



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN EĞRİ ÇIKARIMLI
VE ANFİS TABANLI MPPT GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper Fatih DEMİR

Danışman: Doç. Dr. Abdullah Hakan YAVUZ

TOKAT- 2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Abdullah Hakan Yavuz danışmanlığında hazırlamış olduğum “TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN EĞRİ ÇIKARIMLI VE ANFİS TABANLI MPPT GELİŞTİRİLMESİ” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

31/01/2023

Tez Yazarı (Ad Soyad) İmza

Alper Fatih DEMİR

JÜRİ KABUL VE ONAY

Alper Fatih Demir tarafından hazırlanan “**Termoelektrik Jeneratörler İçin Eğri Çıkarımlı ve ANFIS Tabanlı MPPT Geliştirilmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 31.01.2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği’nde Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan) :.....	
Üye :	
Üye :	
Üye :	
Üye :	

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında desteklerini esirgmeden yanımda olan sevgili aileme ve tez çalışmam boyunca yol gösteren, destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Öğr. Üyesi A. Hakan YAVUZ'a teşekkür ederim.



ÖZET

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN EĞRİ ÇIKARIMLI VE ANFIS TABANLI MPPT GELİŞTİRİLMESİ

Demir, Alper Fatih

Yüksek Lisans, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Hakan Yavuz

Ocak 2023, xv + 63 sayfa

Sürdürülebilir bir kalkınma için enerjinin yenilenebilir kaynaklardan ve yüksek verimlilikle çevreci teknolojilerle üretilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, doğrudan enerji dönüşümü yapan sistemlerin geliştirilmesi ile enerji dönüşüm kayıpları azaltılabileceği gibi sistemler daha basit yapılara indirgenebilecektir.

Termoelektrik jeneratörler (TEJ) atık ısılardan doğrudan elektrik enerjisi üretimi sağlayarak enerji verimliliğine katkıda bulunurlar. TEJ'in ürettiği gücün maksimum seviyede yüke aktarılabilmesi için TEJ'in iç direnci ile yük direnci eşit olmalıdır. Bu eşitlik her zaman mümkün olmadığından dolayı TEJ iç direnci ile yük arasındaki uyumu sağlamak üzere çeşitli maksimum güç noktası izleyici (MPPT) yöntemleri uygulanır.

Bu çalışmada, TEJ'in maksimum güç noktasını (MPP) belirlemek ve izlemek için geleneksel değiştir ve izle (P&O) yöntemi üzerinden geliştirilen eğri çıkarımlı ve ANFIS tabanlı MPPT algoritması (EÇ – ANFIS) önerilmiştir. Önerilen MPPT tasarımının performansı, farklı termal ve elektriksel çalışma koşulları altında MATLAB simülasyon çalışmasıyla doğrulanarak, sonuçlar geleneksel P&O tabanlı MPP izleyici ile karşılaştırılmıştır.

Önerilen yöntemde, MPP'nin bulunması ve MPP çevresinde kararlı bir çıktının korunması için TEJ'in güç – gerilim eğrisine ait matematiksel fonksiyonu çıkarılarak MPP'si doğrudan bulunmuş, DA – DA dönüştürücüsünün görev döngüsü ANFIS vasıtasıyla değiştirilerek izlenmiştir.

TEJ'in anlık çalışma koşuluna özgü güç – gerilim fonksiyonu üzerinden MPP'si ve çalışma noktasının MPP'ye olan uzaklığı (hata) matematiksel olarak tek seferde ve net bir şekilde tespit edilmiştir. Hatanın büyüklüğü ve değişim hızına göre ANFIS tarafından

pertürbasyon adımının genişliği ayarlanmıştır. Pertürbasyon adım büyüklüğünün değişken olması MPP'nin hızlı bir şekilde yakalanmasını ve kalıcı durum salınımının sıfırlanmasını sağlamıştır. Yapılan denemelerde önerilen sistemin 2 ila 5 adım arasında hızlı bir şekilde MPP'ye ulaştığı ve MPP'ye ulaştıktan sonra kalıcı durum salınımının sıfırlandığı görülmüştür. Önerilen yöntem, geleneksel P&O yöntemine göre herhangi bir ilave donanım gerektirmeden sadece yazılımsal değişiklikle artırılmış MPPT kabiliyeti sunmuştur. MPPT tekniğinden istenen hızlı takip ve kalıcı durum hatasının minimum seviyeye indirilmesi gereksinimleri karşılanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik, enerji verimliliği, ANFIS, maksimum güç noktası izleyici

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF CURVE SUBTRACTION AND ANFIS BASED MPPT FOR THERMOELECTRIC GENERATORS

Demir, Alper Fatih

Master's Thesis, Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah Hakan Yavuz

December 2022, xv + 63 pages

For a sustainable development, energy must be produced from renewable sources and with high efficiency environmental technologies. In this context, energy conversion losses can be reduced and systems can be reduced to simpler structures by developing systems that directly convert energy.

Thermoelectric generators (TEJ) contribute to energy efficiency by generating electrical energy from waste heat. In order for the power produced by the TEJ to be transferred to the load at the maximum level, the internal resistance of the TEJ and the load resistance must be equal. Since this equation is not always possible, various maximum power point tracker (MPPT) methods are applied to ensure the match between the TEJ internal resistance and the load.

In this study, the ANFIS-based curve extraction MPPT algorithm (EÇ – ANFIS), developed over the traditional Perturb-and-Observe (P&O) method, is proposed to detect and track the maximum power point (MPP) of TEJ. The performance of the proposed MPPT design is verified by MATLAB simulation study under different thermal and electrical operating conditions, and the results are compared with a conventional P&O based MPP tracker.

In the proposed method, in order to find the MPP and maintain a stable output around the MPP, the MPP is directly found through subtracting mathematical function of the power-voltage curve of the TEJ and tracked by changing the duty cycle of the DC – DC converter via ANFIS.

The MPP of the TEJ and the distance (error) of the operating point to the MPP were determined quickly and clearly through the power – voltage function specific to the instantaneous operating condition. The width of the perturbation step was adjusted by

ANFIS according to the size of the error and the rate of change. Variable perturbation step size enabled rapid capture of MPP and elimination of steady state oscillation. In the experiments, it was observed that the proposed system reached the MPP quickly between 2 and 5 steps, and the steady state oscillation was reset after reaching the MPP. The proposed method offered increased MPPT capability with only software modification, without requiring any additional hardware compared to the traditional P&O method. The demands from the MPPT technique to track fast and to minimize steady-state error were met.

Key Words: Thermoelectric, energy efficiency, ANFIS, maximum power point tracker



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TERMOELEKTRİK.....	7
2.1. Seebeck Etkisi	7
2.2. Peltier Etkisi	8
2.3. Thomson Etkisi	9
2.4. Thomson (Kelvin) İlişkileri.....	9
2.5. Joule Isısı.....	10
2.6. Kalite Faktörü.....	10
2.7. Termoelektrik Jeneratörler	11
2.8. TEJ'lerin Yapısı	11
2.9. Termoelektrik Jeneratörlerin Performans Parametreleri	13
2.10. TEJ'ler için Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT).....	16
2.10.1. P&O yöntemi	19
2.10.2. Artan İletkenlik (INC) yöntemi	20
2.10.3. Açık Devre Gerilimi (OCV) ve Kısa Devre Akımı (SCC) yöntemleri.....	21
2.11. MPPT için Kullanılan DA – DA Dönüştürücüler	22
2.11.1. Alçaltan (buck) dönüştürücü.....	23

2.11.2. Yükselten (boost) dönüştürücü	23
2.11.3. Alçaltan – yükselten (buck – boost) dönüştürücü.....	24
2.12. ANFIS.....	25
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	28
3.1. TEJ Modellemesi	28
3.2. Alçaltan – Yükselten DA Dönüştürücünün Modellenmesi.....	34
3.3. Karşılaştırılan Yöntem	34
3.4. Önerilen Eğri Çıkarımlı ANFIS Tabanlı MPPT Yöntemi	35
3.5. Çalışma için ANFIS Modelinin Hazırlanması	40
3.6. Performans Kriterleri	43
3.6.1. Stabil koşullarda farklı ΔT değerleriyle gerçekleştirilen testler	43
3.6.2. Dinamik yük değişimi testleri.....	44
3.6.3. Dinamik sıcaklık değişimi testleri	44
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI	46
4.1. Stabil Koşullarda Farklı ΔT Değerleriyle Gerçekleştirilen Testler.....	46
4.2. Dinamik Yük Değişimi Testleri	49
4.3. Dinamik Sıcaklık Değişimi Testleri.....	52
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	56
Kaynaklar.....	59

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3-1. Kullanılan TE karakteristikleri.....	28
Tablo 3-2. DA dönüştürücü parametreleri.....	34
Tablo 3-3. Stabil Koşullarda Farklı ΔT Değerleriyle Gerçekleştirilen Testler.....	44
Tablo 3-4. Dinamik yük değişimi test koşulları	44
Tablo 3-5. Dinamik sıcaklık değişimi test koşulları	45
Tablo 4-1. Farklı ΔT değerleriyle stabil koşullarda yapılan testlerin sonuçları.....	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Seebeck etkisi (HoSung Lee, 2016)	7
Şekil 2.2. Peltier ve Thomson etkilerinin gösterimi (HoSung Lee, 2016).....	9
Şekil 2.3. Bazı termoelektrik malzemelerin ZT değerleri (HoSung Lee, 2016).....	11
Şekil 2.4. TEJ'in yapısı (Mamur, 2020)	13
Şekil 2.5. Farklı ΔT değerlerine göre akım, gerilim, güç ve MPP eğrileri (Mamur & Çoban, 2020b).....	17
Şekil 2.6. TEJ güç - gerilim eğrisi üzerinde MPPT (Mamur, 2020).....	18
Şekil 2.7. Değişik sıcaklık farklarına göre MPP'nin değişimi (Bunthern, 2014).....	18
Şekil 2.8. P&O MPPT akış diyagramı	20
Şekil 2.9. INC MPPT akış diyagramı	21
Şekil 2.10. Alçaltan (buck) dönüştürücü şeması (recom-power.com, 2022).....	23
Şekil 2.11. Yükselten (boost) dönüştürücü (recom-power.com, 2022).....	24
Şekil 2.12. Alçaltan – yükselten dönüştürücü şeması (recom-power.com, 2022).....	25
Şekil 3.1. Önerilen MPPT yönteminin blok diyagramı	28
Şekil 3.2. TEJ eşdeğer devresi (Bijukumar, 2019)	29
Şekil 3.3. Simulink'te oluşturulan TEJ modeli.....	30
Şekil 3.4. MPPT'siz Simulink uygulaması	31
Şekil 3.5. P&O MPPT'nin Simulink uygulaması	32
Şekil 3.6. Önerilen EÇ – ANFIS MPPT'nin Simulink uygulaması.....	33
Şekil 3.7. MPPT olmadan devre blok şeması	34
Şekil 3.8. P&O MPPT'nin kullanıldığı devre blok şeması.....	35
Şekil 3.9. Akış diyagramı	39
Şekil 3.10. Temel ANFIS yapısı.....	26
Şekil 3.11. Önerilen MPPT yönteminin ANFIS blok şeması	40
Şekil 3.12. Hatanın üyelik fonksiyonları	40

Şekil 3.13. Hatanın değişim hızının üyelik fonksiyonları	41
Şekil 3.14. ANFIS kontrol kurallarının yüzey görünümü	43
Şekil 4.1. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT cevapları.....	48
Şekil 4.2. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve MPPT’siz TEJ gücü.....	47
Şekil 4.3. Farklı ΔT değerlerine göre teorik güç – gerilim eğrileri	47
Şekil 4.4. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT görev döngüsü değişimleri	49
Şekil 4.5. Zamana göre dinamik yük değişimi	50
Şekil 4.6. Dinamik yük değişimine göre EÇ – ANFIS ve MPPT’siz durum güç karşılaştırması	50
Şekil 4.7. Dinamik yük değişimine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT cevapları.....	51
Şekil 4.8. Dinamik yük değişimine göre görev döngüsü değişimleri.....	52
Şekil 4.9. Zamana göre dinamik sıcaklık (ΔT) değişimi	53
Şekil 4.10. Dinamik sıcaklık değişimine göre EÇ – ANFIS ve MPPT’siz durum güç karşılaştırması	53
Şekil 4.11. Dinamik sıcaklık değişimine göre MPPT cevapları	54
Şekil 4.12. Dinamik sıcaklık değişimine göre görev döngüsü değişimleri	55

SİMGE VE KISALTMALAR

SİMGELER

C : Santigrat (derece)

K : Kelvin (derece)

mK : mili Kelvin (derece)

W : Watt

P : Güç (W)

I : Akım (A)

J : Joule

A : Amper

V : Volt

Ω : Ohm (elektrik direnç birimi)

cm : Santimetre

ρ : Elektriksel öz direnç (Ωcm)

σ : Elektriksel öz iletkenlik ($1/\Omega\text{cm}$)

k : Termal öz iletkenlik (W/mK)

α : Seebeck katsayısı

π : Peltier katsayısı

τ : Thomson katsayısı

∇T : Sıcaklık gradyanı

ZT : Kalite faktörü (Figure of Merit)

T_h : Sıcak yüzey sıcaklığı

T_c : Soğuk yüzey sıcaklığı

Q_{Peltier} : Peltier ısısı

Q_{Thomson} : Thomson ısısı

Q_h : Sıcak yüzeyden emilen ısı

Q_c : Soğuk yüzeyden serbest kalan ısı

W : Elektriksel güç (W)

η : Elektriksel verim

ΔT : Sıcaklık farkı (K veya °C)

V_{MPP} : Maksimum güç gerilimi (V)

I_{MPP} : Maksimum güç akımı (A)

V_{oc} : açık devre gerilimi

I_{sc} : kısa devre akımı

P_{MPP} : maksimum güç

KISALTMALAR

TE: Termoelektrik

TEJ: Termoelektrik Jeneratör

MPPT: Maximum Power Point Tracking – Maksimum Güç Noktası İzleyici

MPP: Maximum Power Point – Maksimum Güç Noktası

DA: Doğru Akım

ANFIS: Adaptive Neural Fuzzy Inference System

PWM: Pulse Width Modulation – Darbe Genişlik Modülasyonu



1. GİRİŞ

Günümüzde enerji küresel bir güç unsurudur. Sürdürülebilir bir kalkınma için enerjinin yenilenebilir kaynaklardan ve yüksek verimlilikle çevreci teknolojilerle üretilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, doğrudan enerji dönüşümü yapan sistemlerin geliştirilmesi ile enerji dönüşüm kayıpları azaltılabileceği gibi sistemler daha basit yapılara indirgenebilecektir (Ozdemir, 2019).

Son zamanlarda, termal enerji, çeşitli uygulamalar için uygun bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Mamur & Çoban, 2020b). Termal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren termoelektrik jeneratörler (TEJ) sürdürülebilir enerji alanında artan bir ilgi kazanmış olup, sobalar (Sornek ve ark., 2019), araçların egzoz çıkışları (Zhang, 2018), kol saatleri (Snyder, 2008), kombiler (Yavuz, 2019), uzay teknolojisi cihazları (O'Brien et al., 2008) gibi çok sayıda alanda kullanılabilmektedir. Atık ısıdan enerji hasadı üzerine uygulama araştırmaları devam etmekte olup, endüstriyel tesisler (Omer ve ark., 2020), tarımsal sulama (Yavuz, 2020), güneş kollektörleri (Omer ve ark., 2017) gibi çeşitli alanlarda kullanımlarına yönelik araştırma çalışmaları da bulunmaktadır. Doğrudan elektrik enerjisine dönüşüm sağlamaları, hareketli mekanik parça içermemeleri, güvenilir ve kompakt yapıda olmaları TEJ'ler için avantaj sağlamaktadır (Fernández-Yáñez ve ark., 2021). Diğer yandan, TEJ'lerin atık ısıdan enerji dönüşüm verimlilikleri %5-10 civarındadır, buna karşın, atık enerjinin yeniden kullanımı düşünüldüğünde verimlerinin düşük olması göz ardı edilebilir (Raşit Ahiska & Mamur, 2014).

TEJ'ler, Seebeck etkisi yoluyla termal gücü elektriğe dönüştürmek için kullanılan ekipmanlardır (Wu ve ark., 2018). Bu etkiyle, iki farklı iletken veya yarı iletken arasında bir sıcaklık farkı oluştuğunda gerilim üretilmiş olur (Jouhara ve ark., 2021). TEJ'ler, iki ısı eşanjörü arasına yerleştirilmiş bir dizi termoelektrik (TE) modülden oluşur. Her bir TE modülü, elektriksel olarak seri, termal olarak ise paralel şekilde birbirine bağlanan ve içlerinden geçen termal enerjinin bir kısmını doğrudan elektriğe dönüştüren farklı sayılarda TE çiftlerinden oluşur (Champier, 2017).

TEJ'lerden kazanılan gücü en üst düzeye çıkarmak için en iyi elektriksel çalışma noktasını hızlı ve hassas bir şekilde ayarlamak çok önemlidir. Güç elektroniği dönüştürücülerinin, TEJ tarafından görülen sanal yükü, dönüştürücünün görev çevrimini

değiştirerek gerçek iç direnciyle eşleştiren bir maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması ile kontrol edilmesi gerekmektedir (Montecucco & Knox, 2015).

Maksimum güç aktarımı teoremine göre, kaynaktan yüke maksimum güç aktarımı, TEJ iç direnci ile yük direnci eşit olduğunda gerçekleşir (Bepinkumar Bijukumar ve ark., 2019). Dolayısıyla, dinamik sıcaklık ve değişen yüke sahip bir ortamda TEJ'in maksimum güç noktasının (MPP) doğru bir şekilde izlenmesi gerekir.

TEJ sistemleri için çok sayıda MPPT yöntemi geliştirilmiş olup, iyileştirmelere yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu amaçla, değiştir ve izle (P&O) (Bunthern ve ark., 2014), artımlı iletkenlik (INC) (Twaha, Zhu, Yan, ve ark., 2017), kesirli artımlı direnç (Aldhaifallah ve ark., 2021), açık devre (Pamod ve ark., 2019), kısa devre (Dalala & Zahid, 2015), lineer ekstrapolasyon (B. Bijukumar ve ark., 2018) gibi algoritmalar uygulanmaktadır. Bu gibi algoritmalar arasında P&O ve INC en yaygın kullanılanlardır (Bepinkumar Bijukumar ve ark., 2019). P&O'ya dayalı MPPT yaklaşımında TEJ'in elektriksel çalışma noktası bozulur ve maksimum güce ulaşmak için yön değişikliği takip edilir (Mamur & Çoban, 2020a).

Twaha ve ark (2017) TEJ üzerinde maksimum güç noktasını izlemek (MPPT) için bir ekstremum arama kontrol (ESC) algoritması geliştirmiştir. ESC, esas olarak bilinmeyen ve/veya zamanla değişen bir maliyet fonksiyonu $l(t, u)$ için bir $U_{opt}(t)$ girdisini bulma ve optimize etme çevrim içi optimizasyon problemi ile ilgilenir, burada $u(t)$ girdi parametre vektörüdür. ESC tekniğinin etkinliği, P&O MPPT yönteminin sonuçlarıyla aynı çalışma koşulları altında karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve ESC MPPT yönteminin %6,1 oranında konvansiyonel P&O'dan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Twaha, Zhu, Maraaba, ve ark., 2017).

Rodriguez ve ark (2019) bir Yüksek Frekanslı Enjeksiyon (HFI) MPPT yöntemi önermiş ve deneysel olarak test ederek literatürde en yaygın olarak kullanılan MPPT şeması olan P&O ile karşılaştırmışlardır. Yüksek Frekans Enjeksiyon yöntemi, TEJ'in çalışmasına yüksek frekanslı bir sinyal ekleyerek çalışır ve bu durum doğrudan TEJ'in MPP'sine ulaşmak için kontrol edilebilen bir ofset ile sonuçlanır. Deneysel sonuçlar, önerilen MPPT yönteminin yanıt süresinin, literatürde sunulan herhangi bir şemadan 3 kat daha hızlı olan 2.4ms olduğunu göstermiştir. Önerilen yöntemin bir avantajı, algoritmanın

mevcut MPPT donanımına uygulanabilmesidir, yani ek sensörler yoktur. HFI şeması, kullanıma hazır bir dönüştürücü ile uygulanmış ve en hızlı kaydedilen dinamikleri elde ederken, en iyi kararlı durum izleme şemalarıyla karşılaştırılabilir %99,73'lük kalıcı durum izleme verimliliği elde etmiştir. Termal geçişler sırasında HFI MPPT, %98.7 verimlilik sergilemiştir (Rodriguez ve ark., 2019).

Shang ve ark (2020), IoT uygulamalarında termoelektrik enerji kazanımı için yaptıkları çalışmalarında TE modülü üzerine entegre şekilde bir yükseltici dönüştürücü tasarlamışlardır. TEJ'in iç direnci için donanım açısından verimli bir MPPT devresi sunulan çalışmada, standart 180nm CMOS ile 120mV giriş voltajında ve 600uW çıkış gücünde %83,9'luk verim elde edilmiştir. Geliştirilen tasarım, düşük çıkış dalgalanmasıyla verim artışı sağlamıştır (Shang ve ark., 2020).

Yahya ve Alomari (2021) çalışmalarında, güç eğrisinin başlangıç ve bitiş noktalarında TEJ cihazlarının çıkış gücünü ölçüp karşılaştırmasını yaparak yükseltici dönüştürücüyü kontrol eden, güç diferansiyelleri maksimum güç noktası izleme (PD-MPPT) algoritması önermişlerdir. Algoritmada, gücün birinci düşük noktası dönüştürücünün görev döngüsü sıfıra yakın olduğunda başlamakta, ikinci düşük noktası ise dönüştürücünün görev döngüsü 1'e yakın olduğunda başlamaktadır. Kabarcık sıralama yöntemiyle karakteristik eğrinin ölçülen güç değerlerini karşılaştırmakta ve en büyük değeri seçerek maksimum güç noktasını yakalamaya çalışmaktadır (Yahya & Alomari, 2021).

Miao ve ark (2021) TEJ'den maksimum güç eldesi için zaman üstel oranlı P&O yöntemini önermiştir. Zaman üstel oranlı P&O'yu kullanan MPPT devresi PMOS'u anlık karşılaştırarak güç değişimini gözlemler ve NMOS'u anlık üstel olarak ayarlayarak gücü değiştirir, bu da geniş bir TEJ aralığı için gelişmiş bir izleme verimliliği sunar. 110nm CMOS ile uygulanan MPPT devresi 50 mV ila 400 mV arasında TEJ açık devre voltajı ve 1 Ω ila 12 Ω arasında TEJ iç direncine sahip sistemde %98,9 ila %99,5 arasında izleme verimliliği elde etmiştir (Miao ve ark., 2021).

Rezk ve ark (2021), geleneksel artımlı direnç (INR) MPPT yaklaşımının dinamik tepkisini iyileştirmek ve P&O MPPT tekniğinin kalıcı durum salınımlarını ortadan kaldırmak için PI Δ D μ kontrol konseptine dayalı, optimize edilmiş bir fraksiyonel artımlı direnç izleyicisi (OF-INRT) geliştirmişlerdir. OF-INRT'in optimal parametreleri,

popölasyona dayalı sinüs kosinüs algoritması (SCA) kullanılarak belirlenmiştir. Tanıtılan SCA'nın optimalliğini doğrulamak için yapılan deneylerde sonuçlar parçacık sürüşü optimizasyonu (PSO) ve balina optimizasyon algoritması (WOA) tabanlı tekniklerle karşılaştırılmıştır. Verimlilik açısından, SCA ile maksimum %96.56 verim elde edilirken, en düşük verim %80,33 olarak PSO ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, optimize edilmiş fraksiyonel MPPT yöntemi, sırasıyla INR ve P&O MPPT yöntemlerine kıyasla dinamik yanıtı artırmayı ve kalıcı durum salınımlarını ortadan kaldırmayı başarmıştır (Rezk ve ark., 2021).

Kanagaraj (2021) fotovoltaiik ve termoelektrik jeneratörü birlikte kullanarak hibrit sistem oluşturmuş ve tasarladığı MPPT modeliyle Matlab programı üzerinde simüle etmiştir. Geliştirdiği sistemde maksimum güç noktasını takip için değişken artımlı iletkenlik (INC) yöntemiyle kesir dereceli bulanık mantık denetleyicisi (FOFLC) tabanlı bir kontrol tekniğı kullanmıştır. Önerilen sistem konfigürasyonunda, TEJ, gelen güneş ışınımı nedeniyle PV panelde üretilen atık ısı enerjisini kullanarak ekstra elektrik enerjisi üretmek için PV panele monte edilmiştir. PV ve TEJ, çıkış voltaj seviyesini artırmak ve böylece güç çıkışını iyileştirmek için elektriksel olarak seri olarak bağlanmıştır. Önerilen MPPT tekniğı, hız ve doğruluk açısından maksimum gücü elde etmedeki etkinliğini doğrulamıştır. Ayrıca, çalışma sonucuna göre PV ve TEJ hibrit sistemi, bağımsız PV sistemine kıyasla daha yüksek enerji verimliliğı sağlamıştır (Kanagaraj, 2021b).

Kanagaraj (2021) bir diğer çalışmasında, TEJ için değişken kesirli faktör kullanan adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemi (VFANFIS) tabanlı MPPT önermiştir. Önerilen bu MPPT tekniğinde, güç-gerilim (P-V) eğrisinde TEJ'in çalışma noktasına bağılı olarak izleme adım boyutunu belirleyebilmek üzere değişken bir kesirli faktör kullanılmıştır. TEJ voltajındaki değişime bağılı olarak belirlenen kesirli faktör değeri, değişken izleme adım boyutunun elde edildiğı adaptif nöro-bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) giriş alanı aralığını genişletmek veya daraltmak için kullanılır. Daha büyük izleme adımı boyutu, TEJ'in çalışma noktasını hızla maksimum güç noktasına (MPP) doğru hareket ettirir, TEJ çalışma noktası MPP'ye yaklaştığında ise herhangi bir salınım olmaksızın kararlı durumu korumak için izleme adımı boyutu küçültölür. VFANFIS tabanlı MPPT tekniğı, farklı termal ve elektriksel çalışma koşulları altında MATLAB simölasyon çalışması ile denenmiştir. Çalışma sonuçlarında, önerilen MPP izleyicinin, geleneksel artımlı iletim

(INC) tabanlı MPPT tekniği ile karşılaştırıldığında MPP'yi hızlı ve doğru bir şekilde elde ederek TEJ'den maksimum gücü elde etmek için daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Kanagaraj, 2021a).

Thankakan ve Nadar (2021), rüzgâr türbinlerinin stator sargılarında oluşan ısıdan elektrik enerjisi geri kazanımı için stator çevresine termoelektrik modülleri yerleştirmişler ve bu modüllerin çıkışında maksimum gücü elde edebilmek için ANFIS tabanlı MPPT kontrolörü geliştirmişlerdir. TEJ'in üreteceği gerilimin stator sargılarındaki sıcaklığa bağlı olmasından hareketle buradaki sıcaklık değerlerine göre beklenen maksimum güç noktası ANFIS vasıtasıyla tahmin edilerek yakalanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda izleme süresinin 0.1 saniye ve izleme doğruluğunun %99.08 olarak gerçekleştiği belirtilmiştir (Thankakan & Samuel Nadar, 2021).

Aldhaifallah vd (2021) Artımlı direnç (INR) izleme yönteminin dinamik yanıtını geliştirmek ve tepe tırmanma (HC) yönteminin kararlı durum salınımını ortadan kaldırmak için, kesirli INR'ye dayalı bir MPPT yöntemi geliştirmiştir. Önerilen yöntem, tipik olarak INR yöntemiyle kullanılan gizli entegratör yerine bir kesirli PI kullanmaya dayanır. Yöntemin hem dinamik hem de kararlı durum yanıtları için HC ve INR'ye kıyasla verimli olduğu sonucuna varılmıştır (Aldhaifallah ve ark., 2021).

Vega ve Lezama (2021), dört farklı maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması ile enerjiyi süper kapasitörde depolayan, yükseltici dönüştürücü tabanlı termoelektrik enerji kazanım sistemi üzerine çalışmışlardır. Tasarladıkları devreyi geliştirmek için P&O, Artımlı İletkenlik (INC), Açık Devre Gerilimi (OVC) ve Kısa Devre Akımı (SCC) algoritmalarını test etmişler ve son olarak, OVC algoritmasını, süper kapasitörleri en hızlı şarj eden algoritma olarak tespit etmişlerdir (Vega & Lezama, 2021).

Arreola ve ark. (2022), dönüştürücünün özelliklerinin analiz edilmesiyle devre bağlantılarını kesmeye gerek kalmadan açık devre voltajını dolaylı yoldan ölçerek MPP'yi tespit eden ve bulanık mantığa dayalı olarak takip eden bir tasarım geliştirmişlerdir. Algoritma, devreye uygulanan giriş voltajı ile giriş akımının okunduğu önceden belirlenmiş bir ilk görev döngüsüne dayanmaktadır. Bu değerler ile devreden elde edilen denklemler kullanılarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı hesaplanır. Ardından maksimum güç noktasındaki görev döngüsü hesaplanarak devreye uygulanır.

Bu görev çevrimi, devreden maksimum gücü alamazsa algoritma, görev çevriminde bir artış veya azaltmayı hesaplamak için bulanık mantığa dayalı ikinci bir aşamaya başlar. Tasarlanan tekniğin, 20W'lık bir sistemde P&O tekniğine göre yüke %3,9 ila %5,6 arasında daha fazla güç sağladığı tespit edilmiştir (Marroquín-Arreola ve ark., 2022).

Bu çalışmada, TEJ'in MPP'sini elde etmek ve izlemek için eğri çıkarımlı ve ANFIS tabanlı MPPT kontrol algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemde, MPP'nin bulunması ve MPP çevresinde kararlı bir çıktının korunması için TEJ'in güç – gerilim eğrisine ait fonksiyonu üzerinden MPP'si matematiksel olarak doğrudan bulunarak ANFIS vasıtasıyla izlenmiştir.

Önerilen MPPT tasarımının performansı, farklı termal ve elektriksel çalışma koşulları altında simülasyon çalışmasıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar analiz edilmiş ve önerilen yöntemin avantajlarını doğrulamak için geleneksel P&O tabanlı MPP izleyici ile karşılaştırılmıştır.

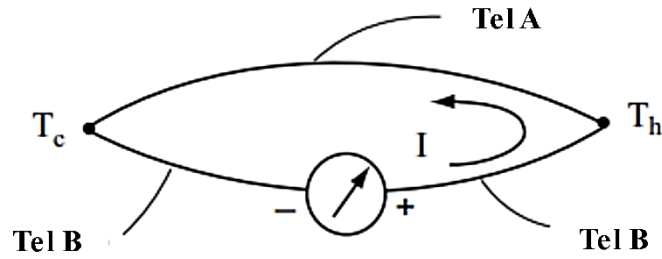
2. TERMoeLEKTRİK

Termoelektrik, termal ve elektriksel olaylar arasındaki ilişkiyi ifade eder. Termoelektrik süreçler, termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine veya tam tersine dönüştürebilir. Hem termal hem de elektriksel etkileri içeren devreye termoelektrik devre denir. Termoelektrik devrelerin çalışması literatürde üç temel etki ile ifade edilir.

2.1. Seebeck Etkisi

1821'de Thomas J. Seebeck tarafından keşfedilen Seebeck etkisi, termoelektrik jeneratörün temelini oluşturmaktadır. Bir sıcaklık farkının bir elektrik akımı oluşturmasını ifade eder. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi iki farklı metalden yapılmış bir devrenin bağlantı noktaları arasında oluşturulan sıcaklık farkıyla bir elektromotor kuvveti veya bir potansiyel fark meydana gelir. Bu kapalı devre termokupl olarak adlandırılır. Oluşan potansiyel fark ΔV , sıcaklık farkı (ΔT) ile orantılıdır ve Seebeck katsayısı (α) olarak Denklem 1'de verildiği gibi ifade edilir (Jouhara ve ark., 2021):

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$



Şekil 2.1. Seebeck etkisi (HoSung Lee, 2016)

Bir termokupl, sıcaklığı ölçmek için Seebeck etkisini kullanır. Bu etki, bir termoelektrik jeneratörün temelini oluşturur. Sonrasında Jean Peltier, bağlantı boyunca bir akım uygulayarak soğumanın gerçekleşebileceğini göstererek Seebeck etkisinin tersini keşfetmiştir.

Nanoteknolojinin gelişimiyle termoelektrik malzemelerde ve verimlilikte dikkate değer iyileşmeler olmuştur. Termoelektrik, sayısız uygulama ile giderek daha önemli hale gelmiştir. Pek çok uygulamada, her biri p-tipi ve n-tipi yarı iletken elemanlardan oluşan

bir dizi termokupl, elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel olarak iki yüksek termal iletkenlik ancak düşük elektriksel iletkenlik seramik plakalar arasına sıkıştırılarak bağlanır.

Termoelektrik prensibini kullanan temel olarak iki türde cihaz vardır: termoelektrik jeneratörler ve termoelektrik soğutucular. Bu cihazların hareketli parçaları yoktur ve bakım gerektirmezler.

Termoelektrik jeneratörler, enerji santrallerinden ve içten yanmalı motorların kullanıldığı araçlardan atık ısı geri kazanımı için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tür cihazlar, derin uzay ve dağ tepesindeki telekomünikasyon tesisleri gibi uzak alanlarda da güvenilir güç sağlayabilir.

Diğer yandan Termoelektrik soğutucular, elektronik paketlerde ve tıbbi aletlerde soğutma ve sıcaklık kontrolü sağlar (HoSung Lee, 2016).

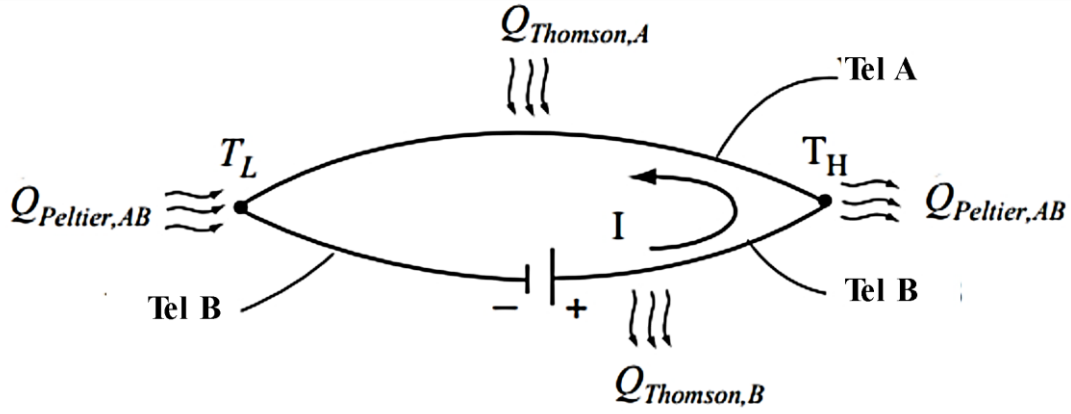
2.2. Peltier Etkisi

1834'te Jean Peltier, Seebeck'in etkisini araştırırken, Şekil 2.2'deki gibi farklı metallerin birleştirilmesiyle oluşan kapalı bir devreye DA gerilim uygulandığında akımın yönüne bağlı olarak birleşim noktalarının birinden ısı emilirken (soğutma) diğer bağlantı noktasında ısının yayıldığını (ısıtma) keşfetmiştir. Bu etkiye Peltier etkisi, açığa çıkan ısıya da Peltier ısısı denir. Açığa çıkan ısı miktarı uygulanan akımın şiddeti ile doğru orantılıdır ve akımın yönü değiştirildiğinde ısı transfer yönleri de değişir. Bu etki sayesinde Peltier soğutucu olarak bilinen katı hal tabanlı ısı pompaları üretilebilir. Peltier etkisi, iletkenlerde elektrik akımının iletilmesinde rol alan elektronların ortalama enerjisinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkar (Jouhara ve ark., 2021).

Birim zamanda üretilen Peltier ısısı (Q_{Peltier}) Watt cinsinden Denklem (2)'deki gibi ifade edilir:

$$Q_{\text{Peltier}} = \pi_{AB} \cdot I \quad (2)$$

Burada π_{AB} , Peltier katsayısını ifade eder.



Şekil 2.2. Peltier ve Thomson etkilerinin gösterimi (HoSung Lee, 2016)

2.3. Thomson Etkisi

1850'lerde William Thomson (daha sonra Lord Kelvin), hem Seebeck'in hem de Peltier'in sonuçlarını teorik olarak doğrulamayı ve iki etki arasında bağlantı kurmayı başardı. Buna göre akım taşıyan bir iletkenin herhangi iki noktası arasında bir sıcaklık farkı varsa, akımın yönüne bağlı olarak Joule ısınımına ek olarak Thomson ısısının ($Q_{Thomson}$) ortaya çıktığını keşfetti. Buna Thomson etkisi denir.

Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilen Thomson ısısı hem elektrik akımı hem de sıcaklık gradyanı (∇T) ile orantılıdır. Böylece, bir iletken boyunca emilen veya serbest bırakılan Thomson ısısı;

$$Q_{Thomson} = -\tau_{AB} I \nabla T \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada τ_{AB} Thomson katsayısıdır.

2.4. Thomson (Kelvin) İlişkileri

1854'te Thomson, termoelektriğin bu üç etkisi arasındaki ilişkileri termodinamik olarak incelemiş ve elektriksel Seebeck etkisinin termal Peltier ve Thomson etkilerinin bir kombinasyonundan kaynaklandığını göstermiştir. Termoelektrikteki tersinir ve tersinmez süreçlerin ayrılabilir olduğu varsayımıyla termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını uygulayarak (4) ve (5) numaralı denklemlerde gösterildiği gibi iki ilişki ortaya koymuştur. Bu ilişkiler daha sonra deneylerle tamamen doğrulanmıştır (HoSung Lee, 2016; Jouhara ve ark., 2021).

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (4)$$

$$\tau_{AB} = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (5)$$

2.5. Joule Isısı

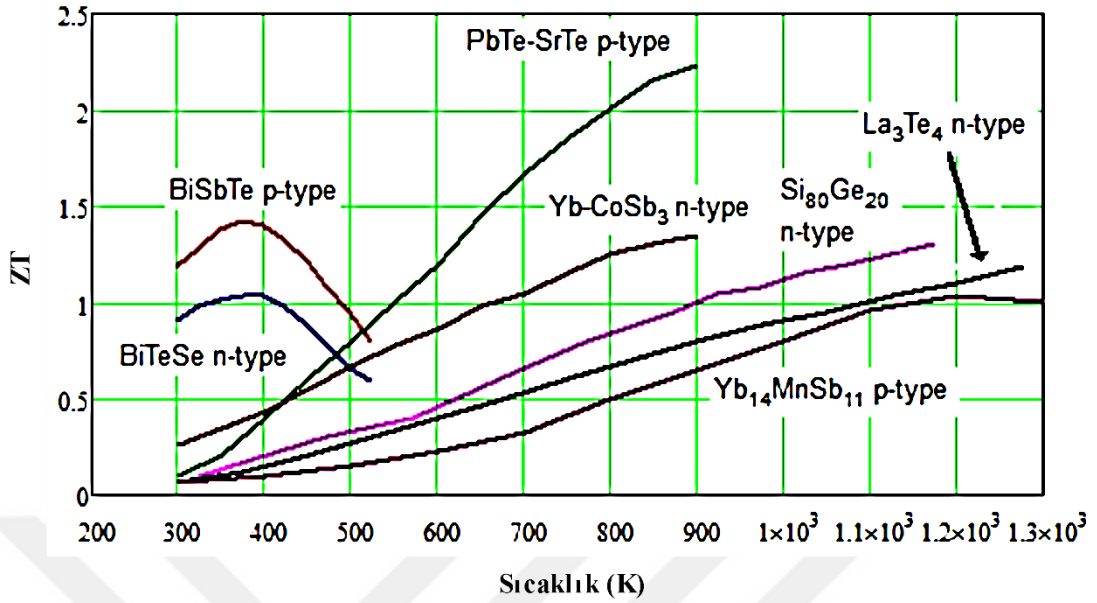
Joule ısısı iletkenler üzerinden bir akım geçirildiğinde iletkenlerin kendi iç dirençleri (ρ) nedeniyle ortaya çıkan ısıyı ifade eder. Joule ısısı akımın karesi ile orantılı değişir. Dolayısıyla, ortaya çıkan bu ısı termoelektrik devrede yüzeyler arasındaki transfer edilen ısıyı etkiler ve termoelektrik ısı denklemlerinde dikkate alınmalıdır. Peltier ısısı akımın kendisi ile Joule ısısı ise akımın karesi ile orantılı olarak değiştiğinden akım değeri arttıkça Joule ısısı Peltier etkisi ile ortaya çıkan soğutma etkisini yok eder. Bu nedenle optimum çalışma noktası açısından önemlidir. Joule ısısının azaltılması için mümkün olduğu kadar küçük öz dirence sahip malzemeler seçilmelidir (R. Ahiska ve ark., 2008).

2.6. Kalite Faktörü

Termoelektrik cihazların performansı Denklem (6)'da verildiği gibi Kalite Faktörü (Figure of Merit, Z) ile ifade edilir (Kanagaraj, 2021a).

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \quad (6)$$

Burada, σ elektriksel iletkenlik ($1/\Omega\text{cm}$), k termal iletkenlik (W/mK)'dir. Z'nin birimi $1/\text{K}$ 'dir. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini ifade etmek için ZT ile gösterilen birimsiz kalite faktörü, termoelektrik cihazların verimlerinin ifadesinde kullanılır. Verimin maksimum olabilmesi için Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenliği büyük, termal iletkenliği ise küçük olan malzemeler seçilmelidir. ZT'nin değeri doğrudan kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Şekil 3'te bazı termoelektrik malzemelerin ZT değerleri verilmiştir.



Şekil 2.3. Bazı termoelektrik malzemelerin ZT değerleri (HoSung Lee, 2016).

2.7. Termoelektrik Jeneratörler

Termoelektrik jeneratörler sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Yüzeyler arasında sıcaklık farkı meydana geldiğinde ısı dengenin sağlanması için yüzeyler arası ısı akışı olur. Yük taşıyıcıları tarafından sağlanan ısı transferi, uçlar arasında bir potansiyel fark oluşturur. Isıl denge sağlanıncaya kadar transfer devam eder. Uçlar arasına bir yük bağlanırsa yük üzerinden yük üzerinden bir akım geçer. DA'nın sürekliliğini sağlayabilmesi için emilen ısıнын ısı transfer sistemleri ile atılması gerekir. TEJ'lerde Seebeck etkisine bağlı olarak meydana gelen potansiyel fark yüzeyler arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır. Dolayısıyla tasarımda bu farkın mümkün olduğunca büyük olmasına odaklanılmalıdır.

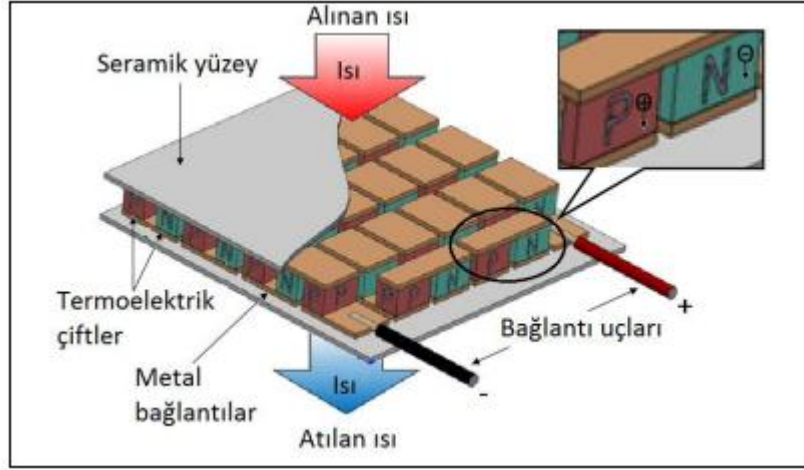
2.8. TEJ'lerin Yapısı

TEJ'lerin performansı doğrudan malzeme kalitesi ile ilgilidir. Yüzeyler arasında sıcaklık farkı meydana geldiğinde ısı transferiyle beraber elektrik akımını oluşturan şarj yükleri de transfer edilir. Transfer edilen şarj yüklerinin sayısının fazla olması elektriksel olarak akımın fazla olması anlamına gelir. Termoelektrik etki Seebeck, Peltier, Thomson etkileri ile ifade edilir. Bu etkiler doğrudan malzeme kalitesi ile ilgili olup, sıcaklıkla değişen etkilerdir. Kalite faktörü; elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, Seebeck katsayısı ve

sıcaklığın bir fonksiyonudur. Maksimum kalitenin elde edilmesi için bahsi geçen malzeme özelliklerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenliğin büyük olması gerekirken, termal iletkenliğin küçük olması gerekmektedir. Bununla birlikte üç özellik de birbirinden bağımsız değildir. Seebeck katsayısında bir artış meydana geldiğinde elektriksel iletkenlik azalırken şarj yüklerinin sayısının artması nedeniyle termal iletkenlik artar.

Termoelektrik jeneratörlerin yapı taşları olarak ifade edilen termoelektrik çift serbest elektron içeren ve elektriksel iletkenlikleri katkı yapılan malzeme ile ayarlanabilen yarı iletken tabanlı p- tipi ve n- tipi malzemelerden meydana gelir. Malzeme kalite kat sayılarının yüksek olması n- tipi malzemede çoğunluk taşıyıcısı olarak elektronların, p- tipi malzemede ise çoğunluk taşıyıcısı olarak oyukların şarj yüklerinin taşınmasında kullanılması nedeniyle daha güçlü termoelektrik etkinin ortaya çıkması sağlanır. p- ve n- tipi yarı iletkenlerin elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlanmasıyla bir termoelektrik çift elde edilir. Termoelektrik çiftlerin diğer termoelektrik çiftlerle elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanması ve termal iletkenlik sağlamak için seramik plakalar arasına yerleştirilmesiyle termoelektrik jeneratör modülleri elde edilir. Büyük güçlü termoelektrik jeneratörler ise termoelektrik modüllerin istenilen gücü elde edebilmek için seri ve paralel kombinasyonları kullanılarak oluşturulur.

Bir TEJ'in yapısı Şekil 2.4'te gösterilmiştir. TEJ'in yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluştuğunda Seebeck etkisiyle sıcak taraftan soğuk tarafa yük akışı olur ve bu yük akışı bir elektromotor kuvveti üretimi sağlar. Isı akışı hem p- tipi yarı iletkenlerdeki oyuklar hem de n- tipi yarı iletkenlerdeki elektronlar tarafından sağlanır (Kanagaraj, 2021a).



Şekil 2.4. TEJ'in yapısı (Mamur, 2020)

Termoelektrik jeneratörlerin gücünün maksimum olduğu nokta iç direnci ile yük direncinin birbirine eşit olduğu noktadır. Bu noktaya maksimum güç noktası denir. Yük direncinin değişmesiyle birlikte termoelektrik jeneratörden çekilen güç değişir. Termoelektrik jeneratörlerde çıkış gücünü etkileyen önemli bir faktör de sıcaklıktır. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ve kullanılan malzemenin Seebeck katsayısı açık devre voltajını değiştirmektedir. Bu nedenle sıcaklık ve yük direncindeki değişimler neticesinde maksimum güç noktası değişir. Verimlerinin düşük olması nedeniyle termoelektrik jeneratörlerin etkili kullanım alanlarının artması sürekli maksimum güç noktasında çalışması ile sağlanabilir. Bu amaçla maksimum güç noktası izleme algoritmaları kullanılmalıdır. Termoelektrik jeneratörler için özel bir algoritma olmaması nedeniyle solar sistemler için kullanılan maksimum güç noktası izleme algoritmaları termoelektrik jeneratörler için de kullanılabilir. DA sistemlerinde DA – DA dönüştürücüler vasıtasıyla yüke aktarılan gücün maksimum yapılması en yaygın yöntemdir. Bu yöntemlerde görev döngüleri ayarlanmak suretiyle gücün maksimum yapılması amaçlanır. MPP'ye hızlı bir şekilde ulaşması, MPP'de mümkün olduğu kadar az salınım yapması bu yöntemler için başarı kriterleridir.

2.9. Termoelektrik Jeneratörlerin Performans Parametreleri

Termoelektrik jeneratörler sıcak yüzeyden emilen ısının şarj yükleri ile taşınması neticesinde elektrik enerjisi üreten ısı pompalarıdır. Bir termoelektrik çift tarafından sıcak yüzeyden emilen ısı miktarı T_h sıcaklığına bağlı olarak tanımlanabilir. Böyle bir devrede termal olarak Seebeck etkisi ve termal iletkenlik yoluyla iletilen ısı ve şarj yüklerinin

hareketi sebebiyle ortaya çıkan Joule ısısından söz edilebilir. Joule ısısı, p- ve n- tipi yarı iletkenler boyunca hareket eden elektronlar ve oyuklar vasıtasıyla meydana getirdiği elektriksel akımın karesi ile orantılıdır. Her iki yüzey için de dikkate alınması gerekir. Bu ısının yarısı sıcak yüzeyde diğer yarısı ise soğuk yüzeyde etkili olur. Seebeck etkisi ile iletilen ısı Seebeck katsayısı, sıcak yüzey sıcaklığı ve elektriksel akım ile orantılı iken termal iletkenlik yoluyla iletilen ısı termal iletkenlik katsayısı ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ile değişir. TEJ'in N tane termoelektrik çiftten oluştuğu dikkate alındığında T_h sıcaklığına sahip birleşim yüzeyinden emilen ısı miktarı Watt olarak Denklem (7)'deki gibi ifade edilebilir.

$$Q_h = N \left[\alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R_{in} + K (T_h - T_c) \right] \quad (7)$$

Burada α (Seebeck katsayısı), R_{in} (elektriksel direnç) ve K (termal iletkenlik) ifadeleri sırasıyla (8), (9) ve (10) numaralı denklemlerde verildiği gibidir:

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (8)$$

$$R_{in} = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (9)$$

$$K = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \quad (10)$$

Eğer p- tipi ve n- tipi termokuplların özellikleri aynı ise; $\rho = \rho_p + \rho_n$ ve $k = k_p + k_n$ olup, $R_{in} = \rho L / A$ ve $K = kA / L$ olacaktır.

Termoelektrik jeneratörlerin sıcak yüzeyden emdikleri ısı soğuk yüzeye transfer edilir. T_c sıcaklığına sahip soğuk yüzeyden serbest kalan ısı miktarı Denklem (11)'de verilmiştir.

$$Q_c = N \left[\alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R_{in} + K (T_h - T_c) \right] \quad (11)$$

Termodinamiğin birinci kanununa göre termoelektrik jeneratörün çıkış gücü, sıcak yüzeyden emilen ısı miktarı ile soğuk yüzeyden serbest kalan ısı miktarı arasındaki fark kadardır. Böylece termoelektrik jeneratörün çıkış gücü (W) Denklem (12) ile ifade edilir.

$$W = Q_h - Q_c \quad (12)$$

Elektriksel olarak termoelektrik jeneratörden elde edilen güç, akımın karesi ve yük direncine bağlı olarak Denklem (13) ile ifade edilebilir.

$$W = N \left[\alpha (T_h - T_c) I - I^2 R_{in} \right] \quad (13)$$

Elektriksel güç ile termal güç birbirine eşit eklendiğinde, uçlarına yük direnci bağlanmış bir jeneratörün çıkış gerilimi Denklem (14) ile ifade edilebilir.

$$V = N I R_L = N \left[\alpha (T_h - T_c) - I R_{in} \right] \quad (14)$$

Çıkış gerilim denkleminde termoelektrik jeneratörün akımı Denklem (15) ile elde edilir.

$$I = \frac{\alpha (T_h - T_c)}{R_L + R_{in}} \quad (15)$$

Termoelektrik jeneratör çıkış akımı termoelektrik çift sayısından bağımsızdır. Son 2 denklem kullanılarak TEJ uçlarındaki gerilim düşümü Denklem (16) ile ifade edilebilir ve güç Denklem (17)'daki gibi bulunur.

$$V = \frac{N \alpha (T_h - T_c)}{\frac{R_L}{R_{in}} + 1} \left(\frac{R_L}{R_{in}} \right) \quad (16)$$

$$W = \frac{N \alpha^2 (T_h - T_c)^2}{R_{in}} \frac{\frac{R_L}{R_{in}}}{\left(\frac{R_L}{R_{in}} + 1 \right)^2} \quad (17)$$

Termoelektrik jeneratörlerin ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirme verimi çıkış gücünün, sıcak yüzeyden emilen ısıya oranı ile bulunur. Termal verim olarak da adlandırılan Carnot verimi Denklem (18) ile ifade edilir.

$$\eta_{th} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h} \right) \frac{R_L}{R_{in}}}{\left(1 - \frac{R_L}{R_{in}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T_h} \right) + \frac{1}{2 Z T} \left(1 - \frac{R_L}{R_{in}} \right)^2 \left(1 + \frac{T_c}{T_h} \right)} \quad (18)$$

Burada ortalama sıcaklık $\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}$ 'dir. Carnot çevrim verimi ise $\eta_c = 1 - T_c / T_h$ şeklindedir.

Verim denklemi incelendiğinde yük direnci, sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları ve malzeme kalitesini ifade eden kalite faktörü TEJ'in enerji verimliliğini etkilemektedir. Kalite faktörü doğrudan malzeme kalitesine bağlı olarak değişmekte olup, son yıllarda kalite faktörü 2 değerine yaklaşmıştır. Buna bağlı olarak termoelektrik jeneratörlerin kullanım alanları giderek artmıştır. Termoelektrik jeneratörler kalite faktörüne bağlı olarak çevrim verimliliği değişen cihazlardır. Kalite faktöründeki artışla beraber %10'lara varan çevrim verimi söz konusudur. Termoelektrik jeneratörler ısı kaynağı olarak atık ısı, güneş ısı ve üretilmesi için ekstra güç harcanmayan ısıları kullandığı için yenilenebilir enerji statüsüne giren bir teknoloji durumuna gelmiştir. Verimleri düşük olmasına rağmen kullandığı ısı kaynakları dikkate alındığında, ekonomik geri dönüş sürelerinin artması neticesinde uygulama alanları önemli ölçüde artmıştır (Twaha, Zhu, Yan, ve ark., 2017; R. Ahiska ve ark., 2008).

2.10. TEJ'ler için Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT)

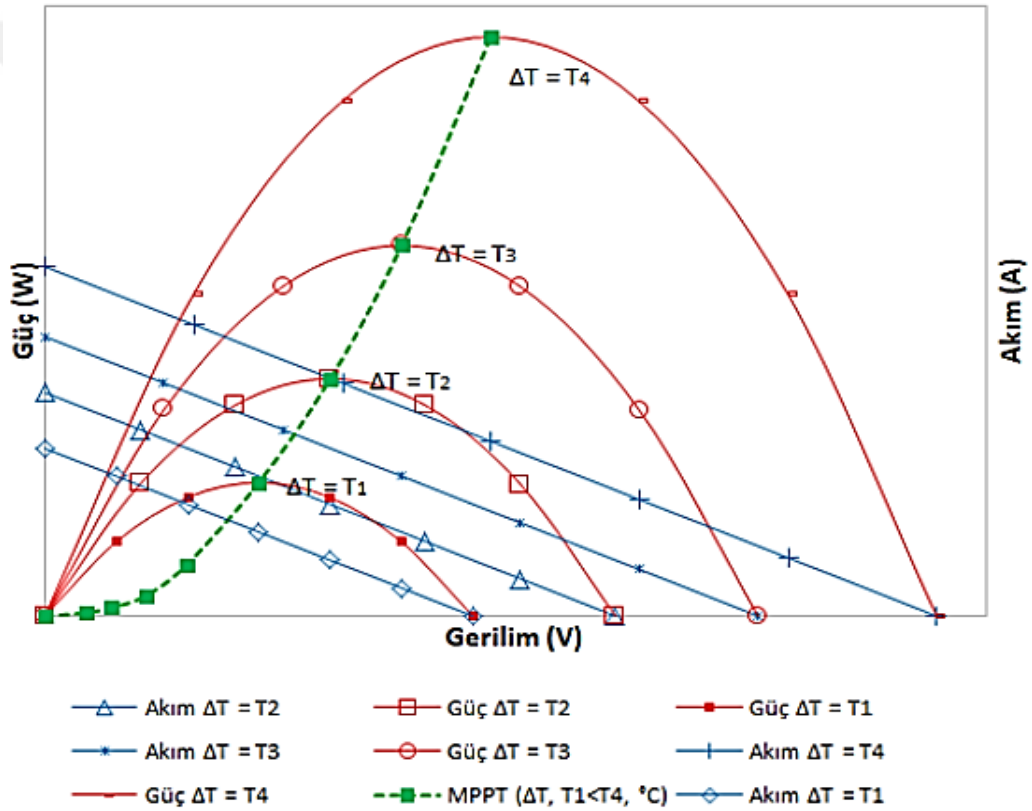
TEJ'lerin yukarıda bahsedilen dezavantajlarının yanı sıra dinamik çalışma koşullarında yarı iletken parametrelerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi iç direncinin de değişmesine sebep olmaktadır. Bu durum yüke maksimum güç aktarmak için gerekli empedans uyumunu zorlaştırmaktadır. TEJ'lerden elde edilen gücün etkin olarak kullanılabilmesi için maksimum güç noktası izleme tekniklerinin kullanılması zorunludur. Bu amaçla girişte meydana gelen sıcaklık değişimlerine, çıkışta meydana gelen yük değişimlerine ve iç direnç değişimine göre maksimum güç noktasını takip edecek bir uyumlama devresine ihtiyaç vardır. Maksimum güç noktası izleme yapan DA – DA dönüştürücüler bu amaçla kullanılabilecek en uygun devredir ve hem güç düzenlemesi hem de maksimum güç noktası izlemesi darbe genişlik modülasyonu (PWM) tabanlı sistemlerle yapılabilir.

TEJ'in iç direncinden dolayı yüke maksimum oranda güç aktarabilmek için iç direnç ile yük arasında uyum sağlanması gerekir. Bu uyumu sağlamak üzere yük ile TEJ arasında ara yüz görevi görecek olan bir devre kullanılır (Bunthern et al., 2014).

Maksimum güç transferi teoremi, $R_{in} = R_L$ olduğunda TEJ'den maksimum güç elde edilebileceğini ifade eder. Buna göre maksimum güç, Denklem (19)'da verildiği gibi açık devre geriliminin (V_{OC}) ve kısa devre akımının (I_{SC}) yarısında elde edilebilecektir (Kanagaraj, 2021a). Şekil 2.5'te TEJ'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı değişimlerine göre akım, gerilim, güç ve MPP eğrileri görülmektedir.

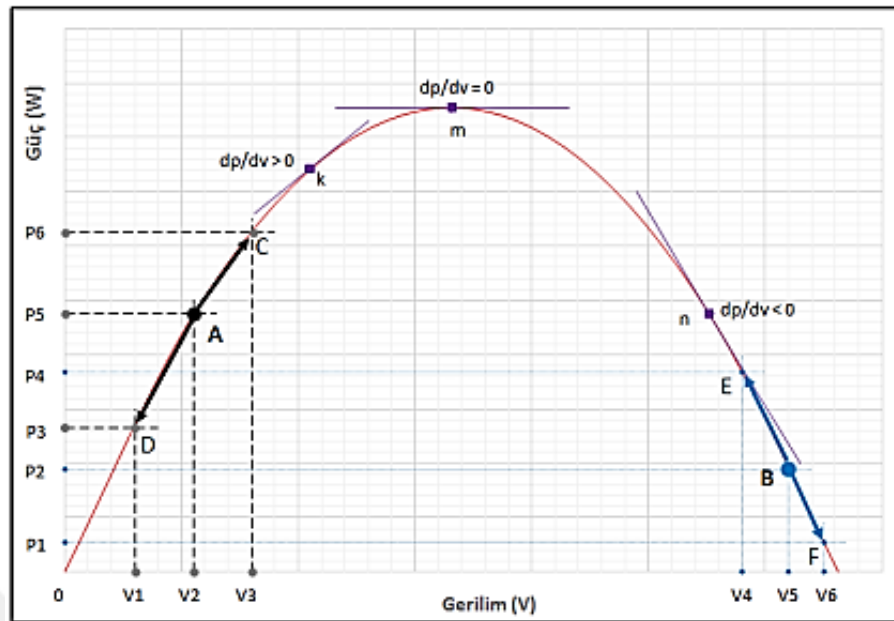
$$V_{MPP} = \frac{V_{OC}}{2} \text{ ve } I_{MPP} = \frac{I_{SC}}{2} \quad (19)$$

Burada, V_{MPP} gerilim için ve I_{MPP} akım için MPP değerleridir.



Şekil 2.5. Farklı ΔT değerlerine göre akım, gerilim, güç ve MPP eğrileri (Mamur & Çoban, 2020b)

Şekil 2.6'da belirli bir sıcaklık farkı değeri için TEJ'in güç – gerilim eğrisi gösterilmiştir. $R_{in} - R_L$ arasındaki ilişkiye göre TEJ'in çalışma noktası grafik üzerinde değişecektir. Şekil 2.7'de ise sıcaklık farkı değişimlerine göre TEJ'in $P - V$ eğrisinin değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık farkı arttıkça TEJ'in üreteceği güç ve gerilim de artacağından dolayı MPP'nin yeri değişecektir.

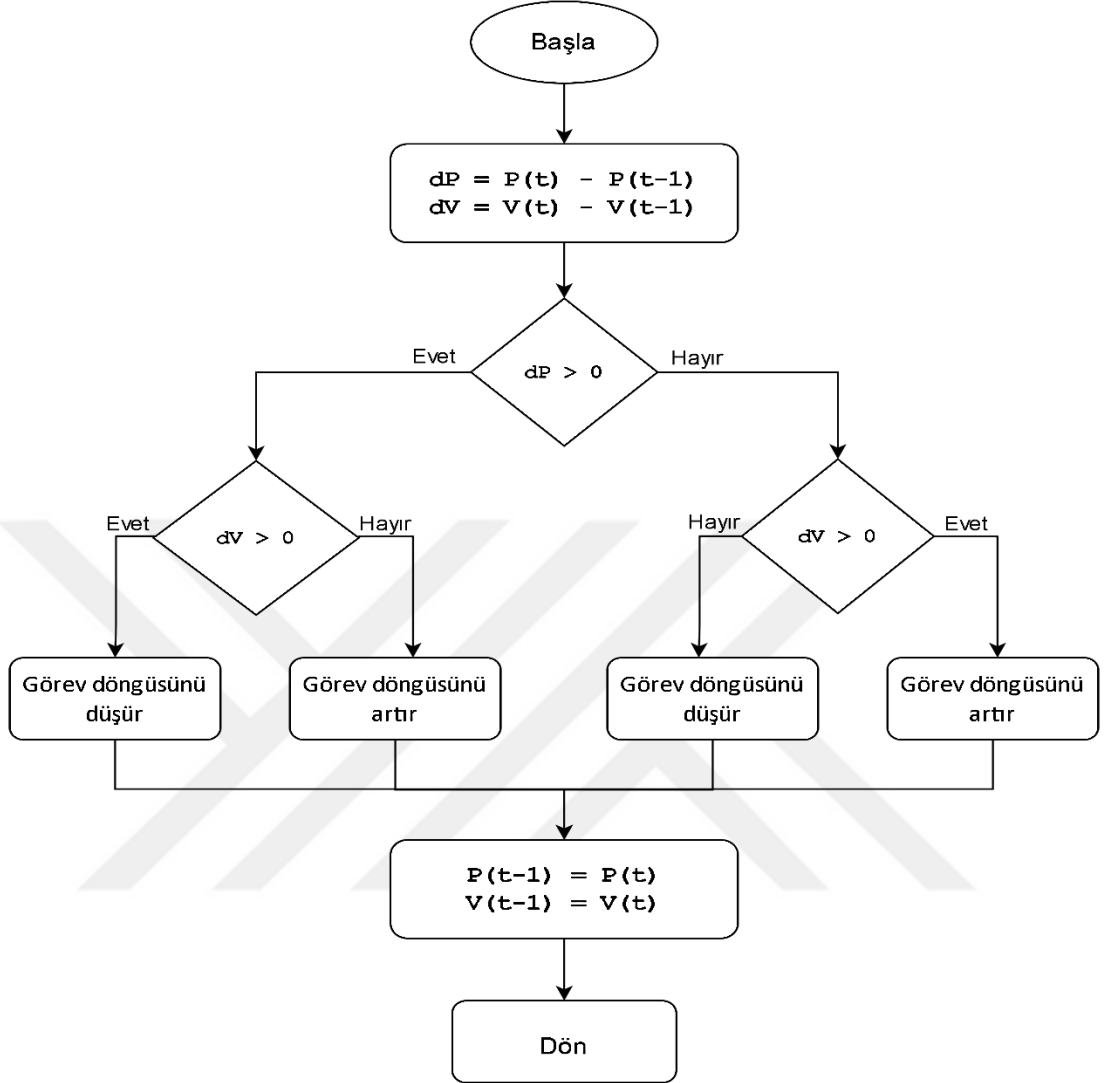


2.10.1. P&O yöntemi

Uygulanmasının basitliği nedeniyle Perturb & Observe yöntemi (P&O) yaygın kullanılan bir MPPT yöntemidir. Şekil 2.6'dan, MPP'nin solunda çalışırken gerilimi artırmanın (azaltmanın) gücü arttırdığı (azalttığı), sağında çalışırken de gerilimi artırmanın (azaltmanın) gücü azalttığı (artırdığı) görülebilir (Bunther et al., 2014).

Bu yöntemde, sistemin çalışma noktası bozularak TEJ'in çıkış gücü değiştirilir. Şekil 2.8'deki akış diyagramında gösterildiği gibi güç ve gerilimdeki değişimler sorgulanır. Güç ve gerilim değişimlerinin her ikisi de pozitif veya negatif ise MPP'nin sol tarafında bulunduğu anlaşılır. D değeri pertürbasyon adımı (ΔD) kadar azaltılır. Güç ve gerilim değişimleri birbirine göre zıt işaretli ise MPP'nin sağ tarafında bulunduğu anlaşılır. Bu sefer, D değeri ΔD kadar artırılır. Sonrasında tekrar başa dönülerek aynı işlemler tekrarlanır. Bu işlemlere MPP'ye ulaşıncaya kadar devam edilir. Kararlı duruma ulaşıldığında, algoritma tepe noktası etrafında salınım yapar. Kararlı durumda MPP etrafındaki bu salınım, yöntemin dezavantajlarından biridir (Mamur & Çoban, 2020a).

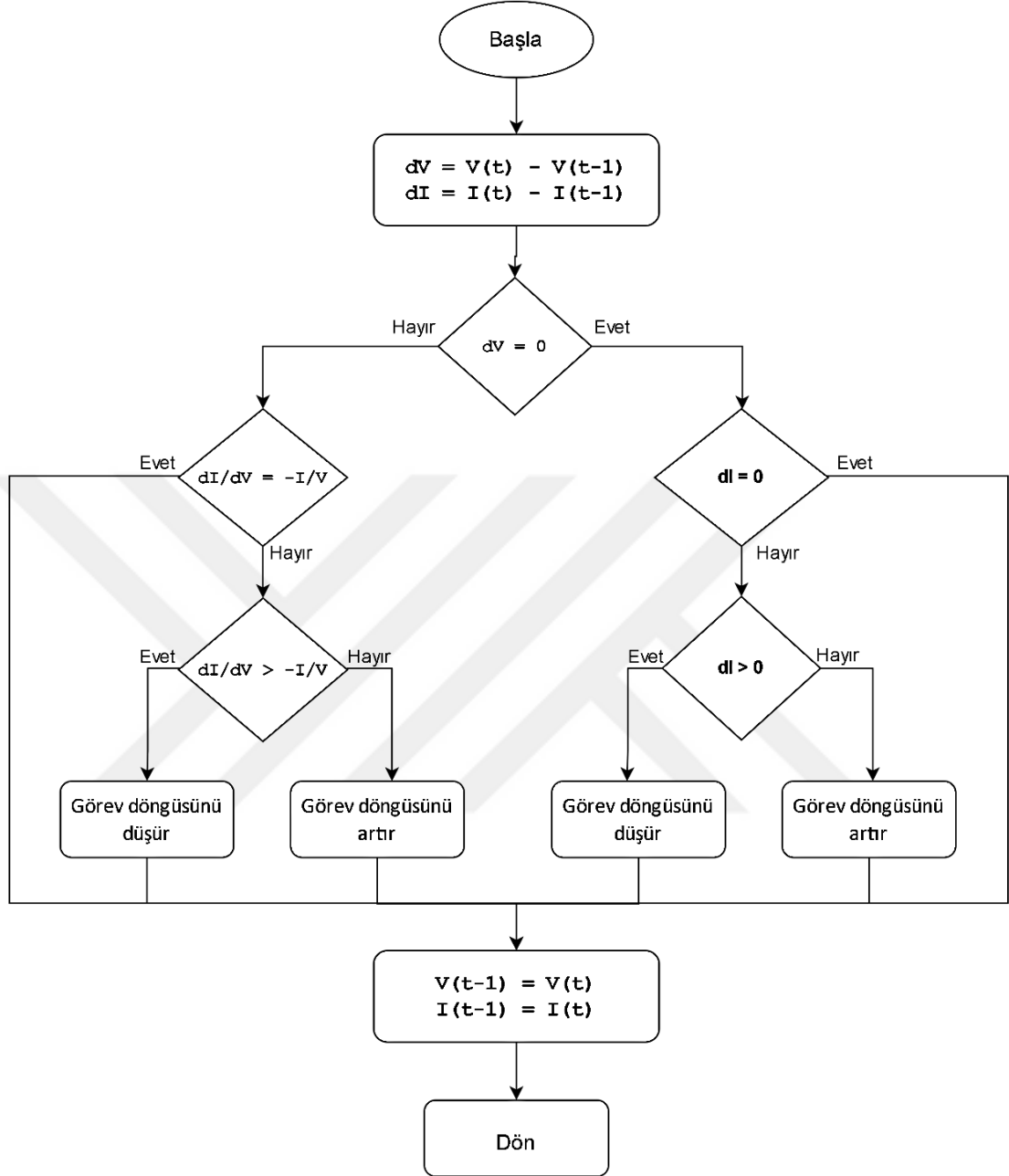
Pertürbasyon adımının büyük seçilmesi, MPP çevresinde kalıcı durum salınımının yüksek olmasına neden olur. Buna karşılık pertürbasyon adımı küçük seçildiğinde ise MPP'ye ulaşma süresi uzamaktadır (Mamur & Çoban, 2020a).



Şekil 2.8. P&O MPPT akış diyagramı

2.10.2. Artan İletkenlik (INC) yöntemi

Bu yöntemde de MPP'de gücün gerilime göre türevinin (dP/dV) sıfır olduğu gerçeğinden hareket edilir. TEJ'in çıkış gerilimi ve akımı ölçülerek gerilim ve akımdaki değişimler hesaplanır. Şekil 2.9'daki akış diyagramında verildiği gibi iletkenlik türevinin oranı anlık iletkenlikle aşamalı olarak karşılaştırılarak MPP'ye ulaşmaya çalışılır.



Şekil 2.9. INC MPPT akış diyagramı

2.10.3. Açık Devre Gerilimi (OCV) ve Kısa Devre Akımı (SCC) yöntemleri

OCV MPPT yöntemi, TEJ'in MPP'deki geriliminin açık devre geriliminin yarısı büyüklüğünde olması prensibine dayanmaktadır. Belirli aralıklarla TEJ ile yük ayrılarak açık devre gerilimi (V_{OC}) ölçülür. Bulunan açık devre gerilimin yarısına çalışma gerilimi ayarlanarak MPP izlenmeye çalışılır. V_{OC} 'nin ölçümü için TEJ'in yükten ayrılması

nedeniyle yüke güç aktarımının kesintiye uğratılması önemli dezavantajlarındanır (Montecucco & Knox, 2015).

OCV tekniğine benzer şekilde SCC MPPT yöntemi, TEJ'in MPP'deki akımının kısa devre akımının yarısı büyüklüğünde olması prensibine dayanmaktadır (Dalala ve Zahid, 2015). Bu yöntemde ise belirli aralıklarla TEJ'in çıkışı kısa devre yapılarak kısa devre akımı (I_{sc}) ölçülür. Bulunan kısa devre akımının yarısına çalışma akımı ayarlanarak MPP izlenmeye çalışılır. Yine bu yöntemde de I_{sc} 'nin ölçümü esnasında TEJ'in kısa devre yapılmasının yüke güç aktarımını kesintiye uğratması dezavantaj oluşturmaktadır (Dalala & Zahid, 2015).

2.11. MPPT için Kullanılan DA – DA Dönüştürücüler

TEJ'lerin doğası gereği, yüke doğrudan bağlanamazlar, dolayısıyla bu sistemlerin verimliliğini artırmak için bir DA – DA dönüştürücünün kullanılması gerekir (Marroquín-Arreola ve ark., 2022). Literatürde çok çeşitli tiplerde dönüştürücüler bulunmaktadır (Antchev, 2010). Bu arada, TEJ gibi enerji toplama sistemlerinde üç standart DA – DA dönüştürücü kullanılır (buck, boost ve buck – boost) (Yahya & Alomari, 2021).

Düşük güçlü DA – DA dönüştürme işlemlerinde, çoğu modern güç dönüşümü, buck (alçaltan), boost (yükselten) ve buck – boost (alçaltan – yükselten) dönüştürücüler olmak üzere üç farklı türde güç dönüştürücüsü ile yapılır. Anahtarlama güç dönüşümü, birçok sektörde modern elektronik teknolojisi uygulamalarında temel olarak kullanılmaktadır (Converters & Converter, 2020).

DA – DA dönüştürücüler, giriş geriliminden daha yüksek veya daha düşük olabilen ortalama bir çıkış geriliminin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu dönüştürücülerin temel prensibi bobin ve kapasitör gibi elektrik bileşenlerinde enerjinin depolanarak yüke aktarılmasıdır. Enerji depolama ve bırakma süresi kontrol edilerek çıkış gerilimi ayarlanır. Bu işlem transistör gibi anahtarlama elemanlarıyla gerçekleştirilir. Anahtarlama elemanı farklı genişlikteki darbeleri bir gerilim ile (PWM) kontrol edilir. Anahtarlama periyodu içerisinde PWM sinyalinin darbe genişliğine (görev döngüsü) göre çıkış gerilimi ayarlanmış olur. Görev döngüsü (D) ifadesi Denklem (20)'de verildiği gibidir.

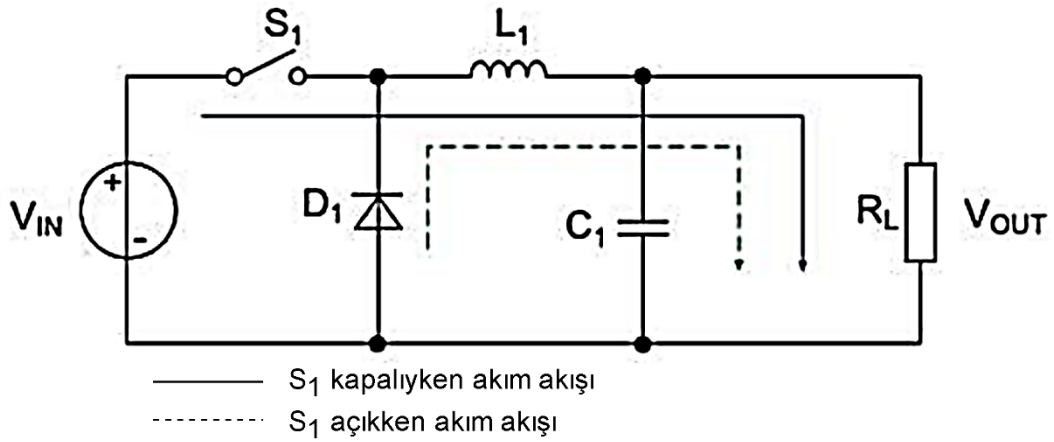
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (20)$$

Burada t_{on} , anahtarın kapalı olduğu süre, t_{off} ise anahtarın açık olduğu süredir. Burada görüleceği üzere görev döngüsü değeri 0 – 1 aralığında olacaktır.

Dönüştürme oranı $M = V_{OUT}/V_{IN}$ olarak ifade edilir ve anahtarın görev döngüsüne bağlı olarak değişir. Burada V_{IN} dönüştürücünün girişine uygulanan gerilim ve V_{OUT} dönüştürücünün çıkışında oluşan gerilimdir.

2.11.1. Alçaltan (buck) dönüştürücü

Alçaltan dönüştürücü, bir DA kaynağının giriş voltajını stabilize bir düşük çıkış voltajına düşürmesi amaçlanan anahtarlama bir DA – DA dönüştürücüdür. Şekil 2.10’da basitleştirilmiş devre şeması verilen bir alçaltan dönüştürücüde anahtarlama olayı sırasında akımın devreden nasıl geçtiği gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Alçaltan (buck) dönüştürücü şeması

Gerilim dönüşüm ifadesi Denklem (21)’deki gibidir.

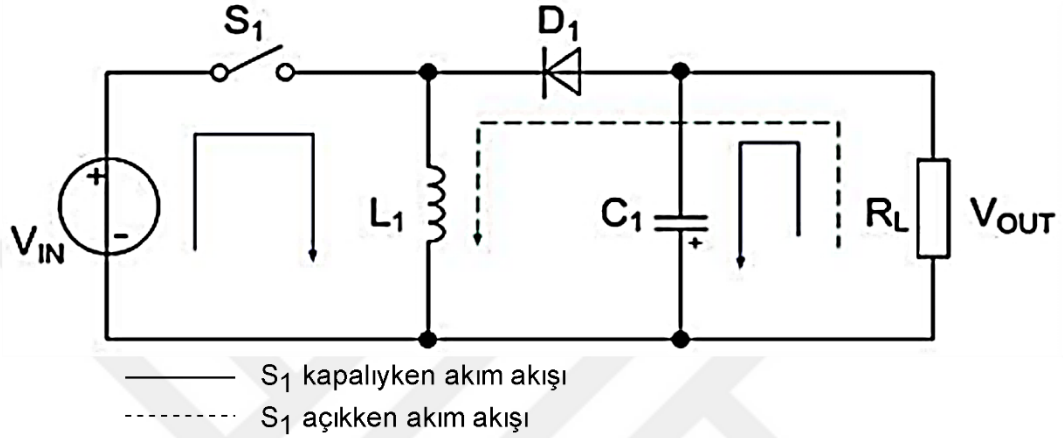
$$V_{OUT} = D.V_{IN} \quad (21)$$

2.11.2. Yükselten (boost) dönüştürücü

Yükselten dönüştürücü, bir DA kaynağının giriş voltajını stabilize daha yüksek bir çıkış voltajına yükselten anahtarlama bir DA – DA dönüştürücüdür. Bir alçaltan dönüştürücüye benzer şekilde, yükselten dönüştürücüde de bir indüktör, diyot ve

kondansatör gibi devre elemanları kullanır ve anahtar vasıtasıyla çıkış voltajı düzenlenir, fakat devre elemanlarının yerleşimi farklı şekilde düzenlenir.

Şekil 2.11’de basitleştirilmiş devre şeması verilen bir yükseltici dönüştürücüde anahtarlama olayı sırasında akımın devreden nasıl geçtiği gösterilmektedir.



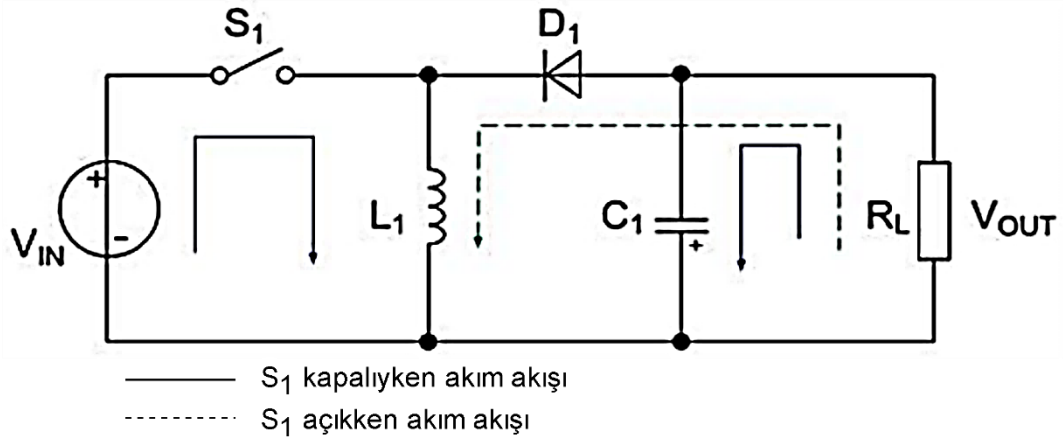
Şekil 2.11. Yükselten (boost) dönüştürücü

Çıkış gerilimi bağıntısı Denklem (22)’de gösterilmiştir.

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{1 - D} \quad (22)$$

2.11.3. Alçaltan – yükselten (buck – boost) dönüştürücü

Bir alçaltan – yükselten dönüştürücü, düzenlenmiş giriş voltajının altında veya üstünde çıkış voltajı sağlar. Bir alçaltan – yükselten dönüştürücü devresi hem alçaltan dönüştürücünün hem de yükselten dönüştürücünün öğelerini birleştirir. Aşağıdaki basitleştirilmiş devre şeması, bir buck – boost dönüştürücü aracılığıyla anahtarlama olayı sırasında tipik bir akım akışını gösterir.



Şekil 2.12. Alçaltan – yükselten dönüştürücü şeması

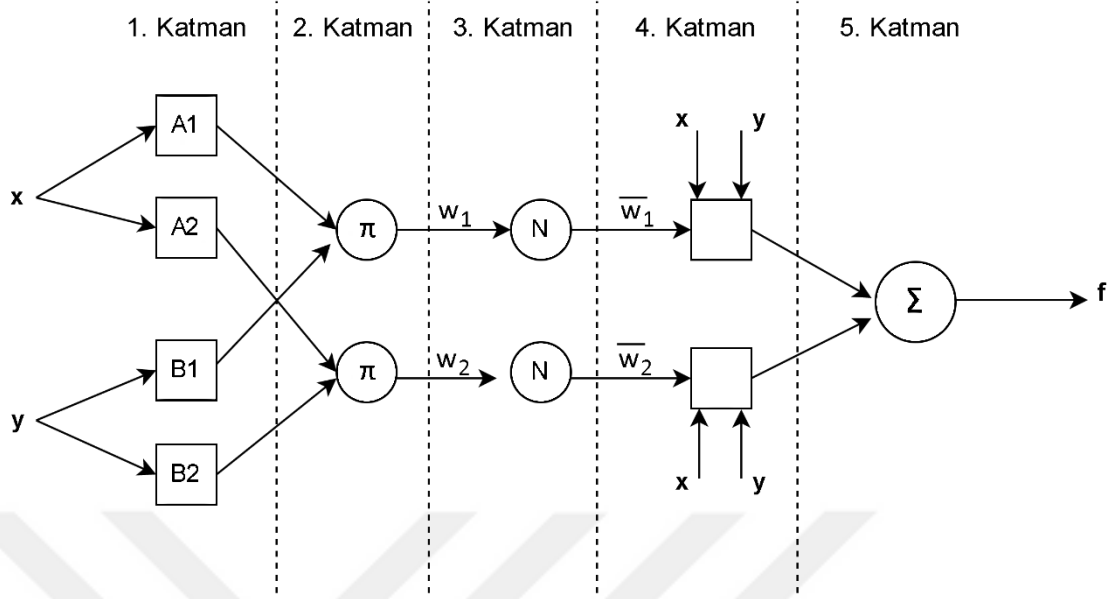
Gerilim dönüşüm ifadesi Denklem (23)’te verilmiştir.

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} \cdot D}{1 - D} \quad (23)$$

2.12. ANFIS

ANFIS, Jang vd tarafından geliştirilen, hem sinir ağının öğrenme yeteneklerini hem de bulanık mantığın karar verme yeteneklerini birleştiren ileri beslemeli bir yapay sinir ağıdır (Jang, 1993), (Atsalakis et al., 2018). Bulanık mantığın Takagi-Sugeno (1985) tipi çıkarım yöntemiyle kullanılabilir. Bulanık mantık sisteminin kural tabanı ve üyelik fonksiyonları, bilinen giriş – çıkış değerleri kullanılarak yapay sinir ağlarının (YSA) öğrenme metotlarıyla optimize edilir. Böylelikle bulanık sistemler, öğrenme kabiliyeti kazanmış olur.

Şekil 2.13’da temel ANFIS mimarisi gösterilmiştir. ANFIS, her katmanda bulanık mantık kural sayısı kadar nöron bulunduran 5 adet katmandan oluşmaktadır.



Şekil 2.13. Temel ANFIS yapısı

1. *katmanda* giriş değerleri bulanıklaştırılarak üyelik dereceleri hesaplanır. Üyelik fonksiyonu Denklem (24)'de verilmiştir.

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - b_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (24)$$

Burada A_i bulanık küme terimlerini, a_i ve b_i ise optimize edilecek olan üyelik fonksiyonu parametrelerini ifade etmektedir.

2. *katmanda* kurallar işlenir. Tüm giriş değerleri Denklem (25)'de verildiği gibi cebirsel çarpılır.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \dots \quad (25)$$

3. *katmanda* kuralların normalizasyon işlemleri yapılır. Bulanık kuralların etkinleştirme seviyeleri hesaplanır. Katman sayısı bulanık kural sayısına eşittir.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \dots \quad (26)$$

4. *katmanda* bir önceki katmandan gelen her bir kural kendine ait çıkış fonksiyonu ile çarpılır.

$$\overline{w_i} \cdot f_i = \overline{w_i} (p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1, 2 \dots \quad (27)$$

Burada p_i , q_i ve r_i doğrusal sonuç parametreleridir.

5. *katman*, 4. katmandan gelen tüm girdileri toplar ve bulanık sınıflandırma sonuçlarını kesin değerlere dönüştürür. Tek bir sabit düğümden oluşan bu katmanda, Denklem (28) kullanılarak tüm gelen sinyallerin toplamı elde edilir.

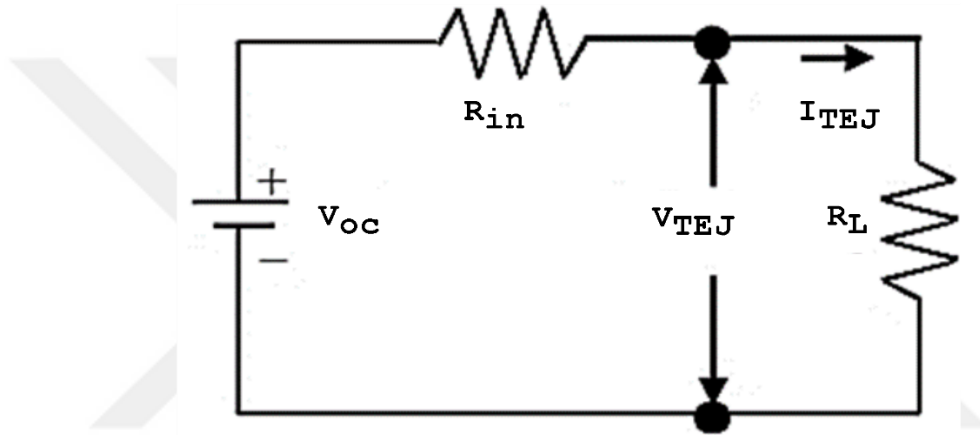
$$\sum_i \overline{w_i} \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (28)$$

TE'lerde oluşan açık devre gerilimi V_{OC} Denklem (29)'teki gibi ifade edilebilir.

$$V_{OC} = \alpha \cdot (T_h - T_c) = \alpha \cdot \Delta T \quad (29)$$

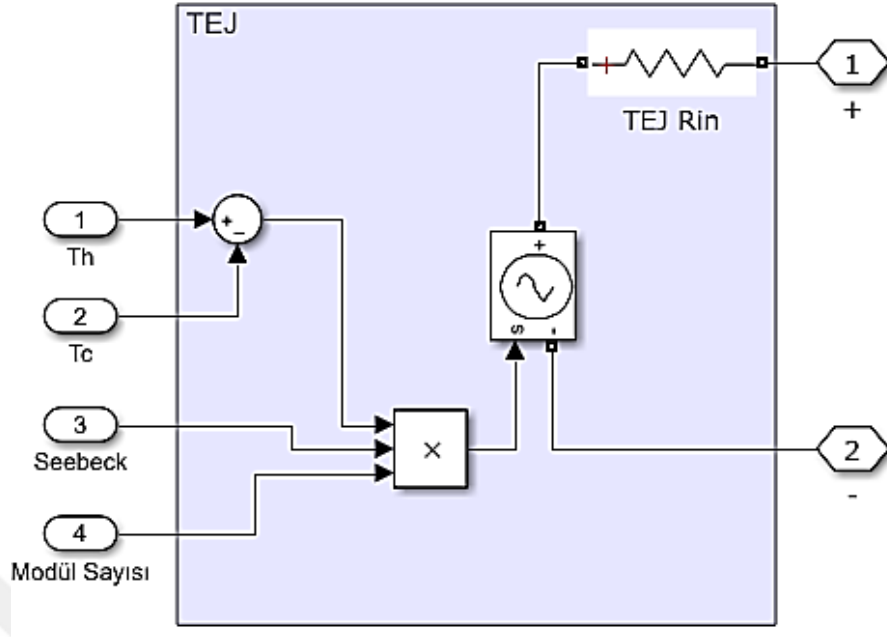
Burada T_h ve T_c sırasıyla sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklıkları (K), ΔT iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı ve α Seebeck katsayısıdır (V/K).

TEJ'in eşdeğer devresi, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sıcaklığa bağımlı bir gerilim kaynağı ve iç dirençten oluşan basit bir DA devresi ile temsil edilebilir.



Şekil 3.2. TEJ eşdeğer devresi (Bijukumar, 2019)

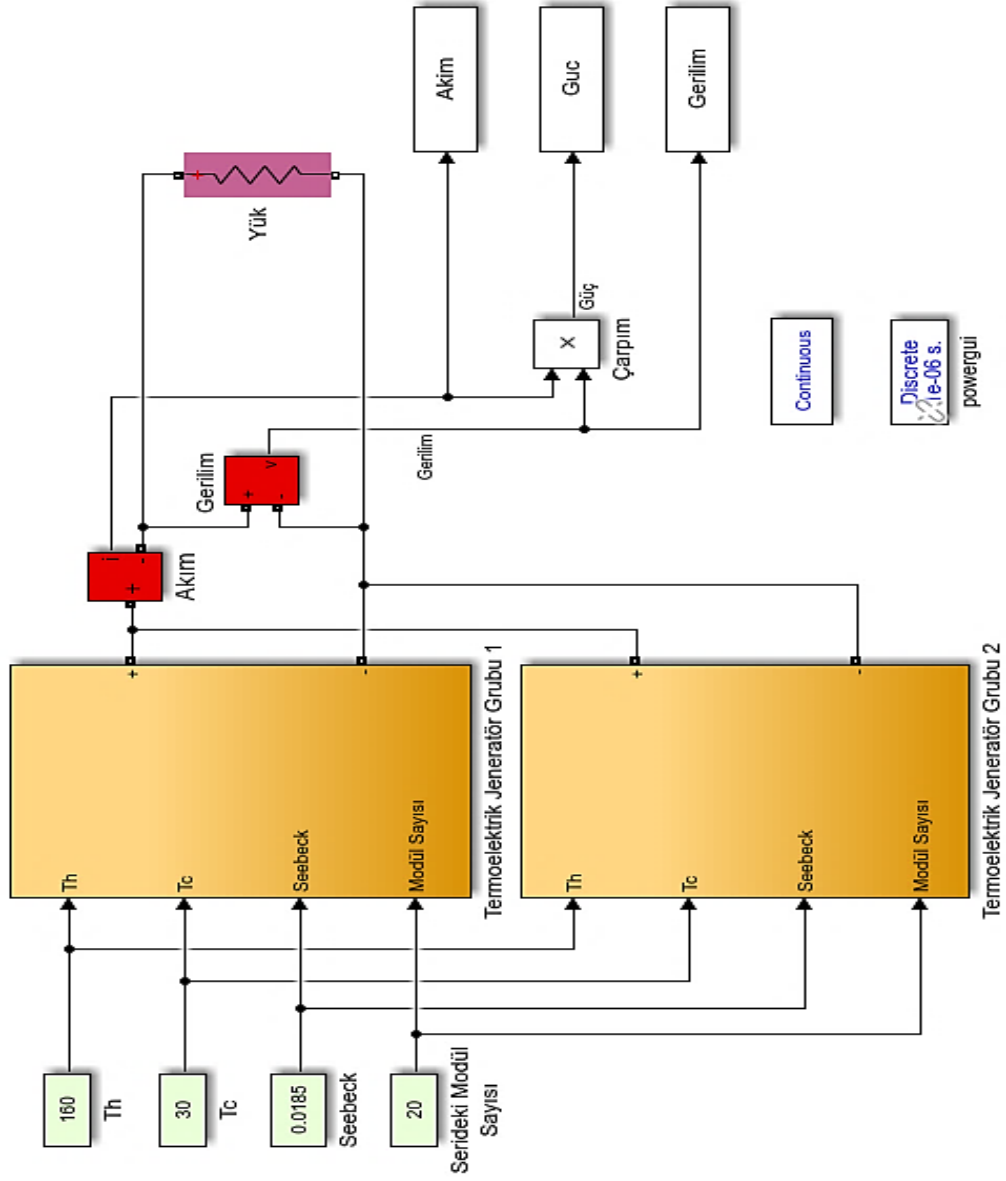
Denklem (29) ve Şekil 3.2'de verilen eşdeğer devre dikkate alınarak Simulink programında TEJ modeli Şekil 3.3'de verildiği gibi oluşturulmuştur. Model, TEJ'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), kullanılan malzemenin Seebeck katsayısı ve seri bağlı modül sayısının çarpım olarak kullanıldığı kontrollü gerilim kaynağı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemenin iç direnç değeri seri bağlı modül sayısı ile çarpılarak R_{in} olarak modele dahil edilmiştir.



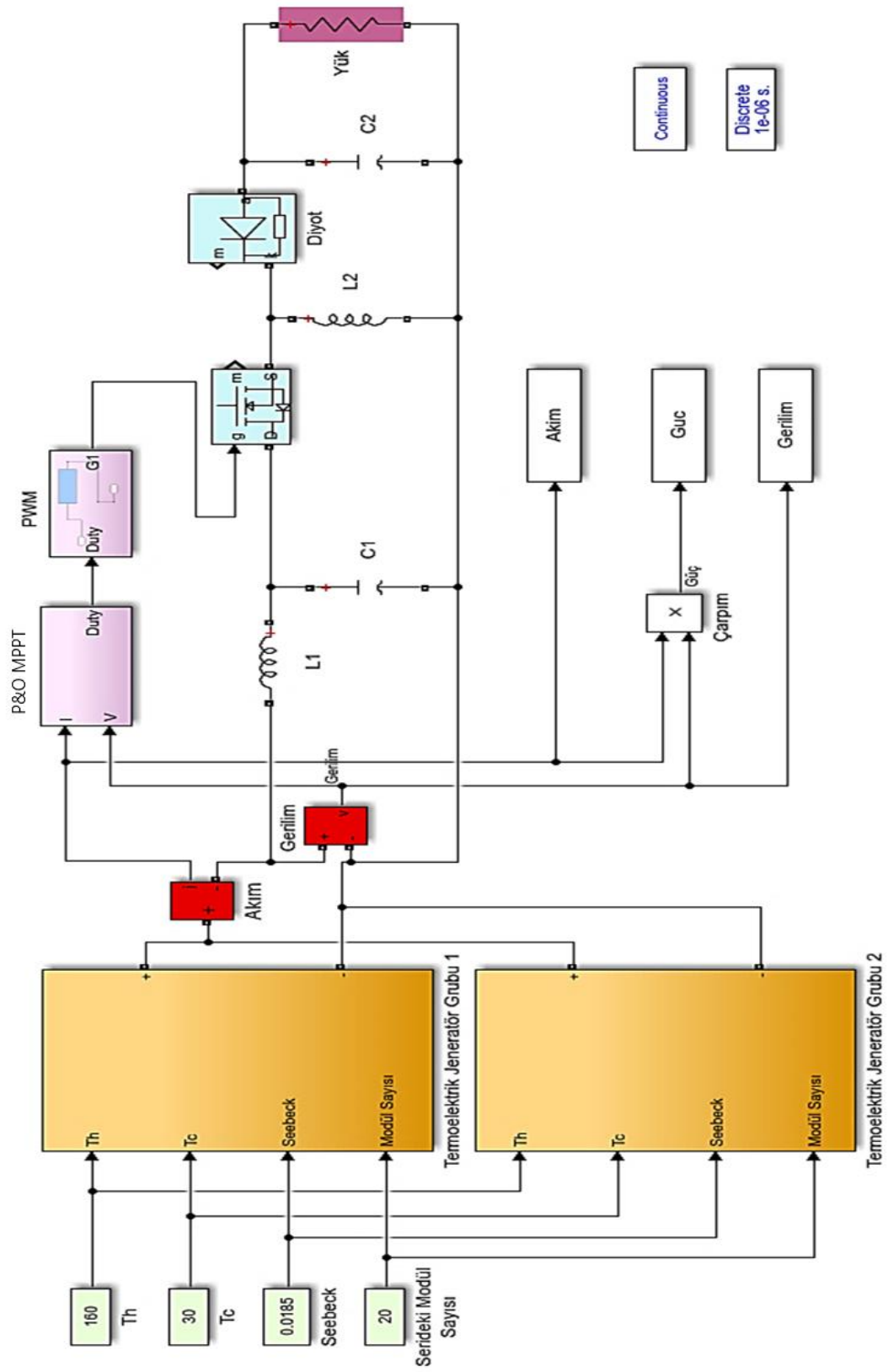
Şekil 3.3. Simulink'te oluşturulan TEJ modeli

Seri bağlı modüllerden oluşan TEJ'ler aynı sayıda modüle sahip TEJ'ler ile paralel bağlanarak simüle edilebilmektedir. Bu çalışmada önerilen ve karşılaştırılan yöntemlerin performans analizlerinin yapılabilmesi için 3 adet simülasyon çalışması yapılmıştır.

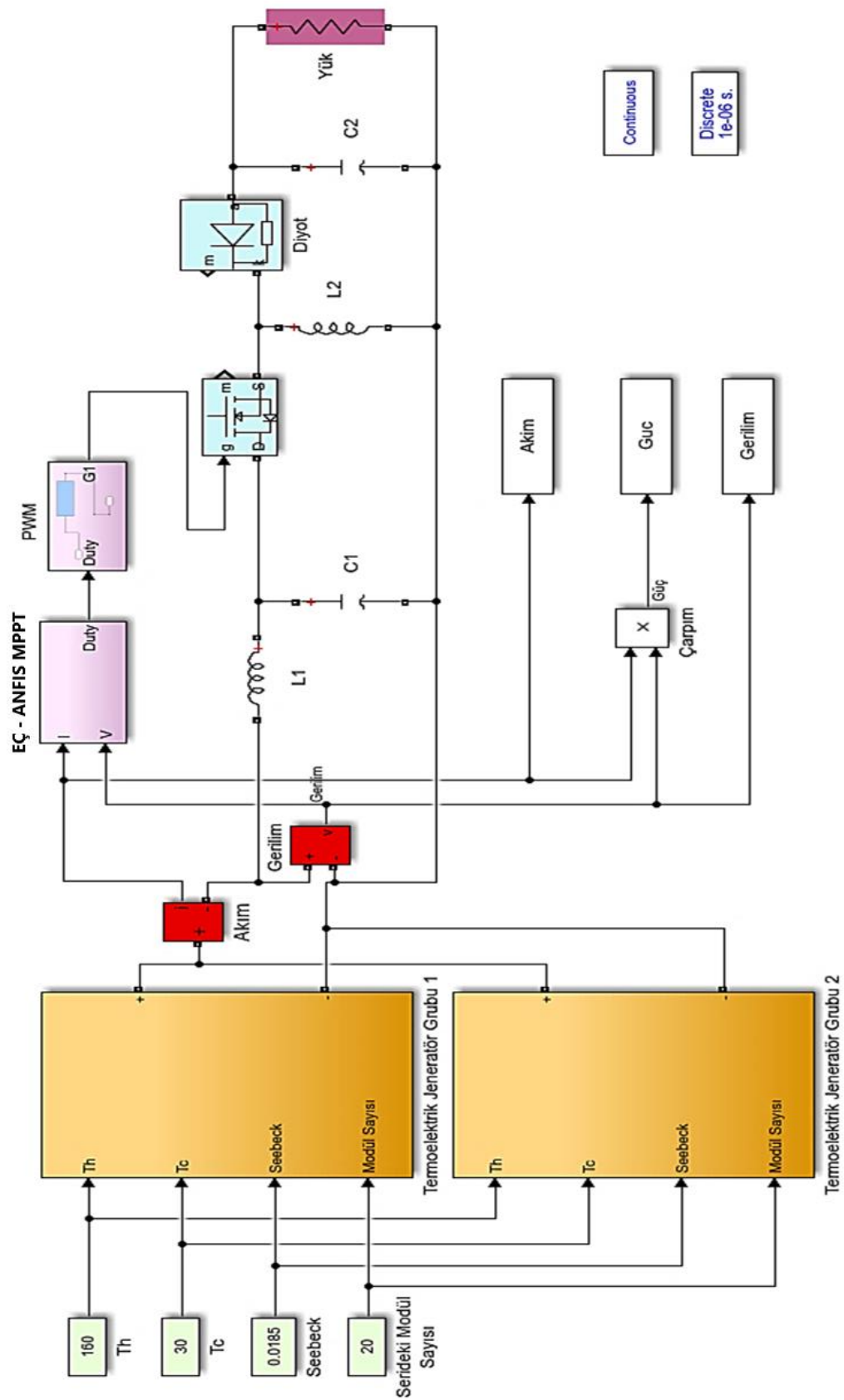
Seri bağlı modüllerin oluşturduğu TEJ'lerin bir yük direnci modeli ile birleştirilerek maksimum güç noktası izleme olmaksızın simüle edilmesi Şekil 3.4'te, P&O yöntemi ile DA – DA dönüştürücünün kontrol edildiği simülasyon şeması Şekil 3.5'te ve önerilen EÇ – ANFIS MPPT yöntemi ile DA – DA dönüştürücünün kontrol edildiği simülasyon şeması ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4. MPPT'siz Simulink uygulaması



Şekil 3.5. P&O MPPT'nin Simulink uygulaması



Şekil 3.6. Önerilen EÇ – ANFIS MPPT'nin Simulink uygulaması

3.2. Alçaltan – Yükselten DA Dönüştürücünün Modellenmesi

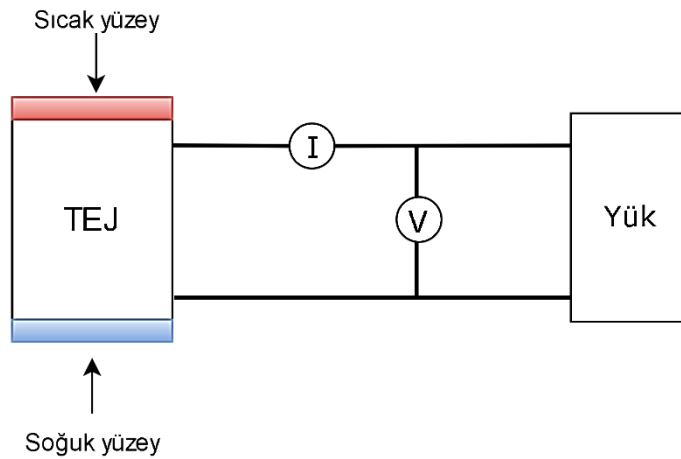
Sürekli iletim modda anahtarlama DA – DA alçaltan – yükselten dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 3.6’da MATLAB Simulink uygulaması verilen sistemde kullanılan dönüştürücünün devre parametreleri Tablo 3-2.’de verilmiştir.

Tablo 3-2. DA – DA dönüştürücü parametreleri

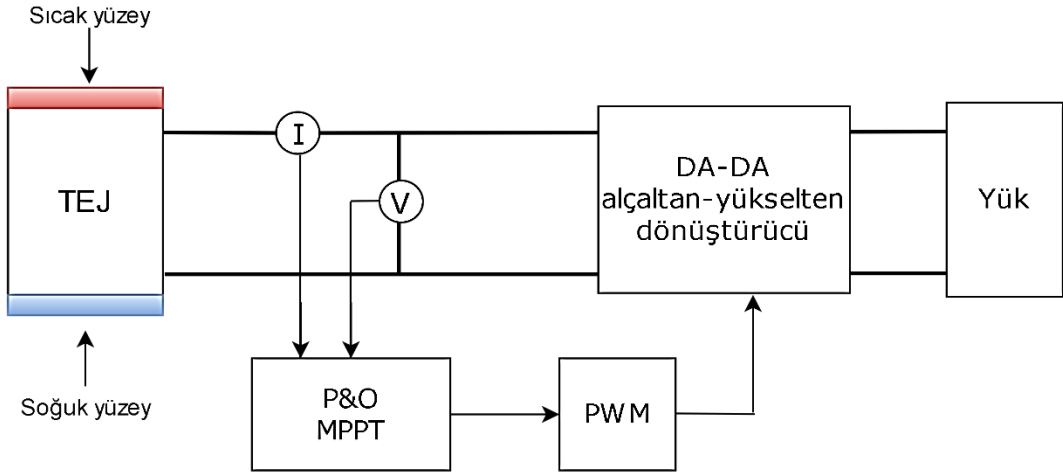
ELEMAN	DEĞER
L1	1 mH
L2	83 μ H
C1	1 mF
C2	1 mF
Anahtarlama frekansı	25 kHz

3.3. Karşılaştırılan Yöntem

Önerilen yöntem, Bölüm 2.10.1’de bahsedilen yaygın kullanılan P&O yöntemi ile ve MPPT kullanılmadan yükün TEJ’e doğrudan bağlandığındaki sonuçlar ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Şekil 3.7’de MPPT kullanılmadan oluşturulan devre blok şeması ve Şekil 3.8’de P&O MPPT yönteminin uygulandığı devre blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. MPPT’siz devre blok şeması



Şekil 3.8. P&O MPPT'nin kullanıldığı devre blok şeması

3.4. Önerilen Eğri Çıkarımlı ANFIS Tabanlı MPPT Yöntemi

Burada da P&O yönteminde olduğu gibi mevcut çalışma anında güç – gerilim eğrisinin hangi tarafında bulunulduğuna bakılarak pertürbasyon adımı değiştirilir. Fakat, önerilen yöntemde farklı olarak TEJ'in anlık çalışma koşuluna özgü güç – gerilim eğrisi matematiksel bir fonksiyon şeklinde çıkarılarak, bu eğri üzerinde MPP ve anlık çalışma noktasının MPP'ye uzaklığı – diğer bir ifadeyle hata (e) – tespit edilir. Hata ve hatanın değişim hızına bağlı olarak ANFIS tarafından görev döngüsü fark değeri (d_a) üretilir. Üretilen d_a değeri, mevcut görev döngüsü (D_1) değerine eklenerek DA dönüştürücünün PWM sinyali kontrol edilir. Bu şekilde, MPP'nin doğru ve hızlı bir şekilde izlenmesi sağlanır.

Şekil 3.2'deki TEJ eşdeğer devresi göz önüne alınırsa TEJ devresinden geçen akım Denklem (30) ile ifade edilir.

$$I_{TEJ} = \frac{V_{OC}}{R_{in} + R_L} \quad (30)$$

Burada, I_{TEJ} TEJ akımı (A), R_i TEJ iç direnci (Ω) ve R_L yük direncidir (Ω). TEJ gerilimi Denklem (31) ve TEJ tarafından yüke aktarılan güç Denklem (32) ile hesaplanabilir.

$$V_{TEJ} = I_{TEJ} \cdot R_L \Rightarrow V_{TEJ} = \left(\frac{V_{OC}}{R_{in} + R_L} \right) \cdot R_L \quad (31)$$

$$P_{TEJ} = \frac{V_{TEJ}^2}{R_L} \Rightarrow P_{TEJ} = \frac{V_{OC}^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (32)$$

Güç ile gerilim arasındaki ilişki gücün gerilime bağlı fonksiyonu olarak ($P_{TEJ} = f(V_{TEJ})$) şeklinde ifade edilebilir. Şekil 2.6'daki P – V eğrisi ve Denklem (32) dikkate alındığında TEJ gücü V_{TEJ} 'in 2. dereceden azalan parabolik bir fonksiyonudur.

2. dereceden parabolik bir fonksiyonun ifadesi Denklem (33)'de verilmiştir. Denklem (33)'de görüldüğü üzere 2. dereceden parabolik bir fonksiyonun 3 adet katsayısı (m, n ve c katsayıları) vardır. Bu katsayıların bulunmasıyla $P_{TEJ} = f(V_{TEJ})$ fonksiyonu belirlenmiş olacaktır.

$$y = f(x) = m \cdot x^2 + n \cdot x + c \quad (33)$$

Denklem (33)'de verilen 3 adet katsayının belirlenebilmesi için fonksiyonun 3 farklı değerinin bilinmesi gereklidir. Bununla birlikte, Denklem (32)'ye göre V_{TEJ} sıfır olduğunda P_{TEJ} değeri de sıfır olacağından dolayı Denklem (33)'deki c katsayısı sıfır olacaktır. Geriye kalan m ve n katsayıları ise 2 farklı V_{TEJ} değerine karşılık gelen P_{TEJ} değerleriyle hesaplanarak bulunacaktır.

Denklem (33)'de bulunan x ifadesi V_{TEJ} 'e, y ifadesi ise P_{TEJ} 'e karşılık gelmektedir.

$$y_1 = m \cdot x_1^2 + n \cdot x_1 + 0 ; \quad y_2 = m \cdot x_2^2 + n \cdot x_2 + 0 \quad (34)$$

Bilinen (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) değerlerine karşılık Denklem (34)'daki eşitliklerin hesaplanmasıyla m ve n katsayıları Denklem (35) ve Denklem (36)'de verildiği gibi bulunur.

$$n = \frac{y_1 \cdot x_2^2 - y_2 \cdot x_1^2}{x_1 \cdot x_2 (x_2 - x_1)} \quad (35)$$

$$m = \frac{y_1 - n \cdot x_1}{x_1^2} \quad (36)$$

Şekil 2.6'daki P – V eğrisinin sol tarafında değişimin türevi pozitif, sağ tarafında ise negatiftir. Eğrinin tepe noktasında ise eğim (türev) sıfırdır. MPP, güç – gerilim eğrisinin

tepe noktasıdır. $P_{TEJ} = f(V_{TEJ})$ parabolik fonksiyonunun maksimumu yani türevinin sıfır olduğu nokta tepe noktası diğer bir ifadeyle MPP'dir. Dolayısıyla $P_{TEJ} = f(V_{TEJ})$ fonksiyonun türevinin sıfır olduğu noktanın bulunmasıyla MPP tespit edilmiş olacaktır.

$$f'(x) = 2.m.x + n \quad (37)$$

$$0 = 2.m.x + n \Rightarrow x = -n / 2m \quad (38)$$

Önerilen tasarımda anlık olarak çalışma noktasının türevine bakılacaktır. MPP'de türev sıfıra eşit olduğundan dolayı P – V eğrisi üzerindeki her noktanın türevi MPP'ye olan uzaklığı yani hatayı (e) verecektir.

Önerilen yöntemde ANFIS'in giriş parametreleri olarak hata ve hatanın değişim hızı kullanılmıştır. ANFIS'in doğru ve anlamlı çıktı üretebilmesi için girişlerine gönderilen değerlerin uygun üyelik fonksiyonu kümelerine denk gelmesi gerekecektir. Bu nedenle ANFIS'in birinci giriş parametresi olan hatanın büyüklüğünün orantısal olarak ifade edilmesi için türev fonksiyonu Denklem (39)'te verildiği gibi türevin maksimum değeriyle orantılanarak $E(V_{TEJ})$ normalize fonksiyonu elde edilmiştir. P – V eğrisinin maksimum eğimleri eğrinin V_{TEJ} eksenini kestiği noktalarda olacaktır. Şekil 2.6'daki grafikte görüldüğü üzere $f(0)$ noktasında eğim (türev) maksimum ve işareti pozitiftir.

$$E(V_{TEG}) = \frac{f'(V_{TEG})}{f'(0)} = \frac{2.m.V_{TEG} + n}{2.m.0 + n} = \frac{2.m.V_{TEG} + n}{n} \quad (39)$$

Denklem (39)'teki gibi normalize edilmiş hatanın değeri -1 ile +1 aralığında olacaktır. Hatanın değeri -1'e yaklaştıkça negatif büyümekte, +1'e yaklaştıkça pozitif büyümekte ve 0'a yaklaştıkça ise azalmaktadır. Çalışma noktasının hatası (e_1) Denklem (40)'deki gibi bulunur.

$$e_1 = E(V_{TEG(1)}) \quad (40)$$

ANFIS'in ikinci giriş parametresi olan hatanın değişim hızı (e_d) ise Denklem (41)'da gösterildiği üzere birim görev döngüsü değişimiyle hatanın ne kadar değiştiğini ifade eden orandır.

$$e_d = \frac{e_1 - e_0}{D_1 - D_0} \quad (41)$$

Burada e_1 ve D_1 sırasıyla t anındaki hata ve görev döngüsü değerlerini, e_0 ve D_0 sırasıyla $t-1$ anındaki hata ve görev döngüsü değerlerini ifade etmektedir. Önerilen yöntemde, e_1 ve e_d parametreleri ANFIS tarafından işlenerek görev döngüsü fark değeri (d_a) üretilir. ΔD adım genişliği Denklem (42)'de verildiği gibi dinamik olarak değiştirilir.

$$D_1 = D_1 + d_a \quad (42)$$

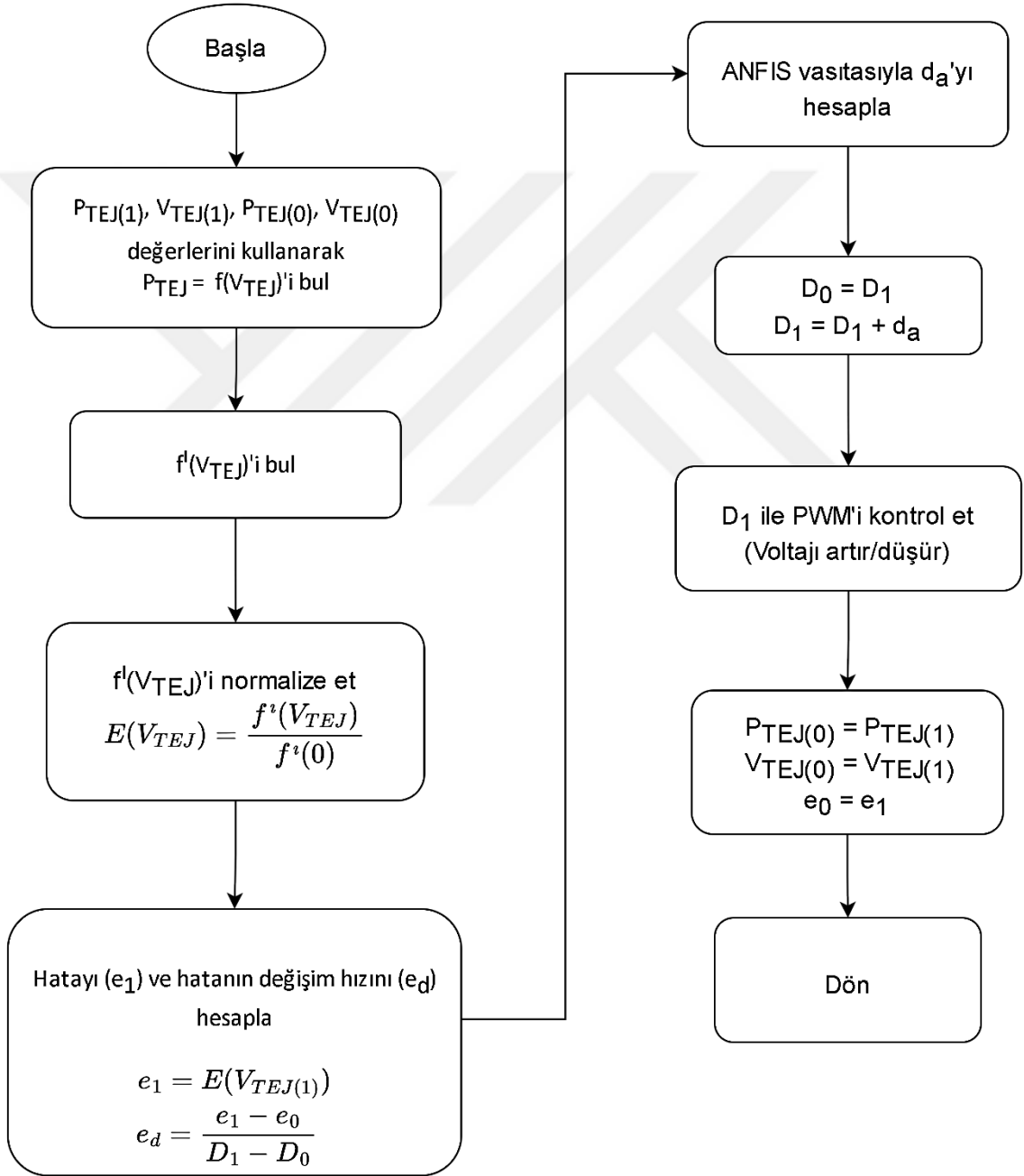
e 'nin değerine göre ANFIS tarafından üretilecek olan d_a 'nın işareti pozitif veya negatif olacaktır. Böylelikle, daha büyük e , ANFIS'in çıkışında daha büyük ΔD üretilmesini sağlayacak ve MPP için izleme süresini kısaltacaktır. MPP'ye yaklaşıldığında, daha küçük hata (e) değeri oluşacağından ΔD adım genişliği düşürülecek, dolayısıyla salınım en aza indirilerek MPP çevresinde kararlı bir çıktı sağlanacaktır. Bu çalışmada, hata e , çalışma konumunun MPP'ye uzaklığı olarak belirlenir. Hata değeri uygun şekilde -1 ile +1 arasında kesirli bir faktöre dönüştürülür. Hata sıfır ise TEJ çalışma noktasının MPP'ye ulaştığını gösterir. Önerilen yöntem, sabit adım genişliği kullanan yöntemler ile karşılaştırıldığında, MPP'yi daha hızlı yakalar ve MPP'de salınımsız daha kararlı bir çıktı sağlar.

Önerilen yöntem aşağıdaki adımları kullanarak çalışır:

1. TEJ'in gerilimi (V_{TEJ}) ve akımı (I_{TEJ}) kullanılarak güç çıkışı hesaplanır.
2. Çalışma anındaki (t anındaki) güç ve gerilim değerleri ile ($t-1$) anındaki güç ve gerilim değerleri kullanılarak $P_{TEJ} = f(V_{TEJ})$ parabolik fonksiyonunun katsayıları, (35) ve (36) numaralı denklemlere göre bulunur.
3. Denklem (37)'a göre bu fonksiyonun türevi bulunarak Denklem (39)'te verildiği gibi normalize edilir.
4. Hata (e) ve hatanın değişim hızı (e_d) sırasıyla (40) ve (41) numaralı denklemlere göre hesaplanır.
5. ANFIS, e ve e_d girişlerini kullanarak görev döngüsü fark değerini (d_a) üretir.
6. Görev döngüsü fark değeri Denklem (42)'teki gibi kullanılarak D_1 görev döngüsü değeri güncellenir.

7. Yeni üretilen görev döngüsü değeri ile DA – DA dönüştürücünün PWM sinyali kontrol edilerek yüke aktarılan gerilim değeri değiştirilir.

Önerilen EÇ – ANFIS MPPT yöntemi ile yukarıdaki algoritma izlenerek P – V eğrisi üzerinde çalışma noktasının MPP'ye doğru hareket etmesi sağlanır. Önerilen MPPT kontrol algoritması, Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

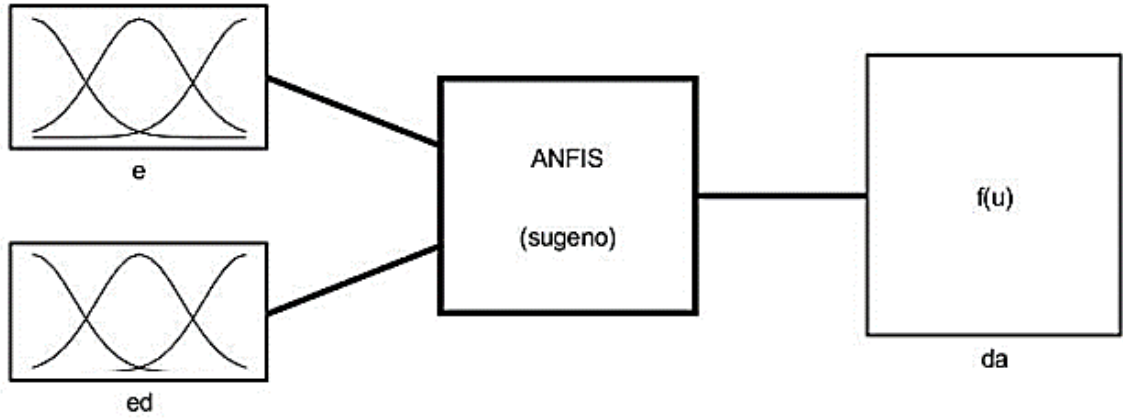


Şekil 3.9. EÇ – ANFIS MPPT akış diyagramı

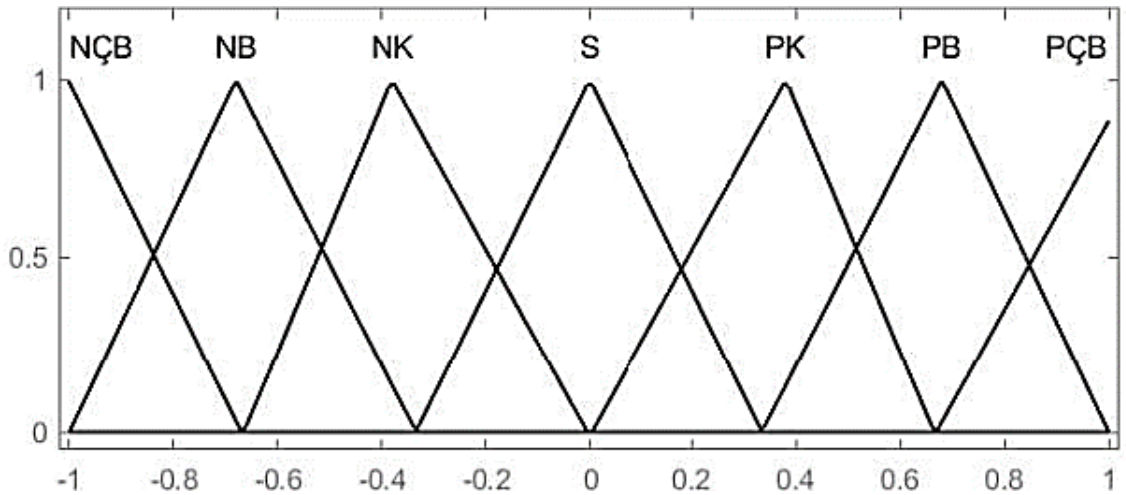
3.5. Çalışma için ANFIS Modelinin Hazırlanması

Bu çalışmada iki giriş ve bir çıkışa sahip olan ANFIS'in blok şeması Şekil 3.10'de gösterilmiştir. ANFIS'in birinci girişi olan hata girişi 7 adet üyelik fonksiyonuna ve ikinci girişi olan hatanın değişim hızı girişi de 3 adet üyelik fonksiyonuna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

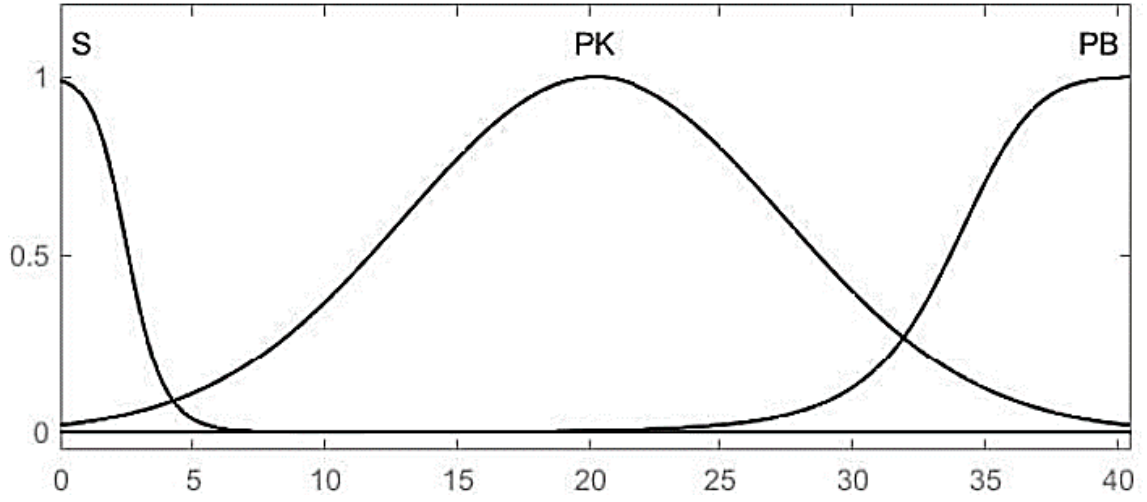
Hazırlanan veri seti ile ANFIS sistemi eğitilmiştir. Eğitilmiş ANFIS'in hata girişinin üyelik fonksiyonları grafiği Şekil 3.11'de ve hatanın değişim hızının üyelik fonksiyonları grafiği Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Önerilen MPPT yönteminin ANFIS blok şeması

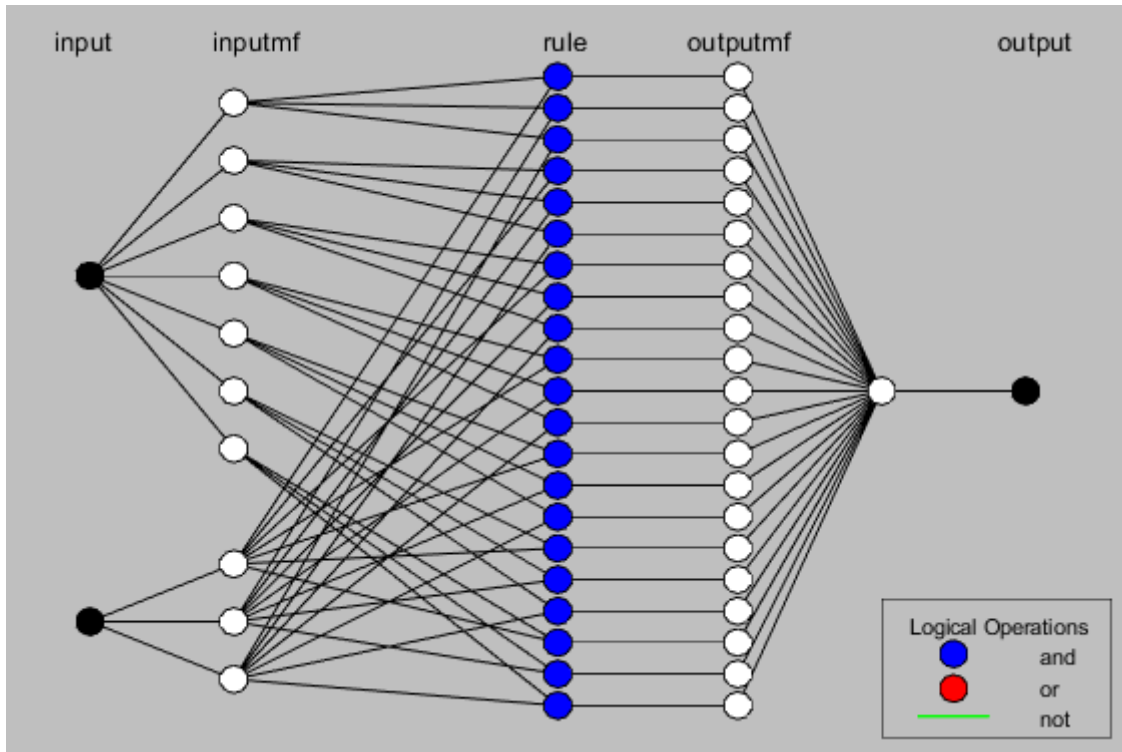


Şekil 3.11. Hatanın üyelik fonksiyonları

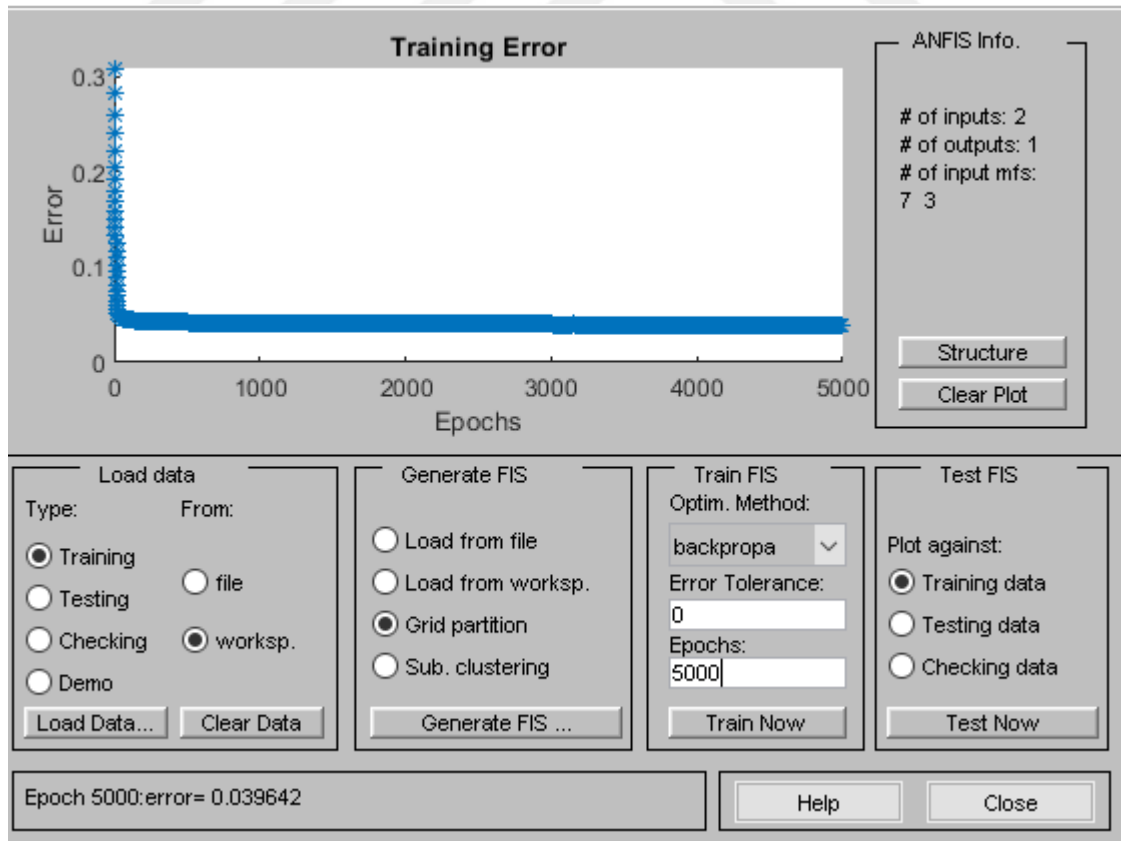


Şekil 3.12. Hatanın değişim hızının üyelik fonksiyonları

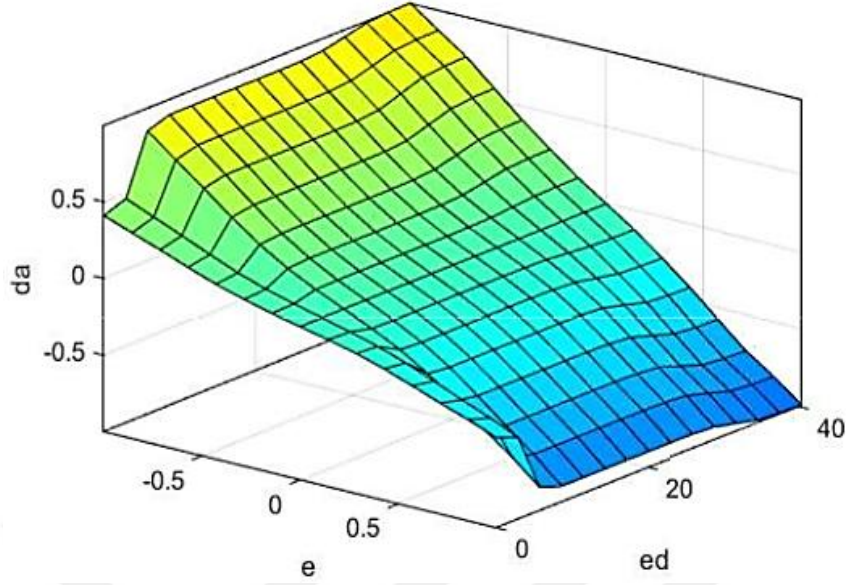
Yukarıda bahsedilen girişlere ve girişlerin üyelik fonksiyonlarına göre oluşturulan ANFIS modelinin yapısı Şekil 3.13'te gösterilmektedir. İki giriş, bir çıkış ve 21 kuraldan oluşan ANFIS ağının eğitimi için ham veriler içerisinde rastgele değerler seçilerek bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti kullanılarak back propagation optimizasyon metodu ve 5000 eğitim döngü sayısı ile eğitildikten sonra %0.039642 hata değeri elde edilmiştir. MATLAB görüntüsü Şekil 3.14'te verilmiştir. Şekil 3.15'te ANFIS'in kontrol kurallarının üç boyutlu yüzey görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Oluşturulan ANFIS yapısı



Şekil 3.14. Oluşturulan ANFIS'in eğitilmesi



Şekil 3.15. ANFIS kontrol kurallarının yüzey görünümü

3.6. Performans Kriterleri

Geliştirilen yöntemin maksimum güç noktasını yakalama ve izlemede etkinliğini doğrulamak amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Çeşitli çalışma koşulları altında TEJ'in MPPT olmadan, P&O MPPT ile ve geliştirilen MPPT ile MPP'yi izleme performanslarını (MPP'ye ulaşma hızı, izleme doğruluğu ve kalıcı durum salınımı gibi) görmek ve karşılaştırmak üzere aşağıdaki başlıklarda verilen testler uygulanmıştır.

3.6.1. Stabil koşullarda farklı ΔT değerleriyle gerçekleştirilen testler

Sistemin farklı sıcaklık aralıklarındaki (dolayısıyla farklı güç büyüklüklerindeki) çalışma performanslarını görmek amacıyla testler yapılmıştır. Bu gruptaki testler stabil çalışma koşulları altında (sabit sıcaklık ve yük koşulları) farklı ΔT sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Bu grupta testler Tablo 3-3'de verildiği gibi her üç sistem için de (MPPT olmadan, P&O MPPT ile ve geliştirilen MPPT yöntemi ile) üç farklı ΔT sıcaklığı aralığında ayrı ayrı uygulanmıştır. Tüm testlerde yük 90Ω 'da ve soğuk yüzey sıcaklığı 30°C 'de sabit olarak ayarlanmıştır.

Tablo 3-3. Stabil Koşullarda Farklı ΔT Değerleriyle Gerçekleştirilen Testler

	1. Test	2. Test	3. Test
T_h	80°C	160°C	250°C
T_c	30°C		
R_L	90Ω		

3.6.2. Dinamik yük değişimi testleri

EÇ – ANFIS ve P&O'nun çalışma esnasındaki ani yük değişimlerine karşı dinamik MPPT cevaplarını görmek amacıyla testler yapılmıştır. Tablo 3-4'te verildiği gibi, başlangıçta 1Ω olan yük değeri 0.4. saniyede 90Ω ve 0.7. saniyede tekrar 1Ω olacak şekilde değiştirilmiştir. TEJ yüzey sıcaklıkları ise soğuk yüzey 30°C ve sıcak yüzey 250°C ($\Delta T = 220^\circ\text{C}$) olup, deney boyunca sabittir.

Tablo 3-4. Dinamik yük değişimi test koşulları

Zaman aralığı (sn)	0 – 0.4	0.4 – 0.7	0.7 – 1
T_h	250°C		
T_c	30°C		
R_L	1Ω	90Ω	1Ω

3.6.3. Dinamik sıcaklık değişimi testleri

Çalışma esnasındaki sıcaklık değişimlerine karşı dinamik MPPT cevaplarını görmek için TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkları değiştirilmiştir. Bu deneyde soğuk yüzey sıcaklığı 30°C'de ve yük 20Ω'da sabit olarak tutulmuştur.

Tablo 3-5'te verildiği gibi başlangıçta 160°C olan sıcak yüzey sıcaklığı, 0.4. saniyede 250°C'ye yükseltilmiş, daha sonra da 0.7. saniyede 80°C'ye düşürülmüştür.

Tablo 3-5. Dinamik sıcaklık değişimi test koşulları

Zaman aralığı (sn)	0 – 0.4	0.4 – 0.7	0.7 – 1
T _h	160 ⁰ C	250 ⁰ C	80 ⁰ C
T _c	30 ⁰ C		
R _L	20Ω		

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Eğri çıkarımlı ANFIS tabanlı MPPT tekniğini test etmek ve geleneksel P&O MPPT tekniği ile karşılaştırmak için MATLAB yazılımı üzerinde simülasyon programı geliştirilmiştir. Test çalışmaları farklı sıcaklık ve yük değerleriyle hem stabil hem de dinamik değişken çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir.

4.1. Stabil Koşullarda Farklı ΔT Değerleriyle Gerçekleştirilen Testler

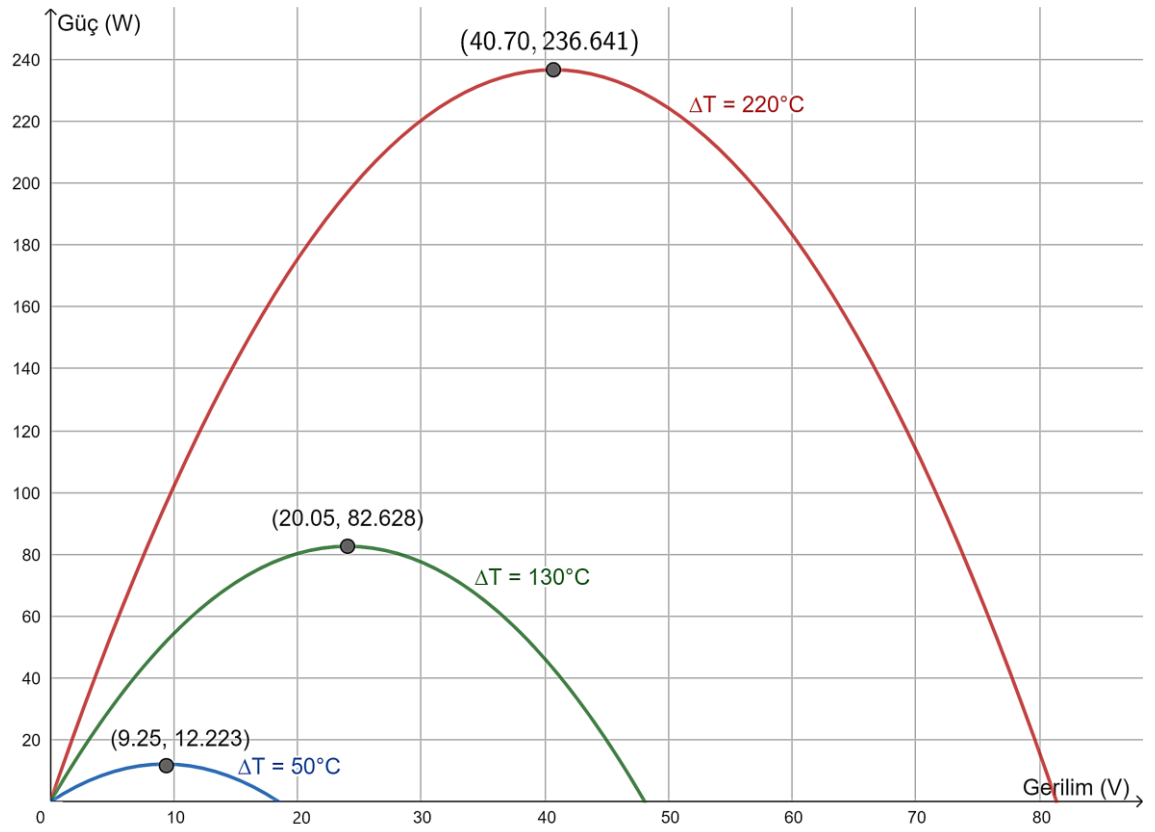
Değişik sıcaklık farklarına göre MPPT cevaplarını görmek için yapılan testlere ait sonuçlar Tablo 4-1’de paylaşılmıştır. Simülasyon koşullarındaki ΔT değerlerine göre oluşan teorik güç – gerilim eğrileri ve bu eğrilerin tepe noktalarında yer alan MPP değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

TEJ’in MPPT’siz ve EÇ – ANFIS ile çalıştırıldığı simülasyon sonuçlarının verildiği Şekil 4.2’deki grafikte görüldüğü üzere MPPT’siz durumda MPP’den ortalama %73 oranında düşük güçte çalışarak büyük oranda verimsizlikle sonuçlandığı görülmüştür.

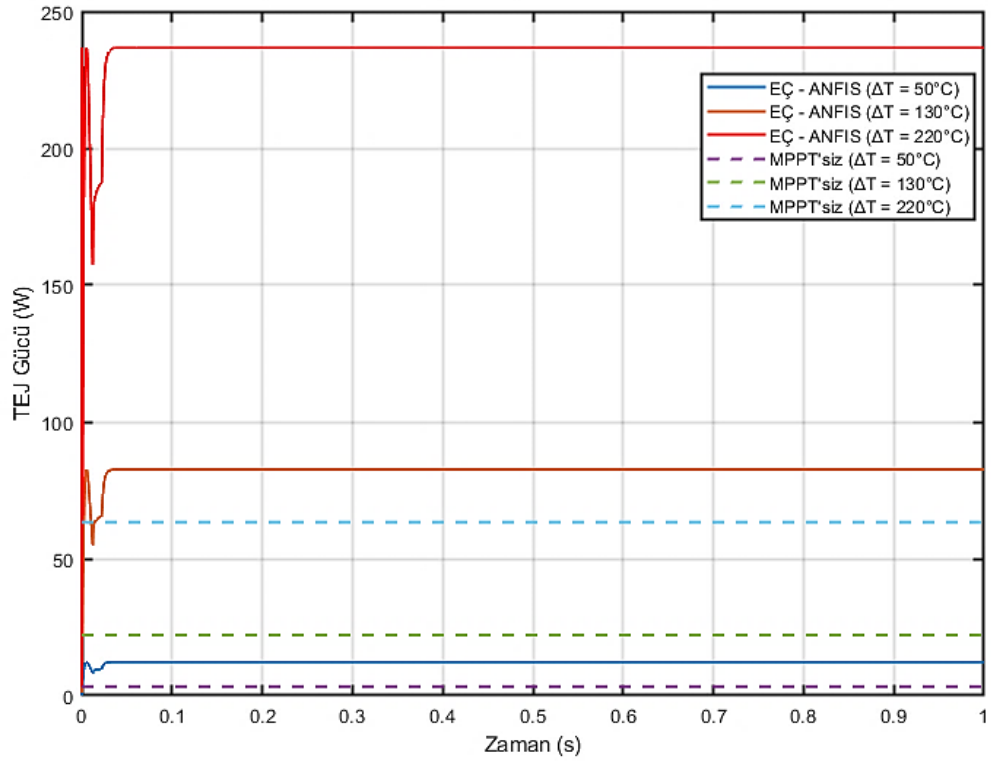
Şekil 4.3’te EÇ – ANFIS ve P&O yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Önerilen EÇ – ANFIS ile 0.03 saniyede maksimum güce ulaşıldığı görülmüştür. Buna karşılık, P&O ile maksimum güce 0.38 saniyede ulaşılmıştır. Kararlı duruma ulaştıktan sonra geleneksel P&O yöntemine kıyasla EÇ – ANFIS sayesinde MPP etrafındaki salınım ortadan kaldırılmıştır.

Tablo 4-1. Farklı ΔT değerleriyle stabil koşullarda yapılan testlerin sonuçları

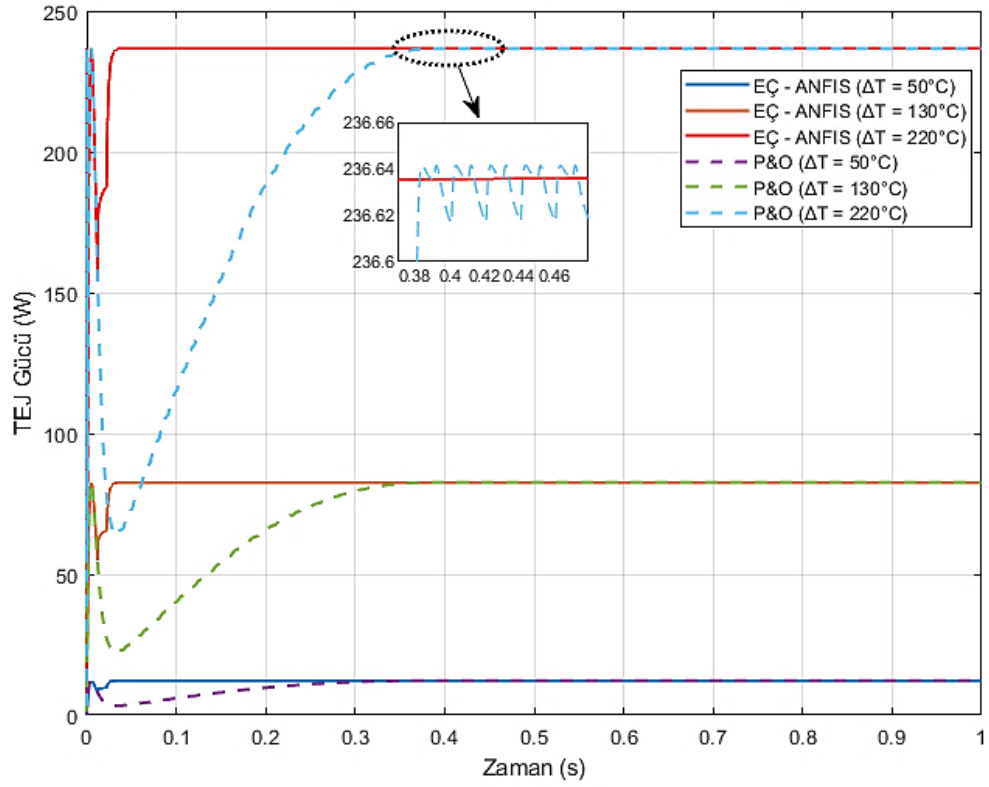
	EÇ-MPPT			P&O MPPT			MPPT’siz		
	ΔT 50°C	ΔT 130°C	ΔT 220°C	ΔT 50°C	ΔT 130°C	ΔT 220°C	ΔT 50°C	ΔT 130°C	ΔT 220°C
Ripple (%)	0	0	0	0.8	0.7	0.7	0	0	0
Teorik Max. Güç (W)	12.223 21	82.627 84	236.641 43	12.223 21	82.627 84	236.641 43	12.223 21	82.627 84	236.641 43
Ölçülen Max. Güç (W)	12.222 86	82.626 68	236.635 2	12.222 46	82.625 43	236.632 7	3.2737 3	22.130 40	63.3793 6
Fark (%)	0.0029	0.0014	0.0026	0.0061	0.0029	0.0037	73.217	73.216	73.217



Şekil 4.1. Farklı ΔT değerlerine göre teorik güç – gerilim eğrileri

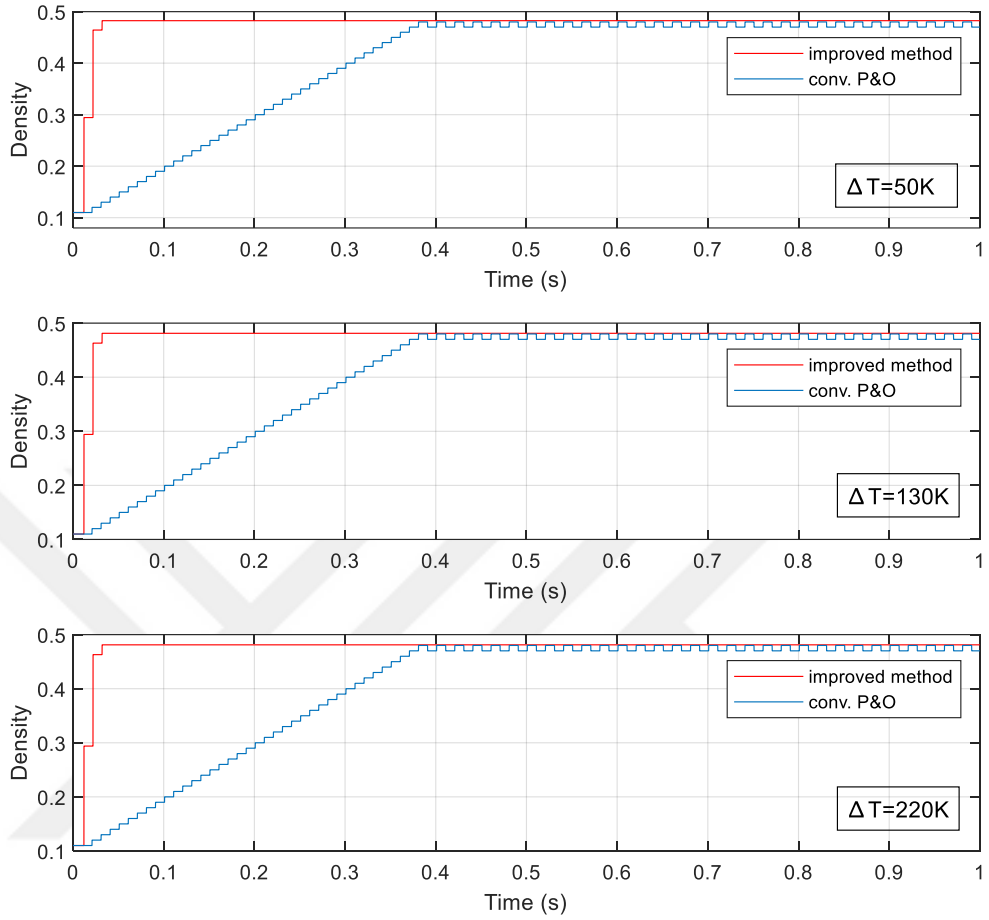


Şekil 4.2. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve MPPT'siz TEJ gücü



Şekil 4.3. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT cevapları

Şekil 4.4'te verilen görev döngüsü değişim grafiklerinde görüldüğü üzere, EÇ – ANFIS 3 adımda MPP'yi yakalamış olup, MPP'yi yakaladıktan sonra salınım yapmaksızın sabit değerde devam etmiştir. P&O yöntemi ise çok sayıda adım sonrasında MPP'ye ulaşmış, sonrasında ise pertürbasyon adım genişliği kadar MPP etrafında sürekli salınım yaparak ilerlemiştir.



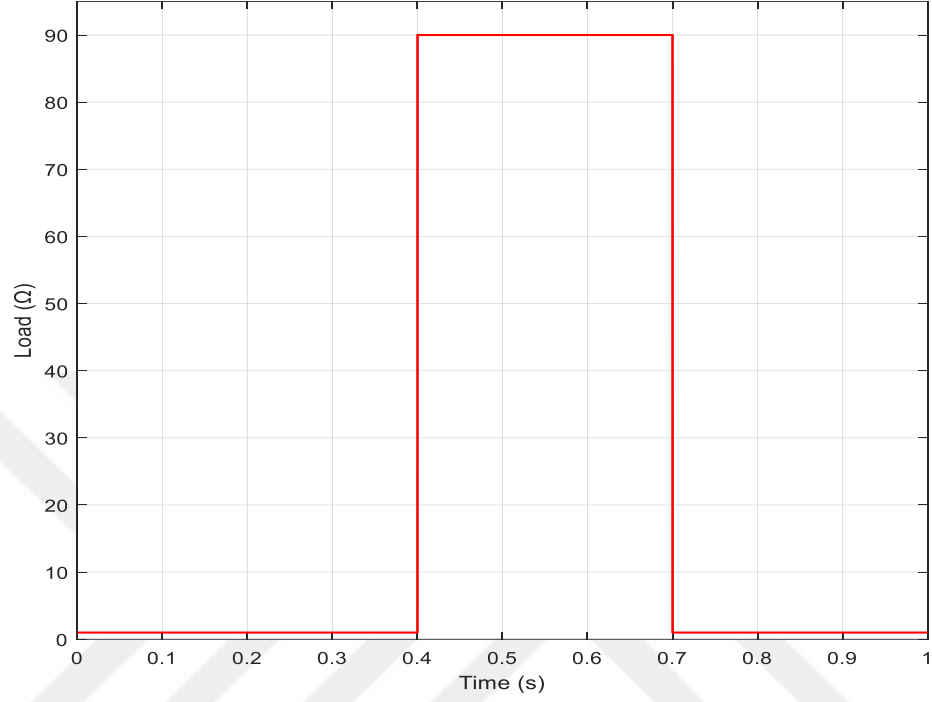
Şekil 4.4. Farklı ΔT değerlerine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT görev döngüsü değişimleri

4.2. Dinamik Yük Değişimi Testleri

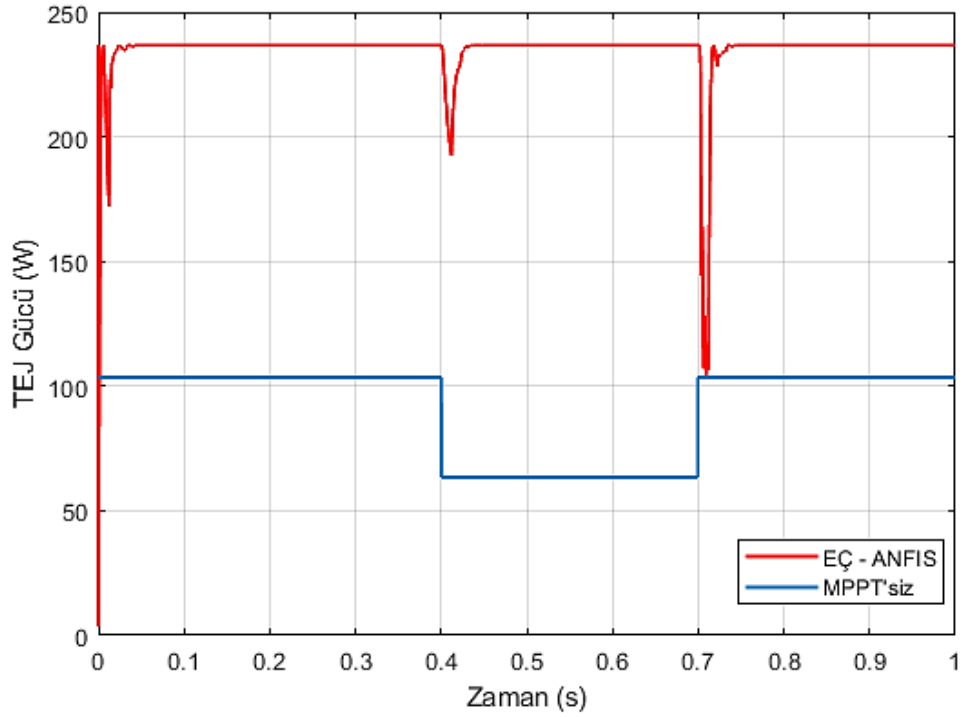
EÇ – ANFIS ve P&O'nun çalışma esnasındaki ani yük değişimlerine karşı dinamik MPPT cevaplarını görmek amacıyla gerçekleştirilen deneye ait grafikler Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.5'te verildiği gibi, başlangıçta 1Ω olan yük değeri 0.4. saniyede 90Ω ve 0.7. saniyede tekrar 1Ω olacak şekilde değiştirilmiştir. TEJ yüzey sıcaklıkları ise soğuk yüzey 30°C ve sıcak yüzey 250°C ($\Delta T = 220^{\circ}\text{C}$) olup, deney boyunca sabittir.

Şekil 4.6'da TEJ'in MPPT'siz ve EÇ – ANFIS ile çalıştırıldığında güç değişimleri karşılaştırılmıştır. Buna göre MPPT'siz durumda güç aktarımının büyük oranda verimsiz olduğu görülmektedir. Kalıcı durumlar dikkate alındığında önerilen yöntem ile 1Ω yük direncinde yüke aktarılan güç 236.641W iken MPPT'siz durumda 103.53W 'tır. Yüke

yaklaşık olarak 2.28 kat daha fazla güç aktarılmıştır. 90Ω 'luk yük direnci ile yapılan testlerde ise yüke aktarılan güç 3.73 kat artmıştır.

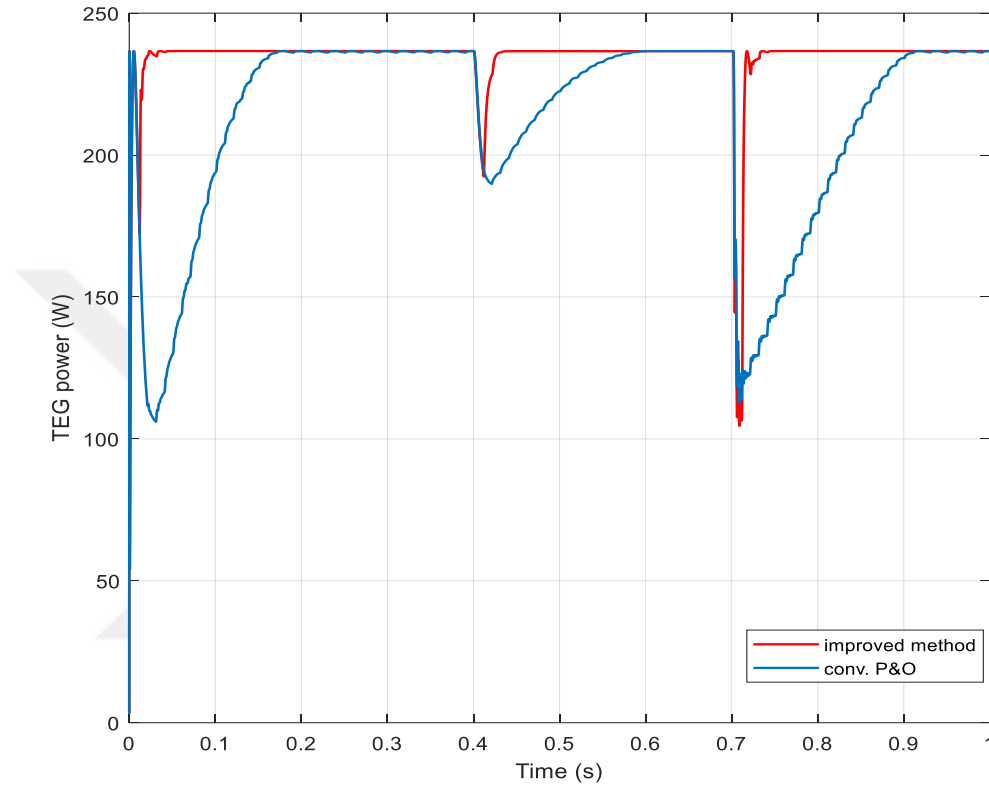


Şekil 4.5. Zamana göre dinamik yük değişimi



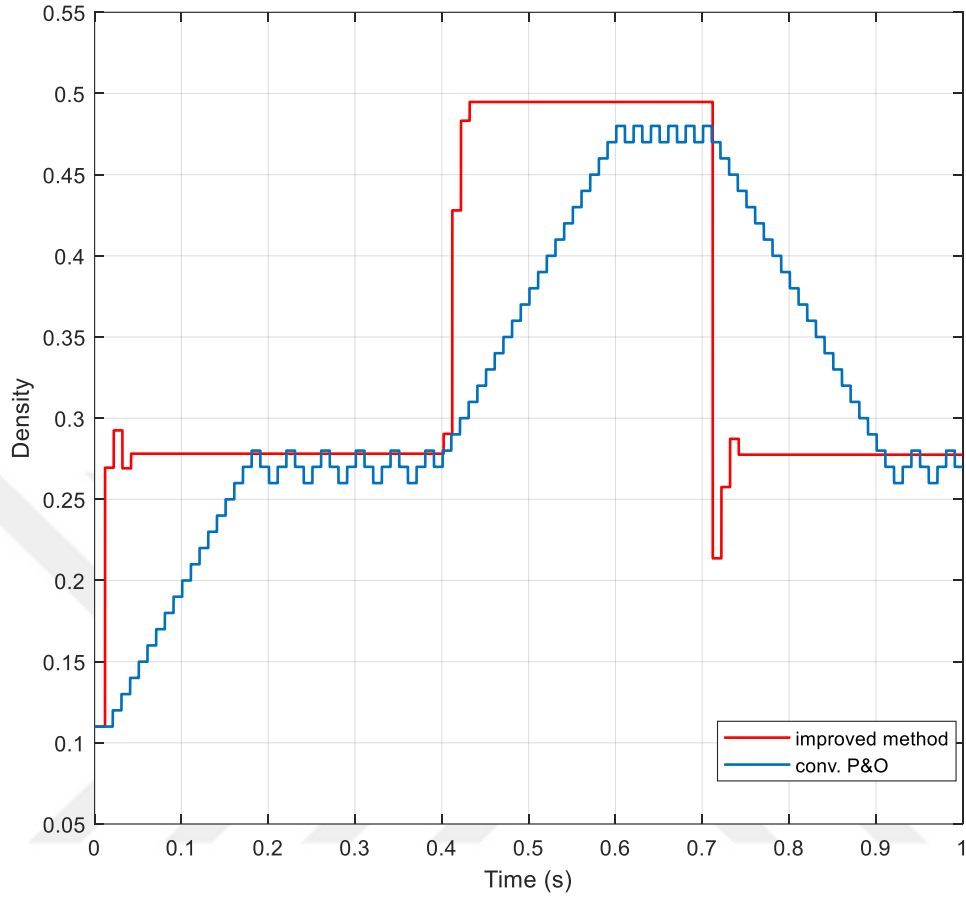
Şekil 4.6. Dinamik yük değişimine göre EÇ – ANFIS ve MPPT'siz durum güç karşılaştırması

Şekil 4.7’deki grafikte EÇ – ANFIS ve P&O’nun yük değişimine karşı dinamik cevapları verilmiştir. Yük değişimlerinde tekrar MPP’nin yakalanması EÇ – ANFIS ile 0.03 saniyeden kısa sürerken, P&O ile yaklaşık 0.2 saniye sürmüştür. Şekil 4.7’den görüldüğü gibi önerilen yöntem her yük değişiminde daha çabuk toparlanarak MPP’ye ulaşmıştır.



Şekil 4.7. Dinamik yük değişimine göre EÇ – ANFIS ve P&O MPPT cevapları

MPP’yi yakalamak için görev döngüsü değişimlerinin verildiği Şekil 4.8’de görüldüğü üzere yük değişimlerinde EÇ – ANFIS ortalama 3 ila 4 adımda hızla MPP’ye ulaşır sonrasında salınımsız ilerlerken, P&O ise çok sayıda adım ile MPP’ye ulaşarak sonrasında MPP etrafında salınım yaparak ilerlemiştir.

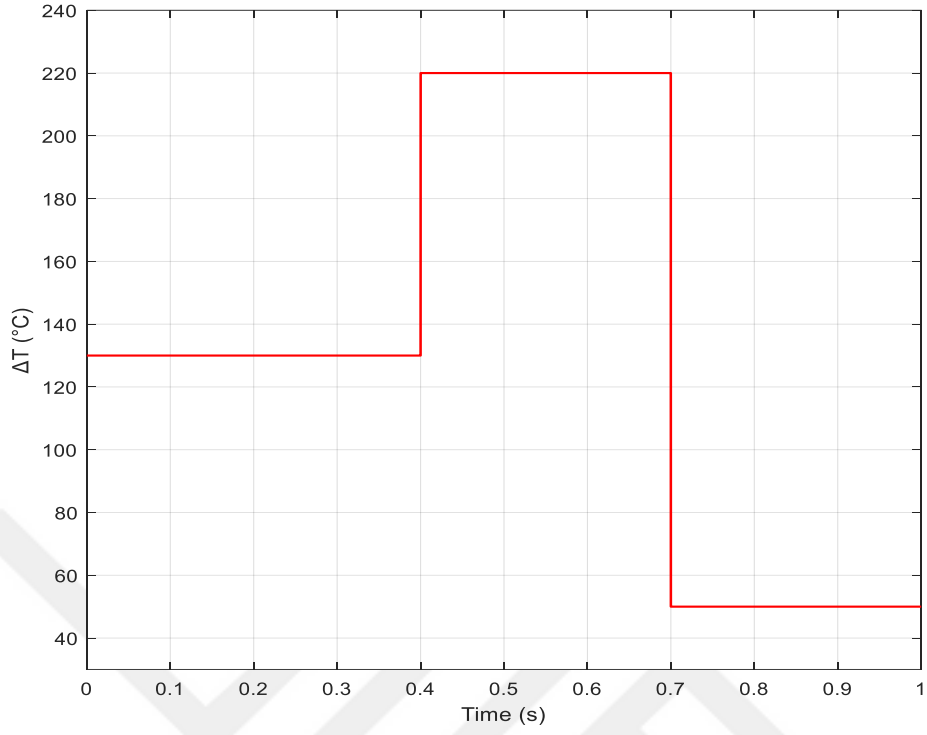


Şekil 4.8. Dinamik yük değişimine göre görev döngüsü değişimleri

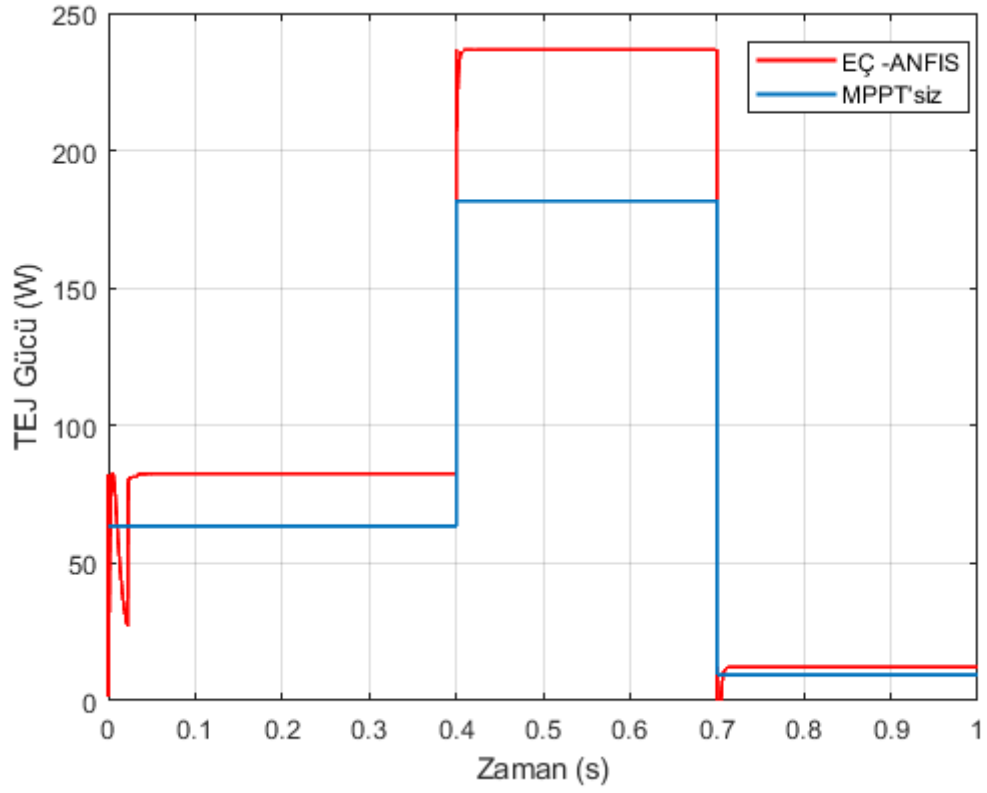
4.3. Dinamik Sıcaklık Değişimi Testleri

Çalışma esnasındaki sıcaklık değişimlerine karşı dinamik MPPT cevaplarını görmek için TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkları değiştirilmiştir. Bu deneyde soğuk yüzey sıcaklığı 30°C 'de ve yük 20Ω 'da sabit değerlerde tutulmuştur. Başlangıçta 160°C olan sıcak yüzey sıcaklığı, 0.4. saniyede 250°C 'ye yükseltilmiş, daha sonra da 0.7. saniyede 80°C 'ye düşürülmüş, Şekil 4.9'daki gibi ΔT sıcaklık farkları değişimi oluşturulmuştur.

Önerilen yöntem ile MPPT'siz durumda elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Kalıcı durumlar dikkate alındığında önerilen yöntem ile sırasıyla 130, 220 ve 50 sıcaklık farklarında yüke aktarılan güç 82.62W, 236.622W ve 12.221W olmuştur. Her üç durumda da yüke yaklaşık olarak 1.3 kat daha fazla güç aktarılmıştır.

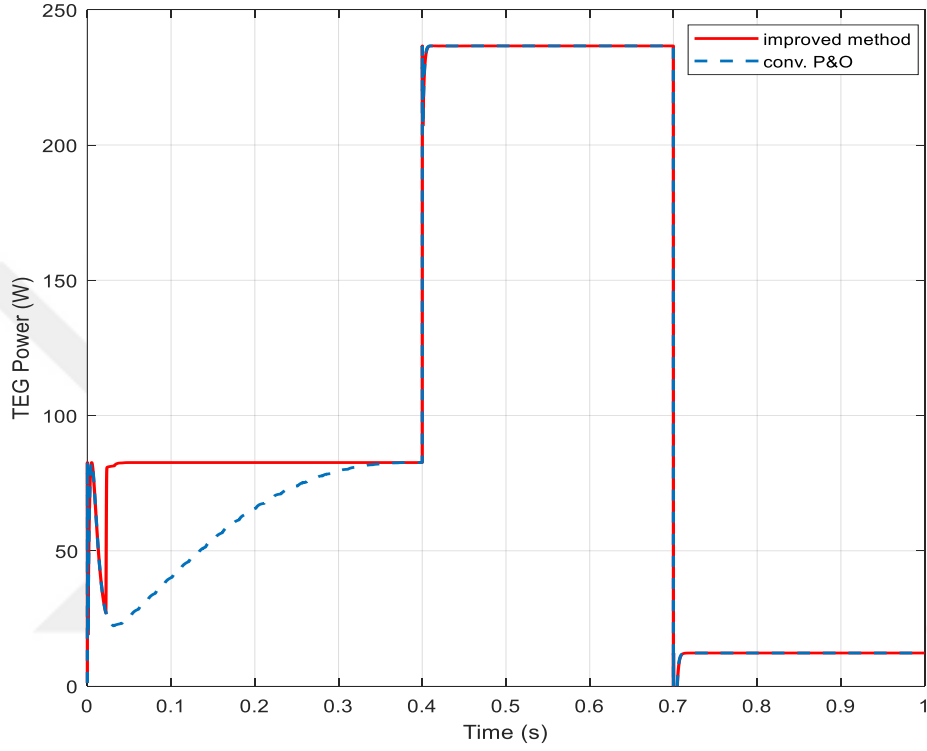


Şekil 4.9. Zamana göre dinamik sıcaklık (ΔT) değişimi



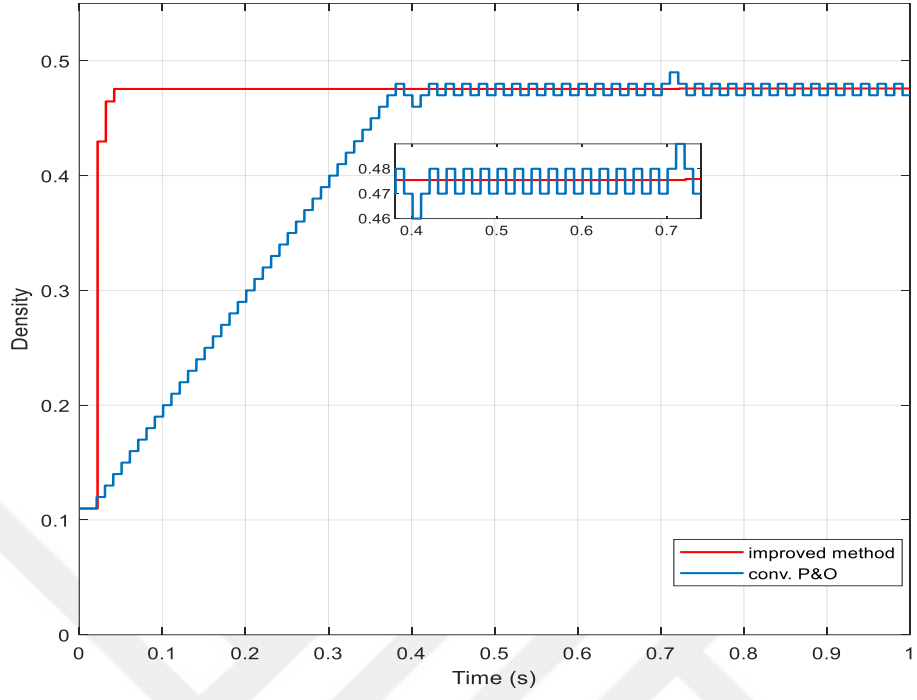
Şekil 4.10. Dinamik sıcaklık değişimine göre EÇ – ANFIS ve MPPT'siz durum güç karşılaştırması

Şekil 4.11’de önerilen yöntem ile P&O yöntemi testleri sonucunda elde edilen verilerin grafiği gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere sıcaklık değişimlerinde her iki yöntemin de hızlı bir şekilde MPP’ye ulaştığı görülmüştür. Ancak ilk MPP’ye ulaşma anında önerilen yöntem 9.3 kat daha hızlıdır.



Şekil 4.11. Dinamik sıcaklık değişimine göre MPPT cevapları

Dinamik sıcaklık değişimine göre görev döngüsü değişimleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Kalıcı durumda, önerilen yöntem görev döngüsünü değiştirmezken, P&O yöntemi MPP’de olup olmadığını görev döngüsünü adım sayısı kadar değiştirerek kontrol etmektedir. Bu değişimler büyütülerek şekil içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Dinamik sıcaklık değişimine göre görev döngüsü değişimleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

TEJ'in anlık çalışma koşuluna özgü güç – gerilim eğrisi matematiksel fonksiyon şeklinde ifade edilerek bu fonksiyonun türevi üzerinden MPP ile çalışma noktasının MPP'ye uzaklığı (hata) keskin ve hızlı bir şekilde tespit edilmiştir. Hatanın büyüklüğü ve değişim hızına göre ANFIS yardımıyla pertürbasyon adımının genişliği ayarlanarak MPP'nin hızlı, doğru, kararlı ve salınımsız izlenmesi sağlanmıştır.

TEJ'in anlık çalışma koşuluna özgü güç – gerilim fonksiyonu çıkarılarak bu fonksiyonun türevi üzerinden MPP'si ve çalışma anındaki MPP'ye uzaklık (hata) hızlı ve net bir ifadeyle tespit edilmiştir.

Pertürbasyon adımı sabit olmayıp, hatanın büyüklüğüne ve değişim hızına bağlı olarak ANFIS yardımıyla değişken adım büyüklüğü oluşturulması MPP'nin hızlı bir şekilde yakalanmasını ve kalıcı durum salınımlarının ortadan kaldırılmasını sağlamıştır.

Yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde önerilen yöntem, P&O yöntemine göre Şekil 4.3, Şekil 4.7 ve Şekil 4.11'de verilen grafiklerde görüldüğü gibi farklı sıcaklık aralıkları, dinamik yük değişimi ve dinamik sıcaklık değişimlerinde ilk MPP'ye ulaşma açısından daha başarılıdır. Farklı sıcaklık aralıklarında ve stabil şartlarda yapılan testlerde yaklaşık olarak 12.7 kat daha hızlı MPP'ye ulaşabilmektedir.

Dinamik yük değişimi testlerinde önerilen yöntem hem ilk MPP'ye ulaşma süresi hem de MPP'deyken yük direnci değiştiğinde P&O yöntemine göre daha hızlı MPP'yi yakalamaktadır. Şekil 4.7 incelendiğinde her durumda MPP'ye yaklaşık olarak 6.7 kat daha hızlı ulaşmaktadır.

Dinamik sıcaklık değişimleri için yapılan testlerde ilk MPP'ye ulaşma önerilen yöntemde daha hızlı olurken, MPP'deyken sıcaklık şartları değiştiğinde her iki yöntem de hızlı bir şekilde MPP'yi yakalamaktadır. Bu durum sıcaklık şartlarının değişiminin empedans uyumunu etkilemediği gerçeği ile açıklanır. Çünkü bu çalışmada TEJ modelinin iç direncinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmıştır. İlk MPP'yi yakalama süresi 9.3 kat daha hızlıdır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ilk MPP'ye ulaşma hızlarının farklı olması hazırlanan çalışma koşullarında TEJ iç direnci ile yük direncinin uyumsuzluk oranı ile açıklanır. Uyumsuzluk oranı arttığında önerilen yöntemin P&O yöntemine göre hız farkı daha da artmaktadır. Farklı sıcaklık koşullarında MPP'deyken şartlar değiştiğinde şekil ...daki gibi her iki yöntemin performansı aynı olduğu görülmektedir. Gerçek çalışma koşullarında TEJ'lerin yapısında kullanılan yarı iletken malzemelerin parametreleri sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu durum TEJ'lerin iç dirençlerinin sıcaklıkla değişen dinamik bir değişken olduğu anlamına gelir. Bu çalışmada sabit kabul edilen iç direnç değişimlerini de içeren bir çalışma yapılırsa önerilen yöntemin dinamik sıcaklık değişimlerinde hem ilk MPP'yi yakalamada hem de sonrakilerde daha etkin performans göstereceği açıktır. Sonraki çalışmalarda dikkate alınması gerekir.

Elektronikte kaynakların verimli bir şekilde kullanılabilmesi için ripple faktörünün en az olması gerekmektedir. Basitçe voltaj dalgalanmaları olarak tanımlayabileceğimiz ripple faktörü DA işaretlerinin kalitesi için önemli bir faktördür. TEJ'lerde elde edilen enerji DA olmasına rağmen P&O yönteminde MPP'ye ulaşsa bile sürekli MPP noktasında olup olmadığını kontrol ettiği için DA çıkış işaretini bozmaktadır. Çünkü P&O tekniğinin doğası gereği önce denge durumu bozulup (perturb), sonra MPP kontrolü yapılır. Bu bozmadan kaynaklı olarak Şekil 4.3'te görüldüğü gibi ripple doğal olarak oluşur. Yani devre elemanları ve anahtarlardan kaynaklı bozucu etkilere ilaveten toplam harmonik distorsiyonu artırıcı bir etki oluşturur. Bu tekniğin kullanıldığı uygulamalarda DA – DA dönüştürücüler için tasarlanan filtre devrelerinde bu ilave etki mutlaka dikkate alınmalıdır. Önerilen yöntemde Şekil 4.3'te görüldüğü gibi MPP'ye ulaştıktan sonra kalıcı durumda ripple faktörüne etki edecek ilave salınımlar oluşmaz. Dolayısıyla elde edilen işaretin kalitesini bozmaz.

Önerilen yöntem, P&O yöntemine göre herhangi bir ilave donanım gerektirmeden sadece yazılımsal değişikliklerle artırılmış MPPT kabiliyeti sunmuştur. Böylelikle önerilen sistem ilave kontrol elemanlarına ihtiyaç duymadan sade bir tasarıma sahiptir. Bir MPPT'den beklenen hızlı ve doğru takip ile kalıcı durum salınıminin ortadan kaldırılması isterleri sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen yöntem teorik olarak açıklanmış, simülasyon çalışmaları ile performans kriterlerine göre test edilmiş, literatürde yaygın olarak kullanılan P&O yöntemi ile karşılaştırılmış, elde edilen bulgular analiz edilerek yöntemin

avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Sonraki çalışmalarda, deneysel olarak TEJ'lerden elde edilen veriler analiz edilerek önerilen yöntemin performansı doğrulanmalıdır.



Kaynaklar

- Ahiska, R., Yavuz, A. H., Kaymaz, M. & Güler, I. (2008). Control of a thermoelectric brain cooler by adaptive neuro-fuzzy inference system. *Instrumentation Science and Technology*, 36(6), 636–655. <https://doi.org/10.1080/10739140802451287>
- Ahiska, Raşit & Mamur, H. (2014). A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 128–136.
- Aldhaifallah, M., Saif, A. W. A., Baroudi, U., Rezk, H. & Mohamed, A. (2021). Fractional Incremental Resistance Based MPPT for Thermoelectric Generation systems. *18th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2021*, 902–907. <https://doi.org/10.1109/SSD52085.2021.9429510>
- Antchev, M. (2010). DC/DC Conversion. In *Technologies for Electrical Power Conversion, Efficiency, and Distribution* (Issue November). <https://doi.org/10.4018/978-1-61520-647-6.ch006>
- Atsalakis, G. S., Atsalaki, I. G. & Zopounidis, C. (2018). Forecasting the success of a new tourism service by a neuro-fuzzy technique. *European Journal of Operational Research*, 268(2), 716–727. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.044>
- Bijukumar, B., Kaushik Raam, A. G., Ganesan, S. I. & Nagamani, C. (2018). A Linear Extrapolation-Based MPPT Algorithm for Thermoelectric Generators under Dynamically Varying Temperature Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(4), 1641–1649. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2830796>
- Bijukumar, Bepinkumar, Raam, A. G. K., Ganesan, S. I., Nagamani, C. & Reddy, M. J. B. (2019). MPPT algorithm for thermoelectric generators based on parabolic extrapolation. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(6), 821–828. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.2007>
- Buntherm, K., Long, B., Christophe, G., Bruno, D. & Pascal, M. (2014). Modeling and tuning of MPPT controllers for a thermoelectric generator. *2014 1st International Conference on Green Energy, ICGE 2014*, 2(3), 220–226. <https://doi.org/10.1109/ICGE.2014.6835425>
- Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
- Converters, B. & Converter, B. (2020). *An Introduction to Buck, Boost, and Buck/Boost Converters | RECOM*. Recom. <https://recom-power.com/ko/rec-n-an-introduction-to-buck,-boost,-and-buck!sboost-converters-131.html?0>
- Dalala, Z. M. & Zahid, Z. U. (2015). New MPPT algorithm based on indirect open circuit voltage and short circuit current detection for thermoelectric generators. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 1062–1067. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7309806>
- Fernández-Yáñez, P., Romero, V., Armas, O. & Cerretti, G. (2021). Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. *Applied*

- Thermal Engineering*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291>
- HoSung Lee. (2016). *Thermoelectrics: Design and Materials*. John Wiley & Sons.
- Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive network-based fuzzy inference systems. *IEEE Trans. Syst.*, 23, 665–685.
- Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axccl, B., Wrobel, L. & Dai, S. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2021.100063>
- Kanagaraj, N. (2021a). An Enhanced Maximum Power Point Tracking Method for Thermoelectric Generator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 16(3), 1207–1218. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00665-0>
- Kanagaraj, N. (2021b). Photovoltaic and thermoelectric generator combined hybrid energy system with an enhanced maximum power point tracking technique for higher energy conversion efficiency. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063144>
- Mamur, H. & Çoban, Y. (2020a). Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(1), 124–139. <https://doi.org/10.3906/elk-1907-166>
- Mamur, H. & Çoban, Y. (2020b). Simulation of maximum power point tracking with buck-boost convertor for thermoelectric generators. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(5), 916–926. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.92488>
- Marroquín-Arreola, R., Lezama, J., Hernández-De León, H. R., Martínez-Romo, J. C., Hoyo-Montaño, J. A., Camas-Anzueto, J. L., Escobar-Gómez, E. N., Conde-Díaz, J. E., Ponce-Silva, M. & Santos-Ruiz, I. (2022). Design of an MPPT Technique for the Indirect Measurement of the Open-Circuit Voltage Applied to Thermoelectric Generators. *Energies*, 15(10), 3833. <https://doi.org/10.3390/en15103833>
- Miao, J., Chen, H., Lei, Y., Lv, Y., Liu, W. & Song, Z. (2021). Mppt circuit using time exponential rate perturbation and observation for enhanced tracking efficiency for a wide resistance range of thermoelectric generator. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/app11104650>
- Montecucco, A. & Knox, A. R. (2015). Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 828–839. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2313294>
- O'Brien, R. C., Ambrosi, R. M., Bannister, N. P., Howe, S. D. & Atkinson, H. V. (2008). Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. *Journal of Nuclear Materials*, 377(3), 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.04.009>
- Omer, G., Yavuz, A. H. & Ahiska, R. (2017). Heat pipes thermoelectric solar collectors for energy applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8310–

8313. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.132>
- Omer, G., Yavuz, A. H., Ahiska, R. & Calisal, K. E. (2020). Smart thermoelectric waste heat generator: Design, simulation and cost analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37(December 2019), 100623. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100623>
- Ozdemir, Z. O. (2019). *Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretimi yöntemleri*. July.
- Pamod, J., Pumrin, S. & Supmonchai, B. (2019). An input capacitor-less boost converter with variation-tolerant MPPT circuit for thermal energy harvesting. *ECTI-CON 2018 - 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 632–635. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2018.8619936>
- Rezk, H., Alhato, M. M., Al-dhaifallah, M. & Bouallègue, S. (2021). A sine cosine algorithm-based fractional MPPT for thermoelectric generation system. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111650>
- Rodriguez, R., Guo, J., Preindl, M., Cotton, J. S. & Emadi, A. (2019). High frequency injection maximum power point tracking for thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 198(March), 111832. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111832>
- Shang, Z., Zhao, Y. & Gou, W. (2020). *Converter for Thermoelectric Energy Harvester in IoT Applications*. 67(9), 1654–1658.
- Snyder, G. J. (2008). Small thermoelectric generators. *Electrochemical Society Interface*, 17(3), 54–56. <https://doi.org/10.1149/2.f06083if>
- Sornek, K., Filipowicz, M., Żoładek, M., Kot, R. & Mikrut, M. (2019). Comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with wood-fired stove. *Energy*, 166, 1303–1313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.140>
- Thankakan, R. & Samuel Nadar, E. R. (2021). ANFIS-Based MPPT Controller of the Thermoelectric Energy Harvesting System for DC Micro-grid Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1137–1154. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04942-4>
- Twaha, S., Zhu, J., Maraaba, L., Huang, K., Li, B. & Yan, Y. (2017). Maximum power Point Tracking control of a thermoelectric generation system using the extremum seeking control method. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10122016>
- Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B. & Huang, K. (2017). Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*, 37, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.003>
- Vega, J. & Lezama, J. (2021). Design and Implementation of a Thermoelectric Energy Harvester with MPPT Algorithms and Supercapacitor. *IEEE Latin America Transactions*, 19(1), 163–170. <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9423860>
- Wu, S. jun, Wang, S., Yang, C. jun & Xie, K. ren. (2018). Energy management for

- thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking. *Energy Conversion and Management*, 177(September), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.040>
- Yahya, K. & Alomari, O. (2021). A new maximum power point tracking algorithm based on power differentials method for thermoelectric generators. *International Journal of Energy Research*, 45(5), 7476–7486. <https://doi.org/10.1002/er.6329>
- Yavuz, A. H. (2019). Design of energy recovery systems: Thermoelectric combi boiler generator and power analysis. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(4), 2938–2946. <https://doi.org/10.3906/elk-1801-202>
- Yavuz, A. H. (2020). Solar thermoelectric generator assisted irrigation water pump: Design, simulation and economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 41(June), 100786. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100786>
- Zhang, Y. (2018). Thermoelectric Advances to Capture Waste Heat in Automobiles. In *ACS Energy Letters* (Vol. 3, Issue 7, pp. 1523–1524). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.8b00749>

ÖZGEÇMİŞ

Özgeçmiş bilgileri, Tezin basılı kitabının son sayfasında yer almaktadır.

