

Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Uygulamalar

Editor
GÖKHAN ÖZTÜRK
MUHAMMED REŞİT ÇORAPSIZ

BİDGE Yayınları

Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar Ve
Uygulamalar

Editör: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK & Dr. Öğr. Üyesi Muhammed
Reşit ÇORAPSIZ

ISBN: 978-625-372-333-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için
yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni
olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İçindekiler

Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Güneş Enerjisi: PV Panel, DC-DC Yükselten Dönüştürücü ve MPPT Algoritmaları	4
Mehmet YILMAZ	4
M. Fatih ÇORAPSIZ	4
PV Panel: Modelleri, Kısmi Gölgeleme Etkisi ve Bağlantı Şekilleri	32
Mehmet YILMAZ	32
M. Fatih ÇORAPSIZ	32
Lityum-İyon Pil Hücrelerinde Pil Sağlığı Tahmin Yöntemleri	58
Muhammed Reşit ÇORAPSIZ	58
Yüksek Seviyeli Sentezleme ile FPGA’de Dijital Devre Tasarımı	87
Bahadır ÖZKILBAÇ	87
Tevhit KARACALI	87
Dijital Sistemlerde Kullanılan Sayı Gösterimleri	114
Bahadır ÖZKILBAÇ	114
Tevhit KARACALI	114
Metamalzemelerde Emici Uygulamaları	138
Merve Kurt	138
Gökhan ÖZTÜRK	138

BÖLÜM I

Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Güneş Enerjisi: PV Panel, DC-DC Yükselten Dönüştürücü ve MPPT Algoritmaları

Mehmet YILMAZ¹
M. Fatih ÇORAPSIZ²

1. Giriş

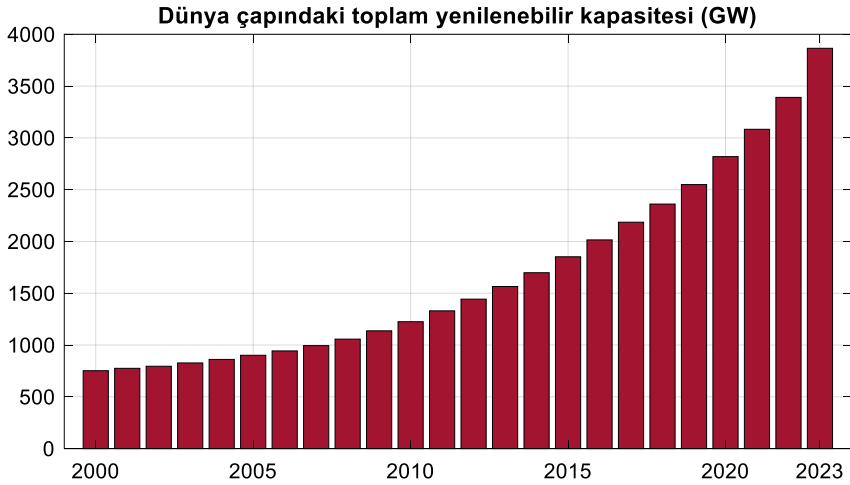
Yenilenebilir enerji, doğada kendini sürekli yineleyen ve tükenme riski taşımayan enerji türüdür (Ray, 2019). Fosil enerji yakıtlarının giderek tükenmesi, iklim değişikliklerine sebebiyet vermesi ve çevreye yaymış oldukları zararlı gazlardan dolayı enerji

¹ Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7624-4245, mehmet.yilmaz@atauni.edu.tr

² Dr Öğr. Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5692-8367, corapsiz@atauni.edu.tr

retiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır (Sayed & ark., 2023; Deshmukh & ark., 2023).

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA)'nın verilerine göre 2000 yılında 752 GW olan toplam enerji kapasitesi 2023 yılında 3865 GW ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Dünya genelinde toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin yıllara göre değişimi şekil 1'de gösterilmiştir.



şekil 1. Dünya genelinde toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin yıllara göre değişimi ((QERY, 2024))

şekil 1'den yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kapasitesinin yıllara göre önemli derecede artış gösterdiği görülmektedir. 2000 yılında dünya elektrik enerjisi kapasitesinin %21'i yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmakta iken bu oran 2023 yılında %43 seviyelerine ulaşmıştır (QERY, 2024).

Dünya genelinde toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin yıllara göre değişimi Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir. Tablo

1'den yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim kapasitesinin sürekli şekilde artış gösterdiği görülmektedir (QERY, 2024).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının giderek artması bazı avantaj ve dezavantajlara neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir (Maradin, 2021);

Tablo 1. Yenilenebilir Enerji Kapasitesi

Yıl	Kapasite (GW)	Yıl	Kapasite (GW)
2000	752	2012	1443
2001	775	2013	1565
2002	795	2014	1698
2003	827	2015	1852
2004	861	2016	2015
2005	901	2017	2186
2006	943	2018	2361
2007	994	2019	2549
2008	1057	2020	2819
2009	1137	2021	3083
2010	1225	2022	3391
2011	1330	2023	3865

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının avantajları:

- Sera gazı emisyonlarını azaltarak çevresel koruma sağlaması
- Fosil enerji yakıtlarının tüketiminin azaltılması
- Enerjide dışa bağımlılığı azaltması
- Ekonominin gelişimini olumlu etkilemesi

- İstihdamı artırması
- Kırsal kesimlerin gelişimine katkıda bulunması

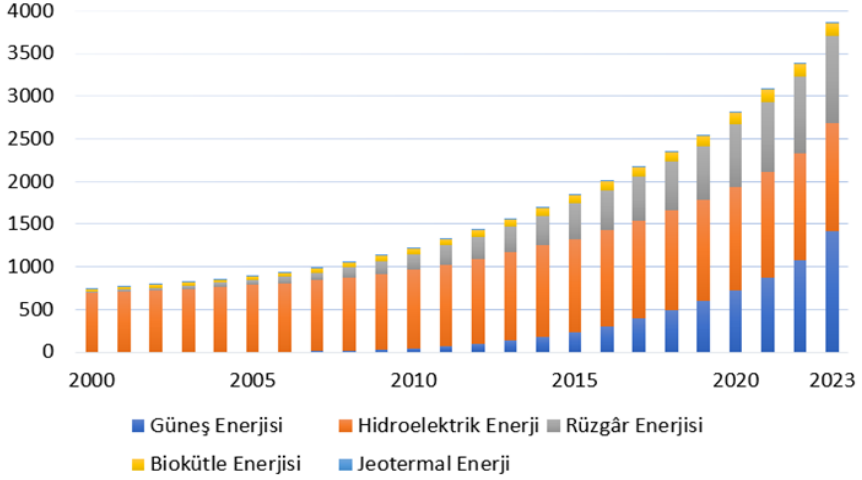
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının dezavantajları:

- Elektrik üretiminin hava koşullarına bağlı olması
- Öngörülemezlik ve süreksizlik
- Düşük güçlü elektrik enerjisi üretmesi
- Başlangıç aşamasında maliyetlerin yüksek olması
- Depolama sorunlarının mevcut olması

Başlıca kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları şunlardır (Gross, Leach & Bauen 2003; Sheikh, 2010; Rahman, Farrok & Haque, 2022);

- Güneş Enerjisi
- Hidroelektrik Enerji
- Rüzgâr Enerjisi
- Biokütle Enerjisi
- Jeotermal Enerji

Yenilenebilir enerji türlerinin kurulu kapasite (GW) değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. IRENA verilerine göre 2000 yılında kurulu gücü en yüksek yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik enerjisi iken 2023 yılı verilerine göre güneş enerjisi en yüksek kurulu güce sahiptir (QERY, 2024).



Şekil 2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçlerinin değişimi

2. Güneş Enerjisi

PN yarıiletken malzemeler ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmektedir. P tipi yarı iletken malzemede çoğunluk taşıyıcıları elektron boşlukları iken N tipi yarı iletken malzemede çoğunluk taşıyıcıları yük elektronlardır. PV hücre yapımında en sık kullanılan pil çeşitleri aşağıda sıralanmıştır (Turgut & Selçuk, 2009);

- Monokristal silisyum piller
- Polikristal silisyum pilleri
- Amorf silisyum piller
- İnce film piller
- Kristal silisyum piller

Güneş enerjisi günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Islam & ark., 2013; Shukla & ark., 2013; Prakash & Kumar, 2014; Răboacă, 2019). Bunlar;

- Seralarda sıcaklık kontrolü için güneş enerji sistemleri kullanılmaktadır.
- Tarımsal arazilerde sulamak yapmak amacıyla güneş enerjisiyle çalışan su pompaları kullanılmaktadır.
- Özellikle kırsal kesimlerde güneş enerjisi ısı enerjisine dönüştürülerek sıcak su üretiminde kullanılmaktadır.
- Elektrikle çalışan ulaşım araçlarında birincil enerji kaynağı olarak güneş enerjisi kullanılmaktadır.
- Özellikle kırsal bölgelerde güneş enerjisi ile çalışan sokak lambaları kullanılmaktadır.
- Su arıtma sistemlerinde güneş enerjisi ile çalışan sistemler kullanılmaktadır.
- PV paneller aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

PV paneller ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmenin birçok avantajı mevcuttur (Turgut & Selçuk, 2009; Lakatos & ark., 2011; Silveira & ark., 2013; Sampaio & González, 2017). Bunlar;

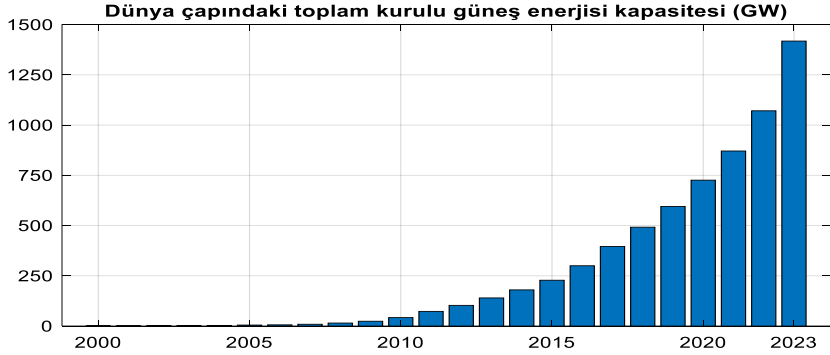
- Rüzgâr, kar, buz vb. değişken çevresel koşullara karşı oldukça dayanıklıdır.
- Arzu edilen güç seviyesi ilave PV modüller aracılığıyla kolaylıkla karşılanmaktadır.

- Hareketli parçası bulunmadığından bakım masrafları diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha düşüktür.
- Güneşten elektrik üretimi gerçekleştiği için herhangi bir yakıt masrafı bulunmamaktadır.
- Elektrik enerjisi üretimi sırasında herhangi bir gürültü meydana gelmemektedir.
- Üretim sırasında karbon salınımı olmadığından çevre kirliliğine neden olmaz.
- Teknolojik gelişmelere bağlı olarak PV sistemlerin verimliliği artırılıp maliyetleri azaltılmaktadır.
- GSM baz istasyonlarının olduğu kırsal alanlarda da PV sistemlerden üretim gerçekleştirilmektedir.

Birçok avantajının yanında PV sistemlerden elektrik enerjisi üretmenin dezavantajları da bulunmaktadır (Lakatos & ark., 2011; Silveira & ark., 2013; Sampaio & González, 2017). Bunlar;

- Başlangıç maliyetleri oldukça yüksektir.
- Elektrik üretimi güneş ışığına bağlı olduğundan dolayı gece saatlerinde üretim gerçekleşmemektedir.
- Büyük güçlü güneş enerji sistemleri için geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır
- Üretimin olmadığı durumlarda enerjinin kullanılması amacıyla depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Dünyada ki toplam kurulu güneş enerjisi kapasitesi Şekil 3’te gösterilmiştir (QERY, 2024).



Şekil 3. Dünya genelinde toplam kurulu güneş enerji kapasitesinin yıllara göre değişimi

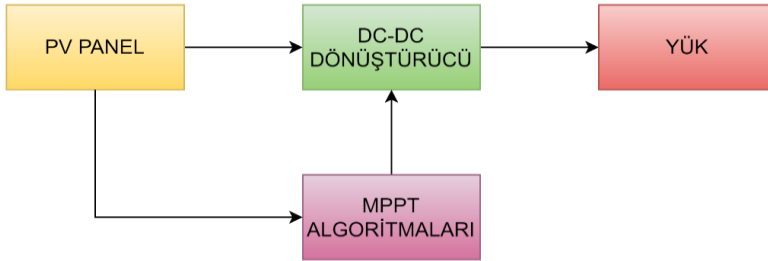
Dünyadaki toplam kurulu güneş enerji kapasitesinin yıllara göre durumu Tablo 2’de verilmiştir (QERY, 2024).

Tablo 2. Güneş Enerji Kapasitesi

Yıl	Kapasite (GW)	Yıl	Kapasite (GW)
2000	1	2012	103
2001	1	2013	140
2002	2	2014	180
2003	2	2015	228
2004	3	2016	300
2005	5	2017	396
2006	6	2018	492
2007	9	2019	595
2008	15	2020	726
2009	24	2021	871
2010	42	2022	1071
2011	73	2023	1418

Dünyada güneş enerjisi kurulu gücü en yüksek olan ülke 609.92 GW ile Çin olurken 139.21 GW ile ABD ikinci sırada, 89 GW ile Japonya üçüncü sırada yer almaktadır. 11.29 GW ile Türkiye ise dünya genelinde on birinci sırada bulunmaktadır (QERY, 2024).

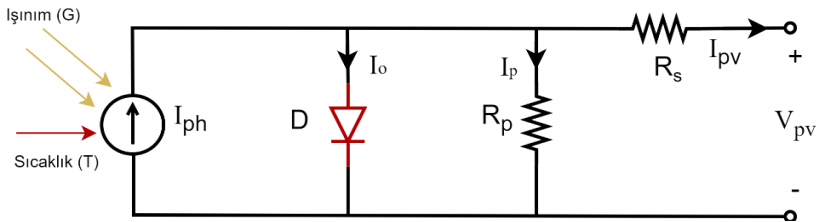
Şebekeden bağımsız olarak çalışan PV sistemlerin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Şebekeden bağımsız çalışan PV sistem blok diyagramı

2.1. PV Panel

PV paneller PN yarıiletken malzemeler olan PV hücrelerden meydana gelmektedir. PV hücrelerin elektriksel davranışlarını gözlemlemek amacıyla en çok tek diyotlu PV hücre modeli kullanılmaktadır. Şekil 5'te tek diyotlu PV hücre modeli sunulmuştur (Yılmaz & Çorapsız, 2024).



Şekil 5. Tek diyotlu PV hücre modeli

Tek diyotlu PV hücre modeli bir adet paralel direnç, bir adet seri direnç, bir adet diyot ve bir adet akım kaynağından oluşmaktadır. Şekil 5’te G ışınım değerini, T ise sıcaklık değerini temsil etmektedir. PV sistemlerden üretilen akım değeri ışınım, gerilim değeri ise sıcaklıkla doğrudan değişmektedir. Eşitlik 1’te PV hücreden üretilen akım (I_{pv}) değeri verilmiştir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o - I_p \quad (1)$$

Eşitlik 1’de I_{ph} ışınım ve sıcaklığa bağlı olarak üretilen akım değerini, I_o ise diyot akımını temsil etmektedir. Sıcaklık ve ışınım bağlı olarak üretilen I_{ph} akımı matematiksel olarak Eşitlik 2’de verilmiştir (Seyedmahmoudian & ark, 2013).

$$I_{ph}(G) = [I_{sc} + K_i T_{dif}] \frac{G}{G_r} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de K_i sıcaklık katsayısını, I_{sc} kısa devre akımını, G ışınım değerini, G_r referans ışınım değerini, T_{dif} ise çalışma sıcaklık değeri ile referans çalışma sıcaklık değerinin farkını ifade etmektedir. Kısa devre akımı ile ters saturasyon akımı arasındaki ilişki Eşitlik 3’te verilmiştir (Seyedmahmoudian & ark, 2013).

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qE_{oc}}{AK_b T_K} - 1\right)} \quad (3)$$

Eşitlik 3’te K_b Boltzman sabitini, q elektron yükünü ve A ise diyot idealite faktörünü temsil etmektedir. Eşitlik 4’te diyot akımı verilmiştir (Seyedmahmoudian & ark, 2013).

$$I_o = I_{o1} \left[\exp\left(\frac{qV_{pv} + I_{pv}R_s}{AK_b T_K}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

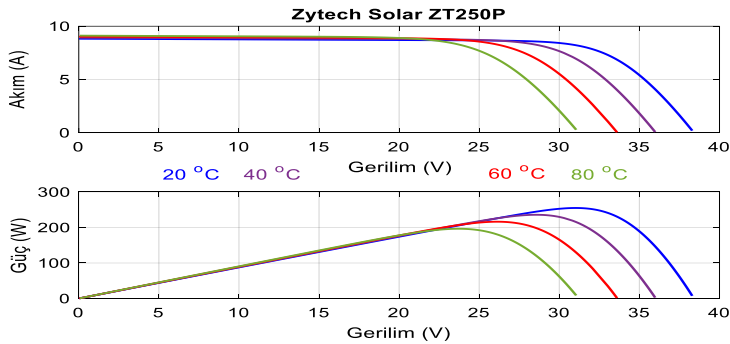
Eşitlik 4'te I_{o1} diyot saturasyon akımını ifade etmekte olup Eşitlik 5'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Seyedmahmoudian & ark, 2013).

$$I_{o1} = I_{rs} \left(\frac{T_K}{T_R} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_{go}}{AK_b} \left(\frac{T_{dif}}{T_K T_R} \right) \right) \quad (5)$$

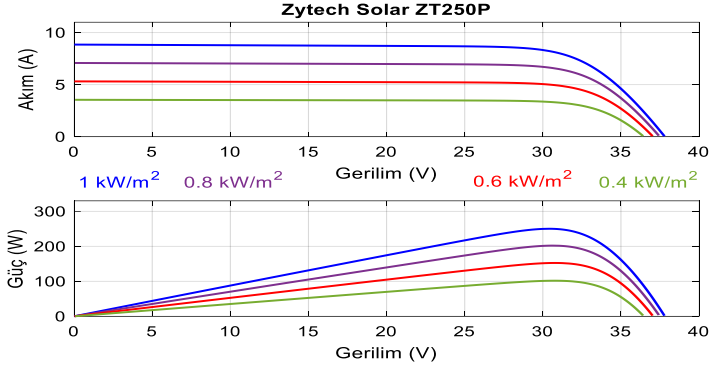
Eşitlik 5'te E_{go} yarıiletken malzemenin bant aralığı enerjisini ifade etmektedir. Paralel koldaki I_p akımı Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (6)$$

PV panellerden üretilen akım ve gerilim değerleri sıcaklık ve ışınım ile doğrudan etkilidir. Şekil 6'da ışınım değeri sabit sıcaklık değerinin değişmesi durumunda PV panel Akım-Gerilim (I-V) ve Güç-Gerilim (P-V) karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 7'de ise ışınım değerinin değişken sıcaklık değerinin sabit olması durumunda PV panel I-V ve P-V karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 6. Sabit ışınım ve değişken sıcaklık değerleri için PV panelin I-V, P-V karakteristikleri



Şekil 7. Sabit sıcaklık ve değişken ışıınım değerleri için PV panelin I-V, P-V karakteristikleri

Sıcaklık değerinin sabit ışıınım değerinin artması durumunda gerilim değerinin yaklaşık olarak sabit kaldığı akım değerinin ise arttığı Şekil 7’den görülebilmektedir. Güç değeri akım ve gerilim değerlerine bağlı olduğundan ışıınım değerindeki artış panelden üretilen güç değerini arttırmaktadır.

Sabit sıcaklık durumu için sıcaklık değeri 25°C olarak belirlenmiş ışıınım değerleri ise sırasıyla 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 ve 400 W/m^2 seçilerek I-V ve P-V karakteristikleri elde edilmiştir.

I-V ve P-V karakteristiği elde etmek için kullanılan PV panelin özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. PV panel elektriksel özellikleri

Zytech Solar ZT250P	Değer	Birim
Maksimum güç	250.192	W
Hücre sayısı	60	
Açık devre gerilimi	37.81	V
Kısa devre akımı	8.85	A
Maksimum güç noktasında gerilim	30.4	V
Maksimum güç noktasında akım	8.23	A
Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı	-0.3149	
Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı	0.054305	
Diyot idealite faktörü	0.95176	
Paralel direnç	160.3009	Ω
Seri direnç	0.36633	Ω

2.2. DC-DC Dönüştürücü

DC-DC dönüştürücüler bir gerilim seviyesini uygun kontrol yöntemleriyle başka bir gerilim seviyesine dönüştüren elektronik donanımlardır. DC-DC dönüştürücüler özellikle güç kayıplarını azaltarak enerji aktarımını daha verimli bir şekilde gerçekleştirmektedirler. Günümüzde DC-DC dönüştürücüler birçok alanda kullanılmaktadır (Hossain & Rahim, 2018). Bunlar;

- PV sistemlerde
- Elektrikli araçlar (EV), hibrit elektrikli araçlar (HEV), yakıt hücresi araçlarda (FCV)
- Yüksek gerilimli (HVDC) ve orta gerilimli (MVDC) güç sistemlerinde
- Güç kaynaklarında
- Taşınabilir cihazlarda

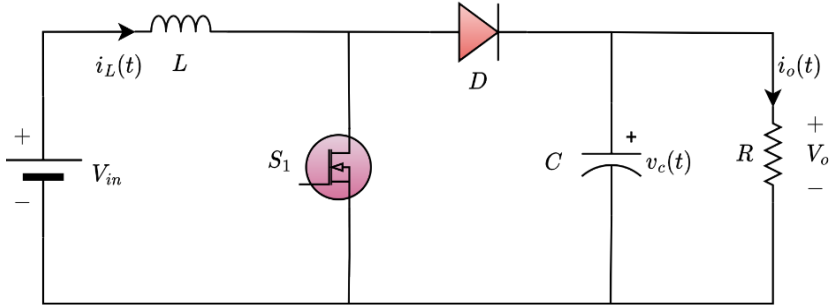
- Araç ses sistemlerinde
- Cep telefonu şarj cihazlarında

PV sistemlerde en sık kullanılan DC-DC dönüştürücü topoloji çeşitleri aşağıda belirtilmiştir (Sutikno & ark., 2022).

- Alçaltan tip (Buck) dönüştürücü
- Yükselten tip (Boost) dönüştürücü
- Alçaltan (Buck) – Yükselten (Boost) dönüştürücü
- Cuk dönüştürücü
- SEPIC dönüştürücü
- Zeta dönüştürücü

2.2.1. Yükselten Tip Dönüştürücü Topolojisi

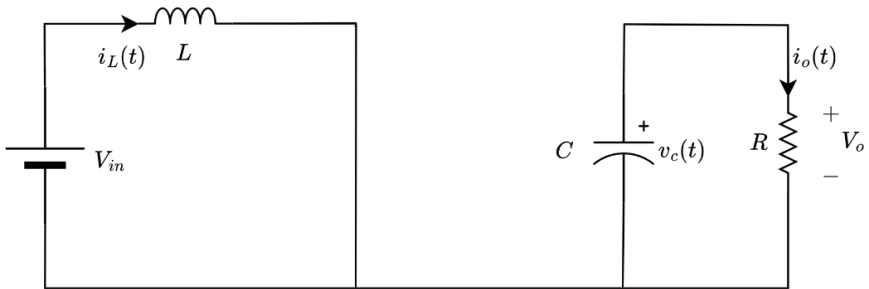
Yükselten tip dönüştürücü, giriş gerilim değerini çıkışa daha yüksek seviyelerde aktaran DC-DC dönüştürücü topolojileridir (Srinivasan & ark., 2021). Temel olarak yükselten tip dönüştürücü topolojileri bir adet giriş kaynağı (V_{in}), bir adet anahtarlama elemanı (S_1), bir adet bobin (L), bir adet diyot (D) ve bir adet çıkış kapasitesinden (C) oluşmaktadır (Yılmaz & Çorapsız, 2022). Şekil 8’de temel yükselten tip dönüştürücü topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 8. Yükselten tip dönüştürücü devre topolojisi

Yükselten tip dönüştürücüler için çalışma prensibi yarıiletken anahtarlama elemanının iletim ve kesim durumlarına göre belirlenmektedir. Bobinin enerjiyi depolayıp yüke aktarması sayesinde çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. PV sistemlerde yükün arzu ettiği gerilim seviyelerini sağlayabilmek amacıyla yükselten tip dönüştürücü topolojileri kullanılmaktadır. Anahtarlama elemanın görev süresi maksimum güç noktası takip (MPPT) algoritmaları ile kontrol edilerek yüke mümkün olabilen en yüksek güç sağlanmaktadır.

Anahtarlama elemanının iletim durumuna ait eş değer devre modeli Şekil 9’da verilmiştir (Yılmaz & Çorapsız, 2022).



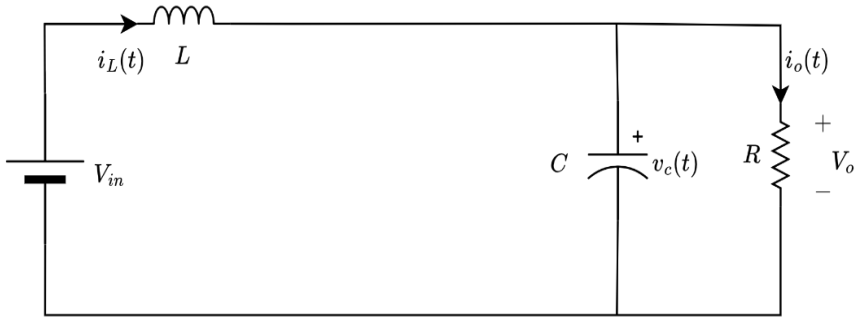
Şekil 9. Anahtarlama elemanı iletim durumu devre topolojisi

Şekil 9’da görüldüğü gibi anahtarlama elemanı kısa devre özelliği, diyot ise açık devre özelliği göstermektedir. Bu durumda giriş gerilimi tarafından bobin enerji depolamaktadır. Aynı zamanda diyot kesimde olduğu için yük çıkış kapasitesi tarafından beslenmektedir. Anahtarlama elemanının iletim durumuna ait durum değişkenleri Eşitlik 7 ve Eşitlik 8’de verilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (7)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{-V_0}{R} \right) \quad (8)$$

Anahtarlama elemanının kesim durumuna ait eş değer devre modeli Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Anahtarlama elemanı kesim durumu devre topolojisi

Bu durum için anahtarlama elemanı açık devre özelliği, diyot ise kısa devre özelliği göstermektedir. Bobin üzerinde depoladığı enerjiyi yüke aktarmaktadır. Yüksek anahtarlama frekansında bu durum tekrarlanarak sürekli bir çıkış gerilimi sağlanmaktadır. Anahtarlama elemanının kesim durumuna ait durum değişkenleri Eşitlik 9 ve Eşitlik 10’da verilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - V_0) \quad (9)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_0}{R} \right) \quad (10)$$

2. 3. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmaları

MPPT algoritmaları özellikle güneş enerjisi ya da rüzgâr enerjisi gibi değişken çevresel koşulların olduğu tesislerde enerji üretimini optimize etmek amacıyla kullanılan algoritmalarlardır. MPPT algoritmalarının temel amaçları sistemin farklı tüm koşullarında maksimum gücün elde edilmesini sağlayacak çalışma noktasını belirlemektir. PV sistemlerde çıkış akım ve gerilim değeri sıcaklık ve ışıyım ile doğrudan etkilendiği için sistemin veriminin arttırılması amacıyla MPPT algoritmalarının kullanımı oldukça önemlidir. MPPT algoritmalarının başlıca kullanım alanları aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Güneş enerji sistemlerinde
- Rüzgâr enerji sistemlerinde
- Şarj cihazlarında

MPPT algoritmalarının en önemli avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Değişken çevresel koşullarda (kısmi gölgelenme vb.) çalışma noktasını sürekli izleyip güncelleyerek PV panellerdeki enerji verimliliğini artırmaktadır.
- PV panelleri maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırarak mevcut güneş enerjisini çok daha yüksek

oranda elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamaktadır.

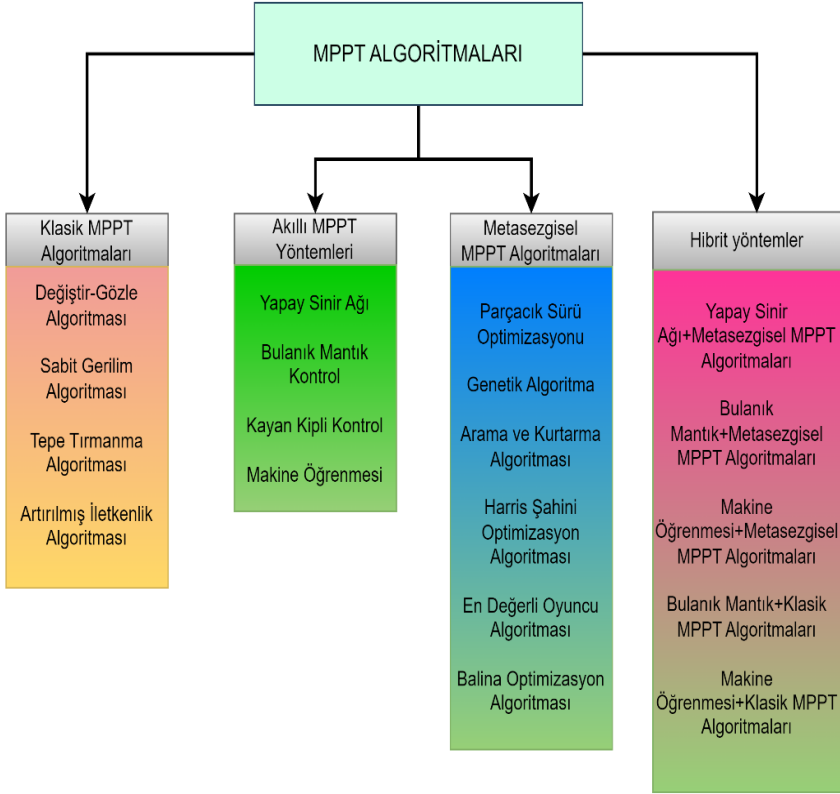
- Şebekeden bağımsız PV sistemler ya da akü depolamalı hibrit sistemler için daha yüksek verim değerlerinde akülerin şarj edilmesini sağlamaktadır.
- Enerji verimliliğinden dolayı başlangıç maliyetlerinin daha hızlı şekilde amorti edilmesine katkıda bulunmaktadır.

MPPT algoritmalarının en önemli dezavantajı ise sistemin karmaşıklığını artırması, başarılı sonuçlarının elde edilebilmesi için elektronik bileşenler ilave edilmesi ve yazılım gerektirmesidir.

MPPT algoritmalarını izleme yöntemlerine göre sınıflandırılması maddeler halinde verilmiştir (Katche & ark., 2023; Bollipo, Mikkili & Bonthagorla 2020). Bunlar;

- Klasik MPPT algoritmaları
- Akıllı MPPT yöntemleri
- Metasezgisel MPPT algoritmaları
- Hibrit yöntemler

MPPT algoritmaları Şekil 11’de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 11. MPPT algoritmalarının sınıflandırılması (Yılmaz, 2024)

Klasik MPPT algoritmaları karmaşıklığının az olması nedeniyle kolaylıkla PV sistemler için uygulanmaktadır. Eşit ışınım koşulları için maksimum güç noktasının takibinde oldukça verimli algoritmalarlardır. Bu algoritmaların en önemli dezavantajlarından biri kısmi gölgeleme koşullarında yerel maksimum noktaları takip ederek küresel maksimum güç noktasına ulaşamamalarıdır. Diğer dezavantajları ise kararlı durumda maksimum güç noktası etrafında salınımlara sahip olmalarıdır (Bollipo, Mikkili & Bonthagorla 2020). En sık kullanılan klasik optimizasyon algoritmaları değiştir-

gözle algoritması, sabit gerilim algoritması, artırılmış iletkenlik algoritması, tepe tırmanma algoritması, kısa devre akım ve açık devre gerilim yöntemleridir.

Klasik MPPT algoritmalarının zayıf yönlerini gidermek amacıyla metasezgisel optimizasyon algoritmaları MPPT için tercih edilmeye başlanmıştır. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları karmaşık problemlerin çözümlerinde kullanılan yöntemlerdir. Bu algoritmalar değişken çevresel koşullarda bile yüksek verimle çalışabilmektedir. Bunun temel nedeni problem uzayını geniş çapta tarayarak yerel güç noktalarını atlayıp küresel güç noktasına ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Metasezgisel optimizasyon algoritmalarının en önemli dezavantajlarından biri hesaplama yükleri klasik optimizasyon algoritmalarına göre daha yüksektir. Algoritmaların performansı parametre değerlerine bağlıdır. Parametre değerlerinin uygun olmaması durumunda takip süresi uzamakta ve verim değerleri ise düşmektedir. En sık kullanılan metasezgisel optimizasyon algoritmaları parçacık sürü optimizasyonu (Renaudineau & ark., 2014), genetik algoritma (Hadji, Gaubert & Krim 2018), karınca koloni optimizasyon algoritması (Titri & ark., 2017), arama-kurtarma algoritması (Zafar & ark., 2021), haris şahini optimizasyon algoritması (Mansoor, Mirza & Ling, 2020), en değerli oyuncu algoritması (Pervez & ark., 2021) ve balina optimizasyon algoritmasıdır (Kumar & Rao, 2016).

Akıllı MPPT yöntemleri değişken hava koşullarında yüksek verimli tekniklerdir. Ayrıca akıllı MPPT yöntemleri küresel maksimum güç noktasını bulmada oldukça başarılıdır. Bu yöntemlerin MPPT verimlilikleri yüksek ve takip etme süreleri oldukça hızlıdır. Bu yöntemlerin en önemli dezavantajları ise büyük

veri setleriyle çalışma sorunudur. En sık kullanılan başlıca akıllı MPPT yöntemleri bulanık mantık kontrol, yapay sinir ağı, kayan kipli kontrol ve makine öğrenimi tabanlı MPPT algoritmalarıdır (Bollipo, Mikkili & Bonthagorla 2020).

Hibrit yöntemler klasik algoritmalar, metasezgisel optimizasyon algoritmalar ya da akıllı MPPT yöntemlerinin birleşiminden oluşan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde ilk aşamada genellikle MPP tahmini gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada ise tahmin edilen bu MPP gelişmiş metodolojiler ile gerçek MPP ya da gerçek MPP'ye en yakın noktada PV sistemin çalışması sağlanmaktadır. Literatürde PV sistemlerde MPPT için birçok hibrit çalışma önerilmiştir. Yapay sinir ağı ve değiştir-gözle algoritmasının birleşiminden hibrit bir yöntem önerilmiştir (Çelik & Teke, 2017). Bu hibrit yöntemin en önemli avantajları yakınsama süresinin hızlı olması, verim değerinin yüksek olmasıdır. Hibrit yöntemin en önemli dezavantajı ise sistem çalıştırılmadan önce eğitim işleminin gerçekleştirilme aşamasıdır. Başka bir çalışmada yapay arı kolonisi ve değiştir-gözle algoritması birleştirilerek yeni hibrit yöntem önerilmiştir (Pilakkat & Kanthalakshmi, 2019). Önerilen yöntemde yapay arı kolonisi ile küresel güç noktası belirlenirken değiştir-gözle algoritması ile MPPT daha doğru şekilde gerçekleştirilmiştir. Önerilen hibrit yöntemin en önemli avantajı kararlı durumdaki salınımları ortadan kaldırmasıdır. Dezavantajı ise uygulamasının karmaşık bir yapıya sahip olmasıdır. Bulanık mantık ve değiştir-gözle algoritmalarının birleşiminden oluşan yeni bir hibrit yöntem PV sistemler için önerilmiştir (Haji & Genc, 2018). Bu yöntemde bulanık mantık kontrolcü sistemi maksimum güç noktası etrafında tutarken değiştir-gözle algoritması ile görev süresi belirlenmektedir.

Yöntemin en önemli avantajları değişken çevresel koşullara uyum sağlaması ve doğruluk oranını yüksek olmasıdır. En önemli dezavantajı ise uygulamasının karmaşık olması ve ön bilgi gerektirmesidir. Kısmi gölgelenme koşullarında yapay sinir ağı ve parçacık sürü optimizasyonunun beraber kullanıldığı farklı bir MPPT yöntemi önerilmiştir (Hamdi, Regaya & Zaafouri 2019). Önerilen bu yöntemin en önemli avantajı yüksek verim ile MPPT gerçekleştirmesidir. En önemli dezavantajları ise uygulama zorluğu ve PV sistemin çalışmadan önce eğitim işleminin olmasıdır. Yılmaz ve arkadaşları hem eşit ışınlam hem de kısmi gölgelenme koşullarında yüksek verim ile MPPT gerçekleştirebilen yeni bir hibrit yöntem önermiştir (Yılmaz, Kaleli & Çorapsız, 2023). Önerilen hibrit yöntem parametreleri optimize edilmiş Gauss süreç regresyonu ve süper bükümlü kayan kipli kontrolcüden oluşmaktadır. Önerilen hibrit yöntemin en önemli avantajı gerçek zamanlı veriler ve farklı kısmi gölgelenme koşullarında performansının yüksek olmasıdır. En önemli dezavantajı ise PV sistem kullanılmadan önce eğitim işleminin önceden yapılması gerekmektedir

Literatürde var olan tüm bu MPPT algoritmalarının temel amacı PV sistemden farklı tüm koşullar için maksimum elde edilecek güç değerinin en yüksek seviyelere ulaşmasını sağlamaktır. Bu sayede daha yüksek verim ile MPPT gerçekleştirilip kayıplar azaltılmaktadır.

3. Sonuç

Yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı gün geçtikçe artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinden güneş enerjisi diğer enerji türlerine göre 2023 yılı sonu itibariyle en yüksek kurulu güce sahiptir. Güneş enerji sistemleri temel olarak PV

paneller, DC-DC dönüştürücü ve MPPT algoritmalarından oluşmaktadır. PV paneller ile üretilen gerilim değeri yüke DC-DC dönüştürücüler ile daha yüksek/düşük seviyede aktarılmaktadır. DC-DC dönüştürücülerin görev süreleri MPPT algoritmaları ile kontrol edilerek tüm farklı çevresel koşullar için PV panellerden maksimum güç elde edilmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-33.

Çelik, Ö., & Teke, A. (2017). A Hybrid MPPT method for grid connected photovoltaic systems under rapidly changing atmospheric conditions. *Electric Power Systems Research*, 152, 194-210.

Deshmukh, M. K. G., Sameeroddin, M., Abdul, D., & Sattar, M. A. (2023). Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1756-1759.

Gross, R., Leach, M., & Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. *Environment international*, 29(1), 105-122.

Hadji, S., Gaubert, J. P., & Krim, F. (2018). Real-time genetic algorithms-based MPPT: study and comparison (theoretical an experimental) with conventional methods. *Energies*, 11(2), 459.

Haji, D., & Genc, N. (2018). Fuzzy and P&O based MPPT controllers under different conditions. *In 2018 7th international conference on renewable energy research and applications (ICRERA)* (pp. 649-655). IEEE.

Hamdi, H., Regaya, C. B., & Zaafour, A. (2019). Real-time study of a photovoltaic system with boost converter using the PSO-RBF neural network algorithms in a MyRio controller. *Solar energy*, 183, 1-16.

Hossain, M. Z., & Rahim, N. A. (2018). Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design

and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 205-230.

Islam, M. R., Sumathy, K. K. S. U., & Khan, S. U. (2013). Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 1-25.

Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., & Adaramola, M. S. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (mppt) techniques used in solar pv systems. *Energies*, 16(5), 2206.

Kumar, C. H., & Rao, R. S. (2016). A novel global MPP tracking of photovoltaic system based on whale optimization algorithm. *International Journal of Renewable Energy Development*, 5(3).

Lakatos, L., Hevessy, G., & Kovács, J. J. W. F. (2011). Advantages and disadvantages of solar energy and wind-power utilization. *World Futures*, 67(6), 395-408.

Mansoor, M., Mirza, A. F., & Ling, Q. (2020). Harris hawk optimization-based MPPT control for PV systems under partial shading conditions. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122857.

Pervez, I., Shams, I., Mekhilef, S., Sarwar, A., Tariq, M., & Alamri, B. (2021). Most valuable player algorithm based maximum power point tracking for a partially shaded PV generation system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(4), 1876-1890.

Pilakkat, D., & Kanthalakshmi, S. (2019). An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy*, 178, 37-47.

Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905-910.

Răboacă, M. S., Badea, G., Enache, A., Filote, C., Răsoi, G., Rata, M., ... & Felseghi, R. A. (2019). Concentrating solar power technologies. *Energies*, 12(6), 1048.

Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112279.

Ray, P. (2019). Renewable energy and sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1517-1533.

Renaudineau, H., Donatantonio, F., Fontchastagner, J., Petrone, G., Spagnuolo, G., Martin, J. P., & Pierfederici, S. (2014). A PSO-based global MPPT technique for distributed PV power generation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 1047-1058.

Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and sustainable energy reviews*, 74, 590-601.

Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3), 1415.

Syedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Rahmani, R., Yusof, R., & Renani, E. T. (2013). Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. *Energies*, 6(1), 128-144.

Sheikh, M. A. (2010). Energy and renewable energy scenario of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 354-363.

Shukla, R., Sumathy, K., Erickson, P., & Gong, J. (2013). Recent advances in the solar water heating systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 173-190.

Silveira, J. L., Tuna, C. E., & de Queiroz Lamas, W. (2013). The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 133-141.

Srinivasan, S., Tiwari, R., Krishnamoorthy, M., Lalitha, M. P., & Raj, K. K. (2021). Neural network based MPPT control with reconfigured quadratic boost converter for fuel cell application. *International journal of hydrogen energy*, 46(9), 6709-6719.

Sutikno, T., Purnama, H. S., Aprilianto, R. A., Jusoh, A., Widodo, N. S., & Santosa, B. (2022). Modernisation of DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: A review. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci*, 28(3), 1845.

Titri, S., Larbes, C., Toumi, K. Y., & Benatchba, K. (2017). A new MPPT controller based on the Ant colony optimization algorithm for Photovoltaic systems under partial shading conditions. *Applied Soft Computing*, 58, 465-479.

Turgut, E., & Selçuk, K. (2009). Elektrik enerjisi üretimi iletimi ve dağıtımı. Detay Yayıncılık.

Yılmaz, M., & Corapsiz, M. (2022). Artificial Neural Network based MPPT Algorithm with Boost Converter topology for Stand-Alone PV System. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 15(1), 242-257.

Yılmaz, M., Kaleli, A., & Çorapsız, M. F. (2023). Machine learning based dynamic super twisting sliding mode controller for increase speed and accuracy of MPPT using real-time data under PSCs. *Renewable Energy*, 219, 119470.

Yılmaz, M., & Corapsiz, M. (2024). PSO Training Neural Network MPPT with CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 13(1), 88-97.

Yılmaz, M. (2024). Development and real-time implementation of a new hybrid MPPT method for solar energy systems (Doctoral dissertation, Ataturk University).

Zafar, M. H., Khan, N. M., Mirza, A. F., Mansoor, M., Akhtar, N., Qadir, M. U., ... & Moosavi, S. K. R. (2021). A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101367.

QERY (2024). (15/11/2024 tarihinde <https://qery.no/renewable-energy-capacity-tracker/> adresinden ulaşılmıştır).

BÖLÜM II

PV Panel: Modelleri, Kısmi Gölgeleme Etkisi ve Bağlantı Şekilleri

Mehmet YILMAZ¹
M. Fatih ÇORAPSIZ²

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi sessiz çalışması, bakım masraflarının az olması ve çevre dostu enerji kaynağı olması gibi avantajlarından dolayı kurulu gücü sürekli olarak artış göstermektedir. Güneş enerji sistemlerinde fotovoltaik (PV) paneller ile enerji dönüşümü sağlanmaktadır. Bu yüzden enerji

¹ Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7624-4245, mehmet.yilmaz@atauni.edu.tr

² Dr Öğr. Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5692-8367, corapsiz@atauni.edu.tr

verimliliğinin artırılması açısından PV panellerin doğru bir şekilde modellenmesi oldukça önemlidir.

PV hücre teknolojileri yarı iletken malzemelerden üretilen, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılan materyallerdir. Literatürde PV hücre teknolojileri performansları, üretim süreçleri ve kullanılan malzemelere göre dört temel kategoride incelenmektedir (Fazal & Rubaiee, 2023). Bunlar;

- Birinci nesil PV hücreler (Kristal silisyum)
 1. Tek Kristalli PV hücreler
 2. Çok Kristalli PV hücreler
- İkinci nesil PV hücreler (İnce film)
 1. Amorf Silisyum PV hücre
 2. Galyum Arsenit PV hücre
 3. Kadmiyum Tellür PV hücre
 4. Bakır İndiyum Galyum Selenid PV hücre
- Üçüncü nesil PV hücreler (Yeni nesil)
 1. Boya duyarlı PV hücreler
 2. Organik PV hücre
 3. Perovskit PV hücre
- Dördüncü nesil PV hücreler (Çok katmanlı)
 1. Perovskit/Si katman
 2. III-V/Si katman

Kristal silisyum PV hücreler enerji dönüşümü için en sık kullanılan PV hücre teknolojilerdir (Gervais & ark., 2021). Tek kristalli PV hücreler ve çok kristalli PV hücreler olarak iki ana türü bulunmaktadır (Mesquita & ark., 2019). Kristal silisyum PV hücrelerin en önemli avantajları şunlardır;

- Hücre üretiminde kullanılan silisyumun dünya kabuğunda en çok bulunan ikinci element olması,
- Hücre üretim maliyetlerinin teknolojinin gelişmesine paralel olarak azalması,
- Kristal hücreler uzun yıllar boyunca PV hücre üretiminde kullanıldığı için olgunlaşmış bir yapıya sahip olmasıdır.

İnce film PV hücreler piyasada kullanılan PV panellerin yaklaşık %10'luk kısmını oluşturmaktadır (Fazal & Rubaiee, 2023). Kristal silisyum PV hücrelere göre az malzeme ile üretildiğinden daha az maliyetlidir (Zhang, Wang & Yang, 2018). İnce film teknolojisi ile üretilen PV hücreler 35-260 nm kalınlığa sahiptir (Vrielink & ark., 2012; Tyagi & ark., 2013). Başlıca kullanılan ince film PV hücre teknolojileri amorf silisyum PV hücre, galyum arsenit PV hücre, kadmiyum tellür PV hücre ve bakır indiyum galyum selenid PV hücredir. Bu PV hücre teknolojisinin en önemli avantajları şunlardır;

- Üretim maliyetlerinin düşük olması,
- Esnek yüzeylere kolaylıkla uygulanabilmeleri.

Yeni nesil PV hücreler henüz laboratuvar aşamasında olan hücre teknolojileridir. Yeni nesil PV hücre teknolojilerine boya duyarlı PV hücreler, organik PV hücre ve perovskit PV hücre örnek verilebilmektedir. Bu teknolojilerde düşük kararlılık ve sıvı elektrolit gibi nedenlerden dolayı ticari kullanımı oldukça sınırlıdır (Kabir & ark., 2022).

Çok katmanlı (Tandem) PV hücre teknolojisi, iki ya da daha fazla katmandan oluşturularak yüksek verim elde etmeyi amaçlayan hücre teknolojileridir. Perovskit/Si katman ve III-V/Si katman

teknolojileri bu alanda büyük potansiyele sahiptirler. Piyasada kullanılan PV hücrelerin verimleri düşük olduğunda bu alanda ki verimi yükseltecek çalışmalar güneş enerji sistemleri için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada PV panellerin elektriksel davranışını gözlemlemek amacıyla birinci kısımda literatürde en sık kullanılan PV panel model çeşitleri açıklanacaktır. İkinci kısımda panellerin performansını etkileyen kısmi gölgelenme durumundan bahsedilecektir. Son kısımda ise verimlilik ve sistem performansı açısından oldukça önemli olan PV panel konfigürasyon çeşitlerinden bahsedilecektir.

2. PV Panel Modelleme Çeşitleri

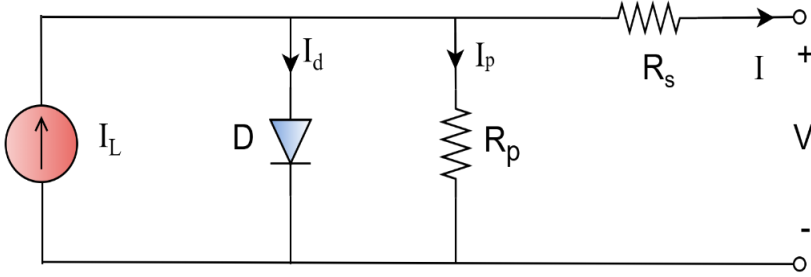
PV panel modelleme çeşitleri güneş enerjisi sistemlerinde verimlilik, performans ve tasarım kriterleri açısından oldukça önemlidir. PV panel modelleme çeşitleri ile tasarlanan sistemin farklı çevresel koşullarda performansı önceden tahmin edilebilmektedir. Literatürde en sık kullanılan PV panel modelleme çeşitleri şunlardır (Eltamaly & Farh, 2020);

- Tek diyotlu PV model
- Çift diyotlu PV model
- Çoklu diyot PV model
- Deneysel (Amprık) PV model

2.1. Tek Diyotlu PV Model

Tek diyotlu PV model, PV hücrelerin elektriksel davranışlarının tahmin edilebilmesi için en sık kullanılan modeldir.

Şekil 1’de tek diyotlu PV hücre modeline ait görsel sunulmuştur (Yılmaz & Çorapsız, 2024).



Şekil 1. Tek diyotlu PV model eşdeğer devresi

Tek diyotlu PV model, sistemin Akım-Gerilim (I-V) karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Model bir adet akım kaynağı (I_L), bir adet paralel direnç (R_p), bir adet seri direnç (R_s) ve bir adet diyot (D) ile temsil edilmektedir. Eşitlik 1’de ideal PV hücrenin çıkış akım değerinin matematiksel olarak ifadesi verilmiştir.

$$I = I_L - I_d - I_p \quad (1)$$

Eşitlik 1’de I_d diyot akımını temsil etmektedir. Shockley denklemini kullanılarak diyot akımı Eşitlik 2’de verilmiştir (Stornelli & ark., 2019).

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{V_D}{v_t}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Eşitlik 2’de diyot gerilimi V_D , terminal gerilimi v_t ve ters saturasyon akımı I_o ile temsil edilmektedir. v_t ’nin matematiksel ifadesi Eşitlik 3’te verilmiştir (Stornelli & ark., 2019).

$$v_t = \frac{kAT}{q} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te k Boltzmann sabitini ($-1.380653 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), q elektron yükünü ($-1.60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), A diyot idealite faktörünü ve T çalışma sıcaklığını temsil etmektedir.

V_D gerilim değeri ise Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$V_D = V + IR_s \quad (4)$$

Şekil 1'de paralel kolda R_p direnci üzerindeki akım (I_p) Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5)$$

Tüm eşitlikler düzenlendiğinde PV hücre çıkış akımı Eşitlik 6'da ki gibi ifade edilmektedir.

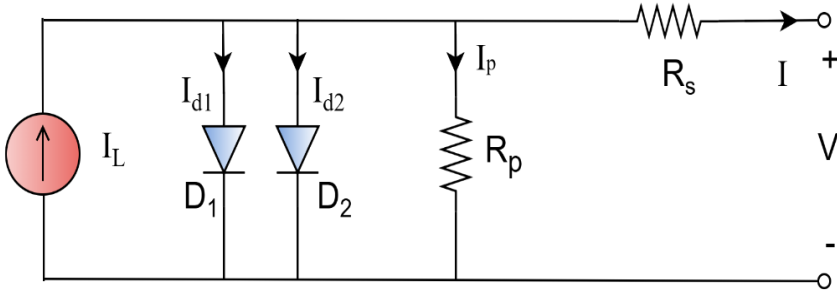
$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{v_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (6)$$

Tek diyotlu PV modelin en önemli avantajları aşağıda sıralanmıştır. Bunlar (Abdelhamid & ark., 2019, Stornelli & ark., 2019);

- Hesaplamaların basit ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi,
- PSpice ve Matlab gibi yazılımlara kolayca entegre edilebilmesidir.
- Tek diyotlu PV modelin en önemli dezavantajları ise;
- Yapısının basit olmasından kaynaklı gerçek zamanlı çevresel koşulları tam olarak yansıtmaması,
- Diyot idealite faktörünü sabit olarak değerlendirmesidir.

2.2. İki Diyotlu PV Model

İki diyotlu PV model, PV hücrelerin elektriksel davranışlarını modellemek amacıyla oluşturulmuş bir modeldir. Bu model tek diyotlu PV modele göre daha karmaşık olmasına rağmen daha doğru bir modelleme sunmaktadır. Şekil 2’de iki diyotlu PV model gösterilmiştir.



Şekil 2. İki diyotlu PV model eşdeğer devresi

İki diyotlu PV model, bir adet akım kaynağı (I_L), bir adet paralel direnç (R_p), bir adet seri direnç (R_s) ve iki adet diyot (D_1, D_2) ile temsil edilmektedir. İki diyotlu PV modelde iki adet diyot kullanılmasının nedenleri şunlardır (Eltamaly & Farh, 2020);

- Birinci diyot, difüzyon ve yüzey rekombinasyonunu temsil etmektedir.
- İkinci diyot, yüksek ışıının olduğu tükenme bölgesindeki rekombinasyonu temsil etmektedir.

Eşitlik 7’de ideal PV hücrenin çıkış akım değerinin matematiksel olarak hesaplanması verilmiştir (Yadav & ark., 2023).

$$I = I_L - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (7)$$

Diyotlara ait I_{d1} ve I_{d2} akımları Eşitlik 8 ve Eşitli 9'da verilmiştir.

$$I_{d1} = I_{o1} \left[\exp \left(\frac{V_D}{v_t} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

$$I_{d2} = I_{o2} \left[\exp \left(\frac{V_D}{v_t} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

Tüm eşitlikler düzenlendiğinde PV hücre çıkış akımı Eşitlik 10'da ki gibi ifade edilmektedir.

$$I = I_L - I_{o1} \left[\exp \left(\frac{V_D}{v_t} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[\exp \left(\frac{V_D}{v_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (10)$$

İki diyotlu PV modelin en önemli avantajları aşağıda sıralanmıştır. Bunlar;

- Düşük ışıyım ve sıcaklık değerlerinde PV hücrenin elektriksel davranışını daha hassas modellemesi,
- Tükenme bölgesi rekombinasyonu, difüzyon ve yüzey rekombinasyonunu dikkate aldığı için daha gerçekçi davranış göstermesidir.

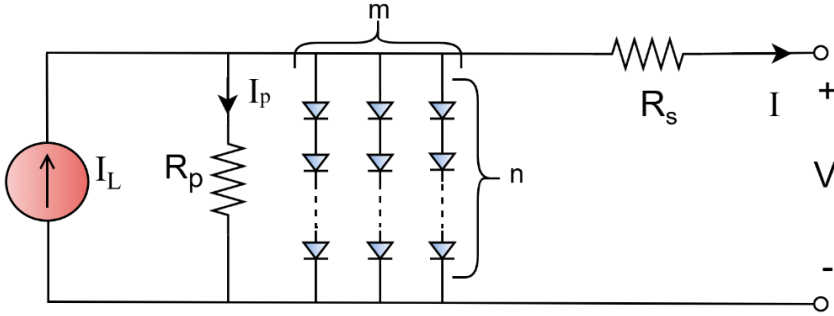
İki diyotlu PV modelin en önemli dezavantajları ise;

- İlave kullanılan diyottan dolayı karmaşıklığının daha fazla olması,
- İlave diyot kullanıldığından dolayı model parametrelerini hesaplamak için daha uzun zaman gerektirmesidir.

2.3. Çoklu Diyot PV Model

Çoklu diyot PV model, PV hücrelerin elektriksel davranışlarını daha doğru bir şekilde modellemek amacıyla birden çok diyot kullanılmasıyla oluşturulan modeldir. Modeldeki her bir diyot PV hücredeki farklı yeniden birleşme süreçlerini ifade

etmektedir. Şekil 3'te genelleştirilmiş çoklu diyot PV model gösterilmiştir.



Şekil 3. Çok diyotlu PV model eşdeğer devresi

Çoklu diyot PV model, bir adet akım kaynağı (I_L), bir adet paralel direnç (R_p), bir adet seri direnç (R_s) ve m adet paralel diyot ve n adet seri diyot ile temsil edilmektedir.

Çoklu diyot PV hücre modeli için genel olarak PV hücre çıkış akımı Eşitlik 11'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$I = I_L - \sum_{i=1}^m I_{o,i} \left[\exp\left(\frac{V_D}{v_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (11)$$

Çoklu diyot PV modelin en önemli avantajı ise;

- Yüksek doğruluk gerektiren durumlarda çoklu diyot PV model diğer modellere göre daha doğru sonuçlar vermektedir.

Çoklu diyot PV modelin en önemli dezavantajı ise;

- İlave kullanılan diyotlardan dolayı karmaşıklık ve model parametre hesaplama süresi diğer modellere göre daha uzundur.

2.4. Deneyisel (Ampirik) PV Model

Deneyisel (Ampirik) PV model, ölçümlere dayalı olarak gerçekleştirilen modelleme yöntemidir. Bu modelde I-V karakteristikleri geçmiş veriler kullanılarak oluşturulmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan deneyisel PV model King/Sandia modelidir (Kratochvil, Boyson & King, 2004). Bu modelde belirli PV paneller için geniş bir aralıktaki sıcaklık ve ışıınım değişimleri gözlemlenerek çok sayıda deneyisel katsayı belirlenmiştir. Bu sayede PV panellerin davranışları oldukça yüksek başarı oranı ile tahmin edilmektedir. Ampirik katsayılar elde edilirken Eşitlik 12’de verilen matematiksel ifade kullanılmıştır.

$$P = f(G_{ışıınım}, T_{sıcaklık}) \quad (12)$$

Deneyisel (Ampirik) PV modelin en önemli avantajı geniş sıcaklık ve ışıınım değişikliklerine karşı yüksek hassasiyette I-V karakteristiklerinin elde edilmesidir. Deneyisel (Ampirik) PV modelin en önemli dezavantajı ise gözleme dayalı tahminler gerçekleştirildiği için laboratuvar koşullarına uygun olmasına rağmen saha koşullarında uygulanması sınırlıdır.

3. Kısmi Gölgeleme Etkisi

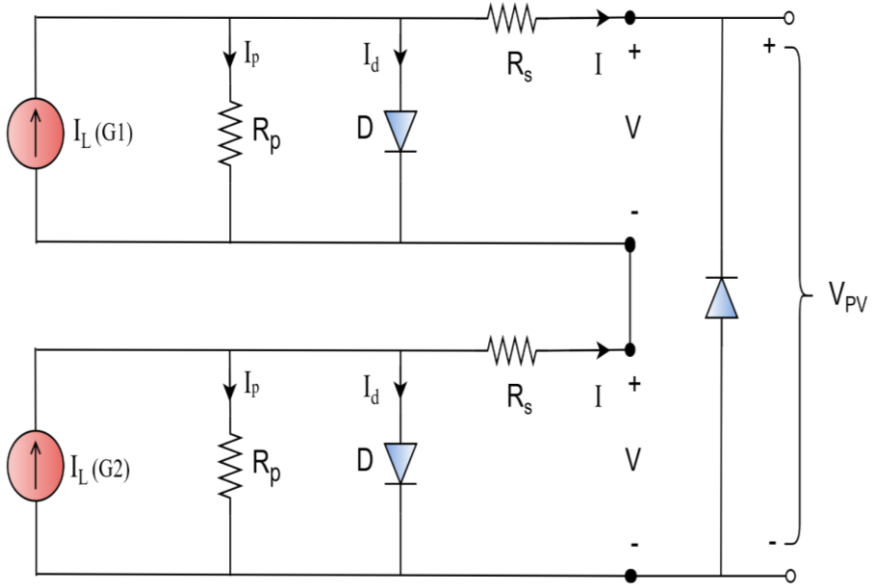
Kısmi gölgeleme, güneş enerji sistemlerinde PV panellerin bazılarının çevresel faktörlere bağlı olarak gölgelemesi sonucu oluşan bir durumdur. Kısmi gölgelemeye sebebiyet olabilecek durumlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır. Bunlar;

- Binaların oluşturmuş olduğu gölgeleme etkisi,
- Bitkiler ya da ağaçların oluşturmuş olduğu gölgeleme etkisi,

- Mevsimsel değişikliklere bağlı olarak oluşan gölgelenme etkisi,
- Panellerin kendileri arasında oluşan gölgelenme etkisi,
- Kış aylarında kar yağışı sonucu oluşan gölgelenme etkisidir.

Kısmi gölgelenme durumunda panellerin ışınım değerlerinde farklılıklar meydana gelmektedir. ışınım değerlerindeki bu farklılıklar paneller tarafından üretilen akım değerlerinin de değişkenlik göstermesine neden olmaktadır.

şekil 4'te gösterilen iki seri bağlı PV bağlantı yapısı için üretilen akım ve gerilim değerleri sırasıyla Eşitlik 13 ve Eşitlik 14'te verilmiştir (Seyedmahmoudian & ark., 2013).



şekil 4. İki seri bağlı PV bağlantı yapısı

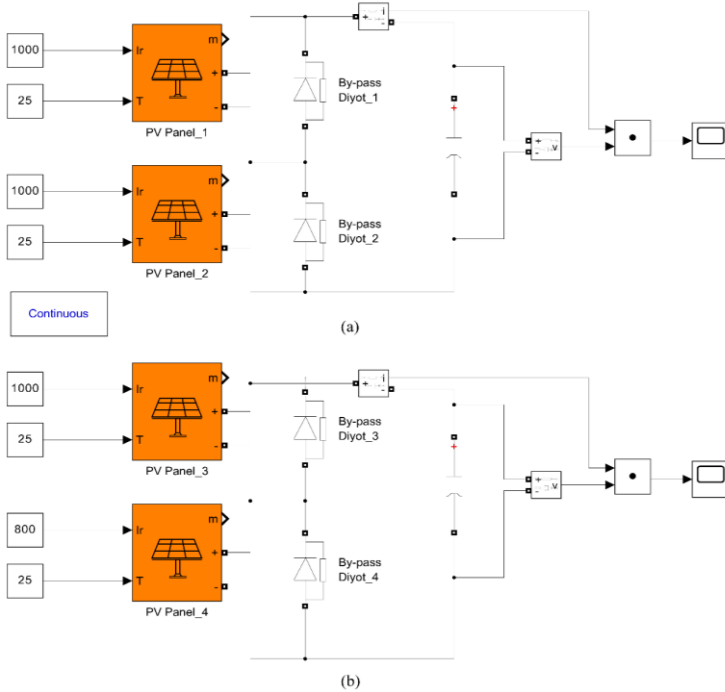
$$I_{PV} = \begin{cases} I_{ph}(G_1) - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv_1} + I_{pv}R_s)}{N_s n K_b T_k} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv_1} + I_{pv}R_s N_s)}{R_p N_s} & I_{PV} > I_{ph1} \\ I_{ph}(G_2) - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv_2} + I_{pv}R_s)}{N_s n K_b T_k} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv_2} + I_{pv}R_s N_s)}{R_p N_s} & I_{PV} < I_{ph2} \end{cases} \quad (13)$$

$$V_{PV} = \begin{cases} V_{pv_1} & I_{PV} > I_{ph1} \\ V_{pv_1} + V_{pv_2} & I_{PV} < I_{ph2} \end{cases} \quad (14)$$

Seri bağılı PV panel bağlantı yapısı için ışıınım değerlerindeki farklılık üretilen akım değerlerinde farklı olmasına neden olmaktadır. Her iki panelde ışıınım değeri düşük olan panelin kısa devre akımına kadar birlikte aynı akım değerini üretirler. Sonrasında ışıınım değeri yüksek olan panel ışıınım değeri düşük olan panele göre daha fazla akım üretecektir. Bu durumda ışıınım değeri düşük olan panel ışıınım değeri yüksek olan panelden akım çekecektir. Bu durum PV paneller için “hot spot” ile adlandırılan olumsuzluklara neden olmaktadır (Shams, Mekhilef & Tey, 2021). Bu olumsuzlukların giderilmesi amacıyla by-pass diyotları kullanılmaktadır (Mäki & Valkealahti, 2011). By-pass diyotları eşit ışıınım koşullarına kadar sistemde açık devre gibi çalışırken kısmi gölgelenme durumlarında ışıınım değeri düşük paneli devreden çıkarmaktadır. By-pass diyotları PV sistemi hot spot durumuna karşı korumasına rağmen PV sistemin Güç-Gerilim (P-V) karakteristiğinde birden çok maksimum güç noktasının oluşumuna neden olmaktadır. İki seri PV bağlantı yapısı için eşit ışıınım ve kısmi gölgelenme koşullarında PV sistemin I-V ve P-V karakteristiklerinin gözlemlenmesi amacıyla Şekil 5’te gösterilen benzetim modeli oluşturulmuştur. PV panele ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. PV panel elektriksel özellikleri

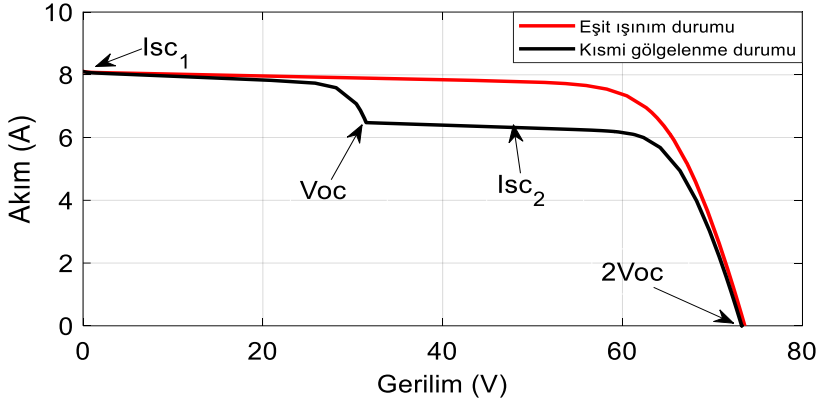
Aavid Solar ASMS-220p	Değer	Birim
Maksimum güç	220.5	W
Açık devre gerilimi	36.80	V
Kısa devre akımı	8.08	A
Maksimum güç noktasında gerilim	30	V
Maksimum güç noktasında akım	7.35	A
Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı	-0.3364	
Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı	0.038465	
Paralel direnç	83.699	Ω
Seri direnç	0.3192	Ω



Şekil 5. PV sistem a) Eşit ışınım koşulu b) Kısmi gölgelenme koşulu modellenmesi

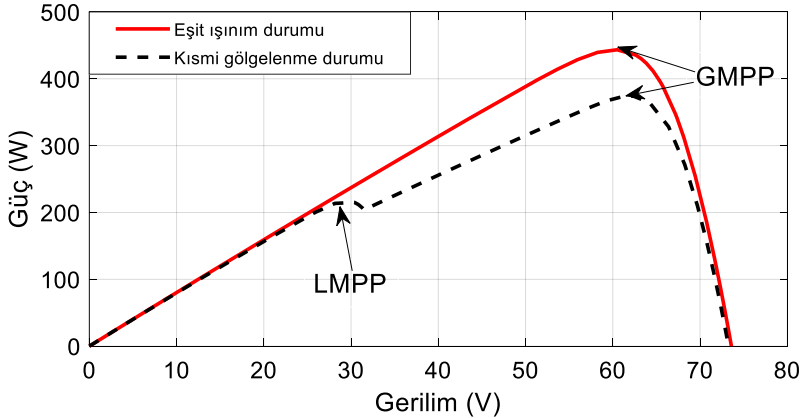
Şekil 5’te ki PV sistem tasarlanırken eşit ışıınım koşullarında panellerin ışıınım değeri 1000 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Kısmi gölgelenme koşulları için ise birinci panelin ışıınım değeri 1000 W/m^2 , ikinci panelin ışıınım değeri ise 800 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Her iki durum için sıcaklık değeri ise sabit ve 25°C seçilmiştir.

PV sistemin hem eşit ışıınım hem de kısmi gölgelenme durumlarına ait I-V karakteristikleri Şekil 6’da gösterilmiştir (Yılmaz, 2024). Eşit ışıınım koşullarında panellerin ürettiği akım ve gerilim değeri eşit olduğu için seri bağlantıdan dolayı açık devre gerilimi $2V_{oc}$, kısa devre akımı ise $I_{sc}=I_{sc_1}=I_{sc_2}$ olmaktadır. Kısmi gölgelenme koşullarında I-V karakteristiği iki bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede her iki panelde düşük ışıınım değeri panele göre akım ve gerilim değeri üretilmektedir. Bu durumda açık devre gerilimi $2V_{oc}$, kısa devre akımı ise I_{sc_2} olmaktadır. İkinci bölgede ise yüksek ışıınım değerine sahip panel düşük ışıınım değerine sahip panelin by-pass diyotunu aktif hale getirerek ikinci paneli devre dışı bırakmaktadır. Bu bölgede açık devre gerilimi V_{oc} , kısa devre akımı ise I_{sc_1} olmaktadır.



Şekil 6. PV sistem I-V karakteristiği

PV sistemin hem eşit ışınlam hem de kısmi gölgelenme durumlarına ait P-V karakteristikleri Şekil 7’de gösterilmiştir (Yılmaz, 2024). Eşit ışınlam koşullarında P-V karakteristiğinde tek bir maksimum güç noktası mevcuttur. Bu nokta küresel maksimum güç noktası (GMPP) olarak adlandırılmaktadır. Kısmi gölgelenme koşullarında iki adet maksimum güç noktası mevcuttur. Bunlardan birincisi yerel maksimum güç noktası (LMPP) diğeri ise GMPP’dir.



Şekil 7. PV sistem P-V karakteristiği

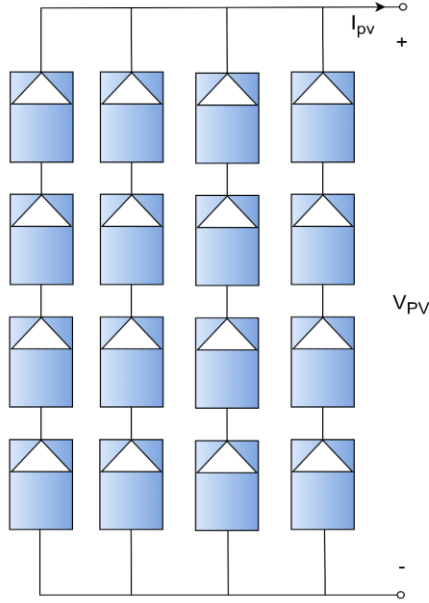
4. PV Panel Bağlantı Şekilleri

PV panellerden arzu edilen gerilim ve akım değerlerini elde edebilmek amacıyla çeşitli PV bağlantı şekilleri mevcuttur (Ramaprabha & Mathur, 2012). Bunlar arasında en sık kullanılan bağlantı çeşitleri aşağıda verilmiştir (Farh & Eltamaly, 2020; Mohammadnejad, Khalafi & Ahmadi, 2016; Ramos-Paja & ark., 2012).

- Seri-paralel (SP) bağlantı
- Toplam çapraz bağlı (TCT)
- Köprü bağlantılı (BL)
- Bal peteği (HC) bağlantılı

4.1. Seri-Paralel (SP) PV Bağlantı Yapısı

PV panellerde SP bağlantı konfigürasyonunda öncelikle paneller arzu edilen gerilim değerlerini sağlayabilmek amacıyla seri bağlanırlar. Sonrasında seri bağlantı yapısına sahip paneller arzu edilen akım ihtiyacını karşılamak amacıyla paralel bağlanmaktadır. Şekil 8’de SP bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 8. SP bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem

SP bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli avantajı;

- PV sistemin gerilim ve akım değerlerini arzu edilen değerlere ayarlanmasında esneklik sağlaması.

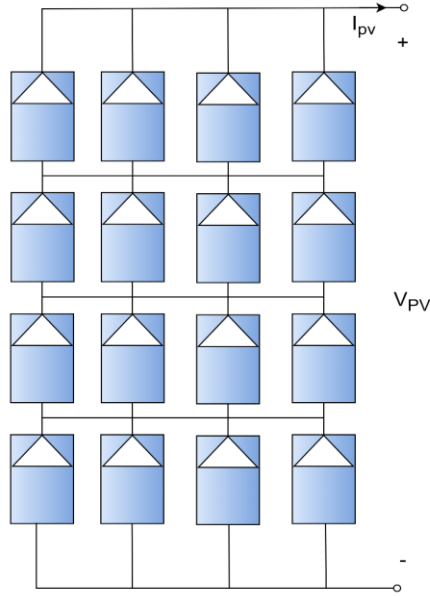
SP bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli dezavantajı ise;

- Kısmi gölgelenme koşulları ya da bireysel panellerde meydana gelebilecek arıza durumunun seri bağlantıdaki diğer panellerinde performansını etkilemesi.

4.2. Toplam Çapraz Bağlı (TCT) PV Bağlantı Yapısı

TCT bağlantı yapısı SP bağlantı yapısına ek olarak daha dengeli bir akım üretilmesi amacıyla çapraz bağlantıların eklenmesi ile elde edilmektedir. Bu bağlantı yapısında her satırdaki PV hücre

sonraki satırdaki PV hücre ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 9’da TCT bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 9. TCT bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem

TCT bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli avantajı;

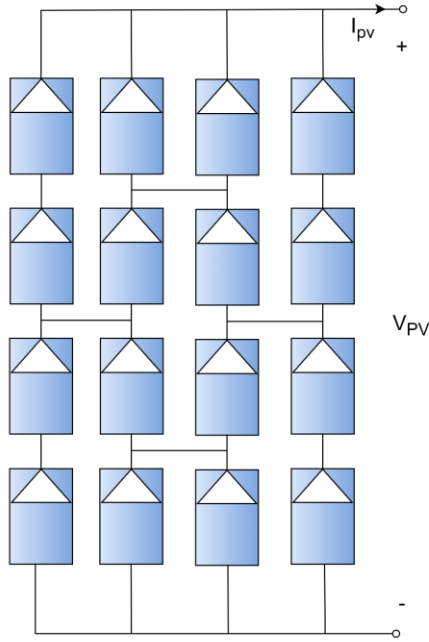
- Çapraz bağlantı sayesinde herhangi bir kısmi gölgelenme ya da bireysel PV hücre arızası durumunda daha dengeli enerji üretimi sağlanmaktadır.

TCT bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli dezavantajı ise;

- Ek kablo bağlantıları nedeniyle SP’ye göre kurulumu daha karmaşık ve maliyet açısından daha pahalıdır.

4.3. Köprü Bağlantılı (BL) PV Bağlantı Yapısı

BL bağlantı yapısı PV panellerden daha verimli enerji elde edilmesi amacıyla oluşturulan bağlantı yapısıdır. BL bağlantı yapısında ilk olarak iki panel seri olarak bağlanmaktadır. Sonrasında seri bağlantılı modüller paralel bağlanır. Şekil 10'da BL bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 10. BL bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem

BL bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli avantajı;

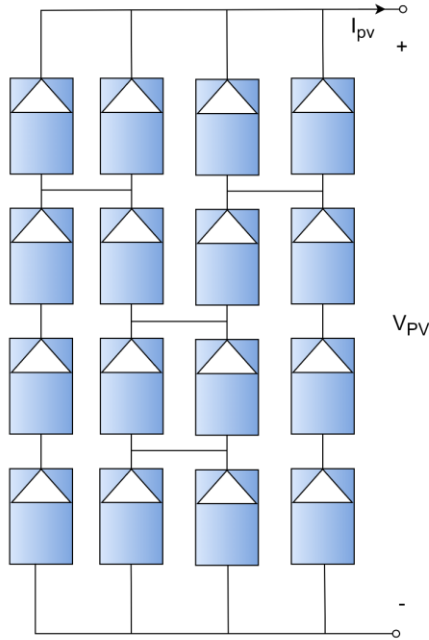
- Hem yatay hem dikey bağlantılar sayesinde gölgelenmenin olduğu durumlarda enerji verimliliğini artırmaktadır.

BL bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemin en önemli dezavantajı ise;

- Ek bileşenler gerektirdiğinden akım ve kurulum maliyetleri yüksektir.

4.4. Bal Peteği (HC) Bağlantılı PV Bağlantı Yapısı

BL bağlantılı PV sistemin konfigürasyonunun değiştirilmesiyle HC bağlantılı PV bağlantı yapısı oluşturulmuştur (Wang & Hsu, 2011). HC bağlantı yapısı oluşturulurken TCT ve BL bağlantı yapılarının avantajları birleştirilmiştir. Şekil 11’de HC bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 11. HC bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistem

SP, TCT, BL ve HC konfigürasyonlarının karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir (Farh & Eltamaly, 2020).

5. Sonuç

Güneş enerji sistemlerinde PV paneller aracılığıyla enerji dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden PV panellerin modelleme çeşitlerini, PV panellere kısmi gölgelenme etkisini ve PV panellerin bağlantı şekillerini bilmek PV sistemin verimliliği ve performansı açısından oldukça önemlidir.

PV panel modelleme çeşitlerinden tek diyotlu PV hücre modelinin hesaplamaların basit ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi en önemli avantajı olarak belirtilmiştir. İki diyotlu PV hücre modeli düşük ışıınım ve sıcaklık değerlerinde PV hücrenin elektriksel davranışını daha hassas modellemektedir. Yüksek doğruluk gerektiren durumlarda ise çoklu diyot PV model diğer modellere göre daha doğru sonuçlar vermektedir. PV sistemlerde çevresel koşullara bağlı olarak paneller farklı ışıınım değerlerine sahip olabilmektedir. Bu durumda panellerin ürettikleri akım değeri birbirlerinden farklıdır. Özellikle seri bağlantı şekline sahip PV sistemlerde akım değerlerindeki farklılık hot-spot durumuna neden olmaktadır. PV panellerden hem eşit ışıınım hem de kısmi gölgelenme koşullarında arzu edilen gerilim ve akım değerlerini elde edebilmek amacıyla farklı PV bağlantı şekilleri mevcuttur. SP bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemde gerilim ve akım değerlerini arzu edilen değerlere ayarlanması oldukça kolaydır. TCT bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemde çapraz bağlantı sayesinde herhangi bir kısmi gölgelenme ya da bireysel PV hücre arızası durumunda daha dengeli enerji üretimi sağlanmaktadır. BL bağlantı konfigürasyonuna sahip PV sistemde hem yatay hem dikey bağlantılar sayesinde gölgelenmenin olduğu durumlarda enerji

verimliliğini artırmaktadır. Tüm bağlantı konfigürasyonlarının karşılaştırılması ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. SP, TCT, BL ve HC konfigürasyonlarının karşılaştırılması

Bağlantı Şekli	Avantaj	Dezavantaj
SP	✓ Uygulaması basittir. ✓ Eşit ışıyım koşullarında oldukça verimlidir.	✓ Çevresel değişimlere diğer bağlantı şekillerine göre daha duyarlıdır.
TCT	✓ Kısmi gölgelenme koşullarında verimlidir.	✓ İlave bileşenlerden dolayı en fazla kablo bağlantısının olduğu bağlantı çeşitidir.
BL	✓ SP’ye göre %2.5 daha fazla güç sağlamaktadır. ✓ Kısmi gölgelenme koşullarında şebekeyi beslemeye devam etmektedir.	✓ Verimliliği, karmaşıklığı orta seviyededir.
HC	✓ Kısmi gölgelenme koşullarında şebekeyi beslemeye devam etmektedir.	✓ Verimliliği, karmaşıklığı orta seviyededir.

Kaynaklar

Abdelhamid, H., Edris, A., Helmy, A., & Ismail, Y. (2019). Fast and accurate PV model for SPICE simulation. *Journal of Computational Electronics*, 18(1), 260-270.

Eltamaly, A. M., & Farh, H. M. (2020). PV Characteristics, performance and modelling. *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, 31-63.

Farh, H. M., & Eltamaly, A. M. (2020). Maximum power extraction from the photovoltaic system under partial shading conditions. *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, 107-129.

Fazal, M. A., & Rubaiee, S. (2023). Progress of PV cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability. *Solar Energy*, 258, 203-219.

Gervais, E., Shammugam, S., Friedrich, L., & Schlegl, T. (2021). Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics—Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110589.

Kabir, F., Manir, S., Bhuiyan, M. M. H., Aftab, S., Ghanbari, H., Hasani, A., ... & Adachi, M. M. (2022). Instability of dye-sensitized solar cells using natural dyes and approaches to improving stability—an overview. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102196.

Kratochvil, J. A., Boyson, W. E., & King, D. L. (2004). *Photovoltaic array performance model* (No. SAND2004-

3535). Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States).

Mäki, A., & Valkealahti, S. (2011). Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 173-183.

Mesquita, D. D. B., Silva, J. L. D. S., Moreira, H. S., Kitayama, M., & Villalva, M. G. (2019, September). A review and analysis of technologies applied in PV modules. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)* (pp. 1-6). IEEE.

Mohammadnejad, S., Khalafi, A., & Ahmadi, S. M. (2016). Mathematical analysis of total-cross-tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations. *Solar energy*, 133, 501-511.

Ramaprabha, R., & Mathur, B. L. (2012). A comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2012(1), 120214.

Ramos-Paja, C. A., Bastidas, J. D., Saavedra-Montes, A. J., Guinjoan-Gispert, F., & Goez, M. (2012, November). Mathematical model of total cross-tied photovoltaic arrays in mismatching conditions. In *2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)* (pp. 1-6). IEEE.

Syedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Rahmani, R., Yusof, R., & Renani, E. T. (2013). Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. *Energies*, 6(1), 128-144.

Shams, I., Mekhilef, S., & Tey, K. S. (2021). Maximum power point tracking using modified butterfly optimization algorithm for partial shading, uniform shading, and fast varying load conditions. *IEEE transactions on Power Electronics*, 36(5), 5569-5581.

Stornelli, V., Muttillio, M., De Rubeis, T., & Nardi, I. (2019). A new simplified five-parameter estimation method for single-diode model of photovoltaic panels. *Energies*, 12(22), 4271.

Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Rahim, N. A., Jeyraj, A., & Selvaraj, L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 443-461.

Vrielink, J. A. M., Tiggelaar, R. M., Gardeniers, J. G., & Lefferts, L. (2012). Applicability of X-ray fluorescence spectroscopy as method to determine thickness and composition of stacks of metal thin films: A comparison with imaging and profilometry. *Thin Solid Films*, 520(6), 1740-1744.

Yadav, D., Singh, N., Bhadoria, V. S., Vita, V., Fotis, G., Tsampasis, E. G., & Maris, T. I. (2023). Analysis of the factors influencing the performance of single-and multi-diode PV solar modules. *IEEE Access*, 11, 95507-95525.

Yılmaz, M. (2024). Development and real-time implementation of a new hybrid MPPT method for solar energy systems (Doctoral dissertation, Ataturk University).

Yılmaz, M., & Corapsiz, M. (2024). PSO Training Neural Network MPPT with CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 13(1), 88-97.

Wang, Y. J., & Hsu, P. C. (2011). An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. *Energy*, 36(5), 3069-3078.

Zhang, T., Wang, M., & Yang, H. (2018). A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Energies*, 11(11), 3157.

BÖLÜM III

Lityum-İyon Pil Hücrelerinde Pil Sağlığı Tahmin Yöntemleri

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ¹

1. Giriş

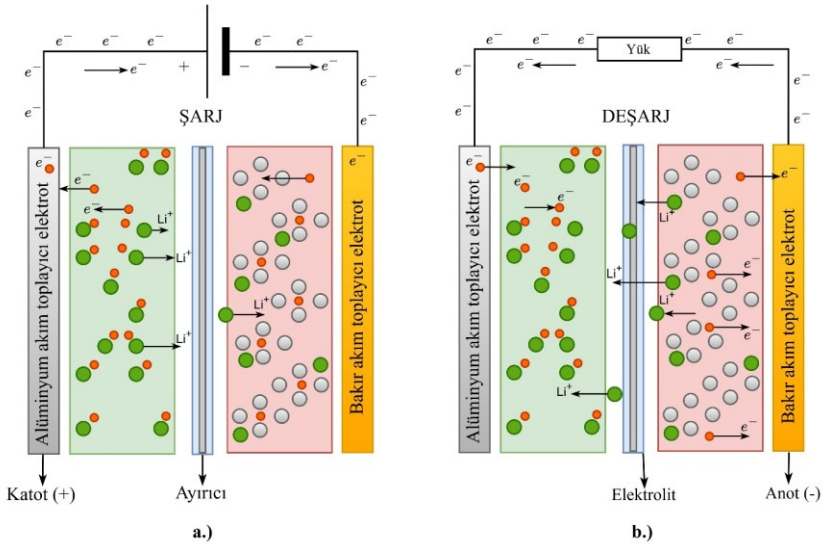
18. yüzyılın sonlarında İtalyan hekim Luigi Galvani'nin kurbağa bacakları üzerinde gerçekleştirdiği deneylerden tesadüfen ortaya çıkan bir sonuç günümüz pil teknolojilerinin gelişmesinin temelini oluşturmaktadır. Galvani 1780 yılında gerçekleştirdiği deneyinde farklı iki metali ölü bir kurbağa bacağına dokundurmasıyla kurbağa bacağının kaslarında bir hareket gözlemiştir. Bu sonucu bilimsel olarak açıklamak için çalışmalarını genişletmek üzere farklı deneyler gerçekleştirse de 1800 yılında aslında yakın arkadaşı olan ancak bilimsel anlaşmazlıklar yaşadığı Alessandro Volta ortaya çıkan enerjinin aslında ıslak kaslara temas eden metallere kaynaklandığını ortaya koymuştur. Daha sonra Volta çalışmalarını genişleterek çinko ve gümüş diskler arasına

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5477-5299, r.corapsiz@erzurum.edu.tr

yerleştirdiği ve sodyum klorür çözeltilisine batırılmış bezler ile birbirinden ayrılmış katmanlarla yığın haline getirilmiş ilk “elektrokimyasal hücre” kavramını tanıttı (Volta, 1800). Voltaik yığın olarak adlandırılan bu buluş bilinen ilk primer (birincil veya tekrar şarj edilemeyen) hücre olarak tanımlandı. Bu hücre terminallerine bir alıcı bağlandığında sürekli bir elektrik akımı üretebiliyordu. Ancak hücre enerjisi hızla tükeniyordu ve tekrar kullanım için şarj edilmeye uygun değildi. 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante yeniden şarj edilebilir kurşun-asit pilin temellerini oluşturdu ve bu temeller 1881’de Fransız kimya mühendisi Camille Alphonse Faure tarafından geliştirilerek bu pillerin ticarileştirilmesine ve endüstriyel boyutta üretilmesine zemin hazırladı. Bu devrim niteliğindeki buluş sekonder (ikincil veya yeniden şarj edilebilir) hücre olarak tanımlandı ve elektrik enerjisinin taşınabilir hale gelmesinde etkili bir rol üstlendi (Scrosati, 2011). Daha uzun süre enerji sağlayabilen, daha fazla hücre gerilimine sahip olan pil teknolojilerine dair araştırmalar Nikel-Demir, Nikel-Kadmiyum ve Nikel-Metal-Hidrat gibi çeşitli elektrot malzemelerinin kullanılmasıyla hızla gelişti. Lityum tabanlı pil teknolojileri 1970’li yılların başında sadece primer hücre olarak üretilebiliyordu. Bu durumun altında yatan ana etken hammaddeye erişimin zor olmasından kaynaklanan maliyet yüksekliğiydi. Ancak giderek artan ham madde arayışı ve artan mobil enerji talebi doğrultusunda ilk ticari lityum iyon pilin patenti 1987 yılında Akira Yoshino tarafından alındı (Yoshino, 2012). 1991 yılına gelindiğinde ünlü elektronik devi SONY COMPANY şarj edilebilir lityum iyon pilleri endüstriyel boyutta ticarileştirdi ve pil pazarına ciddi bir rakip kazandırdı.

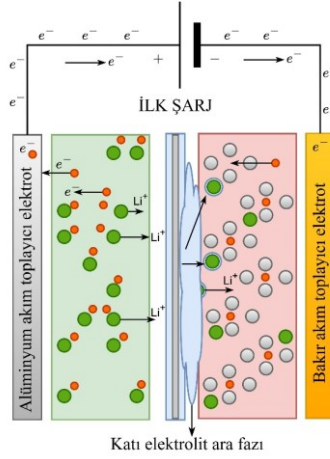
2. Lityum-iyon piller

Lityum-iyon piller genel olarak şarj ve deşarj işlemlerinde hücreye iletimi sağlamak için iki akım toplayıcı elektrottan, elektronların anot ve katot terminalleri arasında doğrudan geçişini engelleyen bir ayırıcıdan ve elektrotlar arasında iyon akışını kolaylaştıran bir elektrolitten oluşur (Thi & ark., 2023). Lityum-iyon hücrelerde katot malzemesi olarak genellikle nikel açısından zengin veya kobalt içermeyen malzemeler kullanılırken anot malzemeleri olarak silisyum ve lityum kullanılmaktadır (Y. Liu & ark., 2021). Anot ve katot için kullanılacak malzemeler pillerin enerji ve güç yoğunlukları, maliyetleri ve enerji dönüşümündeki verimliliği gibi etkenlerde önemli ölçüde rol oynar (L. Zhou & ark., 2018). Şekil 1 lityum-iyon pil hücrelerinin iç yapısında şarj ve deşarj döngüleri esnasında meydana gelen reaksiyonları temsil etmektedir.



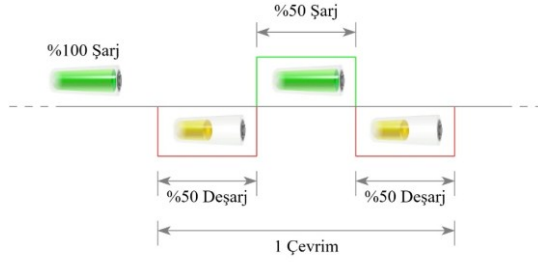
Şekil 2: Lityum-iyon hücresinin şarj ve deşarj reaksiyonları

Lityum-iyon hücrenin şarj reaksiyonlarını temsil eden Şekil 1a'da hücre harici bir kaynak tarafından şarj edildiğinde lityum iyonları anot bölgesine doğru hareket eder (Horiba, 2014). Bu aşamada ayırıcı elektronların geçişini engelleyeceği için elektronlar akım akış yönüne ters yönde hareket ederek anot elektrotuna ulaşır. Bu reaksiyon harici enerji kaynağının akımı belirlenen bir kesme akımına düşene kadar devam eder ve bu aşamada pil hücresinin tam şarj olduğu varsayılır. Şekil 1b'de belirli bir enerji düzeyine kadar şarj edilmiş hücrenin terminallerine bir alıcı bağlanmasıyla iyonlar ters yönde hareket ederek katot elektrotuna geçer. Bu esnada ayırıcı elektron geçişine müsaade etmeyeceğinden elektronlar akım akış yönünün tersine hareket ederek katot tarafına ulaşır (Ghiji & ark., 2020). Bu işlem belirli bir kesme voltajına kadar devam eder ve hücre bu potansiyele ulaştığında pilin tamamen deşarj olduğu kabul edilir. Lityum doğası gereği oldukça reaktif bir malzeme olduğundan hücrenin ilk şarjı esnasında lityumun elektrolit ile girdiği reaksiyondan dolayı envanterin yaklaşık %5'i kaybedilir. Bu kayba sebep olan elektrolitin anot tarafında meydana gelen katı elektrolit ara fazıdır (Xiong & ark., 2020). İlk şarj esnasında lityum envanterinin küçük bir bölümü kayba uğrasa da aslında bu durum hücrenin tam şarjı esnasında anotta bulunan elektronların elektrolit ile temasının bir nebze önüne geçer. Elektronların, elektrolit yüzeyine doğrudan temas etmesi elektrolitin kimyasal yapısının bozulmasına ve hücrenin enerji verimliliğinin azalmasına yol açar.



Şekil 3: Katı elektrolit ara fazının oluşumu

Lityum iyon hücrelerde verimliliğin azalması hücrenin yaşlanması olarak tanımlanır. Pil hücresindeki yaşlanma genellikle iki başlık altında incelenir. Bunlardan birincisi takvim ikincisi ise çevrim yaşlanmasıdır. Takvim yaşlanması pilin üretildiği andan itibaren başlar ve hücre yaşamının başlangıcı (*Beginning of Life-BoL*) olarak adlandırılır. Çevrim yaşlanması ise hücrenin şarj ve deşarj döngülerinden kaynaklanan ve zaman içerisinde lityum envanter kaybı (*Loss of Lithium Inventory-LLI*) ve aktif malzeme kaybı (*Loss of Active Material-LAM*) ile sonuçlanan durum olarak tanımlanmaktadır (Xiong & ark., 2020). Lityum envanter kaybı ilk şarj esnasında maksimum seviyede gerçekleşmekte ve hücrenin bütün şarj deşarj çevrimi boyunca da devam etmektedir. Çevrim ifadesi pil teknolojilerinde sıklıkla kullanılan bir terim olup tam dolu bir hücrenin tamamen deşarj edildikten sonra tekrar tamamen şarj edilmesi işlemi 1 çevrim (*1 cycle*) olarak tanımlanır. Şekil 3 bir pil hücresinde meydana gelen 1 çevrimin oluşumunu göstermektedir.



Şekil 4: Pil hücrelerindeki çevrim olayının gösterilmesi

Şekil 3'te %100 dolu bir pil hücresi birinci aşamada %50 deşarj edilmiş ve ikinci aşamada hücre tekrar %100 doluluğa kadar şarj edilmiştir. Üçüncü aşamada hücre tekrar %50 deşarj edilmiştir. Deşarj seviyesinin %100'e ulaşmasıyla hücre bir tam çevrimi gerçekleştirmiş olur. Çevrim kavramı pil sağlığı tahminleri için oldukça kritik bir etkidir. Lityum tabanlı hücrelerin günümüz teknolojisinde sıklıkla kullanılmasının ana sebepleri arasında bu hücrelerin çevrim ömürlerinin yüksek olması yer alır (G. Liu & ark., 2024).

Tablo 1: Farklı pil hücrelerinin elektriksel özelliklerinin karşılaştırılması

Pil tipi	Hücre gerilimi (V)	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Çalışma sıcaklığı (°C)
Pb-asit	2	35	1000	-15, +50
NiCad	1,2	50-80	2000	-20, +50
NiMH	1,2	70-95	<3000	-20, +60
Li-ion	3,6	118-250	2000	-20, +60
LiPo	3,7	130-225	>1200	-20, +60

Tablo 1’de beş farklı pil hücresinin elektriksel özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir (Çorapsız & Kahveci, 2023). Lityum hücreler diğer hücrelere kıyasla daha yüksek terminal gerilimi, daha yüksek enerji yoğunluğu, daha yüksek çevrim ömrü ve daha yüksek çalışma sıcaklığı aralıklarına sahiptir. Bu özellikler lityum tabanlı pil teknolojilerinin günümüzde havacılık sektöründen taşımacılığa, taşınabilir elektronik aygıtlardan enerji depolama sistemlerine varana kadar birçok alanda kullanılma sebebini ortaya koymaktadır (Chen & ark., 2023). Yüksek hücre geriliminin avantajı, birden fazla hücrenin seri bağlanmasıyla daha küçük hacimlerde daha yüksek terminal gerilimlerine ulaşılabilmesidir. Yüksek enerji yoğunluğu özellikle elektrikli araçlarda aranan avantajlardan biridir ve aracın menzili ile doğrudan ilişkilidir. Çevrim ömrünün yüksek olması pil hücresinin daha uzun süre kullanılmasına katkıda bulunur ve pil yenileme işlemlerinin daha uzun sürede gerçekleştirilmesine katkı sağlar. Çalışma sıcaklığı bakımından özellikle negatif sıcaklığa dayanabilme sınırının düşük olması, taşıt teknolojisinde normalin altında iklim koşullarına sahip bölgelerde önemli üstünlük sağlar. Orion marka 2500mAh standart bir lityum-iyon hücre Şekil 4’te gösterilmiştir (URL-1).

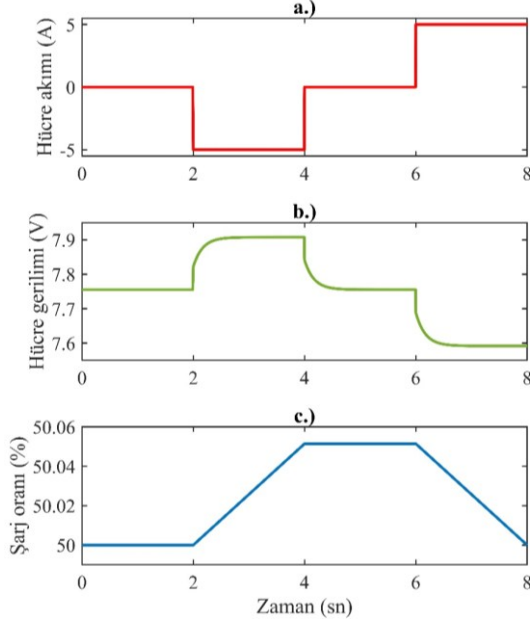


Şekil 5: ORION marka 2500mAh lityum-iyon pil hücresi

Pil hücrelerinin üzerinde hücre ve deşarj kapasitesi değeri bulunur. Hücre kapasitesi genellikle mAh cinsinden verilirken deşarj kapasitesi ‘C-değeri (*C-rate*)’ ile verilir. C-değeri hücrelerin şarj ve deşarj akımlarını ifade etmede sıklıkla kullanılır ve 1C-değeri hücreyi 1 saatte deşarj edecek akım değeri olarak tanımlanır. Örneğin Şekil 4’teki hücre teorik olarak 1 saat boyunca 2500mA değerinde akım sağlar ve hücrenin deşarj akımı 1C olarak ifade edilir (Saxena & ark., 2019). Ancak gerçek bir pil uygulamasında hücre içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar, hücre iç direnci ve ortam sıcaklığı gibi etkenlerden dolayı 1C değerinde tam deşarj işlemi 1 saatin altında bir sürede gerçekleşir. Hücreye ait diğer elektriksel ve fiziksel özellikler üretici tarafından sağlanan bilgi yapılarından temin edilir. Bu özellikler arasında hücrenin boyutları, ağırlığı, nominal hücre voltajı, enerji yoğunluğu, iç direnci, önerilen minimum ve maksimum şarj akımları, deşarj kesme voltajı, çevrim ömrü ve maksimum sürekli veya darbeli deşarj akımları değerleri bulunur.

2.1. Lityum-iyon pilin şarj/deşarj dinamikleri

Pil sağlık durumu (*State of Health-SoH*), şarj durumu (*State of Charge-SoC*) ve hücre gerilimi gibi kavramlar pil hücrelerinin kalan çevrim ömürlerini veya hizmet sürelerini değerlendirmede kritik bir öneme sahiptir. Bu kavramların anlaşılması için pil hücresinde şarj ve deşarj olaylarının etkisinin elektriksel olarak incelenmesi gerekir. Şekil 5 bir lityum iyon hücresine aynı genlikte önce şarj sonra deşarj akımı uygulanması sonucunda hücre geriliminin ve şarj durumunun değişimini temsil etmektedir.



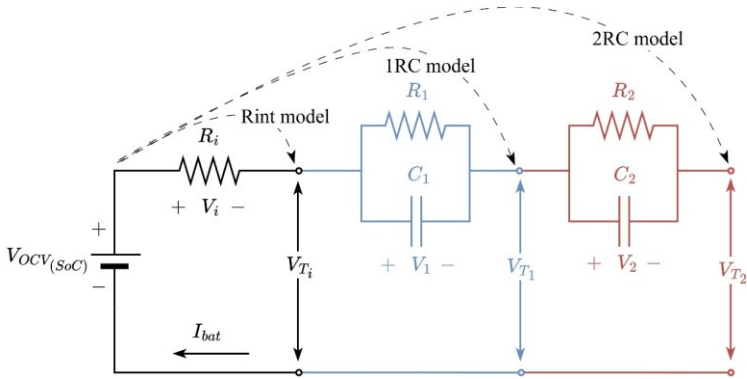
Şekil 6: Lityum-iyon hücrenin şarj/deşarj durumundaki dinamikleri

Şekil 5a hücre akım profilini temsil etmektedir ve negatif hücre akımı hücrenin şarj olduğunu, pozitif hücre akımı ise hücrenindeşarj olduğunu gösterir. Hücreyi şarj etme işlemine başlandığı anda ($t = 2sn$) Şekil 5b'deki gibi hücre geriliminde üç farklı değişim gözlenir. Birinci değişim hücre gerilimindeki dik artıştır. Bu ani gerilim artışı hücre iç direncinden kaynaklanır ve Eşitlik 1'deki gibi verilir.

$$R_{iç} = \frac{\Delta V_1}{I_{şarj}} \quad (1)$$

Eşitlik 1'deki notasyonlarda $R_{iç}$ hücre iç direncini, ΔV_1 hücre gerilimindeki ani gerilim artışını ve $I_{şarj}$ şarj akımının

genliğini temsil eder. Hücre iç direncinden kaynaklanan gerilim artışının hemen ardından meydana gelen ikinci değişimde ($2 < t < 3$) hücre geriliminde hızlı bir şarj eğrisi gözlenir. Bu bölge pil hücresinin kısa süreli elektrokimyasal etkilerinden kaynaklanan dinamikleri temsil eder. Hücre geriliminin değişim hızının yavaşladığı bölge ($3 < t < 4$) üçüncü değişim bölgesidir ve pilin uzun süreli dinamiklerini temsil eder. Benzer olaylar hücrenin deşarjı esnasında da görülür. Bu gerilim değişimlerinin ve karşılık geldikleri matematiksel eşitliklerin ilişkisi izleyen referansta ayrıntılı olarak bulunabilir (Çorapsız & Kahveci, 2023). Şekil 5c'deki hücre şarj oranı doğrudan hücre gerilimiyle ilişkilidir.



Şekil 7: Elektriksel eşdeğer devre modelleri

Pil hücrelerinin şarj ve deşarj durumundaki dinamiklerini belirlemek hücrelerin kalan ömrünü, şarj oranını, kapasite kayıplarını ve yapılabilecek proaktif işlemleri gerçekleştirmek adına oldukça önemlidir. Araştırmacılar, bu dinamikleri belirlerken genellikle elektrokimyasal modeller, elektriksel eşdeğer devre modelleri ve veri odaklı modeller olmak üzere üç farklı pil modeli üzerine yoğunlaşmıştır (W. Zhou & ark., 2021). Bu modeller

arasında elektriksel eşdeğer devre modelleri basit yapıları ve hızlı uygulanabilirlikleri bakımından ön plana çıkmıştır. Ancak eşdeğer modeller hücre iç reaksiyonlarını, gerilim değişimlerini, şarj doluluğunu ve hücre dinlenme süresindeki değişimleri (dinlenme süresi Şekil 5b'deki $4 < t < 6$ s aralığına karşılık gelir) doğru bir şekilde temsil etmelidir. Şekil 6'da sıklıkla kullanılan elektriksel eşdeğer devre modelleri gösterilmiştir. Bu modeller arasında Rint model hücre doluluk oranına bağlı açık devre gerilimini temsil eden bir gerilim kaynağından ($V_{OCV(soc)}$) ve pil iç direncini (R_i) temsil eden bir dirençten oluşur (Campagna & ark., 2020). Bu model sadece doğrusal elemanlardan oluşturulduğu için hücre dinamiklerini tam olarak temsil edemez. Hücre akımına bağlı olarak iç direnç üzerine düşen gerilim ($V_i = I_{bat}R_i$) dikkate alınarak hesaplandığında hücre terminal gerilimi Eşitlik 2'deki gibi elde edilebilir.

$$V_{Ti} = V_{OCV(soc)} - V_i \quad (2)$$

Bu model genellikle Şekil 5b'de verilen hücre geriliminde $t = 2sn$ anındaki değişimi temsil eder. İkinci eşdeğer devre olan 1RC model genellikle Birinci Dereceden Thevenin Model olarak bilinir ve Rint modele seri olarak bağlanan paralel bir R_1C_1 ağından meydana gelir. Bu modelde hücre polarizasyon etkisini modelleyen RC ağı polarizasyon direncini temsil eden R_1 ve polarizasyon kapasitesini temsil eden C_1 elemanlarından oluşur (Wang,Zhang & Chen, 2016). Bu modele karşılık gelen elektriksel ilişkiler Eşitlik 3'teki gibi yazılabilir.

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 C_1} + \frac{I_{bat}}{C_1} \\ V_{T_1} = V_{OCV(SoC)} - V_1 - I_{bat} R_i \end{cases} \quad (3)$$

Eşitlik 3’te verilen matematiksel ifade Şekil 5b’deki hücre gerilimi değişiminde yaklaşık olarak $2 < t < 3$ s aralığını temsil eder. Üçüncü eşdeğer devre olan 2RC model İkinci Dereceden Thevenin Modeli olarak bilinir ve 1RC modele seri olarak bağlanan paralel bir $R_2 C_2$ ağından meydana gelir. Bu ağ anot ve katot arasındaki konsantrasyon farkını modellemek için kullanılır ve konsantrasyon direncini temsil eden R_2 ve konsantrasyon kapasitesini temsil eden C_2 elemanlarından oluşur (Shrivastava & ark., 2022). 2RC modeli hücre dinamik davranışlarını optimum şekilde yansıtan model olarak kabul edilir ve pil sağlığı, şarj durumu, çevrim ömrü ve pil parametrelerinin elektriksel olarak belirlenmesi gibi birçok durumda sıklıkla kullanılır. Bu modele karşılık gelen matematiksel eşitlikler aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{cases} \frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_2 C_2} + \frac{I_{bat}}{C_2} \\ V_{T_2} = V_{OCV(SoC)} - V_1 - V_2 - I_{bat} R_i \end{cases} \quad (4)$$

Eşitlik 4’te verilen matematiksel ifade Şekil 5b’deki hücre gerilimi değişiminde yaklaşık olarak $3 < t < 4$ s aralığını temsil eder.

3. Pil sağlığı ve tahmin yöntemleri

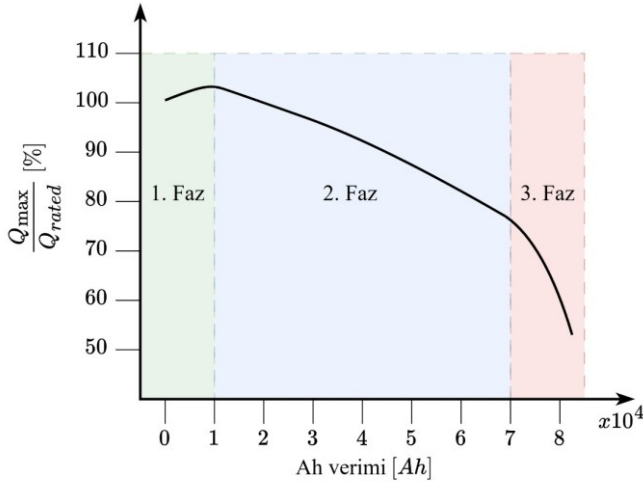
Pil sağlığı (*State of Health-SoH*) pilin belirli bir şarj/deşarj operasyonu geçirmesinden sonra mevcut durumunu ifade eder. Bu durum pildeki kapasite veya güç azalmalarını, pilin kalan ömrünü ve

pil yenileme süreçlerini yönetebilmek için kritik bir ölçüttür. Bu ölçüt doğrudan hücre üzerinden belirlenemeyeceği için genellikle pilin iç ve dış reaksiyonları göz önünde bulundurularak belirlenen bir tahmin yöntemi içerir (Berecibar & ark., 2016). SoH genellikle yüzde cinsinden pilin mevcut kapasitesinin başlangıç kapasitesine oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$SoH = \frac{Q_{max}}{Q_{rated}} \times 100\% \quad (5)$$

Eşitlik 5’te *SoH* pil sağlık yüzdesini, Q_{max} hücrenin mevcut durumdaki kapasitesini ve Q_{rated} hücrenin anma kapasitesini temsil eder. Hücre çevrim sayısı arttıkça hem LLI hem de LAM sebebiyle maksimum kapasite azalır. Bir hücrenin BoL kapasitesinin %80’ine düşmesi yaşamının sonu (*End of Life-EoL*) olarak tanımlanır (Stroe,Knap & Stroe, 2018). Pil hücresinin yaşlanması ile ilgili hem iç hem de dış etkenler olarak farklı mekanizmaların varlığından söz edilse de lityum envanter kaybının (*Loss of Lithium Inventory-LLI*) en önemli faktör olduğu kabul edilmektedir (Shi & ark., 2017). Araştırmacılar, yaklaşık 1000 çevrim gerçekleştirmiş ticari bir lityum iyon pil hücresinin hem anot hem de katot özgül kapasitelerini koruduklarını ancak döngü sayısının artmaya devam etmesiyle sürekli bir LLI kaybının gözlemlendiğini vurgulamışlardır (Striebel & ark., 2003). Aktif malzeme kaybı (*Loss of Active Material-LAM*) hem pozitif hem de negatif elektrodun elektriksel temas kaybı, aktif bölgelerin dirençli yüzey katmanları tarafından bloke edilmesi sebebiyle meydana gelir ve hücrede hem kapasite hem de güç kaybına sebep olur (Birkel & ark., 2017). Pil hücresinin çalışma koşullarına bağlı olarak meydana gelen bu iki etki hücredeki

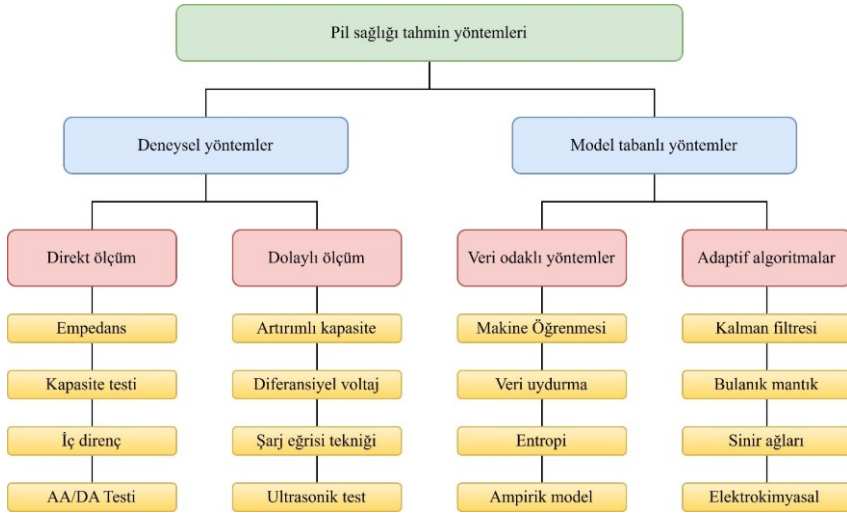
yaşlanma mekanizmalarının en önemli nedenleridir. Bir pil hücresindeki yaşlanma eğrisi Şekil 7’de gösterildiği gibi üç aşamadan oluşur (Lucu & ark., 2020).



Şekil 8: Hücre yaşlanmasının evrimi

Şekil 7’deki hücre yaşlanma evriminde birinci faz hücre yaşamının başlangıcında (*Beginning of Life-BoL*) ilk şarj esnasındaki kapasite artışıyla ilgilidir ve çoğunlukla hücrenin geometrik özelliklerine atfedilir. Bu faz genellikle yaşlanma mekanizmaları belirlenirken dikkate alınmaz. Üçüncü faz kapasite kayıplarının %20 değerini aştığı ve pil hücresinin yaşamının sonu (*End of Life-EoL*) olarak tanımlanan bölgedir. Bu sınırdan sonra pil hücresinin birincil ömrünü tamamladığı ve artık verimli bir şekilde kullanıma uygun olmayacağı kabul edilir. Bu fazda hücre geri döndürülemez bir şekilde kapasite kaybına uğrar ve genellikle sökmeye dayalı ölüm sonrası analiz tekniği ile pil yaşlanmasının deneysel olarak belirlenmesi süreçlerine hizmet eder. İkinci aşama

daha doğrusal bir yapıdadır ve tahmin yöntemleri genellikle bu aralıkta uygulanır. LLI ve LAM bu fazda gerçekleşir ve malzemenin yaşlanması ile sonuçlanır. Pil sağlığı tahmin yöntemleri deneysel ve model tabanlı olmak üzere iki başlık altında incelenir. Doğrudan ölçüm ve dolaylı analiz teknikleri deneysel model altında birleşirken, veri odaklı yöntemler ve adaptif algoritmalar model tabanlı teknikleri oluşturur. Şekil 8’de pil sağlığını değerlendirmek için gerçekleştirilen deneysel ve model tabanlı tekniklerin sınıflandırılması gösterilmiştir (Nuroldayeva & ark., 2023).



Şekil 9: Pil sağlığı tahmin yöntemlerinin sınıflandırılması

Deneysel yöntemler direkt ve dolaylı ölçümler olarak iki gurup altında incelenebilir. Direkt ölçüm teknikleri empedans ölçümü, kapasite testi iç direnç testi ve AA/DA testi olarak dört ayrı gurupta sınıflandırılmıştır. Bu teknikler uygulama kolaylığı bakımından basittir ve hücre voltajı, hücre akımı ve hücre sıcaklığı ölçülerek pil sağlığı izlenir. Hem direkt hem de dolaylı ölçüm

teknikleri deneysel yöntemler olduklarından sadece bireysel pil hücrelerinde fayda sağlayabilir. Hücre geometrisinin, anot ve katot malzemelerinin, hücre kimyasının ve çalışma koşullarının değiştiği durumlarda yeterli performansı göstermeyebilir (Berecibar & ark., 2016).

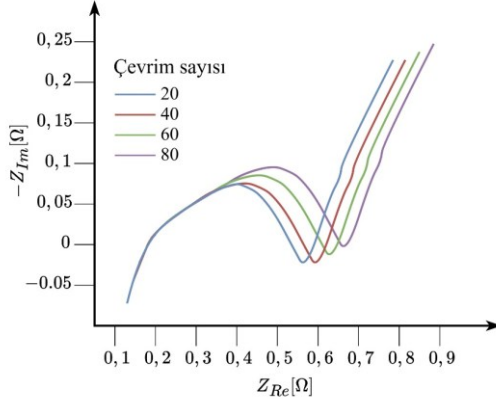
3.1. Direkt ölçüm teknikleri

3.1.1. Empedans ölçümü

Empedans ölçümü bilinen en etkili tahribatsız pil sağlığı belirleme tekniklerinden biridir. Hücre yaşlanması artarken elektrolit iletkenliğindeki bozulma hakkında bilgi sağlar. Bu teknik genellikle tek bir frekans değeri veya bir darbe tekniği yöntemiyle hücrenin direncini belirlemek için basit ve hızlı bir yöntemdir (Tröltzsch, Kanoun & Tränkler, 2006). Bu yöntemin eksikliği pil hücresinde meydana gelen farklı frekanslardaki yaşlanma etkilerinin tek bir frekans değerinde gerçekleştirilen ölçüm ile belirlenememesidir. Bu sebeple bu teknik yerine çoğunlukla elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) tekniği kullanılır. EES tekniği ile empedans ölçümünü belirli bir frekans aralığı için gerçekleştirilebildiğinden belirli frekans aralığındaki yaşlanma etkileri daha kolay belirlenir. EES, pil hücresine sinüzoidal bir akım uygulanmasıyla hücre empedansının karakterize edilmesi işlemidir.

$$Z_{pil} = \frac{V_T}{I_u} = \frac{V_0 e^{j(\omega t + \varphi)}}{I_0 e^{j\omega t}} = Z_0 e^{j\varphi} = Z_0 (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (6)$$

Eşitlik 6’da Z_{pil} pil empedansını temsil eder ve uyartım akımı I_u ve tepki gerilimi V_T büyüklükleri ile hesaplanır. Burada Z_0 pil empedansının genliğini, ω uyartım akımının açısal frekansını ve φ faz gecikmesini temsil eder.



Şekil 10: Pil yaşlanmasının EES ile belirlenen etkisi

Şekil 9 pil yaşlanmasına bağlı olarak EES tekniğinin kullanılmasıyla pil empedansının değişimini temsil etmektedir. Çevrim sayısı arttıkça lityum iyon pil hücresinde bozunma artar ve pil iç direncinin yükselmesiyle empedans yüksek frekanslarda sağa doğru kayar (Li & ark., 2024).

3.1.2. Kapasite testi

Kapasite testi hızlı ve basit uygulanabilir bir yöntem olmakla birlikte hücrenin belirli bir C-oranındaki şarj akımına karşılık ölçülen kapasitesi olarak tanımlanabilir. Hücre tamamen şarj olduğundaki kapasitenin, hücre tamamen deşarj olduğundaki kapasitesi ile karşılaştırılmasıyla belirlenir. Bu tekniğin avantajı belirli koşullarda gerçek yaşlanma değerlerine yaklaşık cevaplar üretebilmesidir. Ancak bu teknik belirli bir koşul altında hücrenin tam şarj ve deşarj olmasını gerektirir (Peng & ark., 2022).

3.1.3. İç direnç ölçümü

İç direnç ölçümü empedans ölçümüne benzer şekilde deneysel olarak gerçekleştirilir. Pil iç direnci elektrot malzemelerinin bozunması ve elektrolit kimyasının dezenformasyona uğraması sebebiyle artar. Pil çevrim sayısı arttıkça bu etkiler artmaya devam eder. Şekil 6'daki eşdeğer devrede gösterilen pil iç direncinin (R_i) artması hem şarj hem dedeşarj anında iç direnç üzerine düşen gerilimin (V_i) artmasına sebep olur.

$$R_{iç} = \frac{\Delta V_T}{\Delta I_{bat}} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de $R_{iç}$ hücre iç direncini, ΔV_T pil terminal gerilimindeki ani değişimi ve ΔI_{bat} hücreye uygulanan şarj veyadeşarj akımını temsil eder. Bu durum şarj esnasında hücre şarj gerilimini düşürürkendeşarj esnasında hücreden alınan terminal geriliminin azalmasına sebep olur. İç dirençteki bu değişim referans alınarak pilin sağlığı tahmin edilebilir. Bu teknik temelde DA testi olarak bilinir. AA testinde ise direnç ve kapasitör elemanlarından oluşan ek bir köprü devresi kurularak belirli bir frekans aralığında gerilimler uygulanır. Bu tekniğin avantajı ise faz açısı boyunca empedansın gerçek ve sanal bileşenlerine ayrılarak iç direncin Nyquist çizimi üzerinde belirlenebilmesidir (Westerhoff & ark., 2016).

3.2. Dolaylı ölçüm teknikleri

3.2.1. Artırımlı kapasite ve diferansiyel voltaj testi

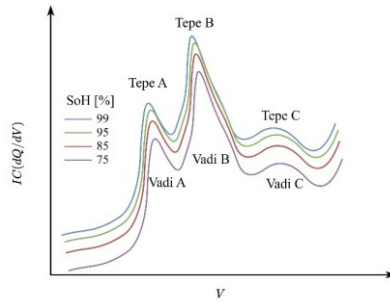
Artırımlı kapasite analizi (*Incremental Capacity Analysis - ICA*) lityum tabanlı pil teknolojilerinin bozunma etkilerini

belirlemek ve kalan kullanılabilir kapasite (*Remaining Usage Capacity-RUL*) miktarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. ICA yönteminin temel prensibi belirli bir gerilim altında şarj kapasitesinin değişim oranını elde etmektir. Diğer bir ifadeyle şarj kapasitesinin pil hücre gerilimine göre türevini hesaplamaktır. Diferansiyel Voltaj Analizi (*Differential Voltage Analysis-DVA*) ise ICA'nın tam tersidir ve hücre kapasitesinin hücre gerilimine göre türevi olarak hesaplanır (Zheng & ark., 2018).

$$dQ/dV \approx \Delta Q/\Delta V \quad (8)$$

$$dV/dQ \approx \Delta V/\Delta Q \quad (9)$$

Eşitlik 8'de ve Eşitlik 9'da Q pil hücre kapasitesini, V hücre gerilimini temsil eder. Hem ICA hem de DVA dolaylı SoH belirleme teknikleridir. Her iki teknikte birbirine benzerlik gösterir ve eğri grafikleri elde edildiğinde eğride tepe ve vadi noktaları oluşur. Bu tekniklerde genellikle akım ve gerilim ölçümleri gerçekleştirilir. Diğer tüm ölçümler dolaylı veya türetilmiş ölçümlerdir (Beatty, Strickland & Ferreira, 2024).



Şekil 11: Farklı SoH oranlarındaki hücrelerin ICA eğrileri

Şekil 9 farklı SoH oranlarındaki pil hücreleri üzerinde gerçekleştirilen ICA testlerinden elde edilen eğrileri temsil etmektedir. Sabit şarj akımında meydana gelen tepe noktalarındaki azalma pil hücresinin yaşlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Ancak hem ICA hem de DVA tekniklerinin en büyük dezavantajı ölçüm sırasında meydana gelen gürültüye oldukça duyarlı olmaları ve bu gürültülerin eğrilerde istenmeyen tepe veya vadi bölgeleri meydana getirebilmesidir.

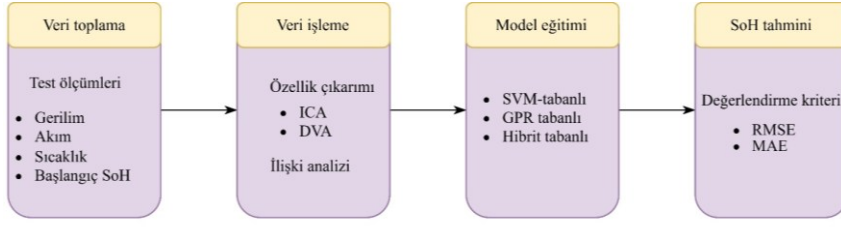
Dolaylı ölçüm tekniklerinden şarj eğrisi tekniği farklı yaşlanma periyotlarından geçmiş pil hücrelerinin şarj eğrileri üzerinde bir ilişki belirleme temeline dayanmaktadır. Şarj eğrilerinin birbirlerine oldukça benzerlik gösterebileceği bilinmektedir. Ancak çevrim sayısının artmasına bağlı olarak pilin yaşlanması hücre şarj süresinin kısalmasına ve hücrede gerilim değişiminin daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu değişimler bu tekniğin ilham kaynağı olmuştur (Guo & ark., 2014). Diğer dolaylı ölçüm tekniği olan ultrasonik test pil sağlığını yapısal olarak izleme olanağı sunan tahribatsız yöntemlerden biridir. Teste tabi pil hücresi ultrasonik dalgalara maruz bırakılır ve hücredeki yapısal değişimlerin izlenmesine olanak tanır (Wu & ark., 2019).

3.3. Veri odaklı yöntemler

3.3.1. Makine öğrenmesi

Makine öğrenmesi tekniği veri odaklı bir model olduğundan bu teknikte hücre elektriksel ve fiziksel değişimleri sürekli ölçülmelidir. Ancak deneysel tahmin tekniklerinden farklı olarak veri odaklı teknikler geçmiş ölçümlerden elde edilen verileri de kullanır. Şekil 11 veri odaklı teknikler arasında son yıllarda sıklıkla

kullanılan makine öğrenmesi tekniğine ait işlem adımlarını gösterir (Ren & Du, 2023).



Şekil 12: Makine öğrenmesi tabanlı SoH tahmini işlem adımları

Bu teknikte birinci ve en kritik adım hücre üzerinden elde edilen gerilim, akım, sıcaklık ölçümlerinin doğru ve mümkün olduğu kadar gürültüsüz elde edilmesidir. Bu veriler çeşitli teknikler kullanarak yaşlanma ile ilişkili nicelikleri belirler. Gerçek SoH verilerinden oluşturulan eğitim verileri ile makine öğrenmesi tabanlı teknikler kullanılarak elde edilen test verileri karşılaştırılır ve modeller arasındaki ilişki belirlenir. Veri odaklı tekniklerden ikincisi olan veri uydurma tekniği tıpkı bir pilin açık devre gerilimi ile şarj doluluk oranı arasındaki ilişkinin belirlendiği eğri uydurma tekniğine benzer şekilde SoH'yi üstel veya polinom ilişkisi kurarak belirleme işlemidir.

3.4. Adaptif yöntemler

3.4.1. Kalman filtresi

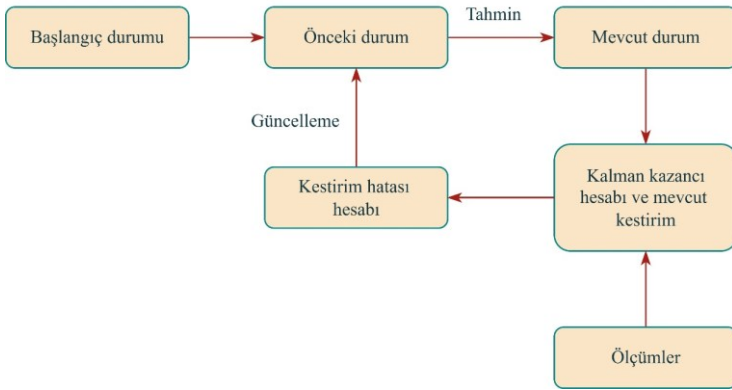
İlk olarak 1960 yılında bilim dünyasına kazandırılan kalman filtresi doğrusal bir sistemin önceki ve mevcut durumlarına dayanarak gelecekteki durumlarını tahmin etme işlemidir. Bu işlem tahmin ve güncelleme olmak üzere genelde iki adımda gerçekleşir. Birinci adımda geçmiş bilgiler kullanılarak sistemin durumu tahmin

edilir. Güncelleme adımında tahmin değerleri mevcut gözlemlerle karşılaştırılır ve adımlar tekrarlanır (Khodarahmi & Maihamei, 2023). Genişletilmiş kalman filtresi ve Koksuz kalman filtresi pil sağlığı tahmin yöntemlerinde sıklıkla kullanılan kalman filtresi yöntemleridir.

$$SoH = \frac{R_{EoL} - R_m}{R_{BoL}} \quad (10)$$

$$R_{EoL} = 2 \cdot R_{BoL} \quad (11)$$

Eşitlik 10'da ve Eşitlik 11'de R_{BoL} hücrenin yaşam başlangıcındaki direncini, R_m hücrenin mevcut direncini, R_{EoL} hücrenin yaşam sonundaki direncini temsil eder. Eşitlik 11 pil iç direncinin, başlangıçtaki değerinin iki katına çıkmasıyla hücrenin yaşamının sonuna ulaştığının ifade eder.



Şekil 13: Kalman filtresi uygulama işlem basamakları

Şekil 12'de kalman filtresinin genel uygulama işlem basamakları gösterilmiştir. Başlangıç durumundaki pil gerilimi, akımı ve sıcaklığı gibi bilgiler önceki durum ile karşılaştırılarak

mevcut durum tahmini gerçekleştirilir. Elde edilen tahmin gerçek ölçüm sonuçları iler karşılaştırılır ve tahmin hatası belirlenerek birinci adım güncellenir. Kalman filtresi türevleri arasında pil SoC tahmini, SoH tahmini uygulamalarında en çok kullanılan teknik adaptif kalman filtresidir.

Adaptif yöntemlerden ikincisi olan bulanık mantık özellikle doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde oldukça güçlü bir araçtır. Bu teknik giriş katında bir bulanıklaştırıcıdan, orta katmanda uzman deneyimlere dayalı oluşturulan kural tabanından ve çıkış katında bir durulaştırıcıdan oluşur. Pil sağlığı tahmin işlemelerinde bulanık tabanlı uygulamaların kullanılması giriş ve çıkış değişken sayılarının kolaylıkla artırılabilmesi sebebiyle oldukça elverişlidir. Bu durum sınırlı sayıda değişkenler yerine hücre dışında gerçekleşen tüm reaksiyonların pil sağlığına etkisinin incelenmesine imkn verebilir.

4. Sonuç

Sonuç olarak pil sağlığı, özellikle pil teknolojilerinin yoğun olarak kullanıldığı elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri, enerji hasat sistemleri için kritik bir öneme sahiptir. Pil hücrelerinin hem i hem de dış reaksiyonlarının sebep olduğu yaşlanma mekanizmalarının belirlenmesi, bu mekanizmalar için prognoz işleminin gerçekleştirmesi hücrelerin etkili ve verimli kullanılmaları için büyük önem arz etmektedir. Ek olarak pil sağlığının doğru tahmini, hücre için gerçekleştirilecek proaktif işlemlerin çeşitlendirilmesine ciddi katkı sağlar. Pil sağlığı belirleme algoritmalarının farklı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Deneysel modeller gerçeğe daha yakın sonuçlar sağlarken bu sonuçların elde edilmesinde pil laboratuvar testlerine alınabileceği

gibi hizmet dışı da kalabilir. Dolaylı lm teknikleriyle bir dizi kapasite eğrisi üzerinden pil sağlığı tahmin edilebilmektedir. Bu yöntemler ölçüm temeline dayandığından gerçeğe yakın sonuçlar sağlayabilir ancak ölçümdeki gürültülere oldukça duyarlıdır. Veri odaklı modeller gerçek yaşlanma koşullarının belirlenmesi için ciddi bir veri altyapısına sahip olmayı gerektirir. Ancak bu tekniklerin benzer hücreler üzerinde ciddi bir doğrulama kabiliyetleri mevcuttur. Adaptif yöntemler etkili tahmin sonuçları sergilemesine rağmen hem veri bazında hem de matematiksel olarak hesaplama yükü gerektirir. Derinlemesine devam eden araştırmalar sayesinde pil sağlığı tahmin algoritmaları hem mevcut pil teknolojilerinin verimli ve uzun yıllar kullanılmasında hem de gelecekteki pil teknolojilerinin yaşlanma mekanizmalarının iyileştirilmesinde önemli bir yol gösterici olacaktır.

Kaynaklar

Beatty M, Strickland D, & Ferreira P. (2024). A Review of Methods of Generating Incremental Capacity–Differential Voltage Curves for Battery Health Determination. *Energies*, 17(17), 4309.

Berecibar M, Gandiaga I, Villarreal I, Omar N, Van Mierlo J, & Van den Bossche P. (2016). Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 572-587.

Birkl C R, Roberts M R, McTurk E, Bruce P G, & Howey D A. (2017). Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 341, 373-386.

Campagna N, Castiglia V, Miceli R, Mastromauro R A, Spataro C, et al. (2020). Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study. *Energies*, 13(16), 4085.

Chen J, Zhang Y, Wu J, Cheng W, & Zhu Q. (2023). SOC estimation for lithium-ion battery using the LSTM-RNN with extended input and constrained output. *Energy*, 262, 125375.

Çorapsız M R, & Kahveci H. (2023). A study on Li-ion battery and supercapacitor design for hybrid energy storage systems. *Energy Storage*, 5(1), e386.

Çorapsız M R, & Kahveci H. (2023). An overview of frequency-based power split strategies in electric vehicles with battery/supercapacitor hybrid energy storage system. *Energy Storage*, 5(6), e429.

Ghiji M, Novozhilov V, Moinuddin K, Joseph P, Burch I, et al. (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*, 13(19), 5117.

Guo Z, Qiu X, Hou G, Liaw B Y, & Zhang C. (2014). State of health estimation for lithium ion batteries based on charging curves. *Journal of Power Sources*, 249, 457-462.

Horiba T. (2014). Lithium-Ion Battery Systems. *Proceedings of the IEEE*, 102(6), 939-950.

Khodarahmi M, & Maihami V. (2023). A Review on Kalman Filter Models. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 727-747.

Li C, Yang L, Li Q, Zhang Q, Zhou Z, et al. (2024). SOH estimation method for lithium-ion batteries based on an improved equivalent circuit model via electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Energy Storage*, 86, 111167.

Liu G, Wan W, Nie Q, Zhang C, Chen X, et al. (2024). Controllable long-term lithium replenishment for enhancing energy density and cycle life of lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 17(3), 1163-1174.

Liu Y, Zhang R, Wang J, & Wang Y. (2021). Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience*, 24(4).

Lucu M, Martinez-Laserna E, Gandiaga I, Liu K, Camblong H, et al. (2020). Data-driven nonparametric Li-ion battery ageing model aiming at learning from real operation data - Part B: Cycling operation. *Journal of Energy Storage*, 30, 101410.

Nurolidayeva G, Serik Y, Adair D, Uzakbaiuly B, & Bakenov Z. (2023). State of Health Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Energy Research*, 2023(1), 4297545.

Peng J, Meng J, Chen D, Liu H, Hao S, et al. (2022). A Review of Lithium-Ion Battery Capacity Estimation Methods for Onboard Battery Management Systems: Recent Progress and Perspectives. *Batteries*, 8(11), 229.

Ren Z, & Du C. (2023). A review of machine learning state-of-charge and state-of-health estimation algorithms for lithium-ion batteries. *Energy Reports*, 9, 2993-3021.

Saxena S, Xing Y, Kwon D, & Pecht M. (2019). Accelerated degradation model for C-rate loading of lithium-ion batteries. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 438-445.

Scrosati B. (2011). History of lithium batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 15(7), 1623-1630.

Shi Q, Liu W, Qu Q, Gao T, Wang Y, et al. (2017). Robust solid/electrolyte interphase on graphite anode to suppress lithium inventory loss in lithium-ion batteries. *Carbon*, 111, 291-298.

Shrivastava P, Soon T K, Idris M Y I B, Mekhilef S, & Adnan S B R S. (2022). Model-based state of X estimation of lithium-ion battery for electric vehicle applications. *International Journal of Energy Research*, 46(8), 10704-10723.

Striebel K, Guerfi A, Shim J, Armand M, Gauthier M, & Zaghib K. (2003). LiFePO₄/gel/natural graphite cells for the BATT program. *Journal of Power Sources*, 119, 951-954.

Stroe A I, Knap V, & Stroe D I. (2018). Comparison of lithium-ion battery performance at beginning-of-life and end-of-life. *Microelectronics Reliability*, 88-90, 1251-1255.

Thi M T, Kim C, Kwon S, Kang H, Ko J M, et al. (2023). Investigation of the Properties of Anode Electrodes for Lithium–Ion Batteries Manufactured Using Cu, and Si-Coated Carbon Nanowall Materials. *Energies*, 16(4), 1935.

Tröltzsch U, Kanoun O, & Tränkler H-R. (2006). Characterizing aging effects of lithium ion batteries by impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 51(8), 1664-1672.

URL-1. ORION 18650/25 2500mAh (10C). (10/11/2024 tarihinde <https://static.ticimax.cloud/37661/uploads/dosyalar/orion-18650p-2500.pdf> adresinden ulaşılmıştır.)

Volta A. (1800). On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kind, letter to the Right Hon. Sir Joseph Banks, KBPRS, Philos. *Trans*, 2, 430.

Wang Y, Zhang C, & Chen Z. (2016). Model-based State-of-energy Estimation of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles. *Energy Procedia*, 88, 998-1004.

Westerhoff U, Kroker T, Kurbach K, & Kurrat M. (2016). Electrochemical impedance spectroscopy based estimation of the state of charge of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 8, 244-256.

Wu Y, Wang Y, Yung W K C, & Pecht M. (2019). Ultrasonic Health Monitoring of Lithium-Ion Batteries. *Electronics*, 8(7), 751.

Xiong R, Pan Y, Shen W, Li H, & Sun F. (2020). Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110048.

Yoshino A. (2012). The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), 5798-5800.

Zheng L, Zhu J, Lu D D-C, Wang G, & He T. (2018). Incremental capacity analysis and differential voltage analysis based state of charge and capacity estimation for lithium-ion batteries. *Energy*, 150, 759-769.

Zhou L, Zhang K, Hu Z, Tao Z, Mai L, et al. (2018). Recent Developments on and Prospects for Electrode Materials with Hierarchical Structures for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 8(6), 1701415.

Zhou W, Zheng Y, Pan Z, & Lu Q. (2021). Review on the Battery Model and SOC Estimation Method. *Processes*, 9(9), 1685.

BÖLÜM IV

Yüksek Seviyeli Sentezleme ile FPGA’de Dijital Devre Tasarımı

Bahadır ÖZKILBAÇ¹
Tevhit KARACALI²

1. Giriş

Elektronik devreler, analog ve dijital olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Analog ve dijital devreler, elektronik herhangi bir sistemin temel yapı taşlarıdır (Agarwal & ark, 2005). Her iki devre türü de farklı sinyal işleme yöntemlerini kullanmaktadır. Dijital devreler ayrık zamanlı nicelikler üzerinde çalışırken, analog devreler

¹ Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3384-1565, bahadir.ozkilbac@atauni.edu.tr

² Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3647-6372, tevhith@atauni.edu.tr

sürekli zamanlı nicelikler üzerinde çalışmaktadır (Schell & ark., 2019).

Analog devreler en fazla milivolt seviyelerindeki küçük sinyaller ile uğraşmalarından kaynaklanan hassasiyet nedeniyle elektriksel gürültülere karşı daha duyarlıdır; bu da sinyalin bozulmasına yol açabilmektedir. Buna karşılık, dijital devreler 0 (düşük voltaj seviyesi) ve 1 (yüksek voltaj seviyesi) seviyeleri ile çalıştığından, gürültüye karşı daha dayanıklıdır ve sinyal bozulması daha az görülmektedir. Tasarım bakımından, analog devreler nispeten daha basit bileşenler içermektedir. Fakat karmaşık işlemler için doğrusal olmayan özellikleri ve gürültü problemleri gibi dezavantajlara sahiptir. Dijital devreler ise daha karmaşık olsa da işlemleri ayrık ve doğruluk odaklıdır. Bu nedenle, analog devreler hassas ölçüm ve kontrol uygulamalarında, dijital devreler ise bilgisayar sistemleri, mikroişlemciler ve sayısal iletişim gibi hızlı ve güvenilir veri işleme gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır.

Dijital devreler vakum tüpleriyle başlayıp günümüzde milyonlarca transistör içeren tümleşik devreler haline gelmişlerdir (Collett, 2013). Bu devreler bilgiyi 0 ve 1 rakamlarıyla temsil etmektedirler. Devrelerde 1 ve 0 sırasıyla yüksek voltajı ve düşük voltajı ifade etmektedir.

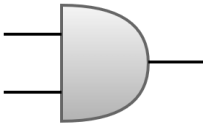
Dijital devreler, mantıksal (lojik) devrelerden oluşmaktadır. Lojik devreler, dijital devrelerin temelini oluşturur ve bu yapı taşları sayesinde sayısal sistemler tasarlanır, mantıksal işlemler gerçekleştirilir ve veriler işlenir. Bilgisayarlar, mikrodenetleyiciler ve dijital sinyal işleme sistemleri gibi birçok dijital sistem lojik devreler kullanılarak tasarlanmaktadır.

Lojik devreler, Boolean cebri kullanılarak bir fonksiyon şeklinde ifade edilmektedir. Bunun için ve, veya ve değil olmak üzere üç işlem kullanılmaktadır. Bu işlemlere ait doğruluk tablosu Tablo 1’de ve semboller Şekil 1’de verilmiştir.

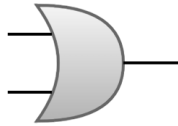
Bir lojik devre ve, veya ve değil işlemlerinin kombinasyonlarından oluşan bir fonksiyon kullanılarak tasarlanmaktadır. Tasarım yapılırken öncelikle lojik devrenin davranışını belirleyecek doğruluk tablosu oluşturulur. Doğruluk tablosundaki değişkenlere Karnaugh haritası gibi yöntemlerle sadeleştirme işlemi yapılır ve böylece tasarlanacak dijital devrenin en sade fonksiyonu elde edilmiş olur. Elde edilen fonksiyonun mantıksal devre şeması çizilerek dijital devre tasarımı elde edilir.

Tablo 1: Lojik kapıların doğruluk tabloları

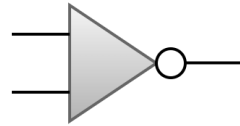
a	b	a ve b	a veya b	değil a	değil b
0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	0	0



VE



VEYA



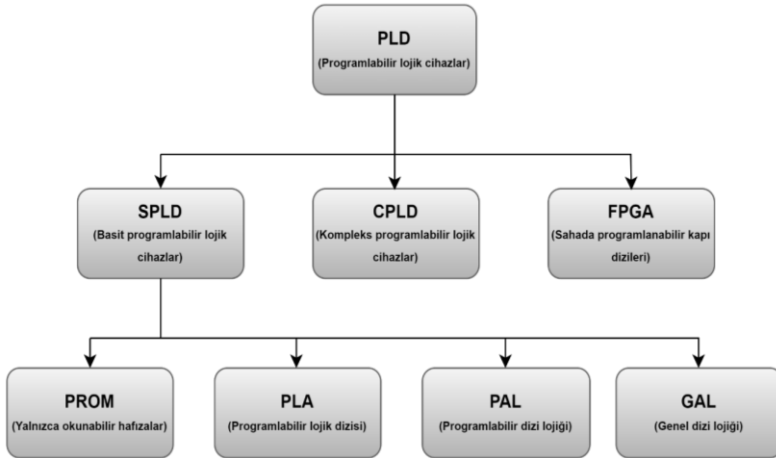
DEĞİL

Şekil 1. Lojik kapıların sembolleri

Bir lojik devre ve, veya ve değil işlemlerinin kombinasyonlarından oluşan bir fonksiyon kullanılarak tasarlanmaktadır. Tasarım yapılırken öncelikle lojik devrenin davranışını belirleyecek doğruluk tablosu oluşturulur. Doğruluk

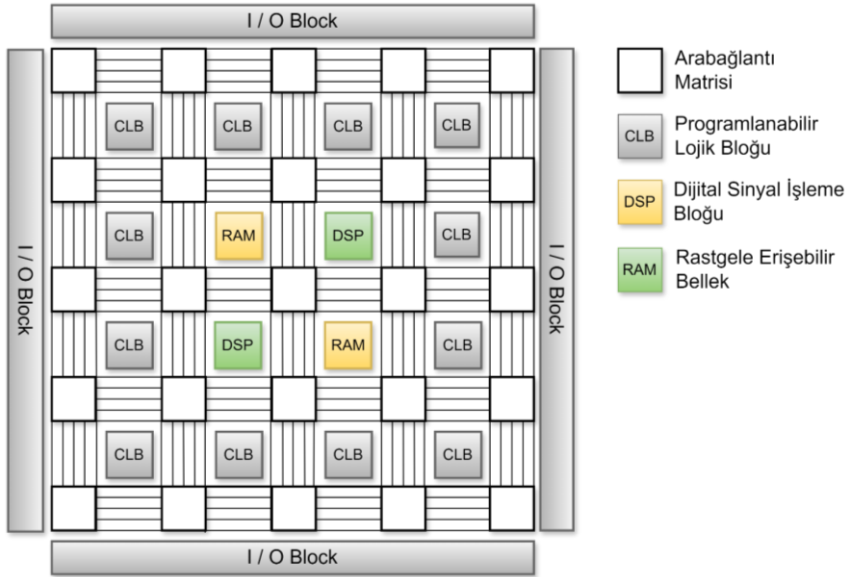
tablosundaki değişkenlere Karnaugh haritası gibi yöntemlerle sadeleştirme işlemi yapılır ve böylece tasarlanacak dijital devrenin en sade fonksiyonu elde edilmiş olur. Elde edilen fonksiyonun mantıksal devre şeması çizilerek dijital devre tasarımı elde edilir.

Basit lojik devrelerde kapılar kullanılarak tasarım yapılırsa da daha karmaşık dijital devrelerde programlanabilir lojik cihazlar (PLD) tasarımcıya oldukça büyük kolaylık sağlamaktadır (Lemieux & ark., 2004). PLD'ler, şekil 2'den de görüldüğü üzere basit programlanabilir lojik cihazlar (SPLD), kompleks programlanabilir lojik cihazlar (CPLD) ve sahada programlanabilir kapı dizileri (FPGA) olmak üzere üç çeşitir (İsa & ark., 2015). SPLD'ler yalnızca okunabilir hafızalar (PROM), programlanabilir lojik dizisi (PLA), programlanabilir dizi lojiği (PAL) ve genel dizi lojiklerinden (GAL) oluşmaktadır (Panigrahy, Jena & Pradhan, 2020). FPGA'ler, en gelişmiş olan ve günümüzde en yaygın kullanılan programlanabilir lojik cihazlardır. (Anderson, 2023).



şekil 2. Programlanabilir lojik cihazlar

FPGA'ler, programlanabilir mantık blokları (CLB), hafıza blokları, dijital sinyal işleme (DSP) blokları ve programlanabilir ara bağlantılardan oluşan dijital tümleşik devrelerdir (Özkılbaç, 2020). Şekil 3'te bir FPGA'in yapısını gösteren görüntü verilmiştir. Gerçek bir FPGA içerisinde bu bloklardan çok daha fazla bulunmaktadır.



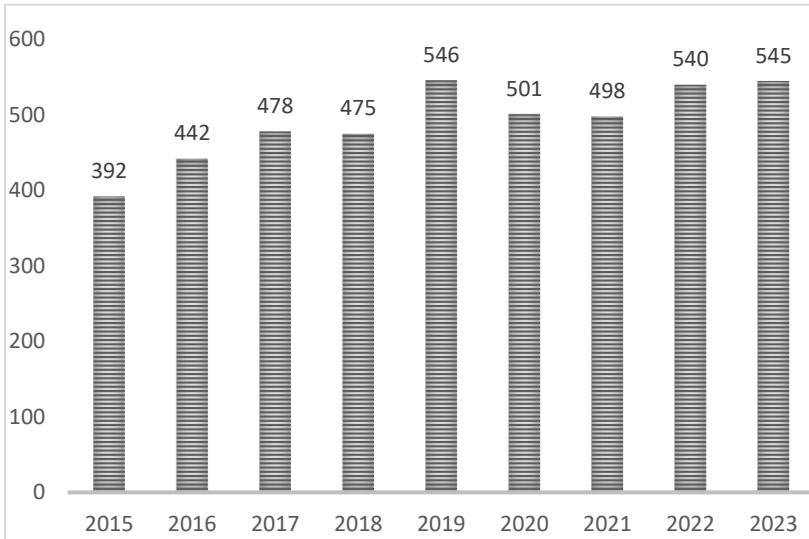
Şekil 3. FPGA'in yapısı

Yeniden yapılandırılabilme, paralel çalışma ve tasarım sürecinin kısa olması gibi avantajlarından dolayı FPGA'lerin dijital devre tasarımında kullanımı oldukça yaygındır (Mao, Yang & Huang, 2023).

FPGA'ler genelde VHDL, Verilog ve SystemVerilog gibi donanım tanımlama dilleri kullanılarak programlanmaktadır (Bruno ve ark., 2024). Donanım tanımlama dilleri kullanılarak yapılan programlamada tasarımcı devrenin en ince detayına hâkim

olmaktadır. Bu da hız ve kullanım alanını istenildiği gibi optimize etme açısından avantaj sağlamaktadır. Fakat tasarımıyla ilgili detaylarla uğraşmak tasarım zorluğunu ve sürecini artırmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar yüksek seviyeli sentezleme (HLS) gibi farklı alternatif yollara yönelmişlerdir.

Yüksek seviyeli sentezleme, C, C++, SystemC ve MATLAB gibi yüksek seviyeli diller kullanılarak daha az karmaşıklıkta ve daha az süreçte FPGA'in programlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu yüzden günümüzde oldukça sık tercih edilen bir tasarım yöntemidir. Şekil 4'te elektrik-elektronik ve bilgisayar bilimleri alanında yüksek seviyeli sentezleme konusunda yıllara göre çalışma sayıları verilmiştir (WOS, 2024).



Şekil 4. Yüksek seviyeli sentezlemenin yıllara göre çalışma sayısı

Yüksek seviyeli sentezleme (HLS), yüksek seviyeli dilde yazılan kodu otomatik olarak bir donanım tasarımına dönüştürme

işlemidir (Curzel, 2024). HLS, tasarım sürecini kolaylaştırıp ve kısaltarak tasarımcının üretkenliğini artırmaktadır. Aşağıda HLS'in avantajları maddelenmiştir:

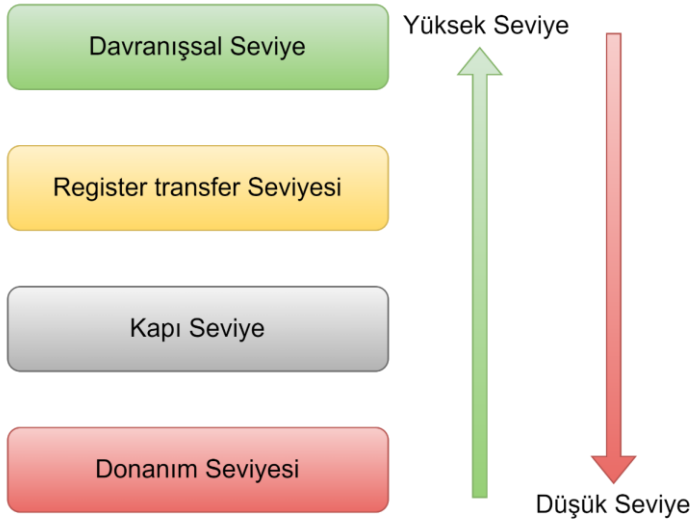
- Tasarım sürecini kısaltır: Donanım tanımlama dilleri ile tasarım yapmak oldukça ayrıntılı ve zordur. Bu da tasarım sürecini uzatmaktadır. HLS, C ve C++ gibi yüksek seviyeli programlama dilleri ile tasarım yapmaya olanak sağladığından süreci kısalmaktadır.
- Paralellik ve performans optimizasyonu: FPGA üretici firmalarının sağlamış olduğu HLS araçları ile paralelleştirme ve boru hattı (pipelining) gibi teknikler kullanılarak performans ve kullanım alanı optimize edilebilmektedir.
- Donanım ve yazılım tasarımını birleştirir: HLS, donanım tasarımı hakkında çok fazla bilgiye sahip olmayan yazılımcıların donanım tasarımı yapmasına olanak sağlar. Böylece yazılım ve donanım arasında bir köprü görevi yapmaktadır.
- Kolay doğrulama ve simülasyon: HLS'de yapılan tasarımın test kodları, C, C++ ve MATLAB gibi diller ile yazıldığından simülasyon daha kolaydır.

2. FPGA Soyutlama Seviyeleri

Günümüzde tümleşik devrelerdeki transistör sayısı yüz milyonlara ulaşmıştır. Bu yüzden tümleşik devrelerin doğrudan işlenmesi giderek zorlaşmaktadır. Bu karmaşıklığı yönetmek için çeşitli soyutlama seviyeleri belirlenmiştir. Bu soyutlama seviyeleri davranışsal seviye, register transfer seviyesi, kapı seviyesi ve

donanım seviyesi olmak üzere dört çeşittir (Sarıtaş, 2013). Yüksek seviyeli sentezleme de aslında bir soyutlama çeşididir. Fakat yüksek seviyeli sentezleme donanım tanımla dilleri kullanılarak yapılmadığından diğer dört soyutlama çeşidinden farklıdır. Bu yüzden yüksek seviyeli sentezleme ayrı bir başlıkta anlatılacaktır.

Şekil 5’te bu dört soyutlama seviyesi ait görüntü verilmiştir. Aşağıdan yukarıya çıkıldıkça soyutlama seviyesi artmakta, yukarıdan aşağıya inildikçe ise soyutlama seviyesi düşmektedir. Soyutlama seviyesi arttıkça tasarım kolaylaşırken, soyutlama seviyesi düştükçe tasarım zorlaşmaktadır.



Şekil 5. FPGA soyutlama seviyeleri

2.1. Davranışsal Seviye

Bu seviyede yapılan soyutlamada tasarımın fonksiyonel tanımlanması yapılmaktadır. Saat sinyali kullanılmadığından sinyal geçişleri anahtarlama zamanına bağlıdır. Davranışsal seviyede

soyutlama çoğunlukla simülasyon gerçekleştirmek için kullanılmaktadır.

2.2. Register Transfer Seviyesi

Register transfer seviyesinde soyutlamada register gibi depolama elemanları, toplayıcı, karşılaştırıcı gibi kombinasyonel devreler ve flip-flop gibi sıralı devreler kullanılmaktadır. Sinyal geçişleri saat sinyali ile yapılmaktadır.

2.3. Kapı Seviyesi

Kapı seviyesinde soyutlamada VE, VEYA ve DEĞİL gibi lojik kapılar ve depolama elemanları kullanılmaktadır.

2.4. Donanım Seviyesi

Donanım seviyesi soyutlamada tasarım, yonganın farklı programlanabilir hücrelerine yerleştirilir. Hücreler arasındaki bağlantılar da tasarımcı tarafından yapılmaktadır.

3. Yüksek Seviyeli Sentezleme Araçları

Farklı firmalar tarafından piyasaya sunulmuş çeşitli HLS araçları mevcuttur. Bu firmaların sunmuş olduğu lisanslar, akademik, ticari ve Berkeley yazılım dağıtımı (BSD) olmak üzere üç çeşittir (Nane & ark., 2016). Her bir aracın desteklediği sayı gösterimi ve kullandığı dil farklıdır. Ayrıca bazı yüksek seviyeli sentezleme araçları simülasyon kodu yazmayı desteklerken bazıları desteklememektedir.

Sentezleme araçlarından kullanılan sayı gösterimleri genellikle kayan noktalı sayı gösterimi ve sabit noktalı sayı gösterimidir. Bu iki sayı gösterimi dijital sistemlerde yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Özkılbaç & Karacalı., 2024) Tablo 2’de

piyasada yaygın olarak kullanılan HLS araçları verilmiştir (O'Loughlin & ark., 2014; Intel 2024; Mathworks 2024, Roane 2024; Synopsys, 2024; Pilato & ark., 2012; Bluespec 2024).

Tablo 2. Piyasada yaygın olarak kullanılan HLS araçları

Derleyici	Firma	Lisans	Giriş	Çıkış
Vivado HLS	Xilinx	Ticari	C, C++, SystemC	VHDL, Verilog, SystemC
Intel HLS Derleyici	Intel	Ticari	C, C++	Verilog
HDL Coder	Matlab	Ticari	MATLAB, Simulink, Stateflow, Simscape	VHDL, Verilog
Stratus HLS	Cadence Design Systems	Ticari	C, C++, SystemC	RTL
Synphony C	Synopsys	Ticari	C, C++	VHDL, Verilog, SystemC
Bambu	PoliMi	Akademik	C	VHDL, Verilog
Bluespec	Bluespec, Inc.	BDS-3	C, C++, Fortran	System Verilog

4. Yüksek Seviyeli Sentezleme (HLS)

Yüksek seviyeli sentezleme literatürde mimari seviyede sentezleme olarak da adlandırılmaktadır (Zhang & ark., 2008). Teknoloji ilerledikçe sistemler daha karmaşık hale gelmektedir. Bu yüzden yüksek seviyeli sentezleme kullanmak giderek bir gereklilik olmaya başlamıştır. Yüksek seviyeli sentezleme ile yazılım ve donanım arasında köprü kurulduğundan tasarımcı verimliliği artmaktadır.

Yüksek seviyeli sentezleme 1980’lerde ortaya çıkmasına rağmen henüz daha dijital donanım tasarımcılarının ilk tercihi değildir (Vanhoof & ark., 2012). Donanım tanımlama dilleri kullanılarak yapılan tasarım daha çok tercih edilmektedir. Çünkü donanım tanımlama dilleri kullanılarak yapılan tasarımda daha fazla detaya hâkim olduğundan performans ve kullanım alanı açısından optimize edebilmek tasarımcının elindedir.

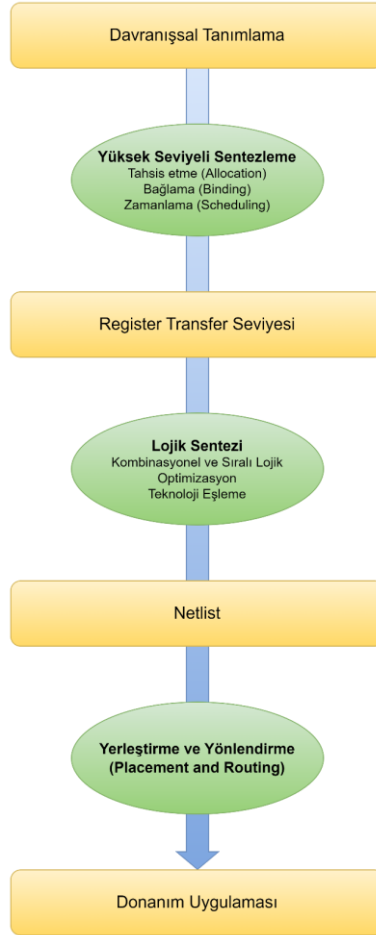
Tasarımı en yüksek derecede optimize etme arzusu tasarımcıların donanım tanımlama dillerini daha çok tercih etmesine neden olmaktadır. Tüm bunlara rağmen HLS kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır. Yüksek seviyeli sentezlemenin kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

- Görüntü işleme video kodlama: Gerçek zamanlı video işleme, sıkıştırma ve kodlama algoritmalarının donanımsal olarak hızlandırılması. (Cortes, Velez & Irizar, 2016; Liu & ark., 2016)
- Makine öğrenimi ve yapay zeka: Makine öğrenimi algoritmalarının hızlandırılması için donanımsal çözümler geliştirilmesi. (Zhao & ark., 2020; Cong & ark., 2022)
- Kriptografi ve güvenlik uygulamaları: Kriptografik algoritmaların FPGA ve ASIC gibi donanımlara uyarlanarak hızlandırılması. (Pearce & ark., 2023; Samir & ark., 2019)
- Ağ altyapıları: Yüksek hızlı veri iletimi ve paket işleme gibi işlemlerin FPGA üzerinde hızlandırılması (Visconti & ark., 2021; Restuccia & Melodia., 2020).

- Gömülü Sistemler: Gerçek zamanlı işlem gerektiren gömülü sistem uygulamaları için HLS, daha hızlı ve optimize edilmiş donanım çözümleri sunar. (Richa & ark., 2023; Hosseinabady, Zainol & Nunez-Yanez, 2019)

Yüksek seviyeli sentezlemede tasarımcı tarafından yazılan kodun donanıma dönüşümü aslında iki aşamalı olarak d    n lebilir. İlk aşama yüksek seviyeli dilde yazılan kodun register transfer seviyeye (RTL) yani VHDL ve Verilog kodlarına d n   t r lmesi, ikinci aşama ise elde edilen donanım tanımlama dilinin donanıma d n   t r lmesidir. Bu işlemlerin hepsi sentezleme araçları tarafından yapılmaktadır.

Şekil 6'dan da görüleceği üzere genel olarak modern bir sentezleme aracı yüksek seviyeli sentezleme, lojik sentezi ve yerleştirme ve yönlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Bu modern sentezleme araçları bir davranışsal tanımlı yapısal bir bileşen a ına d n   t rmektedir. Daha sonra yapısal a  sentezlenip optimize edilerek fiziksel olarak bir düzene yerleştirilir ve yönlendirilir.



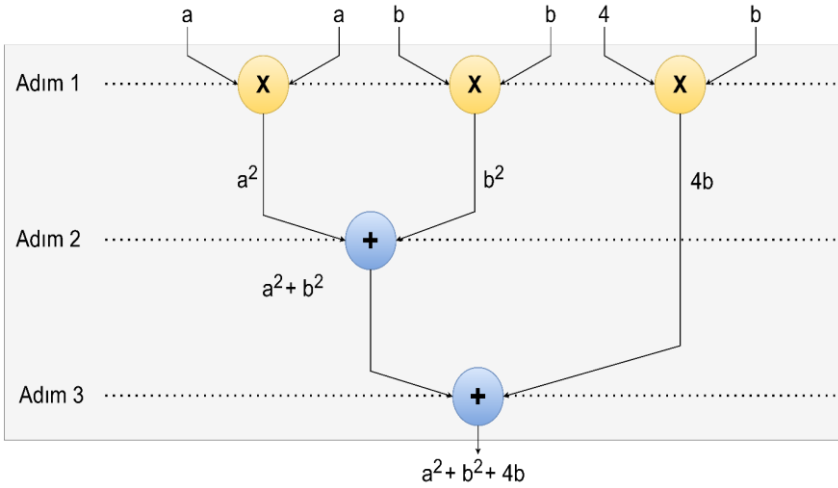
Şekil 6. Donanım geliştirme için sentezleme akışı

Yüksek seviyeli sentezleme ile C ve C++ gibi yüksek seviyeli dilde yazılan kod RTL'e dönüştürülür. Lojik sentezi ve yerleştirme ve yönlendirme aşamalarında ise RTL, donanıma dönüştürülür.

Yüksek seviyeli sentezleme aşamasında ilk olarak davranışsal tanımlamada bulunan hesaplamalar için gerekli olan

kaynaklar tahsis edilmektedir (allocation). İkinci olarak tahsis edilen kaynaklar, karşılık gelen işlemlere bağlanır (binding). Son olarak ise işlemlerin yürütme sırası planlanmaktadır (scheduling). Yüksek seviyeli sentezlemenin çıktısı bir register transfer seviyesinde tasarımıdır.

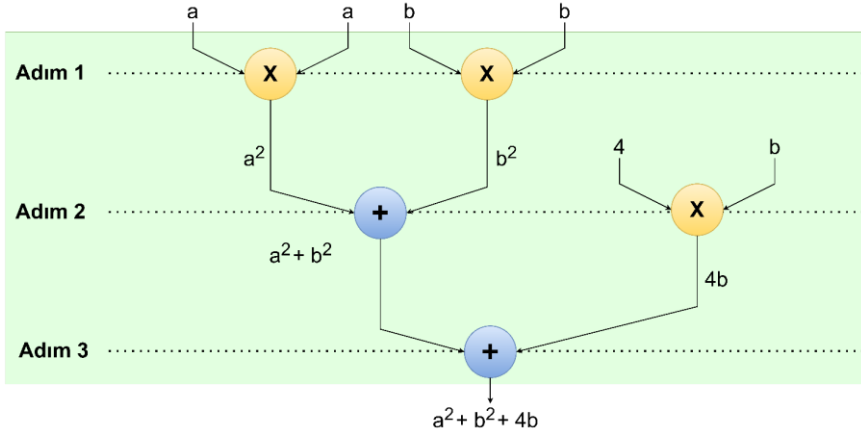
Örnek olarak davranışsal olarak tanımlanan $s = a^2 + b^2 + 4b$ işlemi incelenebilir. Giriş olarak alınan a ve b değişkenleri önceden tanımlanmıştır. Sonucu hesaplamak için tasarımcının iki adet çarpıcı ve bir adet de toplayıcı kullandığı varsayılabilir. Ancak sonucu hesaplamak için Şekil 7’de gösterildiği gibi üç adet çarpıcı ve iki adet toplayıcı da kullanılabilir.



Şekil 7. $s = a^2 + b^2 + 4b$ için tahsis etme, bağlama ve zamanlama

Sonucun hesaplanması için olası bir başka tahsis etme, bağlama ve zamanlama Şekil 8’de gösterilmiştir. İlk adımda birinci çarpıcı a^2 ’nin, ikinci çarpıcı ise b^2 ’nin hesaplanması için kullanılır. İkinci adımda birinci çarpıcı $4b$ ’yi hesaplamak için kullanılır ve a^2

ile b^2 'yi toplamak için de bir adet toplayıcı kullanılır. Üçüncü adımda $a^2 + b^2$ ile $4b$ 'yi toplamak için toplayıcı tekrar kullanılır. Farklı bağlamalar ve zamanlamalar mümkündür. Bağlama ve zamanlama, hesaplama adımını minimize ederek optimizasyonu gerçekleştirir.



Şekil 8. Optimize edilmiş tahsis etme, bağlama ve zamanlama

Yüksek seviyeli sentezlemeden sonra lojik sentezi vardır. Lojik senteziyle optimize edilmiş bir netlist üretilir. Daha sonra netlistler, fiziksel eleman hücrelerini birkaç satıra yerleştirerek ve giriş/çıkış (G/Ç) pinlerini hücreler arasındaki kanallardaki yönlendirme yoluyla bağlar ve böylece devre modülüne dönüştürülür.

5. Yüksek Seviyeli Sentezleme ile Matris Çarpımı

Yüksek seviyeli sentezlemenin daha iyi anlaşılabilmesi ve donanım tasarımında sağladığı kolaylığı göstermek için bu bölümde matrislerin boyutu kullanıcı tarafından belirlenen matris çarpımı tasarımı anlatılacaktır.

Matris çarpımı yapay sinir ağları, görüntü işleme, kontrol sistemleri ve video işleme gibi birçok uygulamada yaygın şekilde kullanılan bir işlemdir (Kung & Hwang, 1998; Li & ark., 2021; Ma & ark., 2019; Marques, 2011, Park & Chung, 2022; Sotiropoulos & Papaefstathiou, 2009; Vasudevan, Anderson & Gregg, 2017). Bu yüzden örnek olarak bu işlem seçilmiştir. Yüksek seviyeli programlama dili olarak C++ kullanılacaktır. Şekil 9’da matris çarpımına ait C++ kodu verilmiştir.

```
1: #include "matrixmul.h"
2: void matrixmul(
3:     mat_a_t a[MAT_A_ROWS][MAT_A_COLS],
4:     mat_b_t b[MAT_B_ROWS][MAT_B_COLS],
5:     result_t res[MAT_A_ROWS][MAT_B_COLS])
6: {
7:     Row: for(int i = 0; i < MAT_A_ROWS; i++) {
8:         Col: for(int j = 0; j < MAT_B_COLS; j++) {
9:             res[i][j] = 0;
10:            Product: for(int k = 0; k < MAT_B_ROWS; k++) {
11:                res[i][j] += a[i][k] * b[k][j]; } } }
```

Şekil 9. Matris çarpımı C++ kodu

Şekil 9’daki kodda ilk olarak #include komutu kullanılarak “matrixmul.h” başlık dosyası programa dahil edilmektedir. Bu dosyada matrislerin satır ve sütun boyutları ve türleri tanımlanmaktadır. Ayrıca bu dosya matrixmul fonksiyonunun prototipini de içermektedir. Şekil 10’da “matrixmul.h” başlık dosyasına ait kodlar verilmiştir.

Şekil 9’daki matris çarpımı kodunda üçüncü satırda matrixmul adında, iki matrisin çarpma işlemini gerçekleştiren bir fonksiyon tanımlanır. MAT_A_ROWS ve MAT_B_ROWS

değişkenleri matrislerin satır boyutunu, MAT_A_COLS ve MAT_B_COLS değişkenleri ise matrislerin sütun boyutunu belirlemektedir.

Sekizinci satırdaki for döngüsü A matrisinin satırlarını, dokuzuncu satırdaki for döngüsü ise B matrisinin sütunlarını indekslemektedir. Onuncu satırda, matris çarpımı sonucunu tutan res matrisinin i. satırının j. sütunundaki elemanın değeri 0 yapılır. Çünkü her iterasyonda toplama işlemi yapıldığından başlangıç değerinin 0 olması gerekmektedir.

On birinci satırdaki döngüyle sonucun yani res matrisinin elemanları belirlenmektedir. Her bir iterasyonda A matrisinin i. satırındaki k. sütunundaki elemanı ile B matrisinin j. sütunundaki k. satırdaki elemanı çarpılarak birikimli toplama işlemi yapılmaktadır. Böylece matrislerin çarpım sonucu elde edilmektedir.

$$res[i][j] = \sum_k a[i][k] \times b[k][j] \quad (1)$$

```

1: #ifndef __MATRIXMUL_H__
2: #define __MATRIXMUL_H__
3:
4: #include <cmath>
5: using namespace std;
6:
7: #define MAT_A_ROWS 3
8: #define MAT_A_COLS 3
9: #define MAT_B_ROWS 3
10: #define MAT_B_COLS 3
11:
12: typedef char mat_a_t;
13: typedef char mat_b_t;
14: typedef short result_t;
15:
16: void matrixmul(
17:     mat_a_t a[MAT_A_ROWS][MAT_A_COLS],
18:     mat_b_t b[MAT_B_ROWS][MAT_B_COLS],
19:     result_t res[MAT_A_ROWS][MAT_B_COLS]);
20: #endif

```

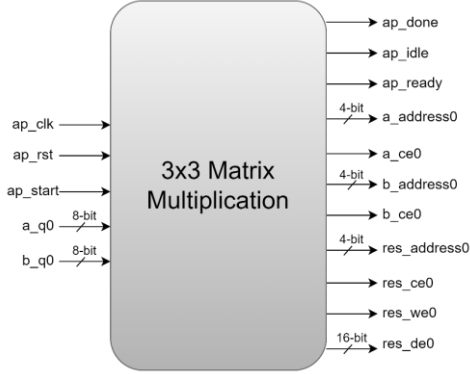
Şekil 10. Matris çarpımı matrixmul.h başlık dosyası

6. Sonuç

6.1. Sentezleme Sonuçları

Bu kod sentezlendiğinde matris çarpımı donanımının VHDL ve Verilog kodları elde edilmektedir. Sentezleme sonucunda Şekil 11'deki gibi giriş çıkış portlarına sahip bir RTL tasarım elde edilir.

Ayrıca sentezleme ile matris çarpımı donanımının performans ve kullanım alanı bilgileri de elde edilmektedir. Xilinx firmasına ait xc7z020-clg400-1 cihazı için yapılan sentezlemeye göre zamanlama sonuçları Tablo 3'teki gibidir.



Şekil 11. Matris çarpımı donanımı giriş çıkış portları

Tablo 3. Matris çarpımı gecikme ve saat döngüsü değerleri

Clock (Hedef)	Clock (Tahmin)
10 ns	8,702 ns
Gecikme	
Minimum	Maximum
79 saat döngüsü	79 saat döngüsü

Kullanılan LUT, Flip-Flop, BRAM ve DSP sayısında Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Matris çarpımı gecikme ve saat döngüsü değerleri

	BRAM	DSP	Flip-Flop	LUT
Kullanılan Miktar	0	1	44	184
xc7z020-clg400-1 Cihazında Var Olan Miktar	280	220	106400	53200
Kullanım Yüzdesi	0	~0	~0	~0

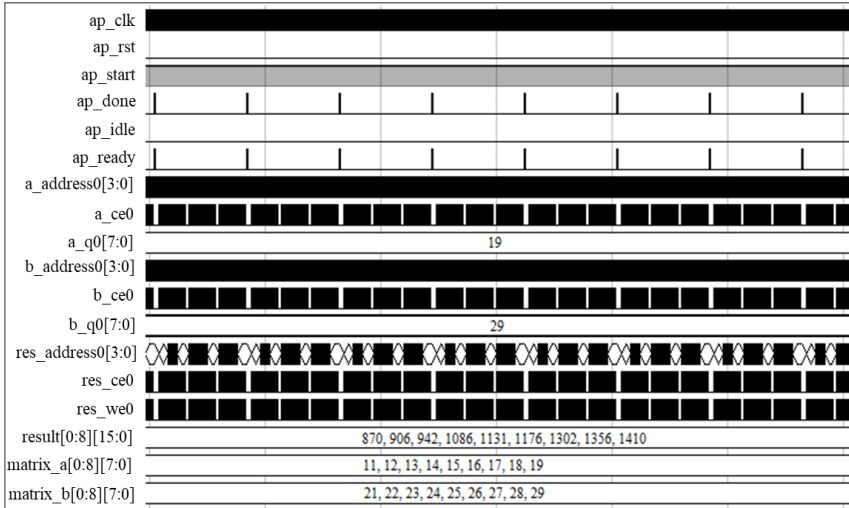
6.2. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan matris çarpımı donanımının fonksiyonel doğrulamasını yapmak için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon işlemi için A ve B matrislerinin her ikisi de 3x3 boyutunda seçilmiştir. Örnek olarak A ve B matrisi aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 14 & 15 & 16 \\ 17 & 18 & 19 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 21 & 22 & 23 \\ 24 & 25 & 26 \\ 27 & 28 & 29 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A ve B matrislerinin çarpım İşlemleri simülasyonda gerçekleştirilir ve çarpım sonucunda elde edilen matris aşağıdaki gibidir. Vivado HLS aracında gerçekleştirilen simülasyon sonucu ise Şekil 12’de verilmiştir.

$$Sonuç = \begin{bmatrix} 870 & 906 & 942 \\ 1086 & 1131 & 1176 \\ 17 & 18 & 19 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Şekil 12. Matris çarpımı simülasyon sonucu dalga şekilleri

Yüksek seviyeli sentezleme (HLS), modern donanım tasarım süreçlerinde çağ atlatan bir teknolojidir. HLS, yüksek seviyeli programlama dillerini kullanarak dijital devre tasarımını, VHDL ve Verilog donanım tanımlama dillerine göre daha hızlı bir şekilde gerçekleştirir.

Yazılım mühendisleri için oldukça kullanışlı olan HLS, tasarım sürecinde soyutlama sağlayarak, karmaşık algoritmaların donanımsal olarak uygulanmasını kolaylaştırır. Bu sayede, tasarım süreleri kısalırken, döngü paralelleştirme ve boru hattı (pipelining) oluşturma gibi optimizasyon teknikleri ile performans artırılır.

Ancak HLS'nin sağladığı soyutlama, her zaman donanım verimliliğini en üst düzeye çıkaramayabilir. Özellikle çok özel performans gerektiren veya kaynak kısıtlı uygulamalarda, elle yazılan RTL kodları daha iyi sonuç verebilir.

Tüm bunlara rağmen yüksek seviyeli sentezlemenin avantajları ve sağladığı zaman tasarrufu, tasarım süreçlerini büyük ölçüde iyileştirir ve gelecekteki donanım/yazılım yakınsamasına doğru önemli bir adım teşkil etmektedir.

Sonuç olarak, HLS'nin yazılım ve donanım geliştirme dünyası arasındaki boşluğu kapatarak, daha hızlı, esnek ve verimli bir donanım geliştirme sürecine olanak sağladığı açıktır. Tasarımcılar, yazılım ve donanım arasındaki bu güçlü entegrasyondan yararlanarak daha yüksek performanslı ve optimize edilmiş sistemler geliştirebilir.

Kaynaklar

Agarwal, A., & Lang, J. (2005). Foundations of analog and digital electronic circuits. Elsevier.

Anderson, M. J. (2023). The Role of FPGA Technology in the Design of Smart Transceivers for use in Optical Communications Systems (Doctoral dissertation, Aston University).

Bluespec, (2024). Bluespac Accelerate - High Level Synthesis. (01/12/2024 <https://info.bluespec.com/acceleratehls>)

Bruno, F., & Eschemann, G. (2024). The FPGA Programming Handbook: An essential guide to FPGA design for transforming ideas into hardware using SystemVerilog and VHDL. Packt Publishing Ltd.

Collett, J. P. (2013). The history of electronics: From vacuum tubes to transistors. In Science in the Twentieth Century (pp. 253-274). Routledge.

Cong, J., Lau, J., Liu, G., Neuendorffer, S., Pan, P., Vissers, K., & Zhang, Z. (2022). FPGA HLS today: successes, challenges, and opportunities. ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETs), 15(4), 1-42.

Cortes, A., Velez, I., & Irizar, A. (2016, November). High level synthesis using Vivado HLS for Zynq SoC: Image processing case studies. In 2016 Conference on design of circuits and integrated systems (DCIS) (pp. 1-6). IEEE.

Curzel, S. (2024). Modern High-Level Synthesis: improving productivity with a multi-level approach. In Special Topics in

Information Technology (pp. 15-25). Cham: Springer Nature Switzerland.

Hosseiniabady, M., Zainol, M. A. B., & Nunez-Yanez, J. (2019). Heterogeneous FPGA+ GPU embedded systems: Challenges and opportunities. arXiv preprint arXiv:1901.06331.

Intel, (2024). Intel® High Level Synthesis Compiler. (01/12/2024)<https://www.intel.com/content/www/us/en/software/prprogrammable/quartus-prime/hls-compiler.html>)

Isa, M. N. B. M., Ismail, R. C., Idris, N., & Zainol, S. A. (2015). Field Programmable Gate Array (FPGA): From Conventional to Modern Architectures. Digital and Analogue Electronics Circuits and Systems, Penerbit UniMAP.

Kung, S. Y., & Hwang, J. N. (1998). Neural networks for intelligent multimedia processing. Proceedings of the IEEE, 86(6), 1244-1272.

Lemieux, G., & Lewis, D. (2004). Design of interconnection networks for programmable logic (Vol. 22). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 33(12), 6999-7019.

Liu, X., Chen, Y., Nguyen, T., Gurumani, S., Rupnow, K., & Chen, D. (2016, February). High level synthesis of complex applications: An H. 264 video decoder. In Proceedings of the 2016

ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (pp. 224-233).

Ma, S., Zhang, X., Jia, C., Zhao, Z., Wang, S., & Wang, S. (2019). Image and video compression with neural networks: A review. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 30(6), 1683-1698.

Mao, N., Yang, H., & Huang, Z. (2023). A parameterized parallel design approach to efficient mapping of cnns onto fpga. *Electronics*, 12(5), 1106.

Marques, O. (2011). *Practical image and video processing using MATLAB*. John Wiley & Sons.

Mathworks, (2024). HDL Coder. (01/12/2024 <https://www.mathworks.com/products/hdl-coder.html>).

Nane, R.; Sima, V. M.; Pilato, C.; Choi, J.; Fort, B.; Canis, A.; Chen, Y. T.; Hsiao, H.; Brown, S. (2016). "A Survey and Evaluation of FPGA High-Level Synthesis Tools" (PDF). *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 35 (10): 1591–1604. doi:10.1109/TCAD.2015.2513673. hdl:11311/998432. ISSN 0278-0070. S2CID 8749577.

O'Loughlin, D., Coffey, A., Callaly, F., Lyons, D., & Morgan, F. (2014). *Xilinx vivado high level synthesis: Case studies*.

Özkılbaç, B. (2020). *Design and real-time implementation of arithmetic logic unit in ieee754 floating point number format*. (Master dissertation, Ataturk University).

Özkılbaç, B., & Karacalı, T. (2024). Design of a novel low-latency parameterizable posit adder/subtractor using leading one predictor in FPGA. *Digital Signal Processing*, 155, 104718.

Panigrahy, M., Jena, S., & Pradhan, R. L. (2020). Digital Design with Programmable Logic Devices. In *Advanced VLSI Design and Testability Issues* (pp. 1-15). CRC Press.

Park, S. S., & Chung, K. S. (2022). CONNA: Configurable matrix multiplication engine for neural network acceleration. *Electronics*, 11(15), 2373.

Pilato, C., & Ferrandi, F. (2012). Bambu: A free framework for the high level synthesis of complex applications. University Booth of DATE, 29, 2011.

Richa, M., Prévotet, J. C., Dardaillon, M., Mroué, M., & Samhat, A. E. (2023). High-level power estimation techniques in embedded systems hardware: an overview. *The Journal of Supercomputing*, 79(4), 3771-3790.

Roane J., (2024). Automated HW/SW Co-Design of DSP Systems Composed of Processors and Hardware Accelerators. (01/12/2024,https://www.cadence.com/en_US/home/resources/white-papers/automated-hw-sw-co-design-of-dsp-systems-composed-of-processors-and-hardware-accelerators-wp.html)

Samir, N., Hussein, A. S., Khaled, M., El-Zeiny, A. N., Osama, M., Yassin, H., ... & Mostafa, H. (2019). ASIC and FPGA comparative study for IoT lightweight hardware security algorithms. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 28(12), 1930009.

Sarıtaş, E., & Karataş, S. (2013). Her yönüyle FPGA ve VHDL (Vol. 754). Palme Yayınevi.

Schell, B., & Tsividis, Y. (2009). Analysis and simulation of continuous-time digital signal processors. *Signal Processing*, 89(10), 2013-2026.

Sotiropoulos, I., & Papaefstathiou, I. (2009, August). A fast parallel matrix multiplication reconfigurable unit utilized in face recognitions systems. In *2009 International Conference on Field Programmable Logic and Applications* (pp. 276-281). IEEE.

Synopsys, I., (2024). Synopsys Introduces Symphony High Level Synthesis. (01/12/2024 <https://news.synopsys.com/home?item=123096>)

Vanhoof, J., Van Rompaey, K., Bolsens, I., Goossens, G., & De Man, H. (2012). High-level synthesis for real-time digital signal processing (Vol. 216). Springer Science & Business Media.

Vasudevan, A., Anderson, A., & Gregg, D. (2017, July). Parallel multi channel convolution using general matrix multiplication. In *2017 IEEE 28th international conference on application-specific systems, architectures and processors (ASAP)* (pp. 19-24). IEEE.

Visconti, P., Velázquez, R., Soto, C. D. V., & De Fazio, R. (2021). FPGA based technical solutions for high throughput data processing and encryption for 5G communication: A review. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(4), 1291-1306.

WOS. (2024). Web of Sciene. (01/12/2024
[https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-
results/6e39c71e-32e6-4f74-b7c2-e649126217d5-010de471c8](https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/6e39c71e-32e6-4f74-b7c2-e649126217d5-010de471c8)).

Zhang, Z., Fan, Y., Jiang, W., Han, G., Yang, C., & Cong, J. (2008). High-Level Synthesis: From Algorithm to Digital Circuit. In ch. AutoPilot: A Platform-Based ESL Synthesis System (pp. 99-112). Springer Netherlands.

Zhao, J., Zhao, Y., Li, H., Zhang, Y., & Wu, L. (2020, September). HLS-based FPGA implementation of convolutional deep belief network for signal modulation recognition. In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 6985-6988). IEEE.

BÖLÜM V

Dijital Sistemlerde Kullanılan Sayı Gösterimleri

Bahadır ÖZKILBAÇ¹
Tevhit KARACALI²

1. Giriş

Dijital sistemlerde tüm hesaplamalar toplama, kaydırma ve mantıksal işlemlerin kombinasyonları kullanılarak yapılmaktadır. Dijital sistemlerde ikili sayı sistemi kullanılmaktadır. Herhangi bir dijital sistem, günlük hayatta kullandığımız onluk sayıları anlamaz. İkili sayı sisteminde çeşitli sayı gösterimleri mevcuttur. Bu sayı gösterimleri arasında hassasiyet, dinamik sayı aralığı, kullanım alanı verimliliği ve hız performansı gibi parametreler dikkate alınarak

¹ Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3384-1565, bahadir.ozkilbac@atauni.edu.tr

² Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3647-6372, tevhit@atauni.edu.tr

kullanım tercihi yapılmaktadır. Genellikle hassasiyet ve dinamik sayı aralığının arttığı sayı gösterimlerinde kullanım alanı verimliliği ve hız performansı azalmaktadır. Yine aynı şekilde genellikle hız performansı ve kullanım alanı verimliliğinin arttığı sayı gösterimlerinde hassasiyet ve dinamik sayı aralığı düşmektedir.

Dijital sistemlerde yaygın olarak kullanılan sayı gösterimleri tam sayı gösterimi, sabit noktalı sayı gösterimi ve IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimidir. Son yıllarda ise Posit sayı gösterimi, IEEE754 kayan noktalı gösterime alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Gustafson & Yonemoto, 2017). Bu sayı gösterimleri arasında IEEE754 kayan noktalı günümüzde en yaygın kullanılan sayı gösterimidir (De Sousa & ark., 2024). İşlemcilerin büyük çoğunluğunda kayan noktalı işlem birimi bulunmaktadır (Hettiarachchi, Davuluru & Balster, 2020).

Tam sayı gösterimi, dijital sistemlerde hesaplama yapmak için kullanılan en basit gösterimdir (Abzug, 2005). Tam sayı gösterimi işaretli ve işaretsiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Page, 2014). Tam sayı gösteriminin hızı performansı ve kullanım alanı verimliliği yüksek, hassasiyeti ve dinamik sayı aralığı düşüktür. Ayrıca tam sayı gösterimiyle kesirli sayılar doğrudan temsil edilemezler.

Sabit noktalı sayı gösterimi kesirli sayıları temsil etmek için yüksek hız performansına ve kullanım alanı verimliliğine sahiptir (Reddy & ark., 2024). Ancak hassasiyeti ve dinamik sayı aralığı düşüktür. IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimi sabit noktalı sayı gösterimine göre daha yüksek hassasiyete ve dinamik sayı aralığına sahiptir (Özkılbaç & Tevhit, 2021). Ancak IEEE754 kayan noktalı

sayı gösterimi işlem birimleri daha karmaşık olduğundan hız performansı ve kullanım alanı verimliliği sabit noktalıya göre daha düşüktür. Posit sayı gösterimi hassasiyet ve dinamik sayı aralığı en yüksek sayı gösterimidir (Balasubramani, 2023). Literatürde posit işlem birimleriyle ilgili çalışmalar olsa da yaygınlaşması için biraz daha olgunlaşmaya ihtiyaç vardır (Jaiswall & ark., 2019; Özkılbaç & Tevhit, 2024). Kıyaslamaların daha iyi anlaşılması açısından hassasiyet, dinamik sayı aralığı, kullanım alanı verimliliği ve hız performansı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- Hassasiyet: Kullanılan sayı gösteriminde yazılabilecek büyüklük olarak en küçük sayıyı ifade etmektedir.
- Dinamik sayı aralığı: Bir sayı gösteriminin temsil edebileceği en küçük ve en büyük sayı arasındaki farktır.
- Kullanım alanı verimliliği: Bir sistemin hesaplama için gereken donanım miktarını minimize etme yeteneğidir.
- Hız performansı: Kullanılan sayı gösterimiyle çalışan işlem birimlerinin bir saniyede yaptığı işlem sayısıdır.

Tasarımcılar gerçekleştireceği uygulamanın ihtiyacına göre uygun sayı gösterimini tercih etmektedirler. Örneğin doğruluğun kritik öneme sahip olduğu yapay zekâ uygulamalarında IEEE754 kayan noktalı ve posit gibi hassasiyetleri ve dinamik sayı aralıkları daha yüksek sayı gösterimleri tercih edilebilir (Mao & ark., 2021; Junaid & ark., 2022; Mishra ve ark., 2022; Yang, 2024). Video akışı (streaming) gibi küçük zaman diliminde çok sayıda işlem yapılan uygulamalarda daha yüksek hız performansına sahip sabit noktalı ve tam sayı gösterimleri kullanılabilir (Fischer, 1999; Garg, Agrawal & Varshney, 2012; Hong & ark., 2020; Huang & ark., 2024; Lin & ark., 2016).

Çalışmanın kalan kısımlarında tam sayı gösterimi, sabit noktalı sayı gösterimi, IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimi ve posit sayı gösterimi ayrı başlıklarda detaylı şekilde açıklanacaktır. En basit yapıya sahip tam sayı gösterimi ve piyasada en yaygın şekilde kullanılan IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimlerinin işlem birimleri de ilgili başlıklar altında verilmektedir.

2. Tam Sayı Gösterimi

Dijital sistemde en basit ve en temel sayı gösterimi tam sayılardır. Tam say kesirli sayılar doğrudan temsil edilemezler. Ancak yapılacak uygulamaya göre sayı aralığı belli bir aralıkta sabitlenip örnekleme yapılarak kesirli sayılar temsil edilebilir (Özkılbaç & Tevhit, 2020). İşaretsiz (unsigned) ve işaretli (signed) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu gösterimlerle ilgili bilgiler ayrı başlıklar halinde verilecektir.

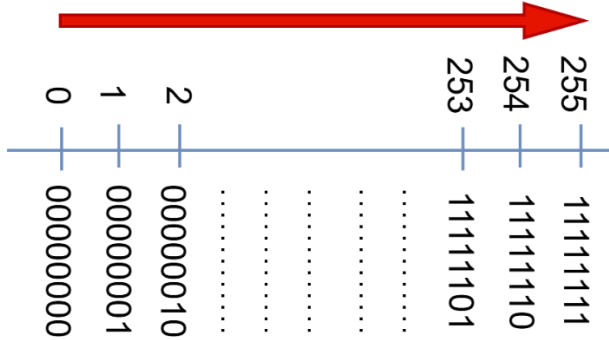
2.1. İşaretsiz Tam Sayı Gösterimi

İşaretsiz sayılar yalnızca sıfır ve pozitif tam sayıları temsil etmektedirler. Tüm bitler sayının büyüklüğünü temsil etmek için kullanılmaktadır. Yani işaret ve kesir için bit kullanılmaz. Şekil 1’de örnek olarak 5 bit uzunluğunda işaretsiz bir tam sayı ve sayının onluk karşılığının hesaplanması verilmiştir.

1	0	1	0	1						
2^4	2^3	2^2	2^1	2^0						
↓	↓	↓	↓	↓						
16	+	0	+	4	+	0	+	1	=	21

Şekil 1. 5 Bitlik işaretsiz tam sayı gösterimi

Bit uzunluğu n olan bir işaretsiz tam sayı gösteriminin alacağı değerler 0 ile $2^n - 1$ arasında değişmektedir. Örnek olarak 8 bit uzunluğunda işaretsiz tam sayı gösteriminin 0 'dan $2^8 - 1$ 'e kadar sayı aralığı Şekil 2'de gösterilmektedir.

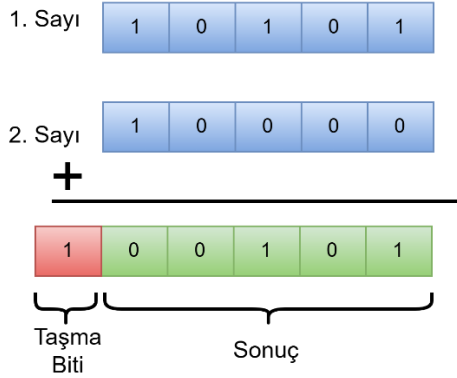


Şekil 2. 8 bit işaretsiz tam sayı gösterimi sayı aralığı

İşaretsiz tam sayı gösterimi ile tasarlanan işlem birimleri yüksek hız performansına ve kullanım alanı verimliliğine sahiptir. Ancak hassasiyeti ve dinamik sayı aralığı düşüktür. İşaretsiz tam sayı gösterimi kullanarak tasarlanan her işlem biriminin detayı anlatılacaktır.

2.1.1. Toplama İşlemi

Toplama işaretsiz tam sayı işlem birimleri arasında adım sayısı en düşük ve tasarımı en kolay işlem birimidir. İki sayının birbirine karşılık olan bitleri toplanmasıyla gerçekleştirilir. Toplama işlemi Şekil 3'teki gibidir. Genelde n bit uzunluğunda işlemcilerde, taşma biti ayrı olarak depolanmaktadır.



Şekil 3. İşaretsiz tam sayı gösterimi 5 bitlik toplama işlemi

2.1.2. Çıkarma İşlemi

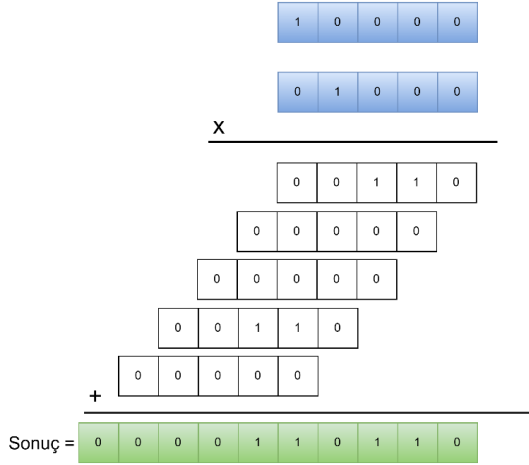
Çıkarma işlemi tümleyen aritmetiği ile yapılmaktadır. İki çeşit tümleme vardır:

- 1'e tümleme: Sayının bitlerinin tersini alma işlemidir.
- 2'ye tümleme: Sayının bitlerinin tersinin alınıp sonuca 1 eklenmesi işlemidir.

Örnek olarak “10010001” sayısının 1'e tümleyeni “01101110” ve 2'ye tümleyeni “01101111” olarak hesaplanır. İşaretsiz tam sayı gösteriminde çıkarma işlemi çıkarılan sayının 1'e ya da 2'ye tümleyeni alınarak yapılmaktadır.

1'e tümleme yöntemi ile çıkarma: Çıkarılan sayının 1'e tümleyeni alınarak eksilen sayı ile toplanır. Eğer toplama işlemi sonrası taşma yoksa sonuç negatiftir. Toplamadan gelen sayının 1'e tümleyeni alınıp başına eksi konularak sonuç elde edilir. Eğer toplama işlemi sonrası taşma varsa sonuç pozitifdir. Taşma biti toplama işleminden gelen sonuca eklenir ve elde edilen sonucun başına artı konulur.

edilir. İkinci çarpanın ilgili biti 1 ise birinci çarpanın değeri 1 bit sola kaydırılarak aşağı yazılır. Eğer ikinci çarpanın ilgili biti 0 ise bir aşağıdaki satıra tüm bitleri sıfır olan sayı dizisi yazılır. Her aşamada elde edilen sayılar alt alta toplanarak çarpım sonucu elde edilir. Çarpma işleminde çarpanların uzunluğu n ise çarpım sonucu $2n$ uzunluğunda olur. Şekil 5'te kaydır topla metodu ile 5 bitlik çarpıcı örneği verilmiştir.



Şekil 5. Kaydır Topla Metodu ile 5 Bitlik Çarpıcı

2.1.4. Bölme İşlemi

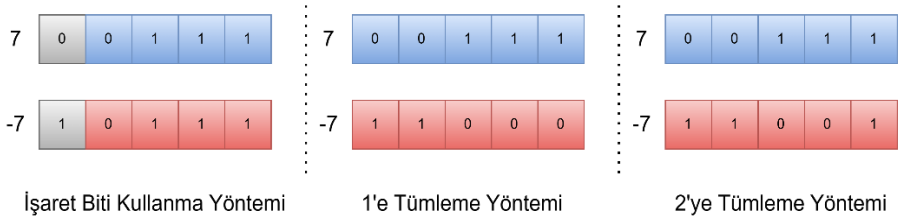
Bölme işlemi için ise çıkarma yöntemi kullanılmaktadır. Bölünen sayıdan her seferinde bölen sayı çıkarılır. Her aşamada bölüm değeri bir artırılır. Bu döngü bölünen bölenden büyük olduğu sürece devam etmektedir. Örnek olarak 5 bitlik sayının bölme işlemi Şekil 6'daki gibidir. Bu yöntem en büyük ortak bölen algoritması (GCD) olarak adlandırılır.



Şekil 6. En büyük ortak bölen algoritması ile 5 bitlik bölme işlemi

2.2. İşaretli Tam Sayı Gösterimi

İşaretli tam sayı gösteriminde negatif sayıları temsil etmek için üç farklı yöntem mevcuttur. İlk yöntem sayıların en anlamlı bitinin işarete ayrılmasıdır. Bu yöntemde işaret biti 0 ise sayı pozitif, işaret biti 1 ise sayı negatiftir. Diğer iki yöntem ise tümlleme metotlarıdır. Sayıların negatifi 1'e tümlleme ya da 2'ye tümlleme yöntemleri ile elde edilir. Şekil 7'de bu üç yöntemin 5 bitte kullanılışına örnek verilmiştir.



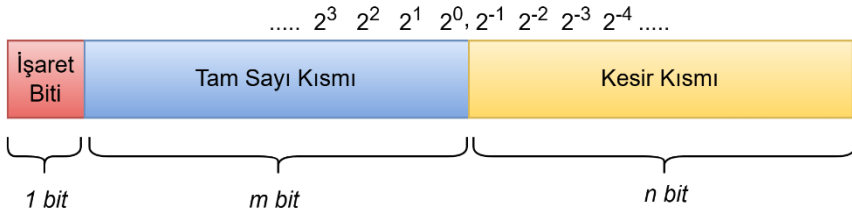
Şekil 7. İşaretli Tam Sayı Gösterimi Yöntemleri

3. Sabit Noktalı Sayı Gösterimi

Sabit noktalı (fixed-point) sayı gösterimi kesirli sayıların dijital sistemlerde temsil edilmesinde kullanılan bir yöntemdir (Agarwal, Meehan & O'regan, 2001; Granas & Dugundji, 2003). Sabit noktalı sayı gösterimi hassasiyetin kritik öneme sahip olmadığı ve sınırlı kaynak gerektiren sistemlerde yaygın olarak kullanılır.

Performans olarak tam sayı gösteriminin gerisinde olsa da daha yüksek hassasiyet ve dinamik sayı aralığına sahiptir. Sayı tam ve kesir bitleri ile temsil edilmektedir. Tam ve kesir kısmı birbirinden virgülle ayrılmaktadır. Sabit noktalı gösterimde, sayı virgüllü bir sabit konuma sahiptir. Bu da temsil edilen sayıların aralığını ve hassasiyetini etkiler.

Sabit noktalı sayı gösterimi işaretli ve işaretsiz olmak üzere iki çeşit sabit noktalı sayı gösterimi bulunmaktadır (Yates, 2009). İşaretsiz sabit noktalı sayı gösterimi sadece sıfır ve pozitif sayıları temsil etmek için kullanılır. İşaretli sabit noktalı sayı gösteriminde ise negatif, sıfır ve pozitif sayılar temsil edilmektedir. Sayının işareti en anlamlı biti işaret biti yapılarak belirlenmektedir. İşaret biti 1 ise sayı negatif, 0 ise sayı pozitiftir. Şekil 8’de işaretli sabit noktalı sayı gösterimi verilmiştir.



Şekil 8. Sabit Noktalı Sayı Gösterimi

Sabit noktalı sayı gösterimi $Q_m.n$ şeklinde gösterilir. Bu gösterimde m tam kısmın bitlerinin sayısı, n ise kesir kısmının bitlerinin sayısıdır. Sabit noktalı sayı gösteriminde yazılan bir sayının onluk değeri (1)’de verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$N = a \times (1, f) \quad (1)$$

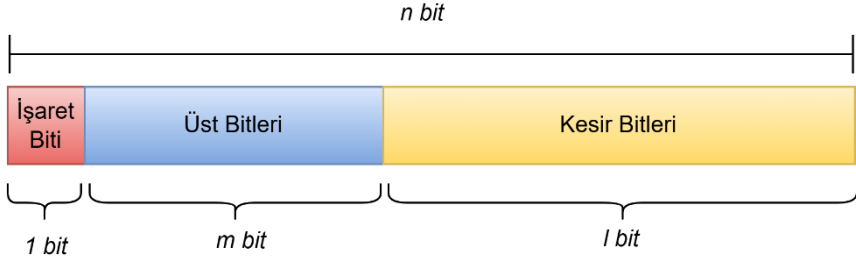
Bu formülde a sayının tam kısmının onluk karşılığı, f kesir bitlerinin onluk karşılığı ve n ise kesir bitlerinin sayısıdır.

Sabit noktalı sayı gösterimi hız performansı ve kullanım alanı verimliliği açısından tam sayı gösterimine oranla daha kötü sonuçlar verse de daha yüksek hassasiyete ve dinamik sayı aralığına sahiptir.

4. Kayan Noktalı Sayı Gösterimi

Kayan noktalı (floating-point) sayı gösterimi çok büyük veya çok küçük sayıların geniş bir aralıkta ve yüksek hassasiyetle temsil edilmesini sağlayan bir yöntemdir (Cohen & Einziger, 2024). Bu yöntem, özellikle bilimsel hesaplamalarda ve işlemcilerde yaygın olarak kullanılır. Kayan noktalı gösterim, onluk sayı sistemindeki bilimsel gösterimin ikilik sayı sistemine uyarlanmış halidir (Muller & ark., 2018).

Kayan noktalı sayı gösteriminde temsil edilecek bir sayı şekil 9'dan da görüleceği üzere sırasıyla işaret, üst ve kesir bitlerinden oluşmaktadır (Zuras & ark., 2008). İşaret biti 0 ise sayı pozitif, 1 ise sayı negatiftir. Üst bitlerinin değeri negatif ya da pozitif olabilmektedir. Bunun için üst bitleri yazılırken bias değeri eklenir. Örneğin üst bitlerinin uzunluğunun 8 olduğu durumda bias "01111111" değerindedir. Böylece pozitif üstün en anlamlı biti 1, negatif üstün en anlamlı biti 0'dır.



Şekil 9. IEEE754 Kayan Noktalı Sayı Gösterimi

IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimi tek duyarlıklı, çift duyarlıklı ve genişletilmiş duyarlıklı olmak üzere üç formata sahiptir (Rao & ark., 2018). Her bir formatta toplam, üst ve kesir bitlerinin uzunluğu değişmektedir. Tablo 1’de bu üç format özetlenmiştir.

Tablo 2. IEEE754 Kayan Noktalı Sayı Gösterimi Formatları

Format	İşaret Biti	Üst Bitleri	Kesir Bitleri	Toplam Bit
Tek Duyarlıklı	1	8	23	32
Çift Duyarlıklı	1	11	52	64
Gen. Duyarlıklı	1	15	112	128

IEEE754 kayan noktalı sayı gösteriminde yazılan herhangi bir sayının onluk karşılığı (2)’de verilen formülle elde edilmektedir. Bu formülde N , kayan noktalı sayının onluk değeri, S işaret bitinin, f kesir bitlerinin ve e ise üst bitlerinin onluk değerleridir. Formülde S , f ve e yerine konularak IEEE754 kayan noktalı sayı gösteriminde yazılmış herhangi bir sayının onluk değeri hesaplanabilir.

$$N = (-1)^S \times 1.f \times 2^e \quad (2)$$

IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimi dijital sistemlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır (LaMeres, 2023). Bu yüzden bu çalışmada IEEE754 kayan noktalı işlem birimleri detaylı olarak anlatılacaktır.

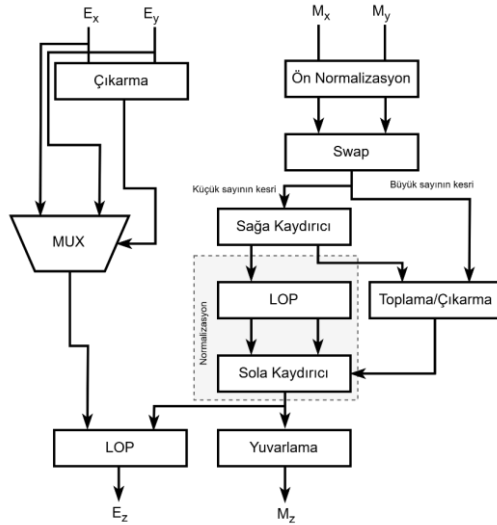
4.1. Toplayıcı ve Çıkarıcı Birimi

Kayan noktalı toplama ve çıkarma işlemleri aynı birimde gerçekleştirilmektedir. Kayan noktalı toplama ve çıkarma işleminin temel mantığı, sayıların üstlerinin eşitlenip kesirlerin toplanıp ya da çıkarılmasıdır. Üst değerlerinin eşitlenmesi küçük sayının kesrinin üstleri farkı kadar kaydırılmasıyla sağlanır. IEEE754 kayan noktalı toplayıcı/çıkarıcı birimi Şekil 10'daki gibidir.

Kayan noktalı toplayıcı/çıkarıcı biriminde öncelikle iki sayının üstleri çıkarılarak büyük ve küçük sayı belirlenir. Üst farkı pozitifse birinci sayı, negatifse ikinci sayı daha büyüktür. Ön normalizasyon için kesir bitlerinin soluna '1' yerleştirilir. Küçük sayının kesri, sayıların üstlerinin farkı kadar sağa kaydırılır. Böylelikle iki sayının üst değeri eşitlenmiş olur.

Kaydırma işleminden elde edilen kesir ve büyük sayının kesri tam sayı toplama/çıkarma modülüne gönderilir. Toplama/çıkarma modülünde işlem sürerken, normalizasyon için gereken en önemli '1' bitinin konumunun tahmini, önde gelen bir tahmincisi (LOP) modülü tarafından yapılır. Yapılan işlem çıkarmaysa normalizasyon için LOP'tan gelen pozisyon miktarı kullanılır. İşlem toplama ise ise LOP'tan gelen pozisyon değeri kullanılmayıp bir bitlik sola kaydırma ile normalizasyon gerçekleştirilir.

Normalizasyon sonrası elde edilen kesir yuvarlama işleminden geçirilerek son kesir değeri elde edilir. Sonucun üstünü belirlemek için, büyük sayının üstü kullanılır. Eğer kesir toplamında herhangi bir taşma olduysa sonucun üst değerine eklenir. Sonucun işaret biti büyük sayının işaret bitidir.



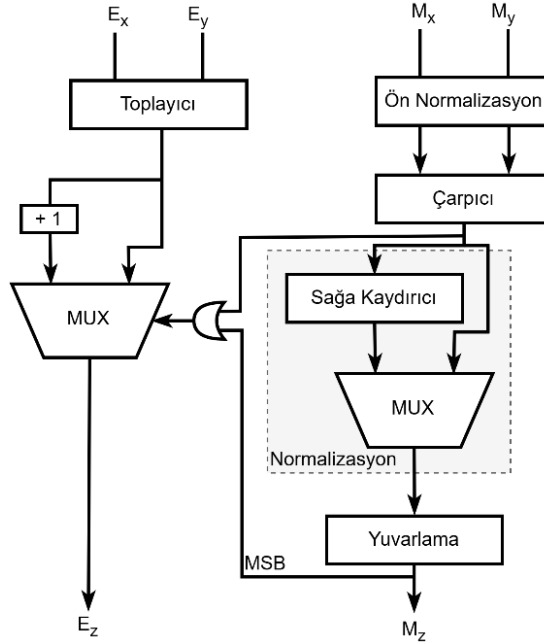
Şekil 10. IEEE754 kayan noktalı toplayıcı/çıkarcı birimi mimarisi

4.2. Çarpıcı Birimi

Kayan noktalı çarpma işleminin temel mantığı sayıların üstlerinin toplanıp kesirlerinin çarpılması şeklindedir. Kayan noktalı çarpıcı birimi Şekil 11'deki gibidir. Toplama işleminde olduğu gibi ön normalizasyon işlemi için iki sayının da kesir bitlerinin soluna '1' yerleştirilir.

Ön normalizasyon işleminden geçirilmiş kesir bitleri çarpılır. Çarpma devam ederken paralel olarak sayıların üst bitlerinin toplanması işlemi de yürütülerek sonucun üst bitleri hesaplanır.

Kesirlerin çarpma sonucunun en anlamlı biti kontrol edilir. En anlamlı bit '1' ise üstlerin toplamından elde edilen değer bir artırılır. Böylelikle artık sonucun üst bitleri elde edilir. Sonucun işaret biti ise iki sayının işaret bitlerinin xor kapısından geçirilmesiyle elde edilir. Son kesir değeri ise çarpmadan gelen sonucun yuvarlanması ile elde edilerek kayan noktalı çarpma işlemi tamamlanmış olur.

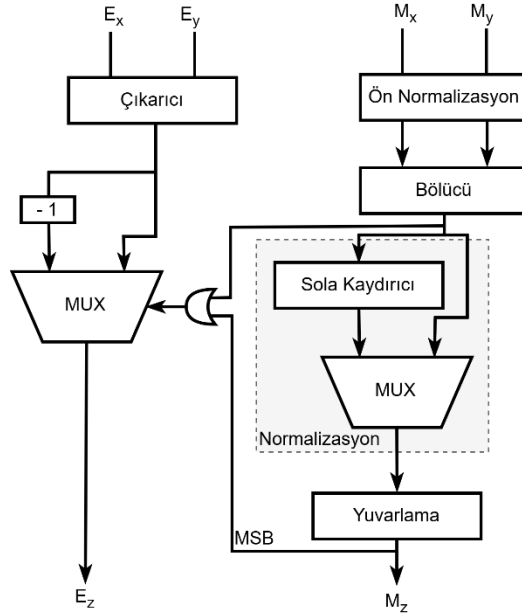


Şekil 11. IEEE754 kayan noktalı çarpıcı birimi mimarisi

4.3. Bölücü Birimi

Kayan noktalı bölme işleminin temel mantığı çarpma işleminin tersidir. Yani üst bitleri çıkarılıp kesir bitleri bölünerek kayan noktalı bölme işlemi gerçekleştirilmektedir. Diğer işlem birimlerinde olduğu gibi iki sayının kesir bitlerinin soluna '1' yerleştirilerek ön normalizasyon işlemi gerçekleştirilir.

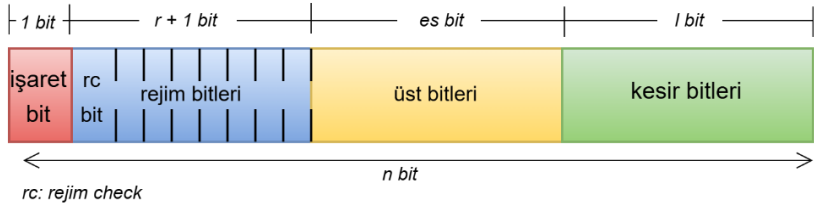
Ön normalizasyon işleminden geçen kesirler bölünür. Bu sırada sayıların üstlerinin çıkarılması işlemi de paralel olarak yürütülür. Böylece sonucun üst bitleri elde edilir. Bölme işleminden elde edilen kesir, sonucun kesrini oluşturmak için yuvarlanır. Sonucun işaret biti ise iki sayının işaret bitlerinin xor kapısından geçirilmesiyle elde edilir. Kayan noktalı bölücü birimi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. IEEE754 kayan noktalı bölücü birimi mimarisi

5. Posit Sayı Gösterimi

Posit sayı gösterimi, Şekil 13’ten de görüleceği üzere sırasıyla işaret, rejim, üst ve kesir bitlerinden oluşmaktadır. Üst bitlerinin uzunluğu sabitken rejim ve kesir bitlerinin uzunluğu temsil edilen sayıya göre değişmektedir.



Şekil 13. Posit Sayı Gösterimi

Posit sayı gösterimi $< N, es >$ formatında gösterilmektedir. Formatta N ve es sırasıyla toplam bit uzunluğu ve üst bitleridir. Posit sayı gösteriminde en anlamlı bit işaret bitidir. İşaret biti 1 ise sayı negatif, 0 ise sayı pozitifdir. İşaret bitinin sağında rejim kontrol (rc) biti bulunur. Rejim bitleri, r tane rc bitinden ve rc 'nin tersi olan bir adet durdurma (stop) bitinden oluşur. Tablo 1'de görüldüğü gibi rejim bitleri, r tane rc bitinden ve bir adet durdurma bitinden oluşur.

Tablo 1. Rejim bitlerine karşılık gelen k ve r değerleri

Rejim Bitleri	k	r
0000	-4	4
0001	-3	3
001x	-2	2
01xx	-1	1
10xx	0	1
110x	1	2
1110	2	3
1111	3	4

Tablodaki k , rejim bitlerine karşılık hesaplanan bir değerdir. Eğer rc biti 1 ise k pozitif, 0 ise negatiftir. (3) numaralı formül kullanılarak k hesaplanabilir.

$$k = \begin{cases} -r & \text{if } rc = 0 \\ r - 1 & \text{if } rc = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Rejim bitlerinden sonra es tane üst biti bulunmaktadır. İşaret, rejim ve üst bitlerinden sonra kalan bitler kesir bitleridir. Herhangi bir posit sayının ondalık değeri (4)'teki denklemle hesaplanır.

$$N = (-1)^s \times useed^k \times 2^e \times (1 + \frac{f}{2^l}) \quad (4)$$

Bu formülde, s , e , f ve l sırasıyla işaret bitinin onluk değerini, üstün onluk değerini, kesrin onluk değerini ve kesir bitlerinin uzunluğunu temsil eder. $Useed$ değeri (5)'teki formülle hesaplanır.

$$useed = 2^{(2^{es})} \quad (5)$$

6. Sonuç

Dijital sistemlerde devre tasarımı yapılırken hız performansı ve kullanılan kaynak miktarı kritik öneme sahipse tam sayı gösterimi kullanılabilir. Fakat tam sayı gösteriminin kullanıldığı uygulamalarda hassasiyet ve dinamik sayı aralığından ödün verilmektedir. Hassasiyet ve dinamik sayı aralığının daha fazla öneme sahip olduğu uygulamalarda ise sabit noktalı sayı gösterimi, tam sayı gösterimine göre hız ve kullanım alanı verimliliğinden çok fazla ödün vermediğinden dolayı tercih edilmektedir. Daha fazla hassasiyet gerektiren uygulamalarda ise günümüzde çoğunlukla IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimi tercih edilmektedir. Posit ise son yıllarda ortaya çıkan, hassasiyeti ve dinamik sayı aralığı

IEEE754 kayan noktalı sayı gösteriminden daha fazla olan bir sayı gösterimidir.

Posit sayı gösteriminde sayının rejime, üst ve kesir bitlerini ayırtırmak ve rejim bitleriyle işlem yapmak donanımda fazladan yüke neden olmaktadır. Yükten kasıt hız performansının ve kullanım alanı verimliliğinin azalması ve tasarım karmaşıklığının artmasıdır. Eğer bu kısıtlamalar çözülrse posit sayı gösterimi ilerleyen zamanlarda IEEE754 kayan noktalı sayı gösteriminin yerini alabilir. Özet olarak dijital sistemlerde kullanılan sayı gösterimlerini kıyaslaması Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sayı Gösterimleri Kıyaslaması

Sayı Gösterimi	Hassasiyet	Dinamik Sayı Aralığı	Hız	Kullanım Alanı Verimliliği
Tam Sayı Gösterimi	Düşük	Düşük	Çok Yüksek	Çok Yüksek
Sabit Noktalı Sayı Gösterimi	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
IEEE754 Kayan Noktalı Sayı Gösterimi	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta
Posit Sayı Gösterimi	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük	Düşük

Kaynaklar

Abzug, C. (2005). Representation of Numbers and Performance of Arithmetic in Digital Computers. James Madison University, Harrisonburg.

Agarwal, R. P., Meehan, M., & O'regan, D. (2001). Fixed point theory and applications (Vol. 141). Cambridge university press.

Balasubramani, S., & Jagadeesan, U. (2023, June). A review of data representation formats for intelligent computing with emphasis on POSITs. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2581, No. 1). AIP Publishing.

Cohen, I., & Einziger, G. (2024). Floating-floating point: a highly accurate number representation with flexible Counting ranges. arXiv preprint arXiv:2410.03692.

De Sousa, J. T., Lopes, J. D., Serôdio, M., Neto, H. C., & Véstias, M. P. (2024, June). PT-Float: A Floating-Point Unit with Dynamically Varying Exponent and Fraction Sizes. In 2024 IEEE 31st Symposium on Computer Arithmetic (ARITH) (pp. 139-146). IEEE.

Fischer, S., Senthinathan, R., Rangchi, H., & Yardanmehr, H. (1999, February). A 600 MHz IA-32 microprocessor with enhanced data streaming for graphics and video. In 1999 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. ISSCC. First Edition (Cat. No. 99CH36278) (pp. 98-101). IEEE.

Garg, H., Agrawal, S., & Varshney, G. (2012). Double Security Watermarking Algorithm for 3D Model using IEEE-754 Floating Point Arithmetic. *International Journal of Computer Applications*, 46(9), 18-22.

Granas, A., & Dugundji, J. (2003). *Fixed point theory* (Vol. 14, pp. 15-16). New York: Springer.

Gustafson, J. L., & Yonemoto, I. T. (2017). Beating floating point at its own game: Posit arithmetic. *Supercomputing frontiers and innovations*, 4(2), 71-86.

Hettiarachchi, D. L. N., Davuluru, V. S. P., & Balster, E. J. (2020, January). Integer vs. floating-point processing on modern FPGA technology. In *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (pp. 0606-0612). IEEE.

Hong, W., Chen, T., Lu, M., Pu, S., & Ma, Z. (2020). Efficient neural image decoding via fixed-point inference. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 31(9), 3618-3630.

Huang, G., Zhang, M., Huang, X., Liu, J., & Zhang, B. (2024, April). Energy-Efficient Video Streaming With Fixed-Wing UAV. In *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1-6). IEEE.

Jaiswal, M. K., & So, H. K. H. (2019). PACoGen: A hardware posit arithmetic core generator. *IEEE access*, 7, 74586-74601.

Junaid, M., Arslan, S., Lee, T., & Kim, H. (2022). Optimal architecture of floating-point arithmetic for neural network training processors. *Sensors*, 22(3), 1230.

Zuras, D., Cowlishaw, M., Aiken, A., Applegate, M., Bailey, D., Bass, S., ... & Canon, S. (2008). IEEE standard for floating-point arithmetic. *IEEE Std*, 754(2008), 1-70.

LaMeres, B. J. (2023). Floating-Point Systems. In *Introduction to Logic Circuits & Logic Design with VHDL* (pp. 485-525). Cham: Springer International Publishing.

Lin, S. H., Pal, R., Wang, B. C., & Golubchik, L. (2016). On market-driven hybrid-P2P video streaming. *IEEE Transactions on Multimedia*, 19(5), 984-998.

Mao, W., Li, K., Cheng, Q., Dai, L., Li, B., Xie, X., ... & Yu, H. (2021). A configurable floating-point multiple-precision processing element for HPC and AI converged computing. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 30(2), 213-226.

Mishra, S. M., Tiwari, A., Shekhawat, H. S., Guha, P., Trivedi, G., Jan, P., & Nemec, Z. (2022, April). Comparison of floating-point representations for the efficient implementation of machine learning algorithms. In *2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)* (pp. 1-6). IEEE.

Muller, J. M., Brisebarre, N., De Dinechin, F., Jeannerod, C. P., Lefevre, V., Melquiond, G., ... & Torres, S. (2018). *Handbook of floating-point arithmetic* (Vol. 1). Basel, Switzerland: Birkhäuser.

Özkılbaç, B., & Karacalı, T. (2020, November). Design and Hardware Implementation of Bit Length Adjustable Cosine and Sine Generator with CORDIC Algorithm in FPGA. In 2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (pp. 145-149). IEEE.

Özkılbaç, B., & Karacalı, T. (2021). Implementation and Design of 32 Bit Floating-Point ALU on a Hybrid FPGA-ARM Platform. *Journal of Brilliant Engineering*, 2, 26-28.

Özkılbaç, B., & Karacalı, T. (2024). Design of a novel low-latency parameterizable posit adder/subtractor using leading one predictor in FPGA. *Digital Signal Processing*, 155, 104718.

Page, R. (2014). *C Coding Standard: 98 Rules for Developing Safe, Reliable, and Secure Systems*. Mellon University, Pittsburgh.

Rao, R. P., Rao, N. D., Naveen, K., & Ramya, P. (2018, February). Implementation of the standard floating point MAC using IEEE 754 floating point adder. In 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 717-722). IEEE.

Reddy, R., Rajesh, B., Nandini, A., Kumar, P., & Chakradhar, K. S. (2024, June). Design of RNS-KSA Based 2D FIR Filter. In 2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Intelligent Communication Systems (ICITEICS) (pp. 1-5). IEEE.

Yang, J. (2024). Acceleration System for Single-Precision Floating-Point Arithmetic Based on IEEE754 Standard. Highlights in Science, Engineering and Technology, 87, 82-89.

Yates, R. (2009). Fixed-point arithmetic: An introduction. Digital Signal Labs, 81(83), 198. (01/12/2024 www.digitalsignallabs.com/fp.pdf)

BÖLÜM VI

Metamalzemelerde Emici Uygulamaları

Merve Kurt¹
Gökhan ÖZTÜRK²

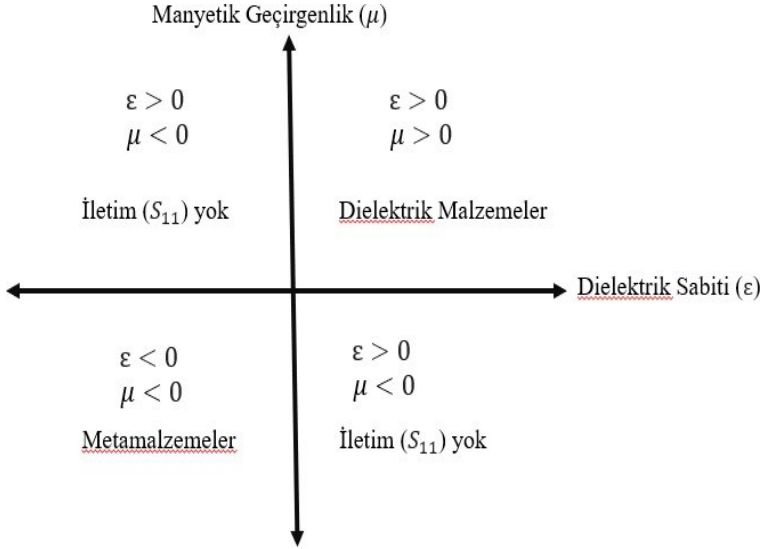
1. Giriş

Metamalzemeler, doğada bulunmayan yapay olarak elde edilen farklı optik özelliklere sahip özel malzemelerdir. Metamalzemeler, hem negatif elektriksel geçirgenliğe (ϵ) hem de negatif manyetik geçirgenliğe (μ) sahip özel yapılardır. Bu özellik, doğada bulunan malzemelerde gözlenmezken metamalzemeleri benzersiz kılmaktadır. Metamalzemeleri farklı kılan geçirgenlik özellikleri araştırmacıların dikkatini çekerek elektriksel ve manyetik geçirgenliğin negatif değerlere ulaştığı metamalzemelerin geliştirilmesi üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmıştır.

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2658-1021, merve.kurt025@gmail.com

² Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-8106-0053, gokhan.ozturk@atauni.edu.tr

Metamalzemeler, elektromanyetik dalgaları bulunduğu ortamda yönlendirerek veya değiştirerek dalgaları (Wang & ark., 2019) kontrol etme yeteneğine sahiptir. Bu bağlamda metamalzemelerin elektromanyetik dalgalarla etkileşimini daha iyi anlayabilmek için elektriksel ve manyetik geçirgenlik işaretine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Metamalzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenlik işaretlerine göre sınıflandırılması

Şekil 1 de metamalzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenlik işaretine göre oluşturulan dört ana bölgesi (Öztürk, 2018) aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır:

1. **Çift Pozitif Ortam (DPS):** Elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) her ikisi de pozitif olan I. bölgeye "Çift Pozitif Ortam" (DPS) denir. Bu, doğada bulunan çoğu malzemenin bulunduğu

bölgedir. Örneğin, hava ve su gibi doğal maddeler bu bölgeye girer. Bu tür malzemeler, elektromanyetik dalgaları doğal yollarla iletebilirler. Bu bölge de dalga yayılımı sağ yöne doğru ilerlemektedir.

2. **Epsilom Negatif Ortam (ENG):** Elektriksel geçirgenliği (ϵ) negatif, manyetik geçirgenliği (μ) ise pozitif olan II. bölgeye "Epsilom Negatif Ortam" (ENG) denir. Bu bölgede dalgalar sönümlenen dalga formundadır. Bu bölgenin niteliklerini bulunduran çalışmalar, özellikle metamatizeme emici tasarımları için önemli bir rol oynar.
3. **μ Negatif Ortam (MNG):** Manyetik geçirgenliği (μ) negatif, elektriksel geçirgenliği (ϵ) ise pozitif olan IV. bölgeye " μ Negatif Ortam" (MNG) adı verilir. Bu bölgede dalga sönümlenen dalga şeklindedir ve bu bölgenin sönümleyici özellikleri radar emiciler, elektromanyetik ekranlama ve enerji dönüşümü gibi uygulamalarda kullanılır.
4. **Çift Negatif Ortam (DNG):** Hem elektriksel geçirgenliği (ϵ) hem de manyetik geçirgenliği (μ) negatif olan III. bölgeye "Çift Negatif Ortam" (DNG) veya "Sol Elli Metamatizeme" denir. Bu bölgede dalga sola ilerleyen dalga şeklinde davranır.

Şekil 1’de gösterilen sınıflandırmada kırılma indisi I., II ve III.bölgelerde pozitif değer alırken IV. bölgede negatif değere sahiptir. Kırılma indisini bu bölgelerde açıklamamızın nedeni elektriksel ve manyetik geçirgenlik ilişkilendirilmesindenidir. Bu

ilişki (Ranjan & Sahoo, 2024), elektromanyetik dalgaların malzeme içindeki yayılımını tanımlamak için kullanılır ve Denklem 1 de verilen ifade ile belirtilmektedir.

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (1)$$

Denklem 1’de verilen n ifadesi kırılma indisini, ε mutlak elektriksel geçirgenliğini ve μ mutlak manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir. Mutlak elektriksel (ε) ve manyetik geçirgenlik (μ); vakumun elektriksel (ε_0) ve manyetik geçirgenliğiyle (μ_0) bağlı elektriksel (ε_r) ve manyetik geçirgenliğin (μ_r) çarpımıyla elde edilmektedir. Bu açıklama matematiksel olarak Denklem 2 ve Denklem 3’te gösterilmektedir. $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ H/m ve $\varepsilon_0=\frac{10^{-9}}{36\pi}$ F/m olup sabit değerlerdir.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3)$$

Metamalzeme kavramının, Şekil 1’de gösterilen sınıflandırmaya dayanan özelliklerinin gelişim süreci, ilk olarak V.G. Veselago ve çalışma arkadaşları tarafından başlatılmıştır. Veselago (Veselago, 1967), malzemelerin hem elektriksel geçirgenlik (ε) hem de manyetik geçirgenlik (μ) negatif olabileceğini öngören bir teori sunmuştur. Veselago’nun çalışmalarının sonrasında Pendry ve çalışma arkadaşları (Pendry & ark., 1998), mikrodalga frekanslarında plazma özellikleri sergileyebilen malzemelerin tasarımına öncülük etmişlerdir. Bu çalışmada, mikron kalınlığında periyodik olarak dizilmiş ince metal tellerin, bir dielektrik ortam içinde negatif elektriksel geçirgenlik (ε_r) oluşturabileceği fikri ortaya konmuştur. Pendry ayrıca bu çalışmanın

bir sonraki aşaması olan negatif manyetik geçirgenliğe sahip Yarık Halka Rezenatörleri (Spling Ring Resenator-SRR) keşfetmiştir (Pendry & ark., 1999). Metamalzeme kavramının oluşum sürecinin ardından 2008 yılında Landy ve çalışma arkadaşları (Landy & ark., 2008), metamalzemeler kullanarak elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde soğurabilen bir emici tasarımı önerdiler. Bu çalışma, metamalzemelerin elektromanyetik dalga Emilimi gerçekleştirebilen işlevsel özelliklerini ortaya koymuştur.

Metamalzemelerin önemli uygulamalarından biri, yansıma ya da iletimi gerçekleştirmeden tüm radyasyonu engelleyebilen emicilerdir. Elektromanyetik emici yapıları çeşitli metodoloji özellikleri sayesinde gelişen teknoloji ile birlikte savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaya başlanılmıştır. Bu uygulama alanlarına optik (Pendry, 2000), radar sistemleri (Brookner, 2016), antenler (Dong & Itoh, 2012), görünmezlik pelerini (Landy & Smith, 2013), polarizasyon dönüştürücüler (Ozturk, 2022), sensörler (Prakash & Gupta, 2022) ve emiciler (Landy & ark., 2008) örnek verilebilir.

2. Elektromanyetik Emici Yapıları Ve Teorik Analizleri

Metamalzeme temelli mikrodalga emiciler GHz ve THz bölgelerinde çalışma frekanslarına göre çeşitlenmektedir. GHz bölgesi metamalzeme emiciler kullanılan alttaş türü (Rogers, FR4, F4B, vb), çalışma bant sayısı, eğik açı performansı, polarizasyon tepkisi, dalga boyu cinsinden kalınlık gibi parametrelere göre çalışma performansları değerlendirilmektedir. Ayrıca ince filmler kullanılarak, RLC toplu parametrelili (lumped elementler) kullanılarak, çok tabakalı metayapılar kaskat bağlanarak ve optik ince filmler (Indium tin oxide-ITO) kullanılarak da GHz bölgesi

için geniş bant aralığına sahip metamalzeme temelli mikrodalga emiciler tasarlanmaktadır. THz bölgesi mikrodalga metamalzeme emiciler metalik özellikleri yüksek grafen, altın gibi gibi metaller ile bant sayısı yüksek, eğik açı performans hassasiyeti düşük polarizasyon bağımsız yapılar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ayrıca VO₂ (Vanadium di Oxide) gibi termal iletkenlik değişimi gösteren yapılar ile sıcaklıkla ayarlanabilir emiciler tasarlanmaktadır. Ayrıca yüksek frekans THz emiciler başka uygulamalar ile hibrit görev yaparak emici ve sensör işlevlerini beraber yürütebilirler.

2.1. Elektromanyetik Emici Yapısı

Metamalzeme temelli mikrodalga emiciler tek tabakalı yapılar için temel olarak metal sonlandırma, alttaş ve metayüzey üçlüsünden oluşmaktadır (Xie & ark., 2023).

Metal malzeme ile sonlandırılmış emicinin soğurma davranışını analiz etmek amacıyla, +z yönünde gelen elektromanyetik dalgaların uyarımı ele alınmıştır. Bu bağlamda, gelen dalga'nın elektrik alanının x yönünde ve manyetik alanının y yönünde olduğu varsayılmıştır. Z yönünde gelen dalga'nın x yönlü elektrik alan bileşenine sahip olması durumunda, gelen dalga (Griffiths, 2023) Denklem 4'te ifade edilmiştir:

$$E^i = \hat{x}E_0e^{-jkz} \quad (4)$$

Burada, E^i gelen dalga'nın elektrik alan şiddetinin fazörünü temsil etmektedir. Tasarımı yapılan emicinin -z yönünde yansıyan dalga'nın elektrik alan şiddetinin x yönünde yansıması beklenmektedir. Ancak metamalzeme yapısının polarizasyon dönüşümü sağlaması durumunda, dalga'nın bir kısmının y yönünde de

yansıması mümkündür. Bu nedenle, yansıyan dalga (Griffiths, 2023) aşağıdaki Denklem 5'te ki gibi ifade edilebilir:

$$E^r = \hat{x}E^{rx}e^{jkz} + \hat{y}E^{ry}e^{jkz} \quad (5)$$

Burada E^r gelen dalganın elektrik alan şiddetinin fazörünü temsil etmektedir. E^{ry} ve E^{rx} sırasıyla y ve x yönlerindeki yansıyan elektrik alan şiddetlerini ifade eder.

Elektromanyetik dalga, metamatizeme soğurucu yapısıyla karşılaştığında, dalganın bir kısmı yüzeyden yansır, bir kısmı geçer ve geri kalan kısmı ise elektriksel ve manyetik kayıplar nedeniyle yapı içinde kalarak emilir. Bu emilen kısmın (Shen & ark., 2011) matematiksel analizi, Denklem 6 da ifade edildiği gibi yapılır :

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (6)$$

$A(\omega)$ emilim katsayısını, $R(\omega)=|S_{11}|^2$ yansıma katsayısını ve $T(\omega) = |S_{21}|^2$ iletim katsayısını temsil etmektedir. Metamatizeme emici (MMA) yapısındaki emilim olayı, deri kalınlığı faktörüyle Deri kalınlığı, elektromanyetik dalgaların bir yüzeyden ne kadar derine nüfuz edebileceğini belirleyen bir parametredir. Bu ilişki (Yu & ark., 2015), matematiksel olarak Denklem 7 de gösterilmektedir.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}} \quad (7)$$

Denklem 7 de yer alan ifade de f dalga frekansını (Hz), μ manyetik geçirgenliği (H/m) ve σ malzemenin elektriksel iletkenliğini (S/m) temsil etmektedir. Denklem 7 ifadesinin matematiksel analizini anlamdığımızda metamatizeme emicilerde arka planın kalınlığının deri kalınlığından çok daha büyük olması, elektromanyetik (EM) dalgalarının bu yapıdan iletilmesinin ihmal edilebilir olduğu anlamına gelir. Bu bağlamda, deri kalınlığı (Zhang

& ark., 1998), emici malzemelerde yüksek emilim sağlayan önemli bir faktör olarak öne çıkar. Dolayısıyla emilim ifadesi Denklem 8’de ki düzenlenebilir.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) \quad (8)$$

Metamalzeme tabanlı emicinin metamalzeme davranışını doğrulamak için, yansıma katsayısı, karakteristik empedans, malzemenin manyetik geçirgenliği (μ) ve elektriksel geçirgenliği (ϵ) gibi ifadelerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda bu terimleri açıklayacak olursak; karakteristik empedans, bir malzemenin elektromanyetik dalgalar üzerindeki empedans özelliklerini tanımlar. Yansıma katsayısı, bir elektromanyetik dalganın bir malzemeye çarptığında yansıyan kısmını ölçen bir parametredir. Bu katsayı (Balanis, 2012) malzemenin yüzeyinden ne kadar dalga yansıdığını belirler. Yansıma katsayısı ile karakteristik empedans arasındaki ilişkiyi veren matematiksel ifade Denklem 9 da verilmiştir. Bu ifade de Γ yansıma katsayısını, Z_g giriş empedansını ve Z_0 serbest uzayın empedansını temsil etmektedir.

$$\Gamma = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (9)$$

Yapılan soğurucu tasarım analizlerinde karakteristik empedans ile serbest uzayın empedansı arasında uygun bir eşleşmenin olması gerekmektedir. Uygun eşleşme sonucunda tasarım için maksimum EM dalgası emilimi sağlanmış olur.

Yansıma katsayısı (Balanis, 2012) ifadesinde bulunan manyetik geçirgenlik (μ) malzemenin manyetik alana karşı gösterdiği tepkiyi ifade ederken, elektriksel geçirgenlik (ϵ) elektrik alanına karşı gösterdiği tepkiyi ifade eder. Manyetik ve elektriksek

geçirgenlik ile serbest uzay empedansı ve karakteristik empedans arasındaki ilişki sırasıyla Denklem 10 ve Denklem 11 de verilmektedir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (10)$$

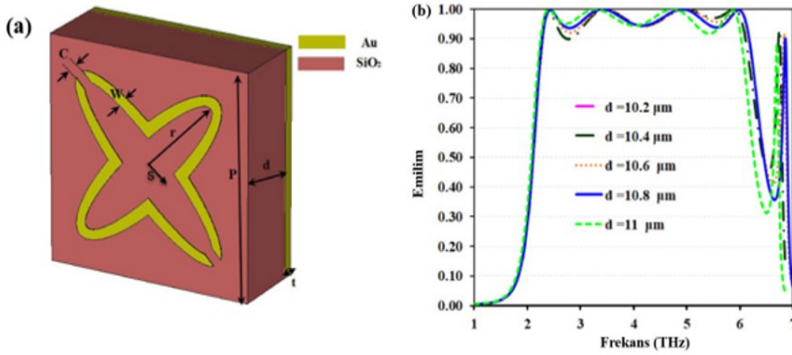
$$Z_g = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (11)$$

3. Elektromanyetik Emici Uygulama Alanları

Elektromanyetik emici uygulamaları, farklı (GHz ve THz vs.) frekans aralıklarında, tek tabakalı ve çok tabakalı yapılarıyla önemli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan tasarımlarda vanadyum dioksit (VO₂) (Jiang, Wang & Wu, 2022), grafen (Zhang & ark., 2021 ve indinyum kalay oksit (Xiao & ark., 2020) gibi farklı dielektrik malzemeleri kullanılmıştır.

3.1. THz Spektrumu İçin Tek Tabakalı Ultra Geniş Bantlı Metamalzeme Emici

THz görüntüleme, algılama ve gizlilik uygulamaları için mikrometre boyutlarında geniş bant aralığına sahip metamalzeme emici yapıları bulunmaktadır. Şekil 2 (a-b) de (Sharma & ark., 2024) 2,42 THz ile 6,11 THz arasındaki geniş terahertz frekans aralığında emilim gerçekleştiren tasarım yapısı sunulmaktadır.



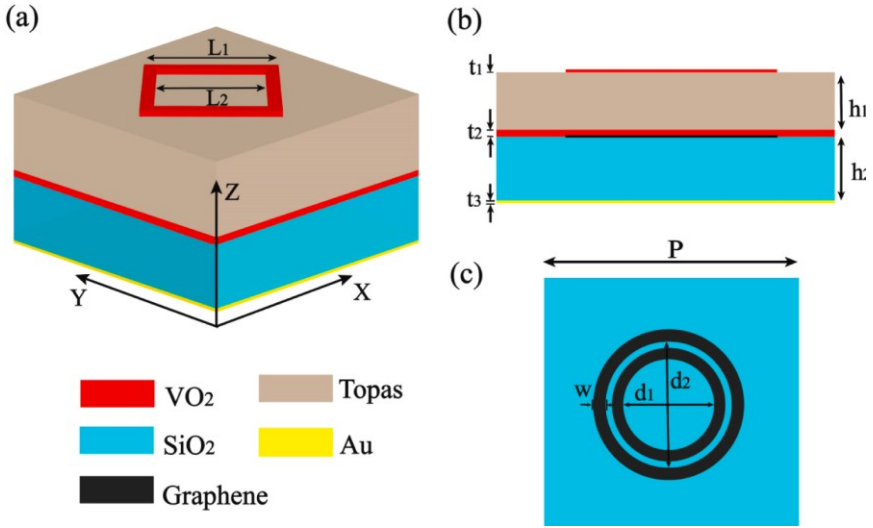
Şekil 2: (a)THz Uygulamaları için önerilen metamalzeme emici tasarımı (b) malzeme kalınlığı değişkenine göre emilim sonuçları

Şekil 2 (a) da tasarım üç katmandan oluşmaktadır: üst katmanda yıldız desenli bir metal yama, ortada dielektriği SiO_2 (silisyum dioksit) olan bir alt tabaka ve en altta, toprak işlevi gören metal bir altın malzeme yer almaktadır. Şekil 2(b)'de ki emici tasarım yapısı metamalzeme kalınlığının değişimiyle elde edilen emilim sonuçlarını göstermektedir. CST Microwave simülasyon programı ile yapılan analizler, 2,47, 3,45, 4,89, 6,01 ve 6,87 THz frekanslarında yüksek emilim elde edildiğini ve dört frekansta %99, bir frekansta ise %90 emilim sağlandığını göstermektedir. Ayrıca, metamalzeme emici tasarımının performansı, hem TE hem de TM polarizasyonları için farklı olay açıları altında incelenmiştir. Sonuçlar, absorberin 30°'ye kadar yüksek emilim verimliliğini koruduğunu, ancak bu açıdan sonra duyarlılığının arttığını ve belirli frekanslarda 45°'ye kadar %70'in üzerinde emilim sağladığını göstermektedir. Bu duyarlılık, sunulan metamalzeme emici

tasarımının normal ve hafif eğik olay açıları için etkili olduğunu ortaya koymaktadır. THz teknolojisini ilerletmek sunulan bu tarz çalışmalar umut verici beklentiler sunmaktadır.

3.2. Geniş Bant Ve Çift Dar Bant Arasında Geçiş Yapabilen Çok Tabakalı THz Metamalzeme Emici

Şekil 3(a-b-c) de (Ma & ark., 2024) vanadyum dioksit ve grafenin ayarlanabilirliğine dayanarak, dinamik olarak fonksiyonları ve emilim spektrumlarını değiştirebilen çok katmanlı ve işlevli terahertz metamalzeme soğurucu önerilmiştir.

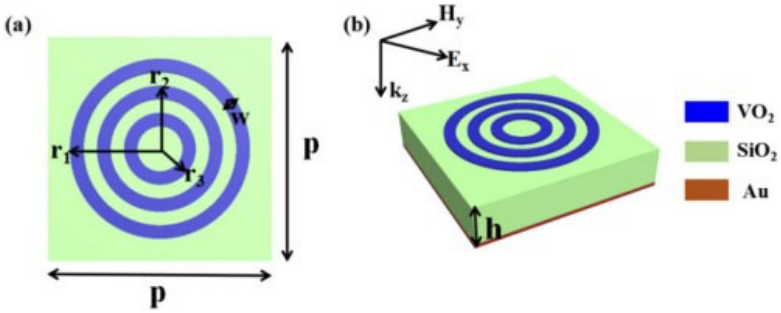


Şekil 3: Önerilen anahtarlanabilir metamalzeme soğurucunun (a) birim hücresinin şematik çizimi (b) yan görünümü ve (c) grafen deseninin üst görünümü

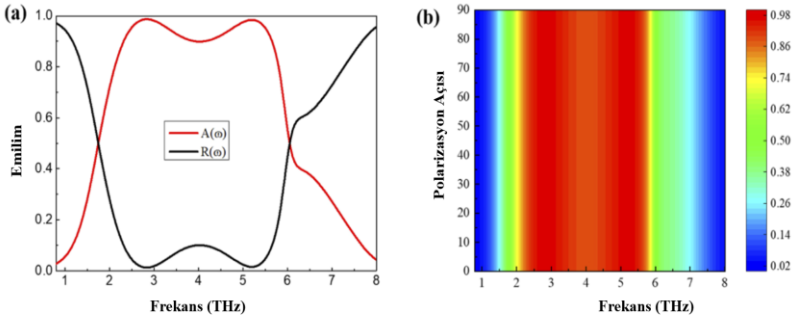
Çalışmada, VO₂ ve grafen, çeşitli performansları yerine getirerek değişken işlevsellik sunmaktadır. Önerilen emici, 3,26–6,91 THz aralığında %90'dan daha büyük bir performans göstermiştir.

3.3. THz Uygulama Alanında Tek Katmanlı Ayarlanabilir Metamalzeme Emici

Şekil 4(a) (a-b) de sunulduğu gibi modülasyon, algılama ve görüntüleme teknolojileri gibi birçok potansiyel uygulama için ayarlanabilir ultra geniş bantlı bir metamalzeme emici tasarımları bulunmaktadır. Ayarlanabilir metamalzeme emici tasarımlarını ayarlanabilir kılmak için kullanılan malzemenin değişebilen özellikleri göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4(a): (a) Absorberin üstten görünüm şeması ve (b) üç boyutlu şeması



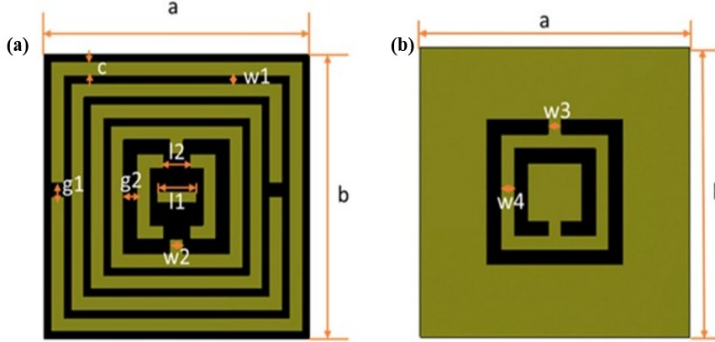
Şekil 4(b): (a) Absorbe edicinin yansıma spektrumu ve emilim spektrumu. (b) Farklı polarizasyon açılarına sahip emilim spektrumunun renk diyagramı

Şekil 4(a) (a-b) de (Wu & ark., 2021) metamalzeme emici tasarımında kullanılan VO₂ malzemesi sıcaklık kontrollü faz değişimi gösteren kompozit bir malzemedir. VO₂'nin kritik sıcaklığı 314K veya 68 derece olarak belirlenmektedir. 341 K olan kritik sıcaklığın altında iken yalıtkan faz, kritik sıcaklık üzerinde ise metal faz olarak işlev görmektedir. Bu çalışmalarda sıcaklık ayarı malzemenin iletkenliği değiştirilerek elde edilmiştir. Yalıtkan faz durumunda iletkenliği 200S/m'den azdır. Bu durumda THz radyasyonunu iyi iletir. Metal faz durumunda iletkenliği 10⁵ mertebesinde olup ve bu şartlar altında THz radyasyonunu engeller. Çalışmalarda kullanılan VO₂, metal faz durumunda çalıştırıldığı için iletkenlik değerleri 10⁵ civarında değerlendirilmiştir. Sunulan çalışmada vanadyum dioksit (VO₂) tabanlı üç rezonans halkası ve dielektrik ara parçası ile ayrılmış bir metal zemin katmanından oluşmaktadır. Simülasyon sonuçları, soğuruculuğun terahertz (THz) aralığında %90'dan fazla olduğunu ve 2,34 ila 5,64 THz arasındaki 3,30 THz'lik bir bant genişliği sağladığını göstermektedir. Ayrıca, VO₂'nin iletkenliği 200 S/m'den 2×10⁵ S/m'ye değiştiğinde, emicilik tepe yoğunluğu %4'ten %100'e kadar ayarlanabilir. Şekil 4(b)(a-b)'de sunulan tasarım için hem emilim grafiği hem de TE ve TM dalgalarında geniş açılı bir soğurucu etkisi gösterilmektedir. 55°'ye kadar geniş bir olay açısında emilim sağlayarak, %75'in üzerinde verimlilikle geniş açılı soğurma performansı sergilemektedir.

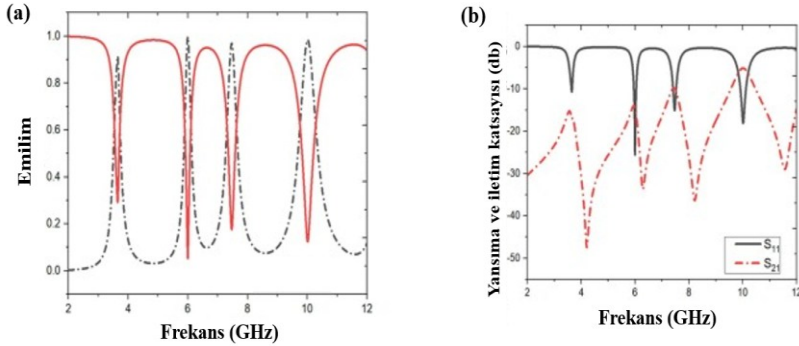
3.4. GHz Aralığında Algılama Uygulamaları İçin FR-4 Malzemesi İle Oluşturulan Tek Katmanlı Metamalzeme Emici

Sıvı algılamadan mikroakışkan algılamaya ve ötesine kadar çeşitli uygulamalar için GHz frekans bandında metamalzeme emici tasarımları bulunmaktadır. Şekilde 5(a) (a-b) de (Rabbani & ark.,

2024) matemalzeme tabanlı rezonatörleri asimetrik kare bölünmüş halkalar ve iç kısmı E şeklinden oluşan sıvı algılamaya yönelik emici tasarımı verilmiştir. Tasarımın dielektrik malzemesi FR-4 iken alt ve üst metal kısımlarında bakır kullanılmıştır.



Şekil 5(a): Önerilen asimetrik emici yapısının birim hücresi: (a) ön görünüm (b) arka görünüm

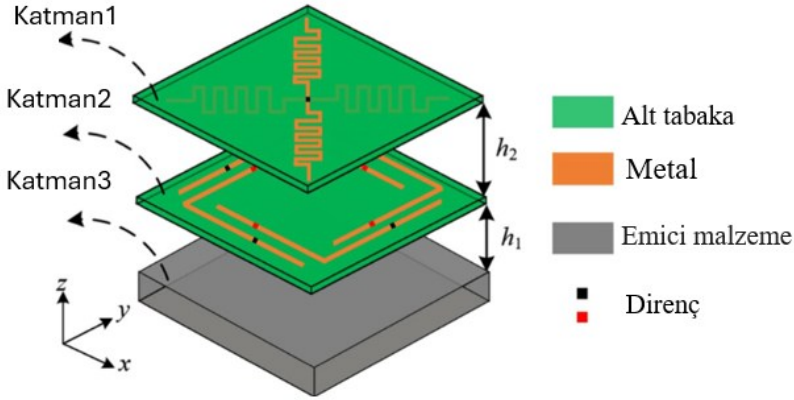


Şekil 5(b): Önerilen asimetrik emici (a) birim hücresinin emilim ve (b) dB cinsinden İletim ve Yansıma Katsayılı Tepki Grafiği

Çalışmada önerilen metamalzeme emici tasarımı için elde edilen emilim tepeleri 3,64 GHz'de %91,46, 5,99 GHz'de %99,72, 7,47 GHz'de %96,89 ve 10,01 GHz'de %98,45 verimlilikle elde edilmiştir. Dört emilim tepesi bu metamalzeme emici tasarımının S, C ve X-bantlarında işlevsel hale getirmektedir. Önerilen tasarımın emilim ve yansıma-iletim katsayılarına verilen tepki grafikleri detaylı olarak Şekil 5(b) (a-b) de gösterilmektedir. Elde edilen bu metamalzeme emici tasarımının analizleri neticesinde sensör işlevselliği yönünden performansı ve uygun fiyatı nedeniyle endüstriyel ve sıvı kimyasal tespiti için ideal çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.5. GHz Aralığında Radar Kesit Alanı Azaltımı İçin Çok Katmanlı Metamalzeme Emici

Şekil 6'da (Li & ark ,2024) gösterilen çalışma, ultra geniş bantlı bir emici tasarımı sunulmuştur. Tasarım, dirençlerle yüklenmiş frekans seçici yüzey (FSS), emici malzeme ve hava ile ayrılmış üç katmandan oluşmaktadır. Eşdeğer devre modeli kullanılarak emicinin çalışma prensibi analiz edilmiştir.

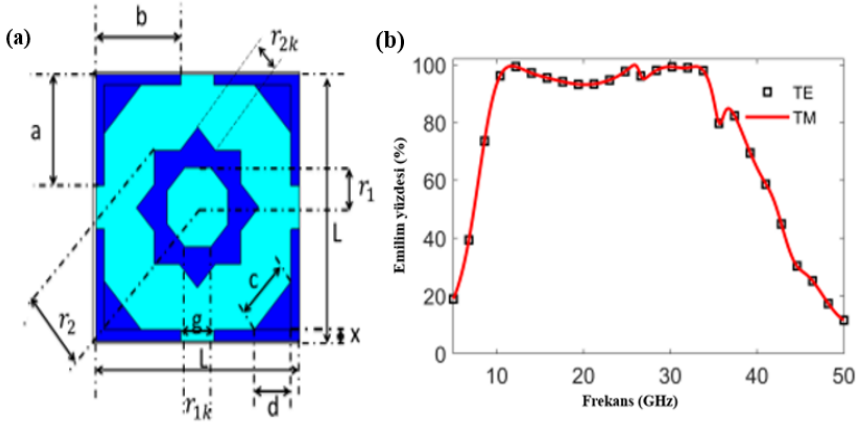


Şekil 6: Önerilen ultra geniş bantlı çok katmanlı soğurucunun şematik diyagramı

Simülasyon sonuçları, hem TE hem de TM polarizasyonları için %181 kesirli bant genişliğine sahip, 0,61 ila 12,33 GHz aralığında ultra geniş bantlı emilim sağlayarak radar kesit alana azaltımı alanında kullanılmıştır.

3.6. GHz Aralığında ITO (İndiyum Kalay Oksit) Malzemesi Kullanılarak Oluşturulan Metamalzeme Emici

Metamalzeme emici tasarım için kullanılan materyallerden biri de ITO (İndiyum Kalay Oksit)dur. Şekil 7(a-b) de ITO materyalinin kullanıldığı örnek olarak hava tabanlı esnek ultra ince şeffaf ITO tabanlı geniş bant ve polarizasyon duyarsız metamalzeme emici tasarımı gösterilmektedir.



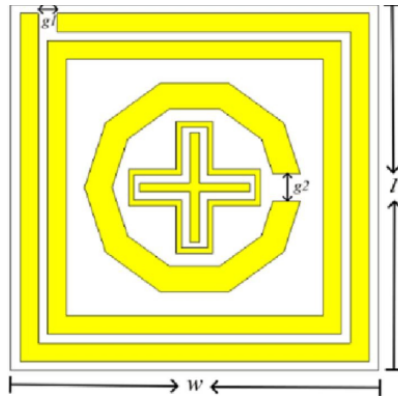
Şekil 7: Önerilen meta malzemeye dayalı ön profil (a) şeffaf emici tasarımı ve (b) yüzde soğurma performansı

Şekilde 7(a) da (Öztürk & ark., 2022) sunulan çalışmada, metamalzeme tabanlı şeffaf ve esnek bir mikrodalga soğurucu tasarımı yapılmıştır. Dielektrik alt tabaka olarak şeffaf PET (polietilen tereftalat) ve iletken olarak ITO (indiyum kalay oksit) kullanılmıştır. Şekil 7(b) de gösterildiği gibi tasarlanan soğurucu, 9,6 GHz ile 34,8 GHz arasında %90 soğurma sağlamaktadır ve 25,2 GHz'de normal darbelerde en yüksek performansı gösterir. Eğik açılar altında ise, 45°'ye kadar %80 soğurma performansı elde edilmiştir. Ayrıca, tasarım hem TE hem de TM polarizasyonlarına karşı duyarsızdır, yani normal gelen elektromanyetik dalgalarda aynı performansı sergiler. Şeffaf dielektrik malzeme yalnızca 2,85 mm kalınlığındadır, bu da yapının boyutu açısından değerlendirilmesinde ince yapmaktadır. Bu ve bu tür emici tasarımları özellikle geniş bant aralığı, esneklik ve şeffaflık gibi

avantajları nedeniyle modern elektronik, iletişim ve güvenlik teknolojilerinde geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır.

3.7. GHz Aralığında Elektromanyetik Enerji Hasadı Uygulamaları İçin Dielektrik Malzemesi Rogers Olan Metamalzeme Emici

Şekil 8’de birim hücresi (Ullah & ark., 2024) sunulan çalışma, ortam enerjisi hasadı (EH) uygulamalarına yönelik yenilikçi ve kompakt bir dört bantlı metamalzeme soğurucu tasarımı sunmaktadır. Soğurucu, geleneksel FR-4 yerine, 2,2 geçirgenlik (ϵ) ve 0,0009 kayıp tanjant (δ) değerlerine sahip Rogers RT 5880 dielektrik malzeme kullanılarak üretilmiştir. 1,575 mm kalınlığındaki bu alt tabaka, daha verimli ve kompakt enerji hasat sistemleri geliştirmek için optimize edilmiştir.



Şekil 8: Önerilen metamalzeme emici tasarımının birim hücresinin üstten görünümü

Önerilen metamalzeme tasarımı, sırasıyla 2.152, 2.716, 3.674 ve 3.908 GHz frekanslarında verimlilikleri %98.91, %98.81, %98.99 ve %99.89 olarak elde edilmiştir. Önerilen tasarım, özellikle

kablosuz sensör ağıları gibi kompakt ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için güçlü bir potansiyel taşımaktadır.

4. Sonuç

Son yıllarda metamalzemelerin oluşum ve gelişimi ile metamalzeme temelli mikrodalga emiciler kolay üretilebilir, geniş bant, eğik açı hassasiyeti düşük, ucuz emilim performansları sunmaktadır. Bu emiciler bant genişliklerinin ve savunma sanayinin önem kazandığı son yıllarda güçlü performansları ile dikkatleri üzerine çekmektedir. Özellikle PCB teknikleri ile üretim kolaylığı sunan GHz bölgesi metamalzeme emiciler radar frekanslarının yaygın olarak kullanıldığı S, C, X, Ku ve K bantları için kolay üretim-yüksek verimlilik avantajı sunmaktadır. THz bölge emiciler yüksek frekanslarda çeşitli bileşenler ile geniş bant avantajları sunmaktadır. Bu emiciler, farklı uygulama alanlarında önemli faydalar sağlayarak enerji hasadı, sensör teknolojileri ve elektromanyetik dalga kontrolü gibi alanlarda etkili çözümler sunmaktadır.

Kaynaklar

H Wang, Y., Cui, Z., Zhu, D., & Yue, L. (2019). Composite metamaterials for THz perfect absorption. *physica status solidi (a)*, 216(6), 1800940.

Gökhan Öztürk (2018).Homojen ve homojen olmayan bianizotropik metamatelzemelerin elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi.

Ranjan, S. K., & Sahoo, S. (2024). Hexagon enclosed modified G-shaped polarization and incident angle independent metamaterial absorber for S, C, X and Ku band frequency. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 155348.

Veselago, V. G. (1967). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Usp. fiz. nauk*, 92(3), 517-526.

Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1998). Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(22), 4785.

Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.

Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402.

Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.

Brookner, E. (2016, October). Metamaterial advances for radar and communications. In *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)* (pp. 1-8). IEEE.

Dong, Y., & Itoh, T. (2012). Metamaterial-based antennas. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2271-2285.

Landy, N., & Smith, D. R. (2013). A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves. *Nature materials*, 12(1), 25-28.

Ozturk, G. (2022). Ultra-thin, wide-angle and bandwidth-enhanced linear and circular metasurface-based reflection-type polarization converter at X-band microwave frequency. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(10), 1423-1435.

Prakash, D., & Gupta, N. (2022). Applications of metamaterial sensors: A review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(1), 19-33.

Xie, Y., Liu, Z., Zhou, F., Luo, X., Cheng, Z., Yang, R., ... & Yang, G. (2023). A multifrequency narrow-band perfect absorber based on graphene metamaterial. *Diamond and Related Materials*, 137, 110100.

Hannan, S., Islam, M. T., Soliman, M. S., Faruque, M. R. I., Misran, N., & Islam, M. S. (2022). A co-polarization-insensitive metamaterial absorber for 5G n78 mobile devices at 3.5 GHz to reduce the specific absorption rate. *Scientific Reports*, 12(1), 11193.

Griffiths, D. J. (2023). *Introduction to electrodynamics*. Cambridge University Press.

Shen, X., Cui, T. J., Zhao, J., Ma, H. F., Jiang, W. X., & Li, H. (2011). Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber. *Optics express*, 19(10), 9401-9407.

Yu, Z., Liu, S., Fang, C., Huang, X., & Yang, H. (2015). Design, simulation, and fabrication of single-/dual-/triple band metamaterial absorber. *Physica Scripta*, 90(6), 065501. Zhang, K., Li, D., Chang, K., Zhang, K., & Li, D. (1998). *Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics* (pp. 274-283). Berlin: Springer.

Balanis, C. A. (2012). Advanced engineering electromagnetics.

Jiang, X. W., Wang, S., & Wu, H. (2022). Metamaterial absorber with tunable absorption bandwidth based on vanadium dioxide. *Acta Photonica Sinica*, 51(1), 0151124.

Zhang, J., Li, Z., Shao, L., & Zhu, W. (2021). Dynamical absorption manipulation in a graphene-based optically transparent and flexible metasurface. *Carbon*, 176, 374-382.

Xiao, J., Xiao, R., Zhang, R., Shen, Z., Hu, W., Wang, L., & Lu, Y. (2020). Tunable terahertz absorber based on transparent and flexible metamaterial. *Chinese Optics Letters*, 18(9), 092403.

Sharma, S., Kazemi, F., Singh, P., Kumar, A., & Zarrabi, F. B. (2024). An ultra broadband metamaterial absorber based on metal-dielectric-metal technology for THz spectrum. *Nano Communication Networks*, 42, 100531.

Ma, S., Zhang, Y., Fu, W., Huang, S., Zhu, Y. F., & Luo, X. (2024). Terahertz metamaterial absorber with switchable function

between broadband and dual narrowband. *Results in Physics*, 56, 107283.

Wu, G., Jiao, X., Wang, Y., Zhao, Z., Wang, Y., & Liu, J. (2021). Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide. *Optics Express*, 29(2), 2703-2711.

Rabbani, M. G., Islam, M. T., Hoque, A., Bais, B., Albadran, S., Islam, M. S., & Soliman, M. S. (2024). Orthogonal centre ring field optimization triple-band metamaterial absorber with sensing application. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 49, 101588.

Li, L., Gao, H., Zhang, B., Wang, J., & Jin, C. (2024). Design of a multilayer absorber for ultra-wideband radar cross section reduction. *Microwave and Optical Technology Letters*, 66(9), e34308.

Öztürk, G., Tutar, F., Ertugrul, M., Koçkeser, A., & Öztürk, Y. Air Based Flexible Ultra-Thin Transparent ITO Based Broadband and Polarization Insensitivity Metamaterial Absorber. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(4), 363-369.

Ullah, N., Islam, M. S., Hoque, A., Yong, W. H., Soliman, M. S., & Islam, M. T. (2024). A compact-sized four-band metamaterial-based perfect absorber for electromagnetic energy harvesting applications. *Optics & Laser Technology*, 168, 109836.

