



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

**BULANIK MANTIK TEMELLİ MPPT ALGORİTMASI VE  
SÜPER-LİFT LUO DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE GÜNEŞ ENERJİ  
SİSTEMLERİNDE PERFORMANS İYİLEŞTİRME**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Bengisu KABA**

**Danışman  
Doç. Dr. Murat TÖREN**

**RİZE  
2025**

## KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Murat TÖREN danışmanlığında, Bengisu KABA tarafından hazırlanan *Bulanık Mantık Temelli MPPT Algoritması ve Süper-Lift Luo Dönüştürücü ile Güneş Enerji Sistemlerinde Performans İyileştirme* adlı bu tez çalışması, 27/06/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Ünvanı, Adı SOYADI

### İmza

Başkan : Doç. Dr. Davut ERTEKİN

Üye : Doç. Dr. Hasan EROĞLU

Üye : Doç. Dr. Murat TÖREN

## **ETİK BEYAN**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Bulanık Mantık Temelli MPPT Algoritması ve Süper-Lift Luo Dönüştürücü ile Güneş Enerji Sistemlerinde Performans İyileştirme” 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.

27/06/2025

**Bengisu KABA**

## ÖN SÖZ

Bu çalışmada, gelişen yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi sistemlerinde verimliliğin artırılması ve yeni teknolojik gelişmelere uyum sağlanması amacıyla bulanık mantık kavramı incelenmiştir. Güneş enerjisi sistemlerinde kullanımı değerlendirilen süper-lift Luo dönüştürücü topolojisi ile birlikte, maksimum güç noktası takibi için bulanık mantık temelli bir kontrol yapısı uygulanmış ve sistemin genel verimliliği artırılmıştır. Bu kapsamda, hem klasik sistemlerde yaygın olarak kullanılan dönüştürücülerden farklı bir topoloji ele alınmış hem de yeni bir kontrol yöntemi tasarlanarak bu yapının sistem performansına etkileri analiz edilmiştir.

Tezin yazımı ve kontrol aşamalarında destek sağlayan Sayın Arş. Gör. Göktürk ÖZTÜRK, özellikle kaynak temini konusunda yardımcı olan bölümümüz öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN, tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde ve şekillenmesinde de katkı sunan Bursa Teknik Üniversitesi öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Davut ERTEKİN hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmanın planlanması, yürütülmesi ve şekillenmesi sürecinde her an yanımda olup katkılarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Murat TÖREN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek sağlayan sevgili aileme de sonsuz minnetlerimi sunarım.

Bengisu KABA  
RİZE/2025

## İÇİNDEKİLER

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY .....                                      | I    |
| ETİK BEYAN .....                                         | II   |
| ÖN SÖZ .....                                             | III  |
| İÇİNDEKİLER .....                                        | IV   |
| ÖZET .....                                               | VI   |
| ABSTRACT.....                                            | VII  |
| KISALTMALAR .....                                        | VIII |
| TABLolar LİSTESİ.....                                    | IX   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                   | X    |
| GİRİŞ .....                                              | 1    |
| 1. LİTERATÜR TARAMASI .....                              | 3    |
| 2. ENERJİ KAYNAKLARI.....                                | 19   |
| 2.1. Yenilenemez Enerji .....                            | 20   |
| 2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....               | 21   |
| 3. GÜNEŞ ENERJİSİ .....                                  | 23   |
| 3.1. Türkiye’deki Güneş Enerji Potansiyeli .....         | 24   |
| 3.2. Güneş Enerji Sistemleri .....                       | 28   |
| 3.2.1. Fotovoltaik.....                                  | 29   |
| 3.2.1.1. Fotovoltaik Hücreler.....                       | 30   |
| 3.2.1.2. Fotovoltaik Paneller ve Dizinler.....           | 34   |
| 3.2.2. Maksimum Güç Noktası Takibi.....                  | 36   |
| 4. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....                                   | 41   |
| 4.1. Yükselten Dönüştürücü.....                          | 41   |
| 4.1.1. Yükselten Dönüştürücü Durum Uzak Denklemleri..... | 43   |
| 4.2. Düşüren-Yükselten Dönüştürücü .....                 | 44   |
| 4.3. Cuk Dönüştürücü .....                               | 45   |
| 4.4. SEPIC Dönüştürücü .....                             | 45   |
| 4.5. Luo Dönüştürücü.....                                | 46   |
| 4.5.1. Süper-Lift Luo Dönüştürücü .....                  | 47   |
| 4.6. Dönüştürücü Tiplerinin Karşılaştırılması.....       | 52   |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 5. BULANIK MANTIK .....                                       | 55 |
| 5.1. Klasik ve Bulanık Mantık Arasındaki Temel Farklar.....   | 56 |
| 5.2. Bulanık Küme ve Üyelik Fonksiyonları .....               | 57 |
| 5.2.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu.....                           | 59 |
| 5.2.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu .....                          | 60 |
| 5.3. Bulanık Mantık Çalışma Prensipleri .....                 | 60 |
| 5.3.1. Bulanıklaştırma .....                                  | 61 |
| 5.3.2. Bilgi Tabanı.....                                      | 61 |
| 5.3.3. Çıkarım .....                                          | 62 |
| 5.3.4. Durulaştırma .....                                     | 65 |
| 5.3.4.1. En Büyük Üyelik Yöntemi .....                        | 66 |
| 5.3.4.2. En Büyüklerin Ortalaması Yöntemi .....               | 66 |
| 5.3.4.3. Ağırlık Merkezi Yöntemi.....                         | 67 |
| 5.3.4.4. Ortalama Ağırlık Yöntemi .....                       | 68 |
| 5.4. Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları .....         | 69 |
| 5.5. Bulanık Mantık ile MPPT Algoritması .....                | 70 |
| 6. SİSTEM TASARIMI .....                                      | 72 |
| 6.1. DA-DA Yükselten Dönüştürücü .....                        | 75 |
| 6.1.1. Yükselten Dönüştürücü için MPPT Algoritması .....      | 76 |
| 6.2. Süper-lift Luo Dönüştürücü .....                         | 79 |
| 6.2.1. Süper-lift Luo Dönüştürücü için MPPT Algoritması ..... | 81 |
| 7. BULGULAR.....                                              | 84 |
| 8. SONUÇ.....                                                 | 94 |
| KAYNAKÇA .....                                                | 96 |

**Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Anabilim Dalı** : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

**Tez Türü** : Yüksek Lisans Tezi

**Danışman** : Doç. Dr. Murat TÖREN

**Hazırlayan** : Bengisu KABA

**Yıl** : 2025

**Sayfa Sayısı** : 109

## **ÖZET**

### **BULANIK MANTIK TEMELLİ MPPT ALGORİTMASI VE SÜPER-LİFT LUO DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE PERFORMANS İYİLEŞTİRME**

Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde maksimum güç noktası takibi (MPPT) için süper-lift Luo dönüştürücü ile entegre edilmiş bulanık mantık tabanlı bir kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Özgün katkı olarak, nadiren incelenen yükselten ve süper-lift Luo DA-DA dönüştürücüleri ortak kontrol sistemi altında karşılaştırılmıştır. Her iki sistem için aynı güneş paneli özelliklerine dayalı bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmıştır. Sonuçlar, süper-lift Luo'nun çıkış gerilimini %344 artırarak 245,8 V'dan 1091 V'a yükselttiğini göstermiştir. Çıkış akımının ise %58,4 azalmayla 32,78 A'den 13,64 A'e düştüğü tespit edilmiştir. Buna rağmen çıkış gücü %86,3 artışla 7981 W'dan 14870 W'a yükselmiş ve verimlilik %4,16 artmıştır. Sonuç olarak süper-lift Luo dönüştürücü ile daha yüksek verimlilikle birlikte daha yüksek gerilim kazancı elde edilmiştir. Bu veriler, süper-lift Luo tabanlı sistemin yüksek güçlü yükler ve endüstriyel uygulamalar için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, iki dönüştürücünün de aynı yük altında çalıştırılarak sistem karşılaştırılması da sunulmuştur. Tasarlanan kontrolör, her iki dönüştürücüde aşım olmadan kararlı maksimum güç çıkışı sağlamıştır. Bunun yanında değişken çevresel koşullar altında da sistemlerin tepkilerinin incelenmesi, kontrol metodolojisi ve dönüştürücü tipinin fotovoltaiik sistem performansına etkisini net olarak göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık Mantık, Süper-lift Luo Dönüştürücü, MPPT, Güneş Enerji Sistemleri.

**Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies**

**Department** : Electric-Electronic Engineering

**Thesis Type** : Master Thesis

**Supervisor** : Assoc. Prof. Dr. Murat TÖREN

**Author** : Bengisu KABA

**Year** : 2025

**Pages** : 109

## **ABSTRACT**

### **PERFORMANCE IMPROVEMENT IN SOLAR ENERGY SYSTEMS WITH FUZZY LOGIC BASED MPPT ALGORITHM AND SUPER-LIFT LUO CONVERTER**

This paper presents a fuzzy logic control mechanism connected with a super-lift Luo converter for maximum power point tracking (MPPT) in solar energy systems. This study presents a novel comparison of the infrequently examined boost and super-lift Luo DC-DC converters utilizing a unified control framework. A fuzzy logic controller utilizing identical solar panel properties has been developed for both systems. The findings indicate that the super-lift Luo augmented the output voltage by 344%, increasing from 245.8 V to 1091 V. The output current has lowered by 58.4%, from 32.78 A to 13.64 A. Nonetheless, the output power surged by 86.3%, escalating from 7981 W to 14870 W, while the efficiency enhanced by 4.16%. Consequently, the super-lift Luo converter attained an elevated voltage gain alongside enhanced efficiency. The data suggest that the Luo-based super-lift system is appropriate for high-power loads and industrial applications. A comparative analysis of the systems was conducted by operating both converters under identical load conditions. The engineered controller has ensured constant maximum power output without overrun in both converters. The analysis of the systems' responses to varying environmental circumstances has unequivocally illustrated the influence of the control methods and converter type on the performance of solar systems.

**Keywords:** Fuzzy Logic, Super-lift Luo Converter, MPPT, Solar Energy Systems.

## KISALTMALAR

|            |   |                                                                                        |
|------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta E$ | : | Hata Değişimi                                                                          |
| ANFIS      | : | Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi<br>(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) |
| E          | : | Hata                                                                                   |
| FLC        | : | Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control)                                           |
| FV         | : | Fotovoltaik                                                                            |
| GEPA       | : | Güneş Enerji Potansiyeli Atlası                                                        |
| GES        | : | Güneş Enerji Sistemi                                                                   |
| IEA        | : | International Energy Agency                                                            |
| InC        | : | Artımlı İletkenlik Algoritması<br>(Incremental Conductance Algorithm)                  |
| I-V        | : | Akım-Gerilim Karakteristiği                                                            |
| MPP        | : | Maksimum Güç Noktası                                                                   |
| MPPT       | : | Maksimum Güç Noktası Takibi                                                            |
| NB         | : | Negatif Büyük (Negative Big)                                                           |
| NS         | : | Negatif Küçük (Negative Small)                                                         |
| P&O        | : | Değiştir-Gözle Algoritması<br>(Perturb and Observe Algorithm)                          |
| PB         | : | Pozitif Büyük (Positive Big)                                                           |
| PI         | : | Oransal-İntegral                                                                       |
| PID        | : | Oransal-İntegral-Türev                                                                 |
| PS         | : | Pozitif Küçük (Positive Small)                                                         |
| PSO        | : | Parçacık Sürü Optimizasyonu                                                            |
| P-V        | : | Güç-Gerilim Karakteristiği                                                             |
| SEPIC      | : | Tek Uçlu Birincil Endüktör Dönüştürücüsü<br>(Single-Ended Primary-Inductor Converter)  |
| SMC        | : | Kayan Kip Kontrol<br>(Sliding Mode Control)                                            |
| YSA        | : | Yapay Sinir Ağı                                                                        |
| ZE         | : | Sıfır (Zero)                                                                           |

## TABLÖLER LİSTESİ

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Farklı çalışmalarda karşılaştırılan kontrolcüler ve FLC'nin avantajları.....                 | 12 |
| <b>Tablo 2.</b> Kontrol algoritmalarının performans kriterlerine göre karşılaştırılması.....                 | 14 |
| <b>Tablo 3.</b> Kontrol algoritmalarının uygulama ve geliştirme kriterlerine göre karşılaştırılması.....     | 15 |
| <b>Tablo 4.</b> Bölgelerin yıllık toplam ışıınım şiddeti ve güneşlenme süreleri.....                         | 26 |
| <b>Tablo 5.</b> Gerilim artırma ve süper-lift tekniklerinin karşılaştırılması .....                          | 47 |
| <b>Tablo 6.</b> Dönüştürücülerin karşılaştırılması .....                                                     | 53 |
| <b>Tablo 7.</b> Dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları .....                                             | 53 |
| <b>Tablo 8.</b> MATLAB’da tanımlı üyelik fonksiyonları.....                                                  | 59 |
| <b>Tablo 9.</b> ‘İse’ bağlacının doğruluk tablosu.....                                                       | 61 |
| <b>Tablo 10.</b> Çıkarım yöntemleri .....                                                                    | 63 |
| <b>Tablo 11.</b> Mamdani ve Sugeno yöntemlerinin karşılaştırılması .....                                     | 65 |
| <b>Tablo 12.</b> Yükselten dönüştürücü devrenin hesaplama parametreleri.....                                 | 76 |
| <b>Tablo 13.</b> Yükselten dönüştürücü devre parametreleri.....                                              | 76 |
| <b>Tablo 14.</b> Yükselten dönüştürücü için FLC kural tabanı.....                                            | 78 |
| <b>Tablo 15.</b> Süper-lift Luo dönüştürücü devrenin hesaplama parametreleri .....                           | 80 |
| <b>Tablo 16.</b> Süper-lift Luo dönüştürücü devre parametreleri .....                                        | 81 |
| <b>Tablo 17.</b> Süper-lift Luo dönüştürücü için FLC kural tabanı .....                                      | 82 |
| <b>Tablo 18.</b> Sistemlerden elde edilen nihai değerler, oturma süreleri ve yüzdesel değişim oranları ..... | 84 |
| <b>Tablo 19.</b> Güncellenmiş yükselten dönüştürücü devre parametreleri .....                                | 92 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması .....                                   | 20 |
| Şekil 2. Yenilenebilir enerji kaynakları .....                                          | 22 |
| Şekil 3. Dünya çapında güneş enerji potansiyeli (Solargis, 2024) .....                  | 23 |
| Şekil 4. Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli ve global radyasyon dağılımı .....        | 24 |
| Şekil 5. Türkiye'nin aylık ortalama (a) ışınlam şiddeti (b) güneşlenme süresi.....      | 25 |
| Şekil 6. Türkiye'de 2014-2022 Haziran sonu güneş enerjisi kurulu güç üretimi .....      | 27 |
| Şekil 7. Türkiye'nin Eylül 2024 itibarıyla kaynaklara göre kurulu güç dağılımı.....     | 28 |
| Şekil 8. Güneş enerji sistemlerinin blok diyagramı.....                                 | 29 |
| Şekil 9. Türkiye'de FV tiplerinden alana göre üretilebilecek enerji grafiği .....       | 31 |
| Şekil 10. FV hücrenin (a) yüklenmiş görünümü (b) bölümleri .....                        | 32 |
| Şekil 11. İdeal bir FV hücrenin tek diyot modeli.....                                   | 33 |
| Şekil 12. Hücre, panel ve dizin.....                                                    | 34 |
| Şekil 13. Bağlantı şekli (a) seri (b) paralel .....                                     | 35 |
| Şekil 14. Sabit ışınlam ( $1000\text{W/m}^2$ ) altında I-V ve P-V karakteristiği .....  | 37 |
| Şekil 15. Sabit sıcaklık ( $25^\circ\text{C}$ ) altında I-V ve P-V karakteristiği ..... | 37 |
| Şekil 16. Akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri .....                           | 38 |
| Şekil 17. MPPT yöntemlerinin temel kategorileri.....                                    | 38 |
| Şekil 18. P&O algoritması süreç akış diyagramı.....                                     | 39 |
| Şekil 19. Yükselten dönüştürücü devre şeması .....                                      | 41 |
| Şekil 20. Yükselten dönüştürücü anahtar (a) kapalı (b) açık durumu .....                | 42 |
| Şekil 21. Düşüren-yükselten dönüştürücü devre şeması .....                              | 44 |
| Şekil 22. Cuk dönüştürücü devre şeması.....                                             | 45 |
| Şekil 23. SEPIC dönüştürücü devre şeması.....                                           | 46 |
| Şekil 24. Süper-lift Luo dönüştürücü devre şeması.....                                  | 47 |
| Şekil 25. Kazanç-Dönüşüm oranı grafiği ( $0,1 \leq k \leq 0,9$ aralığı için) .....      | 48 |
| Şekil 26. Süper-lift Luo dönüştürücü anahtar (a) kapalı (b) açık durumu.....            | 49 |
| Şekil 27. Çıkış gerilimi dalga biçimi .....                                             | 50 |
| Şekil 28. Dalga biçimleri (a) giriş akımı (b) $C_1$ kondansatörü üzerindeki akım .....  | 51 |
| Şekil 29. Klasik mantık ile bulanık mantığın şematik gösterimleri .....                 | 57 |
| Şekil 30. Üyelik fonksiyonları örnekleri .....                                          | 58 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 31.</b> Bulanık mantık sistemi blok diyagramı.....                                                                   | 60 |
| <b>Şekil 32.</b> Bulanık kural tabanlı çıkarım sistemi yapısı .....                                                           | 62 |
| <b>Şekil 33.</b> En büyük üyelik yöntemi şematik gösterimi .....                                                              | 66 |
| <b>Şekil 34.</b> En büyüklerin ortalaması yöntemi şematik gösterimi .....                                                     | 67 |
| <b>Şekil 35.</b> Ağırlık merkezi yöntemi şematik gösterimi .....                                                              | 68 |
| <b>Şekil 36.</b> Ortalama ağırlık yöntemi şematik gösterimi .....                                                             | 69 |
| <b>Şekil 37.</b> GES blok diyagramı .....                                                                                     | 72 |
| <b>Şekil 38.</b> Tasarlanan güneş enerji sistemi (a) klasik yükselten dönüştürücü ile (b) süper-lift Luo dönüştürücü ile..... | 74 |
| <b>Şekil 39.</b> Tasarlanan FLC tabanlı MPPT kontrol içyapısı .....                                                           | 75 |
| <b>Şekil 40.</b> Üyelik fonksiyonları (a) gerilimdeki değişim (b) güçteki değişim (c) çıkış değişkeni .....                   | 78 |
| <b>Şekil 41.</b> Yükselten dönüştürücünün FLC kontrol yüzeyi .....                                                            | 79 |
| <b>Şekil 42.</b> Üyelik fonksiyonları (a) hata oranı (b) hata değişimi (c) görev döngüsü ..                                   | 82 |
| <b>Şekil 43.</b> Süper-lift Luo dönüştürücünün FLC kontrol yüzeyi .....                                                       | 83 |
| <b>Şekil 44.</b> Giriş grafikleri (a) akım (b) gerilim .....                                                                  | 85 |
| <b>Şekil 45.</b> Çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim .....                                                                  | 86 |
| <b>Şekil 46.</b> Güç grafikleri (a) giriş (b) çıkış.....                                                                      | 87 |
| <b>Şekil 47.</b> Verimlilik grafikleri (a) yükselten dönüştürücü (b) süper-lift Luo dönüştürücü.....                          | 88 |
| <b>Şekil 48.</b> Panele verilen değişken grafikler (a) ışıınım (b) sıcaklık.....                                              | 89 |
| <b>Şekil 49.</b> Değişken $I_r$ ve $T$ ile giriş grafikleri (a) akım (b) gerilim.....                                         | 90 |
| <b>Şekil 50.</b> Değişken $I_r$ ve $T$ ile çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim .....                                        | 91 |
| <b>Şekil 51.</b> Değişken $I_r$ ve $T$ ile güç grafikleri (a) giriş (b) çıkış.....                                            | 92 |
| <b>Şekil 52.</b> Farklı yük koşullarında çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim.....                                           | 93 |

## GİRİŞ

Dünyada gelişen ve gelişmekte olan tüm ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınmayı sürdürülebilmesi için enerji sektöründe de gelişmesi gerekmektedir. Bu durumun nedeni, enerjinin tüm sosyal ve ekonomik faaliyetlerde kullanılan en önemli faktörlerden biri olmasıdır. Gelişen ülkelerde yaşanan nüfus artışı ile birlikte sanayileşmenin de artması ihtiyaç duyulan enerji miktarının da artmasına neden olmaktadır. Hayatımızın her alanında kullanılan enerjinin talebindeki bu artış enerji üretiminde de artışı zorunlu hale getirmiştir.

Dünyada enerji ihtiyacının yaklaşık %80'i fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğal gaz vb.) karşılanmaktadır. Yenilenemez enerjinin bir parçası olan bu fosil yakıtların kullanımı artan çevre kirliliğine ve iklim değişikliği ile beraberinde küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu nedenle fosil yakıt kullanımının artması tüm dünya ekosisteminde değişime sebep olarak yaşam şartlarını (temiz hava, suya erişim, gıda üretimi/tüketimi, çevre, sağlık vs.) olumsuz etkilemektedir. Ayrıca fosil yakıtlar yenilenemez enerji kaynakları olduğundan fosil yakıt rezervleri de tükenerek ortalama 80-100 yıl içerisinde tamamen biteceği öngörülmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı farklı kaynaklara yönelimin zorunlu hale gelmesinin sebepleri arasında fosil yakıtlardaki tükenme ve bu yakıtların neden oldukları çevre kirliliği olduğu söylenebilir (Sahu vd., 2018; Topkaya, 2012; Rahman vd., 2022).

Yenilenebilir enerjinin dünyadaki keşfinin en önemli faktörü ise 1970'lerde yaşanan petrol krizi ile birlikte yükselen petrol fiyatlarıdır (Breyer vd., 2022). Yaşanan bu petrol krizi sonrasında enerji güvenliği endişeleri ve çevresel faktörlere olan duyarlılık arttıkça, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar ve projeler geliştirilmeye başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesindeki bir diğer faktör de beraberinde getirdiği avantajlardır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çevre kirliliğine etkisi en az olan enerji kaynaklarıdır,
- Sera etkisi yoktur,
- Enerji kaynakları konusunda dışa bağımlılığı yoktur,
- Tesisleri genelde kırsal bölgelere kurulabileceği için bölgede iş imkânı sağlayarak ekonomiye katkı sağlar,
- Alt yapısal bir dezavantaja da sebebiyet vermez.

Bu avantajları elinde bulundurması sebebiyle gelişen ve değişen dünyada bu yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi de artarak devam etmektedir. Bu nedenle de bu kaynaklardan elde edilen enerjinin artırılması için Araştırma-Geliştirme (AR-GE) çalışmaları ortaya çıkarılmıştır (Erol, 2007). Bu sayede “Yeşil Enerji” ya da “Sürdürülebilir Enerji” olarak da adlandırılan yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe daha da geliştirilmiştir (Cihan, 2019).

Ülkemizin jeopolitik konumu ve sürdürülebilir enerji kaynakları açısından bolluğu, ülkemizde yenilenebilir enerji sektörünün gelişmesine yol açmıştır. Bu sayede ülkemizin enerji ve dolayısıyla ekonomi alanında gelişmesine katkı sağlanmıştır.

Özetle, yenilenebilir enerji sistemlerinin her geçen gün daha da ileriye taşınmasının ve geliştirilmesinin gerekliliği dünyanın ekosisteminin bozulmasının engellenmesi ve ülkenin enerji konusunda dışa bağımlılığının azaltılmasına dayandırılabilir. Bu tez kapsamında da yenilenebilir enerjinin bir parçası olan Güneş Enerji Sistemi (GES) ele alınmaktadır.

Güneş Enerji Sistemleri, yenilenebilir enerji kaynağı olan Güneş’ten gelen ışıınım ve sağladığı sıcaklık faktörleri sayesinde sistemde kullanılan fotovoltaiik (FV) paneller aracılığıyla enerji üretmeye yarayan sistemlerdir. Bu sistemlerde gerekli dönüştürücü ve çeviri elemanları kullanılarak elde edilen enerjinin kullanılması ya da depolanması sağlanmaktadır.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın yayınlamış olduğu Türkiye Güneş Enerji Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ülkemizin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saattir. Ortalama yıllık toplam ışıınım değeri ise 1.527,46 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Bu yüksek güneş enerji potansiyeline sahip ülkemiz International Energy Agency (IEA) verilerine göre de güneş enerjisinden elektrik üretiminde dünya ülkeleri arasında 13., Avrupa ülkeleri arasında ise 6. Sıradadır (IEA, 2021).

GES’lerde verimliliğin artırılması ve bu sayede güneş enerjisinin daha etkili bir şekilde kullanılması da oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple Maksimum güç noktası takibi için kullanılan algoritmaların da Bulanık mantık kontrol gibi yenilikçi sistemlerle birleştirilerek daha etkili kontrol yapılarının oluşturulması gerekmektedir. Bulanık mantık kontrol, diğeri kontrol algoritmalarına kıyasla daha kararlı ve verimli bir sistem çalışması sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir (Çakmak vd., 2025).

## 1. LİTERATÜR TARAMASI

GES'lerde kullanılan dönüştürücü ve evirici gibi elemanların incelenmesi, sistemlerdeki kullanılabilirliğinin araştırılmasını içeren çalışmalar literatürde mevcuttur. GES'lerde kullanılan klasik dönüştürücülerin yanı sıra Split-pi dönüştürücü, Flyback dönüştürücü ve Lineer gerilim regülatörü ile FV sistem oluşturulan bir çalışmada bu dönüştürücülerin FV sistem üzerinde karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada çıkış akımında, geriliminde ve gücünde yaşanan dalgalanmalar açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Çıkış geriliminde en yüksek dalgalanma oranı klasik yükselten dönüştürücüden alınmıştır. Bunun yanında verimlilik yönünden de karşılaştırmanın yapıldığı bu çalışmada %98,13 ile en yüksek verimlilik split-pi dönüştürücüyle elde edilmiştir. En düşük verimlilik ise %64,13 ile lineer gerilim regülatöründen elde edilmiştir. Split-pi dönüştürücünün klasik düşüren-yükselten dönüştürücü ile kıyaslanabilir ve bu dönüştürücüye alternatif olarak kullanılabilir olduğu çalışma sonucunda vurgulanmıştır (Dwivedi vd., 2023). Yükselten, düşüren-yükselten, Flyback ve SEPIC (Single-ended primary-inductor converter) dönüştürücülerin FV sistem için kullanılabilirliğinin incelendiği bir çalışmada da dönüştürücülerin donanım karmaşıklığı, maliyet ve verimlilik açısından karşılaştırmaları da yapılmıştır. Çalışmada çift bobinli dönüştürücülerde kaçak endüktansın neden olduğu gerilim ve akım sızramalarının kritik dezavantaja sahip oldukları vurgulanmıştır (Reshma Gopi & Sreejith, 2018). Bu tez kapsamında ise bu dönüştürücülerden farklı bir topolojiye sahip olan süper-lift Luo dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücüde bir adet bobin elemanının bulunması sayesinde çift bobinli dönüştürücülerde karşılaşılan gerilim ve akım sızramalarının önüne geçilerek FV sistemde verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

Geleneksel SEPIC dönüştürücülerde kazanç sınırlaması ve gerilim stresi nedeniyle verimi düşmektedir. Bir çalışmada bu verim düşümünün engellenmesi amacıyla modifiyeli bir SEPIC dönüştürücü oluşturulmuştur. 6 adet farklı topolojiyle oluşturulmuş SEPIC dönüştürücünün karşılaştırıldığı bu çalışmada gerilimin on kat artırılması sağlanmıştır. Tüm topolojilerde aynı minimum ve maksimum gerilim stresi değerleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verimliliklerin en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla %97,2 ve %99,5'dir (Sutikno vd., 2023). Yüksek kazançlı

DA-DA dönüştürücüler üzerine yapılan çalışmada da FV sistemler için farklı koşullar altında da verimliliği artırmak hedeflenmiştir. Bu amaçla dönüştürücü topolojisinde değişiklik yapılarak FV sistemler için analiz edilmiştir. Bir geçiş anahtarı sayesinde düşüren ve yükselten dönüştürücü olarak çalışabilen modifiyeli yüksek kazançlı dönüştürücü sayesinde değişken koşullarda da uyum sağlamıştır. Geliştirilen dönüştürücü en yoğun güneş ışığı sırasında gerilimi verimli bir şekilde düzenleyerek enerji israfından kaçınmayı sağlamaktadır. Düşük güneş ışığı sırasında da iyi performans sergilediği çalışma sonunda değerlendirilmiştir (Tellapati vd., 2024). Yürütülen bu tez çalışmasında ise süper-lift Luo dönüştürücü kullanılarak FV sistemlerde verimliliğin artırılması sağlanarak yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılabilecek alternatif bir yükselten dönüştürücü analizi gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında sistemde MPPT kontrolü Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control - FLC) ile desteklenerek yenilikçi bir sistem tasarımı sunulmaktadır.

Klasik yükselten dönüştürücü ile süper-lift Luo dönüştürücüsünün bir FV sistem için karşılaştırmasının yapıldığı çalışmada süper-lift Luo dönüştürücüsünün verimliliği artırdığı değerlendirilmiştir. Çalışmada dönüştürücü klasik Değiştir-Gözle Algoritması (Perturb and Observe - P&O) ile kontrol edilerek MPPT gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda farklı ışıyım ve sıcaklık koşullarında alınan veriler doğrultusunda sistem performansının süper-lift Luo ile artırıldığı belirlenmiştir. Süper-lift Luo sayesinde klasik yükselten dönüştürücüye kıyasla sistemde akım dalgalanması azaltılmış ve verimlilik artırılmıştır (Dheeban vd., 2021). Yalnızca GES'lerde farklı yenilenebilir enerji sistemlerinde de süper-lift Luo kullanılabilmektedir. Örneğin hidroelektrik sistemler (HES) üzerine yapılan bir çalışmada klasik yükselten dönüştürücü ve süper-lift Luo dönüştürücü karşılaştırılmıştır. Tasarlanan HES için klasik yükselten dönüştürücü verimi %75 olarak elde edilirken süper-lift Luo ile %98 verim elde edilmiştir. Çalışmada verim artışının yanında yükselme ve yerleşme sürelerinin de süper-lift Luo sayesinde azaldığı değerlendirilmiştir (Chamundeeswari & Niraimathi, 2025). Hibrit sistemlerde de süper-lift Luo dönüştürücü kullanılabilir. Güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin birleştirilerek oluşturulduğu bir hibrit enerji sisteminde yapılan bir çalışmada PI kontrolör kullanılmıştır. Süper-lift Luo dönüştürücünün bu hibrit sistem için değerlendirildiği çalışmada dönüştürücü sayesinde %96 verim elde edilmiştir. Ayrıca

çalışma sonucunda süper-lift Luo dönüştürücünün hibrit sistemde maliyet etkin ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğu değerlendirilmiştir (Ganga Bhavani vd., 2025). Güneş ve rüzgar enerji sistemleri kullanılan bir diğer hibrit enerji sistemi çalışmasında da P&O algoritması kullanılarak süper-lift Luo dönüştürücüsü incelenmiştir. Çalışmada özellikle hibrit enerji sistemleri için süper-lift Luo kullanılmasının daha etkin olduğu vurgulanmıştır (Karthikeyan vd., 2024). Yine hibrit rüzgar ve FV sistem için farklı dönüştürücü topolojilerinin incelendiği bir çalışmada da P&O algoritması kullanılmıştır. Çalışmada algoritmanın kontrol etmesi için negatif çıkışlı bir süper-lift Luo topolojisi önerilmiştir. Çok girişli tek çıkışlı bir yapıya sahip olan bu dönüştürücü 500 W'lık rüzgar türbini ve 560 W'lık FV panelden oluşan hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminde kullanılmıştır. Oransal-İntegral (PI) tabanlı MPPT kontrol algoritması ile P&O karşılaştırmasının da yapıldığı bu çalışmada P&O'nun daha iyi performans gösterdiği ve 240 V'luk sabit DA çıkış gerilimini koruduğu belirlenmiştir (K. Kumar vd., 2018). Süper-lift Luo dönüştürücünün sistemde sağladığı avantajlar göz önüne alınarak bu tez kapsamında da FV sistemde süper-lift Luo dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücünün kontrolü de yine sistem performansını artıracak değerlendirilen FLC ile gerçekleştirilecektir. Bu sayede klasik FV sistemlerden farklı olarak dönüştürücü ve kontrolcüde değişikliğe gidilerek daha verimli bir FV sistem oluşturulması hedeflenmektedir.

Enlargette Luo dönüştürücü modelini kullanan bir çalışmada Gri kurt optimizasyonu (GWO) tabanlı MPPT algoritması ile kontrol sağlanmıştır. GWO, sistem bilgisine bağlı olmayan en uyarlanabilir yöntem olması sebebiyle tercih edilmiştir. Sistem girişi birden çok FV panel ve rüzgâr türbini olarak seçilerek hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi kurulmuştur. Çalışmada FV sistemden elde edilen akımın kısıtlı olduğu vurgulanmaktadır. Ve bu kısıtlanmanın Luo dönüştürücü ile aşılabileceği de değerlendirilmiştir. Ayrıca Luo dönüştürücünün gerilimi verimli bir şekilde yükselterek dalgalanmaların da önüne geçtiği belirlenmiştir (Chitra & Kumari K.S., 2023). Bahsi geçen bu çalışmada kullanılan enlargette Luo dönüştürücü modeli, süper-lift Luo dönüştürücü modelinden daha az kazanç sağlayan bir topolojiye sahiptir. Bu nedenle yürütülen tez çalışmasında süper-lift Luo modeli tercih edilmiştir.

Çift girişli tek çıkışlı bir süper-lift Luo dönüştürücü ile FV sistemin kurulduğu bir çalışmada da ikinci giriş için batarya kullanılmıştır. Çalışmada güneş ışınım

değerinin değiştirilmesiyle testlerin gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda sistemin değişken ışınlam altında hem bataryadan hem de FV panelden güç sağlayarak dönüştürücünün sabit DA gerilimini koruduğu belirlenmiştir (Agarwal vd., 2019). FV sistemlerde enerji verimliliğinin Luo dönüştürücü ile sağlanabileceğini savunan bir diğer çalışmada da süper-lift Luo dönüştürücü P&O tabanlı MPPT algoritmasıyla kontrol edilmiştir. FV panelden beslenen süper-lift Luo dönüştürücünün çıkışına bir direnç, seri bağlı direnç-bobin yükü ve bir motor bağlanarak sistemin farklı yüklerdeki performansı da test edilmiştir. Çalışmada akım dalga formunun yüksek kararlılık gösterdiği belirlenmiştir. Akım çıkışının FV panele verilen ışınlam ve sıcaklık değerlerine bağlı olduğu da vurgulanmıştır (Prem vd., 2023). FV panellerin kaynak olarak kullanıldığı bir diğer çalışmada da Kayan kip kontrol (Sliding Mode Control - SMC) ile kontrol edilen süper-lift Luo dönüştürücü ile yüksek verim elde edilmiştir. Bu nedenle çalışma sonucunda süper-lift Luo dönüştürücülerin FV panellerde kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır (Fallahzadeh vd., 2021). Yapay sinir ağı (YSA) ile kontrol edilen pozitif çıkışlı süper-lift Luo dönüştürücünün FV sistemlerde kullanılmasını inceleyen bir çalışmada YSA ile MPPT süreci optimize edilmiştir. Çalışmada dinamik öğrenme oranına sahip YSA kontrolörünün çevresel değişikliklere uyum sağladığı ve statik öğrenme oranı yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği değerlendirilmiştir. Çalışmada eğitim için 201 veri örneği kullanılmıştır. Çalışma sonucunda dinamik öğrenme oranının değişen koşullar altında daha kararlı gerilim ve güç çıkışları sağladığı belirlenmiştir. Bu sayede enerji dönüşüm verimliliğinde iyileşmeler olduğunu vurgulanmıştır. Statik öğrenme oranıyla %91,8293 verim elde edilirken dinamik öğrenme oranı sayesinde %91,8834 verimlilik elde edilmiştir (Mohammad & Musa, 2024). Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda ise süper-lift Luo dönüştürücü ile birlikte MPPT algoritması FLC ile desteklenecektir. Bu sayede elde edilen verimlilik artışının daha yüksek olacağı değerlendirilmektedir.

Süper-lift Luo dönüştürücünün farklı dönüştürücü tipleriyle kaskad bir yapı oluşturularak kullanılması da mümkündür. Bu kapsamda Cuk dönüştürücü ile birleştirilen pozitif çıkışlı süper-lift Luo dönüştürücünün önerildiği bir çalışmada daha az sayıda bileşenle daha yüksek bir gerilim kazancı seviyesine ulaşılmıştır. Hem benzetim hem de deneysel çalışmaların sonucunda önerilen dönüştürücü yapısının giriş-çıkış terminallerinin ortak toprak noktası ve yüksek gerilim kazancının yanı sıra

yüksek verimlilik gibi avantajlarıyla yenilenebilir uygulamalarda ve yüksek yoğunluklu deşarj lambalarında kullanımının uygun olacağı değerlendirilmiştir (Mahdizadeh vd., 2022). Flyback topolojisi ve birleştirilmiş bobin konseptinin süper-lift Luo dönüştürücüye entegre edilerek yeni bir dönüştürücü tasarlanan çalışmada da 110 W prototip üretimi de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tasarlanmış olan ve üç çıkışlı tek anahtarlı bir yükseltici devre yapısına sahip bu yeni dönüştürücünün dinamik tepki ve kayıpları incelenmiştir. Kuplajlı bobin temelli dönüştürücülerde kaçak endüktans enerjisinin sisteme geri kazandırılmasıyla birlikte anahtarlama elemanları üzerinde aşırı gerilim zorlaması meydana gelmemektedir. Bu sayede daha verimli bir yapıya sahip olan bu dönüştürücü ile tam yükte %92,5 civarında verimlilik sağlanmıştır (Ghasemi vd., 2022). Süper-lift Luo dönüştürücünün düşüren dönüştürücü ile birleştirildiği bir çalışmada ise elektromanyetik bileşenler olmadan çift çıkış üretilmiş ve bu sayede çıkış gerilimlerindeki dalgalanma oranı düşürülmüştür. Eşzamanlı yükseltme ve düşürme çıkışlarının sağlandığı bu yapı ile geniş bir gerilim aralığı, gelişmiş gerilim kazancı ve elektromanyetik cihazlar kullanmadan düşük iletim kayıpları elde edilmiştir (Faridpak vd., 2021). Süper-lift Luo dönüştürücü, yüksek gerilim kazancı ve katmanlı yapısı sayesinde çeşitli dönüştürücü tipleriyle birleştirilmeye uygun, esnek yapıda bir dönüştürücüdür. Ancak bu kaskad yapılarda kontrol algoritmasının dinamik tepkileri doğrudan etkilenebilmektedir. Bu tez kapsamında da bulanık mantık kontrol kullanılmış ve bu kontrolcünün yükselten ve süper-lift Luo dönüştürücüleri üzerindeki etkileri incelenmesi hedeflendiğinden süper-lift Luo dönüştürücü yapısı sade bir şekilde ele alınmıştır.

Süper-lift Luo topolojisi, özellikle düşük giriş gerilimlerine sahip yenilenebilir enerji sistemleri için sunduğu avantajlarla dikkat çekmektedir. Literatürde yaygın olarak yükselten, Cuk ve SEPIC gibi temel yapılar tercih edilse de bu dönüştürücüler yüksek gerilim kazancı elde etmek için genellikle ek devre elemanları, kademeli yapılar veya kuplajlı elemanlar gibi modifikasyonlara ihtiyaç duymaktadır. Süper-lift Luo dönüştürücü ise yüksek gerilim kazancı sağlama kapasitesinin yanı sıra, daha az anahtarlama elemanı ile çalışabilme özelliği sayesinde sistem karmaşıklığını azaltmaktadır. Gerilimi aşamalı olarak artıran süper-lift tekniğini kullan bu dönüştürücü çıkışta yüksek ve kararlı bir DA gerilim elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, süper-lift

Luo dönüştürücünün daha az bileşenle yüksek performans sunması, maliyet etkinliğini de artırmaktadır. Aynı zamanda güvenilir bir yapı da sunan süper-lift Luo dönüştürücü bu yönleriyle günümüz enerji dönüşüm sistemlerinde aranan performans ve verimlilik standartlarını karşılamakta önemli bir çözüm sunmaktadır. Tüm bu avantajlar nedeniyle çalışmada tercih edilen süper-lift Luo dönüştürücünün FV sistemlerle entegrasyonu literatürde nadiren ele alınmıştır. Çalışmada bu dönüştürücü sayesinde sistemde performans iyileştirmesi sağlanmış ve dönüştürücünün FV tabanlı enerji sistemlerine uygulanabilirliği başarılı bir şekilde ortaya konmuştur.

Dünya genlinde de ülkemizde de oldukça öneme sahip olan GES'lerinin geliştirilmesi için özellikle sistemde kullanılan kontrol yöntemlerinin geliştirilmesiyle performans artırılmasına yönelik çalışmalar da sürdürülmüştür.

36 adet seri bağlı hücreden oluşan 60 W'lık bir panelin kullanıldığı çalışmada bulanık mantık-MPPT yönteminin daha iyi sonuç vereceği öngörülmüştür. Çalışmada bulanık mantık temelli MPPT algoritmasının geçici durumu iyileştirdiği ve statik durumda dalgalanmaları azalttığı belirlenmiştir. MPPT stratejisi ele alındığında çalışma sonucunda elde edilen hız, tork ve gerilim eğrilerinden tasarlanan Bulanık mantık-MPPT yöntemi ile düşük gerilim ve güç dalgalanma oranıyla maksimum noktayı daha iyi bir şekilde takip edebildiği sonucuna varılmıştır (Zerimeche vd., 2020). Değişken ışıınım ve sıcaklık koşullarında testlerin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada Bulanık mantık kontrol algoritmasının klasik yükselten dönüştürücüyü kontrol etmesi sağlanmıştır. FLC, hızlı ve doğru maksimum güç noktası takibi sağlamıştır. Aynı zamanda yüksek verimliliğe sahiptir. Çalışmada sistem kararlı durum ve dinamik testlerde iyi performans sergilediği belirlenmiştir (Mohd Yunus vd., 2022). Hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminde enerji dağıtımını optimize etmek için de FLC kullanılmıştır. Sistemin benzetim çalışması yapılmış ve önerilen FLC sayesinde yakıt tüketiminde %30 azalma ve sistem verimliliğinde %15 artış sağlanmıştır (Koca, 2025). Rüzgar türbini, enerji depolama sistemi ve FV panel içeren hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminde FLC kullanımı incelen bir çalışmada da FLC algoritması PI kontrol ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada FLC'nin değişken çevresel koşullar altında güç kontrolünde %14,5'e varan iyileşme ile birlikte PI kontrolüne kıyasla iletişim hatalarına karşı %15,5 daha iyi dayanıklılık sağladığı tespit edilmiştir (Alankrita vd., 2025). Yürütülen bu tez çalışmasında da FLC ile güneş enerji sistemlerinde

performans artırımı hedeflenmektedir. Çeşitli kontrolcülerle oluşturulan sistemler arasında karşılaştırma yaparak FLC'nin üstün olduğunu belirleyen çalışmalar da bu hedefimizin gerçekleştirilebilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Artımlı iletkenlik algoritması (Incremental Conductance Algorithm - InC) ve FLC arasında karşılaştırma yapan bir çalışmada kontrolcüler düşük FV güç dönüşüm sistemine uygulanmıştır. Değişken ışınlam ve sabit sıcaklık değerleri altında bu iki kontrolcünün karşılaştırıldığı çalışmada FLC'nin FV gücü kolayca dönüştürdüğü, dalgalanmaları azalttığı ve güneş ışınlamının değişimine hızlı yanıt verdiği belirlenmiştir (Giurgi vd., 2022). InC ve FLC algoritmalarının ticari bir FV sistemi için karşılaştırılmasının yapıldığı bir çalışmada da FLC sabit durum osilasyonu, yanıt süresi ve aşım yönünden daha üstün performans göstermiştir (Derbeli vd., 2023). InC ile FLC'nin karşılaştırıldığı bir diğer çalışmada da FLC'nin daha üstün olduğu vurgulanmıştır. FLC ile InC'ye göre sistem maksimum güç noktasına daha hızlı yerleşmiş, o noktada daha az dalgalanma sağlamıştır. Ayrıca elde edilen verim yönünden de karşılaştırma yapıldığında FLC ile daha yüksek verim elde edildiği belirlenmiştir (Lüy vd., 2024). Bir başka InC ev FLC karşılaştırmasını içeren çalışmada FLC gerilim dalgalanmasını daha etkili bir şekilde azaltmıştır. Ayrıca hava koşullarının hızlı değişimine de verimli ve hızlı tepki vermiştir. Çalışmadan alınan sonuçlar neticesinde sistemin daha kararlı ve verimli çalışması için FLC'nin kullanılması önerilmiştir (Çakmak vd., 2025). Yine FLC ve InC'nin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmada sistemin düzenli ve düzensiz durumları ele alınmıştır. Her iki durumda da FLC'nin InC'ye göre daha hızlı tepki verdiği belirlenmiştir (Shukla & Mohaney, 2022). P&O Algoritması, FLC ve InC kullanılarak yapılan farklı çalışmalarda da yerleşim süresi, güç kaybı ve salınımlar açısından FLC'nin daha üstün olduğu belirlenmiştir. İzleme doğruluğu P&O ve InC'ye göre daha iyi olan FLC sayesinde sistemde daha düşük salınımlar ve hızlı değişen çevre koşullarında da sistem performansının arttığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle FLC'nin P&O ve InC'ye göre FV sistemlerde MPPT kontrolü için daha verimli, güvenilir ve duyarlı olduğu vurgulanmıştır (Chandini vd., 2022). P&O, InC ve FLC algoritmalarının karşılaştırılmasının yapıldığı bir diğer çalışmada da FLC daha üstün performans sergilemiştir. Çalışmada değişken ışınlam ve suni kesintiler altında sistemler test edilmiştir. Gerilimde yaşanan ani yükselmeler ve geçici arıza

durumlarında FLC kararlı bir çıkış gücü sağlayarak InC ve P&O algoritmalarından üstün olduğunu kanıtlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen gücün, değişken ışınım koşulları altında dahi, FLC algoritmasıyla artırıldığı belirlenmiştir (Larabi, 2023). FLC'nin Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrol tabanlı P&O ve yine PID tabanlı InC algoritmalarıyla karşılaştırıldığı bir çalışmada da InC yönteminin dezavantajlarına vurgu yapılmıştır. Bu dezavantajlar, sistem çıkışında oluşan salınının fazla olması ve çevresel koşulların hızlı değişmesine karşılık yanıt süresinin yavaş olmasıdır. PID tabanlı P&O algoritmasında ise uygulama kolaylığı olmasının yanı sıra maksimum güç noktası etrafında salınımların olduğu ve değişken koşullarda verimli olmadığı belirlenmiştir. Ancak FLC sayesinde daha kısa bir tepki süresi ve sabit çıkış gücü elde edilmiştir. Bunun yanında değişken koşullarda dahi düşük salınım sağladığı belirlenmiştir. Bu sebeple de FLC ile yüksek verimlilik elde edilmiştir. Çalışma sonucunda FLC'nin FV sistemler için daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir (S. Z. Hassan vd., 2018). P&O, FLC ve günümüzdeki ileri tekniklerden YSA tabanlı denetleyicinin karşılaştırıldığı bir çalışmada da yine FLC ile optimum güç çıkışı elde edilmiştir (Arunagirinathan & Subramanian, 2023). FV sistemlerde MPPT'nin hızlı ve doğru yapılabilmesi için FLC ile SMC algoritmasının karşılaştırıldığı bir çalışmada da Power Simulation (PSIM) programı ile benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hızlı değişen koşullar altında sağlam, hızlı ve verimli yanıt için FLC algoritmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir (Özbay, 2020). Sharjah, BAE'de 2,88 kW'lık bir şebekeye bağlı FV sistemin performans tahmini için algoritmanın geliştirildiği bir çalışmada farklı makine öğrenimi modelleri de karşılaştırılmıştır. Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı, Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Rastgele Orman dahil olmak üzere diğer yerleşik makine öğrenimi modellerinin de incelendiği bu çalışmada Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS) ile yüksek tahmin doğruluğu elde edilmiştir. Çalışmada ANFIS modelinin çevresel faktörler ve FV çıkışı arasındaki doğrusal olmayan bağımlılıkları yakalamadaki sağlamlığını vurgulanmıştır. Bu da ANFIS'in FV sistem performans yönetiminde etkinliğini göstermektedir (Salameh vd., 2025). Farklı kontrolcülerle karşılaştırılan FLC algoritmasının üstünlükleri yapılan bu çalışmalarla anlaşılmış olup bu nedenle bu tez kapsamında da FV sistemlerin performansının iyileştirmesi için FLC kullanılacaktır. Bu kontrol yapısının gerekliliği

olan kural yapısı da ANFIS kullanılarak belirlenecektir. Bu sayede optimum FLC parametre ayarları kullanılarak FV sistemin daha verimli çalışması sağlanacaktır.

Klasik P&O ile bulanık mantık tabanlı MPPT yöntemlerinin benzetim çalışması ile karşılaştırmasını içeren bir çalışmada bulanık mantık temelli MPPT yönteminin hızlı ve daha kararlı olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda FLC temelli MPPT algoritmasının ışıınım değerlerindeki ani değişimler sırasında da daha iyi performans sergilediği çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde ispatlanmıştır. MPPT'nin yanıt süresi P&O ile 65 ms iken FLC ile 3,5 ms olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle maksimum nokta takibini yavaşlattığı için P&O ile oluşturulan klasik MPPT yönteminin salınımına neden olarak sistem kararlılığını etkilediği vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda FLC sayesinde hızlı yanıt sağlanarak sistem kararlılığının da iyileştirileceği belirlenmiştir (Essakhi vd., 2021). FLC ile P&O algoritmasının bağımsız bir FV sistem üzerinde karşılaştırmasının yapıldığı çalışmada da FLC'nin üstün olduğu belirlenmiştir. Sistemde FLC sayesinde P&O 'ya göre daha düşük salınım ve daha hızlı tepki süresi elde edilmiştir. Çalışmada FLC'nin kesin sistem bilgisi gerektirmediği için tasarım kolaylığı sağlaması özelliğinin yanında optimum performans için FLC parametrelerinin ayarlanmasının karmaşık olduğu da vurgulanmıştır (Hadjaissa vd., 2022). Yine klasik P&O ile FLC arasında karşılaştırmaların yapıldığı bir çalışmada FLC-MPPT algoritmasının daha üstün performans sergilediği değerlendirilmiştir. FLC-MPPT algoritması klasik P&O'ya göre maksimum güç noktasında daha az salınım gerçekleştirmiştir. Ayrıca değişken hava koşullarına karşı sistem toleransını artırarak daha az enerji kaybına yol açtığı belirlenmiştir (Mustafa, 2023). P&O ve FLC'nin karşılaştırıldığı bir diğer çalışmada da FLC'nin P&O'ya göre daha güvenilir olduğu vurgulanmıştır. Değişken ışıınım ve sıcaklık koşullarında da karşılaştırma yapıldığında FLC'nin daha verimli olduğu değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda FLC'nin yaklaşık %98 izleme verimliliğine ulaştığı belirlenmiştir (Salım, 2021). Klasik P&O'nun yanında parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile de FLC karşılaştırması yapılan bir çalışmada da hem sıcaklık hem de ışıınım değerleri değiştirilerek sistemler test edilmiştir. PSO ve FLC algoritmaları P&O'dan daha üstün performans sergilemiştir. FLC ile %97,38 verim değeri elde edilen bu çalışmada en yüksek verim değerini %97,68 ile PSO sağlamaktadır (Teke vd., 2023). PSO ve FLC algoritmaları ile yüksek verimlilik elde

edilebileceği çalışmalarda tespit edilmiştir. Bunun yanında PSO'nun FLC'ye göre daha karmaşık yapıda olduğu da bilinmektedir. PSO algoritmasının yüksek hesaplama karmaşıklığına karşın, FLC'nin esnekliği ve düşük yapısal karmaşıklığı dikkate alındığında; bu tez çalışmasında, hem uygulanabilirlik hem de performans açısından avantaj sağlayan FLC algoritması tercih edilmiştir. İncelenen çalışmalarda yapılan karşılaştırmalar ve sonucunda önerilen sistemin avantajları Tablo 1'de gösterilmiştir. Önerilen FLC algoritması incelenen çalışmalarda da sistemde sağladığı birçok farklı avantajı sayesinde öne çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da GES'lerinde gereken MPPT algoritmasının FLC algoritması ile desteklenerek verim artışının sağlanması hedeflenmektedir.

**Tablo 1.** Farklı çalışmalarda karşılaştırılan kontrolcüler ve FLC'nin avantajları

| Çalışmanın Yazarları (Yılı)          | Karşılaştırılan Kontrolcüler | Önerilen FLC kontrolcünün avantajları                                                                                                                           |
|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lüy, vd. (2024)                      | InC, FLC                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hızlı yerleşme</li> <li>• Daha az dalgalanma</li> <li>• Yüksek verim</li> <li>• Kısa yerleşme süresi</li> </ul>        |
| Chandini, vd. (2022)                 | P&O, FLC, InC                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha az güç kaybı ve salınım</li> <li>• Yüksek izleme doğruluğu</li> <li>• Daha verimli ve güvenilir olması</li> </ul> |
| Larabı (2023)                        | P&O, FLC, InC                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ani yükselme ve arıza durumlarında kararlı çıkış sağlaması</li> <li>• Verimde artış</li> </ul>                         |
| Arunagirinathan & Subramanian (2023) | P&O, FLC, YSA                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimum güç çıkışı sağlaması</li> </ul>                                                                                |
| Özbay (2020)                         | SMC, FLC                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Değişken çevre koşullarında hızlı ve verimli yanıt sağlaması</li> <li>• Daha az salınım ve enerji kaybı</li> </ul>     |
| Mustafa (2023)                       | P&O, FLC                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Değişken çevre koşullarında sistem toleransının yüksek olması</li> </ul>                                               |

Bu tez kapsamında da önceki çalışmalarda yapılan karşılaştırmalar sonucunda en etkili ve üstün performans sergilediği değerlendirilen FLC kullanılacaktır. Bu sayede güneş enerji sisteminde etkili bir kontrolcü tasarımı yapılarak sistem verimi artırılabilecektir.

FLC'nin geliştirilmesi üzerine yapılmış çalışmalar da literatürde mevcuttur. Bu kapsamda farklı üyelik fonksiyonlarının performanslarının karşılaştırıldığı bir çalışmada dönüştürücünün anahtarlama frekansı her üyelik fonksiyonu için değiştirilmiştir. Kullanılan anahtarlama frekansları 5 kHz, 10 kHz ve 20 kHz olarak ayarlanırken ışıyım değişkeni de 1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> ve 600 W/m<sup>2</sup> olarak değiştirilmiştir. Çalışmada karşılaştırılan üyelik fonksiyonları ise Üçgen, Trapezoidal, Gauss ve GBell olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda Trapezoidal, Gaussian ve GBell'in aynı izleme hızına sahip olduğu ancak Gaussian üyelik fonksiyonunun diğer üç üyelikten daha önemli salınımlara sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma GBell ve Trapezoidal üyelik fonksiyonlarının Üçgen ve Gauss'a göre daha iyi performans gösterdiğini ve anahtarlama frekansının 20 kHz'e çıkarılmasıyla GBell üyelik fonksiyonunun Trapezoidal'e göre daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır (Sutikno vd., 2021). Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda da üçgen üyelik fonksiyonu kullanılacaktır. Güneş enerji sistemleri için de yaygın olarak kullanılan bu fonksiyon ile sistem performansının iyileştirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, FLC tabanlı MPPT kontrolcülerinin FV sistemlerde MPPT performansını artırmak için etkili bir seçenek olduğu görülmektedir. Ayrıca FLC'nin, güneş panellerinden elde edilen enerjinin maksimum verimlilikle kullanılmasına olanak sağladığı, geniş dinamik ve esnek bir kontrol stratejisi olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle yürütülen bu çalışmada da GES'ler için MPPT algoritmasının FLC ile desteklenmesi sağlanarak sistem performansının artırılması hedeflenmektedir.

FLC algoritması özellikle doğrusal olmayan, karmaşık ve modelleme zorluğuna sahip sistemlerde etkili bir kontrol yaklaşımıdır. Geleneksel modellerin aksine matematiksel bir modele ihtiyaç duymadan sistemin kontrolünü sağlayabilmesi de en önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bu kapsamda FLC'nin farklı kontrol algoritmalarına kıyasla sistem performansına etkisinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla da Tablo 2'de FLC'nin InC, P&O, YSA ve SMC gibi yaygın kullanıma sahip kontrol algoritmalarıyla karar doğruluğu, hassasiyet, verimlilik ve uyarlanabilirlik gibi performans kriterleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre FLC belirsizlik içeren durumlarda insan benzeri karar

verebilme yeteneği, yüksek karar doğruluğu ve verim oranıyla öne çıkmaktadır. Kural tabanlı yapısı sayesinde farklı koşullara kolayca adapte olabilmesi de FLC’yi esnek ve uygulanabilir bir kontrol yapısı haline getirmektedir. YSA ve SMC algoritmaları da yüksek doğruluk ve adaptasyon kabiliyetine sahip olsa da, FLC’nin daha sade ve uygulaması kolay yapısı gerçek zamanlı sistemler için öne çıkan bir kontrolcü olmasını sağlamaktadır. InC ve P&O gibi geleneksel yöntemler ise düşük hassasiyet ve sınırlı uyarlanabilirlik nedeniyle daha dezavantajlıdır.

**Tablo 2.** Kontrol algoritmalarının performans kriterlerine göre karşılaştırılması

| Kontrol Algoritması | Karar Doğruluğu                                                             | Hassasiyet | Verim                  | Uyarlanabilirlik                                                  |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| FLC                 | Yüksek. Belirsizlik altında insan benzeri kararlar verebilir.               | Yüksek     | Yüksek (~%95-%98)      | Orta-Yüksek. Yeni kurallarla esnek şekilde güncellenebilir.       |
| InC                 | Orta. Gerilim-akım değişimlerini esas alır, sınırlı analiz yeteneği vardır. | Orta       | Orta-Yüksek (~%90-%95) | Düşük. Sabit mantığa sahiptir.                                    |
| P&O                 | Düşük-Orta. Yalnızca değişim yönüne bakar, salınımlardan etkilenebilir.     | Düşük      | Orta (~%85-%90)        | Düşük. Sistem dinamiklerine doğrudan uyum sağlayamaz.             |
| YSA                 | Yüksek. Eğitim verilerine bağlı olarak yüksek doğruluk sağlar.              | Çok Yüksek | Çok Yüksek (>%98)      | Yüksek. Eğitimle yeni koşullara hızla adapte olabilir.            |
| SMC                 | Yüksek. Sistemdeki ani değişimlere hızlı tepki verir.                       | Yüksek     | Yüksek (>%95)          | Yüksek. Yapısı gereği değişken koşullara kolay uyum sağlayabilir. |

FLC algoritmasının güçlü yönlerinden biri de pratik uygulamalara olan uygunluğudur. Ancak bu avantajın anlamlı bir şekilde ortaya koyulabilmesi için FLC’nin diğer kontrol algoritmalarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, Tablo 3’te FLC yine InC, P&O, YSA ve SMC kontrol algoritmalarıyla; uygulanabilirlik, gerçek zamanlı çalışma kabiliyeti, geliştirme süreci ve toplam sistem maliyeti gibi uygulama ve geliştirme kriterlerine göre detaylı şekilde karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3.** Kontrol algoritmalarının uygulama ve geliştirme kriterlerine göre karşılaştırılması

| Kontrol Algoritması | Uygulanabilirlik                                                         | Gerçek Zamanlı Uygunluk                                                | Maliyet                                                                   | Tasarım ve Geliştirme Karmaşıklığı                           |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| FLC                 | Yüksek. Mikrodenetleyici temelli sistemlerde kolayca entegre edilebilir. | Uygun. Kurallar optimize edilirse gerçek zamanlı kontrol sağlanabilir. | Orta. Geliştirme süreci biraz zaman alır ancak donanım maliyeti düşüktür. | Orta. Kural tabanı oluşturulması uzmanlık gerektirir.        |
| InC                 | Çok Yüksek. Basit ve düşük donanım gerektirir.                           | Uygun. Basit yapısı sayesinde zaman kaybı yaşanmaz.                    | Düşük. Geliştirmesi ve donanımı oldukça ucuzdur.                          | Düşük. Standart formülasyonla kolayca uygulanabilir.         |
| P&O                 | Çok Yüksek. Yaygın ve basit bir MPPT yöntemidir.                         | Uygun. Hızlı tepki verir ancak salınımlar görülebilir.                 | Çok düşük. En az kaynak tüketen algoritmalardan dır.                      | Çok düşük. Basit bir algoritma yapısına sahiptir.            |
| YSA                 | Orta. Gelişmiş işlem gücü ve eğitim süreci gerektirir.                   | Sınırlı. Yoğun hesaplama nedeniyle gecikme olabilir.                   | Yüksek. Eğitim verisi, donanım ve yazılım açısından maliyetlidir.         | Yüksek. Ağ yapısının tasarımı ve eğitimi karmaşıktır.        |
| SMC                 | Orta. Karmaşık yapısı uygulamada uzmanlık gerektirir.                    | Uygun. Hızlı tepki süresi sunar ancak yüksek işlem gücü gerekebilir.   | Orta-yüksek. Geliştirme ve uygulama süreci maliyetlidir.                  | Yüksek. Matematiksel analiz ve doğrulama süreçleri zorludur. |

FLC'nin farklı kontrolcülerle birleştirilerek hibrit yapıda kullanılması da mümkündür. Bu bağlamda FLC'nin hibrit yapıda kullanılmasıyla tasarlanmış sistemler de mevcuttur.

Bir çalışmada geleneksel MPPT yöntemleri arasında bulunan artımlı iletkenlik açısı (AIC) yöntemi ile Aralık Tip-2 Takagi Sugeno Kang bulanık mantık kontrolcüsüne dayalı hibrit bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Çalışmada AIC yöntemi, sonlu aralığa sahip bir giriş değişkeni ile kararlı koşullarda iyi bir MPPT çalışması yürütmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda önerilen sistemin yüksek izleme performansı, hızlı ve kararlı olmasıyla birlikte değişken koşullara karşı sağlam performans gösterdiği belirlenmiştir. Aynı zamanda önerilen bu kontrolcü sistemi ile geleneksel MPPT yöntemine kıyasla güç dalgalanmalarında önemli ölçüde iyileşme sağladığı değerlendirilmiştir. Bu iyileşmeler FV sistemin kararlı bir maksimum güç

noktasına hızlı bir şekilde ulaşmasına katkı sağlamaktadır (Keçecioğlu vd., 2020). Güneş enerjisi batarya sistemleri için düşüren-yükselten dönüştürücünün FLC ile kontrolünün gerçekleştirildiği bir çalışmada PI kontrol ile de karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada FLC'nin salınım ve aşma konusunda PI kontrolcünden daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Bunun yanında çalışma sonucunda PI+FLC hibrit kontrolcü yapısıyla yerleşme süresi, salınım ve aşma açısından daha avantajlı bir çıkış elde edildiği değerlendirilmiştir (Şahin & Okumuş, 2011). Benzetim çalışmasının yanında deneysel çalışmaların da sürdürüldüğü bir çalışmada, FLC tabanlı bir P&O algoritması geliştirilerek klasik P&O algoritması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda FLC tabanlı P&O algoritmasının klasik P&O algoritmasına göre üstün özelliklere sahip olduğu değerlendirilmiştir. Deney sonucunda güneş ışıınımı ve sıcaklığındaki değişikliklere daha iyi tepki göstererek daha etkili maksimum güç izlemesi sağlayan algoritmanın FLC tabanlı P&O algoritması olduğu belirlenmiştir (Nzoundja Fapi vd., 2023). P&O yaklaşımını kullanarak bir FLC tasarımı sunan bir diğer çalışmada ise değişken çevre koşullarında geliştirilen FLC-P&O algoritmasının esnek P&O'ya göre daha az güç dalgalanmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen karşılaştırmalar sonucunda birleştirilmiş FLC-P&O yapısının esnek P&O'ya göre hem salınım hem tepki süresi hem de hesaplama doğruluğu açısından da daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır (Eshete vd., 2023). Ayrıca hibrit çalışma FLC parametrelerinin optimize edilmesi için de kullanılmaktadır. Kısmi gölgeleme koşullarında FLC'nin daha iyi performans göstermesini sağlamayı hedefleyen bir çalışmada dinamik güvenlik marjına (DSM) dayalı FLC önerilmektedir. DSM, sistem durumunun normal durumdan sapmasını ölçen bir performans indeksidir. Bu indeks sayesinde FLC kontrolör çıkışı, FV sistemin maksimum güç noktasına hızla ulaşmasını sağlayacak şekilde uyarlanmaktadır. Çalışmada sistemin anormal çalışma durumunu, gölgeleme anını veya arıza durumlarını kapsayan DSM ile FLC'nin performansı artırılmıştır (Bakkar vd., 2021). Yapay zeka temelli FLC ile P&O algoritmasının karşılaştırması yapılan bir çalışmada da optimize edilmiş FLC'nin yüksek enerji dönüşümünde daha etkili olduğu ve salınımları azalttığı belirlenmiştir. Çalışmada önerilen yapay zeka temelli FLC'nin P&O algoritmasına kıyasla daha verimli olduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanında güneş ışıınımı veya sıcaklığın hızla değiştiği durumlarda, salınımları azaltarak iyileştirilmiş izleme performansı sağladığı belirlenmiştir (M. S. Hassan vd.,

2023). Genetik Algoritma (GA) ile FLC'nin optimizasyonunun yapıldığı bir çalışmada da farklı ışıınım değerleri için maksimum güç noktası takibi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı ışıınım ve sıcaklık değerleri için sistem test edilmiştir. FLC sayesinde sistemin, test edilen noktalarda kararlı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir (Can & Özgüven, 2021). Yalnızca güneş enerji sistemlerinde değil birçok uygulamada da FLC kontrol kullanılabilmektedir. Bu kapsamda yine GA ile optimize edilen FLC çok katlı binalarda sismik kaynaklı hareketin azaltılması için kullanılmıştır (Sadeghian vd., 2025). Şebekeye bağlı bir FV sistem üzerine yapılan bir çalışmada da FLC tabanlı PSO kontrolörü önerilmiştir. Hem benzetim çalışması hem de deney yoluyla performans doğrulaması yapılan bu çalışmada kısmi gölgeleme koşulları da incelenmiştir. 100,7 kW güç elde edilen sistemden kısmi gölgeleme koşullarında da optimum gücün ortalama %98,08'i tutarlı bir şekilde elde edilmiştir (Naiem-Ur-Rahman vd., 2025). Yine PSO algoritması ile FLC algoritmasının üyelik fonksiyonlarının belirlendiği bir çalışmada farklı yük koşullarında da sistem performansı incelenmiştir. Dirençli, bobinli ve lineer olmayan üç farklı yük ile sistem çalıştırılarak kontrol performansı ortalama kare hata, ortalama mutlak hata ve standart sapma kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda PSO tabanlı FLC'nin farklı yük koşulları altında yüksek kararlılık ve düşük hata ile başarılı bir kontrol sağladığı belirlenmiştir (Abdolrasol vd., 2023). PSO algoritması ile FV panelin gücünün entegrasyonuna dayalı kriteri standart koşullar altında ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $I_r=1000\text{ W/m}^2$ ) maksimize edilmiş çalışmada da FLC-MPPT kontrolü geliştirilmiştir. PSO ile optimize edilmiş FLC-MPPT modelinin optimize edilmemiş FLC-MPPT modelinden maksimum verimlilik açısından daha üstün olduğu belirlenmiştir. Çalışmada önerilen optimize edilmiş FLC-MPPT modeli ile kısa bir yerleşme süresi, Maksimum güç noktası (MPP) etrafında küçük salınımlar ve kararlı durum hatası elde edilmiştir. Ancak çalışmada optimizasyon sonucunda MPPT algoritmasının çalışma prensibine uygun olmayan bulanık kuralların da üretilebildiği değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu bağlamda geliştirilerek ortaya çıkan sorunların giderilmesinin sağlanacağı vurgulanmıştır (Bouarroudj vd., 2021). Bu tez çalışmasında hibrit kontrolcülerde oluşabilecek sorunlar değerlendirilerek hibrit kontrolcüler yerine FLC ile birlikte sistemde kullanılan dönüştürücü tipinin değiştirilmesiyle sistem performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu sayede hibrit yapılarda ortaya çıkan sorunlarla karşılaşmadan,

yapılan değişikliklerle kararlılık korunarak verim artırılacaktır. Ayrıca kontrolcü yapısının daha da karmaşık olması engellenerek daha uygulanabilir ve kısmen daha basit bir kontrolcü yapısı ile sistem oluşturulmuş olacaktır.

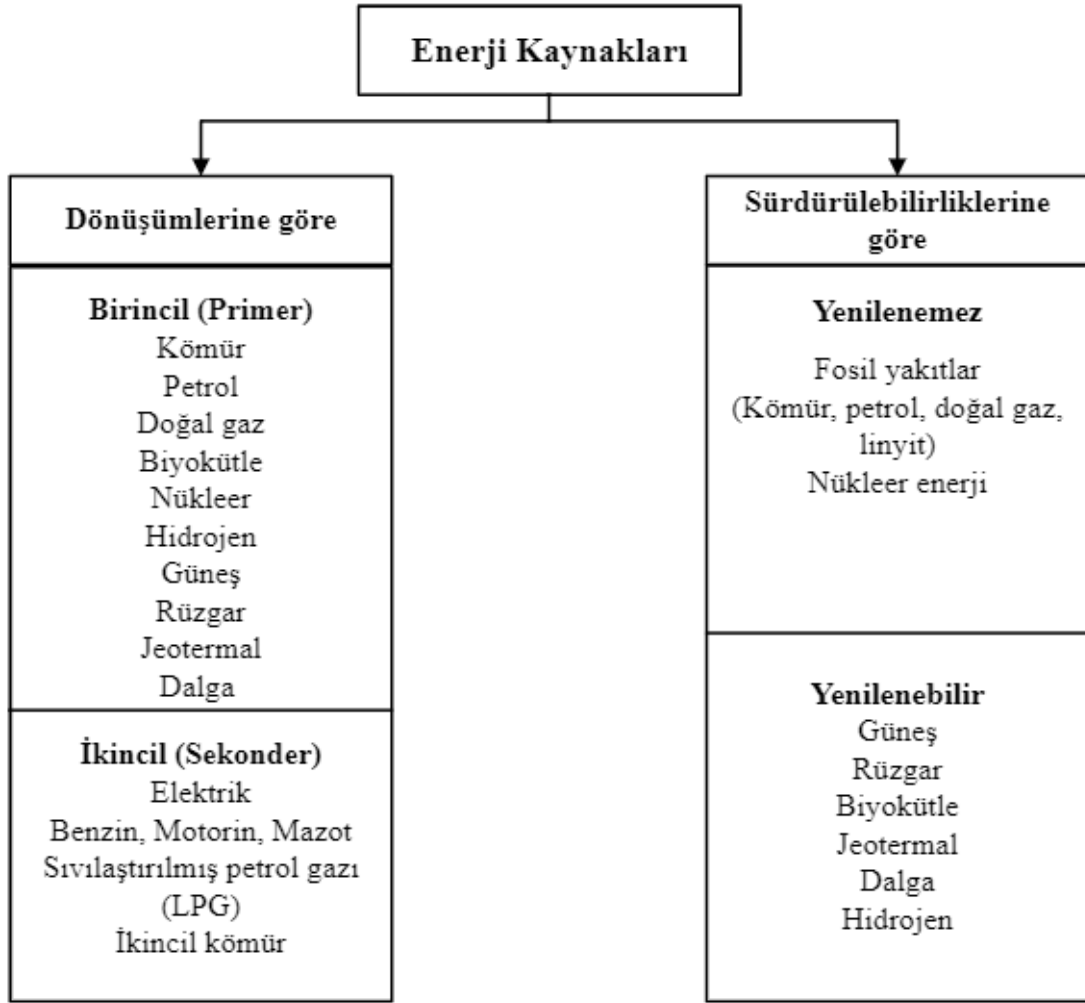
İncelenen farklı çalışmalar sonucunda güneş enerjisi sistemlerinde bulanık mantık ve süper-lift Luo dönüştürücülerin ayrı ayrı kullanılmasının sistemde avantaj sağladığı değerlendirilmektedir. Bu tez kapsamında ise güneş enerji sistemlerinde süper-lift Luo dönüştürücü ile birlikte bulanık mantık kontrolcünün kullanılmasının sistemdeki etkileri incelenecektir. Sistemde süper-lift Luo dönüştürücünün kullanılması ve MPPT'nin bulanık mantıkla desteklenmesi sayesinde daha yüksek bir performans elde edileceği öngörülmektedir. Bu eklemelerin ve değişikliklerin güneş enerji sistemlerinde yapılması neticesinde elde edilecek sonuçların kapsamlı bir karşılaştırması tez kapsamında sunulacaktır. Bu sayede de sistemin performansındaki artış incelenecektir. Analiz sürecinde, dönüştürücüler üzerinde aynı yük koşulları uygulanarak karşılaştırmalı değerlendirmelerin de yapılması hedeflenmektedir. Sistemin dinamik değişikliklere verdiği tepkilerin incelenebilmesi için de kullanılan panele uygulanan sıcaklık ve ışıınım değerleri değiştirilerek bir performans analizi yapılacaktır. Elde edilen bulgular, önerilen yapının geleneksel yöntemlere kıyasla sağladığı avantajları somut verilerle ortaya koymayı amaçlamaktadır.

## 2. ENERJİ KAYNAKLARI

Enerji, günümüzde teknolojinin de ilerlemesiyle birlikte hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bunun nedeni sokak aydınlatmalarından fabrikalara, elektrikli otomobillerden günlük ev yaşantımıza kadar hayatımızın her alanında enerjiye ihtiyaç duymamızdır (Konstantinou vd., 2018). Sonuç olarak enerjinin insan yaşamının temel bir ihtiyacı olduğu söylenebilir.

Günümüzde ülkelerin gelişmişlik seviyelerini belirleyen en önemli unsurlardan biri de enerjidir (Hangun vd., 2022). Enerjiye duyulan ihtiyaç, ülkedeki nüfus artışı ve sanayileşmenin ilerlemesi gibi ülkelerin gelişmişlik seviyeleriyle doğrudan ilişkili olan birçok unsura bağlıdır (Mombekova vd., 2024).

İhtiyaç duyulan enerjinin sağlanabilmesi için gereken enerji kaynakları dönüşümlerine ve sürdürülebilirliklerine göre iki kategoride incelenebilir. Dönüşümlerine göre enerji kaynakları birincil ve ikincil olarak ayrılırlar. Birincil ya da diğer adıyla primer enerji kaynakları doğada doğrudan bulunabilen enerji kaynaklarıdır. Bunlara kömür ve petrol örnek olarak gösterilebilir. İkincil ya da diğer adıyla sekonder enerji kaynakları ise birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilen kaynaklardır. Bu ikincil enerji kaynaklarına da elektrik, mazot ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi örnekler verilebilir. Bunun yanında enerji kaynakları sürdürülebilirliklerine göre de iki ayrı kategoride incelenmektedirler. Bunlar yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları tükenebilir olduklarından sürdürülebilir özelliğe sahip değildirler. Yenilenemez enerji kaynaklarına fosil yakıtları örnek olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise sürdürülebilir özelliğe sahiptirler. Bu nedenle güneş ve rüzgar gibi sürekli mevcut olan kaynaklar örnek olarak gösterilebilir (Taşçıoğlu & Yıldırım Keser, 2019). Şekil 1’de Enerji kaynaklarının sınıflandırması gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Enerji kaynaklarının sınıflandırılması

Elektrik üretilen enerji kaynakları ise üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar yenilenemez enerji kaynakları altına incelenen fosil ve nükleer enerji kaynakları ile yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Rashid, 2019).

### 2.1. Yenilenemez Enerji

Doğada sınırlı bir miktarda bulunan ve tükenen kaynaklar olan yenilenemez enerji kaynakları özellikle fosil kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır.

Yeryüzünde bulunan organik maddelerin, bitki ve hayvan kalıntılarının milyonlarca yıl toprak ve çamur gibi maddelerin üzerini örtmesi sonucunda baskı ve ısı altında kalmaktadırlar (Rashid, 2019). Bu nedenle de bu kalıntıların hava teması uzun süre kesilmektedir. Hava teması kesilen bu kalıntılar oksijen bakımından yetersiz kalarak çürümeye başlayarak fosil yakıt haline gelmektedir. Fiziksel koşullara göre

farklı fosilleşme göstererek petrol, kömür ve doğal gaz gibi farklı fosil yakıt türlerine dönüşebilmektedir (Kumar & Choudhary, 2021; Zohuri vd., 2022).

Enerji üretimi bu fosil yakıtların yakılması sonucunda elde edilmektedir. Bu fosil yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi gazlar sera gazı emisyonları, iklim değişiklikleri, küresel ısınma, çevre kirliliği gibi birçok olumsuz sonucu beraberinde getirmektedir (Al Mubarak vd., 2024).

Dünya genelinde oldukça fazla zarar sebep olan bu karbon emisyonları ve sera gazı etkilerinin azaltılabilmesi için hane düzeyinde enerji tüketim harcamalarının azaltılması gerekmektedir. Ancak bu pek mümkün olmadığından enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması önerilmektedir. Dünyada karbon nötr hedefine 2050'ye kadar ulaşılması planlanmaktadır. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi için de yenilenebilir enerji kaynakları önerilmektedir. Yenilenebilir enerjinin teşviki için de hem dünya genelinde hem de ülkemizde çeşitli çalışmalar yürütülmektedir (Piao & Managi, 2023).

Yenilenemez enerji kaynaklarının tükenme hızları, teknolojik gelişmeler, sebep oldukları çevresel etkiler ve yenilenebilir enerjiye geçiş gibi birçok etmen göz önünde bulundurulduğunda ortalama 100 yıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir (A. Kumar vd., 2010).

## **2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları**

Yenilenebilir enerji kaynakları sürekli kendini yenileyebildikleri ve doğada güneş ve rüzgar gibi hazır halde bulunabildikleri için sürdürülebilir enerji kaynakları olarak da adlandırılırlar (Cihan, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynakları, hem çevresel ve insan sağlığı açısından olumsuz etkileri en aza indirmesi hem de ülkelerin enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltması gibi birçok avantaja sahiptir (Özkaya, 2004). Bu sebeple kullanılması ve geliştirilmesi elzem olan enerji kaynakları olduğu söylenebilir.

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal, dalga ve hidrojen olarak sıralanabilir (Rashid, 2019). Bu kaynaklar Şekil 2'de de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Yenilenebilir enerji kaynakları

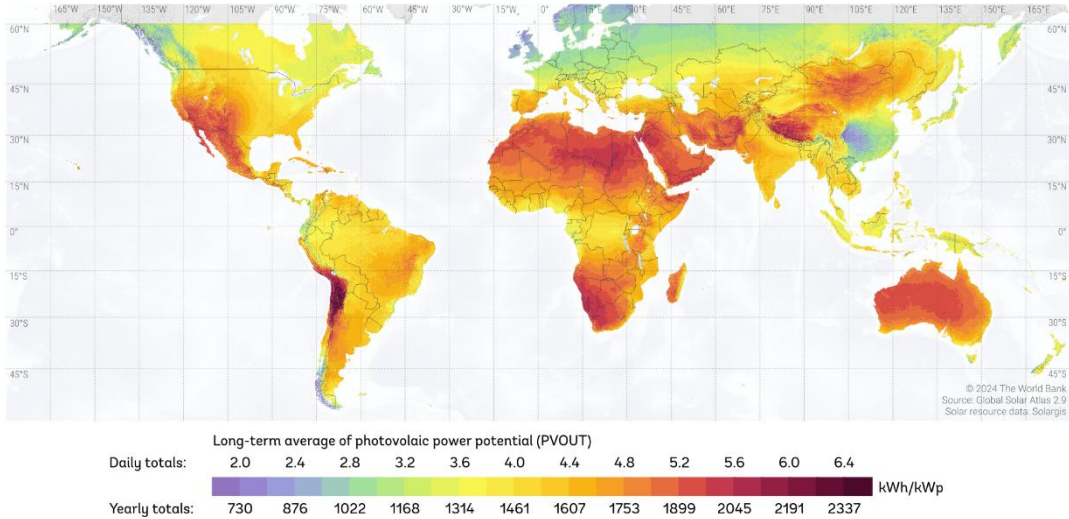
Yenilenebilir enerjinin kullanılması fosil yakıt kullanımının aksine CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> gazlarının salınımına neden olmamaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları, elektriği sıfır ya da minimum CO<sub>2</sub> emisyonu ile ürettiği için temiz enerji kaynaklarıdır (Alkan & Karadağ Albayrak, 2020; Özkaya, 2004).

Bu tez kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ele alınmaktadır.

### 3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Solar enerji olarak da adlandırılabilen güneş enerjisi, dünyada en bol bulunan yenilenebilir enerji kaynağıdır (Rashid, 2019; Salım, 2021). Güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisine güneş enerjisi adı verilir. Füzyon süreci ise hidrojen gazının helyuma dönüşmesidir (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Güneşten gelen ışıma fotovoltaik sistemler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Fotovoltaik sistemlerden üretilen bu elektrik enerjisi öncelikli olarak sistemin topladığı güneş ışığına bağlıdır. Güneş ışımasının dünya üzerindeki dağılımı da güneş ışınlarının geliş açısına ve güneşe olan mesafeyle ilişkili olarak değişmektedir. Dünyanın yıllık hareketi nedeniyle konumun güneş ile olan mesafesi ve güneş ışınlarının geliş açısının değişmesi, o konumun coğrafik özelliklerine iklimine bağlı olarak ilgilenilen konumun sahip olabileceği güneş ışımasını belirlemektedir (Emikönel, 2022). Bu nedenle ülkemizin bulunduğu coğrafik konum sayesinde güneş enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Şekil 3’de Solargis tarafından sunulan dünya çapında güneş enerji potansiyeli gösterilmiştir.



Şekil 3. Dünya çapında güneş enerji potansiyeli (Solargis, 2024)

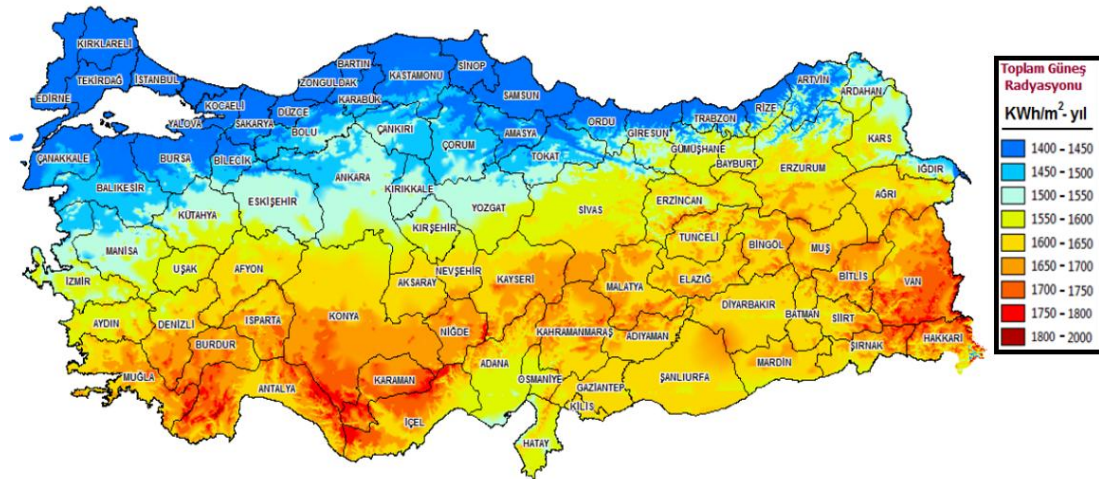
Şekil 3’de gösterilen haritada da belirtildiği üzere yüksek güneş enerji potansiyeline sahip ülkelerden biri de Türkiye’dir. Ülkemizin sahip olduğu bu yüksek

güneş enerji potansiyelinin yenilenebilir enerji alanındaki gelişmelerin artmasında önemli rol oynayacağı değerlendirilmektedir.

### 3.1. Türkiye’deki Güneş Enerji Potansiyeli

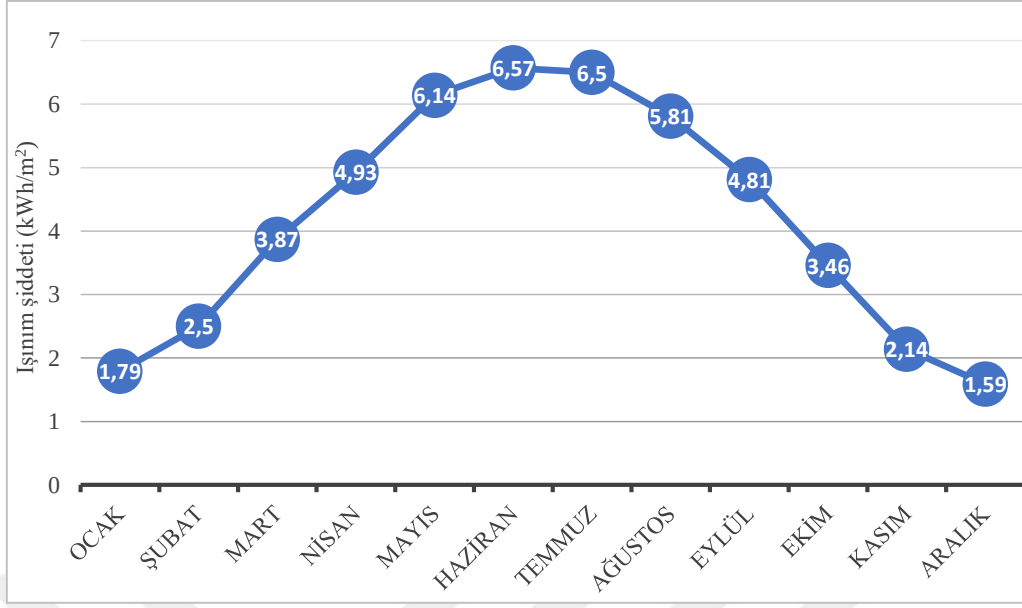
36-42 güney paralelleri ile 26-45 doğu meridyenleri arasında bulunan ülkemiz konumu itibarıyla dört mevsim dönüşümlü olarak güneş ışınlarını yoğun bir şekilde alabilen alanlara sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan GEPA raporuna göre Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saattir. Buna göre de Türkiye, günlük ortalama 7,5 saat güneş alabilmektedir. Yine GEPA’ya göre ülkemizin toplam ışıınım değeri 1.527,46 kWh/m<sup>2</sup>’dir.

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla güneş enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Ve bu özelliği sayesinde birçok ülkeye göre daha avantajlıdır (Emikönel, 2022). Türkiye’nin toplam güneş radyasyon dağılımını gösteren GEPA Şekil 4’de verilmiştir.

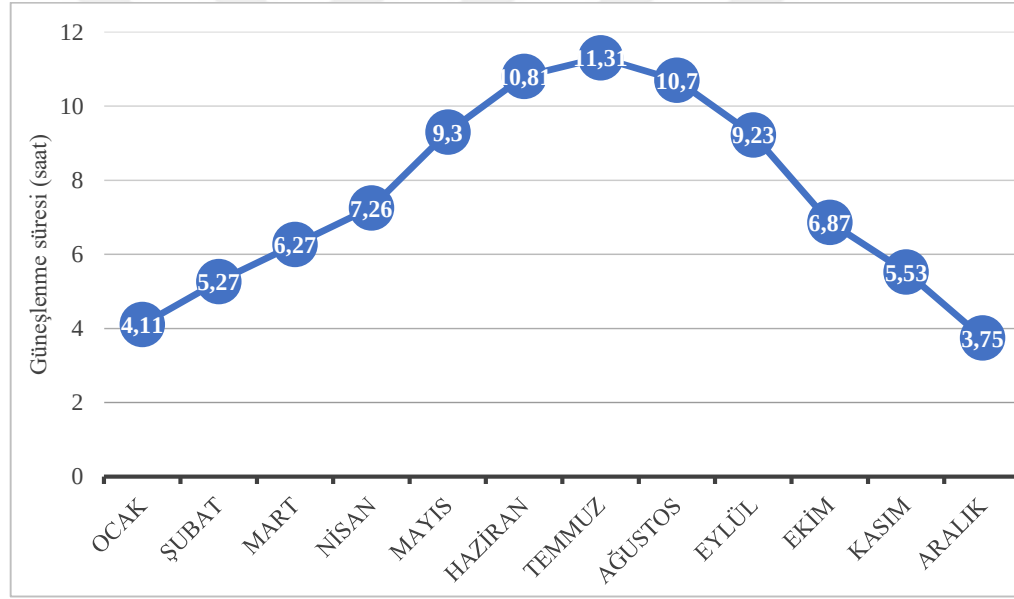


Şekil 4. Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli ve global radyasyon dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

Şekil 5’de Türkiye’nin aylık olarak kWh/m<sup>2</sup> cinsinden ortalama ışıınım şiddeti ile saat cinsinden toplam güneşlenme sürelerini gösteren grafikler gösterilmiştir. Grafiklere göre Türkiye, Haziran ayında en yüksek ışıınım şiddetine sahipken en fazla güneşlenme süresi Temmuz ayındadır.



(a)



(b)

**Şekil 5.** Türkiye'nin aylık ortalama (a) ısıtım şiddeti (b) güneşlenme süresi

Ülkemizde bulunan yedi bölgenin ısıtım değerleri ve güneşlenme süreleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Bu değerlere ve Şekil 4'de verilen haritaya göre ülkemizin Güneydoğu Anadolu, Akdeniz, Doğu Anadolu ve İç Anadolu bölgelerinin potansiyeli daha fazladır. Karadeniz bölgesinin ise coğrafi konumu nedeniyle fazla yağış alması ve ekvatora en uzak bölgemiz olması diğer bölgelere göre daha az güneş enerji potansiyeline sahip olmasına neden olmaktadır (Doğanay, 2021; Emikönel &

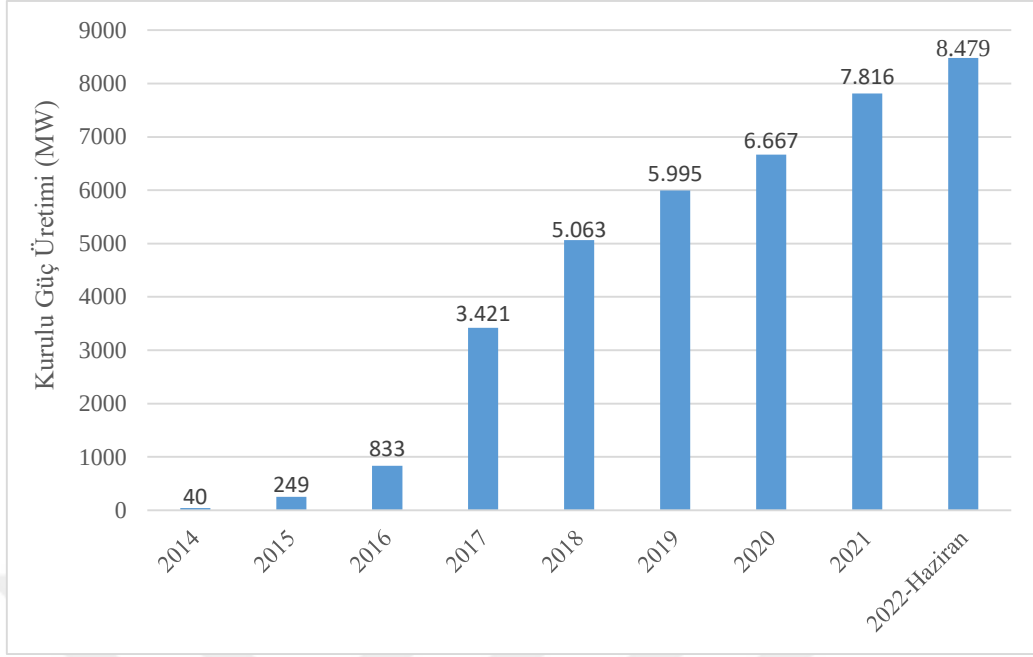
Kocalmış Bilhan, 2022). Türkiye'nin sahip olduğu bu potansiyelin kullanımı uygulanan teşvik politikaları sayesinde de yıldan yıla artış göstermektedir.

**Tablo 4.** Bölgelerin yıllık toplam ışıınım şiddeti ve güneşlenme süreleri

| Bölgeler           | Toplam Işıınım Şiddeti<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | Güneşlenme Süresi<br>(saat) |
|--------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|
| Güney Doğu Anadolu | 1460                                            | 2993                        |
| Akdeniz            | 1390                                            | 2956                        |
| Doğu Anadolu       | 1365                                            | 2664                        |
| İç Anadolu         | 1314                                            | 2628                        |
| Ege                | 1304                                            | 2738                        |
| Marmara            | 1168                                            | 2409                        |
| Karadeniz          | 1120                                            | 1971                        |

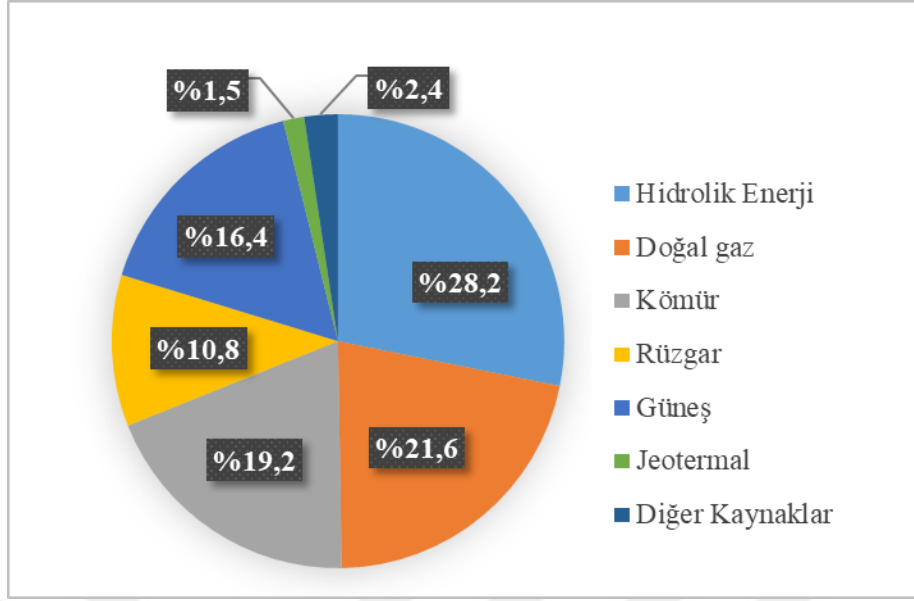
Güneş enerji santrallerinin kurulabilmesi için ışıınım şiddetinin yanında iklim koşulları, yeryüzü şekilleri ve bitki örtüsü gibi farklı çevresel faktörler de etkili olabilmektedir. Tüm bu faktörler ve Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli göz önüne alındığında Türkiye'nin yedi bölgesinde de kurulabilecek güneş enerji santrallerinin hem bölgesel enerjiye hem de ülke ekonomisine katkı sağlayacağı öngörülebilir (Emikönel & Kocalmış Bilhan, 2022).

Yüksek güneş enerji potansiyeline sahip ülkemizde 2014 yılı öncesinde kayda değer bir güneş enerjisine dayalı kurulu güç üretimi gerçekleştirilememiştir. 2016 sonrasında artışa geçen kurulu güç üretimi günümüzde verilen teşvikler sayesinde giderek hızla artmaya devam etmektedir. Ülkemizin 2014 yılı ile 2022 yılının Haziran ayı sonu arasındaki güneş enerjisine dayalı kurulu güç (MW) üretim grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Türkiye’de 2014-2022 Haziran sonu güneş enerjisi kurulu güç üretimi

2023 yılında Türkiye’nin elektrik üretiminin %6,7’si güneşten elde edilirken 2024 Eylül ayı sonu itibariyle üretilen elektriğin %16,4’ü güneş enerjisinden elde edilmiştir. Elektrik enerjisi üretim santral sayısı ise Eylül 2024 itibariyle lisanssız santraller de dâhil olmak üzere toplamda 31.590 adettir. Bu santrallerin 29.512 âdeti güneş kaynaklıdır (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bu verilere göre 2024 Eylül ayı itibariyle sahip olunan santrallerin %94’ü güneş enerjisi kaynaklıdır. 2024 yılı Eylül ayı itibariyle Türkiye’nin Kurulu gücünün kaynak dağılımı Şekil 7’de verilen pasta grafiği ile belirtilmiştir.

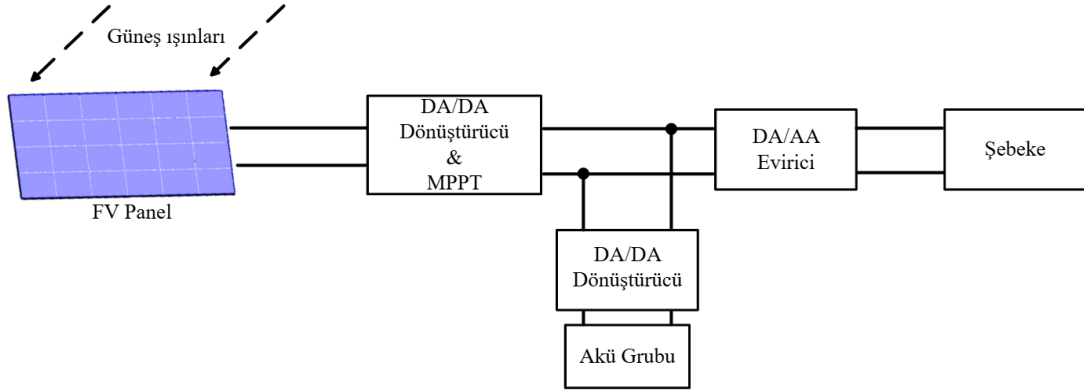


**Şekil 7.** Türkiye'nin Eylül 2024 itibarıyla kaynaklara göre kurulu güç dağılımı

### 3.2. Güneş Enerji Sistemleri

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücreleri bir ya da iki katmanlı olarak üretilmektedirler. Bu hücreler üzerine belirli bir açıyla gelen güneş ışınları hücrenin uçlarında elektrik enerjisi üretilmesini sağlamaktadır. Bu süreç ışık fotonlarının hücrelerde emilmesi sonucunda elektronların açığa çıkması ve bu elektronlar sayesinde elektrik akımı üretilmesi olarak da açıklanabilir. Işın yoğunluğuna bağlı olarak üretilen akım her ne kadar artıyor olsa da tek bir hücreden elde edilebilecek maksimum gerilim hücre yapısına da bağlı olarak yaklaşık 0,6-0,7 V arasındadır. Bu nedenle bu hücreler seri ya da paralel bağlanarak gerekli gerilim ve akım değerlerini sağlayabilmesi için güneş paneli haline getirilir. Ardından bu panellerin de seri ya da paralel bağlantıları yapılarak gerekli güç değerinin sağlanabilmesi için güneş enerji santralleri oluşturulur (Bilhan, 2024; Kabalcı, 2021).

Ev ve küçük işyerleri gibi enerji ihtiyacı nispeten daha az olan bölgeler için ya da daha fazla elektrik enerjisi üretebilen ve bu sayede şebekeyi besleyen güneş enerji sistemlerinin genel blok diyagramı Şekil 8'de gösterilmiştir. Güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü için rüzgâr gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla oluşturulan sistemlerden farklı olarak güneş enerji sistemlerinde elektrik jeneratörüne ihtiyaç duyulmamaktadır.



**Şekil 8.** Güneş enerji sistemlerinin blok diyagramı

Güneş ışınlarının güç yoğunluğu uzayda yaklaşık  $1.353 \text{ kW/m}^2$ 'dir. Ancak yerküre atmosferindeki bazı gaz ve su buharı bu enerjinin bir kısmını emmektedir. Ayrıca panele gelen güneş ışınlarının zenit (yansıtma) açısı ve ışınların bazı yansıma ve saçılmaları gibi etkiler nedeniyle güneş ışınlarının bu güç yoğunlukları yeryüzünde azalmaktadır. Diğer bir adı solar ışıınım olan yerküredeki güneş enerji yoğunluğu ( $\rho_{ir}$ ) Denklem 1'de gösterilen matematik modeli ile belirlenebilmektedir.

$$\rho_{ir} = \rho_0 \cos(\theta) (\alpha_{dt} - \beta_{wa}) \alpha_p \quad (1)$$

Burada;  $\rho_{ir}$  yerküredeki güneş enerji yoğunluğunu,  $\rho_0$  ise yerküre dışındaki (uzaydaki) güç yoğunluğunu ifade etmektedir.  $\theta$  zenit açısını,  $\alpha_{dt}$  atmosferdeki ve özellikle su buharı dışında kalan gazların doğrudan geçirgenliğini,  $\alpha_p$  Aeresol geçirgenliğini ve  $\beta_{wa}$  ise su buharının ışıınım emme katsayısını ifade etmektedir. Aeresol, atmosferdeki sülfat, amonyum, nitrat, siyah karbon ve kükürt gibi atmosferik parçacıkları tanımlamaktadır (Rashid, 2019).

### 3.2.1. Fotovoltaik

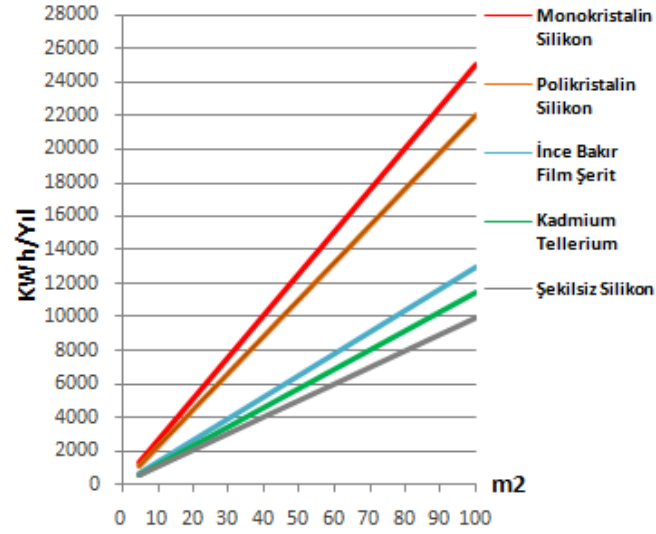
Fotovoltaik (FV) malzemeler güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmektedir. FV hücreler yarıiletkenlerden meydana getirilen bir ya da iki katmanlı yapılardır. fotovoltaik kelimesi yunanca ışık anlamına gelen "foto" kelimesinden türetilmiştir. "volt" ise elektriğin öncüsü kabul edilen Alessandro Volta ile ilişkili olarak gerilim birimidir. Fotovoltaik malzemelerin ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğü 1839'larda Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir (Rashid, 2019). Becquerel, elektrolit içerisine daldırılan elektrotlar arasında meydana gelen gerilimin elektrolit üzerine düşen ışıkla ilişkili olduğunu

gözlemlemiştir. Katı cisimler üzerinde ise 1876 yılında William Grylls Adams ve Richard Evans Day tarafından selenyum kristalleri kullanılarak fotovoltaiik olayı gözlemlenmiştir. Yaklaşık %6 verimlilik sağlayan FV hücreler ilk olarak 1954 yılında silikon kristal ile elde edilmiştir. Uzay çalışmaları için 1960'ların başından bu yana güvenilir bir kaynak olarak kullanılan FV malzemeler her ne kadar 1954'lerde de yeryüzünde kullanılmış olsa da 1970'lerde meydana gelen petrol krizi ile yaygınlaşmaya ve gelişmeye başlamıştır (Rona, 2024). Uzay çalışmalarında kullanılan silikon kristallerin verimliliğini artırma çalışmalarının yanı sıra daha az yarıiletken malzeme kullanımına olanak sağlamaya yönelik çalışmalar da sürdürülmüştür. Daha az yarıiletken malzeme ile daha az maliyetli olması öngörülen ince filmler üzerine çalışmalar giderek hız kazanmıştır (Esho vd., 2024; Ishizaki vd., 2018).

Gerçek anlamda ilk kez FV hücre 1883 yılında Amerikalı mucit Charles Fritts tarafından icat edilmiştir. Bir tarafı demir diğer tarafı yarıiletken altın plaka arasına yerleştirilmiş selenyumdan oluşan bu hücre dünyanın ilk çalışan FV hücresidir. Fritts, birkaç selenyum ünitesini New York'da bir çatı üzerine yerleştirerek ilk panel düzenlemesini de gerçekleştiren mucittir (Karayaka & Güneri, 2023; Rona, 2024).

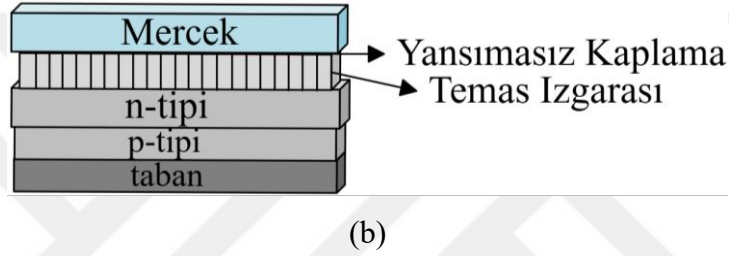
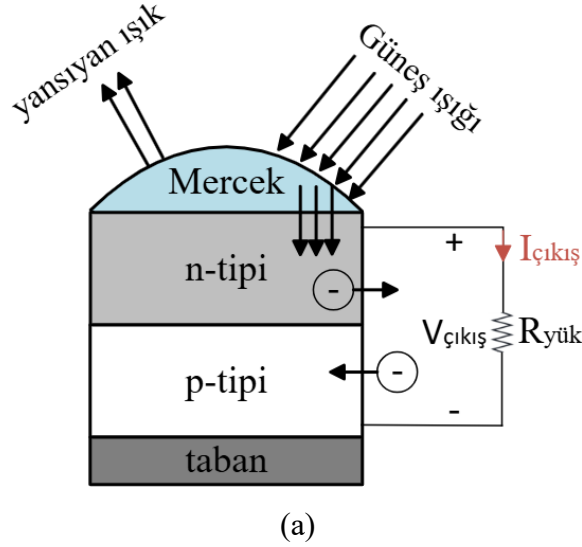
### **3.2.1.1. Fotovoltaiik Hücreler**

Fotovoltaiik sistemlerin en küçük birimi olan FV hücreler güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerden oluşmaktadır. Bu hücreler genellikle monokristal ya da polikristal silisyum malzemelerden kullanılarak üretilir. En yaygın ve yüksek verimlilik sağlayan monokristaller, polikristallere göre daha maliyetlidir. Çoklu-kristal silisyum olarak da adlandırılan polikristallerin silikon saflığı daha düşük olması nedeniyle monokristallere göre daha düşük verimliliğe sahiptirler. Bunun yanında monokristaller polikristallere göre sıcaklığa daha dayanıklıdır. Monokristallerin en yüksek verimliliği yaklaşık %24 iken polikristaller yaklaşık %18 verimlilik sağlamaktadır (Oğuz vd., 2015; Sugianto, 2020). Farklı FV tipleri de mevcuttur. Bu tiplerin panel alanlarına göre üretebilecekleri yıllık kWh değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.



**Şekil 9.** Türkiye’de FV tiplerinden alana göre üretilebilecek enerji grafiği (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2022)

Bir FV hücresi üzerine gelen ışık, hücreden yansıyabilir, hücre tarafından emilebilir ya da hücrenin içinden geçip gidebilir. Ancak sadece emilen ışık sayesinde elektrik üretilebilir. Emilen ışık enerjisi FV hücreyi oluşturan yarıiletken malzemenin atomları arasında bulunan elektronlara aktarılmaktadır. Hücrede oluşan akımın yönü n-ekleminden p-eklemine doğrudur. Elektron sayısı fazla olan n-eklemi sayesinde yarıiletken nötr olsa dahi yarıiletkende elektron fazlalığı varmış gibi görünür. İkinci eklem olan p-ekleminde ise daha az elektron bulunur. Bu sayede yarıiletken nötr de olsa elektron açığı varmış gibi görünür (Kabalcı, 2021; Rashid, 2019). Yüklenmiş bir FV hücre ve FV hücrenin bölümleri Şekil 10’da gösterilmiştir.



**Şekil 10.** FV hücrenin (a) yüklenmiş görünümü (b) bölümleri

Hücrelerin çalışma prensipleri yarıiletken diyotların çalışma prensibine benzemektedir. Yarıiletken diyottan akım geçmesi için dışardan gerilim uygulanması gerekirken FV hücreden akım geçmesi için hücreye ışık fotonlarının uygulanması gerekmektedir. FV hücreden geçen akım *Schockley Diyot Denklemi* ile tanımlanan hücre gerilimi ile ilişkilidir. Bu akım Denklem 2’de verilmiştir.

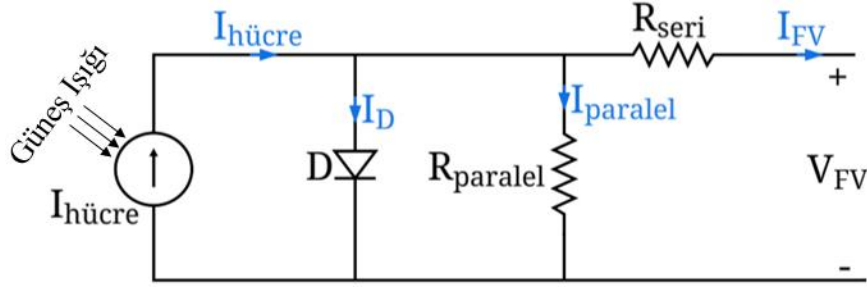
$$I_D = I_S (e^{(V_{FV} + I_{FV} R_{seri}) / \eta V_T} - 1) \quad (2)$$

Burada  $I_D$  diyottan geçen akım,  $I_S$  ters doyma akımı ve  $\eta$  ise ideallik katsayısıdır.  $I_S$  genellikle  $10^{-6}$  ile  $10^{-5}$  A arasında bir değer alırken  $\eta$  1 ile 2 arasında değer alır  $V_T$  ise termal gerilimdir ve Denklem 3 ile hesaplanabilir.

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

Burada  $k$  Boltzmann sabitidir.  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K değerindedir.  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklığı temsil ederken  $q$  ise  $1,602 \times 10^{-19}$  C değerindeki elektron yükünü ifade eder (A. M. Kumar & Karuvelam, 2023; Shaikh vd., 2023).

İdeal bir FV hücrenin tek diyot modeli Şekil 11’de gösterilmiştir.



**Şekil 11.** İdeal bir FV hücrenin tek diyot modeli

Burada devre çıkışında gösterilen  $I_{FV}$  akımı Denklem 4’de gösterildiği gibidir.

$$I_{FV} = I_{hücre} - I_S \left( e^{\frac{V_{FV} + I_{FV} R_{seri}}{\eta V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{FV} + I_{FV} R_{seri}}{R_{paralel}} \quad (4)$$

Standart sıcaklık koşulları ( $T_{ref}=25^\circ C$ ) altında üretilen  $I_{hücre}$  akımı Denklem 5’de gösterildiği gibi güneş ve referans ışıınım değerlerine bağlı olarak da hesaplanabilir.

$$I_{hücre} = \frac{G}{G_r} \left( I_{kd} + K(T - T_{ref}) \right) \quad (5)$$

Burada  $G$  güneş ve  $G_r$  referans ışıınım değerleridir.  $I_{kd}$  ise kısa devre akımını ifade eder.  $K$  değeri de kısa devre akımının sıcaklık değişimine duyarlılığını gösteren bir katsayıdır.

Diyot ters doyma akımı ise Denklem 6 ile hesaplanabilir.

$$I_S = I_{rS} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left( \frac{q E_g}{k} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) / \eta K} \quad (6)$$

Burada  $E_g$  elektron volt (eV) cinsinden bant aralığı enerjisini ifade eder.  $I_{rS}$  ise standart sıcaklık koşulundaki referans ters doyma akımını ifade eder ve Denklem 7 ile hesaplanabilir.

$$I_{rS} = \frac{I_{kd}}{e^{\left( \frac{q V_{ad}}{\eta K T_{ref}} \right) - 1}} \quad (7)$$

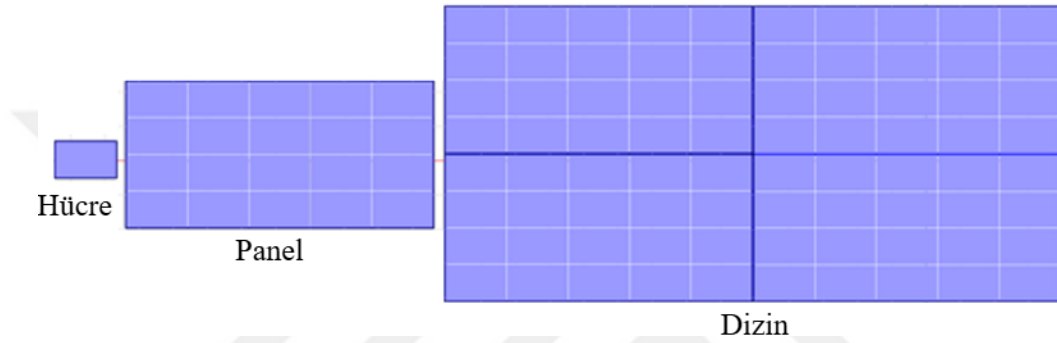
Burada  $V_{ad}$  açık devre gerilimidir (Rashid, 2019; Shaikh vd., 2023).

Hücre akımı oldukça küçük bir değerdedir ve ışık yoğunluğuna, hücre verimliliğine ve yüzey alanına bağlı olarak değişir. Buna bağlı olarak da hücrenin güç çıkışı Denklem 8’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{\text{çıkış}} = \eta_{\text{hücre}} \rho_{\text{hücre}} A \quad (8)$$

Burada  $\eta_{\text{hücre}}$  hücrenin verimliliğini,  $\rho_{\text{hücre}}$  hücrenin FV güç yoğunluğunu ve  $A$  ise hücrenin güneş alan alanını ifade etmektedir (Rashid, 2019).

Hücrelerden panel ve panellerin de seri/paralel bağlantıları yapılarak dizin meydana getirilmektedir. Bu sayede gerekli akım ve gerilim değerleri elde edilerek istenen güç çıkışı sağlanmaktadır. Şekil 12’de hücre, panel ve dizin şekli gösterilmiştir.



Şekil 12. Hücre, panel ve dizin

### 3.2.1.2. Fotovoltaik Paneller ve Diziner

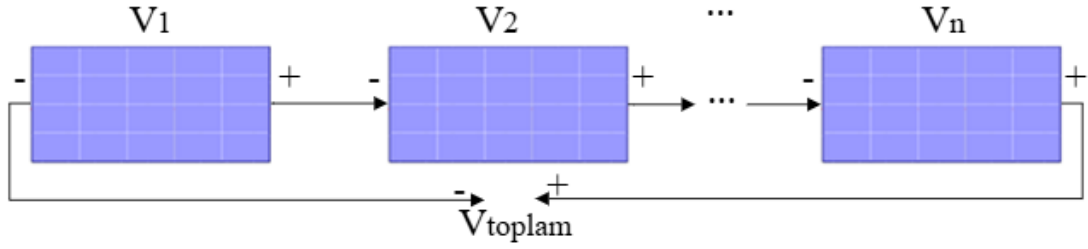
Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren FV sistemlerin yapı taşı olan hücre, panel ve dizinler enerji üretim kapasitesini belirleyen kritik unsurlardır. Bir panelin elektriksel verimliliği Denklem 9 ile hesaplanabilir.

$$\eta_e = \frac{I \times V}{G \times A} \quad (9)$$

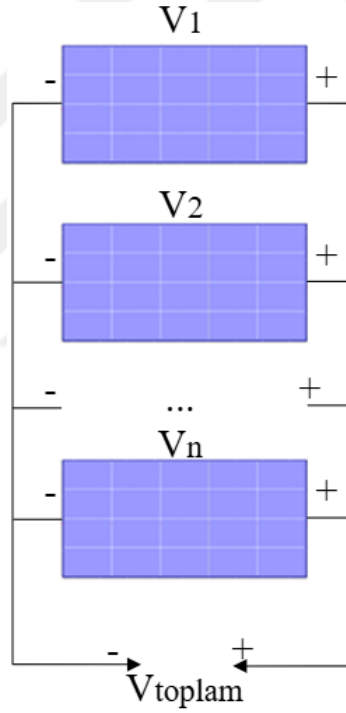
Burada  $\eta_e$  panelin elektriksel verimidir. Panel alanı  $A$  ile ifade edilmiş ve bu alana gelen güneş ışınım değeri  $G$  olup birimi  $\text{W/m}^2$ ’dir (Altınkök & Altınkök, 2024).

Elektriksel verimin artırılması için panel gücünün artırılması gerekmektedir. Bunun için de panel akım ve gerilim değerlerinin artırılması gerekmektedir. Panellerin seri/paralel bağlantıları gerekli şekilde yapılarak oluşturulan dizin sayesinde istenen güç değeri elde edilebilir. Panellerin seri bağlanması durumunda panel gerilimleri toplanarak toplam gerilim değeri elde edilir ancak akım değeri sabit kalır. Paralel bağlantı şeklinde ise akım değerleri toplanarak toplam akım elde edilirken gerilim değeri sabit kalır (Adak vd., 2019). Şekil 13’de seri ve paralel bağlantı şekilleri

gösterilmiştir. Denklem 10 ve 11’de seri, 12 ve 13’de ise paralel bağlantı durumunda elde edilen toplam akım ve gerilim hesapları verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 13.** Bağlantı şekli (a) seri (b) paralel

Seri bağlantı durumunda;

$$I_{toplaml} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (10)$$

$$V_{toplaml} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (11)$$

Paralel bağlantı durumunda;

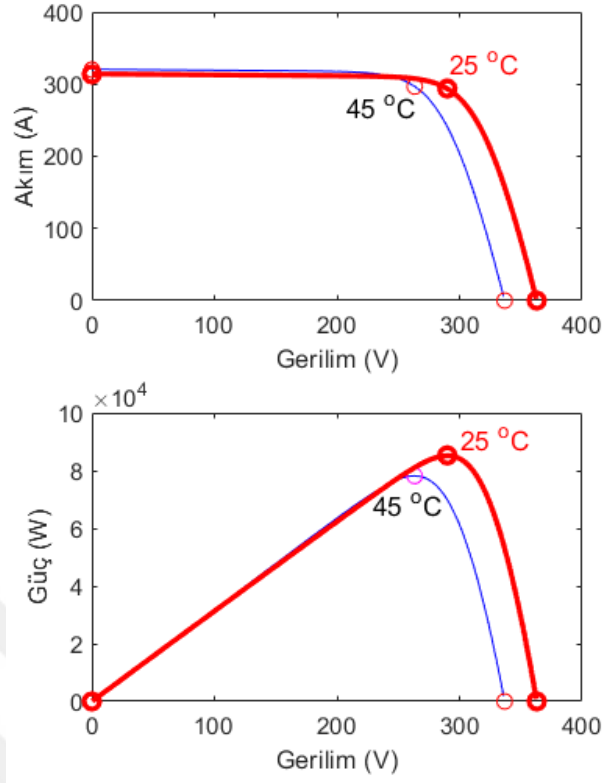
$$I_{toplam} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (12)$$

$$V_{toplam} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (13)$$

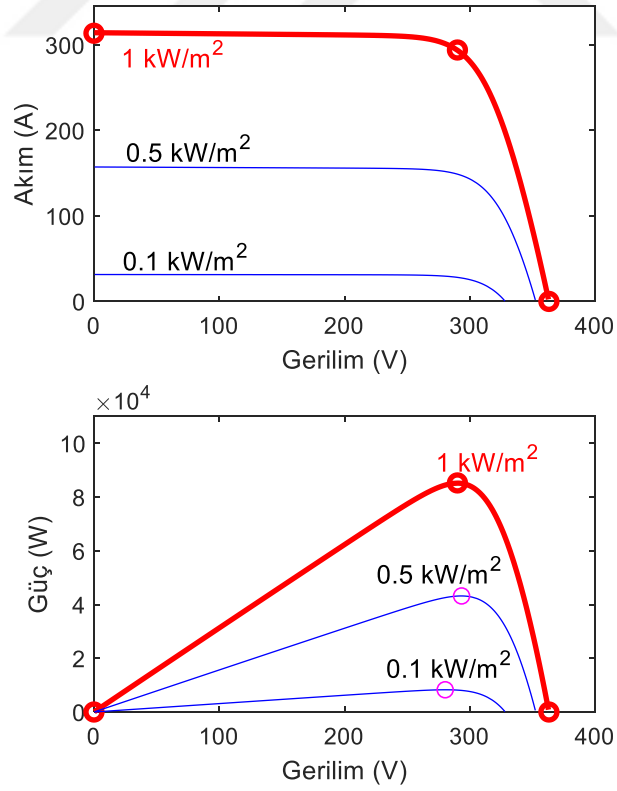
Paneller ihtiyaç duyulan akım ve gerilim değerlerine göre bağlantıları yapılarak dizin oluşturulur (Altaş, 1998). Ancak panelin performansı yalnızca bağlantı şekillerine bağlı değildir. Panel performansını etkileyen diğer etmenler ise gölgelenme, ışık şiddeti gibi çevresel ve yaşlanma, kirlilik gibi panel durumunu gösteren faktörlerdir (Güven & Kocalmış Bilhan, 2024). Bu faktörlere göre de panel dolayısıyla da dizin ve sistem verimi etkilenmektedir.

### 3.2.2. Maksimum Güç Noktası Takibi

FV panellerin güç performansını etkileyen en önemli faktörler panel üzerine düşen ışıınım ve sıcaklıktır. Gün boyunca değişen sıcaklık panelin gerilimini etkilerken ışıınım ise akımını etkilemektedir (Joshi & Arora, 2017). Örnek bir panelin sabit ışıınım-değişken sıcaklık ve sabit sıcaklık-değişken ışıınım altında alınan akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri sırasıyla Şekil 14 ve 15’de gösterilmiştir. MATLAB/Simulink ile örnek olarak seçilen 1Soltech 1STH-215-P panel ile 10 seri ve 40 paralel bağlantılı bir dizin oluşturulmuştur. Genel olarak 20°C sıcaklık ve 1000 W/m<sup>2</sup> ışıınım altında maksimum güç elde edildiğinden sabit sıcaklık ve ışıınım değerleri için bu değerler tercih edilmiştir.

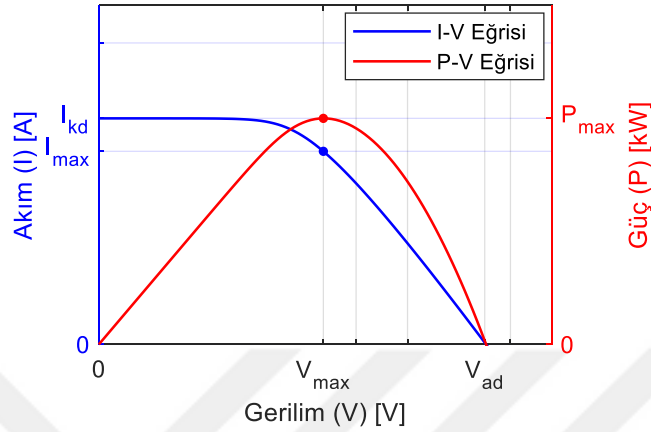


Şekil 14. Sabit ışınlım ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) altında I-V ve P-V karakteristiği



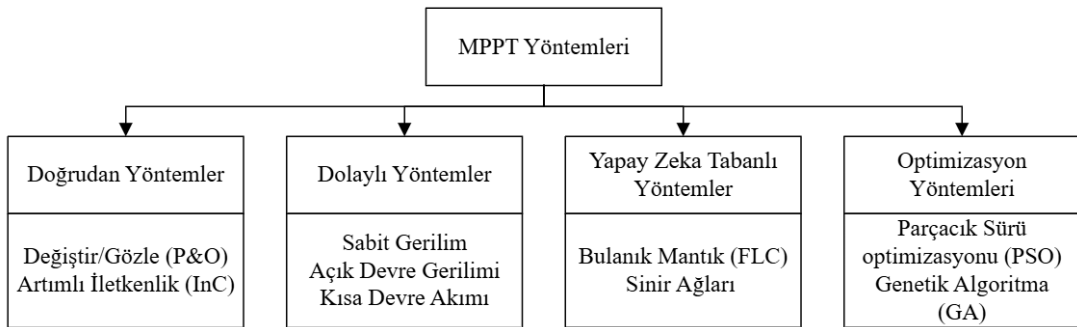
Şekil 15. Sabit sıcaklık ( $25^\circ\text{C}$ ) altında I-V ve P-V karakteristiği

Doğrusal olmayan bu I-V ve P-V karakteristik eğrilerinden yalnızca bir maksimum güç noktası (MPP) belirlenebilir (Wang vd., 2025). Tipik bir panelin I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 16’da gösterilmiştir.



**Şekil 16.** Akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri

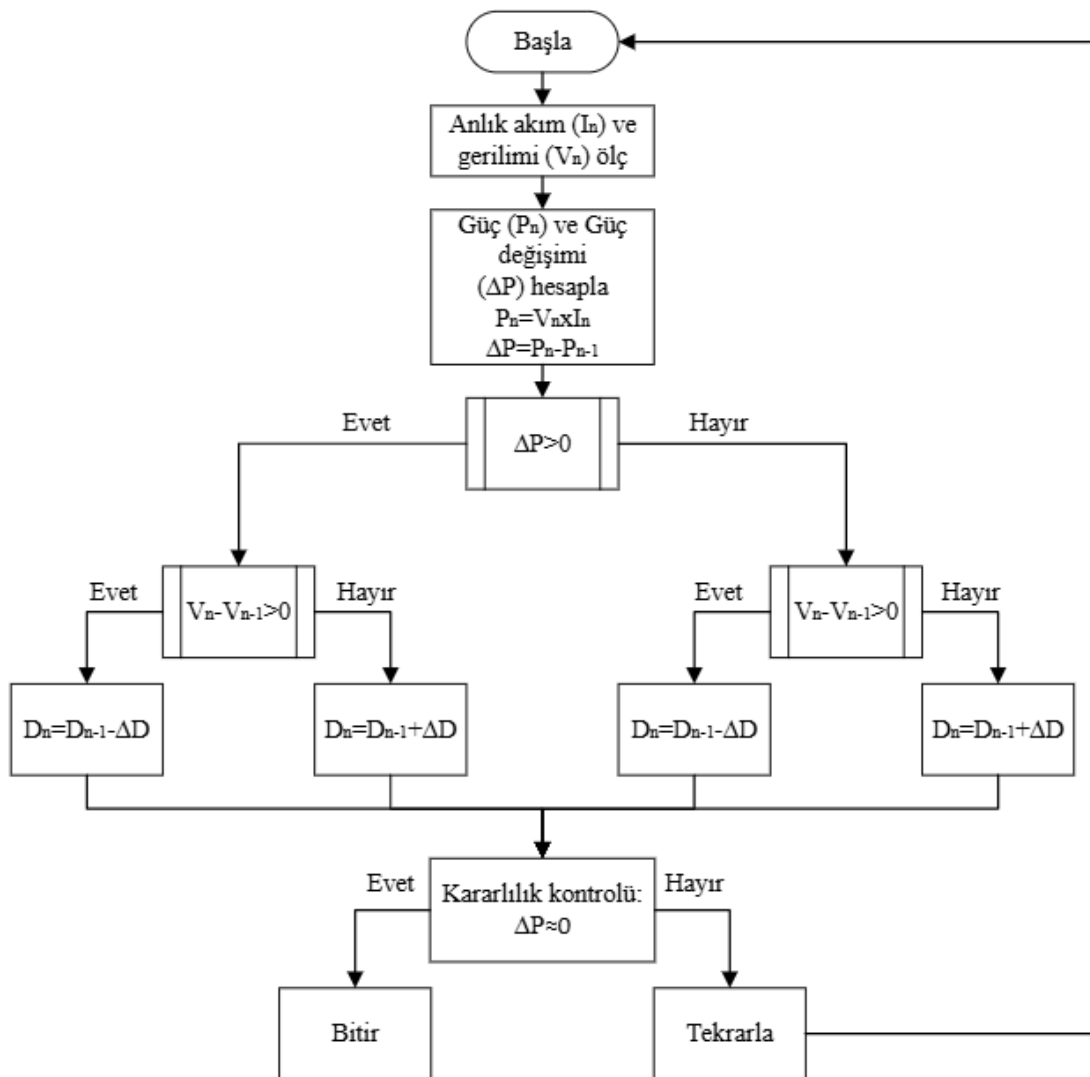
Sistemin bu maksimum güç noktası etrafında kalması sağlanarak panelin en verimli şekilde kullanılması için maksimum güç noktası takibi (MPPT) yapılmaktadır. Bunun için çeşitli yöntemler mevcuttur (Deepika vd., 2023). Şekil 17’de MPPT yöntemlerinin bazı temel kategorileri ve bu kategorilere ait örnek yöntemler verilmiştir.



**Şekil 17.** MPPT yöntemlerinin temel kategorileri

Şekil 17’de görüldüğü gibi MPPT yöntemlerinin çeşitliliği oldukça fazladır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı günümüzde yapılan GES’lerde de kullanılan P&O algoritmasıdır. P&O algoritmasının süreç akış diyagramı Şekil 18’de gösterilmiştir. Burada maksimum gücün hesaplanması için öncelikle panel anlık akım ve gerilimleri

ölçülür (Şahin, 2020). Anlık güç bu değerler sayesinde hesaplanır. Güneş ışınlamı ve sıcaklığa bağlı olarak panelin çıkış gücü sürekli değişmektedir. Ardından gücün ardışık iki değeri arasındaki fark olan  $\Delta P$  hesaplanır. Bunun yanında gerilimdeki değişim ( $\Delta V$ ) de hesaplanmaktadır. Sistemin güç gerilim karakteristiğindeki yönü (eğrinin sağına/soluna), gerilimdeki değişim sayesinde belirlenir. Bu sayede dönüştürücüye verilen görev oranı artırıp/azaltılarak sistemin maksimum güçte çalışması sağlanır. Eğer  $\Delta P/\Delta V > 0$  ise çalışma noktası MPP'nin solundadır. Ancak  $\Delta P/\Delta V < 0$  ise çalışma noktası MPP'nin sağındadır. Bu süreç  $\Delta P$  yaklaşık sıfıra eşitleninceye kadar devam eder (Altaş & Sharaf, 2007b; Bollipo vd., 2021).



**Şekil 18.** P&O algoritması süreç akış diyagramı

P&O algoritması sadece akım ve gerilim ölçümü için sensörlere sahiptir. Bu nedenle de uygulama kolaylığına sahip olan bu algoritma sıklıkla tercih edilmektedir

(Deepika vd., 2023). Günümüzde en yaygın kullanılan MPPT algoritması P&O olsa da yavaş olması, hızlı değişen hava şartlarına uyum sağlayamaması, gerçek MPP'nin yerinin tam olarak belirlenememesi ve çalışma noktasının MPP'ye yakın bir noktada salınım yapması gibi dezavantajları da vardır (Karag z đ  & Duranay, 2023). Bu geleneksel yöntemlerden kaynaklanan MPP etrafındaki FV güç salınımları yeni MPPT yöntemleri aramak için de ikna edici bir nedendir (Hadji vd., 2018). P&O algoritmasının bu dezavantajlarını aşmak ve sistem performansını artırmak amacıyla bu tez kapsamında daha güncel ve avantajlı bir yöntem olan FLC ile MPPT algoritmasının desteklenmesi sağlanmaktadır.



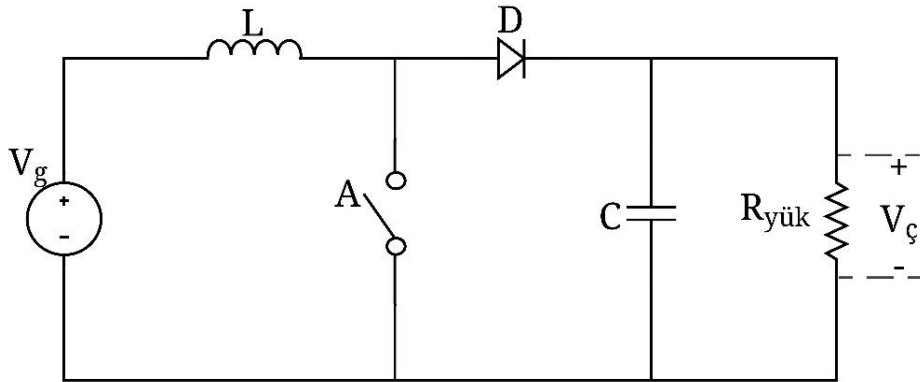
## 4. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

FV sistemlerde dönüştürücüler, panellerden elde edilen değişken gerilimin yük veya şebekeye uygun sabit bir gerilim seviyesine getirmek için kullanılmaktadır. Bu amaçla yükselten ve düşüren-yükselten dönüştürücüler en yaygın kullanılan dönüştürücü tipleridir. Bunun yanında Cuk ve SEPIC dönüştürücüler de tercih edilebilmektedir. Ancak Luo dönüştürücüler daha yüksek verimlilik ve gerilim kazancına sahip olmasına rağmen literatürde diğer dönüştürücülere kıyasla daha az incelenmiştir.

Bu bölümde, FV sistemlerde kullanılan tek anahtarlı yapıya sahip farklı yükselten tipteki dönüştürücülerin temel çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları ele alınacaktır. Özellikle yüksek gerilim kazancı, verimlilik ve düşük dalgalanma gibi üstün özelliklere sahip süper-lift Luo dönüştürücüsüne de bu bölümde kapsamlı bir şekilde yer verilmiştir.

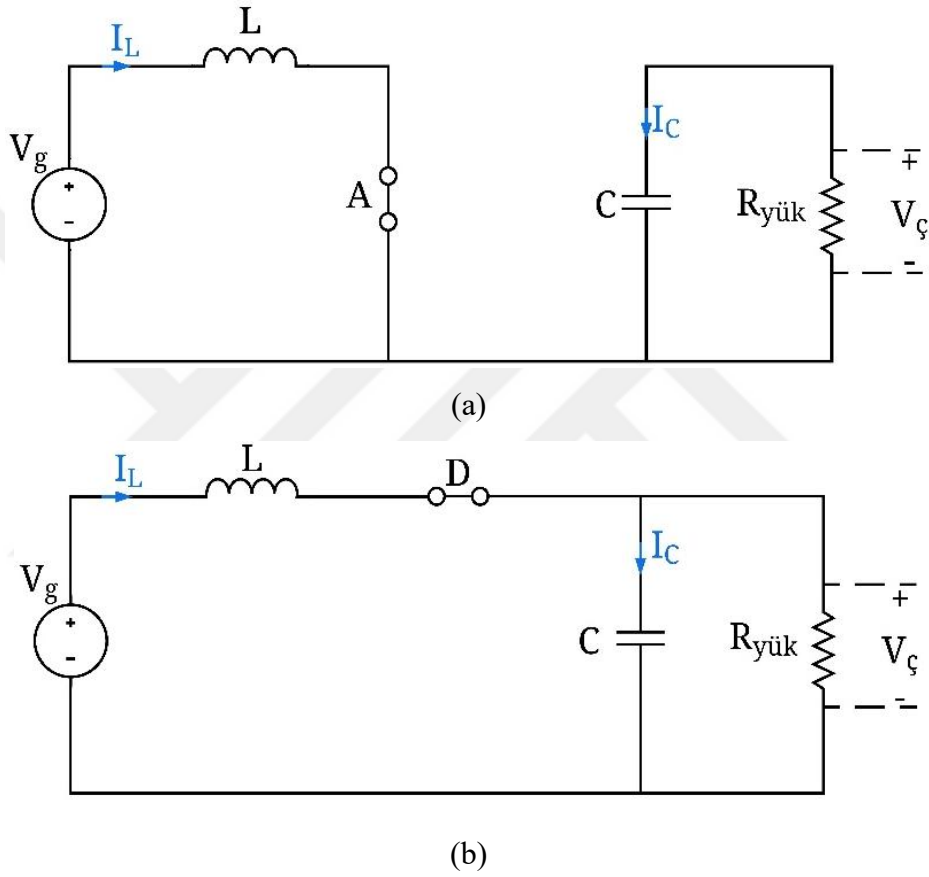
### 4.1. Yükselten Dönüştürücü

Yükselten tipte çalışan en klasik ve en yaygın kullanılan yükselten dönüştürücünün devre şeması Şekil 19’da verilmiştir. Devrede kullanılan anahtarın açık ya da kapalı olması durumlarına göre oluşan devreler de Şekil 20’de verilmiştir. Klasik yükselten dönüştürücüde anahtarlama elemanına gönderilen yüksek ( $I$ ) ve düşük ( $0$ ) durum arasında geçiş yapan sinyal anahtarın açık ya da kapalı kalma süresini kontrol etmektedir. Bu sayede dönüştürücü giriş gerilimini yükselterek çıkışta daha yüksek bir gerilim elde edilmesini sağlar (Jin vd., 2025; Kaba vd., 2025).



Şekil 19. Yükselten dönüştürücü devre şeması

Yükselten dönüştürücü devresinde anahtar konumuna göre devre şeması Şekil 20’de verilmiştir. Yükselten dönüştürücüde anahtarın kapalı olması durumunda diyot izole edilmektedir. Bu sayede giriş gerilimi bobini beslemektedir. Anahtarın açılması durumunda ise çıkış hem girişten hem de bobinden beslenmektedir. Çıkış gerilimi bu sayede yükseltilmektedir. Ayrıca çıkışa paralel bağlanan kondansatör sayesinde de çıkış geriliminin sabit tutulması sağlanmıştır (Bodur, 2010; Hart, 2011).



**Şekil 20.** Yükselten dönüştürücü anahtar (a) kapalı (b) açık durumu

Anahtar durumuna göre değişen devre şeması nedeniyle dönüştürücünün devre denklemleri de farklılaşmaktadır. Anahtarın kapalı ve açık olması durumlarına göre devre denklemleri Denklem 14-17’de verilmiştir.

Anahtar kapalı;

$$V_L = V_g = L \frac{di_L}{dt} \quad (14)$$

$$(\Delta i_L)_{kapalı} = \frac{V_g DT}{L} \quad (15)$$

Anahtar açık;

$$V_L = V_g - V_\zeta = L \frac{di_L}{dt} \quad (16)$$

$$(\Delta i_L)_{açık} = \frac{(V_g - V_\zeta)(1-D)T}{L} \quad (17)$$

Burada  $V_L$  bobin gerilimini,  $V_g$  giriş gerilimini,  $V_\zeta$  çıkış gerilimini ifade etmektedir. Bobin üzerinden akan akım ise  $i_L$  ile gösterilmiştir. Ayrıca  $D$  doluluk oranı,  $T$  ise periyottur.

Sürekli halde bobindeki enerji değişimi sıfır olmalıdır. Aksi takdirde bobin doyuma gitmektedir (Hart, 2011). Bu nedenle de Denklem 18'deki bağıntı oluşturulmaktadır.

$$(\Delta i_L)_{açık} + (\Delta i_L)_{kapalı} = 0 \quad (18)$$

Doluluk oranı ve giriş-çıkış gerilimleri arasında ilişki ise Denklem 19 ile ifade edilmektedir.

$$V_\zeta = \frac{V_g}{1-D} \quad (19)$$

#### 4.1.1. Yükselten Dönüştürücü Durum Uzak Denklemleri

Yükselten dönüştürücüde enerji depolamaya yarayan bobin ve kondansatör elemanları bulunmaktadır. Bu sebeple bobin üzerinden akan akım ve kondansatör gerilimi olmak üzere iki adet durum değişkeni tanımlanır. Bu değişkenler Denklem 20 ve 21'de gösterilmiştir.

$$x_1(t) = i_L(t) \quad (20)$$

$$x_2(t) = V_C(t) \quad (21)$$

Anahtar konumuna göre farklı bağıntılar oluşturularak bobindeki tellerin direnci de iç direnç ( $r_L$ ) olarak alınmaktadır. Ardından elde edilen bağıntılar Denklem 22'de verilen durum uzak denklemi formunda düzenlenmektedir.

$$\dot{x}_n(t) = A_n x(t) + B_n u(t) \quad (22)$$

Burada  $x(t)$  atanan durum değişkeni,  $u(t)$  ise denetimli giriş işaretidir.

Elde edilen denklemlerin istenen formda düzenlenerek matris haline getirilmesi sonucunda Denklem 23’de verilen durum uzay matrisi oluşturulmaktadır.

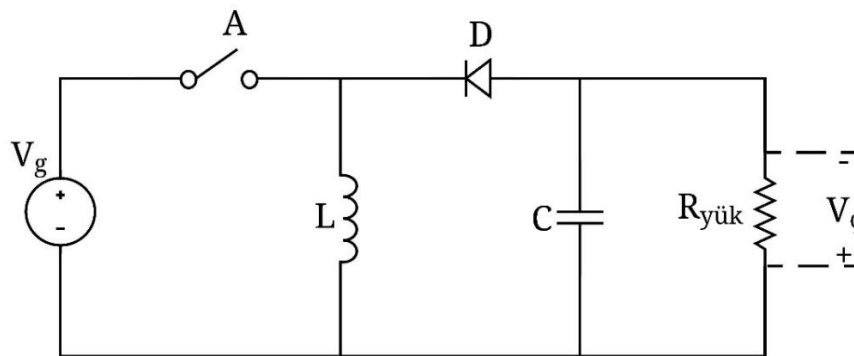
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_L/L & -(1-D)/L \\ (1-D)/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_g \quad (23)$$

Gerekli denklem düzenlemeleri ve Laplace dönüşüm işlemleri yapılmasının ardından dönüştürücünün transfer fonksiyonu da Denklem 24’de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$T_p(s) = \frac{\hat{V}_C(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(1-D)V_C + LI_Ls + I_Lr_L}{LCs^2 + Cr_Ls + (1-D)^2} \quad (24)$$

#### 4.2. Düşüren-Yükselten Dönüştürücü

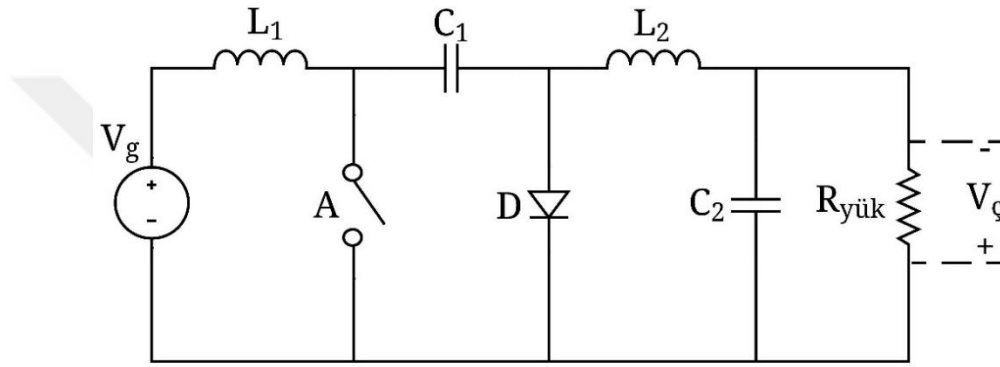
Hem yükselten hem de düşüren dönüştürücü olarak çalışabilen düşüren-yükselten dönüştürücünün devre şeması Şekil 21’de verilmiştir. Bu dönüştürücüde anahtarlama elemanı tıpkı düşüren dönüştürücüde olduğu gibi girişe bağlanmıştır. Anahtarın açık olması durumunda yük kondansatör tarafından beslenirken giriş de bobini beslemektedir. Dönüştürücüde diyot ters polariteye sahip olduğundan dönüştürücünün giriş ve çıkışı birbirinden izole edilmektedir. Anahtarın kapalı olması durumunda ise diyottan akım akmaya başlar. Bu sayede bobin üzerinde depolanan enerji de çıkışa aktarılır (Isen, 2021).



Şekil 21. Düşüren-yükselten dönüştürücü devre şeması

### 4.3. Cuk Dönüştürücü

Cuk dönüştürücünün giriş ve çıkış polaritesi tıpkı düşüren-yükselten dönüştürücüde olduğu gibi ters olmaktadır. Bu ters polarite yeteneği sayesinde Cuk dönüştürücü hem yükselten hem de düşüren dönüştürücü olarak çalışabilmektedir. Cuk dönüştürücünün devre şeması Şekil 22’de verilmiştir. Dönüştürücüde anahtarın açık ya da kapalı olmadı durumu anahtarlama elemanına verilen sinyalin doluluk oranı ve anahtarlama periyoduna bağlı olarak belirlenmektedir (Hadji vd., 2024; Khan vd., 2024).

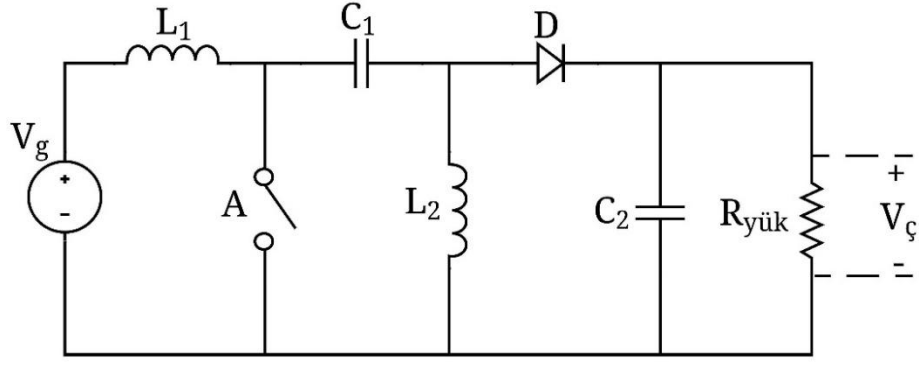


Şekil 22. Cuk dönüştürücü devre şeması

Cuk dönüştürücüde gerilim transferi düşüren-yükselten dönüştürücü ile aynıdır. Dönüştürücüde bobine üzerinden gerçekleştirilen transfer kondansatör kapasitesine bağlıdır (Surya vd., 2017).

### 4.4. SEPIC Dönüştürücü

SEPIC dönüştürücü de Cuk dönüştürücü ile benzer özelliklere sahiptir. Ancak Cuk ile arasındaki fark SEPIC dönüştürücünün çıkışının her zaman pozitif gerilim sağlamasıdır. SEPIC dönüştürücünün devre şeması Şekil 23’de verilmiştir. SEPIC dönüştürücüde anahtar kapandığında  $L_1$  bobini giriş tarafından beslenmektedir. Anahtar açıldığında ise enerji depolamış olan  $L_1$  bobini de kaynak görevi görür (Vijayakumar & Sudhakar, 2024).



**Şekil 23.** SEPIC dönüştürücü devre şeması

Düşüren-yükselten dönüştürücüde olduğu gibi SEPIC dönüştürücüde de çıkış akımı istenmeyen dalgalanmalara sahiptir. Ancak, Cuk ve düşüren-yükselten dönüştürücünün aksine, SEPIC dönüştürücü ters polariteye sahip değildir ve cihaz üzerinde aşırı ısınma veya cihaz arızasına yol açabilecek elektriksel streslere neden olmaz (Surya vd., 2017).

#### 4.5. Luo Dönüştürücü

DA/DA dönüşümünün başarılı yılları olarak adlandırılan 1980 ve 1990'lı yıllarda ortaya çıkan Luo dönüştürücüler ilerleyen yıllarda daha da gelişerek birçok yeni DA/DA dönüştürücü türünü ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (Luo & Ye, 2016).

Luo dönüştürücüler optimum koşullar altında diğer dönüştürücülere kıyasla daha fazla güvenilirliğe sahiptir. Bunun nedeni Luo dönüştürücülerin MPP'de daha düşük görev oranlarında çalışabilmesi ve bu sayede dönüştürücü stresinin önemli ölçüde azaltılmasıdır (Kevat vd., 2025).

Luo dönüştürücüler düşüren modda ya da negatif işaretli yükselten modda gibi farklı türlerde de tasarlanabilmektedir (Chamundeeswari & Seyezhai, 2024; Chockalingam vd., 2024).

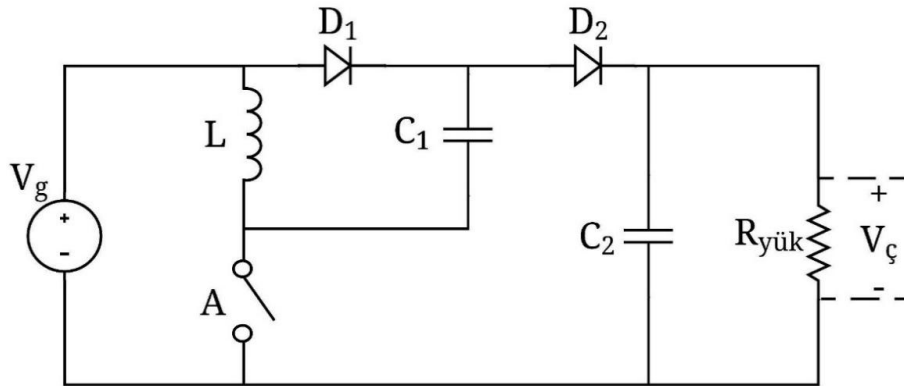
Klasik gerilim artırma tekniğinden farklı olarak 2003 yılında ortaya çıkan süper-lift tekniğinde gerilim geometrik ilerleme boyunca aşama aşama artırılır (Luo & Ye, 2003). Klasik dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılan gerilim artırma tekniği ile daha gelişmiş ve Luo dönüştürücülerde kullanılan süper-lift tekniği arasında bazı temel farklılıklar Tablo 5'de verilmiştir (Luo & Ye, 2016).

**Tablo 5.** Gerilim artırma ve süper-lift tekniklerinin karşılaştırılması

| Özellik        | Gerilim artırma                                                                    | Süper-lift                                                                         |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Tanım          | Giriş geriliminin artırılması için kullanılan temel bir güç dönüştürme tekniğidir. | Daha yüksek verimlilik ve geniş çalışma koşulları sağlayan gelişmiş bir tekniktir. |
| Gelişme Yılı   | 1980’lerin sonları.                                                                | 2003 yılı.                                                                         |
| Verimlilik     | Daha düşük verimlilik ve daha yüksek kayıplara sahiptir.                           | Daha yüksek verimlilik ve daha düşük kayıplara sahiptir.                           |
| Karmaşıklık    | Basit yapılıdır.                                                                   | Daha karmaşık bir yapıya sahiptir.                                                 |
| Uygulama Alanı | Genellikle düşük güç uygulamaları.                                                 | Yüksek verimlilik gerektiren endüstriyel ve ileri düzey dönüşüm uygulamaları.      |
| Performans     | Gerilim kazancı konusunda sınırlıdır.                                              | Daha yüksek gerilim kazancı sağlar ve çıkış gücünü daha verimli şekilde yükseltir. |

#### 4.5.1. Süper-Lift Luo Dönüştürücü

Süper-lift Luo dönüştürücüler bir bobin, iki diyot, iki kondansatör, bir anahtar ve bir yükten oluşmaktadır. Şekil 24’de süper-lift Luo dönüştürücünün ana devre şeması verilmiştir. Bu dönüştürücüler çok yüksek gerilim kazancına sahiptirler. Dönüştürücünün gerilim kazancı Denklem 25’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

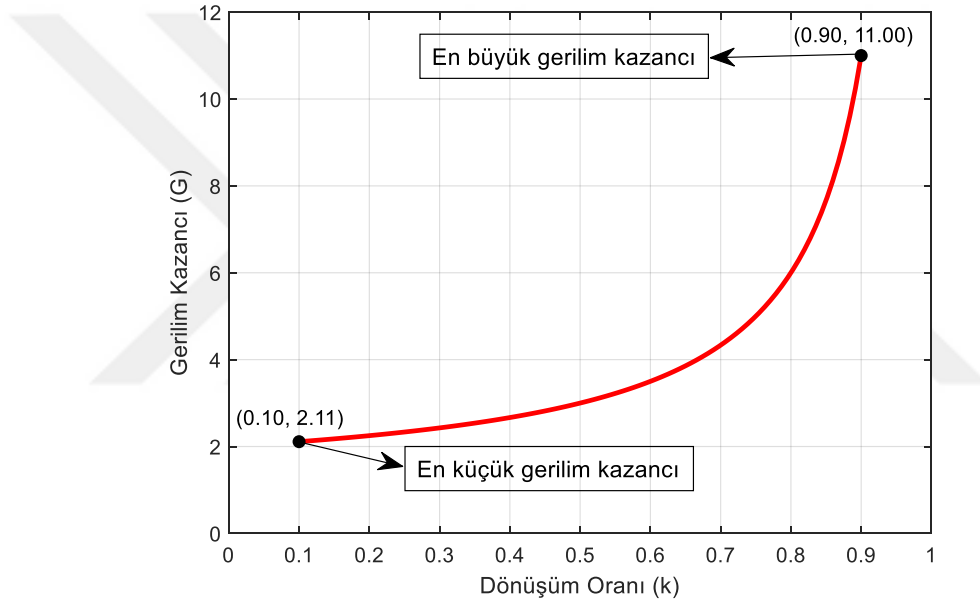


**Şekil 24.** Süper-lift Luo dönüştürücü devre şeması

$$G = \frac{V_c}{V_d} = \frac{2-k}{1-k} \quad (25)$$

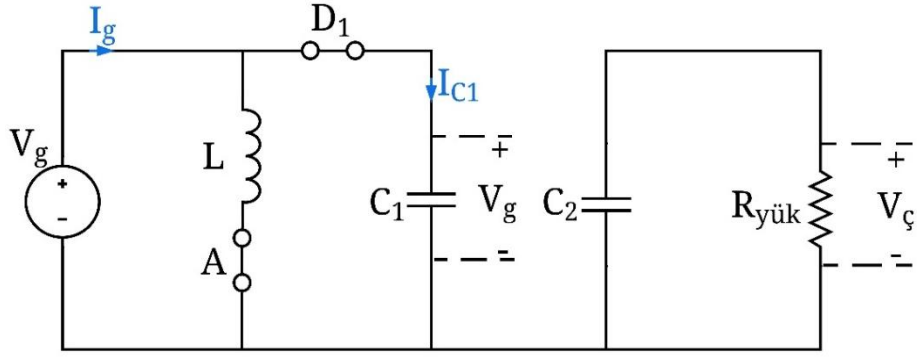
Burada  $G$  gerilim transfer kazancını,  $k$  ise dönüştürme oranını ifade etmektedir (Durga Devi & Nageswari, 2019; Katoch & Joshi, 2022). Denklem  $k=1$  durumunda tanımsız olmaktadır. Denklemde dönüştürme oranının 1'den küçük olması gerektiği

anlaşılmaktadır. Bu nedenle gerilim kazancının pozitif olması için pratik çalışma aralığı olarak da kabul edilen  $0 < k < 1$  aralığı tercih edilir. Süper-lift Luo dönüştürücüde dönüştürme oranındaki çok küçük bir değişim çıkış geriliminde büyük bir değişime neden olmaktadır. Ayrıca, dönüştürme oranının artması anahtar üzerinde gerilim stresine de neden olmaktadır (Glady & Manjunath, 2019; Kececioğlu, 2022). Dönüştürme oranı ile gerilim kazancı arasındaki ilişkiyi daha iyi tanımlamak için  $0,1 \leq k \leq 0,9$  aralığında tanımlı kazanç-dönüşüm oranı grafiği Şekil 25’de verilmiştir. Bu durumda en küçük kazanç değeri  $k=0,1$  için  $G=2,11$  ve en büyük kazanç değeri ise  $k=0,9$  için  $G=11$  olmaktadır.

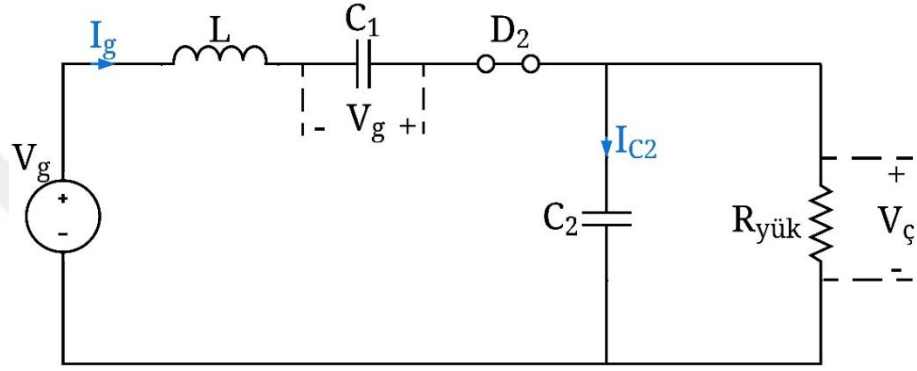


**Şekil 25.** Kazanç-Dönüşüm oranı grafiği ( $0,1 \leq k \leq 0,9$  aralığı için)

Süper-lift Luo devresinde anahtarın açık/kapalı durumuna göre devre şeması Şekil 26’da gösterilmiştir. Anahtarın kapalı olduğu durumda devredeki  $D_1$  diyotu üzerinden akım akar. Bu sayede giriş tarafında kapalı çevrim oluşur ve  $L$  ile  $C_1$  elemanları şarj olur. Anahtar açık konuma geldiğinde ise devrede  $D_2$  diyodu ilettime geçer. Bu durumda ise  $L$  ve  $C_1$  elemanları aralarında seri bağlantı oluşturur ve  $C_2$  ile  $R_{yük}$  elemanları üzerinden de akım akar. Bu anahtar açma/kapama işlemi sayesinde giriş gerilimi çıkışa yükseltilerek iletilir (El-Ghanam, 2020; Luo, 2008).



(a)



(b)

**Şekil 26.** Süper-lift Luo dönüştürücü anahtar (a) kapalı (b) açık durumu

Anahtar durumuna göre devre denklemleri Denklem 26-29 ile ifade edilmektedir.

Anahtar kapalı;

$$I_g = I_L + I_{C_1} \quad (26)$$

$$I_g = I_L + \left(\frac{1-k}{k}\right) \times I_L = \frac{I_L}{k} \quad (27)$$

$$I_{C_1} = \left(\frac{1-k}{k}\right) \times I_L \quad (28)$$

Anahtar açık;

$$I_g = I_L = I_{C_1} \quad (29)$$

Burada  $I_{C1}$   $C_1$  kondansatörü üzerinden akan akım,  $I_L$  bobin akımı ve  $I_g$  giriş akımıdır.

Anahtar kapatıldığında ve anahtarın açık olduğu durumun sonunda  $C_1$  kondansatörü üzerindeki gerilim sırasıyla Denklem 30 ve 31’de verilmiştir. Anahtarın

kapalı olduğu durumda  $C_1$  kondansatörü giriş tarafından beslenirken anahtar açıldığında bobin elemanı ile seri hale gelmektedir.

$$V_{C_1} = V_g - \Delta V_{C_1} = V_g - \frac{t}{C_1} I_L \quad (30)$$

$$\Delta V_{C_1} = \frac{1}{C_1} \int_{kT}^T I_L dt = \frac{1-k}{C_1} T I_L \quad (31)$$

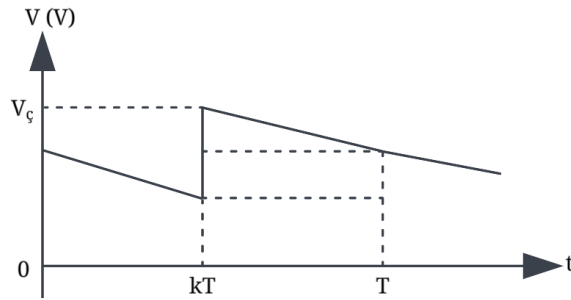
Anahtar açık konumda iken şarj durumunda olan  $C_2$  kondansatörü ise anahtar kapatıldığında  $D_2$  diyotunun kesimde olması sebebiyle  $R_{yük}$  elemanı ile kapalı çevrim oluşturur. Anahtar açıldığında ve anahtarın kapalı olduğu durumun sonunda  $C_2$  kondansatörü üzerindeki gerilim sırasıyla Denklem 32 ve 33’de verilmiştir.

$$V_{C_2} = V_{\zeta} - \frac{t}{C_2} I_{\zeta} = V_{\zeta} \left(1 - \frac{t}{RC_2}\right) \quad (32)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{k}{f_a \times R \times C_2} V_{\zeta} \quad (33)$$

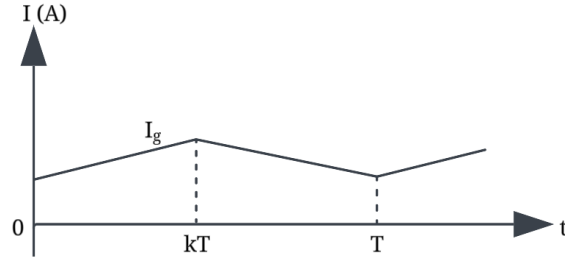
Burada anahtarlama frekansı  $f_a$  ile, periyot  $T$  ile,  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatörleri üzerindeki gerilimin son durumdaki değerleri ise  $\Delta V_{C_1}$  ve  $\Delta V_{C_2}$  değerleri ile ifade edilmiştir (Luo, 2008; Luo & Ye, 2016).

Her iki kondansatörde meydana gelen değişimlerin etkileri ele alındığında çıkış gerilimindeki değişim Şekil 27’de verilen grafik ile açıklanabilir.

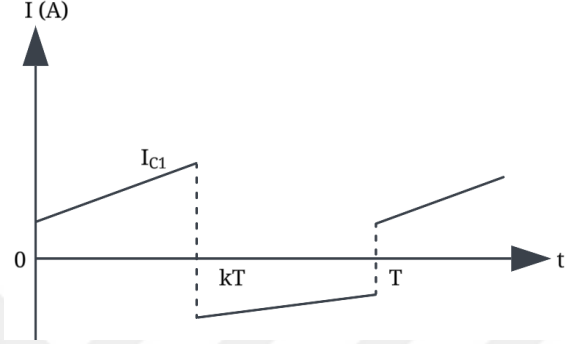


**Şekil 27.** Çıkış gerilimi dalga biçimi

Süper-lift Luo dönüştürücüde anahtarın açık olduğu durumda bobin akımı artarken anahtarın kapalı olduğu durumda azalmaktadır (Luo & Ye, 2016). Giriş akımı ve  $C_1$  kondansatörü üzerinden geçen akımın dalga şekilleri Şekil 28’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 28.** Dalga biçimleri (a) giriş akımı (b)  $C_l$  kondansatörü üzerindeki akım

Süper-lift Luo dönüştürücüde hem bobin akımı hem de çıkış geriliminde dalgalanma mevcuttur. Bu dalgalanmalar sebebiyle bobin akımı ve çıkış gerilimi için değişim oranı da hesaplanabilmektedir. Bu değişim oranları Denklem 34 ve 35’de verilmiştir.

$$\xi = \frac{k(1-k)^2 \times R}{2(2-k) \times f_a \times L} \quad (34)$$

$$\varepsilon = \frac{1-k}{2 \times R \times f_a \times C_1} \quad (35)$$

Burada bobin akımındaki değişim oranı  $\xi$  ile, çıkış gerilimindeki değişim oranı ise  $\varepsilon$  ile ifade edilmektedir (El-Ghanam, 2020).

Süper-lift Luo dönüştürücüde anahtarın açık olması durumu  $dT_s$  ve anahtarın kapalı olması durumu  $(1-d)T_s$  olarak ifade edildiğinde dönüştürücünün durum uzay denklemleri için gereken ilişkiler Denklem 36 ve 37’de gösterildiği şekilde verilebilir.

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 V_d, dT_s \text{ anında} \quad (36)$$

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 V_d, (1-d)T_s \text{ anında} \quad (37)$$

Burada  $A_1+A_2$  durum matrisiyken  $B_1+B_2$  ise vektördür. Süper-lift Luo dönüştürücüde durum değişkenleri bobin akımı ile  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatörleri üzerindeki gerilim olarak sırasıyla  $x_1$ ,  $x_2$  ve  $x_3$  ile ifade edilebilir (Jayachandran vd., 2015). Bu durum değişkeni ataması sonrasında anahtarın açık ve kapalı olması durumlarında matris ifadeleri sırasıyla Denklem 38 ve 39’de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 0 \\ -1/C_1 & -1/C_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/RC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/C_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_d \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & -1/L \\ -1/C_1 & 0 & 0 \\ -1/C_2 & 0 & -1/RC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_d \quad (39)$$

Laplace dönüşümlerinin ardından Denklem 40’da verilen forma göre düzenleme yapıldığında Denklem 41’de verilen transfer fonksiyonu elde edilmektedir.

$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{d}(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)x + (B_1 - B_2)V_d] + (C_1 - C_2)X \quad (40)$$

$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{d}(s)} = V_g \left[ \frac{-sL\left(\frac{(2-D)}{(1-D)^2}\right) + R}{s^2 LRC_2 + sL + R(1-D)^2} \right] \quad (41)$$

#### 4.6. Dönüştürücü Tiplerinin Karşılaştırılması

Yükselten, düşüren-yükselten, Cuk, SEPIC ve süper-lift Luo dönüştürücülerin gerilim kazancı, polarite, verimlilik ve dalgalanma özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 6’da verilmiştir. Düşüren-yükselten ve Cuk dönüştürücüler ters polariteye sahiptirler. Bu nedenle girişten aldıkları pozitif gerilim çıkıştan negatif olarak elde edilmektedir. Gerilim kazancı yükselten dönüştürücüde yüksek olarak tanımlanırken süper-lift Luo’da bu kazanç çok daha yüksektir. Aynı zamanda en düşük dalgalanmanın da süper-lift Luo ile elde edildiği değerlendirilmektedir.

**Tablo 6. Dönüştürücülerin karşılaştırılması**

| Dönüştürücü Tipi  | Gerilim Kazancı      | Polarite | Verimlilik | Dalgalanma |
|-------------------|----------------------|----------|------------|------------|
| Yükselten         | Yüksek ( $>1$ )      | Aynı     | Çok yüksek | Orta       |
| Yükselten-Düşüren | Orta (0,1-10)        | Ters     | Orta       | Orta       |
| Cuk               | Orta (0,1-10)        | Ters     | Orta       | Düşük      |
| SEPIC             | Orta (0,1-10)        | Aynı     | Orta       | Orta       |
| Süper-lift Luo    | Çok yüksek ( $>10$ ) | Aynı     | Çok yüksek | Çok düşük  |

Karşılaştırılan bu dönüştürücülerin devre yapısının basit ya da karmaşık olması, polaritesi veya çıkış dalgalanmasının düşük ya da yüksek olması gibi farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tablo 7’de bu dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

**Tablo 7. Dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları**

| Dönüştürücü Tipi   | Avantajlar                                                                               | Dezavantajlar                                                 |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Yükselten          | Basit yapıdadır<br>Yüksek verimlilik sağlar                                              | Yalnızca gerilim yükseltebilir<br>Çıkış dalgalanması olabilir |
| Düşüren -Yükselten | Hem yükseltici hem düşürücü olarak çalışabilir                                           | Ters polariteye ve çıkışta daha fazla dalgalanmaya sahiptir   |
| Cuk                | Sürekli giriş ve çıkış akımı sağlar<br>Düşük dalgalanmaya sahiptir                       | Gerilim kazancı sınırlıdır<br>Karmaşık tasarıma sahiptir      |
| SEPIC              | Pozitif çıkış gerilimi sağlar<br>Hem yükseltici hem düşürücü olarak çalışabilir          | Gerilim kazancı sınırlıdır<br>Çıkış dalgalanması görülebilir  |
| Süper-lift Luo     | Yüksek gerilim kazancı sağlar<br>Düşük dalgalanmaya sahiptir<br>Yüksek verimlilik sağlar | Daha karmaşık tasarım ve daha fazla elemana sahiptir          |

Bu tez kapsamında özellikle yüksek verimlilik ve az dalgalanma ile öne çıkan yükselten ve süper-lift Luo dönüştürücüleri ele alınmaktadır. Süper-lift Luo dönüştürücünün diğer dönüştürücülerin elde edemeyeceği kadar yüksek gerilim kazancı sağlaması ve yüksek verimliliğe sahip olması dönüştürücüyü öne çıkaran en önemli sebepler arasında yer almaktadır. Bunun yanında oldukça düşük çıkış akım ve gerilim dalgalanmasına sahip olması da hassas elektronik uygulamalar için oldukça güvenli bir seçenek olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yükselten dönüştürücü ise günümüzde geniş uygulama alanına sahip olması, basit yapısı ve yüksek gerilim

kazancı sağlaması sebebiyle çalışmada karşılaştırma için seçilmiştir. Çalışmada süperlift Luo ve yükselten dönüştürücülerin kontrolleri FLC ile sağlanarak bir güneş enerji sistemindeki verimlilikleri ve kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir.



## 5. BULANIK MANTIK

Günlük hayatta kesin yargılar dışında kalan kısımlar için belirsiz kavramlar mevcuttur. Bunlara sayısal bir belirteci olmayan sıcak-soğuk, uzun-kısa gibi sıfatlar örnek olarak verilebilir. Yüksek-orta-alçak gibi orta değer bildiren ifadeler de bu kavramların bir örneğidir. İnsan düşünce mantığı, kesinlik içermeyen bu ifadeleri değerlendirerek bir karar verebilmektedir. Bulanık mantık kavramı da bu kesin yargı bildirmeyen ara değerlerin de ifade edilmesini sağlayan bir yaklaşıma sahiptir. Bulanık mantık insan düşünce sisteminde bulunan bu sayısal olmayan ifadeleri kullanarak akıl yürüten bir düşünce mantığıdır (Emikönel, 2022; Yılmaz & Şahin, 2023). Bulanık mantığın temel taşı olan bulanık kümeler kavramı ise ilk olarak 1965’de Prof. Dr. Lotfi A. Zadeh tarafından yayımlanan “Bulanık Kümeler” yayını ile ortaya atılmıştır. Zadeh, insan düşünce sisteminin oldukça büyük bir kısmının kesin yargı bildirmeyen bilgilerden oluştuğunu vurgulamıştır. Bulanık mantığın genel özellikleri ise yine Zadeh tarafından şu şekilde belirtilmiştir (Zadeh, 1965, 1996);

- Kesin değil yaklaşık düşünme tekniği kullanılır
- Bulanık kümelerde  $[0, 1]$  aralığında sonsuz değer gösterilir
- Bulanık mantıkta dilsel ifadeler (çok, az, biraz, vs.) bilgi olarak kullanılır
- Çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında belirlenen bir kural sayesinde gerçekleştirilir
- Klasik mantıkla ifade edilebilen her sistem bulanık mantık ile de ifade edilebilir
- Matematiksel olarak ifade edilmesi zor olan sistemler için oldukça uygun bir düşünce mantığıdır

Bulanık mantık kullanarak doğrusal olmayan sistemler için matematiksel modele ihtiyaç duymadan ve kesin bilgi içeren girdiler kullanmadan sistemi kontrol edilebilmektedir. Karmaşık matematiksel model ve sistem parametrelerinin kullanılması gerekmediğinden bu kontrol yapısı oldukça verimli olmaktadır. Bu nedenle de MPPT uygulamalarında kullanımı artarak devam etmektedir (Nasser vd., 2020; Teke vd., 2023). Hızlı ve güvenilir bir kontrol sağladığı için MPPT uygulamaları

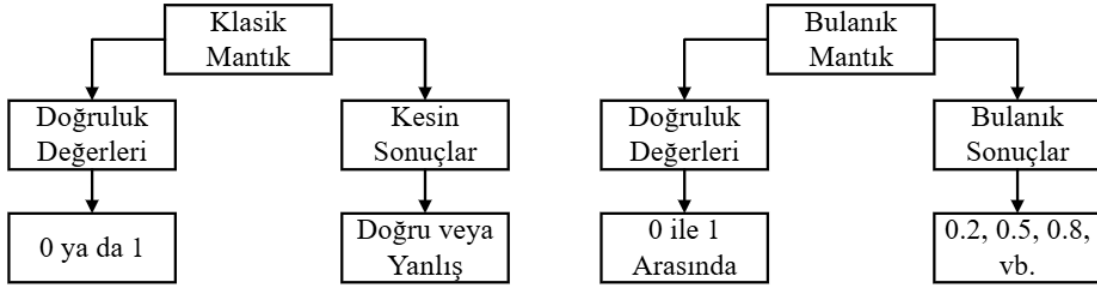
dışında kalan birçok sistemde de yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir (Salım, 2021). Günümüzde bulanık mantığın bazı kullanım alanları;

- Yönetim,
- Robotik,
- Siber güvenlik,
- El yazısı ve ses tanımlama,
- Doğal dil işleme,
- Görüntü işleme,
- Tarım,
- Eğitim,
- Sağlık hizmetleri,
- Akıllı ev sistemleri,
- Enerji sektörü

şeklinde sıralanabilir (Ateş, 2021).

### **5.1. Klasik ve Bulanık Mantık Arasındaki Temel Farklar**

Klasik mantık sadece kesin yargıları içerir. Bu nedenle klasik mantık kümesinde yalnızca 0 ve 1 fonksiyonları kullanılır. Bulanık mantık ise klasik mantıkta olmayan üçüncü bir durumu da irdeler. Bulanık mantık kümeleri 0 ve 1 arasında kalan her değeri kapsayabilir. Bu nedenle de bulanık kümeler sonsuz doğruluk değerlerini içinde barındırır (McNeill & Thro, 1994; Yılmaz & Şahin, 2023). Başka bir deyişle klasik mantık hayatın gri renklerini yok sayarak sadece siyah ve beyaza odaklı bir mantık sunar. Bulanık mantık sistemi ise hayatta olabilecek gri renkleri de görür ve siyah-beyaz arasında kalan durumlardaki doğruluk değerlerini de hesaba katar. Klasik mantık ile bulanık mantığın şematik gösterimi Şekil 29’da verilmiştir.



**Şekil 29.** Klasik mantık ile bulanık mantığın şematik gösterimleri

Bulanık mantık sonsuz doğruluk değerini içinde barındırdığı için kısmi üyeliğe sahiptir. Klasik mantıkta ise bir değişken sadece bir kümeye ait olabilmektedir. Ancak bulanık mantıkta bir değişken kısmi üyelik sayesinde birden fazla küme içerisinde yer alabilir (Ghaderi, 2019; McNeill & Thro, 1994).

Klasik mantıkla bulanık mantık arasındaki bir diğer fark da üyelik fonksiyonudur. Klasik mantıkta yalnızca dikdörtgen üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Bulanık mantık ise birçok üyelik fonksiyonuna sahiptir (Emikönel, 2022).

## 5.2. Bulanık Küme ve Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantık kontrolcü, giriş olarak kullanılan dilsel ifadeler üzerinde tanımlanmış kural tabanını sayesinde karar vermektedir. Dilsel ifadeler, kontrol edilen sistemin giriş ve çıkış değerleri olarak tanımlanabilir. Dilsel ifadeler 0-1 arasındaki sayısal ifadeler olan ve bulanık sayı adı verilen ifadelerle tanımlanır. Bu bulanık sayılar bir bulanık küme oluşturur. Dilsel ifadelerin sayısal fonksiyonları da üyelik fonksiyonları ile tanımlanır. Üyelik fonksiyonu, dilsel ifadelerin küme içerisindeki üyelik derecesini ifade eder. Üyelik derecesi öznel yargılarla belirlenmektedir (Ghaderi, 2019; Zadeh, 1972).

Bulanık kümeler geniş bir uzayı kapsamaktadır. Bu nedenle bir durumun o kümeye ait olup olmadığının anlaşılması için duruma bir aidiyet derecesi atanır. Bir bulanık kümedeki elemanların o kümeye ait olma dereceleri genel olarak Denklem 42’de gösterilen biçim ile ifade edilmektedir. Ayrık ya da sürekli durumlara göre bu ifade Denklem 43 ve 44’da verildiği gibi de düzenlenebilmektedir.

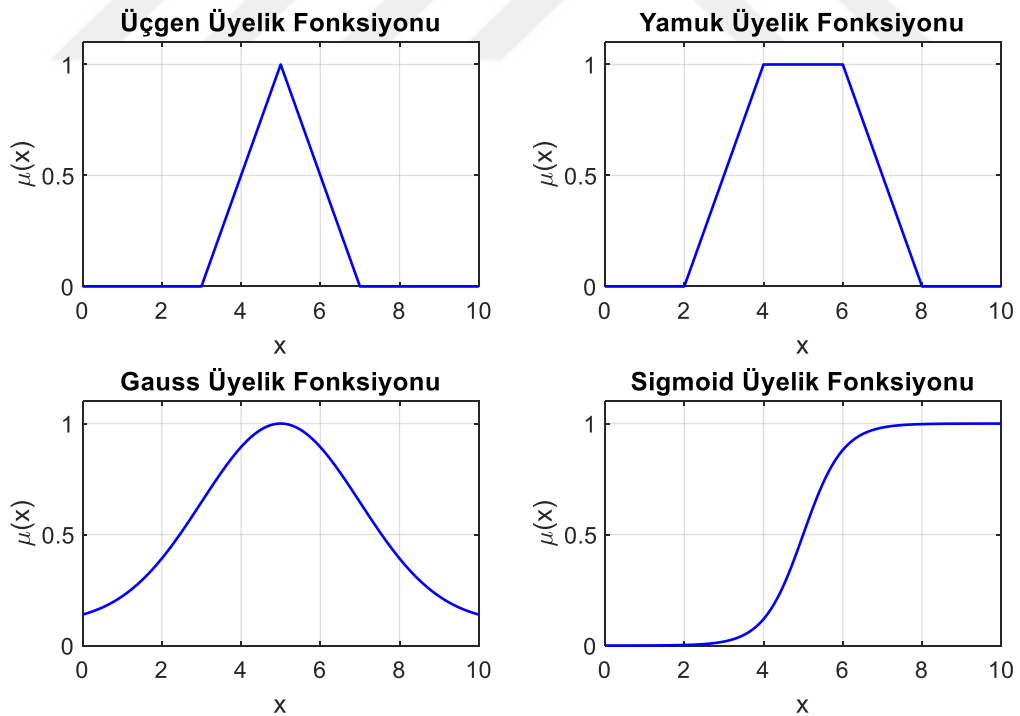
$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (42)$$

$$A = \sum_{x_i \in X} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (43)$$

$$A = \int_x^\infty \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (44)$$

Burada  $X$  uzay kümesini,  $x$  ise uzay kümesinin kesin küme elemanlarını ifade etmektedir. Bulanık küme  $A$  ile gösterilmiştir. Kesin küme elemanlarının  $A$  bulanık kümesindeki üyelik dereceleri ise  $\mu_A(x)$  ile ifade edilmektedir. Matematiksel ifadeler ile hesaplamaların yapılmadığı bu sistemler için oluşturulan bu denklemlerde bulunan  $\sum$  ve  $\int$  sembolleri üyelik fonksiyonlarının birleşimini temsil etmektedirler. Matematiksel işleç olarak toplam ya da integral anlamında kullanılmamıştır (Altaş, 1999; McNeill & Thro, 1994).

Üyelik fonksiyonları, üçgen, yamuk, Gauss, sigmoid, çan eğrisi gibi çeşitli türlerde sınıflandırılmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının sayısı da sistem performansını etkilemektedir. Uygun sayıda ve sisteme uygun formda üyelik fonksiyonu seçilmelidir. Sisteme uygun üyelik fonksiyonu formu, bilgilerinin üyelik derecelerinin nasıl değiştiğiyle ilgilidir. (Emikönel, 2022; Samavat vd., 2023). Şekil 30'da bazı üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



**Şekil 30.** Üyelik fonksiyonları örnekleri

MATLAB programında tanımlı üyelik fonksiyonlarının isim kodları ve açıklamaları Tablo 8’de verilmiştir. Şekil 30’da gösterilen ve MATLAB yardımıyla oluşturulan bu üyelik fonksiyonları da Tablo 8’de verilen üyelik fonksiyonu isim kodları kullanılarak oluşturulmuştur.

**Tablo 8.** MATLAB’da tanımlı üyelik fonksiyonları

| <b>MATLAB İsim Kodu</b> | <b>Üyelik Fonksiyonu</b>  |
|-------------------------|---------------------------|
| trimf                   | Üçgen                     |
| trapmf                  | Yamuk                     |
| gbellmf                 | Çan Şekilli               |
| gaussmf                 | Gauss (tam simetrik)      |
| gauss2mf                | Gauss                     |
| pimf                    | Π                         |
| dsigmf                  | Sigmoidial (tam simetrik) |
| psigmf                  | Sigmoidial                |

En yaygın kullanılan iki üyelik fonksiyonu üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarıdır (Emikönel, 2022; Ross, 2010).

### 5.2.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu

Güneş enerji sistemlerinde de sıklıkla tercih edilen üçgen üyelik fonksiyonunda üç durum söz konusudur (Vinitha vd., 2024). Bu nedenle üyelik fonksiyonlarının üyelik değerleri Denklem 45’de verilen formda gösterilmektedir.

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} (x - a)/(b - a), & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b), & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \vee x < a \end{cases} \quad (45)$$

Burada üyelik fonksiyonunun değerleri  $a, b, c$  ile ifade edilmiştir ve  $a < b < c$  olarak sıralanmaktadır (Emikönel, 2022; Karataş vd., 2020). Üçgen üyelik fonksiyonunun grafiksel gösterimi Şekil 30’da verilmiştir.

### 5.2.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Yamuk üyelik fonksiyonunda üçgenden farklı olarak 4 durum ele alınmaktadır. Bu durumların ikisi kesin yargı bildiren 1 ve 0'dır. Yamuk üyelik fonksiyonunun üyelik değerleri Denklem 46'da verilen formulla ifade edilmektedir. Yamuk üyelik fonksiyonunun grafiksel gösterimi de Şekil 30'de verilmiştir.

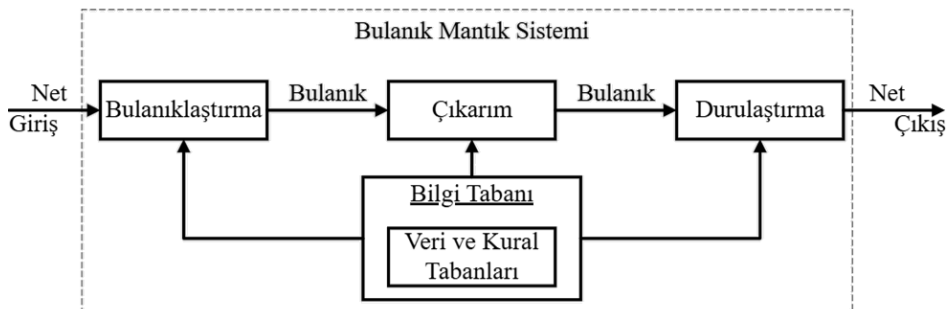
$$\mu_A = \mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} (x - a)/(b - a), a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ (d - x)/(d - c), c \leq x \leq d \\ 0, x > d \vee x < a \end{cases} \quad (46)$$

En sık kullanılan fonksiyonlardan biri olan yamuk üyelik fonksiyonunun tercih edilme sebepleri arasında ise işlem basitliği ve etkinliği sayılabilir (Emikönel, 2022).

### 5.3. Bulanık Mantık Çalışma Prensipleri

Bulanık mantık sistemi bulanıklaştırma, bilgi tabanı, çıkarım ve durulaştırma birimlerini içermektedir. Bilgi tabanı ise kontrol edilecek sistemin verilerini ve bu veriler ışığında oluşturulmuş kural tabanını içermektedir. Kural tabanında klasik "If-Then-Else" yapısıyla oluşturulmuş kurallar bulunmaktadır. Bulanık mantık sisteminin blok diyagramı Şekil 31'de gösterilmiştir.

Bulanık sisteminin ilk birimi olan bulanıklaştırma biriminde girişten alınan veriler üyelik fonksiyonları sayesinde bulanık kümelerle birleştirilir. Bu işlem ile giriş değerlerinin üyelik dereceleri belirlenir. Bulanıklaştırma biriminden alınan bu bulanık değerler kural tabanında bulunan kurallar vasıtasıyla çıkarım biriminde yine bulanık sonuçlara dönüşür. Ardından bu sonuçların kontrol edilecek sistemde kullanılabilmesi için bulanıklığının giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bulanık sonuçlar durulaştırma biriminde net çıktıya dönüştürülür (Emikönel, 2022; Ödük, 2019).



Şekil 31. Bulanık mantık sistemi blok diyagramı

### 5.3.1. Bulanıklaştırma

Bulanık mantık sisteminin ilk bileşeni bulanıklaştırma birimidir. Kontrol edilecek sistemden alınan veriler ait oldukları bulanık kümelerle atanır. Bulanık kümelerle ait olma derecelerini ifade eden bulanık sayılar bulanıklaştırma biriminde elde edilir (Emikönel, 2022; Ödük, 2019).

### 5.3.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı, veri ve kural tabanlarını içermektedir. Giriş ve çıkış bilgileri arasında kural tabanında bulunan kurallar aracılığıyla bağlantı kurulmaktadır. Veri tabanında çıkarım ve kural tabanlarının bilgileri yer almaktadır. Kavramsal terimler ‘‘Eğer-İse’’ ifadeleri ile ilişkilendirilir. Ayrıca girdi sayısı birden fazla olan sistemlerde girdiler ‘‘Ve-Veya’’ ifadeleri ile birbirlerine bağlanır (Doğan, 2012; Emikönel, 2022). Kural tabanında kullanılan klasik ‘‘If-Then-Else’’ yapısının temelini klasik önermelerden ‘‘ise’’ işleci oluşturur. Bu yapı klasik mantıktaki ‘‘ $p$  ise  $q$ ’’ koşullu önermesinden ortaya çıkmaktadır. İki önerme arasındaki bağlantıyı ifade eden bu ‘‘ise’’ kalıbında birinci önerme koşulu ikinci önerme ise sonucu ifade eder. İse kalıbının doğruluğu için hem koşul hem de sonuç önermelerinin doğruluk değerlerine bakılmalıdır. Birinci önermenin  $p$  ikinci önermenin ise  $q$  kabul edildiği durumda ise kalıbı  $p \rightarrow q$  şeklinde gösterilir. Bu durumda ‘‘ise’’ bağlacının doğruluk tablosu Tablo 9’da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** ‘‘İse’’ bağlacının doğruluk tablosu

| $p$ | $q$ | $p \rightarrow q$ |
|-----|-----|-------------------|
| 1   | 1   | 1                 |
| 1   | 0   | 0                 |
| 0   | 1   | 1                 |
| 0   | 0   | 1                 |

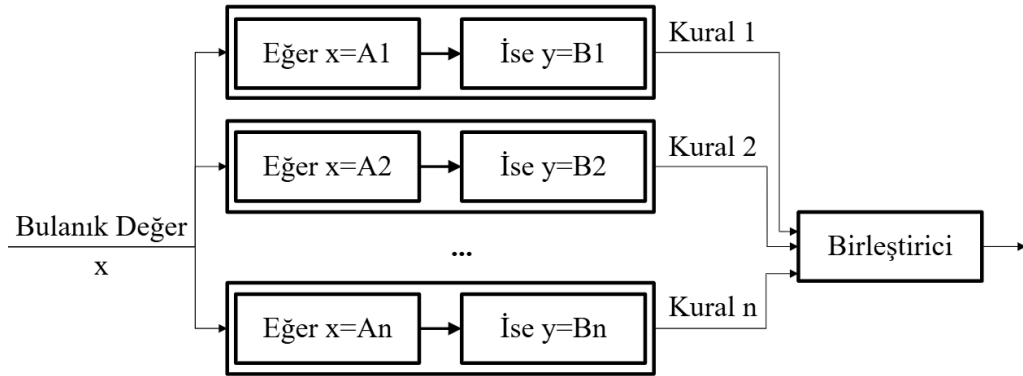
İki girişli ( $A$ ,  $B$ ), tek çıkışlı ( $C$ ) bir sistemde kural ‘‘Eğer  $A=x$  ve  $B=y$  ise o halde  $C=z$ ’dir.’’ şeklinde tanımlanabilir. Burada  $A$  ve  $B$  değişkenlerinin aldığı değerlere göre  $C$  değişkeninin bulanık değeri belirlenmektedir (Emikönel, 2022; Osmanoglu, 2024).

Bulanık çıkarım sistemlerinin temelini oluşturan bulanık kurallar insan düşünce yapısıyla benzerdir. Oluşturulan kurallar sayesinde muhakeme yapılarak bir sonuca varılma işlemi de çıkarım biriminde yapılmaktadır (Doğan, 2012; Yılmaz & Şahin, 2023).

### 5.3.3. Çıkarım

Çıkarım kurallarını belirlemeye dayalı olan çıkarım birimi mantıksal kararlar vererek tanımlanan kuralları bulanık çıktıya dönüştüren birimdir (Mustafa, 2023).

Çıkarım birimi veri tabanındaki üyelik fonksiyonu ve sınır değerleri bilgileri ile kural tabanındaki klasik “If-Then-Else” yapısıyla oluşturulmuş kuralları kullanarak karar vermektedir. Bu nedenle çıkarım birimi karar verme birimi olarak da adlandırılmaktadır (Ödük, 2019). Şekil 32’de bulanık kural tabanlı çıkarım sisteminin içyapısı ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



**Şekil 32.** Bulanık kural tabanlı çıkarım sistemi yapısı

Çıkarım sisteminde birden çok kuralın ilişkilendirilmesi yapılan birleştirici biriminde uygulanan pek çok farklı çıkarım yöntemi bulunmaktadır (Ödük, 2019). Bu yöntemler Tablo 10’da gösterilmiştir.

**Tablo 10.** Çıkarım yöntemleri

| Bulanık Çıkarım Yöntemi | $\mu A \rightarrow B(x, y)$                                                   |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Mamdani (Max-Min)       | $\text{Min}(\mu A(x), \mu B(y))$                                              |
| Max-Prod                | $(\mu A(x) \times \mu B(y))$                                                  |
| Zadeh                   | $\text{Max}[\text{Min}(\mu A(x), \mu B(y))], 1 - \mu A(x)$                    |
| Lukasiewics             | $\text{Min}(1, 1 - \mu A(x) + \mu B(y))$                                      |
| Gödel                   | $1 \rightarrow \mu A(x) \leq \mu B(y)$<br>$\mu B(y) \rightarrow \text{diğer}$ |
| Kleene-Dienes           | $\text{Max}(1 - \mu A(x), \mu B(y))$                                          |
| Sharp                   | $1 \rightarrow \mu A(x) < \mu B(y)$<br>$0 \rightarrow \text{diğer}$           |

Bulanık mantık için sıklıkla kullanılan iki yöntem Mamdani ve Takagi-Sugeno-Kang (Sugeno) olarak adlandırılan yöntemlerdir. Mamdani, Sugeno'ya göre daha yaygın kullanılmaktadır. Bunun nedeni problem ayırt etmeden sonuç verebilmesidir. Sugeno yöntemi ise değişken sayısı daha az olan sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz & Şahin, 2023). Mamdani ve Sugeno yöntemleri dışında Larsen ve Tsukamoto yöntemleri de mevcuttur (Doğan, 2012; Emikönel, 2022).

Mamdani yönteminde çıkış üyelik fonksiyonları giriş üyelik fonksiyonları ile benzerdir. Sugeno yönteminde ise çıkış için gözlemlenebilir fonksiyonlar veya girdi değerlerinin doğrusal denklemleri tanımlanır. Bu durum Sugeno yöntemi ile daha farklı akıl yürütme tekniklerinin kullanılmasına olanak sağlayarak daha esnek bir kontrol yapısı kazandırır. Bu yöntemde, nihai çıktı genellikle tüm kuralların çıktılarının ağırlıklı ortalamasına eşittir (Nada & Bayoumi, 2024; Samavat vd., 2023). Bu ağırlıklı ortalama Denklem 47 ile hesaplanabilir.

$$\text{Son Çıktı} = \sum_{i=1}^n w_i z_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (47)$$

Burada  $n$  kural sayısı,  $w_i$   $i$ . kuralın ağırlığı,  $z_i$   $i$ . kuralın çıkış değeridir.

Kural sayısı kontrolün doğru yapılabilmesi için oldukça önemlidir. Tüm durumları kapsayan yeterli sayıda kural tanımlanmalıdır. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları sayılarının çarpımı ile de kural sayısı belirlenebilmektedir.

Mamdani yöntemi ile algoritma,  $n$  adet rastgele sayı üretir. Burada  $n$  sayısı kural sayısına eşittir. Üretilen sayılar, kuralların "o halde" kısmına karşılık gelir. Her bir kural için, birinci ve ikinci giriş üyelik fonksiyonları ile çıkış üyelik fonksiyonu belirlenir. Her kural için farklı bir çıkış üyelik fonksiyonu atanır. Bu yöntemdeki kural gösterimi Denklem 48 ile ifade edilebilir.

$$\text{Eğer } MF(i) \text{ ve } MF(j) \text{ ise, o halde } MF(P(a)) \quad (48)$$

Burada  $i$  birinci giriş üyelik fonksiyonu,  $j$  ikinci giriş üyelik fonksiyonu ve  $P(a)$  ise  $b$ 'inci üretilen çıkış üyelik fonksiyonunu ifade eder.

Sugeno yönteminde ise her kural için  $P(b)$  şeklinde çıkış üyelik fonksiyonları atanır. Üretilen çıkış değerleri tamsayıdır. Sugeno için kural yapısı Denklem 49 ile gösterilebilir.

$$\text{Eğer } MF(i) \text{ ve } MF(j) \text{ ise, o halde } MF(z). \text{ Ve } MF(z) = P(b) \quad (49)$$

Burada da  $i$  birinci giriş üyelik fonksiyonu,  $j$  ikinci giriş üyelik fonksiyonunu ifade etmektedir.  $P(b)$  ise çıkış üyelik fonksiyonuna karşılık gelen  $b$ 'inci üretilen tamsayı değeridir (Samavat vd., 2023).

Bulanık mantık sisteminde en yaygın kullanılan iki yöntem olan Mamdani ve Sugeno yöntemlerinde bulanıklaştırma, kural tabanı, çıkarım ve durulaştırma birimlerinin özeti ve yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 11'de gösterilmiştir.

**Tablo 11.** Mamdani ve Sugeno yöntemlerinin karşılaştırılması

| Birimler        | Çıkarım Yöntemleri                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | Mamdani                                                                                                                                                                                                                          | Sugeno                                                                                                                                                         |
| Bulanıklaştırma | Sistemden alınan kesin girdiler üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık setlere dönüştürülür.                                                                                                                                  | Sistemden alınan kesin girdiler üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık setlere dönüştürülür.                                                                |
| Kural tabanı    | Kural tabanında bulunan bulanık kurallar, bulanık giriş setlerine uygulanır. Bulanık giriş ve kural öncülleri arasındaki eşleşme derecesi değerlendirilir. Bu işlem için genellikle minimum veya çarpım operatörleri kullanılır. | Kural tabanında bulunan bulanık kurallar, bulanık giriş setlerine uygulanır. Kuralların sonuçları giriş değişkenlerinin doğrusal veya sabit bir fonksiyonudur. |
| Çıkarım         | Kural çıktıları bulanıktır ve bu bulanık çıktılar maksimum veya toplam gibi operatörlerle tek bir bulanık sete dönüştürülür.                                                                                                     | Tüm kuralların çıktıları genellikle ağırlıklı ortalama yöntemiyle birleştirilir.                                                                               |
| Durulaştırma    | Birleştirilmiş bulanık çıktı seti, kesin çıktı değerine dönüştürülür. Bunun için kullanılan en yaygın yöntem ağırlık merkezi yöntemidir.                                                                                         | Ağırlıklı ortalama yöntemi sayesinde çıktı zaten kesin bir değer olarak elde edilmiştir.                                                                       |
| Avantajlar      | Dilsel yorumlana bilirlik.<br>Doğrusal olmayan eşleme yeteneği.                                                                                                                                                                  | Hesaplama kolaylığı.<br>Öğrenme verimliliği.                                                                                                                   |
| Dezavantajlar   | Hesaplama karmaşıklığı.<br>Çıktı durulaştırma belirsizliği.                                                                                                                                                                      | Azaltılmış yorumlana bilirlik.<br>Sınırlı ifade yeteneği.                                                                                                      |

#### 5.3.4. Durulaştırma

Çıkarım biriminden alınan bulanık çıktıların net, kesin bir değere dönüştürülme işlemine durulaştırma denir (Yadav vd., 2024).

Mamdani yöntemi ile kullanılan çok sayıda bulanık kural ve karmaşık üyelik fonksiyonları, hesaplama açısından zorluk oluşturabilmektedir. Ayrıca bulanıklaştırma işleminde zaman zaman belirsizlikler veya yanlışlıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum sistemin performansını da zayıflatabilir (Tang & Ahmad, 2024). Ancak durulaştırma aşaması Mamdani yönteminin gerektirdiği hesaplamayı büyük ölçüde basitleştirerek işlem verimliliğini artırır. Bu sayede performans kaybı yaşanmaz (Salım, 2021).

Bulanık kümelerin kontrol edilecek sistemlerde bir karşılığı olmadığı için gerekli durulaştırma yöntemleri ile bu durulaştırma işlemi gerçekleştirilir (Altaş & Sharaf, 2007a; Ödük, 2019). Ortalama ağırlık ve ağırlık merkezi en sık kullanılan

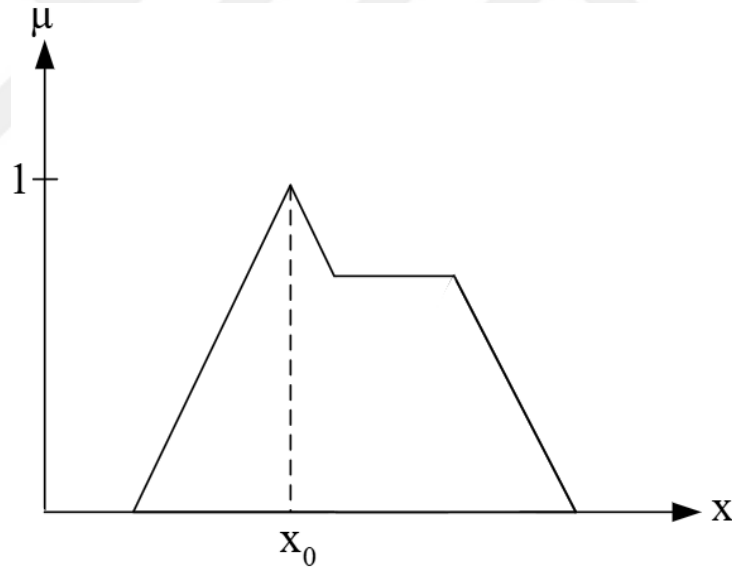
durulaştırma yöntemleridir. Bunların yanında oldukça farklı durulaştırma yöntemleri de mevcuttur (Tang & Ahmad, 2024; Yadav vd., 2024).

#### 5.3.4.1. En Büyük Üyelik Yöntemi

Maksimum üyelik olarak da adlandırılan bu yöntemde üyelik fonksiyonu incelenir. En büyük bulanık değeri seçilir. Karmaşık bir matematiksel işleme ihtiyaç duyulmadan bu yöntem gerçekleştirilebileceği için uygulaması basittir (Ataşoğlu, 2019; Ödük, 2019). Gerçekleştirilen işlem Denklem 50 ile gösterilebilir. En büyük üyelik yönteminde  $x_0$  değerinin belirlenmesinin şematik gösterimi Şekil 33’de gösterilmektedir.

$$\mu_C(x_0) \geq \mu_C(x), x \in X \quad (50)$$

Burada  $x$  üyelik değerini ifade ederken  $C$  ise çıkış üyelik fonksiyonlarının birleşimini ifade etmektedir (Emikönel, 2022).



Şekil 33. En büyük üyelik yöntemi şematik gösterimi

#### 5.3.4.2. En Büyüklerin Ortalaması Yöntemi

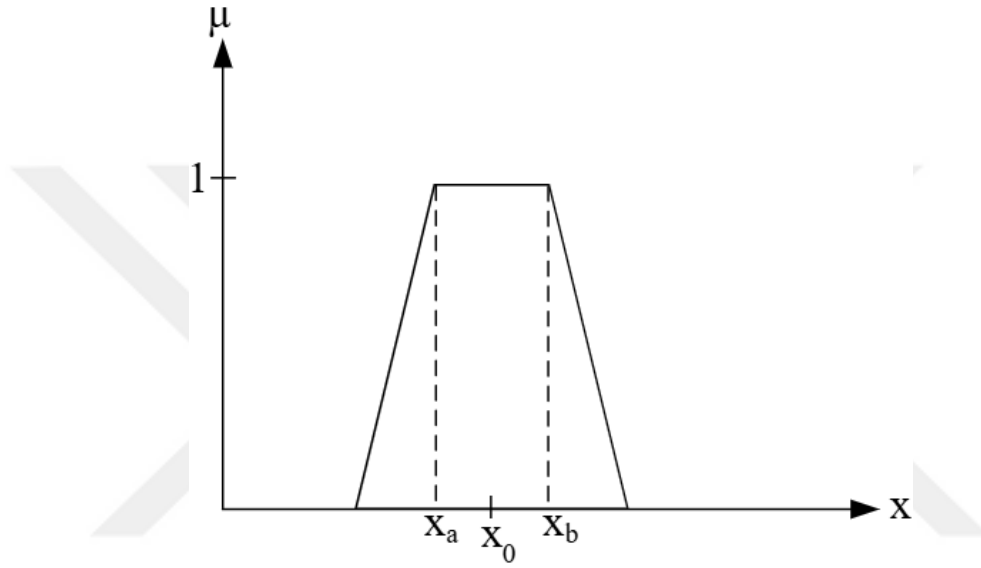
Temelde en büyük üyelik yöntemini içeren bu yöntemde en büyük bulanık değeri sağlayan birden fazla nokta bulunması durumunda bu noktaların ortalaması alınmaktadır (Doğan, 2012; Emikönel, 2022). Bu yöntemde kullanılan işlemin genel formu Denklem 51 ile gösterilmiştir. Uygulanan işlemin iki adet en büyük değere sahip

olması durumu için şematik gösterimi Şekil 34’de verilmiştir. Genel forma göre Şekil 34’de bulunan şematik gösterimin örnek işlemi Denklem 52 ile gösterilmiştir.

$$x_0 = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (51)$$

$$x_0 = \frac{x_a + x_b}{2} \quad (52)$$

Burada  $n$  en büyük değeri sağlayan nokta sayısını ifade etmektedir.

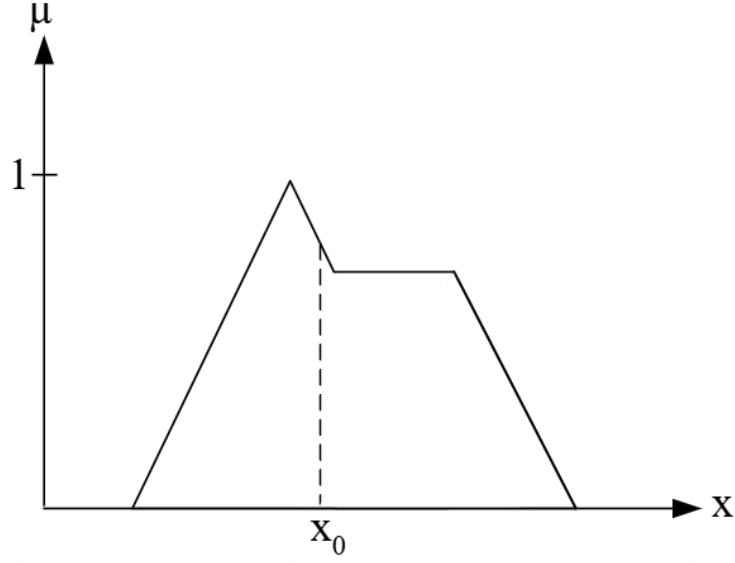


**Şekil 34.** En büyüklerin ortalaması yöntemi şematik gösterimi

#### 5.3.4.3. Ağırlık Merkezi Yöntemi

Centroid ya da alan merkezi olarak da bilinen bu yöntem özellikle Mamdani çıkarım sistemlerinde en yaygın kullanılan durulaştırma yöntemidir. Yöntem, üyelik fonksiyonlarının ağırlık merkezinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır (Bulut, 2020; Emikönel, 2022). Ağırlık merkezi Denklem 53 ile hesaplanır ve durulaştırma biriminden elde edilen net çıktı olarak kullanılır. Çıkışa ait keskin değer, işlenen kurallarla elde edilen bulanık kümelerin altında kalan alanların yatay eksen üzerindeki ağırlık merkezi olarak tanımlanır (Ödük, 2019). Bu yöntemde geometrik alanlarının merkezinin belirlenmesini açıklayan şematik gösterim Şekil 35’de gösterilmiştir.

$$x_0 = (\int x \mu_c(x) dx) / (\int \mu_c(x) dx) \quad (53)$$



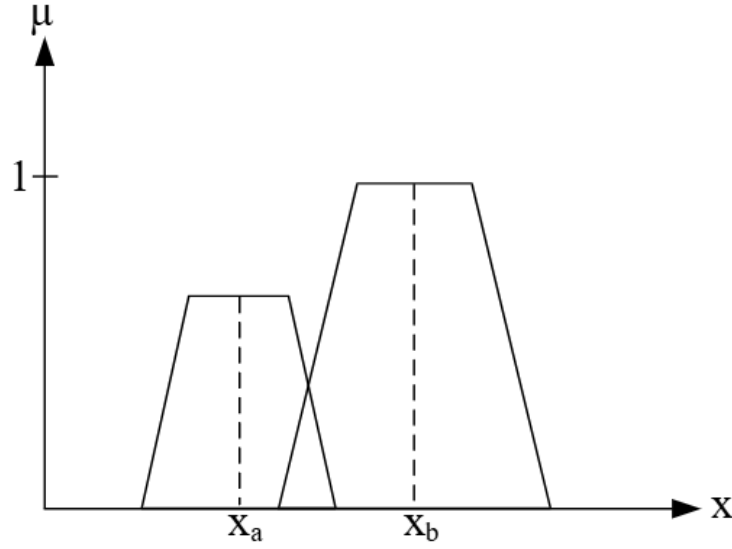
**Şekil 35.** Ağırlık merkezi yöntemi şematik gösterimi

#### 5.3.4.4. Ortalama Ağırlık Yöntemi

Ortalama ağırlık yöntemi simetrik üyelik fonksiyonlarına sahip sistemler için kullanılabilir ve genellikle Sugeno yöntemi ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yöntemde her bir fonksiyonun bulanık değeri ile ağırlıklarının çarpımlarının toplamının, ağırlıkların toplamına bölünmesiyle net çıktı elde edilmektedir (Bulut, 2020; Mustafa, 2023). Yöntemde kullanılan bu işlemin matematiksel gösterimi Denklem 54’da verilmiştir. Ortalama ağırlık yönteminin şematik gösterimi Şekil 36’da gösterilmiştir. Şekil 36’da gösterilen iki adet fonksiyona sahip bir sistem için ortalama ağırlık yöntemi ile elde edilecek çıktı Denklem 55 ile hesaplanmaktadır.

$$x_0 = (\sum_{i=1}^n x_i \mu_C(x_i)) / (\sum_{i=1}^n \mu_C(x_i)) \quad (54)$$

$$x_0 = (x_a \mu_C(x_a) + x_b \mu_C(x_b)) / (\mu_C(x_a) + \mu_C(x_b)) \quad (55)$$



Şekil 36. Ortalama ağırlık yöntemi şematik gösterimi

#### 5.4. Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları

Sistemin kullanıldığı ortam, durum ve uygulamaya göre çeşitli avantaj ve dezavantajlar oluşabilmektedir (Yılmaz & Şahin, 2023). Bulanık mantığın diğer sistemlere göre avantaj ve dezavantajları bu bölümde verilmektedir.

Avantajlar (Bulut, 2020; McNeill & Thro, 1994);

- Daha az değer, kural ve karar gereklidir.
- Kolay uygulanabilir ve anlaşılabilir.
- Tasarımı kolaylığı sayesinde maliyeti azdır.
- Sayısal değil dilsel değişkenler kullandığı için insan düşünce yapısına benzer.
- Çıktı ve girdi arasında ilişki kurarak daha doğru ve kararlı bir yapı sağlar.
- Güvenilirdir ve yüksek verimliliğe sahiptir.
- Esnek yapısı sayesinde sisteme birden fazla işlevsellik katılabilir.
- Bilgi edinimini ve temsilini basitleştirirler.
- Basitliği sayesinde daha önce çözülmemiş sorunların çözümüne olanak tanır.
- Doğrusal olmayan sistemlerle de çalışabilir.
- Kesinlik içermeyen, belirsiz bilgilere karşı toleranslıdır.
- Bozuk ve gürültülü sistemlerden etkilenmez.

- Kontrol edilecek sistemin karmaşıklığı çalışma hızını etkilemez.
- Daha fazla sağlamlığa sahiptir.
- Farklı kontrol yöntemleriyle hibrit bir yapıda çalışabilir.

Dezavantajlar (Emikönel, 2022; McNeill & Thro, 1994);

- Kural tanımlamak zor ve zaman alıcıdır.
- Kullanılacak sisteme özgün bir tasarım gerektirdiğinden uzman bilgi ve deneyimine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Geleneksel yöntemlerden daha kolay uygulanabilir olsa da faaliyete geçmeden önce daha fazla benzetim çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Üyelik fonksiyonlarının değerlerinin belirlenmesi için kesin bir yöntem bulunmadığından deneme-yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum tasarım aşamasında zaman kaybına yol açmaktadır.
- Denetlenebilirlik, gözlemlenebilirlik ve kararlılık analizleri klasik kontrol sistemlerinden farklı teorik yaklaşımlar ve hesaplama teknikleri içerdiği için özel yöntemler gerektirir.

### 5.5. Bulanık Mantık ile MPPT Algoritması

Bulanık mantık ile kurulan MPPT algoritmalarının değişken koşullarda da güvenilir sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni bulanık mantık için oluşturulan hata ve kural tabanlarının sisteme uygun olarak tasarlanmasıdır. Diğer kontrol yöntemlerinde kontrol edilecek sistemin tamamen tanımlanması gerekirken bulanık mantık yöntemi sistemin giriş ve çıkışı arasındaki bağlantıyı kendisi irdelleyerek ek tanımlamaya ihtiyaç duymamaktadır. Bu durum FV sistemlerde bulanık mantık kullanımını artırmaktadır (Mustafa, 2023).

Bulanık mantık ile kurulan MPPT algoritmalarında çoğunlukla hata (E) ve hata değişimi ( $\Delta E$ ) olarak iki giriş kullanılır. Çalışma gerilimine göre gücün değişmediği nokta en yüksek çalışma noktası olarak kabul edilmektedir. Bu durumda hata ve hatanın değişimi sırasıyla Denklem 56 ve 57 ile ifade edilebilir.

$$E(k) = (P(k) - P(k - 1)) / (V(k) - V(k - 1)) \quad (56)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (57)$$

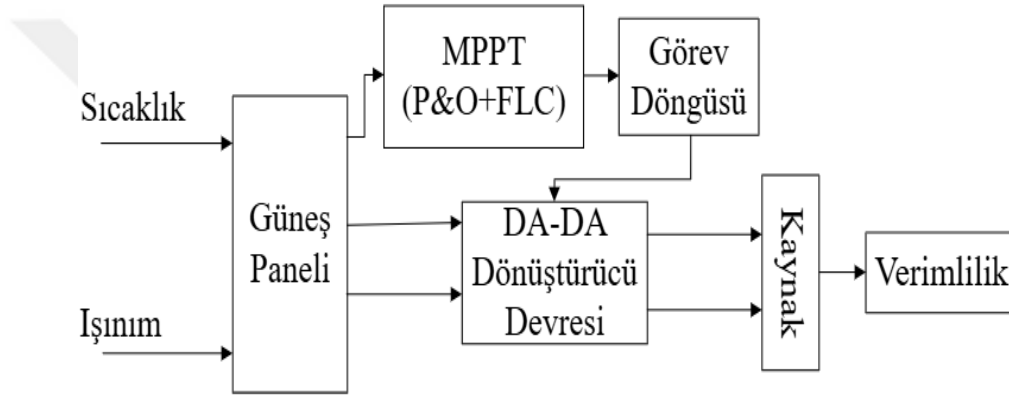
Burada  $k$  ile anlık durum,  $k-1$  ile bir önceki durum ifade edilmektedir (Menzri vd., 2024; Mustafa, 2023).

FV sistemlerin lineer olmayan karakteristiği sebebiyle karmaşık denklemler ortaya çıkmaktadır. Bulanık mantığın kural tabanı ve üyelik fonksiyonları sayesinde bu karmaşık denklemlere ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ancak sistemin doğru bir şekilde çalışabilmesi için kural tabanı ve üyelik fonksiyonlarının uygun şekilde seçilerek düzenlenmesi gerekmektedir. Uygun düzenleme sonucunda bulanık mantık ile MPPT algoritması pratik ve hassas bir takip sağlayabilmektedir (Mustafa, 2023).



## 6. SİSTEM TASARIMI

Güneş panellerinden doğrudan elde edilen doğru akım (DA) çıkış gerilimi, genellikle kullanım amacı doğrultusunda yeterli seviyede yüksek değildir. Bu nedenle, düşük DA gerilimi, yükü karşılayacak seviyeye yükseltilmeli ya da alternatif akıma (AA) dönüştürülmelidir. Güneş enerjisi sistemlerinde bu işlemler hem sistemin genel verimliliğini artırmak hem de şebekeye veya doğrudan yüke uygun enerji sağlamak için büyük önem taşır. Şekil 37’de bu çalışmada kullanılan sistem mimarisinin açıklanması için bulanık mantık tabanlı bir GES blok diyagramı verilmiştir.



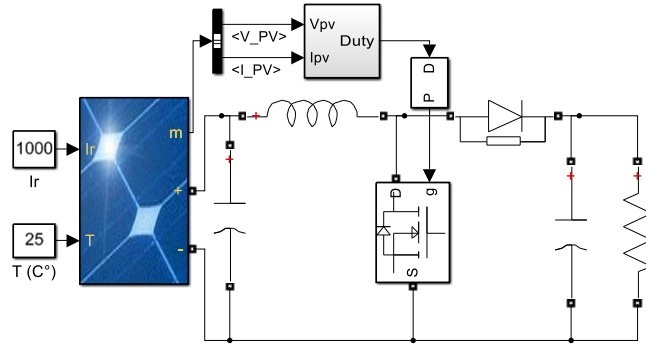
Şekil 37. GES blok diyagramı

FV sistemlerin enerji üretim kapasitesi; ortam sıcaklığı, güneş ışınımı şiddeti, panel yüzey sıcaklığı ve diğer çevresel faktörlere bağlı olarak sürekli değişiklik göstermektedir. Bu değişken koşullar altında, sistemin mümkün olan en yüksek enerji verimiyle çalışabilmesi için FV sistemin MPP’de çalışması gerekmektedir. Sistemin MPP’de çalışması güneş panelinin üretebileceği maksimum gücün sistem tarafından alınmasını sağlar ve enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde artırır.

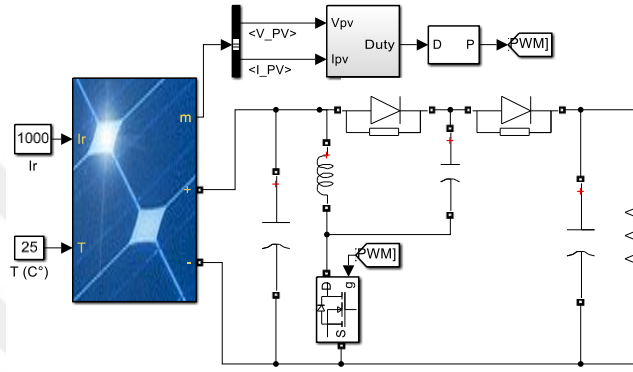
Şekil 37’de verilen mimaride de amaç, değişen çevresel koşullara rağmen güneş panelinden elde edilen enerji miktarını maksimum düzeyde tutmaktır. Bu hedef doğrultusunda, çalışmada P&O yöntemi ve bulanık mantık tabanlı modern yaklaşım kullanılarak bir MPPT algoritması geliştirilmiştir. P&O algoritması; yapısının basit olması, düşük maliyetle uygulanabilmesi ve donanım gereksinimlerinin az olması gibi avantajları nedeniyle güneş enerji sistemlerinde en çok tercih edilen MPPT

yöntemlerinden biridir. Temel prensibi, sistem çıkışındaki küçük değişimlere bakarak çalışma noktasını maksimum güce doğru ayarlamak üzerine kuruludur.

Çalışmada MATLAB/Simulink ortamında bir FV sistemin MPPT ve verimlilik ölçümü amacıyla benzetim modelleri oluşturulmuştur. Bu benzetim modeller Şekil 38’de verilmiştir. Çalışmada iki farklı tip DA-DA dönüştürücü modelinin analizi yapılmaktadır. Bu nedenle aynı panel ve kontrol mimarisi iki dönüştürücü tipi için de kullanılmak üzere iki ayrı model tasarlanmıştır. Modellerde öncelikle giriş parametreleri olarak  $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınımı ve  $25^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığı kullanılmıştır. FV sistemde, her biri 54 hücreden oluşan modüllerden 5 seri bağlı ve bu serilerden 5 paralel bağlı olacak şekilde toplam 25 modül kullanılmıştır. Modül verilerine göre sistemin maksimum gücü  $1575.7875 \text{ W}$ , açık devre gerilimi  $204 \text{ V}$  ( $40.80 \text{ V} \times 5$ ), kısa devre akımı  $9.98 \text{ A}$ , maksimum güç noktası gerilimi  $166.75 \text{ V}$  ( $33.35 \text{ V} \times 5$ ) ve maksimum güç noktası akımı  $9.45 \text{ A}$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca, açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı  $-0.29 \text{ (\%/}^\circ\text{C)}$  ve kısa devre akımı sıcaklık katsayısı  $0.05 \text{ (\%/}^\circ\text{C)}$  olarak tanımlanmıştır. FV panel çıkışındaki gerilim ve akım sinyalleri hem MPPT algoritması olarak kullanılan P&O yöntemine hem de bir DA-DA dönüştürücüsüne yönlendirilmiştir. MPPT algoritması için kullanılan FLC yöntemi sayesinde de P&O yönteminin performansı artırılmış ve FV panelin MPP’de çalışması amacıyla bir görev oranı (duty-cycle) üretilmiştir. Bu görev oranı kullanılan DA-DA dönüştürücüdeki MOSFET anahtarının kontrolünü sağlamıştır. İki sistemde de kullanılan dönüştürücüler FV panel çıkışındaki gerilimi yükseltmektedir. Dönüştürücü çıkışından elde edilen akım ve gerilim bilgisi ve bu verilerin çarpımıyla elde edilen güç verisi kullanılarak sistemin anlık verimliliği belirlenmiştir. Çalışma boyunca bu veriler üzerinden FV sistemin enerji dönüşüm performansı da değerlendirilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 38.** Tasarlanan güneş enerji sistemi (a) klasik yükselten dönüştürücü ile (b) süper-lift Luo dönüştürücü ile

Çalışmada iki farklı tipte gerilim yükselten dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücülerden biri FV sistemlerde sıklıkla tercih edilen klasik yükselten dönüştürücüdür. Kullanılan diğer dönüştürücü ise verimliliği daha yüksek olan ve klasik dönüştürücülerden farklı gerilim yükseltme tekniği kullanan süper-lift Luo dönüştürücüdür.

FV panel çıkışındaki gerilim dalgalanmalarını bastırmak ve bu gerilimi kararlı hâle getirmek amacıyla, dönüştürücü girişine bir adet paralel kondansatör ( $C_{FV}$ ) eklenmiştir. Bu paralel kondansatörün değeri Denklem 58 ile hesaplanmaktadır.

$$C_{FV} = \frac{I_{\phi}}{8 \times f_a \times \Delta V_{\phi}} \quad (58)$$

Dönüştürücülerin kontrolü için tasarlanan bulanık mantık tabanlı MPPT kontrolcünün içyapısı da Şekil 39'da gösterilmiştir. Panelden alınan akım ve gerilim verileri hafıza blokları kullanılarak bir önceki ( $k-1$ ) durum ile karşılaştırılır. Aynı zamanda akım ve gerilim verileri ile hesaplanan güç değeri de bir önceki durum ile

The diagram shows a PLL system with a frequency divider. The input signal  $E$  is split: one path goes through a frequency divider (represented by a square with a downward arrow) to produce  $CE$ , and the other path goes directly to a summing junction. The divider's output  $CE$  is also multiplied by a phase noise signal  $PN$  before being summed with  $E$ . The summing junction's output is the  $in$  of a phase-locked loop block, which contains a frequency divider symbol. The  $out$  of this block is summed with a feedback signal from a delay block (square with a downward arrow). The final output is divided by  $D$ .

### 6.1. DA-DA Yükselten Dönüştürücü

Yükselten dönüştürücünün genel yapısı hakkındaki bilgiler önceki bölümlerde (Bölüm 4.1.) verilmiştir. Bu kısımda ise kullanılan dönüştürücünün parametrelerinin hesabına değinilmiştir.

$$L = \frac{V_{\zeta} \times D \times (1-D)^2}{I_{\zeta} \times f_a \times \Delta I_L} \quad (59)$$

Çıkış gerilimindeki dalgalanmayı ise dönüştürücü çıkışına paralel bağlanmış olan kondansatör azaltmaktadır. Bu kondansatör değerinin hesaplanması da Denklem 60'da gösterilmiştir.

$$C = \frac{I_{\phi} \times (1-D)}{f_a \times \Delta V_{\phi}} \quad (60)$$

Yükselten dönüştürücü devre elemanlarının değerlerinin hesaplamasında kullanılan parametreler Tablo 12'de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** Yükselten dönüştürücü devrenin hesaplama parametreleri

| Parametre         | Değer   |
|-------------------|---------|
| $V_g$             | 186,6 V |
| $V_{\phi}$        | 245,8 V |
| $D$               | 0.2     |
| $f_a$             | 5 kHz   |
| $I_{\phi}$        | 32,78 A |
| $\Delta V_{\phi}$ | 12,29   |

Tablo 12'de verilen parametreler ve Bölüm 4.1'de verilen yükselten dönüştürücüye ait teknik analizler kullanılarak hesaplanan yükselten dönüştürücü parametreleri ise Tablo 13'de verilmiştir.

**Tablo 13.** Yükselten dönüştürücü devre parametreleri

| Parametre | Hesaplanan Değer |
|-----------|------------------|
| $C_{FV}$  | 833 $\mu$ F      |
| $L$       | 0,1 mH           |
| $C$       | 4266 $\mu$ F     |
| $R$       | 7,5 $\Omega$     |

#### 6.1.1. Yükselten Dönüştürücü için MPPT Algoritması

Yükselten dönüştürücü kullanılan FV sistemde tasarlanan FLC sistemin temeli, FV dizinin gerilimini küçük miktarda değiştirerek elde edilen güç çıkışını ölçmeye dayanmaktadır. Güç artarsa gerilim değişimi de aynı yönde devam eder. Ancak gücün azalması durumunda gerilimdeki değişimin yönü de tersine çevrilmektedir.

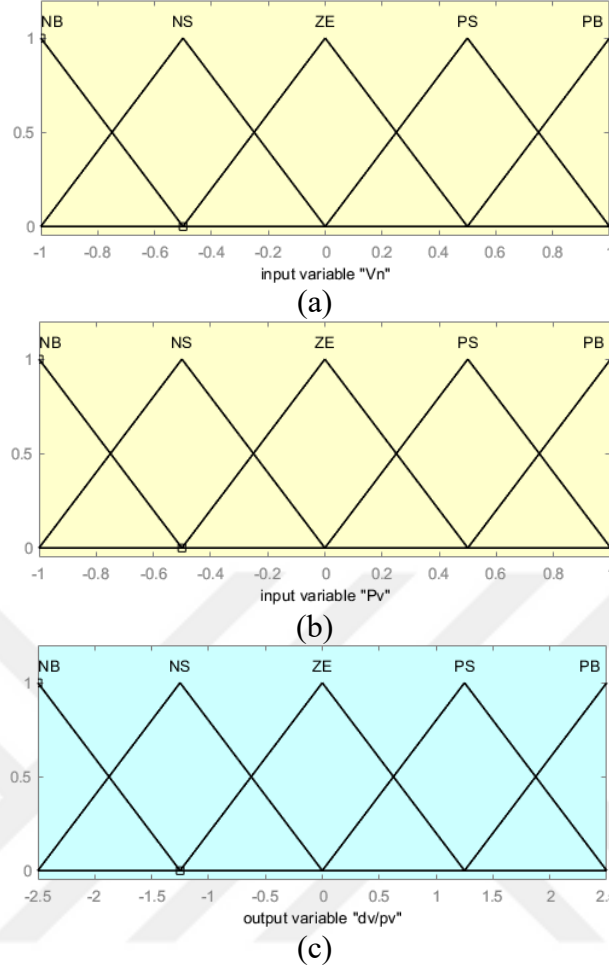
FLC sisteminin ilk adımı olan bulanıklaştırma aşaması kesin giriş değerlerinin, her bir giriş için tanımlanmış üyelik fonksiyonlarıyla ilişkilendirilerek bulanık girişlere dönüştürülmesini içerir. Bu aşamada denetleyici, gerçek zamanlı giriş verilerini alır ve bu verileri, daha önceden tanımlanmış üyelik fonksiyonlarıyla karşılaştırarak uygun bulanık değerleri üretir. Önerilen FLC sistemi için girişler, elde edilen bir  $k$  örneklem anındaki hata ve hata değişimidir. Yükselten dönüştürücü ile tasarlanan bu sistemde anlık olarak belirlenen bu hatayı elde etmek için FV panelin çıkış geriliminin ve gücünün değişimi Denklem 61 ve 62'deki gibi elde edilmektedir.

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1) \quad (61)$$

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (62)$$

Burada  $V(k)$  ve  $P(k)$  örnekleme anı  $k$ 'de FV panelin ölçülen çıkış gerilimi ve gücünü temsil etmektedir. Benzetim çalışmasının ilk adımında, sistemin başlatılması için hem çıkış gerilimi hem de güç parametrelerine rastgele değerlerle atanır. Çıkış gerilimindeki ve güçteki değişimler, görev döngüsünün artırılması, azaltılması veya sabit tutulması gerektiğine karar vermede kullanılır. Sabit adım büyüklüğünün sınırlamalarını aşmak amacıyla FLC adım büyüklüğünü üyelik fonksiyonları ve çıkarım kurallarıyla belirleyen değişken bir yapıya sahiptir. Bu yaklaşım, sistemin hem kararlı durum koşullarında hem de değişen çevresel koşullara tepkisinde performansını artırır.

Üyelik fonksiyonu değerleri, dilsel değişkenlere beş bulanık alt küme kullanılarak atanmıştır. Bunlar; NB (Negative Big-Negatif Büyük), NS (Negative Small-Negatif Küçük), ZE (Zero-Sıfır), PS (Positive Small-Pozitif Küçük) ve PB'dir (Positive Big-Pozitif Büyük). Sisteme uygun şekilde uyarlanabilen üyelik fonksiyonlarının şekli ve bulanık alt kümelerin bölünmesi Şekil 40'da verilmiştir.



**Şekil 40.** Üyelik fonksiyonları (a) gerilimdeki değişim (b) güçteki değişim (c) çıkış değişkeni

FLC sisteminin bir diğer adımı olan çıkarım aşamasında kullanılan ve “if-then” yapısından oluşan kural tabanı sistemin hangi kontrol eylemini gerçekleştireceğini belirlemesi için tasarlanmıştır. Yükselten dönüştürücü kullanılan sistem için tasarlanan kural tabanı Tablo 14’de verilmiştir.

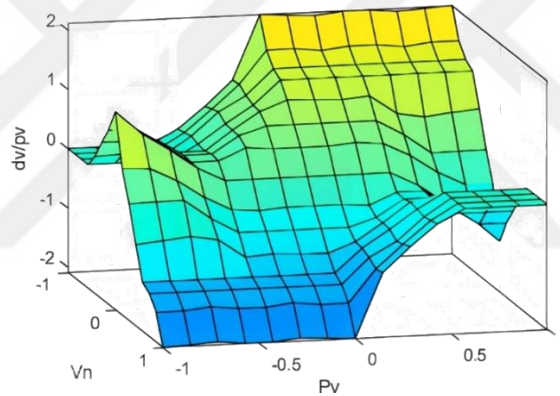
**Tablo 14.** Yükselten dönüştürücü için FLC kural tabanı

| $V_n/P_v$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-----------|----|----|----|----|----|
| NB        | ZE | ZE | PB | PB | PB |
| NS        | ZE | ZE | PS | PS | PS |
| ZE        | PS | ZE | ZE | ZE | NS |
| PS        | NS | NS | NS | ZE | ZE |
| PB        | NB | NB | NB | ZE | ZE |

Son olarak da durulaştırma aşaması için bulanık çıkış değerleri ilgili üyelik fonksiyonları aracılığıyla işlenerek kesin çıkış değerlerine dönüştürülür. Bu sistem için durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Denklem 63’de önceki görev döngüsündeki değişim ifade edilmektedir ve bu sayede görev döngüsü sistemin ihtiyaçlarına uygun şekilde ayarlanmaktadır.

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_{\Delta D} \Delta D_j}{\sum_{j=1}^N \mu_{\Delta D}} \quad (63)$$

Yükselten dönüştürücü için tasarlanan FLC yapısından elde edilen kontrol yüzeyi Şekil 41’de gösterilmektedir. Kontrol yüzeyi geniş bir bölgede kararlı ve düzgün bir yapıya sahiptir. Bu da yükselten dönüştürücünün FLC ile etkili bir şekilde kontrol edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 41. Yükselten dönüştürücünün FLC kontrol yüzeyi

## 6.2. Süper-lift Luo Dönüştürücü

DA-DA dönüştürücüler arasında yer alan pozitif süper-lift topolojileri, yüksek verimlilik sağlamalarıyla dikkat çekmektedir. Bu dönüştürücüler, çıkış gerilimini basamaklı bir yapıda ve geometrik bir ilerleme ile artıracak şekilde tasarlanmıştır. En önemli avantajlarından biri, gerilimdeki dalgalanmayı en aza indirerek kararlı bir çıkış sağlamalarıdır. Bu tez kapsamında önerilen sistem; bir anahtarlama elemanı, iki adet kondansatör, bir bobin, iki hızlı toparlanma özelliğine sahip diyot ve bir direnç yükünden oluşmaktadır. Bu topoloji sayesinde sistemin hedeflenen çıkış gerilimini elde etmekle birlikte GES’nin DA-DA yükselten dönüştürücüye oranla verimlilik artışı hedeflenmiştir.

Süper-lift Luo dönüştürücünün genel yapısı hakkındaki bilgiler önceki bölümlerde (Bölüm 4.5.) verilmiştir. Bu kısımda ise bu bilgilere ek olarak bobin değerinin hesabı Denklem 64’de verilmiştir.

$$L = \frac{V_g - [(2 \times V_i) \times (1 - d)]}{\Delta i_L \times f_a} \quad (64)$$

FV panelden elde edilen DA gerilimi yüksek çıkış gerilimi sağlamak amacıyla süper-lift Luo dönüştürücüye iletilmiştir. Girişte 333.9 V olan FV panel çıkışı, bobin ve hızlı toparlanma diyotlarıyla birlikte çalışan MOSFET anahtarlama elemanı sayesinde, Darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyaliyle 76 kHz frekansta kontrol edilerek anahtarlama yapılmıştır. Bu sayede enerji, kondansatörlerde kademeli olarak depolanır ve yükseltilerek çıkışa aktarılır. Devrede yer alan ek kondansatör-diyot kombinasyonları dönüştürücünün süper-lift karakteristiğini kazandırmakla birlikte çıkış gerilimini geometrik olarak artırmıştır. Çıkışta yer alan yük direnci üzerinden 1091 V gerilim ve 13.64 A akım elde edilerek sistemin hem yüksek verimli hem de kararlı çalışması sağlanır. PWM kontrol sinyali, sistemin çıkış değerlerini sürekli izleyerek gerilim kararlılığını sağlar ve sistemin değişken çevresel koşullara karşı hızlı tepki vermesine olanak tanır.

Süper-lift Luo dönüştürücü devre elemanlarının değerlerinin hesaplamasında kullanılan parametreler Tablo 15’de gösterilmiştir.

**Tablo 15.** Süper-lift Luo dönüştürücü devrenin hesaplama parametreleri

| Parametre | Değer   |
|-----------|---------|
| $V_g$     | 333,9 V |
| $V_\zeta$ | 1091 V  |
| $D$       | 0,56    |
| $f_a$     | 76 kHz  |
| $I_\zeta$ | 13,64 A |

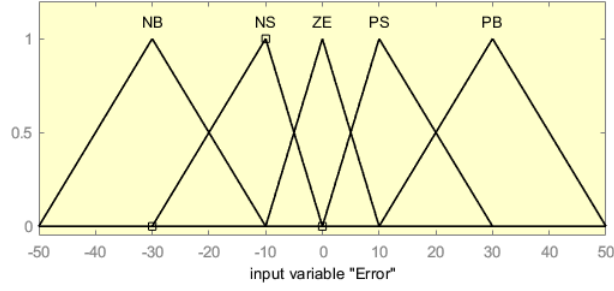
Tablo 15’de verilen parametreler ve Bölüm 4.5’de verilen dönüştürücü teknik analizleri kullanılarak hesaplanan süper-lift Luo dönüştürücü parametreleri ise Tablo 16’da verilmiştir.

**Tablo 16.** Süper-lift Luo dönüştürücü devre parametreleri

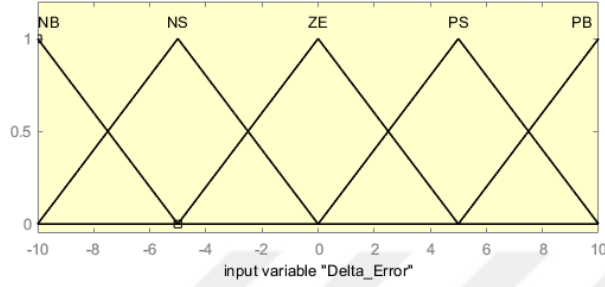
| Parametre | Hesaplanan Değer |
|-----------|------------------|
| $C_{FV}$  | 4400 $\mu$ F     |
| $L$       | 5 mH             |
| $C_1$     | 1100 $\mu$ F     |
| $C_2$     | 1100 $\mu$ F     |
| $R$       | 80               |

#### 6.2.1. Süper-lift Luo Dönüştürücü için MPPT Algoritması

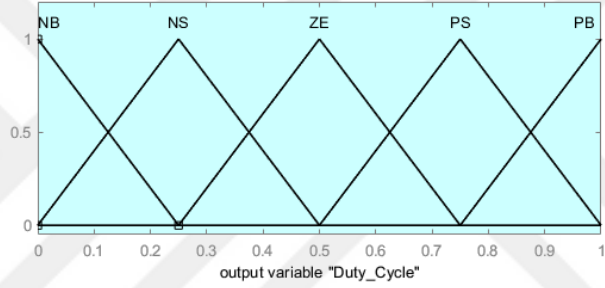
Süper-lift Luo kullanılan FV sistemde yükselten dönüştürücü kullanılan sistemden farklı olarak FLC sistemi FV panelden elde edilen akım ve gerilim verilerini kullanmaktadır. Bu veriler kullanılarak güç değeri hesaplanmış ve önceki güç değeri ile karşılaştırılarak güç değişimi elde edilmiştir. Gerilim farkları üzerinden elde edilen hata ve hata değişimi değerleri, panel tarafından üretilmiş ve bu değerler üyelik fonksiyonları aracılığıyla dilsel değişkenlere dönüştürülmüştür. Bu değişkenlerin her biri için üçgen şekilli üyelik fonksiyonları tasarlanmıştır. Her değişken için beş adet dilsel ifade kullanılmıştır. Bu dilsel değişkenler NB, NS, ZE, PS ve PB'dir. Tasarlanan üyelik fonksiyonları Şekil 42'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

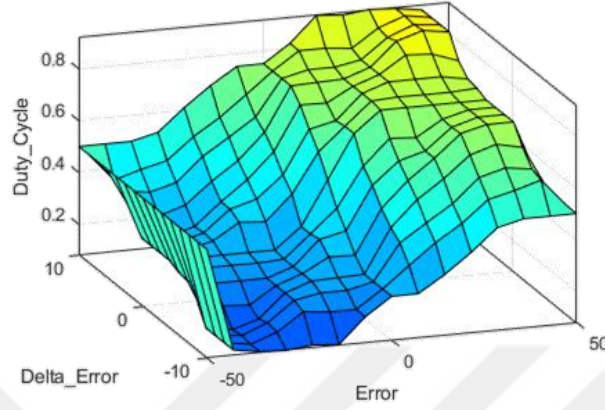
**Şekil 42.** Üyelik fonksiyonları (a) hata oranı (b) hata değişimi (c) görev döngüsü

FLC sisteminin giriş değişkenleri olan hata (Error) ve hata değişimi (Delta\_Error) için tanımlanan beşer adet üyelik fonksiyonu doğrultusunda, toplamda 25 adet kuraldan oluşan bir bulanık kural tablosu tasarlanmıştır. Bu kurallar, sistemin farklı durumlarına uygun kontrol kararlarının alınmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Süper-lift Luo dönüştürücü için tasarlanan kural tablosu Tablo 17’de verilmiştir.

**Tablo 17.** Süper-lift Luo dönüştürücü için FLC kural tabanı

| E/ $\Delta E$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|---------------|----|----|----|----|----|
| NB            | NB | NB | NS | NS | ZE |
| NS            | NB | NS | NS | ZE | PS |
| ZE            | NS | NS | ZE | PS | PS |
| PS            | NS | ZE | PS | PS | PB |
| PB            | ZE | PS | PS | PB | PB |

Süper-lift Luo için tasarlanan FLC yapısından elde edilen kontrol yüzeyi Şekil 43'de gösterilmektedir. Süper-lift Luo dönüştürücünün hızlı anahtarlama kontrol yüzeyi grafiğinde harmoniğe neden olmaktadır. Bu yüzey üzerindeki sarı bölge sistemin optimum çalışma alanını temsil etmektedir.



**Şekil 43.** Süper-lift Luo dönüştürücünün FLC kontrol yüzeyi

## 7. BULGULAR

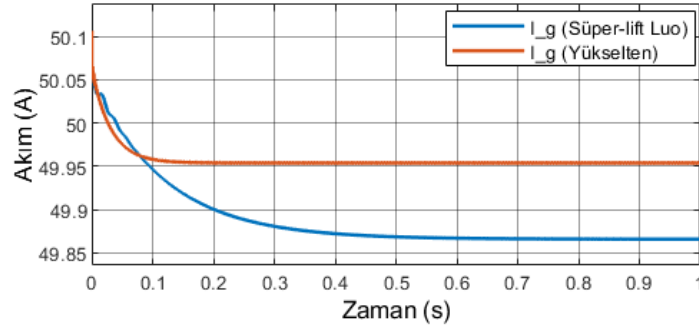
Tasarlanan iki sistemden  $1000\text{W/m}^2$  sabit ışınlam ve  $25^\circ\text{C}$  sabit sıcaklık altında elde edilen değerler Tablo 18’de verilmiştir. Süper-lift Luo dönüştürücüsü daha yüksek gerilim kazancı sunarak aynı parametrelere sahip bir FV panel beslemeli yükselten dönüştürücüye kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla çıkış gücü sağlamaktadır. Ayrıca süper-lift Luo dönüştürücüsünün yükselten dönüştürücüye göre yaklaşık %4 daha yüksek verim sağladığı belirlenmiştir. Bu durum süper-lift Luo dönüştürücünün güç dönüşüm performansı ve enerji iletim verimliliği açısından avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Her bir parametreye ilişkin süper-lift Luo yapısına geçişle oluşan yüzdesel değişimler de tabloda sunulmuştur. Bu sayede iyileştirme miktarının nicel olarak ortaya konması ve iki yapıdan elde edilen sonuçlardaki farkın daha net değerlendirilmesi sağlanmıştır.

**Tablo 18.** Sistemlerden elde edilen nihai değerler, oturma süreleri ve yüzdesel değişim oranları

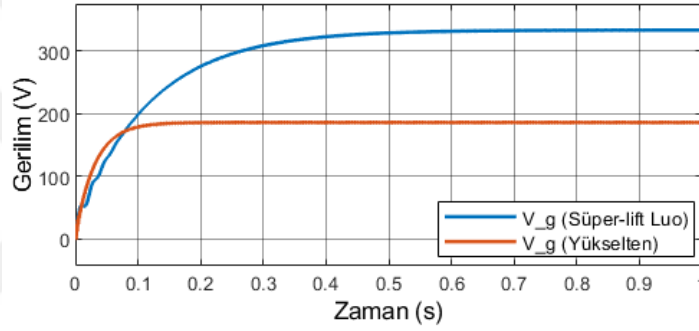
| Parametreler       | Yükselten Dönüştürücü | Süper-lift Luo Dönüştürücü | Değişim Oranı (%)                               |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| Giriş Gerilimi (V) | 156,6                 | 335,2                      | +114.05 (yaklaşık 2,14 kat artış)               |
| Giriş Akımı (A)    | 49,95                 | 49,86                      | -0.18                                           |
| Giriş Gücü (W)     | 9305                  | 16650                      | +78.94                                          |
| Çıkış Gerilimi (V) | 245,8                 | 1091                       | +343.86 (yaklaşık 4,4 kat artış)                |
| Oturma Süresi (s)  | 0,12                  | 0,5                        | +316.7 (daha yavaş tepki)                       |
| Çıkış Akımı (A)    | 32,78                 | 13,64                      | -58.39 (gerilim artışı sebebiyle akımda azalma) |
| Çıkış Gücü (W)     | 7981                  | 14870                      | +86.32 (yaklaşık 2 kat artış)                   |
| Verim (%)          | 85,77                 | 89,34                      | +4.16                                           |

Tasarlanan bu devrelerden elde edilen giriş grafikleri Şekil 44’de gösterilmiştir. Klasik yükselten dönüştürücünün giriş gerilimi yaklaşık 40 V civarından başlamakta ve kısa sürede 180 V seviyesine kadar yükselerek kararlı duruma geçmektedir. Süper-lift Luo dönüştürücü ise daha yüksek bir gerilim artışı sunmaktadır. Giriş gerilimi yine yaklaşık 40 V civarından başlamakta ancak 500 V seviyelerine ulaşmaktadır. Bunun yanında Şekil 44(a)’da verilen akım grafiğinde de süper-lift Luo dönüştürücünün

klasik yükselten dönüştürücüye kıyasla çok daha düşük akım seviyesinde çalıştığı belirlenmiştir.



(a)

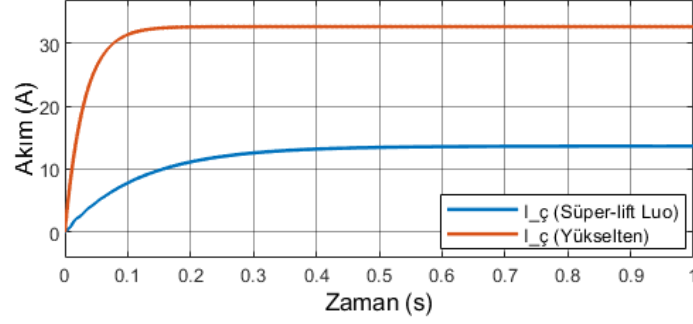


(b)

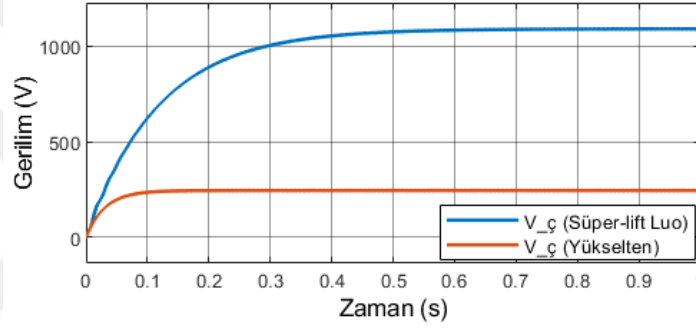
**Şekil 44.** Giriş grafikleri (a) akım (b) gerilim

Tasarlanan benzetim devrelerinden elde edilen çıkış grafikleri ise Şekil 45’de gösterilmiştir. Her iki sistem de aşım olmaksızın tutarlı bir gerilim seviyesi üretebilmektedir. Yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi kısa sürede kararlı duruma geçmektedir. Bu durum sistemin hızlı bir şekilde dengeye oturduğunu göstermektedir. Bunun yanında süper-lift Luo dönüştürücünün gerilim kazancının çok daha yüksek olduğu ve FLC yöntemi sayesinde gerilim artışının istikrarlı biçimde elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca süper-lift Luo dönüştürücünden elde edilen çıkış akımının da yükselten dönüştürücünden elde edilen çıkış akımına göre oldukça düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. Düşük çıkış akımı, anahtarlama elemanları ve diğer iletim bileşenleri üzerindeki akım zorlanmasının azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle iletim kayıplarının düşürülmesi, termal yönetimin kolaylaştırılması ve eleman ömrünün artırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, düşük akım

seviyeleri sayesinde devre izleri ve kablolama açısından daha sade ve kompakt tasarımlar yapılabilmesi mümkün hale gelmektedir.



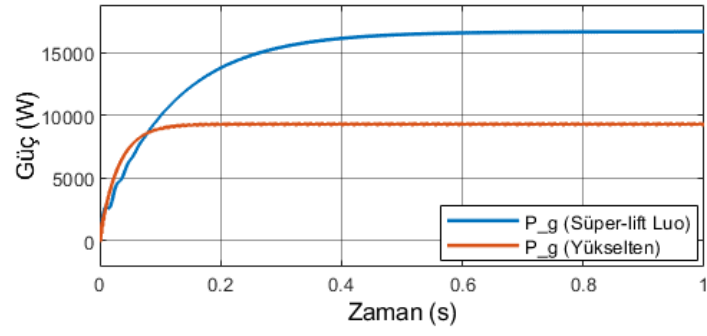
(a)



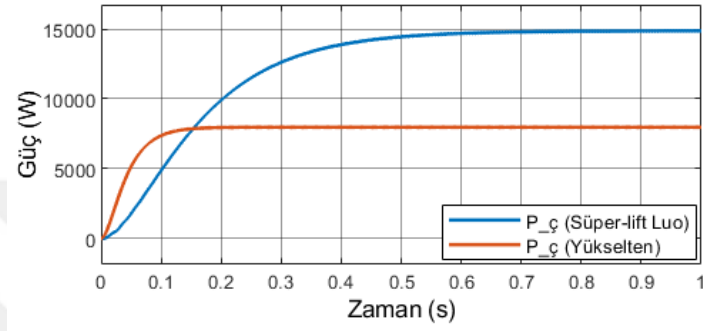
(b)

**Şekil 45.** Çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim

Panelden alınan güç ve dönüştürücülerin çıkışından elde edilen grafikleri ise Şekil 46'da gösterilmiştir. FLC yardımıyla çıkış gücü kararlı bir hale gelmekte ve FV panelden alınan gücün üzerinde bir değere ulaşarak sistemin verimli çalıştığını göstermektedir. İki dönüştürücü için güç grafikleri incelendiğinde süper-lift Luo dönüştürücüde dalgalanma oranının daha düşük olması sayesinde sistem daha kararlı bir güç iletimi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, süper-lift Luo dönüştürücünün dinamik tepki süresinin daha iyi olduğunu ve FV sistemlerde klasik yükselten dönüştürücüye kıyasla daha yüksek performans sunduğunu ortaya koymaktadır.



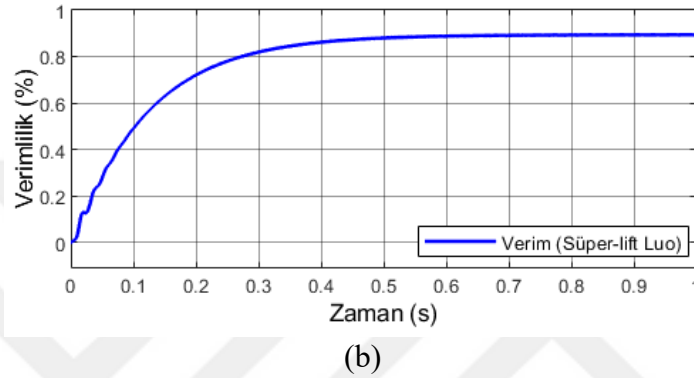
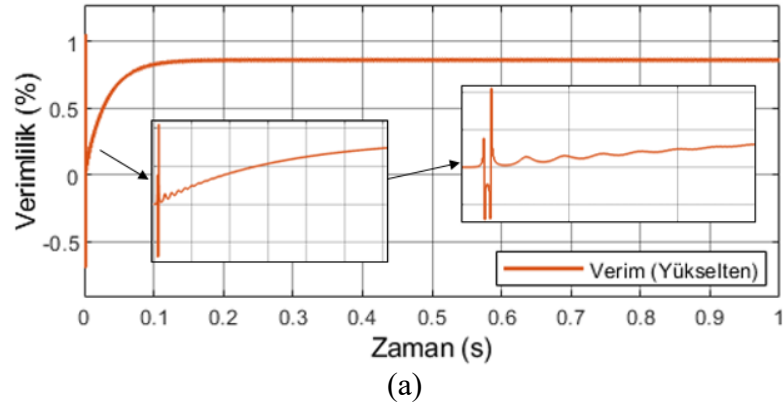
(a)



(b)

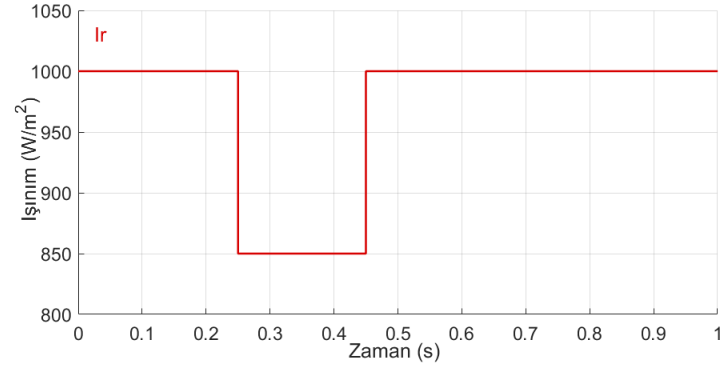
**Şekil 46.** Güç grafikleri (a) giriş (b) çıkış

Tasarlanan sistemlerin verimlilik grafikleri de Şekil 47’de gösterilmiştir. Süper-lift Luo dönüştürücünün %89.34’lük verimliliği ile klasik yükselten dönüştürücünün %85.77’lik verimliliğine kıyasla daha düşük kayıplarla enerji dönüşümünü gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

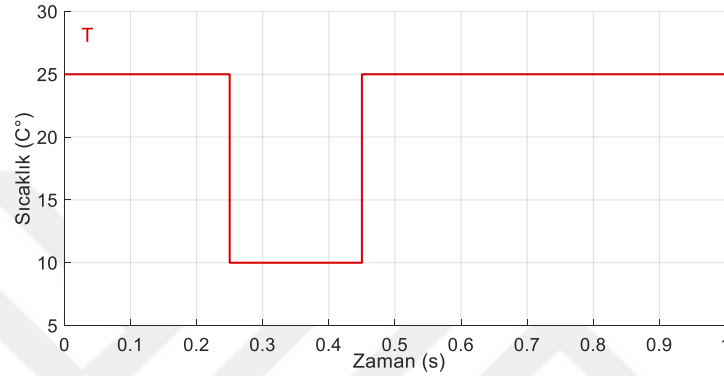


**Şekil 47.** Verimlilik grafikleri (a) yükselten dönüştürücü (b) süper-lift Luo dönüştürücü

Çalışmanın ikinci aşamasında iki sistemin de değişken çevre koşullarındaki dinamik tepkisinin analiz edilebilmesi amacıyla FV panel girişine zamana bağlı olarak değişen ışınlam ve sıcaklık değerleri uygulanmıştır. Tasarlanan devrede panele verilen ışınlam ve sıcaklık değerlerinin değişken olabilmesi için MATLAB/Simulink'te bulunan "Signal Builder" bloğu kullanılmıştır. Bu blok yardımıyla benzetim çalışmasının 0.25'inci saniyesinde ışınlam şiddeti  $1000 \text{ W/m}^2$ 'den  $850 \text{ W/m}^2$ 'ye düşürülmüş ve aynı saniyede sıcaklık  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüştür. Ardından benzetim çalışmasının 0.45'nci saniyesinde ışınlam şiddeti ve sıcaklık değerleri ilk durumdaki değerlerine yükseltilmiştir. Oluşturulan bu grafikler Şekil 48'de gösterilmiştir.



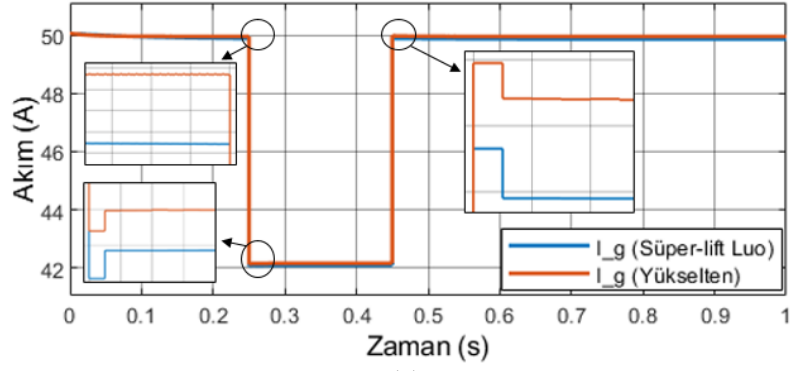
(a)



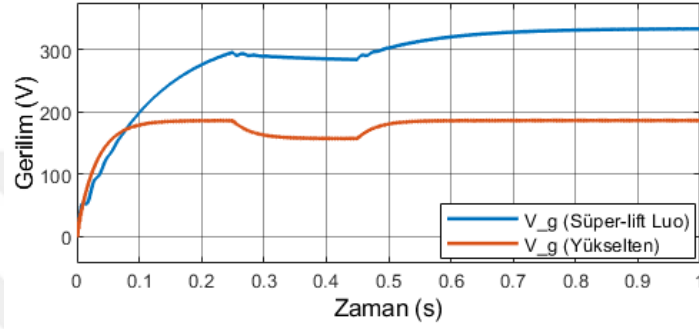
(b)

**Şekil 48.** Panele verilen değişken grafikler (a) ışınlım (b) sıcaklık

Panele girdi olarak verilen bu değişken ışınlım ve sıcaklık değerlerine göre tasarlanan iki devreden de grafikler elde edilmiştir. Şekil 49’da iki sistemden de elde edilen giriş grafikleri verilmiştir. FV panele uygulanan değişken ışınlım ve sıcaklık koşullarına yanıt olarak, panelden çekilen akımın ışınlım değişimlerini yakından takip ettiği ancak panel geriliminin bu değişimlerden daha az etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu, FV hücre özellikleriyle tutarlıdır. Bir FV hücresinde akım ışınlımla doğru orantılı olarak değişmektedir. Gerilim ise sıcaklık ve hücre özelliklerine yüksek derecede bağlıdır ve ani ışınlım değişikliklerinden daha az etkilenir. Bu nedenle panelden çekilen akımının zamanla değişen ışınlım karakteristiğini yansıtması beklenmektedir ve bu elde edilen grafiklerle doğrulanmaktadır.



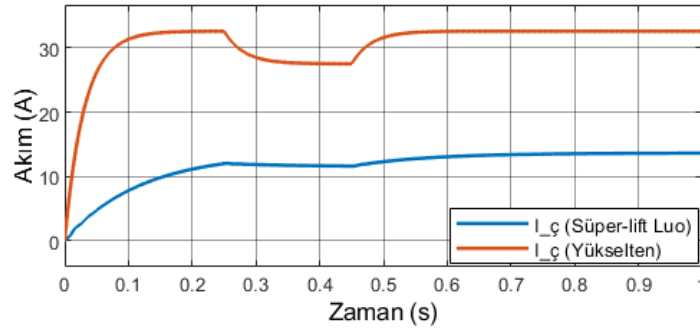
(a)



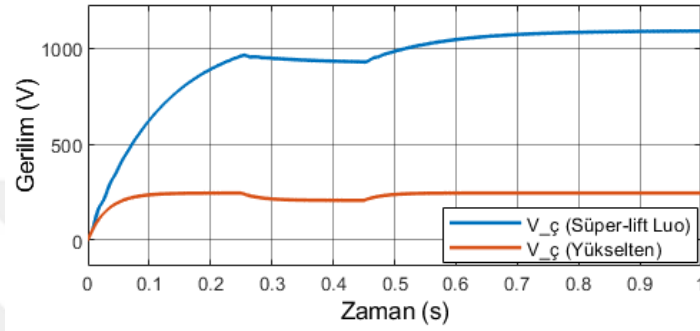
(b)

**Şekil 49.** Değişken  $I_r$  ve  $T$  ile giriş grafikleri (a) akım (b) gerilim

Değişken ışıınım ve sıcaklık koşullarında dönüştürücü çıkışlarından elde edilen akım ve gerilim grafikleri Şekil 50’de gösterilmiştir. İki sistem de değişken çevresel koşullara rağmen tasarlanan MPPT sisteminde kullanılan FLC yöntemi yardımıyla sistemin geçici rejim davranışını başarıyla kontrol etmiş ve çıkış büyüklüklerinin kısa bir sürede kararlı duruma ulaşmasını sağlamıştır. Her iki dönüştürücünün de FLC'nin adaptif yapısı sayesinde sistemin değişken ışıınım ve sıcaklık koşullarına hızlı ve istikrarlı bir şekilde yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Geçici rejimin sonunda, sistem çıkışlarının sabit ışıınım ve sıcaklık altında elde edilen referans değerlerine yaklaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, FLC'nin dış çevresel değişkenlere karşı yüksek uyum sağlama ve kararlı duruma ulaştırma yeteneğini de göstermektedir.



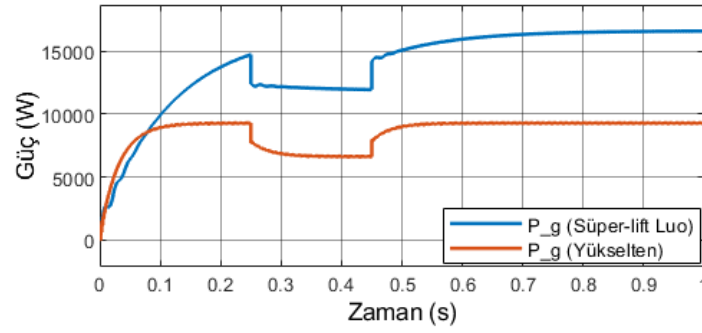
(a)



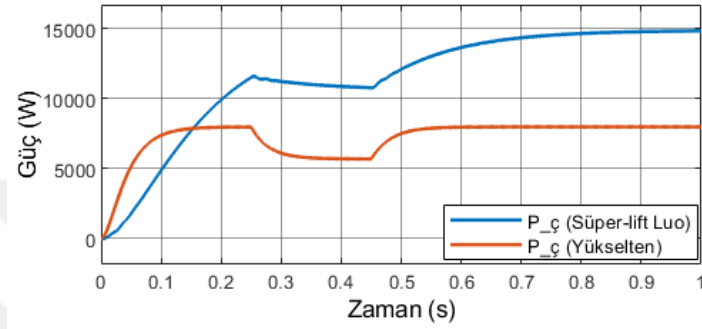
(b)

**Şekil 50.** Değişken  $I_r$  ve  $T$  ile çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim

Değişken ışınlam ve sıcaklık koşullarından elde edilen güç grafikleri Şekil 51’de gösterilmiştir. Bu değişken çevresel koşulları altında, akım bileşeninin panel çıkış gücünde özellikle önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle güç değerleri, Şekil 49(b) ve Şekil 50(b)’de verilen gerilim grafiklerine kıyasla daha belirgin dalgalanmalara maruz kalmaktadır. Bunun nedeni, akımın doğrudan ışınlam şiddeti ve sıcaklık etkilerine daha duyarlı olmasıdır. Yine de, tasarlanan MPPT sisteminde kullanılan FLC, sistemlerin geçici davranışını etkili bir şekilde yönetmekte ve her iki dönüştürücünün değişen çevresel koşullara hızlı ve istikrarlı bir şekilde yanıt vermesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, FLC’nin adaptif kontrol yapısı, güç çıkışı dalgalanmalarını azaltmaya ve sistemlerin referans değerlerine kısa sürede yaklaşmasına katkıda bulunmuştur.



(a)



(b)

**Şekil 51.** Değişken  $I_r$  ve  $T$  ile güç grafikleri (a) giriş (b) çıkış

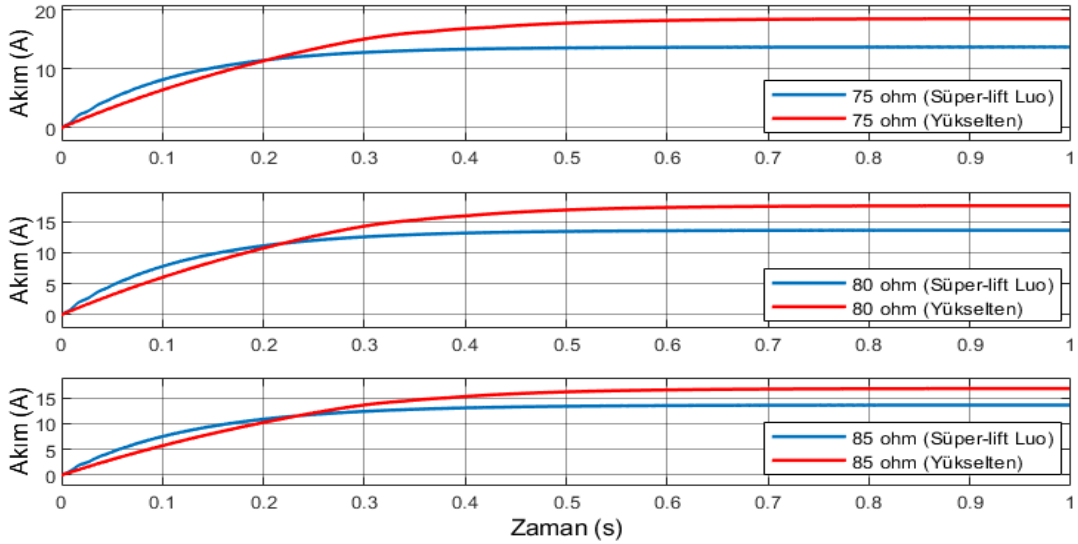
Dönüştürücülerin aynı yük koşulları altında çalıştırılması için yükselten dönüştürücü devre parametreleri değiştirilmiştir. Güncellenmiş devre parametreleri Tablo 19’da verilmiştir.

**Tablo 19.** Güncellenmiş yükselten dönüştürücü devre parametreleri

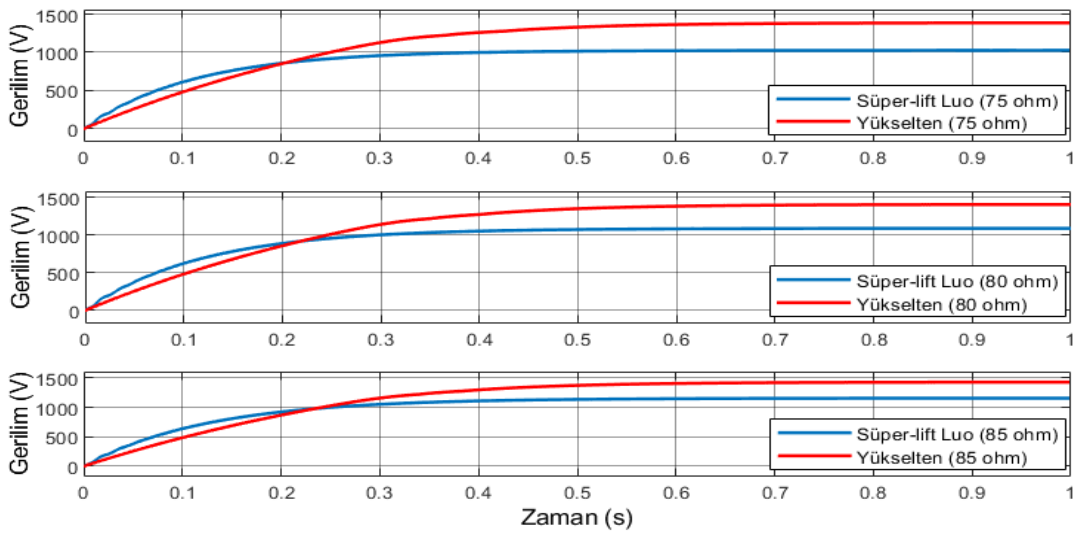
| Parametre | Hesaplanan Değer |
|-----------|------------------|
| $C_{FV}$  | 1600 $\mu$ F     |
| $L$       | 0,5 mH           |
| $C$       | 6000 $\mu$ F     |
| $R$       | 80 $\Omega$      |

İki dönüştürücünün aynı yük koşulları altında çalıştırılması durumunda elde edilen çıkış gerilim ve akım grafikleri de Şekil 52’de sunulmuştur. Dönüştürücülerde kullanılan yük değerleri 75, 80 ve 85  $\Omega$  olarak değiştirilerek akım ve gerilim grafikleri elde edilmiştir. Değişken yük koşullarında da sistemlerin aşma yapmadan kararlı bir gerilim seviyesine ulaştıkları değerlendirilmiştir. Süper-lift Luo dönüştürücüde yük değerinin artırılmasıyla başlangıçta meydana gelen salınımın azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 45’de verilen çıkış akım ve gerilim grafikleri ile karşılaştırıldığında da yükselten dönüştürücü parametrelerinin artırılması sonucunda dönüştürücüden elde edilen çıkış akımında daha fazla dalgalanma meydana gelirken çıkış akım değerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle iki dönüştürücü için de kullanılan 80  $\Omega$ ’luk direnç değeri durumunda süper-lift Luo ile %89,34 verim elde edilirken yükselten dönüştürücüde %75,96 verim elde edilmiştir. Artan çıkış akımı dalgalanması, yükselten dönüştürücünün enerji iletiminde daha fazla kayıp yaşamasına ve dolayısıyla sistem veriminin düşmesine neden olmuştur. Tüm bu bulgular doğrultusunda, süper-lift Luo dönüştürücünün hem kararlılık hem de verim açısından daha üstün bir performans sunduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 52. Farklı yük koşullarında çıkış grafikleri (a) akım (b) gerilim

## 8. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, aynı özelliklere sahip FV panellerle beslenen ve FLC tabanlı MPPT algoritması ile kontrol edilen iki farklı DA-DA dönüştürücü topolojisi - yükselten dönüştürücü ve süper-lift Luo dönüştürücü - MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Sistemler sabit ve değişken ısınım/sıcaklık koşullarında performans, kararlılık, geçici rejim tepkisi, gerilim kazancı ve enerji dönüşüm verimliliği gibi temel teknik kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

Sabit  $1000 \text{ W/m}^2$  ısınım ve  $25^\circ\text{C}$  sıcaklık altında yapılan analizlerde, yükselten dönüştürücü ile tasarlanan sistemin  $245,8 \text{ V}$  çıkış gerilimi ve  $32,78 \text{ A}$  çıkış akımı sağlayarak konut tipi yükler için uygun bir çıkış seviyesi sunduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık süper-lift Luo dönüştürücü  $1091 \text{ V}$  çıkış gerilimi ve  $13,64 \text{ A}$  çıkış akımı ile yaklaşık %344 daha yüksek gerilim, %58,4 daha düşük akım değerleri elde edilmiştir. Bunun sonucunda çıkış gücü yaklaşık %86,3 artarak  $7981 \text{ W}$ 'dan  $14870 \text{ W}$ 'a yükselmiştir. Bu sayede yaklaşık iki kat daha fazla çıkış gücü üretilmiştir. Ayrıca, süper-lift Luo dönüştürücü %89,34 verimlilikle yükselten dönüştürücünün %85,77 veriminden yaklaşık %4,16 daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sunmuştur. Yükselten dönüştürücü daha kısa yerleşme süresiyle öne çıksa da süper-lift Luo topolojisinin daha yüksek güç çıkışı bu farkı teknik olarak açıklamaktadır. Bu yüksek gerilim seviyesi ve artırılmış verimlilik, süper-lift Luo'nun yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) sistemleri, endüstriyel DA yükleri, veri merkezleri, elektrikli araç şarj altyapıları ve büyük ölçekli batarya depolama sistemleri gibi özel uygulamalardaki kullanımını desteklemektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, panel girişine değişken ısınım ve sıcaklık değerleri uygulanarak sistemlerin dinamik performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, panel akımının ısınım değişimlerini yakından takip ettiğini ancak panel geriliminin daha kararlı kaldığını ve FV hücre karakteristiğiyle uyumlu davranış sergilediğini göstermiştir. Her iki sistem de FLC destekli MPPT algoritması sayesinde geçici rejim sürecini istikrarlı şekilde yönetmiş ve çevresel değişkenliklere karşı hızlı adaptasyon sağlamıştır. Güç çıkışlarında gözlenen dalgalanmalar, özellikle akım bileşeninin ısınıma olan duyarlılığıyla ilişkilendirilmektedir ancak FLC'nin katkısıyla

güç çıkışlarının kısa sürede referans değerlere yaklaştığı ve sistemlerin kararlılığını koruduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, süper-lift Luo topolojisinin yalnızca sabit koşullarda değil, değişken çevresel koşullar altında da daha yüksek verimlilik, düşük akım zorlanması ve geniş uygulama potansiyeli sunduğu görülmüştür. Bununla birlikte, FLC tabanlı MPPT ile kontrol edilen her iki DA-DA dönüştürücü sistemi de yüksek performanslı, uyarlanabilir ve güvenilir bir kontrol yaklaşımı sunarak FV sistemlerin verimli ve istikrarlı çalışmasını mümkün kılmıştır. Bu bulgular, dönüştürücü topolojisi ve kontrol yapısının FV sistem performansı üzerindeki kritik etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

İlerleyen çalışmalarda, önerilen FLC tabanlı MPPT kontrol algoritmasının deneysel olarak gerçekleştirilerek gerçek zamanlı sistemlerde uygulanması hedeflenmektedir. Ayrıca, süper-lift Luo dönüştürücünün farklı MPPT algoritmalarıyla kontrol edilmesi ve bu algoritmaların önerilen kontrol yapısıyla süper-lift Luo dönüştürücü üzerinden karşılaştırılması da planlanmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Abdolrasol, M. G. M., Ayob, A., Mutlag, A. H., & Ustun, T. S. (2023). Optimal fuzzy logic controller based PSO for photovoltaic system. *Energy Reports*, 9, 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.039>
- Adak, S., Cangi, H., & Yılmaz, A. S. (2019). Fotovoltaik Sistemin Çıkış Gücünün Sıcaklık ve Işımaya Bağlı Matematiksel Modellemesi ve Simülasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(1), 316–327. <https://doi.org/10.29137/umagd.456988>
- Agarwal, D., Anand, I., & Senthilkumar, S. (2019). A power management scheme for a standalone solar PV system utilizing super lift Luo converter. *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869491>
- Al Mubarak, F., Rezaee, R., & Wood, D. A. (2024). Economic, Societal, and Environmental Impacts of Available Energy Sources: A Review. *Eng*, 5(3), 1232–1265. <https://doi.org/10.3390/eng5030067>
- Alankrita, Pati, A., & Adhikary, N. (2025). Optimal allocation of distributed power in adaptive droop controlled isolated DC microgrid under renewable energy intermittency and uncertainty using fuzzy logic controllers. *Computers and Electrical Engineering*, 126, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110445>
- Alkan, Ö., & Karadağ Albayrak, Ö. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 162, 712–726. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.062>
- Altaş, İ. H. (1998). Fotovoltaik Güneş Pilleri : Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47, 66–71. [http://www.ihaltas.com/downloads/publications/3e\\_98\\_04\\_PV\\_03.pdf](http://www.ihaltas.com/downloads/publications/3e_98_04_PV_03.pdf)
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık : Bulanıklılık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80–85.
- Altaş, İ. H., & Sharaf, A. M. (2007a). A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink Gui Environment. *International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, Int. J. IT&IC*, 1(4), 1–27.
- Altaş, İ. H., & Sharaf, A. M. (2007b). A Novel Photovoltaic On-Line Search Algorithm for Maximum Energy Utilization. *The International Conference on Communication, Computer and Power (ICCCP'07)*, Maskat, Umman, 19-21.
- Altınkök, S., & Altınkök, A. (2024). Photovoltaic Thermal PV/T Solar Panels and

Practical Applications. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 683–699. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1425077>

Arunagirinathan, S., & Subramanian, C. (2023). Design of fuzzy controller for MPPT of solar photovoltaic system. *2023 International Conference on Intelligent Systems for Communication, IoT and Security (ICISCoIS)*, Coimbatore, India, 488-492. <https://doi.org/10.1109/ICISCoIS56541.2023.10100594>

Ataşoğlu, A. (2019). *Bulanık Mantık #4: Bulanık Sistem Uygulaması*. Medium. <https://ahmetatasoglu98.medium.com/bulanık-mantık-4-bulanık-sistem-uygulaması-f346d35af51> (Erişim tarihi: 03.01.2025)

Ateş, E. C. (2021). Bulanık Mantık ( Fuzzy Logic ). İçinde *Siber Ansiklopedi: Siber Ortama Çok Disiplinli Bir Yaklaşım* (ss. 73–77). Pegem Akademi.

Bakkar, M., Aboelhassan, A., Abdelgeliel, M., & Galea, M. (2021). PV Systems Control Using Fuzzy Logic Controller Employing Dynamic Safety Margin under Normal and Partial Shading Conditions. *Energies*, 14(4), 841. <https://doi.org/10.3390/en14040841>

Bilhan, Ö. (2024). Türkiye ' de yenilenebilir enerji kaynakları açısından hidroelektrik ve güneş enerjisinin bölgesel ve iller bazında incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1504–1516. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1548541>

Bodur, H. (2010). *Güç Elektroniği*. Birsen Yayınevi.

Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2021). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9–33. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.02720>

Bouarroudj, N., Abdelkrim, T., Farhat, M., Feliu-Batlle, V., Benlahbib, B., Boukhetala, D., & Boudjema, F. (2021). Fuzzy Logic Controller Based Maximum Power Point Tracking and its Optimal Tuning in Photovoltaic Systems. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 18(3), 351–384. <https://doi.org/10.2298/SJEE2103351B>

Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A. A., Keiner, D., Lopez, G., Ostergaard, P. A., Lund, H., Mathiesen, B. V., Jacobson, M. Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raugei, M., ... Sovacool, B. K. (2022). On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research. *IEEE Access*, 10, 78176–78218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402>

Bulut, K. (2020). *Bulanık mantık tabanlı anahtarlama kapasitörlü (SC) DC-DC yükseltici dönüştürücü tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi)

Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2025). Analyses of PO-Based Fuzzy Logic-Controlled MPPT and Incremental Conductance MPPT Algorithms in PV

- Systems. *Energies*, 18(2), 233. <https://doi.org/10.3390/en18020233>
- Can, M. S., & Özgüven, Ö. (2021). Maksimum Yüksek Güç Noktası Takibi İçin Bulanık Mantık Denetleyicinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. *Jurnal of Computer Science, IDAP-2021(Special)*, 400–410. <https://doi.org/10.53070/bbd.991349>
- Chamundeeswari, V., & Niraimathi, R. (2025). An efficient hybrid approach for high-gain DC–DC converter for hydropower operated plants on DC load with super-lift converters. *Electrical Engineering*, 107(1), 1315–1329. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02779-w>
- Chamundeeswari, V., & Seyezhai, R. (2024). Design and Implementation of Fuzzy sliding mode control (FSMC) approach for a Modified Negative Output Luo DC-DC Converter with its comparative analysis. *Automatika*, 65(1), 45–57. <https://doi.org/10.1080/00051144.2023.2280875>
- Chandini, G., Nikhila, K., Hanumanth Reddy, E., Kazol, D., Amruth Kumar, A., & Narasimhulu, N. (2022). Performance Comparison of FLC MPPT with P & O and Incremental Conductance MPPT For standalone PV System. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 10(6), 2879–2885. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44410>
- Chitra, L., & Kumari K.S., K. (2023). Power Quality Enhancements of AC Grid Using Luo Converter with GWO Based MPPT. *2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Lonavla, India, 1-5. <https://doi.org/10.1109/I2CT57861.2023.10126160>
- Chockalingam, V., Kumar, R. K., Padmanaban, S., & Bhaskar, M. S. (2024). Design of luo converter with integration of step down converter. *Energy Reports*, 12, 4266–4278. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.044>
- Cihan, E. (2019). *Yenilenebilir Enerji ve Türkiye’de Güneş Enerjisi*. (Yüksek Lisans Tezi, T.C. Hasan Kalyoncu Üniversitesi)
- Deepika, M., Karthikeyan, P., Keerthana, A. V., Lakshmanan, M., Gowtham, P., Kumar, C., & Jaisiva, S. (2023). MPPT-Based Charge Controller for Battery Fast Charging. *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2023, 1*, Coimbatore, India, 449-453. <https://doi.org/10.1109/ICACCS57279.2023.10112852>
- Derbeli, M., Napole, C., & Barambones, O. (2023). A Fuzzy Logic Control for Maximum Power Point Tracking Algorithm Validated in a Commercial PV System. *Energies*, 16(2), 748. <https://doi.org/10.3390/en16020748>
- Dheeban, S. S., Muthu Selvan, N. B., & Krishnaveni, L. (2021). Performance improvement of Photo-Voltaic panels by super-lift Luo converter in standalone application. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 1163–1171. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.352>

- Doğan, O. (2012). *Talep Tahmininde Sinirsel Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Yöntemi (ANFIS) Kullanımı ve Yalın Yapay Sinir Ağı Metodu ile Karşılaştırmalı Bir Uygulama*. (Doktora Tezi, T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi)
- Doğanay, M. M. (2021). Mardin Bölgesi Güneş (Fotovoltaik) Enerjisi Potansiyel Analizi. *UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science*, 3(1), 86–117.
- Durga Devi, R., & Nageswari, S. (2019). Mathematical modelling and analysis of voltage super-lift power dc-dc converter for enhanced dynamic characteristics in CCM. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 38(2), 759–776. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2017-0505>
- Dwivedi, D., Maurya, A. K., Gangwar, A., Ahmad, A., Maury, A. P., & Ahuja, H. (2023). Performance analysis of solar PV system for different converter configurations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2570, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2570/1/012009>
- El-Ghanam, S. M. (2020). Design, implementation and performance analysis of positive super-lift Luo-converter based on different MOSFET types. *Indian Journal of Physics*, 94(6), 833–839. <https://doi.org/10.1007/s12648-019-01528-1>
- Emikönel, S. (2022). *Güneş enerji tesisleri için bulanık mantık kontrollü maksimum güç noktası takip algoritmasının geliştirilmesi ve incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)
- Emikönel, S., & Kocalmış Bilhan, A. (2022). Analysis of Turkey's Solar Energy Potential in Different Regions. *OKU Journal of The Institute of Science and Technology*, 5(Special), 170–184. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1034175>
- Erol, E. (2007). Türkiye’de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902–2000. İçinde *Türkiye’de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902-2000*. (Doktora Tezi, T.C. İstanbul Üniversitesi)
- Eshete, F. A., Samajdar, D. P., & Kumar, A. (2023). Analysis of FLC Technique with P&O Algorithm under Variable Weather Condition. *2023 IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, Kalyani, India, 419-424. <https://doi.org/10.1109/DevIC57758.2023.10134878>
- Esho, A. O.-O., Iluyomade, T. D., Olatunde, T. M., & Igbinenikaro, O. P. (2024). Next-generation materials for space electronics: A conceptual review. *Open Access Research Journal of Engineering and Technology*, 6(2), 051–062. <https://doi.org/10.53022/oarjet.2024.6.2.0020>
- Essakhi, H., Farhat, S., Mediouni, M., & Dbaghi, Y. (2021). Improving the dynamic performances of an MPPT controller for a Photovoltaic system using fuzzy logic. *E3S Web of Conferences*, 229, Agadir, Fas, 01013.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122901013>

- Fallahzadeh, S. A. A., Abjadi, N. R., Kargar, A., & Blaabjerg, F. (2021). Applying sliding-mode control to a double-stage single-phase grid-connected PV system. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.30501/JREE.2020.233358.1114>
- Faridpak, B., Farrokhifar, M., Nasiri, M., Alahyari, A., & Sadoogi, N. (2021). Developing a super-lift Luo-converter with integration of buck converters for electric vehicle applications. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(4), 811–820. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.01880>
- Ganga Bhavani, C. S., Bhanu Prasad, N., & Ravi Kishore, D. (2025). Enhancing Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System with Super Lift Luo Converter for Improved Power Management and Reduced THD. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 106(1), 129–143. <https://doi.org/10.1007/s40031-024-01091-2>
- Ghaderi, D. (2019). Investigation a Fuzzy Logic-based Controller for Step-up Converters. *European Journal of Science and Technology*, 17, 645–654. <https://doi.org/10.31590/ejosat.620066>
- Ghasemi, F., Yazdani, M. R., & Delshad, M. (2022). Step-Up DC-DC Switching Converter with Single Switch and Multi-Outputs Based on Luo Topology. *IEEE Access*, 10, 16871–16882. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150316>
- Giurgi, G. I., Szolga, L. A., & Giurgi, D. V. (2022). Benefits of Fuzzy Logic on MPPT and PI Controllers in the Chain of Photovoltaic Control Systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(5), 2318. <https://doi.org/10.3390/app12052318>
- Gladys, J. B. P., & Manjunath, K. (2019). Analysis-intelligent design and simulation of improved state-space modelling for control of Luo converter. *Computers & Electrical Engineering*, 75, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.11.010>
- Güven, G., & Kocalmış Bilhan, A. (2024). Güneş Panellerinin Üretim ve Kurulum Süreçlerinde Verimliliği Belirleyen Faktörlerin Analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1400–1407. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1535918>
- Hadjaissa, A., Gahgouhi, O., Ameer, K., & Rabehi, A. (2022). Journal of Renewable Energies Fuzzy logic concept based MPPT technique for standalone PV system. *Journal of Renewable Energies*, 1(1), 101–107. <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1045>
- Hadji, S., Belkaid, A., Kayisli, K., Colak, I., Aissou, S., & Larbi, L. (2024). A Comparative Analysis of Cuk, SEPIC, and Zeta Converters as Maximum Power Point Trackers. *12th International Conference on Smart Grid*,

- icSmartGrid* 2024, Setubal, Portekiz, 539-544.  
<https://doi.org/10.1109/icSmartGrid61824.2024.10578258>
- Hadji, S., Gaubert, J. P., & Krim, F. (2018). Real-time Genetic Algorithms-based MPPT: Study and comparison (theoretical and experimental) with conventional methods. *Energies*, 11(2), 459–475. <https://doi.org/10.3390/en11020459>
- Hangun, B., Eyecioglu, O., & Beken, M. (2022). Investigating the Energy Production Trends of Countries and Its Relationship Between Economic Development. *2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, İstanbul, Türkiye, 597-600. <https://doi.org/10.1109/ICRERA55966.2022.9922684>
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronics* (1.). McGraw-Hill.
- Hassan, M. S., Ehtesham, M., Ul Haq, A., & Jamil, M. (2023). Enhanced AI Based FLC MPPT Algorithm and its Comparative Analysis with P&O. *2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics and Digital Healthcare Technologies, REEDCON 2023*, New Delhi, India, 571-576. <https://doi.org/10.1109/REEDCON57544.2023.10150590>
- Hassan, S. Z., Li, H., Kamal, T., Ahmad, J., Riaz, M. H., & Khan, M. A. (2018). Performance of different MPPT control techniques for photovoltaic systems. *2018 International Conference on Electrical Engineering, ICEE 2018*, Lahore, Pakistan, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEE.2018.8566713>
- IEA. (2021). *Türkiye güneşten elektrik üretiminde Avrupa’da 6’ıncı sırada*. Güneş Enerji Sanayicileri ve Endüstri Derneği (GENSED). <https://www.gensed.org/basin/turkiye-gunesden-elektrik-uretiminde-avrupada-6inci-sirada> (Erişim tarihi: 23.09.2025)
- Isen, E. (2021). Modeling and Simulation of DC-DC Converters. *Electronic Letters on Science & Engineering*, 17(1), 30–41.
- Ishizaki, K., De Zoysa, M., Tanaka, Y., Jeon, S.-W., & Noda, S. (2018). Progress in thin-film silicon solar cells based on photonic-crystal structures. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(6), 060101. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.060101>
- Jayachandran, D. N., Krishnaswamy, V., Anbazhagan, L., & Dhandapani, K. (2015). Modelling and analysis of voltage mode controlled boost converter. *American Journal of Applied Sciences*, 12(10), 766–774. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2015.766.774>
- Jin, G.-G., Mengesha, K. A., & Son, Y.-D. (2025). Integral Sliding Mode Control of a DC-DC Boost Converter with Uncertainties. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-02136-8>
- Joshi, P., & Arora, S. (2017). Maximum power point tracking methodologies for solar PV systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1154–

1177. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.019>

- Kaba, B., Şahin, M. E., & Tören, M. (2025). Yükselten Tip DA/DA Dönüştürücü Kontrolünün Farklı Kontrol Yöntemleriyle Batarya Kaynağı için İncelenmesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 15(1), 15–26.
- Kabalıcı, E. (2021). Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids. İçinde *Academic Press*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821724-5.00014-3>
- Karagözoğlu, L., & Duranay, Z. B. (2023). Investigation of Maximum Power Point Tracking Methods in Photovoltaic Sytems. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(1), 86–95. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1210658>
- Karataş, F., Koyuncu, İ., Tuna, M., & Alçın, M. (2020). Bulanık Mantık Üyelik Fonksiyonlarının FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 1–9.
- Karayaka, H., & Güneri, Y. (2023). *Güneş Enerjisinin Tarihsel Gelişimi*. piagrid.com. <https://www.piagrid.com/rehber/gunes-enerjisinin-zamanla-gelisimi> (Erişim tarihi: 28.10.2024)
- Karthikeyan, K., Jayanthi, S., & Gokulakrishnan, R. (2024). High gain super lift Luo converter for hybrid energy management systems. *International Journal of Science and Research Archive*, 13, 1318–1331.
- Katoch, R., & Joshi, D. (2022). Comparative Analysis of Positive Output Elementary Superlift Luo Converter using PI and Fuzzy Controller. *2022 IEEE 10th Power India International Conference, (PIICON)*, New Delhi, Hindistan, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PIICON56320.2022.10045271>
- Kececioğlu, O. F. (2022). Design of type-2 fuzzy logic controller optimized with firefly algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic system based on super lift Luo converter. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 35(4), 1–17. <https://doi.org/10.1002/jnm.2994>
- Keçecioglu, O. F., Gani, A., & Sekkeli, M. (2020). Design and hardware implementation based on hybrid structure for MPPT of PV system using an interval type-2 TSK fuzzy logic controller. *Energies*, 13(7), 1842. <https://doi.org/10.3390/en13071842>
- Kevat, V., Sakhare, A., & Mikkili, S. (2025). Design of Non-isolated DC–DC Converters for Maximum Power Point Tracking in Stand-Alone Photovoltaic System. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s41403-024-00515-1>
- Khan, M. U., Murtaza, A. F., Noman, A. M., Sher, H. A., & Zafar, M. (2024). State-Space Modeling, Design, and Analysis of the DC-DC Converters for PV Application: A Review. *Sustainability*, 16(1), 1–20.

<https://doi.org/10.3390/su16010202>

- Koca, Y. B. (2025). Fuzzy logic-based simulation and modelling of grid integration renewable energy systems for sustainable energy. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 80–89. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1438625>
- Konstantinou, T., Ćuković Ignjatović, N., & Zbašnik-Senegačnik, M. (2018). ENERGY: resources and building performance. İçinde S. Kosanović, A. Fikfak, N. Novaković, & T. Klein (Ed.), *ENERGY: resources and building performance* (1. baskı, Sayı June). TU Delft Open. <https://doi.org/10.47982/bookrxiv.25>
- Kumar, A., & Choudhary, S. (2021). Energy requirement, resources and future management: A review. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 59(11), 779–784. <https://doi.org/10.56042/ijpap.v59i11.48505>
- Kumar, A., Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S., & Mishra, S. (2010). Renewable energy in India: Current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2434–2442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.003>
- Kumar, A. M., & Karuvelam, P. S. (2023). PV Fed EV Charging System Based on Re-lift Luo Converter and DAB Converter. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(4), 2609–2621. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01360-4>
- Kumar, K., Tiwari, R., Babu, N. R., & Prabhu, K. R. (2018). Analysis of MISO Super Lift Negative Output Luo Converter with MPPT for DC Grid Connected Hybrid PV/Wind System. *Energy Procedia*, 145, 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.04.062>
- Larabı, Z. (2023). *Comparative study of different mppt algorithms on 250kw grid-connected pv system*. (Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi)
- Luo, F. L. (2008). Analysis of super-lift Luo converters with capacitor voltage drop. *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008*, Singapur, 417–422. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2008.4582550>
- Luo, F. L., & Ye, H. (2003). Positive output super-lift converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(1), 105–113. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.807198>
- Luo, F. L., & Ye, H. (2016). *Advanced DC/DC Converters* (M. H. Rashid (ed.); 2.). CRC Press.
- Lüy, M., Metin, N. A., & Civelek, Z. (2024). Maximum Power Point Tracking with Incremental Conductance and Fuzzy Logic Controller in Solar Energy Systems. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 11(1), 120–130. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1310705>

- Mahdizadeh, S., Gholizadeh, H., & Gorji, S. A. (2022). A Power Converter Based on the Combination of Cuk and Positive Output Super Lift Luo Converters: Circuit Analysis, Simulation and Experimental Validation. *IEEE Access*, 10, 52899–52911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175892>
- McNeill, F. M., & Thro, E. (1994). *Fuzzy Logic A Practical Approach*. AP Professional.
- Menzri, F., Boutabba, T., Benlaloui, I., Bawayan, H., Mosaad, M. I., & Mahmoud, M. M. (2024). Applications of hybrid SMC and FLC for augmentation of MPPT method in a wind-PV-battery configuration. *Wind Engineering*, 48(6), 1186–1202. <https://doi.org/10.1177/0309524X241254364>
- Mohammad, K. A., & Musa, S. M. (2024). Enhancement of solar energy utilization through an artificial neural network controller featuring a dynamic learning rate and a positiveoutput super lift luo converter. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 12(2), 663–673. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.12.2.0338>
- Mohd Yunus, A. N., Mohammad Noor, S. Z., & Musa, S. (2022). Three-phase Inverter with Fuzzy Logic Control (FLC) based Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique for Grid Connected Photovoltaic (GCPV) System. *International Journal of Academic Research in Economics and Management Sciences*, 11(4), 59–76. <https://doi.org/10.6007/ijarems/v11-i4/15018>
- Mombekova, G., Nurgabylov, M., Baimbetova, A., & Keneshbayev, B. (2024). The relationship between energy consumption, population and economic growth in developing countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(3), 368–374. <https://doi.org/10.1080/12269328.2014.895083>
- Mustafa, A. F. (2023). *Bulanık Mantık Denetleyici Kullanılarak MPPT Performansının İyileştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi)
- Nada, A. A., & Bayoumi, M. A. (2024). Development of embedded fuzzy control using reconfigurable FPGA technology. *Automatika*, 65(2), 609–626. <https://doi.org/10.1080/00051144.2024.2313904>
- Naiem-Ur-Rahman, M., Hasan, M. M., Raka, A. M., Rahman, M. F., Rana, M. M., Mansur, A. Al, & Razzak, M. A. (2025). An asymmetric fuzzy-based self-tuned PSO-Optimized MPPT controller for grid-connected solar photovoltaic system. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100902. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100902>
- Nasser, K. W., Yaqoob, S. J., & Hassoun, Z. A. (2020). Improved dynamic performance of photovoltaic panel using fuzzy logic-MPPT algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(2), 617–624. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i2.pp617-624>
- Nzoundja Fapi, C. B., Tchakounte, H., Hamida, M. A., Wira, P., & Kamta, M. (2023).

Experimental Implementation of Improved P&O MPPT Algorithm based on Fuzzy Logic for Solar Photovoltaic Applications. *11th International Conference on Smart Grid, icSmartGrid 2023*, Paris, France, 350-355. <https://doi.org/10.1109/icSmartGrid58556.2023.10169143>

Ödük, M. N. (2019). *Bulanık Mantık Yöntemi Ve Uygulamaları*. Iksad.

Oğuz, Y., Karakan, A., & Uslu, B. (2015). Afyonkarahisar'da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 23(149), 47–58.

Osmanoğlu, M. (2024). *Fuzzy 8*. Ankara üniversitesi. <https://acikders.ankara.edu.tr/course/view.php?id=8936> (Erişim tarihi: 26.12.2024)

Özbay, H. (2020). Comparison of Sliding Mode and Fuzzy Logic MPPT Techniques for PV Systems. *Electronic Letters on Science & Engineering (e-LSE)*, 16(1), 26–35.

Özkaya, S. Y. (2004). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. Uluslararası Ekonomik Sorunlar [Dışişleri Bakanlığı Yayınları]. <https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa> (Erişim tarihi: 25.10.2024)

Piao, X., & Managi, S. (2023). Household energy-saving behavior, its consumption, and life satisfaction in 37 countries. *Scientific Reports*, 13, 1382. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28368-8>

Prem, K. S., Ezhileesha, V., Sharmitha, D., & Arun, R. R. (2023). An improved P&O based optimization control algorithm for voltage improvement in stand-alone PV system. *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICAECA56562.2023.10199516>

Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>

Rashid, M. H. (2019). *Güç Elektroniği: Yarıiletken Elemanlar, Devreler ve Uygulamaları* (S. Sünter & T. Aydemir (ed.); 4. baskı). Nobel Akademik Yayıncılık.

Reshma Gopi, R., & Sreejith, S. (2018). Converter topologies in photovoltaic applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.047>

Rona, E. (2024). *Güneş Enerjisinin Kısa Geçmişi – I*. Kurious - Koç Üniversitesi. <https://kurious.ku.edu.tr/gunes-enerjisinin-kisa-gecmisi-i/> (Erişim tarihi: 28.10.2024)

- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic With Engineering Applications* (3.). WILEY.
- Sadeghian, M. A., Wang, L., & Zhou, Y. (2025). Active tuned mass damper inerter with optimized fuzzy logic controller for structural seismic vibration mitigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 194, 109353. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109353>
- 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., & Okumuş, H. I. (2011). Fuzzy logic controlled buck-boost DC-DC converter for solar energy-battery system. *2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, June 2011, İstanbul, Türkiye*, 394–397. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2011.5946099>
- Sahu, P., Maurya, N. S., & Sahu, S. (2018). Automatic Sun Tracking for the Enhancement of Efficiency of Solar Energy System. *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Phuket, Thailand, 1-4. <https://doi.org/10.23919/ICUE-GESD.2018.8635594>
- Salameh, T., Farag, M. M., Hamid, A.-K., & Hussein, M. (2025). Adaptive neuro-fuzzy inference system for accurate power forecasting for on-grid photovoltaic systems: A case study in Sharjah, UAE. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100958. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100958>
- Salım, R. Y. A. (2021). *Güneş enerjisi sisteminin performansını iyileştirmek için bulanık mantığa dayalı maksimum güç noktası takip algoritması*. (Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi)
- Samavat, T., Nazari, M., Ghalehnoie, M., Nasab, M. A., Zand, M., Sanjeevikumar, P., & Khan, B. (2023). A Comparative Analysis of the Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems for MPPT of an Islanded PV System. *International Journal of Energy Research*, 2023(1), 7676113. <https://doi.org/10.1155/2023/7676113>
- Shaikh, A. M., Shaikh, M. F., Shaikh, S. A., Krichen, M., Rahimoon, R. A., & Qadir, A. (2023). Comparative analysis of different MPPT techniques using boost converter for photovoltaic systems under dynamic shading conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57(2023), 103259. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103259>
- Shukla, A., & Mohaney, S. (2022). A Complete review of FLC MPPT Technique and Comparison with INC Technique. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 10(6), 1245–1253. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44031>
- Solargis. (2024). *Solar resource maps & GIS data*. <https://solargis.com/resources/free->

maps-and-gis-data?locality=world (Erişim tarihi: 23.09.2024)

- Sugianto, S. (2020). Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. *INTEK: Jurnal Penelitian*, 7(2), 92–100. <https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625>
- Surya, P. P., Irawan, D., & Zuhri, M. (2017). Review and comparison Of DC-DC converters for maximum power point tracking system in standalone photovoltaic (PV) module. *2017 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, Surabaya, Endonezya, 242-247. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2017.8387595>
- Sutikno, T., Aprilianto, R. A., Nik Idris, N. R., & Samosir, A. S. (2023). Performance numerical evaluation of modified single-ended primary-inductor converter for photovoltaic systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(4), 3720–3732. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3720-3732>
- Sutikno, T., Subrata, A. C., & Elkhateb, A. (2021). Evaluation of fuzzy membership function effects for maximum power point tracking technique of photovoltaic system. *IEEE Access*, 9, 109157–109165. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102050>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Güneş Enerji Potansiyelimiz*. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (Erişim tarihi: 23.09.2024)
- Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances. *Systems Science and Control Engineering*, 12(1), 1–34. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>
- Taşcıoğlu, A., & Yıldırım Keser, H. (2019). Solar Energy in the Logistics Sector: Assessments on Turkey. *Journal of Business and Social Review in Emerging Economies*, 5(2), 225–236. <https://doi.org/10.26710/jbsee.v5i2.822>
- Teke, M., Al-Arjeeli, A. S. M., & Korkmaz, F. (2023). Design and Comparison of MPPT Controller for PV Systems. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 1–15.
- Tellapati, A. D., Sagar, E., Greeshma, K., & Ananya, R. (2024). Enhancing Solar PV System with High-Gain DC/DC Converters. *2024 5th International Conference for Emerging Technology, INCET 2024*, Karnataki, India, 1-5. <https://doi.org/10.1109/INCET61516.2024.10593057>
- Topkaya, S. O. (2012). A discussion on recent developments in Turkey's emerging solar power market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3754–3765. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.019>

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Güneş*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (Erişim tarihi: 23.09.2024)
- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Elektrik*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim tarihi: 23.09.2024)
- Vijayakumar, S., & Sudhakar, N. (2024). Golden eagle optimized fractional-order PI controller design for a PFC SEPIC converter in EV charging. *Scientific Reports*, 14, 20954. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69653-4>
- Vinitha, J. C., Ramadas, G., & Rani, P. U. (2024). PSO Based Fuzzy Logic Controller for Load Frequency Control in EV Charging Station. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19(1), 193–208. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01568-y>
- Wang, M., Gao, B., Lei, J., Quan, X., & Guan, Y. (2025). Improved White Shark Optimizer Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems Under Partial Shading Conditions. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(3), 1293–1306. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-02084-3>
- Yadav, C., Bhardwaj, M. K., Patel, S., Yadav, S., Bharati, K. K., & Shekhar, Y. (2024). Fault Detection and Location in Power System Using Fuzzy Logic Controller: A Review. *2024 3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, PARC 2024*, Kanada, Toronto, 427-432. <https://doi.org/10.1109/PARC59193.2024.10486521>
- Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2022). *Güneş Enerji potansiyel Atlası (GEPA)*. <https://gepa.enerji.gov.tr/> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- Yılmaz, H., & Şahin, M. E. (2023). Bulanık Mantık Kavramına GenelBir Bakış. *Takvim-i Vekayi*, 11(1), 94–129.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zadeh, L. A. (1972). A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. *Journal of Cybernetics*, 2(3), 4–34. <https://doi.org/10.1080/01969727208542910>
- Zadeh, L. A. (1996). *Fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems* (G. J. Klir & B. Yuan (ed.); 6. baskı). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/2895>
- Zerimeche, I., Haouam, A., Mehazzem, F., Nabti, K., & Chenni, R. (2020). A comparative study between PI and cascaded sliding regulator based on rotor flux oriented control for photovoltaic pumping system and fuzzy MPPT optimization. *Energetika*, 66(1), 24–38. <https://doi.org/10.6001/energetika.v66i1.4296>
- Zohuri, B., Mossavar-Rahmani, F., & Behgounia, F. (2022). Chapter 15-Nonrenewable

energy. İçinde *Knowledge is Power in Four Dimensions: Models to Forecast Future Paradigm* (ss. 465–512). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/C2021-0-02583-9>

