımı ve gerilimi

Şekil 81’de panel gerilimi ve panelden çekilen akım değeri gösterilmiştir. Sistem yaklaşık 160 W güce sahiptir.



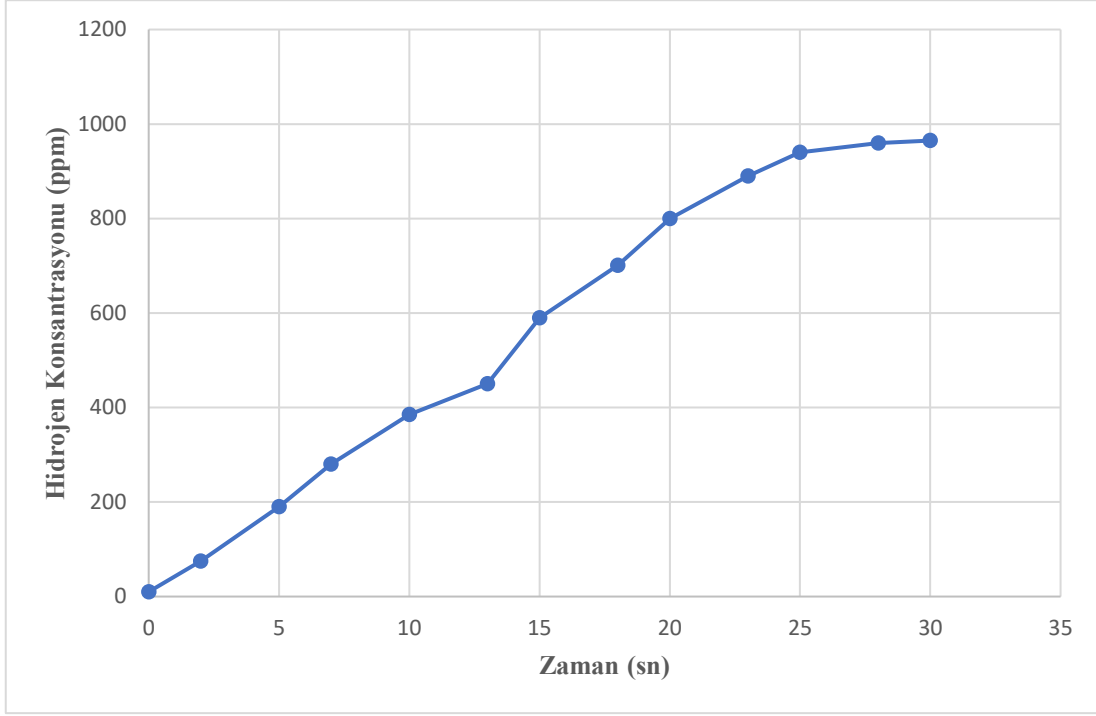
Şekil 81. Panelden elde edilen gerilim ve akım değerleri

Şekil 82’de DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış gerilimi ve akım değeri gösterilmiştir. Çıkış yaklaşık 122 W güce sahiptir.



Şekil 82. DA-DA düşüren dönüştürücü çıkış gerilimi ve akım değerleri

Şekil 83'te çıkışta bulunan elektroliz sisteminin ürettiği hidrojen miktarının anlık değişimini gösteren sensör verileri gösterilmiştir. Sonuç olarak 1 litre su ve 400 gr. KOH kullanıldığı zaman sistem 20 A akım çekmektedir. Çekilen bu akım değeri ile sistem çalıştırıldığı zaman şişeden MQ-8 gaz sensörü ile yaklaşık maksimum 960 ppm değer ölçülmüştür.



Şekil 83. Anlık olarak ölçülen hidrojen konsantrasyon değer grafiği

Hidrojen gaz miktarının ölçümü çevre koşullarından çok çabuk etkilendiği için kapalı bir deney düzeneği içerisinde ölçülmüştür. Bu ölçüm için 500 ml (0,0005 m³) şişe kullanılmıştır. Bu tarz sistemler 4000 ppm sonrası patlama riski barındırdığı için ölçüm yaklaşık 30 saniye yapılmıştır.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ülkemizde ve dünyada son yıllarda güneş enerji santralleri başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bağımlılık giderek artmıştır. Bu artış üretilen enerjinin ihtiyaç duyulan kısmının kullanılıp geri kalan kısmının uygun bir şekilde depolanıp gerektiği zaman kullanılabilmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada da yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi kullanılarak hidrojen enerjisi üretimi amaçlanmıştır. Hidrojen üretimi için elektroliz sistemi tasarlanmıştır. Her ne kadar günümüz şartlarında hidrojen gazının üretilip depolanması maliyetli ve zor olsa da anlık olarak dönüştürülüp kullanılması ve birçok sisteme entegre edilmesi amaçlanmıştır.

Güneş enerjisi sistemleri çevresel koşullardan etkilendiği için MPPT sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada bu ihtiyaca yönelik son zamanlarda kullanımı artan YSA algoritması MPPT ve DA-DA düşüren dönüştürücü sistemine entegre edilmiştir. Tasarlanan bu sistem ile anlık panel gerilimi ve akımına karşılık PWM sinyalleri üretilmiş ve elektroliz sistemi için gerekli olan düşük gerilim yüksek akımı sağlayacak DA-DA düşüren dönüştürücü bu sinyaller ile çalıştırılmıştır. Elektroliz sistemi için 6,25 V gerilim ve 25 A akım hedefi belirlenmiştir. Elektroliz sisteminin verimli çalışması için yüzey alanı geniş paslanmaz çelikler ve çözelti olarak %40 KOH kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında öncelikli olarak yenilenebilir enerji kaynakları, MPPT sistemleri, dönüştürücü modelleri ve elektroliz sistemi incelenmiştir. Daha sonra benzetim aşaması yapılmış ve hedeflenen sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu panelden çekilen yaklaşık 160 W güce karşılık çıkışta 128 W güç elde edilmiştir. Kablo kesiti, sıcaklık ve bobin kayıpları devrede güç kaybına sebep olmuştur. Fakat elektroliz sistemi için gerekli akım değeri elde edilmiştir. Üretilen hidrojen ve oksijen ayrı çıkışlara yönlendirilerek gaz çıkışları gözlemlenmiştir.

Bu tezde yapılan çalışmaya ek olarak YSA-MPPT denetimli dönüştürücü sisteminde giriş değerleri olan panel akımı ve panel gerilimine ilaveten çevresel değişkenler olan ısıtım ve sıcaklık da eklenerek daha net çıkış sonuçları elde edilebilir. Sistem buna uygun tasarlanmıştır. Ayrıca elektroliz sisteminde kullanılan plakalar arası mesafeler değiştirilerek hidrojen üretim karakteristiği elde edilebilir. Sonuç olarak bu çalışmada güncel bir kontrol algoritması olan YSA-MPPT sisteminin laboratuvar ortamında deneysel çalışması yapılmış ve güneş enerjisinden hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- Aden, I. A. (2018). Design and implementation of single- input multiple-output (SIMO) DC-DC buck converter for solar energy application. (Master's thesis). Department of Electrical and Electronics Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon.
- Ahmad, M. S. (2023). Comparative analysis of MPPT techniques for solar and wind. (Published master's thesis). Atılım University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering Technologies, İstanbul.
- Ahmed, S., Cherif, B., ve Benachaiba, C. (2019). Impact of load characteristics on PV solar system with MPPT control. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 62, 355–368. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4_39
- Akal, D., ve Akan, A. E. (2022). Edirne iklim şartlarında çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının polikristal fotovoltaik panel çıkış gücüne etkilerinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 91–102. <https://doi.org/10.21923/jesd.949031>
- Akın, E., ve Şahin, M. E. (2024). Derin Öğrenme ve Yapay Sinir Ağı Modelleri Üzerine Bir İnceleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 1, 27–38.
- Akyürek, E. F., Geliş, K., ve Yoladı, M. (2020). Farklı gölgeleme durumlarının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 161–168. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.766232>
- Alagöz, A. S. (2019). Uydularda Kullanılan Güneş Panelleri. *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, M. H., Shafiullah, M., ve Malik, M. Z. (2020). Investigation of MPPT techniques under uniform and non-uniform solar irradiation condition-a retrospection. *IEEE Access*, 8, 127368–127392. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007710>
- Alsugair, A. M., ve Al-Qudrah, A. A. (1998). Artificial neural network approach for pavement maintenance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(4), 249–255.
- Anonim. (2016). *MOSFET Nedir?* <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektronik/mosfet-nedir-2-13809/>
- Anonim. (2020). Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi. *Edirne Valiliği*, 1(1), 1–60.
- Anonim. (2025). Dünyada Güneş Enerjisi Kurulu Güç Değerleri. <https://www.gensed.org/basin/teias-2024-subat-ay-kurulu-guc-raporunu->

- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., ve Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Çelik, M. (2019). Yükselten Çevirici Topolojisine Sahip Lityum İyon Piller için MPPT Solar Şarj Kontrol Cihazı [(Published master's thesis). Atılım University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering Technologies.]. <http://etheses.uin-malang.ac.id/id/eprint/42417>
- Chi, J., ve Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Chtouki, I., Wira, P., ve Zazi, M. (2018). Comparison of several neural network perturb and observe MPPT methods for photovoltaic applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2018-Febru*, 909–914. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352299>
- Da Rocha, M. V., Sampaio, L. P., ve Da Silva, S. A. O. (2019). Comparative analysis of ABC, Bat, GWO and PSO algorithms for MPPT in PV systems. *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2019*, 347–352. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8996520>
- Dal, A. R. (2021). Güneş Enerji Panellerindeki Optimum Eğim Açısının Verime Etkisinin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 241–250. <https://doi.org/https://doi.org/10.35193/bseufbd.878795>
- Drir, N., Barazane, L., ve Loudini, M. (2014). Comparative study of maximum power point tracking methods of photovoltaic systems. *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2014*. <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7077055>
- Efendi, Y. (2022). Rancang Bangun Monitoring Elektrolisis Air Berbasis Arduino Uno Dan Kontrol Tegangan Buck Converter. (Published Undergraduate thesis) Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- EL, A., Mehdi, E., ve Zazi, M. (2016). PSIM and MATLAB Co-Simulation of Photovoltaic System using “P and O” and “Incremental Conductance” MPPT. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(8). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2016.070811>
- Elobaid, L. M., Abdelsalam, A. K., ve Zakzouk, E. E. (2015). Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: A survey. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 1043–1063. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0359>
- Elyaqouti, M., Hakim, S., Farhat, S., Bouhouch, L., ve Ihlal, A. (2017).

- Implementation in arduino of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 8(1), 434–443. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v8.i1.pp434-443>
- Eser Erdek, G. (2023). Derin öğrenme destekli görüntü işleme teknikleri ile endüstriyel kesici takımların kalan ömürlerinin tahminlenmesi (C. 87, Sayı 1,2). Ankara Üniversitesi.
- Gökdoğan, A. (2023). Bulanık Mantık Denetimli Düşük Güçlü Fotovoltaik Sistem Tasarımı. Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi.
- Goldman, A. (2002). *Magnetics Components for Power electronics*. Springer Science+Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0871-7>
- Grimm, A., de Jong, W. A., ve Kramer, G. J. (2020). Renewable hydrogen production: A techno-economic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22545–22555. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.092>
- Gül, H. (2008). Elektrolitik nano Al₂O₃ partikül takviyeli nikel kompozitlerinin üretimi. Sakarya Üniversitesi.
- Gül, M., ve Akyüz, E. (2020). Hydrogen generation from a small-scale solar photovoltaic thermal (PV/T) electrolyzer system: numerical model and experimental verification. *Energies*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112997>
- Gündoğdu, A., ve Çelikel, R. (2020). ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Turkish Journal of Science & Technology*, 15(2), 101–110.
- Gupta, A., Kumar, P., Pachauri, R. K., ve Chauhan, Y. K. (2014). Performance analysis of neural network and fuzzy logic based MPPT techniques for solar PV systems. *Proceedings of 6th IEEE Power India International Conference, PIICON 2014*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/34084POWERI.2014.7117722>
- Haji, D. M. (2016). Design of Neural Fuzzy Mppt Controller For Pv Based Boost Converter Master's. (Published Master's Thesis). Yüzüncü Yıl University, Institute Of Natural And Applied Sciences, Electrical-electronics Engineering Department Design, Van.
- Hajihosseini, M., Andalibi, M., Gheisarnejad, M., Farsizadeh, H., ve Khooban, M. H. (2020a). DC/DC power converter control-based deep machine learning techniques: Real-Time Implementation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(10), 9971–9977. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2977765>
- Hajihosseini, M., Andalibi, M., Gheisarnejad, M., Farsizadeh, H., ve Khooban, M. H. (2020b). DC/DC Power Converter Control-Based Deep Machine Learning Techniques: Real-Time Implementation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(10), 9971–9977. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2977765>

- Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., ve Alonso-Gómez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188(June), 426–440. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.017>
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., ve Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 142(1), 59–64. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951577>
- Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., ve Mekhilef, S. (2012). An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3627–3638. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185713>
- Jately, V., Azzopardi, B., Joshi, J., Venkateswaran V, B., Sharma, A., ve Arora, S. (2021). Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111467. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111467>
- Kalaiaarasi, N., Dash, S. S., Padmanaban, S., Paramasivam, S., ve Morati, P. K. (2018). Maximum power point tracking implementation by dspace controller integrated through Z-Source inverter using particle swarm optimization technique for photovoltaic applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/app8010145>
- Karabinaoğlu, M. S., Çakir, B., Başoğlu, M. E., Kazdaloğlu, A., ve Güneroğlu, A. (2022). Comparison of deep learning and regression-based MPPT algorithms in PV systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(6), 2319–2338. <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3941>
- Karamanav, M. (2007). Güneş enerjisi ve güneş pilleri. Sakarya Üniversitesi.
- Kardaş, G., Solmaz, R., Yazıcı, B., ve Erbil, M. (2010). Elektroliz yöntemi ile hidrojen gazı eldesi. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 1–5.
- Katti, P., Arjun, M., ve Pradeepa, S. (2020). Small Signal Model for PV Fed Buck Converter in Continuous and Discontinuous Conduction Modes. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(3), 518–522. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2876156>
- Kılıç, E., Keçecioglu, F., Gani, A., ve Şekkeli, M. (2019). Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Osmaniye Korkut Ata University Journal of Natural and Applied. *Journal of Natural and Applied Sciences Yeni*, 3(2), 193–198. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/911549>
- Kökçam, E. (2018). Matlab simulink ortamında buck tipi bir dönüştürücünün çıkış geriliminin optimal kontrolü. Sakarya Üniversitesi.
- Koşar, C. (2021). Hydrogen Storage Methods.

- Kumar, M., S.R.Kapoor, D., Nagar, R., ve Verma, A. (2015). Comparison between IC and Fuzzy Logic MPPT Algorithm Based Solar PV System using Boost Converter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 04(06), 4927–4939. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2015.0406007>
- Kumari, J. S., Babu, C. S., ve Yugandhar, J. (2011). Design and Analysis of Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System. *International Journal of Advances in Science and Technology*, 2(2), 51–60.
- Lameirinhas, R. M., Torres, J. P., ve Cunha, J. P. de M. (2022). A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. *Energies*, 27(1), 4909. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15051823>
- Liu, Y., Li, M., Ji, X., Luo, X., Wang, M., ve Zhang, Y. (2014). A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems. *Energy Conversion and Management*, 85, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>
- Luo, N., Vidal, Y., ve Acho, L. (2014). *Advances in Industrial Control*. Springer-Verlag.
- Maden, T. B., ve Şahin, M. E. (2019). Modeling of The PEM Type Fuel Cells. *Turkish Journal of Materials*, 4(1), 1–10.
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., ve Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6(174), 1312–1327. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.05.013>
- Miyatake, M., Veerachary, M., Toriumi, F., Fujii, N., ve Ko, H. (2011). Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(1), 367–380. <https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5705681>
- Mohan, N. (2003). *Güç Elektroniği*.
- Mostafa, M. R., Saad, N. H., ve El-sattar, A. A. (2020). Tracking the maximum power point of PV array by sliding mode control method. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.09.003>
- Muhida, R., Riza, M., Dunan, H., Cucus, A., Thamrin, T., Muhamad, Z., Pratowa, B., ve Muhida, R. (2022). A maximum power point tracking converter of photovoltaic-solid polymer electrolysis system for hydrogen production. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(11), 1321–1326.
- Nacar, S., ve Öncü, S. (2022). Implementation of hydrogen generation system with resonant converter. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of*

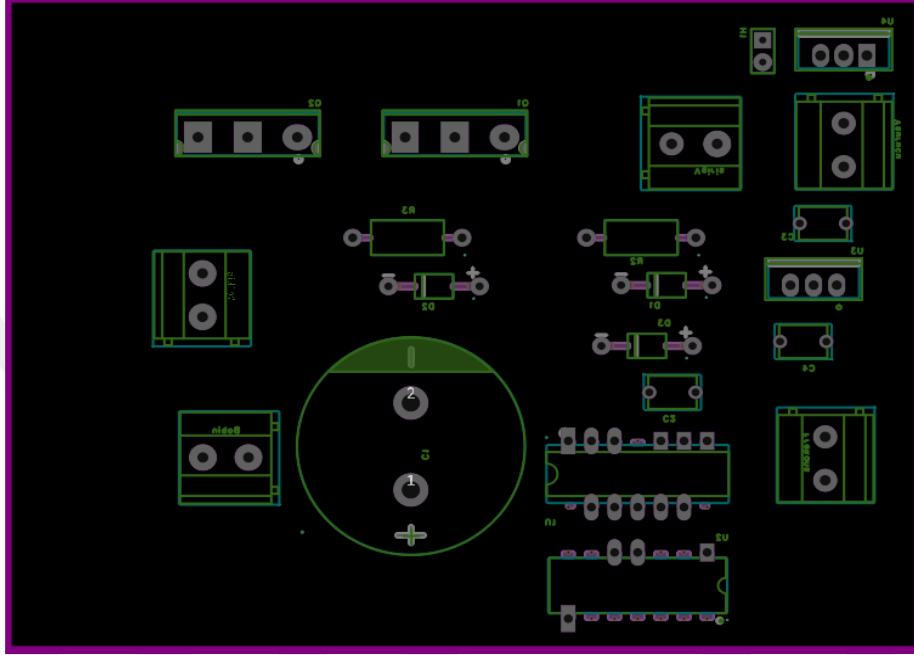
- Nasser, M., Megahed, T. F., Ookawara, S., ve Hassan, H. (2022). A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 86994–87018. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>
- Noman, A. M., Addoweesh, K. E., ve Mashaly, H. M. (2012). A fuzzy logic control method for MPPT of PV systems. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 874–880. <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6389174>
- Ohl, R. S. (1946). Light sensitive electric device. *United states patent office*, 2,402, 6621946.
- Prabhakaran, A., ve Mathew, A. S. (2016). *Sliding Mode MPPT Based Control For a Solar Photovoltaic system*. 2600–2604.
- Rasheed, M. M. R. (2022). Modeling of Pv Panel And Investigation of Mppt Methods for Grid-Connected Pv System. (Published master’s thesis). Harran University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Department Of Electrical And Electronics Engineering, Şanlıurfa.
- Richardson, J. (2023). History of Solar PV. The Renewable Energy Hub. <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/history-of-solar-pv#:~:text=The first practical photovoltaic cell,cells for Earth orbiting satellites>.
- Rizzo, S. A., ve Scelba, G. (2021). A hybrid global MPPT searching method for fast variable shading conditions. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126775>
- Sabareesh, S. U., Aravind, K. S. N., Chowdary, K. B., Syama, S., ve Devi V S, K. (2023). LSTM based 24 hours ahead forecasting of solar PV system for standalone household system. *Procedia Computer Science*, 218, 1304–1313. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.109>
- Sahin, M. (2020). Inductance Selection Criteria and Design Steps for Power Electronics Applications. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 689–695. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.543986>
- Şahin, M. E. (2006). Senkron Buck Dönüştürücü İle Elektroliz Olayının Gerçekleştirilmesi. *İçinde Yüksek Lisans Tezi*. Gazi Üniversitesi.
- Şahin, M. E. (2019). An Efficient Solar-Hydrogen DC-DC Buck Converter System with Sliding Mode Control. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019(3), 558–570. <https://doi.org/10.31202/ecjse.558383>
- Şahin, M. E. (2020). A photovoltaic powered electrolysis converter system with maximum power point tracking control. *International Journal of Hydrogen*

- Energy*, 45(16), 9293–9304. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.162>
- Şahin, M. E. (2024). An Overview of Different Water Electrolyzer Types for Hydrogen Production. <https://doi.org/10.3390/en17194944>
- Şahin, M. E., ve Blaabjerg, F. (2021). An Overview on MOSFET Drivers and Converter Applications. *Electric Power Components and Systems*, 49(8), 828–847. <https://doi.org/10.1080/15325008.2021.2002477>
- Şahin, M. E., ve Okumuş, H. (2013). Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu. *EMO Bilimsel Dergi*, 3(5), 17–25. <http://dergipark.gov.tr/emobd/issue/5506/74678>
- Şahin, M. E., Okumuş, H. I., ve Aydemir, M. T. (2014). Implementation of an electrolysis system with DC/DC synchronous buck converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(13), 6802–6812. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.084>
- Şenaktaş, B. (2005). Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları. Pamukkale Üniversitesi.
- Şentürk, A., ve Coşkun, A. T. (2023). Güneş enerjisi sistemleri için çevresel parametre ölçüm cihazının tasarlanması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 263–278. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.1117897>
- Shekardasht, S. Z. (2016). Güneş enerjisi (pv) destekli hidrojen üretimi ve hidrojen yakıt pilinde kullanılması üzerine bir araştırma. *May*, 31–48.
- Shen, M., Bennett, N., Ding, Y., ve Scott, K. (2011). A concise model for evaluating water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14335–14341. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.029>
- Silveira, R. D., das Neves, G. P., da Silva, S. A. O., ve Angélico, B. A. (2021). An enhanced MPPT algorithm based on adaptive extremum-seeking control applied to photovoltaic systems operating under partial shading. *IET Renewable Power Generation*, 15(6), 1227–1239. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12102>
- Sirius. (2022). ELNSM72M-HC-HV Sersi Güneş Paneli.
- Stofen, D. (2010). Hydrogen Production: by Elektrolisis. 7823–7830.
- Talaat, M., Elkholy, M. H., Alblawi, A., ve Said, T. (2023). Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10410-w>
- TEİAŞ. (2025). TEİAŞ 2025 Mayıs Ayı Kurulu Güç Raporu. <https://enerjiiajansi.com.tr/turkiyenin-kurulu-gucu/>

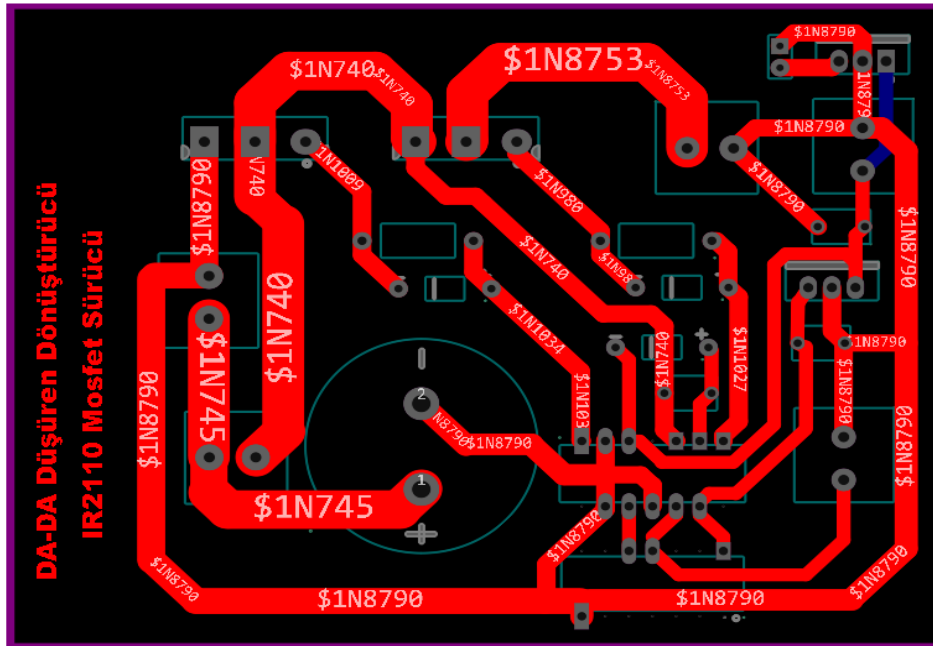
- Trivedi, P. (2016). Design of a Driver IC-IR2110 for MOSFET in Half Bridge Drive. *January*.
- Turgut, A., Temir, A., Aksoy, B., ve Özsoy B. A. (2019). Yapay zekâ yöntemleri ile hava sıcaklığı tahmini için sistem tasarımı ve uygulaması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3, 244–253.
- Usman, M., Balsalobre-Lorente, D., Jahanger, A., ve Ahmad, P. (2022). Pollution concern during globalization mode in financially resource-rich countries: Do financial development, natural resources, and renewable energy consumption matter? *Renewable Energy*, 183, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.067>
- Wikipedia. (2023). Charles Fritts. https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Fritts
- Yap, K. Y., Sarimuthu, C. R., ve Lim, J. M. Y. (2020). Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(6), 1043–1059. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000159>
- Yazici, B., Tatli, G., Galip, H., ve Erbil, M. (1995). Investigation of suitable cathodes for the production of hydrogen gas by electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20(12), 957–965. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00032-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00032-9)
- Yılmaz, M., ve Corapsiz, M. fatih. (2022). Artificial Neural Network based MPPT Algorithm with Boost Converter topology for Stand-Alone PV System. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 242–257. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1002823>
- Younas, U. (2023). Deep Learning LSTM-based MPPT Control of 100kW Dual Stage Grid Tied Solar PV System. 1–33.
- Zengin, A. (2019). Deri Etkisi Nedir? Elektrikport. <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/deri-etkisi-nedir-iletkenleri-tam-performansta-kullaniyor-muyuz/22406#ad-image-0>
- URL-1, (2022). <https://www.newsfindy.com/images/haber/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-155607-20230529.jpg>. Erişim Tarihi: 1 Haziran 2023.
- URL-2, (2023). <https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/G%C3%BCne%C5%9F/g1.png>. Erişim Tarihi: 16 Mayıs 2023.

EKLER

Ek-1. DA-DA düşüren dönüştürücü devresine ait baskı devrenin EasyEDA programında oluşturulan üstten ve alttan devre görünümü.



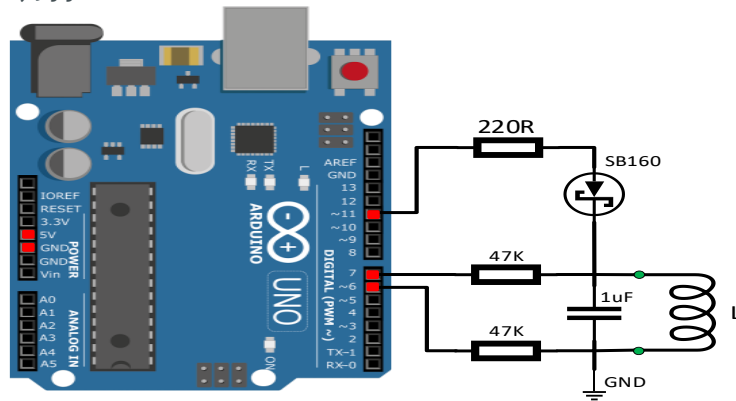
Üstten görünüm



Alttan görünüm

Ek-2. Bobin değeri ölçmek için kullanılan Arduino İDE kodu ve devresi.

```
double pi = 3.1415926535;
double pipi = pi * pi;
int aco=1<<ACO;
void setup(){
  DDRD=0; PORTD=0; ACSR=0; ADCSRB=0;
  Serial.begin(115200);
  pinMode(11, OUTPUT);
  Serial.println("ACO inductance meter");
  delay(500);}
void loop(){
  unsigned long timeout=1000000;
  unsigned long t=0;
  unsigned long total;
  digitalWrite(11, HIGH);
  delay(50);      //indüktör şarj süresi
  digitalWrite(11,LOW);
  while((ACSR & aco)&& t<timeout) {t++;}
  unsigned long start = micros();
  while(!(ACSR & aco)&& t<timeout) {t++;}
  while((ACSR & aco)&& t<timeout) {t++;}
  total=micros() - start-4;
  double C=1.0;      //kondansatör değeri
  double T=total;
  double total2 = (T*T) / ( 4.0 * pipi * C);
  total2*=0.001;      //mH dönüştürme
  if(t>=timeout){
    Serial.println("timeout");}
  else{
    Serial.print(total);
    Serial.print("us  ");
    Serial.print(total2,3);
    Serial.println("mH  ");
    delay(1000);}}
```



Ek-3. DA-DA düşüren dönüştürücü YSA-MPPT algoritma sistemi için benzetim aşamasında veri toplama kodu.

```
% Model adı
model = 'Simulasyon_Veri_Toplama';

% Giriş değer setleri
irradiance_values = [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000];
% G (W/m^2)
temperature_values = [15, 20, 25, 30, 35, 40, 45]; % T (°C)
duty_values = 0:0.1:1; % DutyCycle (0-1 arası 0.1 artarak veri topla)

% Sonuçları saklamak için boş matris
results = [];

% Simülasyon döngüsü
for T = temperature_values
    for G = irradiance_values
        for D = duty_values
            % Parametreleri Simulink'e gönder
            Irradiance = Simulink.Parameter(G);
            Temperature = Simulink.Parameter(T);
            DutyCycle = Simulink.Parameter(D);

            assignin('base', 'Irradiance', Irradiance);
            assignin('base', 'Temperature', Temperature);
            assignin('base', 'DutyCycle', DutyCycle);

            % Simülasyonu çalıştır
            simOut = sim(model, 'StopTime', '0.1', 'SaveOutput', 'on');

            % Çıktıları al
            V = simOut.get('Vpv');
            I = simOut.get('Ipv');
            P = simOut.get('Ppv');

            % Ortalamaları hesapla
            Vmean = mean(V);
            Imean = mean(I);
            Pmean = mean(P);

            % Sonuçları sakla
            results = [results; G T D Vmean Imean Pmean];
        end
    end
end

% Tabloya dönüştür
results_table = array2table(results, ...
    'VariableNames',
    {'Irradiance', 'Temperature', 'DutyCycle', 'Vpv', 'Ipv', 'Ppv'});

% Tabloyu göster
disp(results_table);
```

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

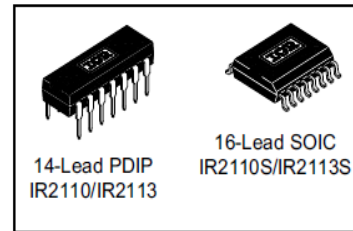
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O+/-}}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

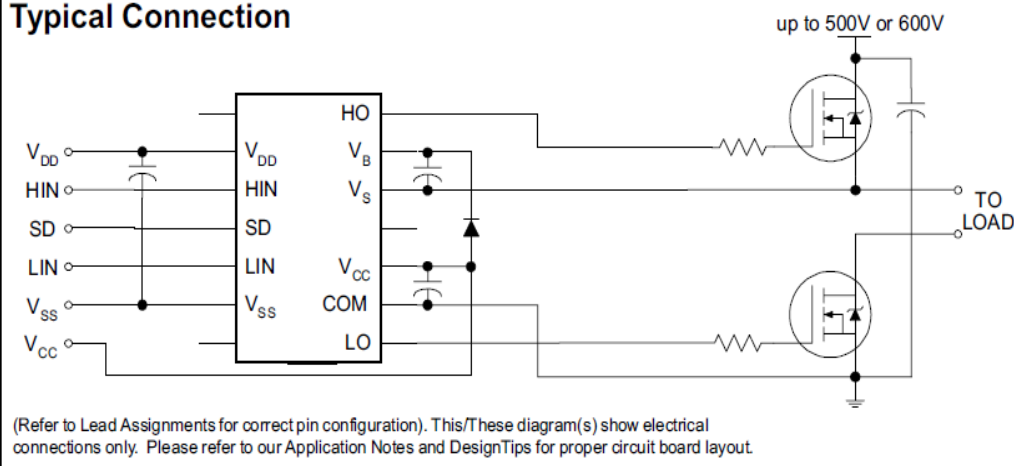
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V
	(IR2113)	-0.3	625	
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_B + 0.3$	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V_{LO}	Low side output voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
V_{DD}	Logic supply voltage	-0.3	$V_{SS} + 25$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	$V_{CC} - 25$	$V_{CC} + 0.3$	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	$V_{SS} - 0.3$	$V_{DD} + 0.3$	
dV_S/dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$ (14 lead DIP)	—	1.6	W
	(16 lead SOIC)	—	1.25	
R_{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient (14 lead DIP)	—	75	$^\circ\text{C/W}$
	(16 lead SOIC)	—	100	
T_J	Junction temperature	—	150	$^\circ\text{C}$
T_S	Storage temperature	-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{DD}	Logic supply voltage	$V_{SS} + 3$	$V_{SS} + 20$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V_{SS}	V_{DD}	$^\circ\text{C}$
T_A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to $-V_{BS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When $V_{DD} < 5V$, the minimum V_{SS} offset is limited to $-V_{DD}$.

Ek-4 (Devam). IR2110 entegresine ait veri sayfaları.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	—	—	—	10 20	

Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IH} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

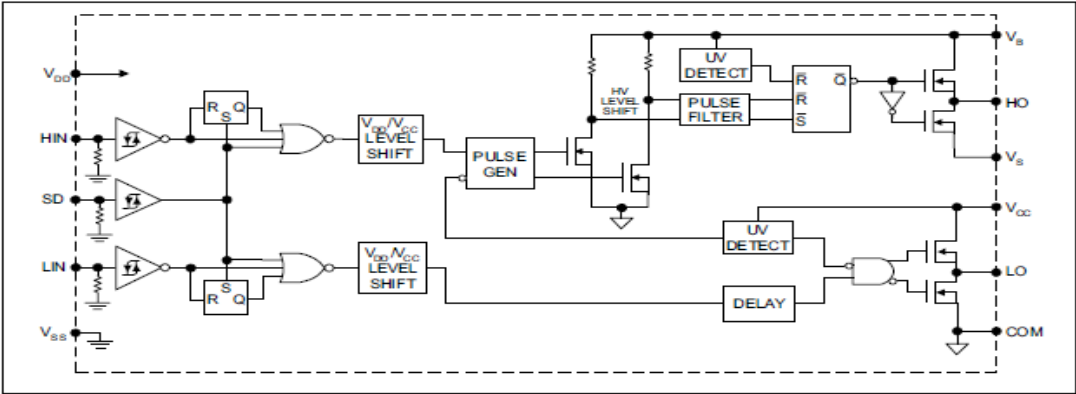
Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QDD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40		$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

Ek-4 (Devam). IR2110 entegresine ait veri sayfaları.

International
IR Rectifier

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

Functional Block Diagram



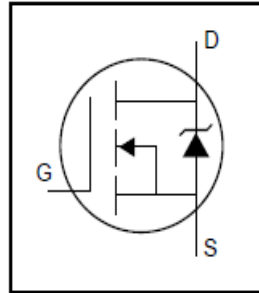
Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments

14 Lead PDIP IR2110/IR2113	16 Lead SOIC (Wide Body) IR2110S/IR2113S
14 Lead PDIP w/o lead 4 IR2110-1/IR2113-1	14 Lead PDIP w/o leads 4 & 5 IR2110-2/IR2113-2
Part Number	

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$$V_{DSS} = 55V$$

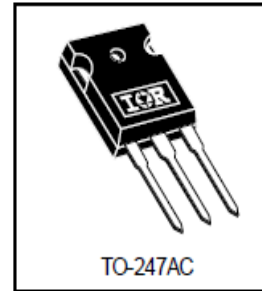
$$R_{DS(on)} = 0.008\Omega$$

$$I_D = 110A\text{⑥}$$

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	110⑥	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	80⑥	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①⑤	390	
P_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②⑤	480	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	59	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③⑤	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

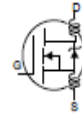
	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

IRFP064N

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$ ⑤
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.008	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 59A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	42	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 59A$ ⑤
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	170	nC	$I_D = 59A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	32		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	74		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13 ④ ⑤
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	100	—		$I_D = 59A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	43	—		$R_G = 2.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	70	—		$R_D = 0.39\Omega$, See Fig. 10④ ⑤
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.)
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		from package and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	4000	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1300	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	480	—		$f = 1.0MHz$, See Fig. 5⑤



Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	110⑥		MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	390		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 59A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	110	170	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 59A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	450	680	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④ ⑤

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 190\mu H$, $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 59A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 59A$, $di/dt \leq 290A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ Uses IRF3205 data and test conditions
- ⑥ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature; for recommended current-handling of the package refer to Design Tip # 93-4

Ek-6. Python Jupyter Notebook-YSA algoritmasının eğitim ve test kodu

```
# Gerekli kütüphanelerin yüklenmesi
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense, Dropout
from tensorflow.keras.optimizers import Adam
from tensorflow.keras.callbacks import EarlyStopping

# 1. Veri Yükleme ve Ön İşleme
# Excel dosyasını belirtilen yoldan oku
file_path = r'C:\Users\TUGRUL\Desktop\MPPT_Tablo_Irr10_Temp1_25A_YENIIII.xlsx'
df = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Sheet1')
# Veriyi temizleme (0,0,0 satırlarını kaldırma)
df = df[(df['Vp'] != 0) | (df['Ip'] != 0) | (df['Duty'] != 0)]
# Giriş ve çıkış verilerini ayırma
X = df[['Vp', 'Ip']].values
y = df['Duty'].values.reshape(-1, 1)
# Veriyi normalize etme
scaler_X = MinMaxScaler()
scaler_y = MinMaxScaler()
X_scaled = scaler_X.fit_transform(X)
y_scaled = scaler_y.fit_transform(y)
# Eğitim ve test setlerine ayırma
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_scaled, y_scaled, test_size=0.2,
random_state=42)

# 2. YSA Modeli Oluşturma
model = Sequential([ Dense(64, activation='relu', input_shape=(2,)),
Dropout(0.2), Dense(32, activation='relu'), Dense(16, activation='relu'), Dense(1) ])
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.001), loss='mse', metrics=['mae'])
# Early Stopping callback
early_stop = EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=10,
restore_best_weights=True)

# 3. Model Eğitimi
print("Model eğitimi başlıyor...")
history = model.fit( X_train, y_train, validation_data=(X_test, y_test),
epochs=100, batch_size=32, verbose=1, callbacks=[early_stop])
```

Ek-6 (Devam). Python Jupyter Notebook-YSA algoritmasının eğitim ve test

kodu

```
# 4. Model Değerlendirme
# Eğitim ve validasyon kayıplarını görselleştirme
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(history.history['loss'], label='Eğitim Kaybı')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='Doğrulama Kaybı')
plt.title('Model Kaybının Gelişimi')
plt.ylabel('Kayıp')
plt.xlabel('Epok')
plt.legend()
plt.show()

# Test setinde değerlendirme
test_loss, test_mae = model.evaluate(X_test, y_test, verbose=0)
print(f"Test Kaybı: {test_loss:.4f}, Test MAE: {test_mae:.4f}")

# 5. Tahminler ve Gerçek Değerlerin Karşılaştırılması
y_pred_scaled = model.predict(X_test)
y_pred = scaler_y.inverse_transform(y_pred_scaled)
y_test_orig = scaler_y.inverse_transform(y_test)
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(y_test_orig, y_pred, alpha=0.5)
plt.plot([y_test_orig.min(), y_test_orig.max()], [y_test_orig.min(),
y_test_orig.max()], 'r--')
plt.xlabel('Gerçek Duty Cycle Değerleri')
plt.ylabel('Tahmin Edilen Duty Cycle Değerleri')
plt.title('Gerçek vs Tahmin Edilen Değerler')
plt.show()

# 6. Modeli Kaydetme
model.save('mppt_model.h5')
print("Model 'mppt_model.h5' olarak kaydedildi.")

# 7. Örnek Tahmin Yapma
# Yeni veri için tahmin (örnek: Vp=20V, Ip=5A)
def predict_duty(Vp, Ip):
    new_data = np.array([[Vp, Ip]])
    new_data_scaled = scaler_X.transform(new_data)
    predicted_duty_scaled = model.predict(new_data_scaled)
    predicted_duty = scaler_y.inverse_transform(predicted_duty_scaled)
    return predicted_duty[0][0]
```

Ek-7. ESP32 S3 mikrodnetleyicisi

ESP32-S3-DevKitC-1

This user guide will help you get started with ESP32-S3-DevKitC-1 and will also provide more in-depth information.

The ESP32-S3-DevKitC-1 is an entry-level development board equipped with either ESP32-S3-WROOM-1 or ESP32-S3-WROOM-1U, a general-purpose Wi-Fi + Bluetooth LE MCU module that integrates complete Wi-Fi and Bluetooth LE functions.

Most of the I/O pins on the module are broken out to the pin headers on both sides of this board for easy interfacing. Developers can either connect peripherals with jumper wires or mount ESP32-S3-DevKitC-1 on a breadboard.



Ek-7 (Devam). ESP32 S3

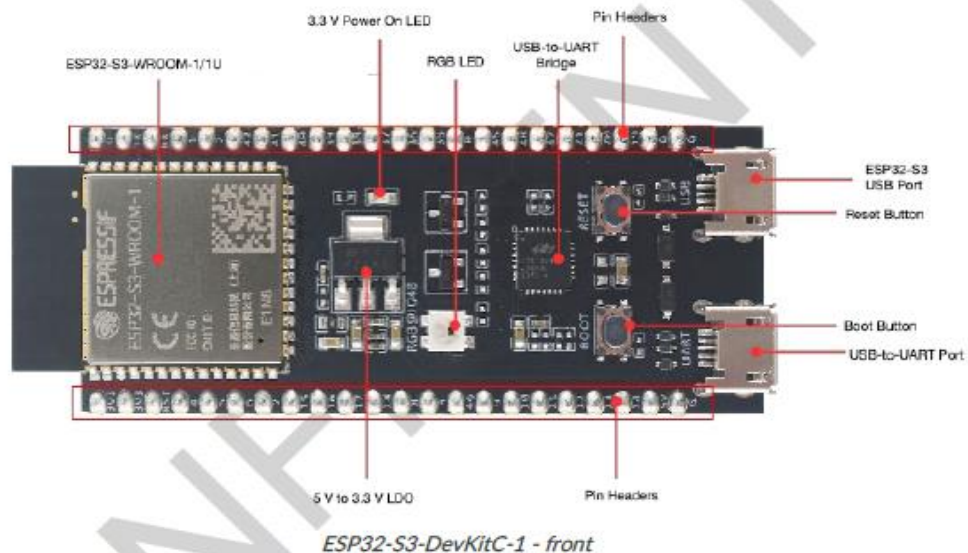
The document consists of the following major sections:

- [Getting started](#): Overview of the board and hardware/software setup instructions to get started.
- [Hardware Reference](#): More detailed information about the board's hardware.
- [Hardware Revision Details](#): Revision history, known issues, and links to user guides for previous versions (if any) of the board.

Getting Started

This section provides a brief introduction of ESP32-S3-DevKitC-1, instructions on how to do the initial hardware setup and how to flash firmware onto it.

Description of Components



The key components of the board are described in a counter-clockwise direction.

Key Component	Description
ESP32-S3-WROOM-1/1U	ESP32-S3-WROOM-1 and ESP32-S3-WROOM-1U are two powerful, generic Wi-Fi + Bluetooth LE MCU modules that have a rich set of peripherals. They provide acceleration for neural network computing and signal processing workloads.
5 V to 3.3 V LDO	Power regulator that converts a 5 V supply into a 3.3 V output.
Pin Headers	All available GPIO pins (except for the SPI bus for flash) are broken out to the pin headers on the board for easy interfacing and programming. For details, please see Header Block .

Ek-7 (Devam). ESP32 S3

Key Component	Description
USB-to-UART Port	A Micro-USB port used for power supply to the board, as well as the communication with the ESP32-S3 chip via the on-board USB-to-UART bridge.
Boot Button	Download button. Holding down Boot and then pressing Reset initiates Firmware Download mode for downloading firmware through the serial port.
Reset Button	Press this button to restart the system.
ESP32-S3 USB Port	ESP32-S3 full-speed USB OTG interface, compliant with the USB 1.1 specification.
USB-to-UART Bridge	Single USB-to-UART bridge chip provides transfer rates up to 3 Mbps.
RGB LED	Addressable RGB LED, driven by GPIO48.
3.3 V Power On LED	Turns on when the USB power is connected to the board.

Start Application Development

Before powering up your board, please make sure that it is in good condition with no obvious signs of damage.

Required Hardware

- ESP32-S3-DevKitC-1
- USB 2.0 cable (Standard-A to Micro-B)
- Computer running Windows, Linux, or macOS

Note

Be sure to use an appropriate USB cable. Some cables are for charging only and do not provide the needed data lines nor work for programming the boards.

Software Setup

Please proceed to [Get Started](#), where Section Installation Step by Step will quickly help you set up the development environment and then flash an application example onto your board.

Contents and Packaging

Retail orders

If you order a few samples, each board comes in an individual package in either antistatic bag or any packaging depending on your retailer.

For retail orders, please go to <https://www.espressif.com/en/company/contact/buy-a-sample>.

Ek-7 (Devam). ESP32 S3

Wholesale Orders

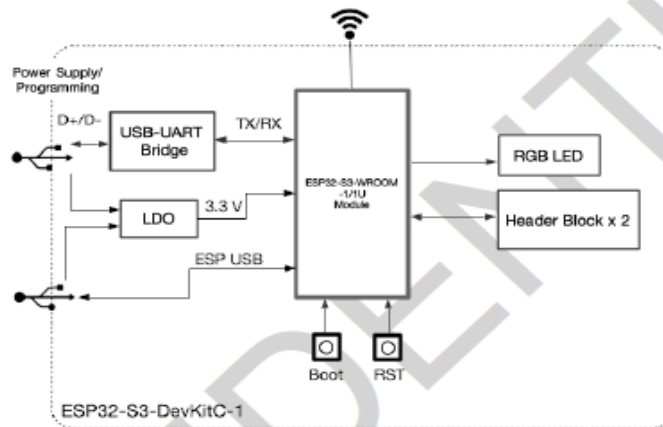
If you order in bulk, the boards come in large cardboard boxes.

For wholesale orders, please go to <https://www.espressif.com/en/contact-us/sales-questions>.

Hardware Reference

Block Diagram

The block diagram below shows the components of ESP32-S3-DevKitC-1 and their interconnections.



ESP32-S3-DevKitC-1 (click to enlarge)

Power Supply Options

There are three mutually exclusive ways to provide power to the board:

- USB-to-UART Port, default power supply (recommended)
- 5 V and GND pins
- 3V3 and GND pins

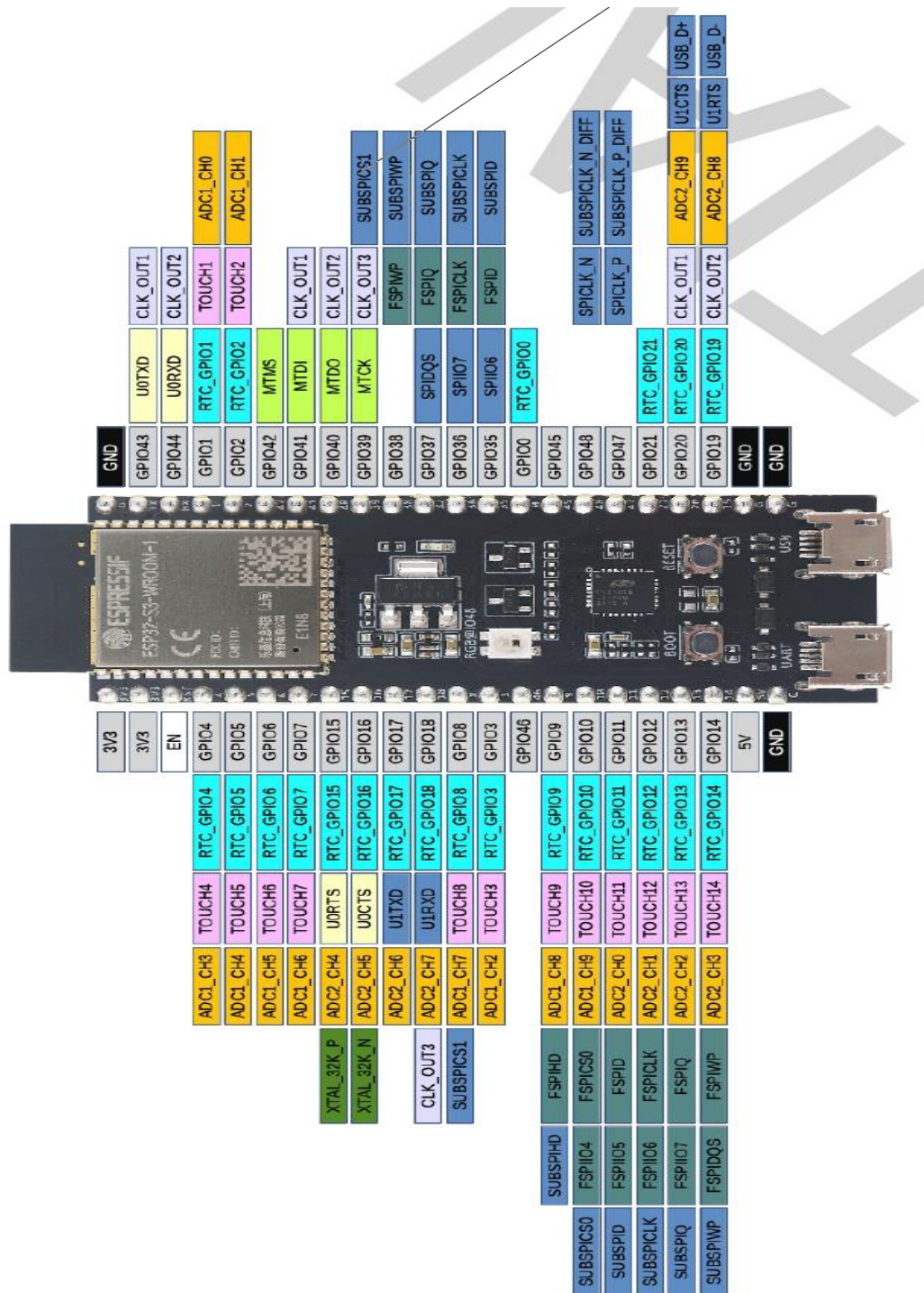
Header Block

The two tables below provide the **Name** and **Function** of the pins on both sides of the board (J1 and J3). The pin names are shown in [ESP32-S3-DevKitC-1 - front](#). The numbering is the same as in the Board Schematic (PDF).

J1

No.	Name	Type ¹	Function
-----	------	-------------------	----------

Ek-7 (Devam). ESP32 S3



Ek-8. E70 ferrit nüve

DMEGC

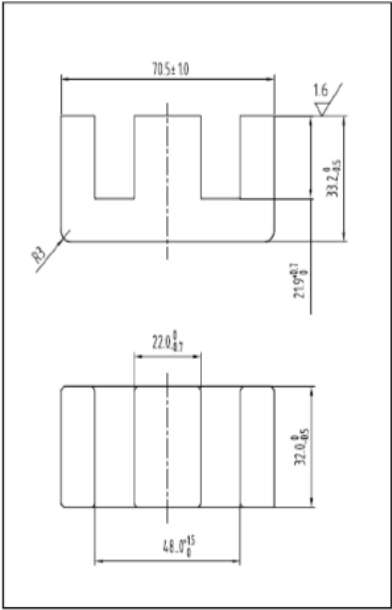
EE cores

EE70

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma (l/A)$	core factor (C_1)	0.22	mm^{-1}
Ve	effective volume	102900.0	mm^3
le	effective length	150.0	mm
Ae	effective area	686.0	mm^2
Amin	minimum area	676.0	mm^2
Wt	mass of core set	≈ 519.0	g



Characteristic

GRADE	AL (nH/N ²)	B (mT)	CORE LOSS (W)
	f=10kHz U=0.25V	H=250A/m f=25kHz T=100°C	f=100kHz B=200mT T=100°C
DMR40	10000 ± 25%	≥ 320	≤ 67.47
DMR44	10000 ± 25%	≥ 320	≤ 60.0
DMR95	13000 ± 25%	≥ 340	≤ 60.0

Ek-9. MQ-8 Hidrojen gaz ölçüm sensörü

MQ-8 Semiconductor Sensor for Hydrogen Gas

Profile

Sensitive material of MQ-8 gas sensor is SnO_2 , which with lower conductivity in clean air. When hydrogen gas exists, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit. MQ-8 gas sensor has high sensitivity to hydrogen gas, also has anti-interference to other gases. This sensor can detect hydrogen, especially city gas. It is a kind of low-cost sensor for kinds of applications.

Features

It has good sensitivity to hydrogen gas in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

Main Applications

It is widely used in domestic gas leakage alarm, industrial flammable gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters

Stable.1

Model			MQ-8
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite, Metal cap
Target Gas			Hydrogen
Detection range			100~1000ppm(H_2 gas)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V_c	$\leq 24\text{V DC}$
	Heater Voltage	V_H	$5.0\text{V} \pm 0.1\text{V AC or DC}$
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R_H	$29\Omega \pm 3\Omega$ (room tem.)
	Heater consumption	P_H	$\leq 900\text{mW}$
	Sensitivity	S	$R_s(\text{in air})/R_s(\text{in } 1000\text{ppm H}_2) \geq 5$
	Output Voltage	V_s	$2.5\text{V} \sim 4.0\text{V}$ (in 1000ppm H_2)
	Concentration Slope	α	$\leq 0.6(R_{1000\text{ppm}}/R_{400\text{ppm H}_2})$
Standard test conditions	Tem. Humidity	$20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 55\% \pm 5\%\text{RH}$	
	Standard test circuit	$V_c: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V};$ $V_H: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V}$	
	Preheat time	Over 48 hours	

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

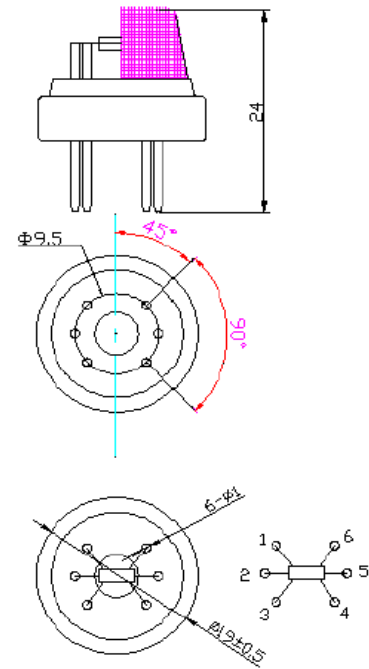


Fig1.Sensor Structure

Unit: mm