

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK
TARTIŞMALAR**

Editör:

Doç.Dr. Rukiye UZUN ARSLAN

Dr.Öğr.Üyesi Süleyman ADAK

yaz
yayınları

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar

Editör

Doç.Dr. Rukiye UZUN ARSLAN

Dr.Öğr.Üyesi Süleyman ADAK

yaz
yayınları

2026

**Elektrik-Elektronik ve Haberleşme
Mühendisliği Alanında Akademik
Tartışmalar**

Editör: Doç.Dr. Rukiye UZUN ARSLAN

Dr.Öğr.Üyesi Süleyman ADAK

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8996-66-1

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

- Nexys 4 DDR FPGA Üzerinde 8-Qubit Kuantum Devre Simülatörü: Tasarım, İmplementasyon ve Performans Analizi.....1**
Ahmet GÖKÇEN
- Rüzgâr Enerjisi Üretim Tahmininde Hibrit Derin Öğrenme ve Boosting Yaklaşımı.....17**
Tuba TANYILDIZI AĞIR
- Cilt Lezyonlarının Yapay Zekâ ile Tespiti: Güncel Yaklaşımlar, Klinik Güvenilirlik ve Sınırlılıklar.....27**
Rukiye UZUN ARSLAN
- İşitme Engelli Ebeveynler İçin Çoklu Algılayıcı Giyilebilir Bebek İzleme ve Uyarı Sistemi.....46**
Rukiye UZUN ARSLAN
- Analysis of A Canal-Type Solar Photovoltaic System64**
Suleyman ADAK
- Akıllı Sağlık Hizmetleri İçin SDN Destekli EDGE-IoT Mimarileri: Zorluklar, Güvenlik ve Araştırma Yönleri.....86**
Abdulaziz CEYLAN
- Fotovoltaik Sistemlerde Optimum Eğim Açısının Belirlenmesine Yönelik Yaklaşımlar ve Sistem Performansına Etkileri102**
Erkul KOCAMAN, Melih ÇOBAN

**Modelling and Optimization of Renewable Power
Generation Systems with Homer Pro – Part I:
Theoretical Foundations and Modelling Methodology...120**
Bahtiyar DURSUN, Sibel DURSUN, Zafer Ömer ÖZDEMİR

**Modelling and Optimization of Renewable Power
Generation Systems with Homer Pro – Part II:
Current Applications and Case Studies.....138**
Bahtiyar DURSUN, Sibel DURSUN, Zafer Ömer ÖZDEMİR

**Regenerative Braking and Its Simulation in Electric
Vehicle Propulsion System.....152**
Serdar KAŞIKCI, Ercan KÖSE

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

NEXYS 4 DDR FPGA ÜZERİNDE 8-QUBIT KUANTUM DEVRE SİMÜLATÖRÜ: TASARIM, İMPLEMENTASYON VE PERFORMANS ANALİZİ

Ahmet GÖKÇEN¹

1. GİRİŞ

Kuantum hesaplama, klasik bilgisayar mimarilerinin temel sınırlarını aşmaya yönelik hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Shor'un asal çarpanlara ayırma (Shor, 1997) ve Grover'in veritabanı arama algoritmaları (Grover, 1996) gibi kuantum algoritmalarının belirli problem sınıflarında üstel hızlanma sağladığı teorik olarak ispatlanmış olmakla birlikte, bu algoritmaların çalıştırılabileceği fiziksel kuantum donanımı henüz olgunlaşma sürecindedir.

Gerçek kuantum donanımı, süper iletken qubit'lerin çalışabilmesi için milikelvine yakın sıcaklıklar gerektiren kriyojenik sistemler, hassas kontrol elektroniği ve gürültü yönetim altyapısı gibi son derece pahalı ve erişimi kısıtlı bileşenlere ihtiyaç duymaktadır. Bu kısıtlar göz önüne alındığında, kuantum algoritmalarının klasik donanım üzerinde simüle edilmesi; algoritma geliştirme, doğrulama ve eğitim amaçları bakımından kritik bir öneme sahiptir (Nielsen ve Chuang, 2000).

Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA), paralel veri işleme yetenekleri, yeniden yapılandırılabilir mimarileri ve düşük güç tüketimleri sayesinde kuantum devre simülasyonu için çekici

¹ Doç. Dr., Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-7569-5447.

bir platform sunmaktadır. Bu çalışmada, Digilent Nexys 4 DDR kartında bulunan Xilinx Artix-7 (XC7A100T) FPGA(Digilent Inc., 2016) üzerine 8-qubit kuantum devre simülatörü implement edilmekte ve performans karakterizasyonu sunulmaktadır.

Çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir: (i) Artix-7 FPGA üzerinde sabit noktalı aritmetik kullanan kuantum devre motoru tasarımı; (ii) Hadamard, Pauli-X, Pauli-Z ve CNOT kapılarının donanım implementasyonu; (iii) CPU ve GPU tabanlı simülatörlerle kapsamlı gecikme ve güç karşılaştırması; (iv) Tasarımın ölçeklenebilirlik analizinin sunulması.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

FPGA tabanlı kuantum simülatörlerine yönelik çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır. Pilch ve Długopolski (2019), kuantum kapılarını üniter matrisler olarak donanımda paralel biçimde emüle eden FPGA tabanlı bir gerçek kuantum bilgisayar öykünücüsü sunmuştur. Doi ve Takahashi (2016), CPU ile GPU'yu birleştiren heterojen HPC sistemlerinde 20 qubit üzeri simülasyon gerçekleştirmiş; fakat bu yaklaşım yüksek güç tüketimi ve donanım maliyeti nedeniyle eğitim amaçlı kullanıma uygun değildir.

Aminian vd. (2008), Intel Stratix IV üzerinde 3-qubit sistemde T kapısını da içeren kapı kütüphanesi sunmuş ve %85 kapı doğruluğu elde etmiştir. Öte yandan Altera Quartus II tabanlı çalışmalar (Lee vd., 2016) qubit başına DSP kullanımını optimize etmeye odaklanmış; ancak sistematik güç karşılaştırması sunmamıştır. Khalid vd. (2004), 2–4 qubit aralığında Hadamard ve CNOT kapılarını implement etmiş; ancak Pauli kapı ailesi ve sabit noktalı aritmetik optimizasyonunu kapsam dışında bırakmıştır. Bu çalışma, düşük maliyetli Nexys 4 DDR platformunu hedefleyerek söz konusu boşluğu doldurmakta; 8-qubit düzeyinde kapsamlı bir güç/gecikme profili ortaya

koymakta ve ölçeklenebilirlik sınırlarını deneysel olarak belirlemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Qubit ve Durum Vektörü

Klasik bir bit yalnızca 0 veya 1 değerini alırken, bir qubit $|\psi\rangle$ süperpozisyon prensibine göre her iki değeri eş zamanlı olarak temsil edebilir (Nielsen ve Chuang, 2000):

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1) \quad (1)$$

Denklem (1)'deki α ve β karmaşık genlik katsayılarıdır. n qubit'lik bir sistemin tam durumu 2^n boyutlu karmaşık bir vektörle ifade edilmektedir. Bu çalışmada $n=8$ seçildiğinden durum uzayı $2^8 = 256$ karmaşık sayıdan oluşmaktadır.

3.2. Kuantum Kapıları

Kuantum kapıları, durum vektörü üzerine uygulanan üniter matrislerdir. Bu çalışmada implement edilen temel kapılar ve matris gösterimleri aşağıda verilmektedir.

Hadamard kapısı (H), bir qubit'i süperpozisyon durumuna taşımak için kullanılmakta olup normalizasyon faktörü $1/\sqrt{2}$ ile tanımlanan 2×2 üniter matris denklem (2)'de verilmiştir.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pauli-X kapısı klasik NOT geçidine karşılık gelir ve $|0\rangle$ ile $|1\rangle$ durumlarını yer değiştirir, denklem (3).

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Pauli-Z kapısı ise $|1\rangle$ durumuna π faz kayması uygular, $|0\rangle$ durumunu değiştirmez, denklem (4).

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

CNOT (Kontrollü-NOT) kapısı iki qubit üzerinde çalışan ve kuantum dolanıklığı oluşturmak için kullanılan temel iki-qubit kapısıdır ve denklem (5)'te verilmiştir.

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

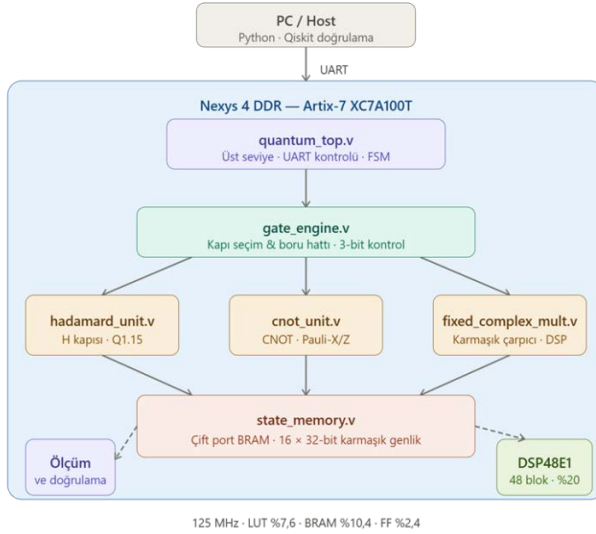
3.3. FPGA’da Sabit Noktalı Karmaşık Aritmetik

FPGA’larda kayan noktalı birim (FPU) bulunmamakta ya da DSP tabanlı implementasyonu yüksek kaynak maliyeti gerektirmektedir. Bu nedenle karmaşık genlikler Q1.15 formatında (1 işaret biti, 15 kesir biti) sabit noktalı sayılarla temsil edilmektedir. Q1.15 formatında 1 LSB = $2^{-15} \approx 3,05 \times 10^{-5}$ çözünürlük elde edilmekte olup bu değer 8-qubit simülasyonu için yeterli hassasiyeti sağlamaktadır. Tek bir Hadamard kapısı uygulaması için gereken karmaşık çarpma iki gerçel çarpma ve bir toplama işlemine indirgenerek DSP48E1 blokları ile verimli biçimde gerçekleştirilmiştir.

4. SİSTEM MİMARİSİ

4.1. Genel Yapı

Simülatör üç ana modülden oluşmaktadır: (1) Durum vektörü belleği, (2) Kapı işlem birimi ve (3) Ölçüm ve doğrulama modülü. Nexys 4 DDR kartının UART arayüzü üzerinden PC ile haberleşen sistem, Python tabanlı bir doğrulama aracıyla karşılaştırmalı test edilmektedir. Şekil 1’de sistem mimarisinin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1. Sistem Mimarisi Blok Diyagramı (RTL Gösterimi)

4.2. Durum Vektörü Belleği

8-qubit sisteminin 256 karmaşık genliği, her biri 32 bit genişliğinde (16 bit gerçek + 16 bit sanal kısım) dört adet Xilinx Block RAM (BRAM) bloğunda saklanmaktadır. Dört BRAM bloğunun kullanılmasının nedeni, çift portlu erişim ile eş zamanlı okuma/yazma desteği ve kapı işlem biriminin paralel veri yolu gereksinimlerini karşılamaktır; toplam veri kapasitesi $256 \times 32 \text{ bit} = 1 \text{ KB}$ olmasına karşın bant genişliği optimizasyonu amacıyla veriler dört ayrı bloğa dağıtılmıştır. Tablo 1'deki 28 BRAM bloğu değeri, durum vektörü belleğine ek olarak boru hattı ara bellekleri ve UART veri tamponlarını da kapsamaktadır.

4.3. Kapı İşlem Birimi

Kapı işlem birimi, 256 boyutlu durum vektörü üzerinde tek-qubit kapıları için blok-köşegen (block-diagonal) dönüşümler kullanacak şekilde boru hattı (pipeline) mimarisinde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım matematiksel olarak 256×256 üniter dönüşüme eşdeğerdir ancak hesaplama yükünü önemli ölçüde

azaltır. Hadamard kapısı tek qubit'e uygulandığında 128×128 'lik blok köşegen matris yapısından yararlanılarak hesaplama iki karmaşık çarpma ve iki toplama işlemine indirgenmiştir. Bu optimizasyon sayesinde DSP48E1 blok sayısı 96 ile sınırlı tutulabilmektedir.

CNOT kapısı implementasyonunda kontrol ve hedef qubit konumları çalışma zamanında yapılandırılabilir. Kontrol qubit'i $|1\rangle$ durumundayken hedef qubit'in genliği değiştirilerek durum vektörünün ilgili indeks çiftleri takas edilmektedir.

Pauli-X kapısı, tek qubit'e uygulandığında ilgili genlik çiftlerini ($|0\rangle$ ve $|1\rangle$ genlikleri) doğrudan takas ederek gerçekleştirilmiştir; herhangi bir çarpma gerektirmediğinden bu işlem tek bir saat çevriminde tamamlanmakta ve ek DSP48E1 bloğu kullanmamaktadır. Pauli-Z kapısı ise $|1\rangle$ durumuna karşılık gelen genliğin işaretini signed negasyon ile tersine çevirerek gerçekleştirilmiştir; normalize kuantum durumlarında genlik büyüklüğü daima 1,0'dan küçük olduğundan Q1.15 ikiye tümleyen taşması oluşmamaktadır. Bu işlem de tek saat çevriminde gerçekleşmektedir.

Kapı seçimi gate_engine.v içindeki 3 bitlik kontrol sinyali ile gerçekleştirilmekte, hangi qubit çiftinin kontrol-hedef rolünü üstleneceği ise çalışma zamanında UART üzerinden iletilen parametre ile belirlenmektedir.

4.4. Verilog Kod Yapısı

Ana modüller şu şekilde organize edilmiştir:

- quantum_top.v — Üst seviye bağlantı ve UART kontrolü
- state_memory.v — BRAM tabanlı durum vektörü belleği

- gate_engine.v — Kapı uygulama boru hattı (H, X, Z, CNOT seçimi)
- hadamard_unit.v — H kapısı sabit noktalı hesaplama birimi
- pauli_x_unit.v — Pauli-X kapısı genlik takas birimi
- pauli_z_unit.v — Pauli-Z kapısı faz işaret ters çevirme birimi
- cnot_unit.v — CNOT kapısı kontrol mantığı
- fixed_complex_mult.v — Q1.15 formatında karmaşık çarpıcı

Aşağıda hadamard_unit.v modülünün temel bölümü verilmektedir. Orijinal tasarımdaki port_qubit sinyali artık gate_engine.v tarafından yönetilmekte; modül yalnızca hesaplama mantığını içermektedir:

```
module hadamard_unit (  
    input wire clk, rst,  
    input wire [15:0] a_re, a_im,  
    input wire [15:0] b_re, b_im,  
    output reg [15:0] out0_re, out0_im,  
    output reg [15:0] out1_re, out1_im  
);  
  
    localparam signed [15:0] INV_SQRT2 = 16'h5A83;  
    wire signed [16:0] sum_re = {a_re[15],a_re} +  
    {b_re[15],b_re};  
  
    wire signed [16:0] diff_re = {a_re[15],a_re} -  
    {b_re[15],b_re};  
  
    wire signed [16:0] sum_im = {a_im[15],a_im} +  
    {b_im[15],b_im};  
  
    wire signed [16:0] diff_im = {a_im[15],a_im} -  
    {b_im[15],b_im};
```

```
    wire signed [31:0] p0_re = INV_SQRT2 *
    $signed(sum_re[16:1]);

    wire signed [31:0] p0_im = INV_SQRT2 *
    $signed(sum_im[16:1]);

    wire signed [31:0] p1_re = INV_SQRT2 *
    $signed(diff_re[16:1]);

    wire signed [31:0] p1_im = INV_SQRT2 *
    $signed(diff_im[16:1]);

    always @(posedge clk) begin

        if (rst) begin

            out0_re<=0; out0_im<=0; out1_re<=0;
            out1_im<=0;

            end else begin

                out0_re <= p0_re[30:15] + p0_re[14];
                out0_im <= p0_im[30:15] + p0_im[14];
                out1_re <= p1_re[30:15] + p1_re[14];
                out1_im <= p1_im[30:15] + p1_im[14];

            end

        end

    endmodule
```

Aşağıda pauli_z_unit.v modülünün temel bölümü verilmektedir:

```
module pauli_z_unit (
    input wire clk, rst,
    input wire signed [15:0] b_re, b_im,
    output reg signed [15:0] out_re, out_im
);

    always @(posedge clk) begin

        if (rst) begin

            out_re <= 0; out_im <= 0;

        end else begin

            out_re <= -b_re;

        end

    end

endmodule
```

```
        out_im <= -b_im;  
    end  
end  
endmodule
```

fixed_complex_mult.v modülü, bir karmaşık çarpma işlemini dört DSP48E1 bloğuna eşleştirmekte; $(a+jb)(c+jd) = (ac-bd) + j(ad+bc)$ bağıntısı Vivado sentez aracı tarafından otomatik olarak atanmaktadır.

5. UYGULAMA VE SONUÇLAR

5.1. Doğrulama Metodolojisi

Tasarımın işlevsel doğruluğu iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Vivado Simulator ile tüm kapılar (H, X, Z, CNOT) için kapsamlı RTL simülasyonu yapılmış; 200'den fazla test vektörü uygulanmıştır. Bell durumu $(|\Phi^+\rangle = (|00\rangle+|11\rangle)/\sqrt{2})$ ve Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) durumu gibi bilinen kuantum durumları referans alınarak doğruluk onaylanmıştır. Kod kapsamı (code coverage) analizi, dal kapsamı bakımından %94 oranı ile tamamlanmıştır.

İkinci aşamada fiziksel kart üzerinde UART üzerinden Python tabanlı Qiskit simülatörüyle (IBM Quantum Team, 2021) karşılaştırmalı test yapılmış; Q1.15 sayısal kesinliğinin getirdiği $\pm 0,003$ hata payı içinde tüm sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Her test senaryosu 50 kez tekrarlanmış ve sonuçların tekrarlanabilirliği doğrulanmıştır. 50 kapılı zincirleme devrelerde ise birikimli yuvarlama hatası kapı başına ortalama $\sim 10^{-4}$ düzeyinde ölçülmüş olup bu oran Q1.15 formatının teorik sınırıyla ($2^{-15} \approx 3,05 \times 10^{-5}$ çözünürlük) uyumludur.

5.2. Kaynak Kullanımı

Vivado İmplementasyon Raporu'ndan elde edilen kaynak kullanım değerleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Nexys 4 DDR (Artix-7 XC7A100T) Kaynak Kullanım Özeti

<i>Kaynak</i>	<i>Kullanılan</i>	<i>Mevcut (Nexys 4)</i>	<i>Kullanım (%)</i>
LUT (Look-Up Table)	9.640	63.400	%15,2
FF (Flip-Flop)	6.208	126.800	%4,9
DSP48E1	96	240	%40,0
BRAM (36Kb)	28	135	%20,7

DSP48E1 kullanımının (%40) diğer kaynaklara kıyasla görece yüksek olması, karmaşık sabit noktalı çarpma işlemlerinin yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Blok köşegen optimizasyonu sayesinde qubit sayısı iki katına çıktığında DSP48E1 ihtiyacı da yaklaşık iki katına çıkmaktadır; bu ilişkiyle 10-qubit sistemde kullanım ~%80'e ulaşarak Artix-7'nin pratik sınırını belirleyecektir.

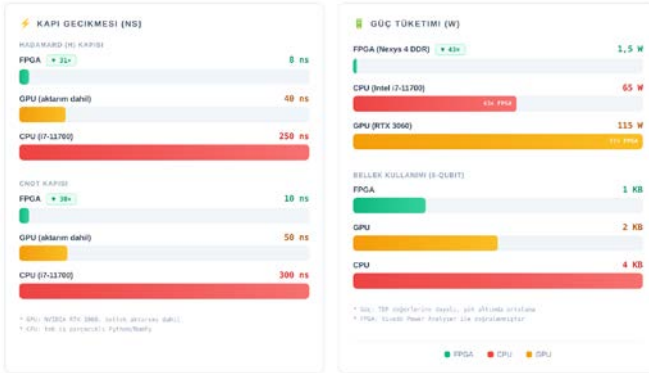
5.3. Performans Karşılaştırması

FPGA implementasyonunun gecikme ve güç tüketimi değerleri, eşdeğer Python/NumPy (Intel Core i7-11700) ve CUDA (NVIDIA RTX 3060) implementasyonlarıyla ölçülmüştür. CPU gecikme ölçümleri cProfiler ile 1000 iterasyonun ortalaması alınarak elde edilmiştir. GPU ölçümleri CUDA Events API kullanılarak gerçekleştirilmiş; bellek aktarım süreleri hem dahil hem hariç olarak ayrıca ölçülmüştür (Tablo 2'deki değerler bellek aktarımı dahil durumdadır). FPGA güç tüketimi Vivado Power Analyzer ile sentez sonrası tahmin edilmiş; kart üzerindeki doğrudan ölçümle $\pm 0,1$ W doğruluk içinde doğrulanmıştır. Sonuçlar Tablo 2'de karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2. Platform Karşılaştırması: Gecikme, Güç Tüketimi ve Bellek Kullanımı

<i>Parametre</i>	<i>FPGA (Nexys 4 DDR)</i>	<i>CPU (Intel i7-11700)</i>	<i>GPU (NVIDIA RTX 3060)</i>	<i>FPGA/CPU Farkı</i>
Qubit Aralığı	4–10	4–25	4–28	—
Hadamard Gecikmesi	8 ns	~250 ns	~40 ns	31×
CNOT Gecikmesi	10 ns	~300 ns	~50 ns	30×
Güç Tüketimi	~1,5 W	~65 W	~115 W	43× daha az
8-qubit Bellek	1 KB BRAM	~4 KB RAM	~2 KB VRAM	4× verimli

Tablodaki değerler, FPGA'nın Hadamard kapısı gecikme metriğinde CPU'ya kıyasla 31 katlık üstünlüğünü net biçimde ortaya koymaktadır. Güç verimliliği açısından ise FPGA 1,5 W ile CPU'nun 65 W'nın çok altında kalmaktadır. GPU bellek aktarım yükü dahil edildiğinde 8-qubit boyutundaki görevlerde FPGA'nın gerisinde kalmaktadır; yalnızca hesaplama süresi değerlendirildiğinde GPU yaklaşık 12 ns değeriyle FPGA'ya yakın performans sergilemektedir. Ancak güç verimliliği açısından FPGA belirgin üstünlüğünü korumaktadır. Platform karşılaştırmaları Şekil 2'de ayrıca görsel hale getirilmiştir.



Şekil 2. FPGA, CPU ve GPU Platformlarının Gecikme, Güç Tüketimi ve Bellek Kullanımı Karşılaştırması

6. TARTIŞMA

Mevcut implementasyon 8 qubit üzerinde çalışmakta olup ölçeklenebilirliğin temel kısıtlayıcısı DSP48E1 kullanımınıdır. 8-qubit sisteminde DSP48E1 kullanımı %40 düzeyindedir. 10-qubit sistemin durum vektörü $2^{10} \times 4$ bayt = 4 KB bellek gerektirmekte; bu değer Nexys 4 DDR'ın toplam BRAM kapasitesi olan 135×36 Kb ≈ 607 KB içinde rahatlıkla kalmaktadır. Bununla birlikte, kapı işlem birimindeki hesaplama yükü ek DSP48E1 blokları gerektireceğinden 10 qubit civarında pratik bir üst sınır oluşturmaktadır.

Toffoli (CCX) ve Phase (P) kapıları mevcut mimariyle uyumludur; ancak Toffoli kapısı 8×8 üniter matris içerdiğinden kapı işlem biriminde dört ek DSP48E1 bloğu ve bir ek boru hattı aşaması gerektirmektedir. Bu ek yük, mevcut DSP48E1 bütçesi (%40) göz önünde bulundurulduğunda Artix-7 kapasitesi dahilinde kalmakla birlikte deneysel doğrulaması gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Q1.15 formatı, $1 \text{ LSB} = 2^{-15} \approx 3,05 \times 10^{-5}$ çözünürlük sunmaktadır. Çok-adımlı devre yürütmelerinde yuvarlama hataları birikebilmekte ve 50 kapılı devrelerde kapı başına $\sim 10^{-4}$ düzeyine ulaşmaktadır; 50 kapı için birikimli hata ise $\sim 5 \times 10^{-3}$ mertebesinde. Bell durumu oluşturma deneyi ($H + \text{CNOT} = 2$ kapı) sonucunda $|00\rangle$ ve $|11\rangle$ genliklerinin beklenen $1/\sqrt{2} \approx 0,7071$ değerinden maksimum 0,0008 oranında saptığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için Q2.29 veya IEEE 754 tek duyarlıklı kayan nokta formatına geçiş araştırılabilir; ancak bu değişiklik DSP48E1 kullanımını yaklaşık iki katına çıkaracaktır.

Normalizasyon korunumu ($\sum |\alpha_i|^2 = 1$) açısından, Q1.15 yuvarlama hataları birikimli olarak olasılık toplamında küçük sapmalar oluşturabilmektedir. Bell durumu doğrulama deneyinde ölçülen maksimum sapma 0,0008 düzeyinde olup bu değer 2

kapılık devre için kabul edilebilir sınırlar içindedir. Bununla birlikte, uzun devre zincirlerinde normalizasyon bütünlüğünü korumak amacıyla periyodik yeniden normalizasyon (re-normalization) adımlarının eklenmesi gelecek çalışmalarda değerlendirilebilir.

Bölüm 5.3'te sunulan gecikme değerlerinin yalnızca kapı hesaplama süresini kapsadığı ve UART haberleşme yükünü içermediği belirtilmelidir. 115200 baud hızındaki UART arayüzü, tek bir 32-bit parametre paketinin iletimi için yaklaşık 3,5 μ s ek gecikme getirmektedir. Bu durum, sistem düzeyinde uçtan uca gecikme ölçümleri açısından önemli bir etkidir ve uygulamaya özel bant genişliği gereksinimleri değerlendirilirken göz önünde bulundurulmalıdır.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, Nexys 4 DDR FPGA kartı üzerinde 8-qubit kuantum devre simülatörü başarıyla implement edilmiş ve kapsamlı biçimde karakterize edilmiştir. Tasarım, sabit noktalı aritmetik kullanarak Hadamard, Pauli-X, Pauli-Z ve CNOT kapılarını 8–10 ns gecikme aralığında gerçekleştirmekte; LUT kullanımını Artix-7 kapasitesinin %15,2'si, en yoğun kaynak olan DSP48E1 kullanımını ise %40'ı ile sınırlı tutmaktadır.

Karşılaştırmalı ölçümler, FPGA'nın Hadamard gecikmesi açısından CPU'ya 31 kat, CNOT gecikmesi açısından 30 kat ve güç tüketimi açısından 43 kat üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, FPGA platformlarının hem akademik araştırma hem de gerçek kuantum sistemleri için kontrol elektroniği geliştirme bağlamında değerli bir araç olduğunu güçlü biçimde desteklemektedir. Düşük maliyet ve erişilebilir geliştirme ortamı göz önüne alındığında, Nexys 4 DDR tabanlı bu sistem özellikle kuantum hesaplama eğitimi ve ilk-aşama

algoritma doğrulaması için uygun bir başlangıç platformu sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Aminian, M., Saeedi, M., Zamani, M. S. ve Sedighi, M. (2008). FPGA-Based circuit emulation of quantum algorithms. Proc. NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), San Francisco, 237–244.
- Digilent Inc. (2016). Nexys 4 DDR FPGA board reference manual. Rev. C. Erişim: <https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-4-ddr/reference-manual>
- Doi, J. ve Takahashi, H. (2016). Quantum computing simulator on a heterogeneous HPC system. Proc. Workshops of International Conference on High Performance Computing, Network, Storage and Analysis (SC Workshops), Salt Lake City, 85–93.
- Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. Proc. 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC), New York, 212–219.
- IBM Quantum Team (2021). Qiskit: An open-source framework for quantum computing. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.2562110
- Khalid, A. U., Zilic, Z. ve Radecka, K. (2004). FPGA emulation of quantum circuits. Proc. IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors (ICCD), 310–315.
- Lee, Y. H., Khalil-Hani, M. ve Marsono, M. N. (2016). An FPGA-based quantum computing emulation framework based on serial-parallel architecture. International Journal of Reconfigurable Computing, 2016, Article ID 5718124.
- Nielsen, M. A. ve Chuang, I. L. (2000). Quantum computation and quantum information. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Pilch, J. ve Długopolski, J. (2019). An FPGA-based real quantum computer emulator. *Journal of Computational Electronics*, 18(1), 329–342.
- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5), 1484–1509.

RÜZGÂR ENERJİSİ ÜRETİM TAHMİNİNDE HİBRİT DERİN ÖĞRENME VE BOOSTING YAKLAŞIMI

Tuba TANYILDIZI AĞIR¹

1. GİRİŞ

Son yıllarda küresel ölçekte enerji talebi, nüfus artışı, sanayi faaliyetlerinin genişlemesi ve kentleşmenin hız kazanmasıyla birlikte önemli ölçüde artış göstermiştir. Enerjiye erişimin temel bileşenlerinden biri olan elektrik arzı, bireylerin ve kurumların günlük faaliyetlerini sürdürebilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Hane halklarının, ticari işletmelerin ve kamu hizmetlerinin işleyişi için ekonomik ve kesintisiz elektrik temini gereklidir. İletişimden ısınmaya, gıda hazırlamadan iklimlendirmeye, aydınlatmadan sağlık ve eğitim hizmetlerine kadar modern yaşamın pek çok alanı doğrudan elektrik kullanımına dayanmaktadır. Elektrik hizmetlerinin yaygın ve güvenilir biçimde sunulması, yaşam standartlarının yükselmesine, çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine ve bilgiye erişimin artmasına katkı sağlamaktadır. Buna karşın, sağlanan önemli gelişmelere rağmen küresel ölçekte geniş bir nüfus kesimi, kesintisiz, güvenilir ve uygun maliyetli elektrik hizmetlerine erişim imkânından hâlen yoksun bulunmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kırsal bölgelerde ve coğrafi olarak erişimi zor yerleşimlerde; yetersiz altyapı, yüksek yatırım maliyetleri ve fiziki engeller elektrik erişimini sınırlayan başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Elektrik erişiminin

¹ Doç. Dr., Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve otomasyon bölümü, ORCID: 0009-0002-5982-690X.

genişletilmesine yönelik politikalar, genellikle iletim ve dağıtım ağlarının geliştirilmesi, yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması, enerji verimliliğinin teşvik edilmesi ve merkezi şebekeye bağlı olmayan çözümlerin desteklenmesi gibi çok boyutlu stratejileri içermektedir[Nwagu ve ark.,2025]. Bu çerçevede, çevreye daha az zarar veren bir seçenek olarak öne çıkan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, küresel ölçekte bir dönüşüm süreci olarak benimsenmiştir. Söz konusu dönüşüm, ülkelerin düşük karbon salımına dayalı enerji sistemlerine geçişi hızlandırma ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik uluslararası girişimlere uyum sağlama çabalarıyla daha belirgin hâle gelmektedir. Bu doğrultuda, enerji sistemlerinin karbon nötrlüğüne ulaşmasını hedefleyen yapısal değişim süreci giderek ivme kazanmaktadır [Bin Abu Sofian ve ark.,2024].Fosil yakıtların yoğun biçimde kullanımı; sera gazı emisyonlarının artmasına, küresel sıcaklıkların yükselmesine, aşırı meteorolojik olayların sıklaşmasına ve gıda arz güvenliğinin zayıflamasına yol açmaktadır. Bu olumsuzluklar, enerji politikalarında dönüşümü zorunlu kılmış ve birçok ülke fosil temelli sistemlerden uzaklaşarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye başlamıştır[Bin Abu Sofian ve ark.,2022]. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde önemli bir yer tutmakta olup sahip olduğu yüksek potansiyel nedeniyle üzerinde yoğun biçimde çalışılması gereken bir alan olarak değerlendirilmektedir. Rüzgâr kaynağının hemen her coğrafyada bulunabilmesi ve türbinlerin hem kara hem de deniz ortamlarında kurulabilmesi, bu enerji türünün yaygınlaşmasını kolaylaştıran başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji tüketimi içerisindeki payının oldukça yüksek olduğu ve güneş enerjisine kıyasla daha geniş bir kullanım alanına sahip bulunduğu görülmektedir. Rüzgâr enerjisinin öne çıkmasında, düşük maliyetlerle yüksek miktarda enerji üretme kapasitesi önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgâr santralleri, birincil kaynak olarak rüzgârı kullanmakta ve

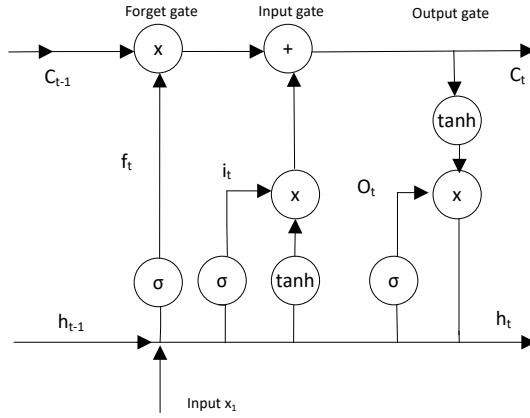
doğrudan kirletici emisyon üretmemeleri bakımından çevresel açıdan avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin ekosistem üzerindeki etkileri çoğu zaman yeterince dikkate alınmamaktadır. Fosil yakıt temelli enerji kaynaklarının yerini rüzgâr enerjisinin alması, genel olarak çevresel göstergelerin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Ancak bu olumlu etkinin düzeyi, ilgili bölgenin enerji bileşimi ve kaynak çeşitliliği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [Chang ve ark.,2022]. Bununla birlikte, rüzgâr enerjisinin üretim sürekliliği, depolama imkânları ve iletim altyapısı bakımından çeşitli teknik sınırlılıkları bulunmaktadır. Özellikle orta ve düşük gelir düzeyine sahip ülkelerde, türbin teknolojilerinin yeterince gelişmemiş olması bu alandaki verimliliği kısıtlayan önemli bir faktördür. Ayrıca rüzgâr enerjisi sistemleri; akustik rahatsızlık, kuş popülasyonları üzerindeki olası etkiler ve görsel çevreye yönelik müdahaleler gibi çevresel ve toplumsal tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, rüzgâr enerjisinin yaygınlaştırılmasında teknik, ekonomik ve ekolojik boyutların bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir [Msigwa ve ar.,2022].

2. METHOD VE METODOLOJİ

2.1. LSTM

Yinelemeli sinir ağları (RNN), ardışık veriyi işleyebilme kapasitesiyle dikkat çeker. Bu yapılarda, her zaman adımında elde edilen bilgi, gizli katmanlar aracılığıyla sonraki adıma aktarılır ve böylece döngüsel bir yapı meydana gelir. Söz konusu mekanizma, geçmişten gelen bilginin korunmasına olanak tanıyarak modelin öğrenme ve soyutlama performansını artırır. Ancak, uzun diziler söz konusu olduğunda geri yayılım sürecinde ortaya çıkan gradyan sönümlenmesi problemi, bu yapıların etkinliğini sınırlandırmaktadır. Bu soruna çözüm olarak

geliştirilen LSTM mimarisi, daha karmaşık parametre yapılarını işleyebilme yeteneğiyle öne çıkar. LSTM, katmanlarında doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları kullanarak bilginin uzun süre korunmasını mümkün kılar. Bu özelliği sayesinde özellikle zaman serisi analizlerinde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Şekil 1’de LSTM modelin mimarisi sunuldu. LSTM yapısı üç temel kapıdan oluşmaktadır: unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı[Tanyıldızı Ağır,2024].



Şekil 1. LSTM mimarisi

2.2. LSBoost

Boosting, önyargı ve varyans bileşenlerini azaltabilme kapasitesine sahip denetimli öğrenme yöntemlerinden biridir. Bu yaklaşım, zayıf öğrenicileri bir araya getirerek güçlü bir öğrenici oluşturmayı amaçlar. Zayıf öğrenici, gerçek sınıflandırma ile yalnızca sınırlı düzeyde ilişki kurabilen bir model iken, güçlü öğrenici bu ilişkiyi yüksek doğrulukla temsil edebilmektedir. Boosting yönteminin temel mantığı, öğrenicilerin ardışık biçimde eğitilmesine dayanır; her bir yeni model, kendisinden önceki modelin hatalarını telafi etmeye odaklanır. Bu süreç, model performansının kademeli olarak iyileştirilmesini sağlar. Çeşitli problem türlerinde yüksek doğruluk oranları sunabilmesi

nedeniyle boosting, hem regresyon hem de sınıflandırma alanlarında yaygın olarak tercih edilen etkili teknikler arasında yer almaktadır. AdaBoost, LogitBoost, GentleBoost, RobustBoost, LPBoost, TotalBoost ve RUSBoost gibi çok sayıda artırma (boosting) algoritması literatürde yer almaktadır. Bu yöntemler, zayıf öğrencilerin ardışık biçimde birleştirilmesi yoluyla model performansını iyileştirmeyi hedefleyen farklı yaklaşımlar sunmakta olup, her biri belirli varsayımlar ve optimizasyon stratejileri çerçevesinde geliştirilmiştir [Su ve ark., 2019]. LSBoost, özellikle regresyon problemlerine yönelik geliştirilmiş bir artırma yöntemidir. Bu yaklaşımda, zayıf regresörlerden oluşan bir model topluluğu, ortalama karesel hatayı minimize edecek şekilde ardışık olarak güncellenir. Her iterasyonda, gerçek hedef değer y_i ile mevcut model çıktısı $F(x_i)$ arasındaki farktan elde edilen artık değerler kullanılarak yeni bir zayıf öğrenci eğitilmektedir. Burada $F(x_i)$, ilgili gözlem x_i için daha önce oluşturulmuş tüm zayıf modellerin birleşik tahminini ifade eder. Söz konusu yinelemeli güncelleme süreci, modelin tahmin performansını aşamalı biçimde artırmaktadır. LSBoost algoritmasına ait sözde kod ise Algoritma 1’de sunulmaktadır. LSBoost, topluluk öğrenmesi çerçevesinde çok sayıda zayıf modeli bir araya getirerek daha yetkin bir öğrenme yapısı inşa etmektedir. Bu yaklaşım, tahmin hatalarının düşürülmesine ve genel doğruluk düzeyinin yükseltilmesine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda LSBoost, yanlılık ve varyans arasında uygun bir denge kurarak aşırı öğrenme riskini azaltmakta ve böylece modelin yeni veri setlerine karşı genellebilirliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, LSBoost karmaşık ve doğrusal olmayan örüntülerin temsilinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmakta; aykırı gözlemler ile veri içindeki rastlantısal dalgalanmalara karşı daha dirençli bir yapı sergilemektedir. Ayrıca, değişkenler arasındaki örtük ilişkileri önceden açıkça tanımlamaya ihtiyaç duymadan ortaya koyabilme yeteneğine sahiptir. Tüm bu nitelikler birlikte değerlendirildiğinde,

LSBoost'un güçlü ve etkin bir modelleme yaklaşımı olarak öne çıkmasının temel nedenleri daha açık biçimde anlaşılmaktadır [Du ve ark.,2025].

```
Define  $x_i$  and  $y_i$  as the  $i$ th training sample of known  $(x, y)$  – values
and  $M$  as the number of iterations.

Define the training set  $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ , a loss function as  $L(y, F) = \frac{(y - F)^2}{2}$  and  $F_m(x)$ 
Define  $h(x; \alpha)$  as a small regression tree of input  $x$  parameterized by  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots\}$ ,
The splitting variables, split locations, and terminal node means serve as the regression function.

Initialization:  $F_0(x) = \bar{y}$ 
for  $m = 1$  to  $M$ , do
     $\tilde{y}_i = y_i - F_{m-1}(x_i)$  for  $i = 1, 2, \dots, N$ 
     $(\rho_m, \alpha_m) = \operatorname{argmin}_{\rho, \alpha} \sum_{i=1}^N [\tilde{y}_i - \rho h(x_i; \alpha)]^2$ 
     $F_m(x) = F_{m-1}(x) + \rho_m h(x; \alpha_m)$ 
end
```

Şekil 2. LSBoost sözde kod

2.3. Hibrit LSTM-LSBoost

Bu çalışmada rüzgâr enerjisini 10 dakika aralıklar ile tahmin etmek için hibrit LSTM-LSBoost model kullanıldı. Modellerin performansını karşılaştırmak için LSTM ve LSBoost model kullanıldı. Bu çalışmada rüzgâr santrali gücünün tahmini için sistematik bir modelleme süreci izlenmiştir. İlk aşamada zaman, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve teorik güç eğrisi gibi değişkenleri içeren giriş veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen veriler, model performansını artırmak amacıyla veri ön işleme ve normalizasyon adımlarından geçirilmiştir. Ardından, modelin en uygun parametrelerle çalışmasını sağlamak için LSBoost yöntemi ile hiperparametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen parametreler kullanılarak LSTM modeli kurulmuş ve veri seti %70 eğitim ve %30 test verisi olacak şekilde ikiye ayrılmıştır. Hibrit LSTM-LSBoost modelin başarısı MSE, RMSE, NRMSE, MAPE ve R^2 gibi performans metrikleri ile değerlendirilmiştir. Son aşamada ise geliştirilen model kullanılarak rüzgâr santralinin güç üretimi tahmin edilmiştir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, rüzgar gücü verileri 10 dakikalık zaman aralıklarıyla analiz edilerek LSTM, LSBoost ve hibrit LSTM–LSBoost modelleri kullanılmış ve bu modellerin tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Tablo 1’de modellerin eğitim için performansları verildi. Tablo 1 incelendiğinde, modellerin eğitim verisi üzerindeki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde en başarılı sonucun hibrit LSTM–LSBoost modeline ait olduğu görülmektedir. Hibrit modelin MSE, RMSE, NRMSE ve MAPE sıra ile $3.1971e-04$, 0.0179, 0.0190 ve 2.4977 idi. MAPE değerinin en düşük seviyede olması, modelin tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte R^2 değerinin 0.97 olması, hibrit modelin veri setindeki değişkenliği büyük oranda açıkladığını göstermektedir. LSBoost modeli, LSTM modeline kıyasla daha iyi performans sergilemiş olup daha düşük hata metrikleri ve daha yüksek R^2 değeri ile dikkat çekmektedir. Buna karşın LSTM modelinin hata değerlerinin daha yüksek ve açıklayıcılık gücünün daha düşük olduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, hibrit modelin hem hata minimizasyonu hem de model doğruluğu açısından diğer modellere göre daha üstün performans sergilediği sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 2 incelendiğinde, modellerin test verisi üzerindeki performansları değerlendirildiğinde hibrit LSTM–LSBoost modelinin en başarılı sonuçları verdiği görülmektedir. Hibrit modelin MSE, RMSE, NRMSE ve MAPE sırasıyla $1.5479e-04$, 0.0124, 0.0218 ve 1.8186 idi. R^2 değerinin 0.984 olması ise hibrit modelin veri setindeki değişkenliği büyük ölçüde açıkladığını göstermektedir. LSBoost modeli, LSTM modeline kıyasla daha iyi performans sergilemiş olsa da hibrit modelin gerisinde kalmıştır. LSTM modelinin ise daha yüksek hata metrikleri ve daha düşük açıklayıcılık gücü ile diğer modellere göre daha zayıf performans gösterdiği görülmektedir. Genel olarak

değerlendirildiğinde, hibrit LSTM–LSBoost modelinin test verisi üzerinde de en yüksek performansı sağlayarak en güvenilir model olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Hibrit LSTM-LSBoost modelinin rüzgâr enerjisi tahmininde etkin ve yüksek doğruluk sağlayan bir yaklaşım olarak kullanılabilmesi ve özellikle kısa vadeli rüzgâr gücü tahmin problemlerinde alternatif bir yöntem olarak önerildiği ifade edilebilir. Bu model elektrik şebekelerinin yönetiminde, enerji piyasalarına yönelik tahmin süreçlerinde, rüzgâr santrallerinin işletilmesinde ve akıllı şebeke teknolojilerinde karar destek aracı olarak kullanılabilir.

Tablo 1. Modellerin eğitim için performans metrikleri

Model	MSE	RMSE	NRMSE	MAPE	R^2
LSTM	0.0013	0.0359	0.0381	5.8362	0.892
LSBoost	8.2803e-04	0.0288	0.0306	4.9112	0.93
Hibrit LSTM-LSBoost modeli	3.1971e-04	0.01790	0.0190	2.4977	0.97

Tablo 2. Modellerin test için performans metrikleri

Model	MSE	RMSE	NRMSE	MAPE	R^2
LSTM	3.6132e-04	0.0190	0.0333	2.9715	0.963
LSBoost	5.5565e-04	0.0236	0.0413	3.7434	0.944
Hibrit LSTM-LSBoost modeli	1.5479e-04	0.0124	0.0218	1.8186	0.984

KAYNAKÇA

- Bin Abu Sofian, A. D. A., Lim, H. R., Siti Halimatul Munawaroh, H., Ma, Z., Chew, K. W., & Show, P. L. (2024). Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage. *Sustainable Development*, 32(4), 3953-3978.
- Chang, L., Saydaliev, H. B., Meo, M. S., & Mohsin, M. (2022). How renewable energy matter for environmental sustainability: Evidence from top-10 wind energy consumer countries of European Union. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 31, 100716.
- da Silva, R. G., Ribeiro, M. H. D. M., Moreno, S. R., Mariani, V. C., & dos Santos Coelho, L. (2021). A novel decomposition-ensemble learning framework for multi-step ahead wind energy forecasting. *Energy*, 216, 119174.
- Du, J., Karimi, M., Khalaf, M. I., Al-Nussairi, A. K. J., Singh, N. S. S., Hasson, A. R., ... & Hashemi, M. (2025). Accurate prediction of physical properties of different Freons via different machine learning models. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 169, 109907.
- Galarza-Chavez, A. A., Martinez-Rodriguez, J. L., Dominguez-Cruz, R. F., Lopez-Garza, E., & Rios-Alvarado, A. B. (2025). Multi-step wind energy forecasting in the Mexican Isthmus using machine and deep learning. *Energy Reports*, 13, 1-15.
- Guan, J., Lin, J., Guan, J., & Mokaramian, E. (2020). A novel probabilistic short-term wind energy forecasting model based on an improved kernel density estimation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23791-23808.

- Hossain, M. A., Gray, E., Lu, J., Islam, M. R., Alam, M. S., Chakraborty, R., & Pota, H. R. (2023). Optimized forecasting model to improve the accuracy of very short-term wind power prediction. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(10), 10145-10159.
- Msigwa, G., Ighalo, J. O., & Yap, P. S. (2022). Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives. *Science of The Total Environment*, 849, 157755.
- Nwagu, C. N., Ujah, C. O., Kallon, D. V., & Aigbodion, V. S. (2025). Integrating solar and wind energy into the electricity grid for improved power accessibility. *Unconventional Resources*, 5, 100129.
- Su, M., Zhang, Z., Zhu, Y., & Zha, D. (2019). Data-driven natural gas spot price forecasting with least squares regression boosting algorithm. *Energies*, 12(6), 1094.
- Tanyıldızı Ağır, T. (2024). Prediction of Losses Due to Dust in PV Using Hybrid LSTM-KNN Algorithm: The Case of Saruhanlı. *Sustainability*, 16(9), 3581.
- Zhang, Y., Han, J., Pan, G., Xu, Y., & Wang, F. (2021). A multi-stage predicting methodology based on data decomposition and error correction for ultra-short-term wind energy prediction. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125981.

CİLT LEZYONLARININ YAPAY ZEKÂ İLE TESPİTİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR, KLİNİK GÜVENİLİRLİK VE SINIRLILIKLAR

Rukiye UZUN ARSLAN¹

1. GİRİŞ

Cilt lezyonları; derinin renk, şekil, yüzey yapısı, sınır düzeni, kabarıklık, pigment dağılımı veya vasküler görünüm bakımından normal deri dokusundan ayrılan lokal ya da yaygın değişiklikler olarak tanımlanmaktadır. Bu lezyonlar, benign nevüslerden premalign aktinik keratozlara ve malign melanom ya da bazal hücreli karsinom gibi kanseröz yapılara kadar geniş bir klinik yelpazede değerlendirilmektedir (Christie-Nguyen vd., 2025). Dermatolojik pratikte temel sorun, görsel olarak birbirine benzeyen benign ve malign lezyonların doğru biçimde ayırt edilebilmesidir. Özellikle melanom gibi agresif seyirli cilt kanserlerinde erken tanı, prognoz ve tedavi başarısı açısından belirleyici öneme sahiptir (Naseri vd., 2025; Caraviello vd., 2025). Bu nedenle cilt lezyonlarının güvenilir biçimde değerlendirilmesi, dermatolojik muayenenin yanı sıra erken tanı yaklaşımları ve klinik karar destek sistemleri açısından da önem taşımaktadır (Dinnes vd., 2018; Mevorach vd., 2025).

Cilt kanserinin küresel hastalık yükü bu gereksinimi daha da belirginleştirmektedir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı verilerine göre 2022 yılında dünya genelinde 1,5 milyondan fazla yeni cilt kanseri olgusu tahmin edilmiş; aynı yıl yaklaşık 330.000 yeni melanom olgusu ve 60.000 melanom

¹ Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-2082-8695.

ilişkili ölüm bildirilmiştir. Bu durum, cilt kanserinin yalnızca bireysel hasta yönetimi açısından değil, halk sağlığı, tarama stratejileri ve sağlık sistemleri üzerindeki yük bakımından da önemli bir problem olduğunu göstermektedir. Ayrıca güncel epidemiyolojik çalışmalar, kutanöz melanom olgularının önemli bir bölümünün ultraviyole radyasyon maruziyetiyle ilişkili olduğunu ortaya koymakta; bu da önlenabilir risk faktörlerinin azaltılması ve erken tanı olanaklarının güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (IARC, 2024; Langselius vd., 2025).

Cilt lezyonlarının değerlendirilmesinde klinik muayene, dermoskopi ve dijital görüntüleme yöntemleri önemli rol oynamaktadır. Dermoskopi; pigment ağı, globül, streak, regresyon alanı, mavi-beyaz örtü ve vasküler yapı gibi çıplak gözle görülemeyen morfolojik özelliklerin incelenmesine olanak sağlar. Bununla birlikte dermoskopik yorumlama; hekimin deneyimi, görüntü kalitesi, lezyon tipi, deri tonu, anatomik bölge ve klinik bağlama göre değişebilmektedir. Bu nedenle tanısal özneliği azaltılabilecek, görüntü özelliklerini nicel olarak analiz edebilecek ve klinisyene destekleyici ikinci görüş sunabilecek bilgisayar destekli yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Dinnes vd., 2018).

Bu noktada yapay zeka (YZ) ve özellikle derin öğrenme (DÖ) yöntemleri, dermatolojik görüntü analizinde öne çıkan araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Zbrzezny vd., 2025; Vieira vd., 2025). Geleneksel makine öğrenmesi (MÖ) yaklaşımları çoğunlukla renk, doku, sınır düzensizliği, asimetri ve şekil gibi elle çıkarılmış özelliklere dayanırken; DÖ modelleri görüntülerden ayırt edici özellikleri doğrudan öğrenebilme kapasitesine sahiptir (Esteva vd., 2017). Evrimsel sinir ağları, lezyon görüntülerindeki düşük seviyeli kenar ve renk özelliklerinden başlayarak daha karmaşık morfolojik örüntülere kadar hiyerarşik temsiller oluşturabilmektedir. Esteva vd. (2017), derin evrimsel sinir ağlarının görüntü pikselleri ve hastalık

etiketleri üzerinden uçtan uca eğitilebildiğini ve cilt kanseri sınıflandırmasında dermatologlarla karşılaştırılabilir performans gösterebildiğini göstermiştir. Ancak bu sistemlerin klinik kullanıma aktarılabilmesi yalnızca yüksek doğruluk değerlerine bağlı değildir; genellenebilirlik, sınıf dengesizliği, deri tonu ve veri seti yanlılığı, açıklanabilirlik, dış doğrulama ve klinik iş akışlarına uyum gibi konuların da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Tjiu vd., 2025; Gordon vd., 2024; Weir vd., 2025).

Bu çalışmada, cilt lezyonlarının YZ ve DÖ yöntemleriyle tespitine yönelik güncel yaklaşımların genel bir değerlendirmesinin sunulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda cilt lezyonlarının klinik özellikleri, dermatolojik görüntüleme yöntemleri, kullanılan veri setleri, görüntü ön işleme adımları, ESA, transfer öğrenme modelleri, Vision Transformer tabanlı yaklaşımlar, hibrit mimariler ve performans değerlendirme ölçütleri ele alınmaktadır. Ayrıca açıklanabilir yapay zeka, model güvenilirliği, veri seti yanlılığı, etik ve hukuki boyutlar ile klinik uygulamaya aktarım sürecinde karşılaşılan temel sınırlılıklar tartışılmaktadır. Bu yönüyle çalışma, YZ tabanlı yöntemlerin dermatolojik görüntü analizindeki mevcut kullanım alanlarını, potansiyel katkılarını ve dikkatle değerlendirilmesi gereken sınırlılıklarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Cilt lezyonlarının YZ tabanlı yöntemlerle değerlendirilmesinde, lezyon türlerinin klinik özellikleri ve kullanılan görüntüleme yöntemleri doğru tanımlanmalıdır. Çünkü modellerin morfolojik örüntüleri öğrenme süreci, lezyonların klinik ve görsel özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle temel lezyon gruplarının açıklanması, sınıflandırma sonuçlarının

klirik bağlamda daha doğru yorumlanmasına katkı sağlar. Başlıca lezyon türlerinin genel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Cilt lezyonu türlerinin genel özellikleri

Lezyon türü	Klinik sınıf	Temel özellikler
Melanom	Malign	Melanosit kökenli, agresif seyirli malign lezyon
Bazal hücreli karsinom	Malign	Sık görülen, çoğunlukla lokal invaziv deri tümörü
Aktinik keratoz	Premalign	Ultraviyole hasarıyla ilişkili premalign lezyon
Melanositik nevüs	Benign	Genellikle simetrik ve homojen pigmentli benign lezyon
Benign keratoz benzeri lezyonlar	Benign	Seboreik keratoz ve solar lentigo gibi keratotik lezyonlar
Vasküler lezyonlar	Benign	Damar kaynaklı, kırmızı-mor renkli lezyonlar
Dermatofibrom	Benign	Sert kıvamlı, fibroblastik kökenli benign lezyon

Tabloda verilen özellikler tanısal açıdan yol gösterici olmakla birlikte kesin tanı için yeterli değildir. Lezyonun görünümü; hastanın klinik öyküsü, deri tipi, anatomik yerleşimi ve zaman içindeki değişimiyle birlikte değerlendirilmelidir. Şüpheli olgularda histopatolojik inceleme önemini korumaktadır. Bu nedenle YZ tabanlı sistemler, tanının yerine geçen bağımsız araçlar değil, klinik değerlendirmeyi destekleyen yardımcı sistemler olarak ele alınmalıdır (Dinnes vd., 2018; Tun vd., 2025).

Cilt lezyonlarının analizinde klinik ve dermoskopik görüntüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Klinik görüntüler standart kameralarla elde edilir ve gerçek klinik ortamı yansıtır; ancak ışık koşulları, kamera açısı, çözünürlük, deri tonu, anatomik bölge ve kıl varlığı gibi değişkenlerden etkilenebilir. Dermoskopik görüntüler ise lezyonun büyütülmüş ve aydınlatılmış görünümünü sağlayarak pigment ağı, globül, regresyon alanı, mavi-beyaz örtü ve vasküler yapılar gibi daha ayrıntılı morfolojik özelliklerin incelenmesine olanak verir.

Dermoskopinin deneyimli klinisyenler tarafından kullanıldığında melanom tanısında doğruluğu artırabildiği bildirilmektedir (Dinnes vd., 2018).

Bununla birlikte, her iki görüntüleme yaklaşımı da veri kalitesi, sınıf dengesizliği, etiket güvenilirliği, cihaz farklılıkları ve hasta çeşitliliğinden etkilenebilir. Bu nedenle YZ tabanlı cilt lezyonu çalışmalarında model mimarisinin yanı sıra görüntüleme yöntemi ve veri setinin yapısı da dikkate alınmalıdır.

3. CİLT LEZYONU VERİ SETLERİ

Cilt lezyonu sınıflandırma çalışmalarında kullanılan veri setleri; görüntü türü, örnek sayısı, sınıf yapısı, anotasyon biçimi ve klinik çeşitlilik açısından farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, modellerin eğitim sürecini, performans değerlendirmesini ve klinik genellenebilirliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Yaygın kullanılan veri setlerinin genel özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Veri seti seçimi, model başarısının yorumlanmasında kritik öneme sahiptir. Tek bir veri setinde yüksek doğruluk elde edilmesi, modelin farklı klinik merkezlerde, farklı cihazlarla alınmış görüntülerde veya farklı deri tonlarında aynı performansı göstereceği anlamına gelmez. Bu nedenle cilt lezyonu sınıflandırma çalışmalarında sınıf dengesizliği, hasta düzeyinde veri ayrımı, dış doğrulama ve farklı klinik popülasyonlarda test etme süreçleri mutlaka dikkate alınmalıdır (Tschandl vd., 2018; Mendonça vd., 2013; Cassidy vd., 2022; Daneshjou vd., 2022).

Tablo 2. Cilt lezyonu sınıflandırmada kullanılan başlıca veri setleri

Veri seti	Temel özellik	Sınırlılık
HAM10000	10.015 dermoskopik görüntü içeren çok kaynaklı açık veri setidir.	Sınıf dengesizliği belirgindir.
ISIC Archive	Farklı koleksiyonlardan oluşan geniş ölçekli açık cilt görüntüsü arşividir.	Koleksiyonlar arasında etiket ve görüntü standardı değişebilir.
PH ²	200 dermoskopik görüntü ve segmentasyon bilgisi içerir.	Örnek sayısı DÖ için sınırlıdır.
Derm7pt	Klinik, dermoskopik görüntü ve hasta meta verilerini içeren multimodal veri setidir.	Eksik veri ve modalite farklılıkları modellemeyi zorlaştırabilir.

4. CİLT LEZYONLARININ TESPİTİNDE YZ VE DÖ YAKLAŞIMLARI

Cilt lezyonlarının görüntü tabanlı değerlendirilmesinde YZ yöntemleri, tanısal doğruluğu artırma, gözlemciye bağlı değişkenliği azaltma ve klinik karar süreçlerini destekleme amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. İlk çalışmalar çoğunlukla klasik görüntü işleme ve MÖ yaklaşımlarına dayanmış; bu süreçte renk, doku, şekil, asimetri, sınır düzensizliği ve çap gibi el yapımı özellikler çıkarılarak destek vektör makineleri, k-en yakın komşu, karar ağaçları, yapay sinir ağları ve rastgele orman gibi sınıflandırıcılarla değerlendirilmiştir. Bu yöntemler kontrollü veri setlerinde yararlı sonuçlar verebilse de başarıları büyük ölçüde araştırmacı tarafından belirlenen özelliklerin kalitesine bağlı kalmıştır (Tajeddin vd., 2018; Kassem vd., 2021).

DÖ yöntemleri, özellikle ESA, cilt lezyonu analizinde önemli bir dönüşüm sağlamıştır. Bu modeller, görüntülerden ayırt edici özellikleri önceden tanımlamaya gerek kalmadan öğrenebilmekte ve düşük seviyeli kenar-renk örüntülerinden daha karmaşık morfolojik yapılara kadar hiyerarşik temsiller

oluşturabilmektedir (Esteva vd., 2017; Wu vd., 2022). Esteva vd. (2017), derin evrişimsel sinir ağlarının dermatolojik görüntüler üzerinden uçtan uca eğitilebildiğini ve bazı cilt kanseri sınıflandırma görevlerinde dermatologlarla karşılaştırılabilir sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Ancak bu modellerin klinik değeri yalnızca doğruluk oranlarıyla değil; veri seti çeşitliliği, hasta temsiliyeti, dış doğrulama ve farklı klinik koşullardaki kararlılık ile birlikte değerlendirilmelidir (Esteva vd., 2017; Brinker vd., 2019).

Sınırlı örnek sayısına sahip tıbbi görüntü veri setlerinde transfer öğrenme yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, büyük veri setlerinde önceden eğitilmiş modeller cilt lezyonu görüntülerine uyarlanarak daha etkili özellik öğrenimi sağlanmaktadır. Bununla birlikte, transfer öğrenme sonuçları yorumlanırken sınıf dengesizliği, veri artırma, hasta düzeyinde veri ayrımı ve dış doğrulama süreçleri dikkate alınmalıdır (Wu vd., 2022; Debelee vd., 2023).

Son yıllarda Vision Transformer ve hibrit evrişimsel sinir ağı-Transformer modelleri de dermatolojik görüntü analizinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu modeller, görüntüyü küçük yama dizileri hâlinde işleyerek lezyon bölgeleri arasındaki ilişkileri değerlendirebilmekte ve daha geniş bağlamsal bilgi yakalayabilmektedir (Dosovitskiy vd., 2021; Xin vd., 2022). Ancak bu modeller genellikle daha fazla veri, yüksek hesaplama gücü ve dikkatli düzenleme gerektirir. Bu nedenle küçük, dengesiz veya tek merkezli veri setlerinde elde edilen yüksek başarılar dış doğrulama yapılmadan genellenebilir kabul edilmemelidir (Cassidy vd., 2022; Daneshjou vd., 2022).

5. VERİ ÖN İŞLEME VE GÖRÜNTÜ HAZIRLAMA YAKLAŞIMLARI

Cilt lezyonu sınıflandırma çalışmalarında görüntülerin doğrudan modele verilmesi çoğu zaman yeterli değildir. Dermoskopik ve klinik görüntüler; çözünürlük, aydınlatma, kamera açısı, kıl varlığı, cetvel işaretleri, yansıma, gölgelenme ve arka plan farklılıklarından etkilenebilir. Bu durum, modelin gerçek lezyon özellikleri yerine görüntüleme koşullarına veya artefaktlara odaklanmasına yol açabilir. Bu nedenle ön işleme adımları model başarısı ve genellenebilirlik açısından önemlidir (Shorten ve Khoshgoftaar, 2019).

Yeniden boyutlandırma ve normalizasyon, görüntülerin modele uygun ortak bir formata getirilmesini sağlar. Ancak aşırı küçültme, lezyon sınırı, pigment dağılımı ve vasküler yapılar gibi tanısal ayrıntıların kaybına neden olabilir. Veri artırma ise döndürme, çevirme, yakınlaştırma, parlaklık-kontrast değişimi, bulanıklaştırma ve gürültü ekleme gibi işlemlerle modelin farklı görüntüleme koşullarına dayanıklılığını artırmayı amaçlar. Bununla birlikte, bu işlemler klinik gerçekliği bozmayacak şekilde uygulanmalıdır; aksi durumda model lezyonla ilişkili olmayan yapay örüntüleri öğrenebilir (Shorten ve Khoshgoftaar, 2019; Al-Asadi ve Altun, 2022).

Dermoskopik görüntülerde kıl, hava kabarcığı, cetvel işareti, yansıma ve gölgelenme gibi artefaktlar lezyon sınırını veya pigment dağılımını örterek model performansını etkileyebilir. Bu nedenle bazı çalışmalarda kıl giderme, yansıma azaltma, kontrast iyileştirme ve lezyon segmentasyonu gibi işlemler uygulanmaktadır (Lee vd., 1997). Ancak bu işlemlerin aşırı uygulanması, lezyona ait ince morfolojik ayrıntıların bozulmasına neden olabilir.

Sınıf dengesizliği de önemli bir problemdir. Bazı lezyon sınıfları çok sayıda örnekle temsil edilirken, nadir sınıflar sınırlı

sayıda görüntü içerebilir. Bu durum, modelin çoğunluk sınıflarına yönelmesine ve az temsil edilen sınıflarda düşük başarı göstermesine yol açabilir. Bu nedenle yeniden örnekleme, sınıf ağırlıklandırma, veri artırma ve sentetik örnek üretimi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak başarı yalnızca genel doğrulukla değil, sınıf bazlı performans ve klinik açıdan kritik hata türleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Bu nedenle veri ön işleme ve görüntü hazırlama süreci, yalnızca teknik bir hazırlık aşaması değil, modelin güvenilirliğini doğrudan etkileyen temel bir adımdır. Bu aşamalar dikkatli tasarlanmadığında model, gerçek lezyon özellikleri yerine veri setine özgü yapay örüntüleri öğrenebilir.

6. PERFORMANS METRİKLERİ

YZ tabanlı cilt lezyonu sınıflandırma modellerinin değerlendirilmesinde yalnızca genel doğruluk değeri yeterli değildir. Özellikle sınıf dengesizliği bulunan veri setlerinde model yüksek doğruluk gösterebilir; ancak melanom gibi klinik açıdan kritik sınıfları yeterli düzeyde tespit edemeyebilir. Bu nedenle doğruluk, kesinlik, duyarlılık, özgüllük, F1-skoru, ROC-AUC ve karışıklık matrisi birlikte değerlendirilmelidir (Powers, 2020; Saito ve Rehmsmeier, 2015).

Bu metrikler içinde duyarlılık, malign lezyonların gözden kaçırılma riskini göstermesi bakımından klinik açıdan özellikle önemlidir. Yanlış negatif sonuçlar, malign bir lezyonun benign olarak değerlendirilmesine ve tanı-tedavi sürecinde gecikmeye yol açabilir. ROC-AUC farklı karar eşiklerinde modelin ayırt edici gücünü değerlendirmek için yararlı olsa da tek başına klinik yeterlilik kanıtı olarak görülmemelidir (Fawcett, 2006; Wu vd., 2022). Bu nedenle performans değerlendirmesi genel doğrulukla sınırlı kalmamalı; sınıf bazlı sonuçlar, karar eşiği ve klinik hata maliyetleriyle birlikte sunulmalıdır (Collins vd., 2024).

7. LİTERATÜRDEKİ GÜNCEL ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Cilt lezyonu sınıflandırma literatüründe çalışmalar yalnızca model başarımı açısından değil; veri kalitesi, dış doğrulama, açıklanabilirlik, insan-YZ etkileşimi ve model adaleti açısından da değerlendirilmelidir. Bu kapsamda güncel çalışmaların özeti Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Literatür Karşılaştırması

Yazar-yıl	Yaklaşım	Temel katkı/Sınırlılık
Esteva vd. (2017)	Derin ESA	Dermatologlarla karşılaştırılabilir performans göstermiştir; dış doğrulama gerektirir.
Tschandl vd. (2018)	HAM10000 veri seti	Yaygın benchmark sunmuştur; sınıf dengesizliği ve yanlılık riski vardır.
Yap vd. (2018)	Multimodal DÖ	Görüntü ve meta veriyi birlikte kullanmıştır; eksiksiz veri toplama zordur.
Kawahara vd. (2018)	Çok görevli DÖ	Tanı ve 7 nokta kontrol listesini birlikte ele almıştır; veri sınırlılığı vardır.
Tschandl vd. (2020)	Karar destek	YZ desteğinin hekim doğruluğunu artırabileceğini göstermiştir; hatalı çıktı yanıltıcı olabilir.
Cassidy vd. (2022)	Benchmark analizi	Veri tekrarı ve standartlaşma sorunlarını tartışmıştır.
Daneshjou vd. (2022)	Model adaleti	Cilt tonu ve nadir hastalık temsilerindeki sınırlılıkları göstermiştir.
Xin vd. (2022)	SkinTrans / ViT	Transformer tabanlı sınıflandırmanın potansiyelini göstermiştir; veri ve hesaplama gereksinimi yüksektir.
Yaqoob vd. (2023)	Federe öğrenme	Gizliliği koruyan eğitim yaklaşımını tartışmıştır; doğrudan performans çıkarımı sınırlıdır.
Krakowski vd. (2024)	Sistemik derleme	İnsan-YZ etkileşimini değerlendirmiştir; sonuçlar bağlama bağlıdır.
Furqan (2026)	Attention-based ViT	Meta veri füzyonunu önermiştir; dış doğrulama gerektirir.

Genel olarak literatürdeki eğilim, yalnızca daha yüksek doğruluk elde etmeye değil; modellerin farklı veri setlerinde, cilt tonlarında, cihazlarda ve klinik koşullarda güvenilir biçimde

çalışıp çalışmadığını sorgulamaya yönelmiştir. Bu nedenle güncel değerlendirmelerde dış doğrulama, veri çeşitliliği, insan-YZ etkileşimi ve raporlama standartları giderek daha önemli hale gelmektedir (Tschandl vd., 2020; Daneshjou vd., 2022; Krakowski vd., 2024).

8. AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKA VE KLİNİK GÜVENİLİRLİK

Tıbbi görüntü analizinde modelin doğru tahmin üretmesi kadar, bu tahmini hangi görsel ipuçlarına dayandırdığı da önemlidir. Cilt lezyonu sınıflandırmada modelin gerçekten lezyon alanına mı, yoksa kıl, cetvel işareti, görüntü kenarı veya ışık yansıması gibi alakasız yapılara mı odaklandığı klinik güvenilirlik açısından kritik bir konudur.

Bu amaçla Grad-CAM, LIME ve SHAP gibi açıklanabilir YZ yöntemleri kullanılmaktadır. Grad-CAM, ESA tabanlı modellerde karar üzerinde etkili görüntü bölgelerini ısı haritalarıyla gösterir (Selvaraju vd., 2017). LIME, belirli bir örnek çevresinde model davranışını daha basit bir modelle açıklamaya çalışır (Ribeiro vd., 2016). SHAP ise Shapley değerlerine dayanarak her özelliğin tahmine katkısını hesaplar (Lundberg ve Lee, 2017). Ancak bu yöntemler kesin tanısal kanıt değil, model davranışını anlamaya yardımcı araçlar olarak değerlendirilmelidir.

Açıklanabilirliğin yanında modelin güven skorlarının kalibrasyonu da önemlidir. DÖ modelleri yüksek olasılık değerleri üretebilse de bu değerler her zaman gerçek doğruluk olasılığını yansıtmayabilir (Guo vd., 2017). Bu nedenle cilt lezyonu sınıflandırma sistemlerinde softmax çıktıları tek başına yeterli görülmemeli; kalibrasyon, belirsizlik tahmini, karar eşiği analizi ve dış doğrulama birlikte değerlendirilmelidir.

9. KLİNİK UYGULANABİLİRLİK, ETİK VE HUKUKİ BOYUTLAR

YZ tabanlı dermatolojik karar destek sistemleri klinik kullanıma aktarılmadan önce etik, hukuki ve düzenleyici yönleriyle değerlendirilmelidir. Hasta görüntüleri kişisel sağlık verisi niteliğinde olduğundan veri gizliliği, anonimleştirme, bilgilendirilmiş onam ve veri paylaşım süreçleri açık biçimde tanımlanmalıdır. DSÖ, sağlıkta YZ uygulamalarında etik ve insan hakları temelli yaklaşımın esas alınması gerektiğini vurgulamaktadır (WHO, 2021).

Bu sistemlerin klinik kullanıma uygunluğu yalnızca sınıflandırma başarısına bağlı değildir. Modelin hangi veriyle geliştirildiği, hangi koşullarda test edildiği, hangi hata türlerine yatkın olduğu ve klinisyene nasıl destek verdiği açıkça raporlanmalıdır. Bu nedenle cilt lezyonu sınıflandırma sistemleri doğruluk, duyarlılık veya ROC-AUC gibi ölçütlerin yanı sıra güvenlik, açıklanabilirlik, dış doğrulama, hasta çeşitliliği ve insan gözetimi açısından da değerlendirilmelidir.

10. MEVCUT SINIRLILIKLAR VE GELECEK EĞİLİMLER

DÖ tabanlı yöntemler cilt lezyonu sınıflandırmada önemli başarılar göstermiş olsa da klinik uygulamaya geçişte bazı sınırlılıklar devam etmektedir. Çalışmaların önemli bir bölümü belirli merkezlere, sınırlı cihazlara veya dar hasta gruplarına dayanmaktadır. Koyu cilt tonlarının, nadir lezyonların ve az örnekli sınıfların yetersiz temsili model genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca sınıf dengesizliği nedeniyle modeller çoğunluk sınıflarında yüksek başarı gösterirken, melanom gibi klinik açıdan kritik sınıflarda daha düşük duyarlılık sergileyebilir.

Birçok çalışmada dış merkezli doğrulama ve prospektif klinik testlerin sınırlı olması, bildirilen yüksek performansların gerçek klinik karşılığını zayıflatmaktadır. Gelecekte multimodal modeller, federe öğrenme, mobil dermoskopi sistemleri, açıklanabilir yapay zekâ, belirsizlik tahmini ve kalibre edilmiş karar destek sistemleri daha fazla öne çıkacaktır. Ancak bu yaklaşımların klinik değer taşıyabilmesi için farklı veri kaynaklarında güvenilir, açıklanabilir ve adil sonuçlar üretmeleri gerekmektedir.

11. SONUÇ

YZ ve DÖ yöntemleri, cilt lezyonlarının otomatik analizi ve dermatolojik karar destek sistemleri için önemli olanaklar sunmaktadır. ESA tabanlı modeller, transfer öğrenme, transformer mimarileri ve multimodal yaklaşımlar sınıflandırma performansını artırabilmektedir. Ancak klinik güvenilirlik yalnızca yüksek doğruluk değerleriyle gösterilemez. Sınıf bazlı performans, dış doğrulama, açıklanabilirlik, kalibrasyon, farklı cilt tonlarında adalet, veri gizliliği ve düzenleyici uygunluk birlikte değerlendirilmelidir.

Bu nedenle YZ, dermatolojide hekimin yerini alan bağımsız bir otorite olarak değil; riskli vakaları önceliklendiren, klinik değerlendirmeyi destekleyen ve tanısal süreci daha sistematik hâle getiren yardımcı bir araç olarak konumlandırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Al-Asadi, M., & Altun, A. A. (2022). Deep learning with SMOTE techniques for improved skin lesion classification on unbalanced data. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 21(3), 97-104.
- Brinker, T. J., Hekler, A., Enk, A. H., Klode, J., Hauschild, A., Berking, C., ... & Schrüfer, P. (2019). Deep learning outperformed 136 of 157 dermatologists in a head-to-head dermoscopic melanoma image classification task. *European journal of cancer*, 113, 47-54.
- Cassidy, B., Kendrick, C., Brodzicki, A., Jaworek-Korjakowska, J., & Yap, M. H. (2022). Analysis of the ISIC image datasets: Usage, benchmarks and recommendations. *Medical image analysis*, 75, 102305.
- Caraviello, C., Nazzaro, G., Tavoletti, G., Boggio, F., Denaro, N., Murgia, G., ... & Marzano, A. V. (2025). Melanoma skin cancer: A comprehensive review of current knowledge. *Cancers*, 17(17), 2920.
- Christie-Nguyen, P., Tschen, J. A., & Saleh, H. M. (2025). Dermatopathology Evaluation of Tumors. In *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing.
- Collins, G. S., Moons, K. G., Dhiman, P., Riley, R. D., Beam, A. L., Van Calster, B., ... & Logullo, P. (2024). TRIPOD+ AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods. *bmj*, 385.
- Daneshjou, R., Vodrahalli, K., Novoa, R. A., Jenkins, M., Liang, W., Rotemberg, V., ... & Chiou, A. S. (2022). Disparities in dermatology AI performance on a diverse, curated clinical image set. *Science advances*, 8(31), eabq6147.

- Debelee, T. G. (2023). Skin lesion classification and detection using machine learning techniques: a systematic review. *Diagnostics*, 13(19), 3147.
- Dinnes, J., Deeks, J. J., Chuchu, N., di Ruffano, L. F., Matin, R. N., Thomson, D. R., ... & Williams, H. C. (2018). Dermoscopy, with and without visual inspection, for diagnosing melanoma in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (12).
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., ... & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *nature*, 542(7639), 115-118.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861-874.
- Furqan, M., Katuk, N., & Hartama, D. (2026). Multiclass Skin Lesion Classification Algorithm using Attention-Based Vision Transformer with Metadata Fusion. *Journal of Applied Data Sciences*, 7(1), 203-217.
- Gordon, E. R., Trager, M. H., Kontos, D., Weng, C., Geskin, L. J., Dugdale, L. S., & Samie, F. H. (2024). Ethical considerations for artificial intelligence in dermatology: a scoping review. *British Journal of Dermatology*, 190(6), 789-797.
- Guo, C., Pleiss, G., Sun, Y., & Weinberger, K. Q. (2017, July). On calibration of modern neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 1321-1330). PMLR.

- IARC. (2024). *Skin cancer*. International Agency for Research on Cancer.
- Kassem, M. A., Hosny, K. M., Damaševičius, R., & Eltoukhy, M. M. (2021). Machine learning and deep learning methods for skin lesion classification and diagnosis: a systematic review. *Diagnostics*, *11*(8), 1390.
- Kawahara J, Daneshvar S, Argenziano G, Hamarneh G. 7-Point Checklist and Skin Lesion Classification using Multi-Task Multi-Modal Neural Nets. *IEEE J Biomed Health Inform*. 2018 Apr 9. doi: 10.1109/JBHI.2018.2824327. Epub ahead of print. PMID: 29993994.
- Krakowski, I., Kim, J., Cai, Z. R., Daneshjou, R., Lapins, J., Eriksson, H., ... & Linos, E. (2024). Human-AI interaction in skin cancer diagnosis: a systematic review and meta-analysis. *NPJ digital medicine*, *7*(1), 78.
- Langselius, O., Rungay, H., de Vries, E., Whiteman, D. C., Jemal, A., Parkin, D. M., & Soerjomataram, I. (2025). Global burden of cutaneous melanoma incidence attributable to ultraviolet radiation in 2022. *International Journal of Cancer*, *157*(6), 1110-1119.
- Lee, T., Ng, V., Gallagher, R., Coldman, A., & McLean, D. (1997). Dullrazor®: A software approach to hair removal from images. *Computers in biology and medicine*, *27*(6), 533-543.
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Mendonça, T., Ferreira, P. M., Marques, J. S., Marcal, A. R., & Rozeira, J. (2013, July). PH 2-A dermoscopic image database for research and benchmarking. In *2013 35th annual international conference of the IEEE engineering*

in medicine and biology society (EMBC) (pp. 5437-5440).
IEEE.

- Mevorach, L., Farcomeni, A., Pellacani, G., & Cantisani, C. (2025). A comparison of skin lesions' diagnoses between AI-based image classification, an expert dermatologist, and a non-expert. *Diagnostics*, 15(9), 1115.
- Naseri, H., & Safaei, A. A. (2025). Diagnosis and prognosis of melanoma from dermoscopy images using machine learning and deep learning: a systematic literature review. *BMC cancer*, 25(1), 75.
- Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. arXiv preprint arXiv:2010.16061.
- Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1135–1144.
- Saito, T., & Rehmsmeier, M. (2015). The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PloS one*, 10(3), e0118432.
- Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 618-626).
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of big data*, 6(1), 1-48.

- Tajeddin, N. Z., & Asl, B. M. (2018). Melanoma recognition in dermoscopy images using lesion's peripheral region information. *Computer methods and programs in biomedicine*, 163, 143-153.
- Tjiu, J. W., & Lu, C. F. (2025). Equity and Generalizability of Artificial Intelligence for Skin-Lesion Diagnosis Using Clinical, Dermoscopic, and Smartphone Images: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina*, 61(12), 2186.
- Tschandl, P., Rosendahl, C., & Kittler, H. (2018). The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Scientific data*, 5(1), 180161.
- Tun, H. M., Rahman, H. A., Naing, L., & Malik, O. A. (2025). Trust in artificial intelligence-based clinical decision support systems among health care workers: systematic review. *Journal of Medical Internet Research*, 27, e69678.
- Vieira, J., Mendonça, F., & Morgado-Dias, F. (2025). Deep Learning Approaches for Skin Lesion Detection. *Electronics*, 14(14), 2785.
- Weir, V. R., Li, Y., Gillis, M. C., Kurtansky, N. R., Salvador, T., Halpern, A. C., ... & Rotemberg, V. (2025). Evaluating skin tone scales for dermatologic dataset labeling: a prospective-comparative study. *npj Digital Medicine*, 8(1), 787.
- World Health Organization. (2021). Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200>

- Wu, Y., Chen, B., Zeng, A., Pan, D., Wang, R., & Zhao, S. (2022). Skin cancer classification with deep learning: a systematic review. *Frontiers in Oncology*, 12, 893972.
- Xin, C., Liu, Z., Zhao, K., Miao, L., Ma, Y., Zhu, X., ... & Chen, H. (2022). An improved transformer network for skin cancer classification. *Computers in Biology and Medicine*, 149, 105939.
- Yaqoob, M. M., Alsulami, M., Khan, M. A., Alsadie, D., Saudagar, A. K. J., AlKhathami, M., & Khattak, U. F. (2023). Symmetry in privacy-based healthcare: A review of skin cancer detection and classification using federated learning. *Symmetry*, 15(7), 1369.
- Zbrzezny, A. M., & Krzywicki, T. (2025). Artificial intelligence in dermatology: A review of methods, clinical applications, and perspectives. *Applied Sciences*, 15(14), 7856.

İŞİTME ENGELLİ EBEVEYNLER İÇİN ÇOKLU ALGILAYICILI GİYİLEBİLİR BEBEK İZLEME VE UYARI SİSTEMİ

Rukiye UZUN ARSLAN¹

1. GİRİŞ

İşitme kaybı, bireyin çevresel sesleri algılama, sözlü iletişime katılma, sosyal etkileşim kurma ve günlük yaşam aktivitelerini bağımsız biçimde sürdürebilme becerisini doğrudan etkileyen önemli bir halk sağlığı ve erişilebilirlik problemidir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre dünya genelinde 1,5 milyardan fazla kişi belirli düzeylerde işitme kaybı ile yaşamaktadır. Ayrıca 2050 yılına kadar yaklaşık 2,5 milyar kişinin bir dereceye kadar işitme kaybı yaşayacağı ve 700 milyondan fazla kişinin işitme rehabilitasyonuna ihtiyaç duyacağı öngörülmektedir (DSÖ, 2026). Bu veriler, işitme engelli bireylerin yaşam kalitesini artırmaya yönelik teknolojik çözümlerin yalnızca bireysel konfor açısından değil, toplumsal katılım, bağımsız yaşam, toplumsal katılım ve sağlık güvenliği açısından da önemli olduğunu göstermektedir.

İşitme engelli bireylerin günlük yaşamda karşılaştıkları iletişim ve erişilebilirlik sorunları, ebeveynlik süreciyle birlikte daha özgül ve kritik bir boyut kazanmaktadır. Bebek bakımında ağlama sesinin fark edilmesi, bebeğin yatış pozisyonunun izlenmesi, bez ıslaklığının anlaşılması ve huzursuzluk durumlarına zamanında müdahale edilmesi ebeveyn sorumluluğunun temel bileşenleri arasında yer almaktadır. İşiten

¹ Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-2082-8695.

ebeveynler için bebek ağlaması doğal bir uyarı mekanizması oluştururken, işitme engelli ebeveynler açısından bu uyarı kanalı sınırlı ya da tamamen kullanılamaz durumdadır. Bu nedenle yalnızca sesli uyarıya dayalı klasik bebek izleme sistemleri, işitme engelli ebeveynlerin bakım sürecindeki ihtiyaçlarını yeterince karşılayamamaktadır. Güncel çalışmalarda da geleneksel bebek izleme sistemlerinin çoğunlukla sesli uyarılara dayandığı, bu durumun işitme engelli ebeveynler için algılama güçlüğü oluşturduğu ve görsel, dokunsal ya da bütünlük uyarı mekanizmalarına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir (Moreira vd., 2025).

Son yıllarda bebek izleme sistemleri, klasik sesli bebek monitörlerinden çoklu sensör, kablosuz haberleşme ve nesnelerin interneti (IoT) tabanlı yapılara doğru evrilmektedir. Bu alandaki çalışmalar genel olarak üç temel yönde ilerlemektedir. İlk grup çalışmalar, işitme engelli ebeveynlere yönelik titreşimli veya görsel uyarı sistemlerine odaklanmaktadır. Örneğin Tang ve Ji (2024), işitme engelli ebeveynler için bebeğin ağlama durumu ve olağan dışı fizyolojik göstergelerini ebeveyn bilekliğine kablosuz olarak ileten giyilebilir tabanlı bir sistem önermiştir. Bahboub ve diğ. (2020), işitme engelli anneler için IoT ve mobil uygulama tabanlı bir bebek izleme sistemi geliştirmiş; sistemde ebeveynin titreşimli bileklik veya mobil telefon bildirim ile uyarılması sağlanmıştır. Mohite ve Jadhav (2021) ise bebek ağlamasını Mel Frekanslı Kepstral Katsayıları ve Yapay Sinir Ağı kullanarak tespit eden, uyarı bilgisini Küresel Mobil İletişim Sistemi üzerinden ebeveynine ileten bir sistem önermiştir. Benzer şekilde Baltacıoğlu ve diğ. (2023), işitme engelli veya işitme kaybı olan ebeveynler için bebek ağlama sesini algılayarak titreşimli uyarı veren bir kol bandı tasarlamıştır. Suud Suliman ve Shahari (2025) tarafından önerilen sistemde ise akustik analiz, Organik Işık Yayan Diyot (LED) ekran ve titreşim motoru bir arada kullanılarak çok modlu bir uyarı mekanizması geliştirilmiştir.

İkinci grup çalışmalar, genel bebek izleme sistemlerinde IoT, mobil bildirim ve yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının kullanımına odaklanmaktadır. Kumar ve Kumar (2023), bebeğin hareketlerini, yaşamsal belirtilerini, ortam koşullarını ve bez nem seviyesini izleyen, hafif yapılı Tekrarlayan Sinir Ağı modeliyle desteklenen bir bebek izleme sistemi önermiştir. Kumaran ve diğ. (2023), Raspberry Pi, sensörler ve evrişimli sinir ağı (ESA) kullanarak bebeğin ağlama, uyuma, oynama ve ani hareketsizlik gibi davranışlarını sınıflandıran bir sistem geliştirmiştir. Chandnani ve diğ. (2025) ise sıcaklık, nem, gaz ve ses verilerini sensörler aracılığıyla izleyen; motorlu sallama, ortam düzenleme ve mobil uygulama üzerinden uzaktan kontrol gibi işlevler sunan akıllı beşik tabanlı bir sistem önermiştir. Bu çalışmalar, bebek izleme teknolojilerinde yalnızca ses verisinin değil, çevresel ve davranışsal birçok göstergenin birlikte değerlendirilmesine yönelik eğilimin arttığını göstermektedir.

Üçüncü grup çalışmalar ise bebek bakımında belirli bir fiziksel göstergenin hassas biçimde izlenmesine odaklanmaktadır. Perumal (2023), geleneksel beşik sistemini sensörler ve Arduino tabanlı kontrol yapısıyla destekleyerek bebeğin durumunun izlenmesine yönelik bir akıllı beşik tasarımı sunmuştur. Wang ve diğ. (2026), bebek bezlerinde idrar miktarının gerçek zamanlı izlenebilmesi için iletken lif tabanlı ve bataryasız çalışan bir Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Frequency Identification, RFID) sensörü geliştirmiştir. Önerilen sistemin hareketten kaynaklanan sinyal değişimlerini azaltabildiği, belirli bir mesafeye kadar izleme yapabildiği ve idrar hacmi tahmininde yüksek doğruluk sağladığı belirtilmiştir. Bu tür çalışmalar, bebek bakımında bez ıslaklığı, ortam koşulları ve fiziksel pozisyon gibi parametrelerin ayrı ayrı veya birlikte izlenmesinin güncel bir araştırma alanı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bebek bakımında dikkate alınması gereken bir diğer önemli konu güvenli uyku pozisyonudur. Uykuya bağlı bebek ölümlerinin azaltılması amacıyla Amerikan Pediatri Akademisi, bebeklerin her uyku zamanında sırtüstü pozisyonda yatırılmasını önermekte ve yan yatışın güvenli kabul edilmediğini belirtmektedir. Aynı rehberde, bebeklerin sert, düz ve eğimsiz bir uyku yüzeyinde yatırılması; yumuşak nesnelere, gevşek yatak takımları ve yastık benzeri materyallerin uyku alanından uzak tutulması gerektiği ifade edilmektedir. Ayrıca ev tipi kardiyorespiratuvar monitörlerin ani bebek ölümü sendromu riskini azaltma stratejisi olarak kullanılmaması gerektiği özellikle vurgulanmaktadır (Moon vd., 2022). Bu durum, bebek izleme sistemlerinin klinik olarak kanıtlanmış koruyucu tıbbi cihazlar olarak değil, ebeveyn farkındalığını artıran yardımcı teknolojiler olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, Centers for Disease Control and Prevention bebeklerin gündüz ve gece uykuları dahil olmak üzere tüm uyku zamanlarında sırtüstü yatırılmasını, düz ve sert bir yüzey kullanılmasını ve bebeğin uyku alanında battaniye, yastık, tampon veya oyuncak gibi yumuşak nesnelere bulundurulmasını önermektedir (Centers for Disease Control and Prevention, 2024). Bu öneriler, riskli yatış pozisyonlarının takip edilmesini ve ebeveynin bu konuda zamanında bilgilendirilmesini destekleyen mühendislik çözümleri için önemli bir tasarım gerekçesi sunmaktadır. Bununla birlikte, yatış pozisyonunu algılayan bir prototipin tek başına ani bebek ölümü sendromunu önleyen bir tıbbi cihaz olarak değerlendirilmemesi gerekir. Bu tür sistemler, daha doğru bir yaklaşımla, riskli durumların fark edilmesine yardımcı olan ve ebeveynin müdahale süresini azaltmayı hedefleyen destekleyici uyarı teknolojileri olarak ele alınmalıdır. Garcia-Herraiz ve diğ. (2025) tarafından önerilen basınç matı ve ESA tabanlı bebek pozisyon izleme

sistemi de bu bağlamda değerlendirilebilecek güncel örneklerden biridir.

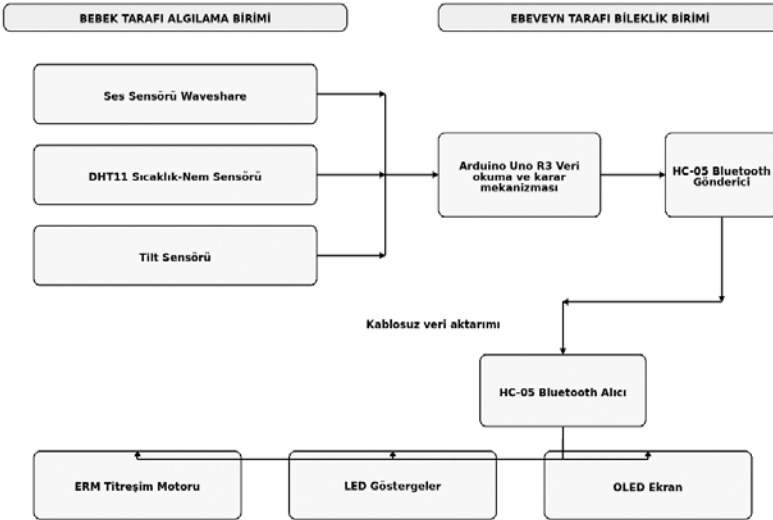
Mevcut çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, işitme engelli ebeveynlere yönelik sistemlerin önemli bir bölümünün yalnızca bebek ağlamasının algılanmasına odaklandığı, bazı sistemlerin ise mobil telefon bildirim veya tekil sensör verisi üzerinden çalıştığı görülmektedir. Bununla birlikte, bebek bakımında ağlama durumunun yanı sıra yatış pozisyonu ve bez ıslaklığı gibi farklı göstergelerin birlikte izlenmesi, ebeveynin bakım sürecine daha hızlı ve bilinçli biçimde müdahale edebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu gereksinimden hareketle bu çalışmada, işitme engelli ebeveynler için sesli uyarılara bağımlı olmayan, mikrodenetleyici tabanlı ve çoklu sensör verisini dokunsal/görsel uyarılarla ebeveyne ileten giyilebilir bir bebek izleme sistemi geliştirilmiştir. Önerilen sistem, bebek tarafında konumlandırılan algılama birimi ile ebeveyn bileğinde taşınan uyarı birimini bütünleştirmekte; ağlama durumu, yatış pozisyonu ve bez ıslaklığına ilişkin bilgileri kablosuz haberleşme aracılığıyla ebeveyne aktarmaktadır. Bu yönüyle çalışma, tıbbi tanı veya koruma amacı taşımayan; işitme engelli ebeveynlerin bebek bakımında farkındalığını artırmayı ve erişilebilir bir izleme çözümü sunmayı amaçlayan taşınabilir bir yardımcı teknoloji olarak konumlandırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, işitme engelli ebeveynlerin bebek bakım sürecinde karşılaşılabilecekleri temel izleme ve uyarı gereksinimlerine yönelik mikroişlemci tabanlı bir akıllı bileklik prototipi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, bebeğin ağlama/yüksek ses durumu, yatış pozisyonu ve bez ıslaklığına ilişkin değişimleri algılayarak ebeveyne dokunsal ve görsel geri bildirim sağlamayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda çalışma;

sensör tabanlı veri toplama, mikrodenetleyici üzerinde eşik tabanlı karar verme, kablosuz veri aktarımı ve bileklik biriminde uyarı üretimi olmak üzere dört temel aşamada yapılandırılmıştır.

Önerilen sistem iki ana birimden oluşmaktadır: bebek tarafı algılama birimi ve ebeveyn tarafı bileklik birimi. Bebek tarafı algılama biriminde ses, sıcaklık-nem ve yatış pozisyonuna ilişkin veriler sensörler aracılığıyla toplanmaktadır. Bu veriler mikrodenetleyici tarafından işlenmekte ve önceden belirlenen eşik değerleriyle karşılaştırılmaktadır. Eşik aşımı oluştuğunda ilgili uyarı kodu Bluetooth modülü üzerinden ebeveyn tarafındaki bileklik birimine gönderilmektedir. Bileklik birimi, gelen uyarı koduna bağlı olarak titreşim motoru, LED göstergeler ve Organik Işık Yayan Diyot (Organic Light Emitting Diode, OLED) ekran aracılığıyla ebeveyne uyarı vermektedir. Böylece sistem, işitme engelli ebeveynler için sesli alarm yerine dokunsal ve görsel geri bildirim kanallarını birlikte kullanan bir yapı sunmaktadır. Önerilen sistemin akış şeması Şekil 1’ de verilmiştir.

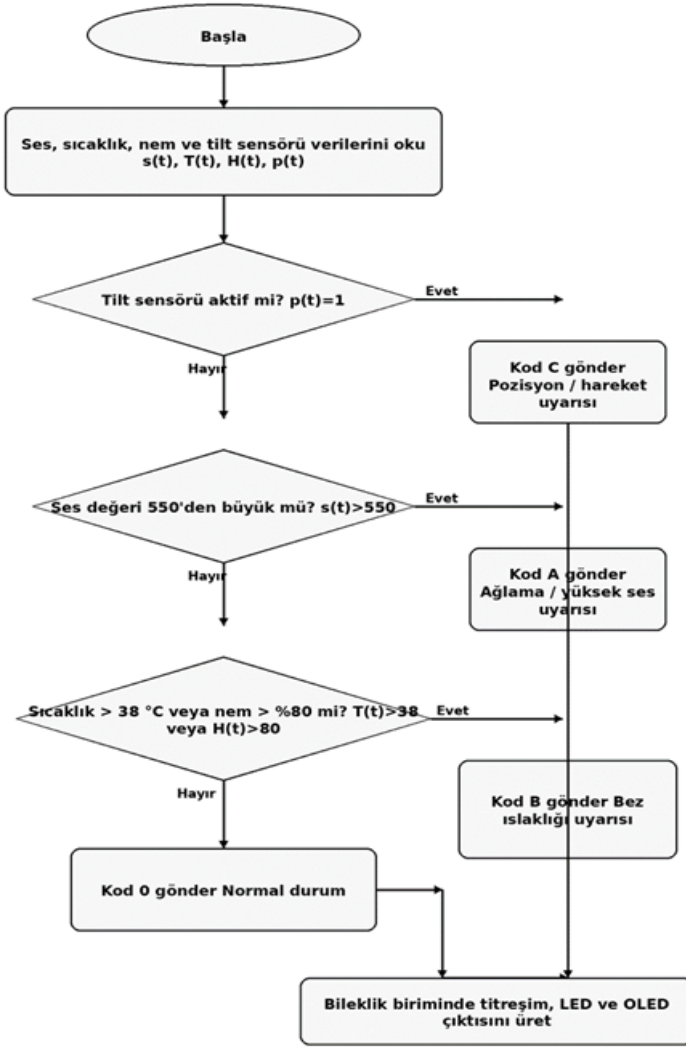


Şekil 1. Önerilen akıllı bileklik sisteminin genel akış diyagramı

Geliştirilen sistemde düşük maliyetli, kolay temin edilebilir ve mikrodenetleyici platformlarıyla uyumlu donanım bileşenleri tercih edilmiştir. Bebek tarafı algılama biriminde ses sensörü, DHT11 sıcaklık-nem sensörü ve tilt sensörü kullanılmıştır. Ebeveyn tarafı bileklik biriminde ise HC-05 Bluetooth modülü, eksantrik dönen kütleli (Eccentric Rotating Mass, ERM) titreşim motoru, LED göstergeler ve OLED ekran yer almaktadır. Sistemin kontrol birimi olarak Arduino Uno R3 mikrodenetleyici kartı tercih edilmiştir. Arduino Uno R3, ATmega328P tabanlı bir mikrodenetleyici kartı olup 14 dijital giriş/çıkış pini, 6 analog giriş, 16 MHz saat frekansı ve 5 V çalışma gerilimine sahiptir (Arduino, 2026).. Bu özellikleri nedeniyle düşük maliyetli, sensör tabanlı ve gerçek zamanlı prototip uygulamaları için uygun bir geliştirme platformu sunmaktadır. DHT11 sıcaklık-nem sensörü, sıcaklık ve bağıl nem değerlerini dijital olarak sağlayan düşük maliyetli bir sensördür. Sensörün çalışma aralığı sıcaklık için 0–50 °C, bağıl nem için %20–90 RH olarak verilmekte; tipik doğruluk değerleri sıcaklık için ± 2 °C ve nem için $\pm 5\%$ RH düzeyindedir (DFRobot, 2020). Bu nedenle bu çalışmada DHT11 sensörü, doğrudan idrar miktarını ölçen nicel bir sensör olarak değil, bez bölgesindeki nem ve sıcaklık artışını dolaylı olarak izleyen bir gösterge bileşeni olarak değerlendirilmiştir. Bebeğe ait verilerin ebeveyn tarafındaki bileklik birimine aktarılması için iki adet HC-05 Bluetooth modülü kullanılmıştır. Bu modüllerden biri bebek tarafında gönderici, diğeri bileklik tarafında alıcı olarak yapılandırılmıştır. Böylece sistem, sensörlerden elde edilen verileri doğrudan ham veri halinde sürekli aktarmak yerine, eşik aşımı durumunda kısa uyarı kodları üzerinden haberleşecek şekilde tasarlanmıştır. Bileklik biriminde gelen uyarı koduna bağlı olarak titreşim motoru, LED göstergeler ve OLED ekran aktive edilmektedir. Bu yapı, işitme engelli ebeveynler için sesli uyarıya bağımlı olmayan dokunsal ve görsel geri bildirim sağlamaktadır.

Sistemin karar mekanizması eşik tabanlı olarak oluşturulmuş olup akış şeması Şekil 2' de sunulmuştur. Bu eşik tabanlı yapı, düşük işlem gücüne sahip mikrodenetleyici tabanlı prototiplerde gerçek zamanlı karar verme açısından uygulanabilir ve açıklanabilir bir yöntem sunmaktadır. Benzer şekilde Baltacıoğlu vd. (2023), işitme kaybı olan ebeveynler için geliştirdikleri titreşimli kol bandında bebek ağlama sesini farklı ses şiddeti değerleri üzerinden analiz etmiş ve ses değişimlerine bağlı bir uyarı mekanizması tasarlamıştır. Mevcut çalışmada ise bu yaklaşım yalnızca ses algılama ile sınırlı bırakılmamış; ses, yatış pozisyonu ve bez ıslaklığı göstergeleri aynı sistem mimarisi içinde birlikte değerlendirilmiştir.

Yatış pozisyonunun izlenmesi, bebek güvenliği açısından destekleyici bir bileşen olarak ele alınmıştır. Amerikan Pediatri Akademisi, uykuya bağlı bebek ölümlerinin azaltılması için bebeklerin sırtüstü pozisyonda, sert ve düz bir uyku yüzeyinde yatırılmasını önermektedir. Bu nedenle tilt sensörü ile pozisyon değişiminin izlenmesi, ebeveynin riskli yatış durumlarını daha hızlı fark etmesine katkı sağlayabilecek bir uyarı işlevi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Eşik tabanlı karar algoritmasının akış diyagramı

3. BULGULAR

Geliştirilen akıllı bileklik prototipinin işlevsel doğrulaması, sensörlerden elde edilen verilerin önceden tanımlanan eşik değerleriyle karşılaştırılması ve bu karşılaştırma sonucunda bileklik biriminde uygun uyarı çıktılarının oluşup

oluşmadığının değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sürecinde ağlama/yüksek ses durumu, bez ıslaklığı göstergesi, yatış pozisyonu/hareket durumu ve normal çalışma durumu olmak üzere dört temel senaryo dikkate alınmıştır. Bu senaryolar, geliştirilen sistemin farklı bakım durumlarına verdiği tepkileri gözlemek ve önerilen eşik tabanlı karar mekanizmasının işlevselliğini değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur.

Deneyisel değerlendirme kapsamında üç temel uyarı senaryosu ele alınmıştır: bez ıslaklığı göstergesi, yatış pozisyonu/hareket durumu ve ağlama/yüksek ses durumu. Ayrıca eşik değerlerin aşılmadığı normal durum da değerlendirilmiştir. Tablo 1’ de deneysel değerlendirme senaryoları ve beklene uyarı çıktıları verilmiştir.

Deneyisel değerlendirme sonucunda, ses sensöründen elde edilen analog değer belirlenen eşik değerini aşması durumunda sistemin ağlama/yüksek ses uyarısı ürettiği gözlenmiştir. Bu durumda bileklik biriminde titreşim motoru, LED göstergeler ve OLED ekran aracılığıyla uyarı çıktısı oluşturulmuştur. Bu bulgu, geliştirilen sistemin bebeğin ağlama veya yüksek ses durumunu işitme engelli ebeveyne sesli alarm kullanmadan aktarabildiğini göstermektedir. Baltacıoğlu vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da bebek ağlama sesinin sessiz ortam ve konuşma sesinden genlik değişimleri bakımından ayrışabildiği ve bu farkın titreşimli giyilebilir uyarı sistemlerinde kullanılabilmesi belirtilmiştir. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, ses değişimlerinin işitme engelli ebeveynlere yönelik giyilebilir uyarı sistemlerinde kullanılabilir bir tetikleyici olduğunu desteklemektedir.

Tablo 1. Deneysel değerlendirme senaryoları ve beklenen uyarı çıktıları

Test senaryosu	Sensör koşulu	Beklenen çıktı	Gözlenen sistem davranışı
Bez ıslaklığı göstergesi	Sıcaklık >38 °C veya nem >%80	Titreşim, LED ve ekran uyarısı	Uyarı üretildi
Yatış pozisyonu/hareket durumu	Tilt sensörü aktif	Titreşim, LED ve ekran uyarısı	Uyarı üretildi
Ağlama / yüksek ses durumu	Ses değeri >550	Titreşim, LED ve ekran uyarısı	Uyarı üretildi
Normal durum	Eşik değerler aşılmadı	Uyarı yok / normal durum bildirimi	Eşik aşımı uyarısı üretilmedi

Bez ıslaklığı göstergesine ilişkin senaryoda, sıcaklık değerinin 38 °C'yi veya bağıl nem değerinin %80'i aşması durumunda sistemin ilgili uyarı kodunu ürettiği ve bileklik biriminde dokunsal-görsel uyarı oluşturduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, sıcaklık-nem sensöründen elde edilen verilerin bez bölgesindeki nem ve sıcaklık artışını izlemek amacıyla kullanılabilmesini göstermektedir. Bununla birlikte, bu çıktı doğrudan idrar miktarının nicel ölçümü olarak yorumlanmamalıdır. DHT11 sensörünün ölçüm aralığı ve doğruluk sınırları dikkate alındığında, geliştirilen sistemin bez ıslaklığına ilişkin değerlendirmesi eşik tabanlı ve dolaylı bir gösterge niteliğindedir. Daha hassas ve nicel izleme gerektiren uygulamalarda, iletken tekstil tabanlı sensörler, kapasitif nem algılayıcılar veya RFID tabanlı özel sensör mimarileri tercih edilebilir.

Yatış pozisyonu/hareket durumuna ilişkin senaryoda, tilt sensörünün aktifleşmesiyle sistemin pozisyon/hareket uyarısı ürettiği belirlenmiştir. Bu bulgu, bebeğin belirgin pozisyon değişimlerinin düşük maliyetli dijital bir sensör aracılığıyla algılanabileceğini ve kablosuz olarak ebeveyn bilekliğine aktarılabilmesini göstermektedir. Bebeklerde güvenli uyku

uygulamalarına ilişkin güncel önerilerde, bebeklerin her uyku sırasında sırtüstü pozisyonda yatırılması ve riskli uyku pozisyonlarından kaçınılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, yatış pozisyonunun izlenmesi, geliştirilen sistemin bebek güvenliğini destekleyici yönlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Ancak sistemin bu işlevi, klinik olarak doğrulanmış bir güvenlik veya önleme mekanizması olarak değil, ebeveyn farkındalığını artıracak yardımcı bir izleme bileşeni olarak ele alınmalıdır.

Normal çalışma senaryosunda, ses, sıcaklık-nem ve tilt sensörlerine ilişkin eşik değerlerinin aşılmadığı durumda sistemin alarm durumuna geçmediği ve normal durum çıktısı verdiği gözlenmiştir. Bu sonuç, geliştirilen karar mekanizmasının yalnızca eşik aşımı gerçekleştiğinde uyarı üreten olay tabanlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Olay tabanlı bu çalışma prensibi, düşük maliyetli mikrodenetleyici sistemlerinde gereksiz veri aktarımını azaltması, uyarı üretimini sadeleştirilmesi ve sistem davranışının kolay yorumlanabilmesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Genel olarak elde edilen bulgular, geliştirilen prototipin tanımlanan teknik senaryolar altında beklenen uyarı davranışlarını üretebildiğini göstermektedir. Sistemin temel ayırt edici yönü, işitme engelli ebeveynlere yönelik uyarı mekanizmasını yalnızca bebek ağlama sesine dayandırmaması; ağlama/yüksek ses, bez ıslaklığı ve yatış pozisyonu/hareket göstergelerini aynı mikrodenetleyici tabanlı mimari içerisinde birlikte değerlendirmesidir. Bu yönüyle önerilen sistem, yalnızca ses duyarlı giyilebilir uyarı sistemlerinden daha bütünleşik bir bakım izleme yaklaşımı sunmaktadır.

Bununla birlikte, elde edilen bulgular prototip düzeyinde işlevsel doğrulama sonuçları olarak değerlendirilmelidir. Çalışma kapsamında uzun süreli kullanıcı deneyimi, farklı ev ortamlarında

saha testi, batarya performansı analizi veya klinik doğrulama yapılmamıştır. Bu nedenle sistemin gerçek kullanım koşullarındaki güvenilirliği, yanlış alarm oranı, haberleşme kararlılığı ve kullanıcı kabulü gelecek çalışmalar kapsamında ayrıca incelenmelidir. Özellikle ses sensörünün çevresel gürültülere duyarlılığı, DHT11 sensörünün nem ölçümündeki sınırlı doğruluğu ve tilt sensörünün bebeğin doğal hareketlerinden etkilenebilme olasılığı, sistemin geliştirilmesi gereken yönleri arasında değerlendirilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, ağlama sesinin daha güvenilir biçimde ayrıştırılması için sinyal işleme ve makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma algoritmaları kullanılabilir. Bez ıslaklığı tespiti için daha hassas nem algılayıcıları veya tekstil tabanlı sensörler değerlendirilebilir. Yatış pozisyonunun daha kararlı biçimde izlenmesi için ise tilt sensörü yerine ivmeölçer veya ataletsel ölçüm birimi tabanlı sensör mimarileri kullanılabilir. Ayrıca Bluetooth Low Energy gibi düşük güç tüketimli haberleşme teknolojilerinin kullanılması, sistemin taşınabilirlik ve batarya ömrü açısından iyileştirilmesine katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak bulgular, geliştirilen akıllı bileklik prototipinin işitme engelli ebeveynlerin bebek bakımında karşılaşılabilecekleri temel uyarı gereksinimlerine yönelik işlevsel bir destek sistemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte sistem, tıbbi bir cihaz veya ani bebek ölümü sendromunu önleyen bir çözüm olarak değil, ebeveynin bebeğe ilişkin bazı kritik durumları daha hızlı fark etmesine katkı sağlayabilecek destekleyici bir giyilebilir uyarı sistemi olarak değerlendirilmelidir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, işitme engelli ebeveynlerin bebek bakım sürecinde karşılaşılabilecekleri temel izleme ve uyarı

gereksinimlerine yönelik mikroişlemci tabanlı bir akıllı bileklik sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem; bebeğin ağlama/yüksek ses durumu, bez ıslaklığına bağlı sıcaklık-nem değişimleri ve yatış pozisyonu/hareket durumunu algılayarak ebeveyne dokunsal ve görsel geri bildirim sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda ses sensörü, DHT11 sıcaklık-nem sensörü ve tilt sensöründen elde edilen veriler Arduino Uno R3 mikrodenetleyicisi üzerinde eşik tabanlı karar mekanizmasıyla değerlendirilmiştir; oluşturulan uyarı kodları HC-05 Bluetooth modülleri aracılığıyla bileklik birimine aktarılmıştır. Bileklik tarafında ise ERM titreşim motoru, LED göstergeler ve OLED ekran kullanılarak kullanıcıya uygun uyarı çıktıları sunulmuştur.

Elde edilen bulgular, geliştirilen sistemin belirlenen teknik senaryolar altında beklenen uyarı davranışlarını üretebildiğini göstermektedir. Ses değerinin belirlenen eşiği aşması durumunda ağlama/yüksek ses uyarısı, sıcaklık veya bağıl nem değerinin belirlenen sınırların üzerine çıkması durumunda bez ıslaklığı göstergesi, tilt sensörünün aktifleşmesi durumunda ise yatış pozisyonu/hareket uyarısı oluşturulmuştur. Eşik değerlerinin aşılmadığı durumda sistemin alarm durumuna geçmemesi, önerilen eşik tabanlı karar yapısının olay odaklı ve kontrollü bir uyarı mantığına sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın temel katkısı, işitme engelli ebeveynlere yönelik uyarı sistemini yalnızca bebek ağlama sesine dayandırmaması; ses, bez ıslaklığı ve yatış pozisyonu/hareket göstergelerini aynı sistem mimarisi içerisinde birlikte değerlendirmesidir. Bu yönüyle geliştirilen akıllı bileklik, işitme engelli ebeveynlerin bebek bakım sürecinde sesli uyarılara bağımlı kalmadan bebeğe ilişkin bazı temel durumları takip edebilmelerine katkı sağlayabilecek destekleyici bir giyilebilir uyarı sistemi olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte, geliştirilen sistem klinik tanı, tedavi veya ani bebek ölümü sendromunu önleme amacı taşımamaktadır. Bu nedenle sistem, tıbbi bir cihaz olarak değil, ebeveyn farkındalığını artırmaya ve bakım sürecinde erken bilgilendirme sağlamaya yönelik yardımcı bir teknoloji çözümü olarak ele alınmalıdır. Gelecek çalışmalarda sistemin daha hassas sensörlerle geliştirilmesi, ses algılama için sınıflandırma tabanlı algoritmaların kullanılması, yatış pozisyonu tespiti için ivmeölçer tabanlı çözümlerin değerlendirilmesi, düşük güç tüketimli haberleşme teknolojilerinin denenmesi ve gerçek kullanıcı koşullarında uzun süreli performans testlerinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Arduino. (2026). UNO R3. Arduino Documentation. Erişim zamanı: 27 Nisan 2026, <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
- Bahbouh, N. M., Alkhodre, A. B., Abi Sen, A. A., Namoun, A., & Albouq, S. S. (2020, February). A cost effective IoT-based system for monitoring baby incidents by deaf parents. In 2019 International Conference on Advances in the Emerging Computing Technologies (AECT) (pp. 1-6). IEEE.
- Baltacıoğlu, K., Başar, M. T., Akdoğan, V., Karaaslan, M., & İlçigen, E. A. (2023). Baby cry-sensitive armband design for parents with hearing loss. *European Mechanical Science*, 7(4), 253-258.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2024, September 17). Providing care for babies to sleep safely. Sudden Unexpected Infant Death and Sudden Infant Death Syndrome.
- Chandnani, K., Tripathy, S., Parbhakar, A. K., Takiar, K., Singhal, U., Sasikumar, P., & Maheswari, S. (2025). A novel smart baby cradle system utilizing IoT sensors and machine learning for optimized parental care. *Scientific Reports*, 15(1), 19080.
- DFRobot. (2020). DHT11 sıcaklık ve nem sensörü (SKU: DFR0067) teknik veri sayfası. Erişim tarihi: 27 Nisan 2026, https://wiki.dfrobot.com/DHT11_Temperature_and_Humidity_Sensor__SKU__DFR0067
- Dünya Sağlık Örgütü. (2026). İşitme kaybı ve sağırılık. Erişim tarihi: 27 Nisan 2026, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

- Garcia-Herraiz, A., Nunez-Nagy, S., Cruz-Piris, L., & Alarcos, B. (2025). Non-intrusive infant body position detection for sudden infant death syndrome prevention using pressure mats. *Technologies*, 13(10), 427.
- Kumar, N. J., & Kumar, A. N. (2023, December). A lightweight (recurrent neural network) RNN architecture for IoT based baby monitoring system to provide real time alerts and notification to parents or care takers. In *2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Kumaran, S., Kumar, C. M., Yashwanth, D., & Deepak, B. (2023, June). CNN-powered baby monitoring system using internet of things sensors. In *2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)* (pp. 938-943). IEEE.
- Moon, R. Y., Carlin, R. F., Hand, I., & Task Force on Sudden Infant Death Syndrome. (2022). Sleep-related infant deaths: updated 2022 recommendations for reducing infant deaths in the sleep environment. *Pediatrics*, 150(1).
- Moreira, L. L., Arce, M. T., Nogueira, R. M., Costa, T. P., Carvalho, C. B., Júnior, W. S., ... & Mattos, E. V. *Intelligent Baby Cry Monitoring System Using IoT and Machine Learning for Deaf Parents*.
- Perumal, V. (2023, June). Smart cradle monitoring system for babies. In *Conference Proceedings On 3rd International Conference On Engineering Facilities Maintenance And Management Technologies (EFM2T'21)* (Vol. 2581, No. 1, p. 050011). AIP Publishing LLC.
- Suud, J., Suliman, F. H., & Shahari, K. H. (2025). Enhancing Safety: A Smart Baby Monitoring System for Deaf

Parents. *Borneo Engineering & Advanced Multidisciplinary International Journal*, 4(1), 31-38.

Tang, X., & Ji, Y. (2024, December). Design of infant monitoring products for hearing-impaired parents. In *2024 17th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* (pp. 93-96). IEEE.

Wang, L., Zhang, H., Mok, P. Y., & Fan, J. (2026). Conductive fiber-based RFID sensor for real-time urine monitoring in smart diapers. *Materials & Design*, 115777.

ANALYSIS OF A CANAL-TYPE SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Suleyman ADAK¹

1. INTRODUCTION

The increasing global demand for energy and the environmental impacts of fossil fuel consumption have accelerated the development of renewable energy technologies. Among these technologies, solar photovoltaic (PV) systems have emerged as one of the most promising and sustainable solutions for electricity generation due to their clean operation, low maintenance requirements, and abundant solar resource availability. However, conventional ground-mounted solar PV installations require large land areas, which may lead to land-use conflicts, especially in densely populated or agricultural regions.

To overcome these challenges, canal-type solar photovoltaic systems, also known as canal-top PV systems, have gained significant attention in recent years. In this approach, solar panels are installed above irrigation canals or water channels, enabling efficient utilization of unused space while simultaneously generating renewable electricity. This dual-purpose infrastructure not only reduces land acquisition requirements but also minimizes water evaporation from canals and improves the efficiency of solar panels through the cooling effect of water beneath the modules. The types of solar photovoltaic systems are shown in Fig. 1.

¹ Doç. Dr., Department of Electrical and Energy, OSB MYO, Mardin Artuklu, University, Mardin, Turkey, ORCID: 0000-0003-1436-2830.

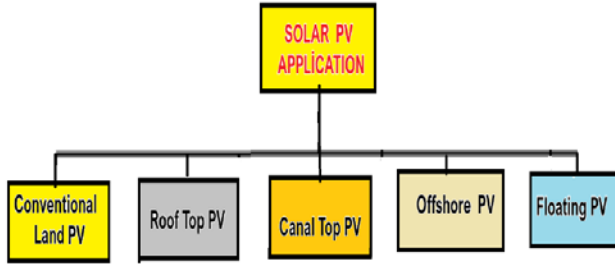


Fig. 1 Types of solar PV solar systems

Canal-type solar PV systems provide several technical, economic, and environmental advantages. The shading effect of the PV panels can help conserve water resources, particularly in arid and semi-arid regions, while the lower operating temperature of the modules can enhance power generation efficiency. Furthermore, these systems contribute to sustainable energy development by integrating renewable energy production with existing water infrastructure. Channel-type solar PV systems offer several practical and technical benefits because their structure is designed to improve sunlight collection, cooling, and mechanical stability. The channel-type solar photovoltaic system is shown in Fig. 2.

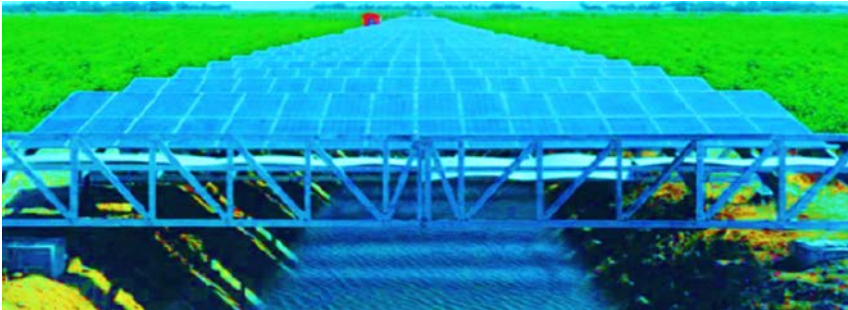


Fig. 2 Canal-type solar PV system (Cuce et al. 2022)

Despite their advantages, canal-based PV systems also present engineering and operational challenges, including structural design complexity, maintenance accessibility, installation cost, and environmental considerations. Therefore,

detailed analysis and evaluation are essential to determine their feasibility, energy performance, and long-term benefits.

1.1. Advantages of a Canal-Type Solar Photovoltaic System

A canal-type solar photovoltaic system offers several advantages compared with a conventional ground-mounted solar installation. Because the panels are installed above an existing canal, it does not require additional land acquisition, which is especially valuable in regions where agricultural or urban land is scarce or expensive. This helps avoid conflicts between energy production and other land uses. The presence of water beneath the panels can also improve solar panel performance. Water tends to create a cooler microclimate, reducing panel temperatures and increasing electrical efficiency, since photovoltaic modules generally operate more effectively at lower temperatures.

Land Conservation:

- Solar panels are installed above existing canals, eliminating the need for large areas of land.
- This is particularly beneficial in regions where agricultural or urban land is scarce and expensive.

Reduced Water Evaporation:

- The panels provide shade to the canal surface, decreasing water loss due to evaporation.
- This helps conserve valuable freshwater resources, especially in arid and semi-arid regions.

Improved PV Efficiency:

- The cooling effect of water beneath the panels lowers module temperatures.

- Since photovoltaic efficiency decreases with increasing temperature, cooler operating conditions can enhance electricity generation.

Reduced Algae Growth:

- Shading of the canal limits sunlight penetration into the water.
- This can reduce algae formation and improve water quality while lowering maintenance requirements.

Dual Use of Infrastructure:

- Existing canal corridors serve both water conveyance and electricity generation purposes.
- This increases the overall utility of public infrastructure.

Lower Dust Accumulation:

- The humid microclimate around canals may reduce dust deposition on solar panels compared to installations in open dry fields.
- Cleaner panels can maintain higher energy output.

Reduced Transmission Costs:

- Canal networks often pass near agricultural and rural communities where electricity is needed.
- This can reduce the length and cost of transmission and distribution infrastructure.

Environmental Benefits:

- Generates renewable energy without additional land disturbance.
- Contributes to reductions in greenhouse gas emissions and supports sustainable development goals.

Canal-type solar photovoltaic systems offer multiple advantages, including land conservation, reduced water evaporation, enhanced photovoltaic efficiency through natural cooling, mitigation of algae growth, dual utilization of existing infrastructure, and environmental sustainability. These benefits make canal-top PV installations an attractive solution for regions facing both energy and water resource challenges.

2. CANAL-TYPE SOLAR PV SYSTEM COMPARISON WITH CONVENTIONAL SOLAR PV SYSTEM

A canal-type solar PV system is installed above irrigation canals or water channels, whereas a ground-mounted solar PV system is installed directly on land using support structures. Both technologies generate electricity from sunlight, but they differ significantly in design, performance, cost, and environmental impact. Canal-type solar PV systems provide a major advantage in land conservation because they utilize existing canal infrastructure instead of occupying agricultural or commercial land. This makes them particularly suitable in densely populated or land-scarce regions. In contrast, ground-mounted systems require large open areas, which may compete with agriculture or other land uses.



Fig. 3 Irrigation canals covered with solar PV panels.

Canal-top systems also contribute to water conservation by reducing evaporation from the canal surface. The shading

effect of the panels can significantly decrease water loss, which is especially valuable in arid and semi-arid regions. Ground-mounted systems do not provide this additional environmental benefit. However, canal-type systems are generally more expensive to construct.

Table 1. Comparison of canal type PV systems and conventional PV systems

Parameter	Canal-Type Solar PV	Ground-Mounted Solar PV
Land Requirement	Minimal additional land use	Requires dedicated land area
Installation Location	Over canals/waterways	Open land/fields/deserts
Cooling Effect	Better cooling from water below	Higher operating temperatures
Energy Efficiency	Slightly higher due to cooling	Standard efficiency
Water Conservation	Reduces canal evaporation	No water-saving benefit
Capital Cost	Higher structural/support cost	Lower and more mature technology
Maintenance Access	More difficult	Easier access
Structural Complexity	High	Moderate
Environmental Benefit	Dual benefit: energy + water saving	Mainly energy generation
Scalability	Limited to canal network	Highly scalable
Construction Time	Longer	Faster

Risk Factors	Corrosion, humidity, canal restrictions	Dust, land degradation
Best Use Case	Water-scarce/agricultural regions	Utility-scale solar farms

Traditional installations also do not provide secondary environmental benefits beyond electricity generation. Unlike canal-mounted photovoltaic systems, they do not contribute to water conservation or the reduction of evaporation losses. Furthermore, large-scale ground-mounted systems may alter local landscapes and, in some cases, affect vegetation and wildlife habitats. Their performance is also highly dependent on weather conditions and solar availability, resulting in fluctuations in power generation throughout the day and across different seasons. These challenges highlight the need for innovative photovoltaic deployment approaches that can improve efficiency, optimize land use, and provide additional environmental benefits while maintaining reliable renewable energy production.

2.1. Water Conservation in Canal-Type PV Systems

Water conservation is one of the most significant advantages of canal-type photovoltaic systems. By installing solar panels above irrigation canals, the photovoltaic array provides partial shading over the water surface, reducing direct exposure to solar radiation and lowering the rate of evaporation. This effect is particularly important in arid and semi-arid regions, where substantial volumes of water can be lost through evaporation during hot seasons. The reduction in water loss helps preserve valuable freshwater resources and improves the overall efficiency of water distribution networks used for agriculture, industry, and domestic consumption.

In addition to minimizing evaporation, the shading created by the solar panels can moderate water temperatures and limit the growth of algae and aquatic vegetation that often develop under prolonged sunlight exposure. Improved water quality and reduced maintenance requirements contribute to more effective canal operation and resource management.

A unique advantage is evaporation reduction. Shading from panels significantly decreases water loss from canals. Some studies observed evaporation reductions of nearly 29%, while regional studies estimate thousands of cubic meters of water savings annually per MW.

Water Evaporation Saving:

Assume average evaporation:

$$e_r=5\text{mm/day}=0.005\text{m/day}$$

Water saved:

$$E_s=6000 \times 0.005$$

$$E_s=30\text{m}^3/\text{day}$$

Thus:

$$=30000 \text{ Liters/day}$$

of water is saved. Water conservation is a critical benefit of canal-type photovoltaic systems because it addresses two essential resources simultaneously: energy and water. By covering canals with solar panels, the amount of direct sunlight reaching the water surface is reduced, which significantly decreases evaporation losses..

2.2. Advantages of A Canal-Type Solar PV System

A canal-type solar PV system generates electricity by installing solar panels above irrigation canals or water channels. One of its major advantages is that it saves valuable land

because the panels are placed over existing waterways instead of occupying agricultural or urban land. This is especially beneficial in regions where land availability is limited or expensive. The water beneath the panels also helps cool the solar modules, improving their efficiency since solar panels perform better at lower temperatures.



Fig. 4 Canal-top solar PV system (Solar AquaGrid)

Another important benefit is the reduction of water evaporation from the canal surface. By providing shade, the solar panels decrease direct sunlight exposure to the water, helping conserve significant amounts of water in hot and dry climates.

3. ANALYSIS AND COMPARISON OF CHANNEL-TYPE SOLAR PV SYSTEMS AND CONVENTIONAL PV PANELS IN TERMS OF EFFICIENCY

Channel-type solar PV systems and conventional PV panels differ mainly in how they manage heat during electricity generation. Conventional PV panels convert sunlight directly into electricity, but as the panel temperature rises, electrical efficiency decreases. In practical outdoor conditions, standard commercial silicon panels usually operate at about 15–22% electrical efficiency, depending on the technology and climate.

Their efficiency drops because excess solar energy becomes heat, increasing cell temperature. Studies show that for every 1 °C increase in panel temperature, electrical efficiency can decrease by around 0.4–0.5%. Channel-type PV systems are designed to improve thermal management by adding air or liquid channels behind or around the PV module.

The major advantage of channel-type systems is not only the increase in electrical efficiency but also the improvement in overall energy utilization. Conventional PV panels waste most absorbed heat into the environment, whereas channel-type systems can capture that heat for water heating, ventilation, or industrial thermal applications. As a result, total energy efficiency in channel-type PV/T systems may exceed 50%, while ordinary PV panels only provide electrical output. A channel-type solar PV system usually refers to a PV panel arrangement where airflow or cooling channels are integrated behind or around the panels.

The key reason channel-type systems improve efficiency is that solar cells lose efficiency as temperature rises.

3.1. Basic PV Efficiency Formula:

In a conventional flat-panel PV system, the incident solar radiation falls directly on a stationary or tracking photovoltaic surface. The efficiency is primarily influenced by cell technology, operating temperature, irradiance level, spectral conditions, and electrical losses. As cell temperature rises, conversion efficiency generally decreases because the open-circuit voltage of the solar cells declines. The electrical efficiency of a solar panel is:

$$\eta = \frac{P_{out}}{GA} \quad (1)$$

Where; η is panel efficiency, P_{out} is electrical power output (W), G is solar irradiance (W/m^2) and A is panel area

(m²). A channel-type solar PV system incorporates a channel or concentrator geometry that redirects, reflects, or concentrates additional solar radiation onto the photovoltaic cells. The increased solar flux can raise the electrical output generated per unit cell area. Consequently, the effective power output becomes:

$$P_{out,ch} > P_{out,conv} \quad (2)$$

Power performance of channel-type solar photovoltaic systems generally differs from that of traditional ground-mounted photovoltaic panels due to the distinct environmental conditions associated with canal installations. In conventional photovoltaic systems, module temperatures often rise significantly under strong solar radiation, leading to reductions in electrical output because photovoltaic cell efficiency decreases as temperature increases. In contrast, channel-type systems are installed above water channels, where the cooling effect of the flowing water helps maintain lower module operating temperatures. This natural cooling mechanism reduces thermal losses and enables the photovoltaic modules to operate closer to their rated power capacity for longer periods.

As a result, channel-type photovoltaic systems frequently achieve higher instantaneous power output and greater annual energy production than comparable traditional installations using the same module technology and installed capacity. The efficiency of a channel-type system can therefore be expressed as:

$$\eta_{ch} = \frac{P_{out,ch}}{G * A_{aperture}} \quad (3)$$

Where, $A_{aperture}$ represents the total solar collection aperture, including the channel structure. If the channel design successfully increases the incident radiation without causing excessive thermal losses, the electrical output can increase and

the overall system efficiency may exceed that of a conventional panel. However, the efficiency advantage is not guaranteed. Concentrated radiation elevates cell temperature, and temperature-related losses can partially offset the gains from increased irradiance. Therefore, the net efficiency improvement depends on the balance between optical concentration gains and thermal degradation effects.

3.2. Temperature Effect on PV Efficiency

Temperature is one of the most significant factors affecting the efficiency of PV systems because solar cell electrical characteristics are highly temperature-dependent. As the operating temperature of a PV module increases, the semiconductor band gap decreases, causing a reduction in the open-circuit voltage. Although the short-circuit current may increase slightly with temperature, the voltage reduction is much greater, leading to a decrease in overall power output and conversion efficiency. PV efficiency decreases with temperature. The relationship between temperature and PV efficiency can be represented by:

$$\eta_T = \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \quad (4)$$

Where; η_T is efficiency at cell temperature T_c , η_{ref} is reference efficiency at 25 °C, β is temperature coefficient (typically 0.004–0.005 / °C), T_c is cell temperature and T_{ref} is 25 °C.

Channel cooling reduces T_c , therefore increasing efficiency. In conventional PV panels, solar radiation is absorbed directly by the module surface, causing the cell temperature to increase above ambient conditions. Under high irradiance and limited airflow, module temperatures can reach 60–80°C, resulting in noticeable efficiency losses. Consequently, the actual operating efficiency is often lower than the rated efficiency measured under standard test conditions.

Numerical example for conventional PV panel:

Given:

- Panel area $A=1.8\text{m}^2$
- Solar irradiance $G=1000\text{ W/m}^2$
- Reference efficiency $\eta_{\text{ref}}=20\%=0.20$
- Temperature coefficient $\beta=0.0045/^\circ\text{C}$
- Cell temperature $T_c=60^\circ\text{C}$

Step 1: Calculate efficiency loss

Temperature rise:

$$T_c - T_{\text{ref}} = 60 - 25 = 35^\circ\text{C}$$

Efficiency:

$$\begin{aligned}\eta_T &= 0.20[1 - 0.0045(35)] \\ &= 0.20(1 - 0.1575) \\ &= 0.20(0.8425) \\ &= 0.1685\end{aligned}$$

So:

$$\eta_T = 16.85\%$$

Efficiency loss in traditional photovoltaic panels is a significant factor that affects the overall performance and energy yield of solar power systems. One of the primary causes of efficiency reduction is the increase in cell temperature during operation. As photovoltaic modules are exposed to prolonged solar radiation, their operating temperature rises, leading to a decrease in the electrical conversion efficiency of the solar cells. This temperature-dependent behavior results in lower power output, particularly during hot weather conditions when solar irradiance is high but thermal losses are also substantial.

Step 2: Output Power

Using:

$$P_{\text{out}} = \eta \cdot G \cdot A$$

$$P_{\text{out}} = 0.1685 \times 1000 \times 1.8$$

$$P_{\text{out}} = 303.3 \text{ W}$$

The output power of traditional PV panels is determined by the conversion of solar radiation into electrical energy through the PV effect. The amount of power generated depends primarily on the intensity of solar irradiance, the efficiency of the solar cells, the operating temperature of the modules, and the overall system design. Under standard operating conditions, photovoltaic panels produce their rated power output when they receive optimal sunlight and operate at the reference temperature specified by manufacturers.

Numerical example for channel-type cooling PV system:

Suppose airflow channels reduce panel temperature from:

$$60 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Now:

$$T_c - T_{\text{ref}} = 40 - 25 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Efficiency of channel-type cooling PV system :

$$\eta_T = 0.20 [1 - 0.0045(15)]$$

$$= 0.20(0.9325)$$

$$= 0.1865$$

Thus:

$$\eta_T = 18.65\%$$

The efficiency of a channel-type cooling photovoltaic system is generally higher than that of conventional photovoltaic

installations because the presence of water beneath the solar panels provides a natural cooling effect that helps maintain lower operating temperatures. Since photovoltaic cell efficiency is inversely related to temperature, reducing the temperature of the solar modules decreases thermal losses and allows a greater proportion of incident solar energy to be converted into electrical power. This improvement in thermal regulation enables the system to operate closer to its optimal performance conditions, particularly during periods of high solar irradiance and elevated ambient temperatures.

New Output Power of channel-type PV system :

$$P_{\text{out}}=0.1865 \times 1000 \times 1.8$$

$$P_{\text{out}}=335.7 \text{ W}$$

The output power of a canal-type solar photovoltaic system is influenced by solar irradiance, module temperature, panel characteristics, and environmental conditions associated with the canal infrastructure. Unlike conventional ground-mounted photovoltaic installations, canal-mounted systems benefit from the cooling effect of the water flowing beneath the panels, which helps maintain lower operating temperatures and improves the electrical performance of the photovoltaic cells. Since the power output of solar modules decreases with increasing temperature, the reduced thermal stress experienced by canal-based systems can result in higher power generation throughout the day.

Efficiency Improvement of channel-type PV system :

Increase in power:

$$\Delta P=335.7-303.3$$

$$\Delta P =32.4\text{W}$$

Percentage improvement:

$$\% \text{ Improvement} = \frac{P_{bew} - P_{old}}{P_{old}} \times 100$$
$$= \frac{32.4}{303.3} \times 100$$

$$\eta_{\text{Improvement}} = 10.68 \%$$

The efficiency of a canal-type solar photovoltaic system can be significantly enhanced by the unique environmental conditions created by the presence of water beneath the solar modules. The water surface acts as a natural cooling medium, reducing the operating temperature of photovoltaic panels and mitigating the adverse effects of thermal losses on electrical performance. Since photovoltaic cell efficiency decreases as cell temperature increases, the lower temperatures observed in canal-mounted installations generally result in higher energy conversion efficiency compared with conventional ground-mounted systems.

In addition, the reflective characteristics of the water surface can increase the amount of incident solar radiation reaching the modules, particularly during periods of low solar elevation, thereby contributing to greater energy yield. The canal environment also reduces dust accumulation on panel surfaces due to higher ambient humidity and the proximity of water, which helps maintain optical transmittance and decreases performance degradation associated with soiling.

Interpretation:

The channel-type PV system:

- Improves airflow and heat removal
- Reduces operating temperature
- Raises electrical efficiency
- Produces more power under the same sunlight

In this example:

Table 2. Comparison of traditional PV and channel-type PV

System	Temperature	Efficiency	Power Output
Conventional PV	60 °C	16.85%	303.3 W
Channel-Type PV	40 °C	18.65%	335.7 W

In hot climates, the efficiency difference becomes more significant. Conventional panels experience stronger thermal losses under intense sunlight and high ambient temperatures, whereas channel-type systems maintain lower cell temperatures through active cooling. Some experimental studies reported panel temperature reductions of 10–17 °C using channel cooling, leading to measurable gains in power output and longer module life. However, channel-type systems are generally more complex and expensive. They require pumps or airflow mechanisms, additional piping or channel structures, maintenance of cooling fluids, and higher installation costs. Conventional PV panels remain simpler, cheaper, lighter, and easier to install, making them more suitable for residential rooftops and low-maintenance applications.

From an efficiency perspective, channel-type PV systems perform better under high-temperature conditions because cooling reduces thermal losses and improves energy recovery. Conventional PV panels are electrically simpler and economically attractive, but they cannot utilize waste heat and are more sensitive to temperature increases. Channel-type (canal-top) solar photovoltaic systems generally exhibit higher energy efficiency than conventional ground-mounted PV systems.

One of the most significant advantages of channel-type PV systems is their minimal land requirement. These systems

are installed above existing canals or water channels, thereby utilizing infrastructure that is already in place. Consequently, no additional land is needed for energy generation. Conventional PV installations, however, require dedicated land areas, which may compete with agricultural, residential, or industrial uses. This makes canal-top PV systems particularly attractive in regions where land availability is limited or land costs are high.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

A channel-type cooling arrangement can significantly improve solar PV performance because PV efficiency is inversely related to temperature. Even a moderate temperature reduction of 15–20 °C may improve electrical output by approximately 8% --15% depending on the panel characteristics. Canal-top solar photovoltaic systems create a symbiotic nexus, using cool, moisture-rich microclimates to boost panel efficiency while reducing water evaporation by up to 40%. Research highlights that, despite higher initial structural costs, these installations offer strong financial viability by conserving land and enhancing energy yield. Canal-top solar photovoltaic systems create a symbiotic nexus, using cool, moisture-rich microclimates to boost panel efficiency while reducing water evaporation by up to 40%. Research highlights that, despite higher initial structural costs, these installations offer strong financial viability by conserving land and enhancing energy yield.

Canal-top solar photovoltaic systems create a symbiotic nexus, using cool, moisture-rich microclimates to boost panel efficiency while reducing water evaporation by up to 40%. Research highlights that, despite higher initial structural costs, these installations offer strong financial viability by conserving land and enhancing energy yield. Canal-top solar photovoltaic

systems create a symbiotic nexus, using cool, moisture-rich microclimates to boost panel efficiency while reducing water evaporation by up to 40%. Research highlights that, despite higher initial structural costs, these installations offer strong financial viability by conserving land and enhancing energy yield.

REFERENCES

1. Desai, A.A., Mikkili, S.(2022). Modeling and Analysis of PV Configurations to Extract Maximum Power Under Partial Shading Conditions, in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8 (6), 1670-1683, <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.00900>
2. Irwanto, M. Y., Irwan, M., Safwati, I., W., Leow, Z., and Gomesh, N.(2014). Analysis simulation of the photovoltaic output performance, *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*, Langkawi, Malaysia, 2014, pp. 477-481, <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814476>
3. Nasri, H., Riahi, J., Oueslati, H., Taghouti, H., & Vergura, S. (2024). Performance Analysis and Optimization of a Channeled Photovoltaic Thermal System with Fin Absorbers and Combined Bi-Fluid Cooling. *Computation*, 12(9), 188. <https://doi.org/10.3390/computation12090188>
4. Adak, S.(2026). Analysis of Harmonic Distortion and Efficiency Enhancements in Floating Solar Photovoltaic Systems. *Iran J Sci Technol Trans Electr Eng ..* <https://doi.org/10.1007/s40998-025-01006-x>
5. Cuce, E., Cuce, P. M., Saboor, S., Ghosh, A., & Sheikhnejad, Y. (2022). Floating PVs in Terms of Power Generation, Environmental Aspects, Market Potential, and Challenges. *Sustainability*, 14(5), 2626. <https://doi.org/10.3390/su14052626>
6. Wang, C., Guo, F., Liu, H., & Wang, G. (2025). A Comprehensive Review of Research Works on Cooling

- Methods for Solar Photovoltaic Panels. *Energies*, 18(16), 4305. <https://doi.org/10.3390/en18164305>
7. Augustin, D., Chacko, R., and Jacob, J. (2016). Canal top solar PV with reflectors, *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India, 2016, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914465>
 8. Javaid, F., and Islam, Z. (2020). Proposed Location and Proposal for Canal Top Solar PV Plant, *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, Ruse, Bulgaria, pp. 1-3, <https://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279009>
 9. Sajimon, A., and Chacko, R.(2017). Design of reflectors for a canal top solar power plant, *2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, Srivilliputtur, India, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ITCOSP.2017.8303146>
 10. Kumar, M., and Kumar, A. (2019). Performance Assessment of Different Photovoltaic Technologies for Canal-Top and Reservoir Applications in Subtropical Humid Climate, in *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9 (3), pp. 722-732, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2892520>
 11. Imik, E., & Yilmaz, M. (2025). A Numerical Investigation on the Performance and Sustainability Analysis of Conventional and Finned Air-Cooled Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Systems. *Sustainability*, 17(23), 10638. <https://doi.org/10.3390/su172310638>
 12. Zhijun Peng, Mohammad R. Herfatmanesh, Yiming Liu. (2017). Cooled solar PV panels for output energy

efficiency optimisation, *Energy Conversion and Management*,150(1),pp. 949-955,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.007>.

AKILLI SAĞLIK HİZMETLERİ İÇİN SDN DESTEKLİ EDGE-IOT MİMARİLERİ: ZORLUKLAR, GÜVENLİK VE ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Abdulaziz CEYLAN¹

1. GİRİŞ

Sağlık sistemleri, network cihazların, gerçek zamanlı veri analitiğinin, yapay zekanın ve yeni nesil iletişim altyapılarının hızlı büyümesiyle yönlendirilen köklü bir dijital dönüşümden geçmektedir. Hastaneler, acil müdahale sistemleri, giyilebilir sağlık izleyicileri ve uzaktan hasta bakımı platformları; büyük hacimli heterojen veriyi toplayabilen, iletebilen ve işleyebilen dijital ekosistemlere giderek daha fazla bağımlı hale gelmektedir. Bu bağlamda IoT, tıbbi sensörleri, mobil cihazları, tanı ekipmanlarını ve hasta izleme sistemlerini birbirine bağlayarak akıllı sağlık hizmetlerinin temel kolaylaştırıcılarından biri haline gelmiştir (Hassan vd., 2018; Satyanarayanan, 2017).

Bu gelişmelere rağmen sağlık IoT'sinin yaygınlaşması çeşitli teknik ve operasyonel güçlükleri beraberinde getirmektedir. Tıbbi verilerin, özellikle aritmi tespiti, acil durum izleme, yoğun bakım gözlemi ve uzaktan tanı gibi uygulamalarda çoğu zaman düşük gecikme ve yüksek güvenilirlikle işlenmesi gerekir. Geleneksel bulut merkezli altyapılar, iletişim gecikmeleri, bant genişliği sınırlamaları ve gizlilik kaygıları nedeniyle bu gereksinimleri her zaman karşılayamayabilir. Bu nedenle edge bilişim, hesaplama ve veri işlemeyi verinin

¹ Öğr. Gör., Adıyaman Üniversitesi, Besni Ali Erdemoğlu MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ORCID: 0000-0001-5549-6785.

üretildiği kaynağa yaklaştıran önemli bir paradigma olarak öne çıkmıştır (Rahmani vd., 2018; Satyanarayanan, 2017).

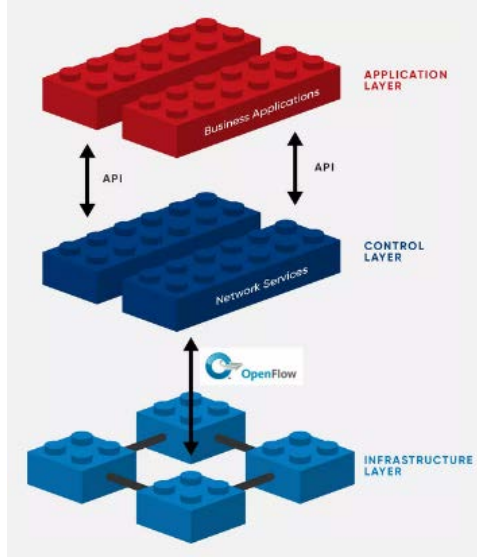
Aynı zamanda sağlık IoT ağlarının artan ölçeği ve heterojenliği, geleneksel ağ yönetimi yaklaşımlarını yetersiz kılmaktadır. Cihazlar farklı iletişim protokolleri, hesaplama kapasiteleri ve enerji kısıtları ile çalışır. Yazılım Tanımlı Ağ Oluşturma (SDN), kontrol düzlemini veri düzleminden ayırarak ve merkezi, programlanabilir ağ yapılandırmasını mümkün kılarak bu yönetim sorunlarına umut vadeden bir çözüm sunar. SDN aracılığıyla operatörler ağ etkinliğine ilişkin genel bir görünüm elde edebilir, trafiği dinamik olarak yönetebilir, güvenlik politikalarını uygulayabilir ve kritik sağlık uygulamaları için hizmet kalitesi gereksinimlerini destekleyebilir (Rana vd., 2019; Siddiqui vd., 2022).

2. YAZILIM TANIMLI AĞ OLUŞTURMANIN TEMELLERİ

Yazılım Tanımlı Ağ Oluşturma, kontrol işlevlerini iletim cihazlarından ayırarak geleneksel ağların işleyişini değiştiren bir ağ paradigmasıdır. Geleneksel mimarilerde yönlendirme, kontrol ve iletim mantığı ağ donanımına gömülüdür. Bu tasarım, özellikle büyük ölçekli uyarılmanın gerektiği durumlarda katı ve yönetilmesi zor altyapılara yol açar. SDN, ağ zekasını yazılım tabanlı denetleyicilerde merkezileştirerek bu sınırlamaları ele alır (Kreutz vd., 2013; Rana vd., 2019).

Tipik bir SDN mimarisi üç katmandan oluşur. Uygulama katmanı, politikaları ve istenen ağ davranışını tanımlayan hizmetleri ve ağ uygulamalarını içerir. Kontrol katmanı, ağ politikalarını iletim kararlarına dönüştüren ve programlanabilir arayüzler aracılığıyla ağ kaynaklarını yöneten SDN denetleyicisini içerir. Altyapı veya veri düzlemi ise denetleyici

tarafından verilen talimatları yürüten anahtarlar, yönlendiriciler ve iletim cihazlarından oluşur.

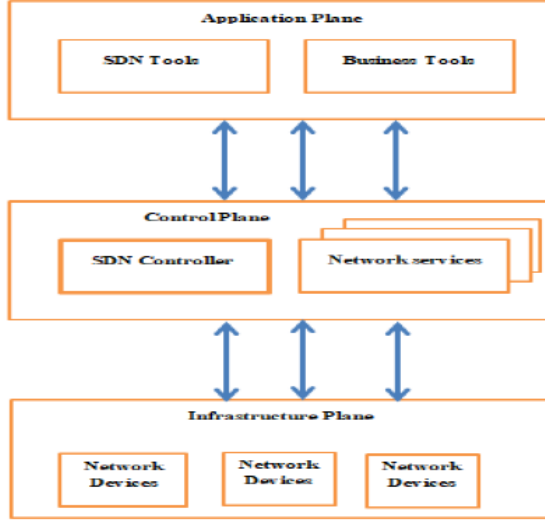


Şekil 1. SDN mimarisinin uygulama, kontrol ve altyapı katmanları

SDN'nin en önemli özelliklerinden biri programlanabilirliktir. Kuzey yönlü ve güney yönlü arayüzler aracılığıyla ağ dinamik olarak kontrol edilebilir ve değişen hizmet gereksinimlerine göre yapılandırılabilir. OpenFlow gibi protokoller, denetleyici ile iletim cihazları arasındaki iletişimi mümkün kılmada önemli bir rol oynamıştır. Bu programlanabilirlik SDN'ye otomasyon, merkezi izleme, esnek politika uygulama ve trafik mühendisliği alanlarında önemli avantajlar sağlar (Alsaedi vd., 2019).

Bununla birlikte SDN yeni kaygıları da beraberinde getirir. Kontrol mantıksal olarak merkezileştirildiği için denetleyici arızaları, kontrol kanalı saldırıları ve ölçeklenebilirlik sorunları ağıın genel performansını etkileyebilir. Bu nedenle SDN güçlü yönetim faydaları sunsa da dağıtımını güvenilirlik,

performans ve güvenlik açısından dikkatli bir değerlendirme gerektirir (Kreutz vd., 2013; Vizarreta vd., 2017).



Şekil 2. SDN'de uygulama, kontrol ve altyapı düzlemleri arasındaki ilişki (Siddiqui vd., 2022).

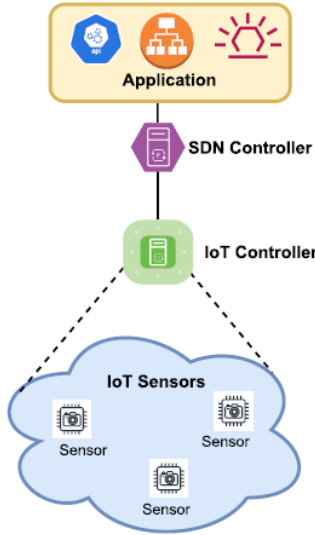
3. IoT AĞLARI VE PROGRAMLANABİLİR YÖNETİM İHTİYACI

Nesnelerin İnterneti, dijital ağlar üzerinden algılama, iletişim kurma ve etkileşime girme yeteneğine sahip bağlantılı nesnelere oluşan büyük ölçekli bir ekosistemi ifade eder. Sağlık alanında IoT cihazları; giyilebilir elektrokardiyogram sensörleri, nabız oksimetreleri, akıllı infüzyon pompaları, görüntüleme sistemleri, sıcaklık sensörleri, hasta bileklikleri ve çevresel izleme cihazlarını içerir. Bu sistemler sürekli veri akışları üretir ve çoğu zaman dinamik, kaynak kısıtlı ortamlarda çalışır.

IoT'nin büyümesi, uzun süredir var olan çeşitli ağ yönetimi sorunlarını daha da yoğunlaştırmıştır. Birincisi, bağlı

cihaz sayısı artmaya devam ederek ölçeklenebilirlik ve adresleme zorlukları yaratmaktadır. İkincisi, cihazlar protokol desteği, pil ömrü, depolama kapasitesi ve işlem gücü bakımından oldukça heterojendir. Üçüncüsü, IoT sistemleri analitik, tanı ve karar desteği için verimli biçimde yönetilmesi gereken büyük veri üretir. Son olarak birçok uygulama sıkı güvenilirlik ve güvenlik beklentileri altında çalışır (Siddiqui vd., 2022).

Geleneksel ağ mimarileri bu gereksinimlere iyi uyum sağlamaz. Statik yapılandırmalar, cihaz bazlı yönetim ve dağıtık trafik akışları üzerinde sınırlı görünürlük, verimli işlemleri engelleyebilir. Bu nedenlerden dolayı SDN, IoT yönetimi için güçlü bir yaklaşım haline gelmiştir. Ağ durumuna ilişkin merkezi bir görünüm sağlayarak ve politika güdümlü kontrolü destekleyerek SDN, karmaşık IoT ortamlarının yönetimini basitleştirebilir ve ağ olaylarına yanıt verme hızını artırabilir.



Şekil 3. SDN tabanlı tipik IoT mimarisi (Siddiqui vd., 2022).

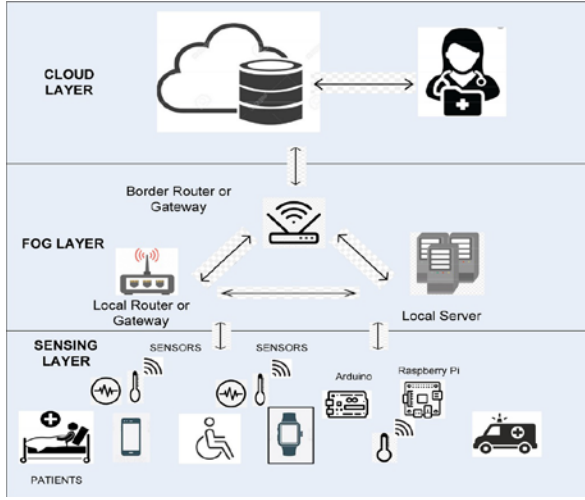
Tablo 1. SDN kullanan IoT çerçevelerine ilişkin 2019 sonrası çalışmaların karşılaştırması (Siddiqui vd., 2022).

Year	Fault tolerance	Load balancing	Security	Energy management	Scalability	SDIoT Framework Taxonomy
2019			✓		✓	Blockchain
2019	✓		✓		✓	Blockchain
2019		✓	✓		✓	Blockchain
2019		✓			✓	OF
2019				✓		Blockchain
2019			✓			Blockchain
2019			✓	✓		Blockchain
2019			✓	✓		NFV
2019			✓			Middleware
2019			✓		✓	Blockchain
2020			✓			Blockchain
2020			✓		✓	Blockchain
2020		✓			✓	NFV, OF
2020				✓		NFV, OF
2020	✓	✓				Edge Computing, NFV
2020			✓			NFV
2020				✓		NFV
2020			✓	✓		NFV, Blockchain
2020			✓	✓		Blockchain
2021			✓		✓	NFV
2021			✓		✓	Blockchain
2021	✓		✓		✓	NFV, Middleware
2021		✓	✓		✓	Middleware, Blockchain
2022	✓		✓		✓	Blockchain, NFV
2022	✓		✓		✓	NFV, Middleware, Blockchain
2022	✓	✓	✓		✓	NFV, Middleware
2022	✓	✓	✓	✓	✓	NFV, Middleware, Blockchain
2022	✓	✓	✓	✓	✓	NFV, Middleware, OF, Blockchain

Literatür, beş temel IoT yönetimi sorununu tutarlı biçimde vurgulamaktadır: hata toleransı, yük dengeleme, güvenlik yönetimi, enerji yönetimi ve ölçeklenebilirlik. Bu sorunlar, hizmet arızalarının hastanın iyileşmesi üzerinde doğrudan sonuçlar doğurabileceğinden sağlık alanında özellikle önemlidir (Kumhar & Bhatia, 2022; Siddiqui vd., 2022).

4. AKILLI SAĞLIK HİZMETLERİNDE EDGE BİLİŞİM

Edge bilişim, hesaplama, depolama ve analitiğin tamamen merkezi bulut veri merkezlerinde değil, veri kaynaklarına daha yakın noktalarda gerçekleştirildiği dağıtık bir bilişim paradigmasıdır. Sağlık alanında bu yaklaşım değerlidir; çünkü birçok klinik ve izleme uygulaması gerçek zamana yakın yanıtlar, düşük gecikme ve yerel gizlilik koruması gerektirir (Hassan vd., 2018; Satyanarayanan, 2017).

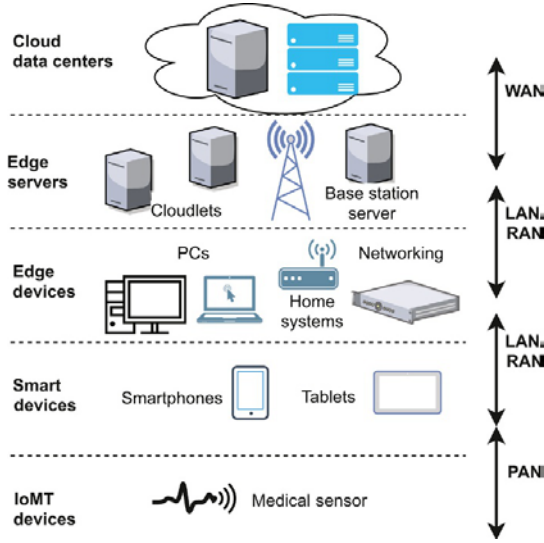


Şekil 4. Edge bilişimin sağlık sistemlerinde katmanlı kullanımı (Pandey, 2022).

Edge bilişim destekli sağlık uygulamalarına örnek olarak giyilebilir EKG izleme, uzaktan kronik hastalık takibi, acil tıbbi destek, akıllı hastane odaları, teletıp platformları ve mobil tanı sistemleri verilebilir. Bu tür senaryolarda edge cihazlar veya yakındaki ağ geçitleri sensör verilerini yerel olarak işleyebilir, anomalileri saptayabilir, uyarıları tetikleyebilir ve gerektiğinde özetlenmiş bilgileri bulut sistemleriyle eşitleyebilir (Gusev, 2022; Rahmani vd., 2018).

Tablo 2. Sağlık hizmeti sunum modellerinin özellikleri (Gusev, 2022).

Model	Randevu	e-Sağlık	Otonom	İletişim
Classical	✓			Doktor-Hasta
Edge		✓		Doktor-Makine-Hasta
Dew		✓	✓	Makine-Hasta



Şekil 5. Edge/dew bilişim çözümünün beş katmanlı mimarisini (Gusev, 2022).

Edge bilişim sağlık hizmetleri için çeşitli avantajlar sunar. İletişim gecikmesini azaltır, uzak sunuculara iletilen veri hacmini düşürür, düşük bağlantılı ortamlarda hizmet erişilebilirliğini artırır ve hassas bilgileri kaynağına yakın tutarak gizliliği güçlendirebilir. Merkezi sağlık altyapısına hızlı erişimin sınırlı olabileceği kırsal veya yeterince hizmet alamayan bölgelerdeki hastalar için özellikle yararlıdır.

Bu avantajlara rağmen sağlık alanındaki edge bilişim ortamları önemli zorluklarla da karşı karşıyadır. Kısa kesintiler bile tanyu veya acil müdahaleyi tehlikeye atabileceğinden güvenilirlik kritik önemdedir. Tıbbi veriler son derece hassas olduğundan güvenlik ve gizlilik de aynı ölçüde önemlidir. Heterojen cihazlar arasında birlikte çalışabilirlik, verimli veri yönetimi ve dağıtık düğümler arasında kaynak koordinasyonu açık sorunlar olarak varlığını sürdürmektedir (Hartmann vd., 2022; Singh & Chatterjee, 2021).

5. SAĞLIK HİZMETLERİ İÇİN SDN, IoT ve EDGE BİLİŞİMİN ENTEGRASYONU

SDN, IoT ve edge bilişimin entegrasyonu, akıllı sağlık sistemleri için güçlü bir mimari temel sağlar. Böyle bir mimaride IoT cihazları fizyolojik ve çevresel verileri toplar, edge düğümler yerel işleme ve hızlı karar desteği sağlar, SDN denetleyicileri ise altyapı genelinde ağ akışlarını, öncelikleri ve güvenlik politikalarını yönetir (Kumhar & Bhatia, 2022; Siddiqui vd., 2022).

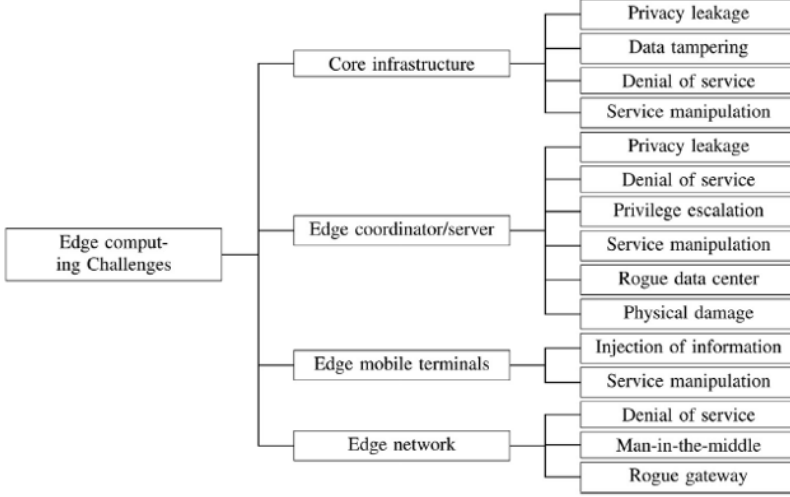
Bu bütünlük mimari çeşitli sağlık hedeflerini destekler. Birincisi, hasta cihazları ile sağlık personeli arasında gerçek zamanlı iletişimi mümkün kılar. İkincisi, aritmi uyarıları veya acil telemetri gibi acil trafiklerin dinamik olarak önceliklendirilmesine olanak tanır. Üçüncüsü, hassas hizmetlerin ve cihazların esnek biçimde yalıtılmasını destekler. Son olarak sistemin değişen iş yüklerine ve klinik bağlamlara uyum yeteneğini artırır.

6. SDN DESTEKLİ EDGE-IoT SAĞLIK SİSTEMLERİNDEKİ BAŞLICA ZORLUKLAR

Ağ kesintileri veya denetleyici arızaları hasta izlemesini aksatabileceği ve klinik yanıtı geciktirebileceği için güvenilirlik ve hata toleransı temel önemini korur. SDN; merkezi hata tespiti, yeniden yönlendirme ve hizmet sürekliliği mekanizmalarını mümkün kılarak güvenilirliği artırabilir; ancak denetleyicinin kendisi yedeklilik ve dayanıklı tasarım yoluyla korunmalıdır (Rahmani vd., 2018; Vizarreta vd., 2017).

Güvenlik ve gizlilik de aynı derecede kritiktir. Sağlık ortamları son derece hassas tıbbi verileri yönetir ve hizmet engelleme saldırıları, yetkisiz erişim, kimlik sahteciliği, kötü amaçlı yazılımlar ve kontrol düzlemi manipülasyonuna karşı

savunmasıdır. SDN merkezi politika uygulamasını ve trafik izlemeyi destekleyebilir; ancak güvenli denetleyici tasarımı ve şifreli iletişim vazgeçilmez olmaya devam eder (Du vd., 2018; Singh & Chatterjee, 2021).



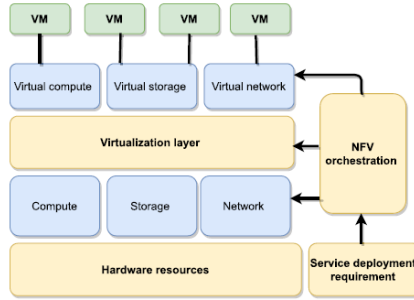
Şekil 6. Edge bilişimde güvenlik ve gizlilik zorluklarının özeti (Zhang vd., 2018; Singh & Chatterjee, 2021).

Gecikme, ölçeklenebilirlik ve enerji verimliliği de sistem performansını şekillendirir. Edge bilişim verileri kaynağa yakın işleyerek gecikmeyi azaltmaya yardımcı olurken, SDN acil trafiği önceliklendirebilir ve yönlendirmeyi optimize edebilir. Bununla birlikte büyük ölçekli sağlık IoT dağıtımları hâlâ verimli denetleyici yerleşimi, düşük ek yüklü akış yönetimi ve pille çalışan cihazlar için hafif kontrol mekanizmaları gerektirir (Hartmann vd., 2022; Kumhar & Bhatia, 2022).

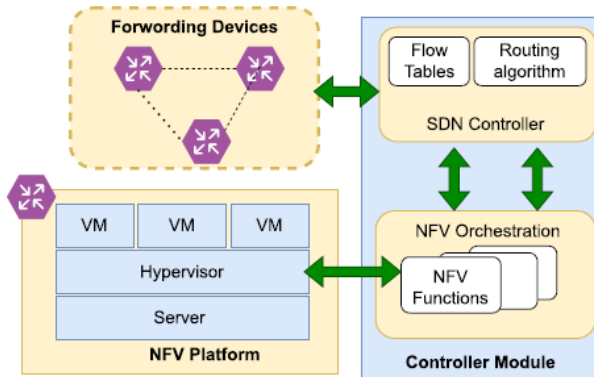
7. ETKİNLEŞTİRİCİ TEKNOLOJİLER VE DESTEKLEYİCİ YAKLAŞIMLAR

OpenFlow ve ilişkili güney yönlü protokoller programlanabilir kontrolün temelini sağlar; ancak kısıtlı IoT ortamlarında çoğu zaman hafif uyarlamalar gereklidir (Alsaedi vd., 2019; Open Networking Foundation, n.d.).

Ağ Fonksiyon Sanallaştırması, güvenlik işlevlerinin, ağ geçitlerinin ve izleme hizmetlerinin sabit donanım aygıtları yerine esnek yazılım bileşenleri olarak dağıtılmasına olanak tanır (Alam vd., 2021).

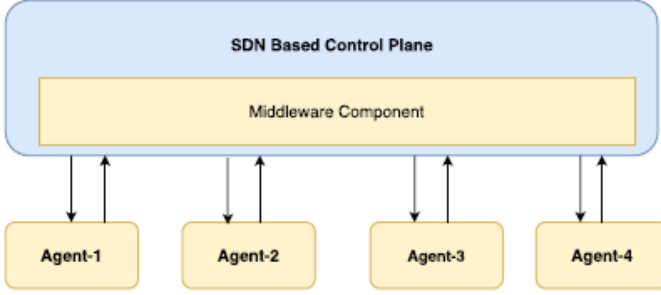


Şekil 7. NFV altyapısında sanallaştırma katmanı ve kaynak bileşenleri (Alam vd., 2021).



Şekil 8. SDN-NFV tabanlı IoT yönetim mimarisi (Alam vd., 2021).

Middleware tabanlı SDN çerçeveleri, ağ davranışının yazılım bileşenleri aracılığıyla uyarlanmasını sağlayarak IoT/M2M ortamlarında güven, politika uygulaması ve denetim desteği sunar (Castilho vd., 2020).



Şekil 9. SDN tabanlı middleware çerçevesi (Castilho vd., 2020).

Blokszincir güven yönetimi, veri bütünlüğü ve erişim kontrolü için de incelenmiştir; ancak sağlık alanındaki edge bilişim ortamlarında hesaplama ek yükü dikkatle değerlendirilmelidir (Sengupta vd., 2020).

Yapay zeka ve makine öğrenimi; anomali tespiti, öngörücü trafik yönetimi ve edge tabanlı klinik analitiği destekleyerek SDN destekli sağlık sistemlerini daha da iyileştirebilir (Gusev, 2022; Pandey, 2022).

8. SONUÇ

Akıllı sağlık hizmetleri bağlamında Yazılım Tanımlı Ağ Oluşturma, Nesnelerin İnterneti ve edge bilişimin kesişimi incelenen bu bölüm, SDN'nin merkezi kontrol, programlanabilirlik, ağ görünürlüğü ve dinamik politika uygulaması aracılığıyla sağlık IoT yönetimi için önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Edge bilişim ise klinik ortamlarda düşük gecikmeli işlemeyi, yerelleştirilmiş analitiği ve daha iyi yanıt verebilirliği mümkün kılarak SDN'yi tamamlar.

Aynı zamanda SDN destekli Edge-IoT sağlık sistemlerinin dağıtımını güvenilirlik, gizlilik, güvenlik, enerji tüketimi ve ölçeklenebilirlikle ilgili önemli zorluklarla ilişkilidir. Bu zorluklar sağlık hizmetlerinin güvenliğini, güvenilirliğini ve etkililiğini doğrudan etkiler. Genel olarak SDN, IoT ve edge bilişimin yakınsaması, yeni nesil sağlık sistemleri için umut vadeden bir yönü temsil etmektedir.

Gelecek araştırmalar dağıtık ve dayanıklı denetleyici mimarilerine, kısıtlı tıbbi cihazlar için hafif güvenliğe, heterojen protokoller arasında birlikte çalışabilirliğe, edge zekasının SDN kontrolüyle daha güçlü entegrasyonuna ve klinik ortamlar için gizliliği koruyan analitiğe odaklanmalıdır

KAYNAKÇA

- Alam, I., Sharif, K., Li, F., Latif, Z., Karim, M. M., Biswas, S., Nour, B., & Wang, Y. (2021). A survey of network virtualization techniques for Internet of Things using SDN and NFV. *ACM Computing Surveys*, 53(2), 1-40. <https://doi.org/10.1145/3440992>
- Alsaeedi, M., Mohamad, M. M., & Al-Roubaiey, A. A. (2019). Toward adaptive and scalable OpenFlow-SDN flow control: A survey. *IEEE Access*, 7, 107346-107379. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932422>
- Castilho, S. D., Godoy, E. P., & Salmen, F. (2020). Implementing security and trust in IoT/M2M using middleware. In *Proceedings of the International Conference on Information Networking (ICOIN)* (pp. 726-731).
- Du, M., Wang, K., Chen, Y., Wang, X., & Sun, Y. (2018). Big data privacy preserving in multi-access edge computing for heterogeneous Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 56(8), 62-67. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1701148>
- Gusev, M. (2022). AI cardiologist at the edge. In R. Pandey (Ed.), *Artificial intelligence and machine learning for edge computing* (pp. 469-477). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824054-0.00020-4>
- Hartmann, M., Hashmi, U. S., & Imran, A. (2022). Edge computing in smart health care systems: Review, challenges, and research directions. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(3), e3710. <https://doi.org/10.1002/ett.3710>
- Hassan, N., Gillani, S., Ahmed, E., Yaqoob, I., & Imran, M. (2018). The role of edge computing in Internet of Things.

- IEEE Communications Magazine, 56(11), 110-115.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700906>
- Kreutz, D., Ramos, F. M. V., & Verissimo, P. (2013). Towards secure and dependable software-defined networks. In Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (pp. 55-60). <https://doi.org/10.1145/2491185.2491199>
- Kumhar, M., & Bhatia, J. B. (2022). Edge computing in SDN-enabled IoT-based healthcare frameworks: Challenges and future research directions. International Journal of Reliable and Quality E-Healthcare, 11(4), 1-15. <https://doi.org/10.4018/IJRQEH.308804>
- Open Networking Foundation. (n.d.). Software-defined networking (SDN) definition. <https://opennetworking.org/sdn-definition/>
- Pandey, R. (Ed.). (2022). Artificial intelligence and machine learning for edge computing. Academic Press.
- Rahmani, A. M., Gia, T. N., Negash, B., Anzanpour, A., Azimi, I., Jiang, M., & Liljeberg, P. (2018). Exploiting smart e-Health gateways at the edge of healthcare Internet-of-Things: A fog computing approach. Future Generation Computer Systems, 78, 641-658. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.02.014>
- Rana, D. S., Dhondiyal, S. A., & Chamoli, S. K. (2019). Software defined networking (SDN) challenges, issues and solution. International Journal of Computer Sciences and Engineering, 7(1), 884-889. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v7i1.884889>
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. Computer, 50(1), 30-39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>

- Sengupta, J., Ruj, S., & Bit, S. D. (2020). A comprehensive survey on attacks, security issues and blockchain solutions for IoT and IIoT. *Journal of Network and Computer Applications*, 149, Article 102481. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102481>
- Siddiqui, S., Mahmood, A., Sheng, Q. Z., Suzuki, H., Ni, W., & Yu, S. (2022). Toward software-defined networking-based IoT frameworks: A systematic literature review, taxonomy, open challenges and prospects. *IEEE Access*, 10, 70850-70901. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188311>
- Singh, A., & Chatterjee, K. (2021). Securing smart healthcare system with edge computing. *Computers & Security*, 108, Article 102353. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102353>
- Vizarreta, P., Trivedi, K., Helvik, B., Heegaard, P., Kellerer, W., & Machuca, C. M. (2017). An empirical study of software reliability in SDN controllers. In *2017 13th International Conference on Network and Service Management (CNSM)* (pp. 1-9). IEEE.
- Zhang, J., Chen, B., Zhao, Y., Cheng, X., & Hu, F. (2018). Data security and privacy-preserving in edge computing paradigm: Survey and open issues. *IEEE Access*, 6, 18209-18237. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2820162>

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE OPTİMUM EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR VE SİSTEM PERFORMANSINA ETKİLERİ

Erkul KOCAMAN¹

Melih ÇOBAN²

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Rezervleri sürekli azalma eğiliminde olan fosil yakıtlar ve bu kaynakların çevresel etkileri, enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara yönelimi hızlandırmıştır. Enerji ihtiyacının yanı sıra sera gazı emisyonunun azaltılmasına yönelik küresel politikaların da etkisiyle temiz enerji üretim kaynaklarının önemini daha da artırmıştır. Bu bağlamda güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde sahip olduğu yüksek potansiyel, çevre dostu yapısı ve sürekli erişilebilirliği sayesinde ön plana çıkmaktadır (Yıldız vd., 2026; Nahim vd., 2025).

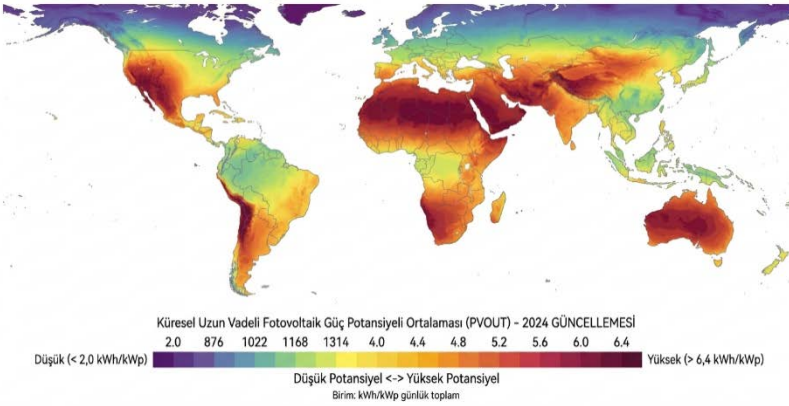
PV sistemler, güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayarak elektrik üretimine katkıda bulunmaktadır. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte maliyetlerin düşmesi bu sistemlere arzı hızla arttırmaktadır. Güneş panellerinin modüler yapısı, farklı ölçülerde tasarlanabilmesi ve bakım gereksinimlerinin diğer kaynaklara göre düşük olması, PV sistemleri hem bireysel hem de endüstriyel

¹ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0007-3896-869X.

² Dr. Öğr. Üyesi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-9528-7187.

uygulamalar için cazip hale getirmektedir. Bu sistemler, enerji arzında güvenilirliğin sağlanması, fosil yakıt kaynaklı dışa bağımlılığın azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi yönünde stratejik bir rol üstlenmektedir (Sameera vd., 2024).

PV sistemlerin performansını, çevresel ve tasarımsal birçok parametre etkilenmektedir. Ortam sıcaklığı, güneş ışınımı şiddeti, panel montaj tasarımı, panel yüzeyinde oluşan kirlenme (tozlanma), gölgelenme ve sistem için seçilen cihazların verimi bu parametrelerin başında gelmektedir. Şekil 1'de, dünya genelinde kurulu güç başına düşen günlük PV enerji üretim potansiyelinin bölgesel ve coğrafi dağılımı verilmiştir. Bunlara ek, sistem tasarım aşamasında doğrudan verimi etkileyen en önemli parametrelerden biri panel eğim açısıdır. Eğim açısı, güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açısını etkileyerek PV sistemlerden elde edilen enerji miktarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, eğim açısının doğru belirlenmesi, PV sistemlerden elde edilebilecek maksimum enerji üretimi açısından ciddi bir öneme sahiptir (Bakhshi-Jafarabadi & Doh Dinga, 2025; Ozer & Demirci, 2025).



Şekil 1. Dünya genelinde birim kurulu PV sistem başına günlük enerji üretim potansiyelinin (kWh/kWp/gün) coğrafi dağılımı, Guermoui vd. (2026)

Güneş ışınımı, yatay bir yüzeye gelen ışınımın yanı sıra eğimli yüzeylere farklı bileşenler halinde ulaşmaktadır. Direkt (beam), yayılı (difüz) ve yansıyan (albedo) ışınım bileşenlerinin toplamı, eğimli yüzeyde elde edilen toplam ışınım miktarını ifade etmektedir. Bu durum, panelin montaj açısına bağlı olarak enerji üretiminde önemli farklılıkların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında, PV panellerin optimum eğim açısında yerleştirilmesi, ışınımın en verimli şekilde toplanmasını sağlayarak sistem performansını ve enerji üretimini doğrudan artırmaktadır (Kacira vd., 2004; Memme vd., 2025).

Literatürde optimum eğim açısının belirlenmesi için farklı çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel olarak, optimum eğim açısının coğrafi enlem ile ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın tek başına yeterli olmadığını ve bölgenin iklim koşulları, atmosferik etkiler ve sistemin kullanım amacına bağlı olarak eğim açısının değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle tozlanma, bulutluluk oranı, coğrafi konum ve mevsimsel ışınım değişimleri gibi faktörler, optimum eğim açısının belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli parametrelerin başında gelmektedir (Alzahrani vd., 2025; Qu vd., 2025).

Sistem tasarımı için önemli parametrelerin başında gelen eğim açısı yalnızca enerji üretimini değil, aynı zamanda sistemin operasyonel performansını da etkilediği bilinmektedir. Düşük eğim açılarında panel yüzeyinde toz ve kar birikiminin artması, sistem veriminde ciddi kayıplara yol açabilmektedir. Benzer şekilde, eğim açısının modül sıcaklığı ve sistem verimliliği üzerinde dolaylı etkileri olduğu da çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur (Sameera et al., 2024). Ayrıca, eğim açısının PV sistem performansı tahmin modellerinin doğruluğunu etkileyen bir parametre olduğu ve özellikle şebeke entegrasyonu açısından önemli olduğu belirtilmektedir (Mayer, 2022).

Optimum eğim açısının belirlenmesi, enerji üretimi üzerinde doğrudan etkili olduğundan, sabit sistemler açısından kritik bir öneme sahiptir. Güneş takip sistemleri, güneşin gün içerisindeki hareketini izleyerek maksimum ışınımı elde etse de, yüksek kurulum maliyetleri ve bakım gereksinimleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmemektedir. Bu sebepten dolayı, sabit sistemlerde uygun eğim açısının belirlenmesi, sistem performansını doğrudan etkileyen temel tasarım parametrelerinden biridir (Arslan & Çunkaş, 2025).

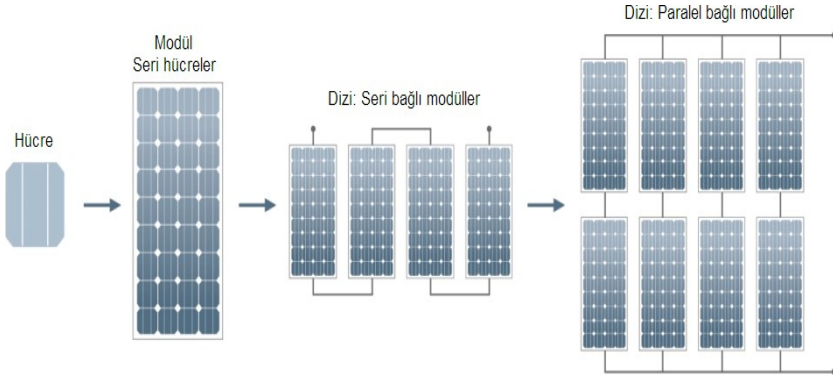
Son yıllarda yapılan çalışmalar, optimum eğim açısının yalnızca yıllık toplam maksimum enerji üretimini hedeflememekte, aynı zamanda belirli uygulamaya göre de optimize edilebileceğini göstermektedir. Örneğin, bazı yapılan çalışmalarda pik yük talebinin yüksek olduğu saatlerde, hedeflenen saat aralığı için enerji üretimini artırmaya yönelik farklı eğim açıları önerilmektedir. Bu durum, optimum eğim açısının enerji üretimi, maksimum verimlilik ve şebeke performansı gibi farklı kriterler doğrultusunda çok yönlü bir optimizasyon problemi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Bakhshi-Jafarabadi & Doh Dinga, 2025).

Bu çalışma kapsamında, PV sistemlerde eğim açısının belirlenmesinde kullanılan teorik ve analitik yaklaşımlar incelenmiştir. Bu doğrultuda, güneş geometrisi, ışınım bileşenleri ve çevresel etkiler dikkate alınarak eğim açısının sistem verimi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda yer alan güncel bilgiler analiz edilerek mevcut yaklaşımlar bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, optimum eğim açısının belirlenmesine yönelik daha önce tespit edilen yaklaşımlar genel hatlarıyla sunulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için literatürdeki boşluklar ortaya konulmuştur.

2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN YAPISI VE PERFORMANS KRİTERLERİ

PV sistemler, güneşten gelen ışınları doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken tabanlı sistemlerdir. Bu enerji dönüşümü, PV etki olarak adlandırılan fiziksel bir mekanizma ile gerçekleşmektedir. Güneş ışınlarının PV hücre yüzeyine çarpması ile birlikte, yarı iletken malzeme içerisinde elektron-boşluk çiftleri oluşmakta ve bu taşıyıcıların hareketi sonucu doğru akım (DC) elektrik enerjisi elde edilmektedir (Yıldız vd., 2026).

PV hücreler genellikle silikon tabanlı malzemelerden üretilmektedir. PV paneller, monokristal ve polikristal olmak üzere iki çeşidi vardır. Monokristal hücreler daha yüksek enerji üretimi ve verime sahipken, polikristal hücreler daha düşük maliyetli olmasından dolayı avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra ince film teknolojileri de belirli uygulamalarda tercih edilmekte, esneklik ve düşük malzeme kullanımı gibi avantajlar sağlamaktadır (Sameera vd., 2024). Şekil 2’de görüldüğü üzere, hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla PV modüller, modüllerin bir araya getirilmesiyle ise PV dizileri oluşturulmaktadır.



Şekil 2. Fotovoltaik sistemlerde güneş hücresinin modül ve dizi yapısına dönüştürülmesi ile seri ve paralel bağlantı konfigürasyonları, Öztürk (2017)

PV sistemlerin performansı, çevresel koşullardan oldukça etkilenmektedir. Güneş ışınımı şiddeti, sistem performansını doğrudan belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Işınım ile enerji üretimi doğru orantılıdır, ışınım arttıkça üretilen elektrik enerjisi de artmaktadır. Ancak ışınımın artması ile modül sıcaklığının artması yarı iletken özellikler nedeniyle verimde düşüğe neden olmaktadır. Ayrıca, panel yüzeyinde biriken toz ve kir tabakası, gelen ışınımın bir kısmını hücrelere ulaşmasını engelleyerek enerji üretimini olumsuz yönde etkilemektedir (Alzahrani vd., 2025; Qu vd., 2025).

PV sistemlerin kurulum tipleri genel olarak sabit sistemler ve güneş takip sistemleri olarak iki bölümde incelenmektedir. Sabit sistemlerde paneller, belirli bir eğim ve yönelim açısına göre yerleştirilmektedir. Sabit sistemler, düşük kurulum maliyetleri ve basit yapıları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Buna karşın, güneş takip sistemleri güneşin gün içerisindeki hareketini izleyerek panel yüzeyinin her zaman optimum açığa yakın konumda kalmasını sağlamaktadır. Tek eksenli ve çift eksenli olmak üzere farklı tipleri bulunan bu sistemler, sabit sistemlere kıyasla daha yüksek enerji üretimi sağlayabilmektedir (Kacira vd., 2004). Ancak güneş takip sistemlerinin mekanik yapılarının karmaşık olması, bakım gereksinimlerinin yüksekliği ve ilk yatırım maliyetlerinin fazla olmasından kaynaklı bu sistemlerin kullanımı sınırlıdır. Bu nedenle, birçok uygulamada sabit sistemler tercih edilmekte ve bu sistemlerde optimum eğim açısının doğru belirlenmesi kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir. (Arslan & Çunkaş, 2025).

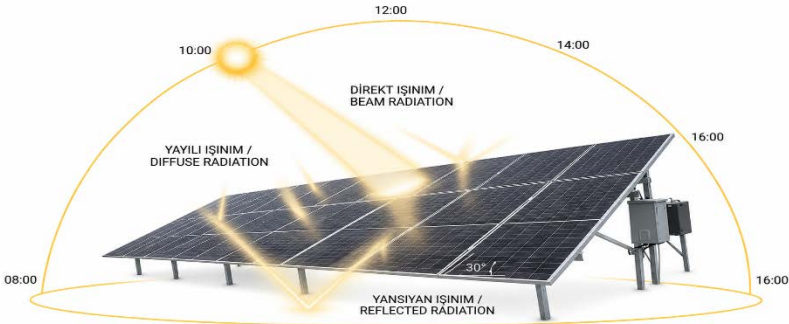
Sonuç olarak, PV sistemlerin verimli çalışması; sistem bileşenlerinin doğru seçimi, çevresel koşulların dikkate alınması ve özellikle panel sistem tasarımının uygun şekilde yapılmasına bağlıdır. Bu bağlamda, eğim açısı hem ışınımın maksimum düzeyde yakalanması hem de çevresel etkilerin minimize

edilmesi açısından temel bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir.

3. GÜNEŞ GEOMETRİSİ VE YÜZEY EĞİMİNİN İŞİNİM ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Güneşin konumu, belirli geometrik parametreler yardımıyla tanımlanmaktadır. Bunlar arasında enlem açısı (ϕ), deklinasyon açısı (δ), saat açısı (ω) ve güneş yükseklik açısı (α) yer almaktadır. Enlem açısı, gözlem noktasının ekvatora olan açısal uzaklığını ifade ederken; deklinasyon açısı, güneşin yıl içerisindeki konum değişimini temsil etmektedir. Saat açısı ise güneşin gün içerisindeki hareketine bağlı olarak değişmekte ve güneşin yerel meridyene göre açısal konumunu ifade etmektedir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle güneşin herhangi bir zaman dilimindeki konumu hesaplanabilmektedir (Nahim vd., 2025).

Güneş ışınımı, Şekil 3'te gösterildiği üzere yatay veya eğimli bir yüzeye ulaştığında direkt (beam), yayılı (difüz) ve yansıyan (albedo) olmak üzere üç temel bileşene ayrılmaktadır. Direkt ışınım, güneşten doğrudan gelen ve atmosferde saçılmaya uğramayan ışınımı tanımlamaktadır. Difüz ışınım, atmosferdeki moleküller, aerosoller ve bulutlar tarafından saçılan ışınım bileşenidir. Yansıyan ışınım ise yer yüzeyi ve çevredeki nesnelere yansıyarak panel yüzeyine ulaşan ışınımı ifade etmektedir (Kacira vd., 2004; Memme vd., 2025).



Şekil 3. Fotovoltaik panel yüzeyine gelen güneş ışınımının direkt (beam), yayılı (diffuse) ve yansıyan (reflected) bileşenlerinin şematik gösterimi.

Eğimli bir yüzeye gelen toplam güneş ışınımı, bu üç bileşenin toplamı olarak ifade edilmektedir:

$$GT = G_b \times R_b + G_d (1 + \cos\beta)/2 + G_r (1 - \cos\beta)/2 \quad (1)$$

Burada GT eğimli yüzeye gelen toplam ışınımı, G_b direkt ışınımı, G_d difüz ışınımı ve G_r yansıyan ışınımı temsil etmektedir. R_b ise direkt ışınımın eğimli yüzeye dönüşüm katsayısını, β ise panel eğim açısını ifade etmektedir. Bu bağıntı, eğim açısının ışınım bileşenleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Yatay düzlemde ölçülen güneş ışınımı verilerinin eğimli yüzeylere aktarılabilmesi için çeşitli dönüşüm modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller genel olarak izotropik ve anizotropik olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. İzotropik modeller, difüz ışınımın gökyüzünde eşit dağıldığını varsayarken, anizotropik modeller güneş çevresindeki ışınım yoğunluğunu da dikkate almaktadır. Özellikle Perez ve Hay–Davies modelleri, anizotropik yaklaşımlar arasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Memme vd., 2025).

Eğim açısı, bu dönüşüm süreçlerinde doğrudan etkili bir parametredir. Özellikle direkt ışınım bileşeninin panel yüzeyine

düşen miktarını belirlemektedir. Panel yüzeyinin güneş ışınlarına dik konumlandırılması durumunda maksimum enerji elde edilirken, bu durum gün ve yıl boyunca güneşin hareketleri sebebiyle değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, sabit sistemlerde yıl boyunca maksimum toplam ışıınıyı sağlayacak optimum eğim açısının belirlenmesi sistem verimi için oldukça önemli olduğu vurgulanmaktadır (Kacira vd., 2004).

Bununla birlikte, difüz ve yansıyan ışıınıyı bileşenlerinin etkisi de eğim açısına bağlı olarak değişmektedir. Düşük eğim açılarında difüz ışıınıyı katkısı artarken, yüksek eğim açılarında yansıyan bileşenin etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, özellikle farklı iklim ve coğrafi koşullarda optimum eğim açısının değişkenlik göstermesinin temel nedenlerinden biri olduğu değerlendirilmektedir (Memme vd., 2025).

4. EĞİM AÇISININ FOTOVOLTAİK SİSTEM PERFORMANSINA ETKİSİ

PV sistemlerde enerji üretimi miktarı, büyük ölçüde panel yüzeyine ulaşan güneş ışıınıyı miktarına bağlıdır. Bu sebepten, panel eğim açısı (tilt angle), ışıınıyı panel yüzeyine geliş açısını belirleyen en önemli tasarım parametrelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Eğim açısının sisteme uygun şekilde belirlenmesi, panel yüzeyine düşen toplam ışıınıyı artırılmasını sağlayarak sistem performansını doğrudan etkilemektedir (Sameera vd., 2024).

Panel yüzeyinin güneş ışınlarına dik yerleştirilmesi durumunda, birim yüzeye düşen enerji miktarı maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Ancak güneşin gün içerisindeki ve yıl boyunca değişen konumu nedeniyle sabit sistemlerde bu durum sürekli olarak sağlanamamaktadır. Bu nedenle, yıl boyunca ortalama maksimum ışıınıyı sağlayacak bir eğim açısının belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar, eğim açısının

uygun seçilmemesi durumunda sistem veriminde önemli kayıpların oluşabileceğini göstermektedir (Kacira vd., 2004; Nahim vd., 2025).

Eğim açısının sisteme etkisi yalnızca direkt ışınım bileşeni ile sınırlı değildir. Difüz ışınım, özellikle bulutlu ve nemli bölgelerde toplam ışınımın önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve bu bileşenin katkısı eğim açısına bağlı olarak değişmektedir. Düşük eğim açılarındaki difüz ışınımın katkısı artarken, yüksek eğim açılarındaki direkt ışınımın etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, optimum eğim açısının belirlenmesinde bölgesel iklim koşullarının da sistem tasarımında etkisi olduğunu göstermektedir (Memme vd., 2025).

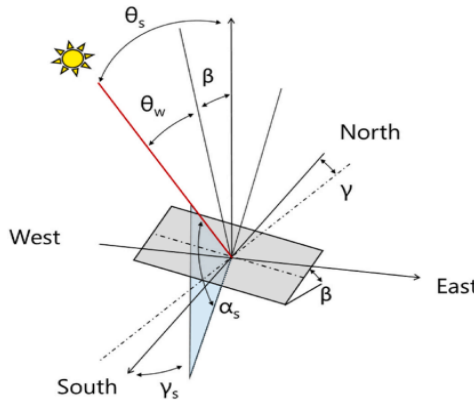
Eğim açısı aynı zamanda panel yüzeyinde meydana gelen çevresel etkiler üzerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle tozlanma, PV sistem performansını doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Düşük eğim açılarındaki panel yüzeyinde toz birikimi daha fazla olmakta ve bu durum ışınımın panel yüzeyine ulaşmasını engelleyerek enerji üretimini azaltmaktadır. Kurak ve çöl iklimine sahip bölgelerde yapılan çalışmalar, uygun olmayan eğim açılarındaki tozlanma kaynaklı kayıpların oldukça yüksek seviyelere ulaşabildiğini ortaya koymaktadır (Alzahrani vd., 2025; Qu vd., 2025).

Bununla birlikte, eğim açısı panel yüzeyinin doğal yollarla temizlenmesine de katkıda bulunmaktadır. Daha dik açılar, yağmur suyunun panel yüzeyinden daha etkin bir şekilde akmasını sağlayarak yüzeyde biriken kir ve tozun temizlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu durum, özellikle bakım maliyetlerinin azaltılması ve uzun vadeli performansın korunması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır (Alzahrani vd., 2025).

Eğim açısının bir diğer önemli etkisi modül sıcaklığı ile ilişkilidir. Panel eğimi, yüzey üzerinde hava akışını ve ısı transferini dolaylı olarak etkileyebilmektedir. Düşük eğim, hava

sirkülasyonunun sınırlandırılması ile birlikte modül sıcaklığının artmasına neden olmakta ve bu durum yarı iletken özellikler nedeniyle verim düşüşüne yol açabilmektedir. Bu nedenle, optimum eğim açısının belirlenmesinde termal etkilerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Sameera vd., 2024).

Yukarıdaki paragraflardan da anlaşılacağı üzere PV bir panelin (veya eğimli herhangi bir yüzeyin) atmosfer dışından gelen direkt güneş ışınları karşısındaki uzaysal konumlandırılması; panelin yatay düzlemle yaptığı eğim açısı (β) ve coğrafi güney (veya kuzey) referans hattından sapmasını ifade eden yüzey azimut açısı (γ) ile belirlenir. Güneşin gökyüzündeki anlık konumu, sırasıyla zenit açısı (θ_s), yükseklik açısı (α_s) ve güneş azimut açısı (γ_s) parametreleri ile tanımlanmaktadır. Söz konusu parametreler Şekil 4'te gösterilmiştir. Tüm bu geometrik değişkenlerin bileşkesi, gelen güneş ışınları ile panel yüzeyinin normali (dik eksen) arasında meydana gelen ve yüzeye düşen anlık ışınım yoğunluğunu doğrudan belirleyen geliş açısını (θ_w) oluşturmaktadır. Sonuç olarak, bu açısal ilişkilerin analitik olarak modellenmesi, güneş takip sistemlerinin tasarımı ve maksimum enerji üretim kapasitesinin hesaplanması açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 4. Eğimli bir yüzey üzerindeki güneş açıları ve yönelim parametreleri, Memme vd. (2021)

5. OPTİMUM EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR

PV sistemlerde optimum eğim açısının belirlenmesi, yalnızca sistematik bir yerleşim problemi olmayıp; ışınım, çevresel etkiler ve sistem hedeflerinin birlikte değerlendirildiği çok değişkenli bir optimizasyon sürecidir. Bu nedenle, eğim açısının belirlenmesine yönelik yaklaşımlar zaman içerisinde basit genel kurallardan çok gelişmiş sayısal ve veri odaklı modellere doğru evrilmiştir.

En temel yaklaşımlardan biri, enlem temelli ampirik yöntemlerdir. Bu yöntemde optimum eğim açısının, sistemin kurulacağı bölgenin enlemine yakın olduğu kabul edilmektedir ($\beta \approx \phi$). Bu yaklaşım, özellikle ilk tasarım aşamalarında hızlı sonuç vermesi açısından avantajlıdır. Ancak güneş ışınımının yıl içerisindeki değişimi, atmosferik koşullar ve yüzey özellikleri gibi faktörler dikkate alındığında, bu yaklaşımın çoğu durumda sistem için yeterli doğruluğu sağlayamadığı görülmektedir (Kacira vd., 2004; Ozer & Demirci, 2025). Bu nedenle enlem temelli yöntemler genellikle başlangıç tahmini olarak kullanılmakta ve daha gelişmiş analizlerle desteklenmektedir.

Daha yüksek hassasiyetli sonuçlar için geliştirilen analitik yaklaşımlar; toplam ışınımı matematiksel olarak modellemekte ve maksimum enerji kazanımı sağlayan eğim açısını hesaplamaktadır. Bu doğrultuda, ışınım bileşenleri kullanılarak saatlikten yıllığa kadar değişen ölçeklerde enerji hesaplamaları yapılabilmektedir. Toplam ışınım fonksiyonunun eğim açısına göre türevi alınarak ulaşılan optimum değerler, uzun dönemli verilerle desteklendiğinde sistem tasarımı için güvenilir bir temel oluşturmaktadır. (Nahim vd., 2025; Memme vd., 2025).

Sayısal optimizasyon yöntemleri, eğim açısının belirlenmesinde daha esnek ve güçlü bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu yöntemlerde belirli bir açı aralığı belirlenerek farklı eğim değerleri için sistem performansı tek tek hesaplanmakta ve maksimum enerji üretimini sağlayan açı değeri seçilmektedir. Bu işlem genellikle iteratif algoritmalar veya parametrik tarama yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle farklı senaryoların hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Ullah vd., 2025).

Simülasyon tabanlı yöntemler, gerçek meteorolojik verilerin kullanılması sayesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemlerde, farklı eğim açıları için yıllık enerji üretimi hesaplanmakta ve en yüksek üretimi sağlayan açı optimum olarak belirlenmektedir. Simülasyon araçları, ışınım verilerinin yanı sıra sıcaklık, rüzgâr ve sistem kayıpları gibi parametreleri de dikkate alarak kapsamlı analizler yapılmasına imkân vermektedir. Bu sayede, teorik yaklaşımlara kıyasla daha uygulamaya yakın sonuçlar elde edilebilmektedir (Ullah vd., 2025).

Sabit sistemlerin yanı sıra; eğim açısının periyodik olarak değiştirildiği dinamik yaklaşımlar, sistem verimliliğini optimize eden kritik bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, aylık veya mevsimsel olarak eğim açısının değiştirilmesiyle sistem performansının artırılması hedeflenmektedir. Özellikle güneşin yükseklik açısının yıl boyunca önemli değişim gösterdiği bölgelerde, sabit eğim yerine dönemsel ayarlamalar yapılması enerji üretiminde gözle görünür artışlar sağlayabilmektedir (Choudhary vd., 2025). Ancak bu yaklaşımın uygulanabilirliği, mekanik sistem gereksinimleri ve bakım maliyetleri ile doğrudan ilişkilidir.

Buna ek olarak, veri odaklı ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar, eğim açısının belirlenmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmaları ve yapay sinir

ağları, geçmiş meteorolojik veriler ile sistem performans verilerini kullanarak optimum eğim açısını tahmin edebilmektedir. Bu yöntemler, özellikle değişken iklim koşullarına sahip bölgelerde sisteme uyumlu çözümler sunarak klasik yöntemlere kıyasla daha verimli çözümler sunmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, PV sistemlerde eğim açısının sistem performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve optimum eğim açısının belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar incelenmiştir. Elde edilen değerlendirmeler, eğim açısının yalnızca panel konumlandırmasına ilişkin geometrik bir parametre olmadığını; aynı zamanda ışıınım kazanımı, çevresel kayıplar ve sistem verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan çok boyutlu bir tasarım değişkeni olduğunu göstermektedir.

Eğim açısının doğru belirlenmesi, panel yüzeyine ulaşan toplam güneş ışıınımını artırarak enerji üretimini önemli ölçüde yükseltmektedir. Bununla birlikte, eğim açısının difüz ve yansıyan ışıınım bileşenleri, modül sıcaklığı ve yüzey kirliliği gibi faktörlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Özellikle düşük eğim açılarında artan tozlanma etkisi ve yüksek eğim açılarında değişen ışıınım dağılımı, optimum açının belirlenmesini çok değişkenli bir problem haline getirmektedir.

Optimum eğim açısının belirlenmesine yönelik yöntemler incelendiğinde, basit enlem temelli yaklaşımların hızlı sonuçlar sunduğu, ancak daha hassas analizler için matematiksel modelleme, sayısal optimizasyon ve simülasyon tabanlı yöntemlerin tercih edilmesi gerektiği görülmektedir. Ayrıca, aylık ve mevsimsel açı ayarlamalarının yıllık sabit sistemlere kıyasla daha yüksek enerji üretimi sağlayabildiği, ancak uygulamada maliyet ve bakım giderleri nedeniyle sınırlı düzeyde tercih edildiği değerlendirilmektedir.

Genel olarak, optimum eğim açısının tek bir sabit değerden ziyade; coğrafi konum, iklim koşulları ve sistem kullanım amacına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum, eğim açısının belirlenmesinde bölgeye ve uygulamaya özgü analizlerin yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalar açısından değerlendirildiğinde, eğim açısının belirlenmesine yönelik mevcut yaklaşımların çoğunlukla sabit varsayımlara dayandığı ve dinamik çevresel koşulları sınırlı düzeyde temsil edebildiği görülmektedir. Özellikle ışınım bileşenlerinin zamansal değişimi, yüzey kirliliği, sıcaklık etkileri ve sistem kullanım senaryoları birlikte ele alındığında, eğim açısının daha bütüncül modellerle değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, yalnızca yıllık toplam enerji üretimini maksimize eden yaklaşımlar yerine, farklı zaman dilimlerinde değişen enerji talebi ve üretim profillerini dikkate alan yöntemlerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Alzahrani, M., Rahman, T., Rawa, M., & Weddell, A. (2025). Impact of dust and tilt angle on the photovoltaic performance in a desert environment. *Solar Energy*, 288, 113239.
- Arslan, M., & Çunkaş, M. (2025). An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. *Journal of Engineering Research*, 13, 2689–2701.
- Bakhshi-Jafarabadi, R., & Doh Dinga, C. (2025). Optimum tilt and azimuth of fixed grid-connected photovoltaic system for peak load shaving: a multi-scale model. *Renewable Energy*, 255, 123714.
- Choudhary, S., Lal, S., & Verma, S. (2025). Seasonal optimization of solar PV tilt angles for enhanced energy efficiency in Rajasthan, India. *Unconventional Resources*, 8, 100230.
- Guermoui, M., Belaid, A., Riche, A., & Melgani, F. (2026). Optimizing Algeria's solar potential: End-to-end PV siting, performance mapping, and techno-economic insights. *Energy Conversion and Management*, 359, 121511.
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265–1275.
- Mayer, M. J. (2022). Impact of the tilt angle, inverter sizing factor and row spacing on the photovoltaic power forecast accuracy. *Applied Energy*, 323, 119598.

- Memme, S., Fossa, M., & Rouse, D. (2025). Best tilt of PV system in Canada: Effect of the sky radiation model and climate conditions. *Renewable Energy*, 254, 123716.
- Nahim, H. M., Ibrahim, T., Faraj, J., Ali, S., Khaled, M., & Darwiche, M. (2025). Optimizing solar panel tilt angles for enhanced energy production: Case studies in Lebanon. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106720.
- Ozer, R. A., & Demirci, M. (2025). Determination of optimum tilt angle for solar panels: Case study for Eastern Anatolia Region of Turkey. *Gümüşhane University Journal of Science*, 15(1), 93–104.
- Öztürk, H. H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Sergisi, İzmir, 18–21 Ekim 2017. Elektrik Mühendisleri Odası (EMO).
- Qu, H., Zhao, H., Wang, W., & Zhang, J. (2025). Experimental study on the losses of dusty PV modules considering irradiance levels and tilt angles. *Energy Reports*, 13, 2844–2854.
- Sameera, Tariq, M., & Rihan, M. (2024). Analysis of the impact of irradiance, temperature and tilt angle on the performance of grid-connected solar power plant. *Measurement: Energy*, 2, 100007.
- Ullah, M. R., Hasan, M., Biswas, D., Ali, M. F., & Hasan, M. G. (2025). Techno-economic analysis of tilt angle and inter-row spacing: Optimization of a 200 MW floating solar PV plant. *Energy Conversion and Management: X*, 28, 101245.
- Yıldız, G., Gürel, A. E., & Maraşlı, M. (2026). Performance analysis of a PV power plant installed on the roof. *Düzce*

University Journal of Science and Technology, 14(2),
617–628.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF RENEWABLE POWER GENERATION SYSTEMS WITH HOMER PRO – PART I: THEORETICAL FOUNDATIONS AND MODELLING METHODOLOGY

Bahtiyar DURSUN¹

Sibel DURSUN²

Zafer Ömer ÖZDEMİR³

1. INTRODUCTION

The global energy transition is reshaping how electricity systems are designed, financed, and operated. Population growth, urbanization, industrial activity, and digital infrastructure continue to increase electricity demand, while climate policy and public-health concerns require a decisive reduction in fossil-fuel dependence. Renewable energy technologies — especially photovoltaic (PV), wind, biomass, biogas, small hydropower, geothermal energy, and hydrogen-based systems — therefore occupy a central position in contemporary power-system planning. The technical challenge is not simply to install renewable capacity. Solar and wind resources are inherently variable, and their production profiles do not always coincide

¹ Assoc. Prof. Dr., Edunetsoft Educational Technology and Software Company, Altunizade Avenue, Üsküdar, Istanbul, Türkiye., ORCID: 0000-0002-6036-7408.

² Msc., Department of Physics, Sentez VIP School, Bakırköy, Istanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-8177-8214.

³ Assoc. Prof. Dr., Department of Analytical Chemistry, Hamidiye Faculty of Pharmacy, University of Health Sciences Türkiye, Istanbul, Türkiye., ORCID: 0000-0002-8362-3136.

with the temporal pattern of electricity demand. PV output is constrained by daylight and cloudiness, whereas wind output depends on local and often stochastic wind conditions. In practice, this variability can create mismatches between supply and demand, resulting in excess electricity during high-resource periods and capacity deficits during low-resource periods. Hybrid renewable energy systems (HRES) address this limitation by combining complementary resources, storage technologies, dispatchable generators, power-electronic interfaces, and, where available, grid interaction (Dursun, 2012).

A hybrid system may include PV panels, wind turbines, battery banks, biogas or diesel generators, electrolyzers, hydrogen tanks, fuel cells, converters, and utility-grid links. The value of such a configuration lies in complementarity. PV generation may reduce daytime fuel consumption; wind may contribute during different daily or seasonal intervals; batteries may absorb short-term surplus electricity; hydrogen systems may provide longer-duration storage; and dispatchable generators or grid imports may protect critical loads when renewable production is insufficient. These advantages, however, come with design complexity. Each component has its own capital cost, lifetime, replacement schedule, efficiency, maintenance requirement, and environmental implication (Aykut & Terzi, 2020).

For this reason, HRES planning requires more than a static capacity calculation. A technically and economically defensible design must account for hourly load profiles, solar irradiation, wind-speed distributions, fuel prices, battery state of charge, generator dispatch, inverter efficiency, project lifetime, interest or discount rates, emissions, grid tariffs, and reliability constraints. HOMER Pro has become one of the most widely used software platforms for this purpose because it combines hourly simulation,

optimization, and sensitivity analysis in a single decision-support environment (Khalil et al., 2021; Ross-Hopley et al., 2025).

This two-part chapter is prepared as a book-chapter treatment rather than as a narrow case-study report. It synthesizes the theory of HOMER-based modelling with current applications in rural electrification, schools, hospitals, irrigation systems, biogas-supported microgrids, hydrogen storage, and university campuses. The present Part I explains how HOMER Pro is structured, what its principal modules and outputs mean, and how a defensible model is built; Part II then applies this framework to recent literature and to two detailed case studies. The objective is to explain how HOMER Pro is used, what its principal outputs mean, and how its results should be interpreted critically in academic and engineering contexts.

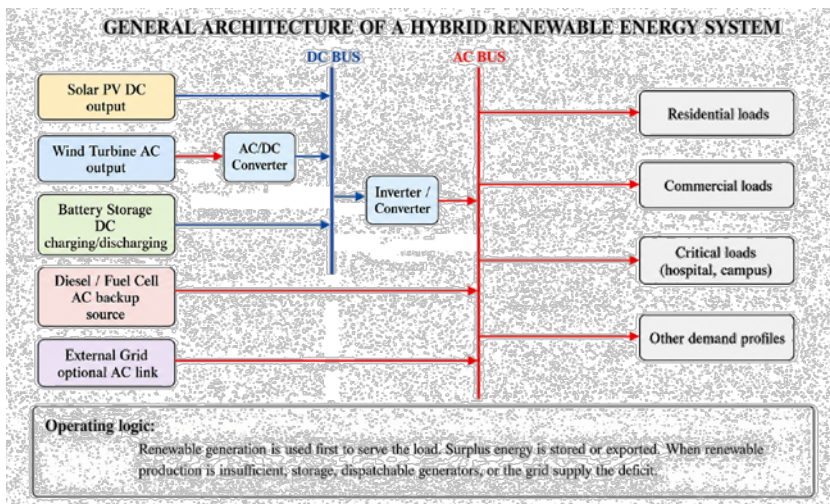


Figure 1. General architecture of a hybrid renewable energy system.

2. CONCEPTUAL BASIS OF HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

2.1. Rationale for the Hybrid-System Approach

A hybrid renewable energy system is an integrated power-supply architecture in which two or more energy sources, often combined with one or more storage technologies, serve a defined electrical or thermal load. The design objective is to exploit the complementary behaviour of different resources. In regions where solar and wind availability differ by season or time of day, hybridization can improve the probability that at least one renewable source is available when the load requires power. Storage then buffers short-term or medium-term mismatches, while dispatchable units or grid links provide additional resilience(Bahramara et al., 2016).

Hybrid systems are especially relevant for islands, remote villages, agricultural production sites, health facilities, campuses, schools, military facilities, data centers, and other critical loads where interruptions have high economic or social costs. Recent studies also show that HRES modelling increasingly extends beyond simple electricity supply. It now includes oxygen production for fish farming (Mbasso et al., 2023), hydrogen production (Tiam Kapen et al., 2022), (Hüner, 2025), biogas valorization from organic or sanitation waste(Chisale et al., 2023), irrigation energy planning (Manolache et al., 2025), and technical validation with MATLAB/Simulink and life-cycle assessment (Mojumder et al., 2025).

The advantage of hybridization is not automatic. A system with too many components may have higher capital expenditure and greater maintenance complexity than a simpler alternative. Conversely, a poorly sized single-source system may require large oversizing or frequent diesel operation. The analytical task is therefore to identify a configuration that balances cost,

reliability, renewable penetration, environmental benefit, and operational simplicity.

2.2. Typical System Components

PV arrays convert solar irradiation into direct-current electricity and are typically connected to a DC bus through appropriate power-electronic interfaces. They are attractive because of modularity, low operating cost, and declining capital costs. Their limitation is diurnal and weather-dependent production (Parida et al., 2011).

Wind turbines convert kinetic energy in moving air into electrical power. Wind output is highly sensitive to wind speed because available wind power is proportional to the cube of wind velocity. Wind resources can complement PV resources, but wind turbines require careful site assessment, suitable hub-height data, and maintenance planning (Manwell et al., 2009).

Battery systems provide short-duration storage and fast dynamic response. Their role is to smooth renewable fluctuations, reduce generator cycling, maintain continuity during short deficits, and support peak demand. Battery feasibility depends on chemistry, capital cost, depth of discharge, cycle life, replacement schedule, temperature effects, and recycling or disposal considerations (Koochi-Fayegh & Rosen, 2020).

Dispatchable generators, including diesel and biogas units, improve reliability because they can operate when renewable production is low. Diesel generators are often economically simple but increase fuel dependence and emissions. Biogas generators may reduce waste-management burdens and improve circularity when local organic residues or human excreta are available, as illustrated in school-scale analyses (Chisale et al., 2023).

Hydrogen-based subsystems generally include an electrolyzer, a hydrogen tank, and a fuel cell. Surplus renewable electricity is used by the electrolyzer to produce hydrogen; stored hydrogen is later reconverted to electricity through the fuel cell. This pathway can support longer-duration storage and clean hydrogen production, although conversion losses and high component costs remain significant constraints (Hüner, 2025; Tiam Kapen et al., 2022).

3. HOMER PRO AS A DECISION-SUPPORT PLATFORM

HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) was originally developed at the United States National Renewable Energy Laboratory (NREL) and is now enhanced and distributed by UL Solutions. The acronym was historically expanded as “Hybrid Optimization Model for Electric Renewables,” but the current platform adopts the broader “Multiple Energy Resources” formulation to reflect its expansion beyond electricity-only systems. The software is today offered as a family of products built on a common simulation engine: HOMER Pro for least-cost design of microgrids and off-grid or islanded systems, HOMER Grid for behind-the-meter grid-connected systems that optimize demand charges and tariffs, and HOMER Front for utility-scale storage and front-of-the-meter projects. According to UL Solutions, the platform is used by more than 250,000 energy professionals in over 190 countries, which makes it one of the most widely adopted tools for hybrid-system techno-economic analysis. The analysis in this chapter is based on HOMER Pro (Lambert, Tom Gilman Paul Lilienthal, 2006).

HOMER Pro evaluates hybrid energy systems through three interrelated operations: simulation, optimization, and sensitivity analysis. In the simulation step, HOMER computes the

energy balance for each candidate configuration at time steps that can range from one minute to one hour, determines whether the load can be served under the specified constraints, and estimates operational outcomes such as generator runtime, battery state of charge, excess electricity, unmet load, and emissions. In the optimization step, feasible systems are ranked according to a user-defined objective, most commonly the lowest net present cost; the proprietary, derivative-free HOMER Optimizer searches the design space so that hundreds or even thousands of candidate systems can be compared in a single run. In the sensitivity step, uncertain parameters are varied to determine whether the preferred solution is robust under different resource, cost, and policy conditions(Manolache et al., 2025).

The core strength of HOMER Pro is its ability to compare many system architectures using a consistent set of technical and economic assumptions. Users define load profiles, meteorological resources, component options, costs, dispatch strategies, reliability limits, grid tariffs, and financial parameters. HOMER then constructs feasible combinations and ranks them. This iterative procedure is particularly useful when a design team must decide whether to include storage, whether to remain grid-connected, whether to add a generator, and which renewable source should receive priority.

The software should not be treated as a black box. Results are only as reliable as the input data and assumptions. Resource data from NASA or other databases may be adequate for pre-feasibility analysis but may not replace high-resolution on-site measurements for investment-grade studies. Similarly, component costs, discount rates, inflation assumptions, fuel prices, and replacement schedules must be documented transparently. Recent work has emphasized the importance of sensitivity analysis and independent validation when HOMER

outputs are used for planning decisions (Babu & Ray, 2023; Mojumder et al., 2025).

HOMER PRO WORKFLOW

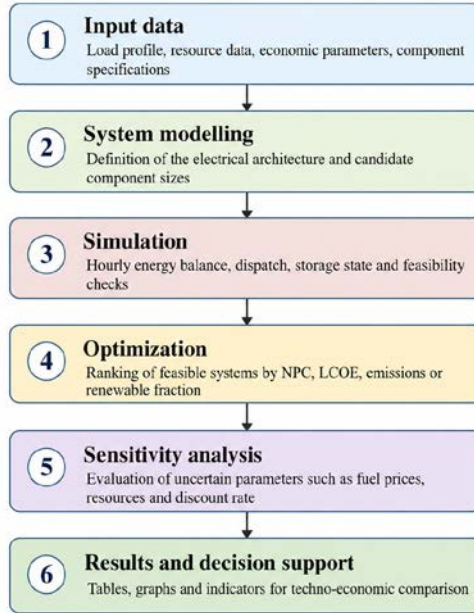


Figure 2. General workflow of HOMER Pro modelling, optimization, and decision support.

MAIN MODULES USED IN HOMER PRO

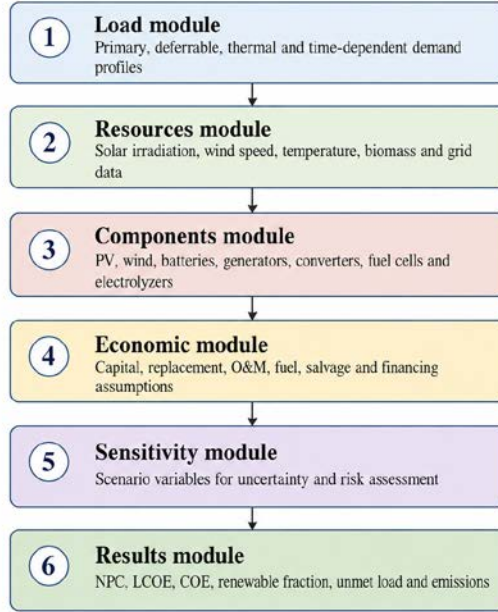


Figure 3. Main modules commonly used in HOMER Pro analyses.

The base HOMER Pro license can model solar PV, wind, batteries, diesel generators, and simple grid connections, while optional add-on modules extend the analysis to more specialized architectures. The Biomass module represents biogas-fueled or cofired generators; the Hydro module adds run-of-river or small hydro; the Combined Heat and Power and Advanced Load modules handle thermal demand and combined AC/DC or deferrable loads; the Hydrogen module models electrolyzers, hydrogen storage, and fuel cells; the Advanced Storage module unlocks a modified kinetic battery model with temperature and degradation effects; the Multi-Year module captures load growth, PV degradation, and fuel-price escalation over the project lifetime; and the MATLAB Link module allows a user-defined dispatch algorithm to be coupled to the simulation. These modules are directly relevant to the biogas, hydrogen, and

dynamic-validation studies discussed in Part II, because they determine which physical processes HOMER can represent and how realistically dispatch and storage behavior are captured (Bahramara et al., 2016; Lambert, Tom Gilman Paul Lilienthal, 2006).

4. MODELLING PROCEDURE IN HOMER PRO

4.1. Load Modelling

The load profile is the starting point of an HRES model. It describes how much electricity is needed, when it is needed, and which part of the demand is critical. HOMER Pro allows the user to define primary loads, deferrable loads, thermal loads, and time-dependent variations. In simple cases, a synthesized daily profile may be sufficient; in critical applications, measured hourly load data are preferable.

Load quality directly affects sizing results. Underestimating peak demand may produce an apparently low-cost system that fails under real operating conditions. Overestimating demand may lead to unnecessary oversizing. In hospital, school, or campus applications, load profiles should reflect working hours, night demand, seasonal cooling or heating, equipment use, and potential future growth. The Somalia hospital case examined in Part II, for example, requires reliability-oriented interpretation because energy continuity in health facilities is not merely an economic criterion but a service-quality requirement.

4.2. Resource Assessment

Renewable-resource assessment includes solar irradiation, wind speed, temperature, biomass availability, fuel supply, and grid reliability. For PV systems, monthly or hourly global horizontal irradiation and temperature are essential. For wind systems, wind-speed data should correspond to the turbine

hub height or be adjusted using a validated wind-shear model. For biomass or biogas systems, the availability, collection logistics, energy content, and seasonal variability of the feedstock must be specified.

Many HOMER-based studies use NASA, NREL, national meteorological services, or measured on-site data. The choice depends on the study objective. A book-chapter or preliminary academic assessment may rely on database inputs, whereas an investment-grade project should combine long-term databases with site measurements and uncertainty analysis (Dursun et al., 2013; Stackhouse, 2017).

4.3. Component Definition and Dispatch Strategy

After the load and resources are defined, the user specifies the candidate components and their technical-economic parameters. These include PV capacity ranges, wind turbine models, battery quantity and chemistry, generator capacity, fuel cost, converter rating, fuel-cell capacity, electrolyzer size, hydrogen-tank capacity, capital cost, replacement cost, operation and maintenance cost, lifetime, efficiency, and salvage value.

Dispatch strategy affects operating cost and component use. In load-following dispatch, the generator typically produces only enough electricity to meet the immediate deficit, avoiding unnecessary battery charging. In cycle-charging dispatch, the generator may operate at a higher output and charge the battery while running. Tiam Kapen et al. reported that dispatch strategy, battery inclusion, and hydrogen-system architecture materially affected feasibility and cost in PV/biogas/fuel-cell/electrolyzer systems. (Tiam Kapen et al., 2022).

MODELLING PROCESS FOR HYBRID ENERGY SYSTEMS

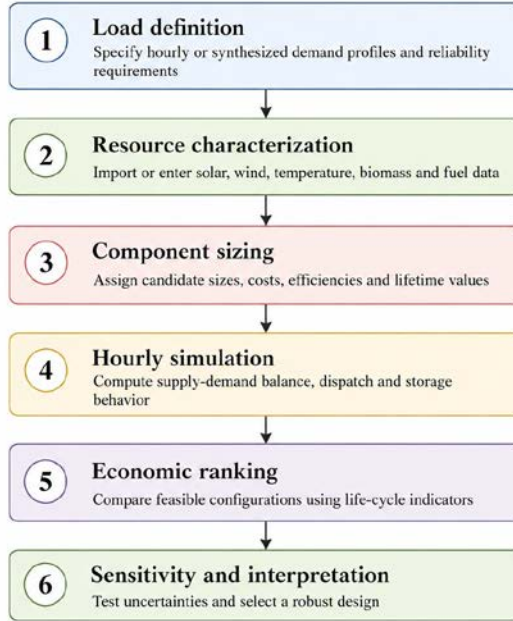


Figure 4. Sequential modelling process for hybrid renewable energy systems in HOMER Pro.

5. ECONOMIC, TECHNICAL, AND ENVIRONMENTAL INDICATORS

5.1. Net Present Cost and Capital Recovery

Net present cost (NPC) is the present value of all costs incurred over the project lifetime, including capital investment, replacement, operation and maintenance, fuel, grid purchases, and salvage value. HOMER Pro commonly uses NPC as the primary ranking criterion because it expresses the full life-cycle burden of a configuration in one economic measure (Dursun, 2012).

$$NPC = C_{ann,tot} / CRF(i, N)$$

$$CRF(i, N) = [i (1 + i)^N] / [(1 + i)^N - 1]$$

In these expressions, $C_{ann,tot}$ is the total annualized cost, i is the real interest or discount rate, and N is the project lifetime. The capital recovery factor converts a present value into an equivalent annualized cost. Because discount-rate assumptions strongly influence NPC, they should be included in sensitivity analysis whenever possible.

5.2. Cost of Energy and Levelized Cost of Energy

Cost of energy (COE) and levelized cost of energy (LCOE) express the average cost of served electricity. LCOE is commonly used to compare different technologies or configurations over their lifetime. In hybrid systems, however, LCOE must be interpreted together with reliability and environmental indicators because a low LCOE can be achieved at the expense of higher unmet load or higher emissions (Dursun, 2012).

$$LCOE = (C_{cap,ann} + C_{rep,ann} + C_{O\&M,ann} + C_{fuel,ann} - S_{ann}) / E_{served,ann}$$

Here, the numerator represents annualized capital, replacement, operation and maintenance, fuel costs, and salvage adjustment, whereas $E_{served,ann}$ is the annual electricity served to the load. Recent studies continue to use LCOE and NPC as central indicators, but increasingly complement them with renewable fraction, excess electricity, battery state of charge, power-quality variables, and life-cycle assessment (Mojumder et al., 2025).

5.3. Reliability and Environmental Indicators

Reliability is usually represented by unmet load, capacity shortage, loss-of-load probability, or related measures. In critical systems, a zero or near-zero unmet load may be required. In flexible applications such as irrigation, a small permitted capacity shortage may be economically acceptable if it greatly reduces

capital expenditure (Manolache et al., 2025). Therefore, reliability requirements should be defined according to the service context rather than assumed uniformly for all applications.

Environmental indicators include carbon dioxide, carbon monoxide, sulphur dioxide, nitrogen oxides, and sometimes particulate emissions. Recent HOMER studies also integrate life-cycle assessment to consider upstream material and manufacturing impacts, especially for PV modules, batteries, and wind turbines. Mojumder et al. highlight that renewable systems can reduce operational emissions while still requiring attention to material efficiency, recycling, and battery life-cycle impacts (Mojumder et al., 2025).

6. FROM METHODOLOGY TO APPLICATION

The framework established in this Part I — load definition, resource assessment, component and dispatch modelling, and the economic, technical, and environmental indicators that rank candidate systems — provides the basis for the applied analysis that follows. Part II of this chapter applies the same methodology to the recent HOMER Pro literature and to two detailed case studies: a nursing-home hybrid system with hydrogen storage and the Somalia–Türkiye Training and Research Hospital energy system. Readers are encouraged to treat the two parts as a single continuous treatment, in which the conceptual and economic tools introduced here are used to interpret real configurations, trade-offs, and design recommendations.

REFERENCES

- Aykut, E., & Terzi, Ü. K. (2020). Techno-economic and environmental analysis of grid connected hybrid wind/photovoltaic/biomass system for Marmara University Goztepe campus. *International Journal of Green Energy*, 17(15), 1036–1043. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1821691>
- Babu, M. Ku., & Ray, P. (2023). Sensitivity analysis, optimal design, cost and energy efficiency study of a hybrid forecast model using HOMER pro. *Journal of Engineering Research*, 11(2), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100033>
- Bahramara, S., Moghaddam, M. P., & Haghifam, M. R. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>
- Chisale, S. W., Eliya, S., & Taulo, J. (2023). Optimization and design of hybrid power system using HOMER pro and integrated CRITIC-PROMETHEE II approaches. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100005>
- Dursun, B. (2012). Determination of the optimum hybrid renewable power generating systems for Kavakli campus of Kırklareli University, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.017>
- Dursun, B., Gokcol, C., Umut, I., Ucar, E., & Kocabey, S. (2013). Techno-economic evaluation of a hybrid PV - Wind power generation system. *International Journal of Green*

- Energy*, 10(2).
<https://doi.org/10.1080/15435075.2011.641192>
- Hüner, B. (2025). Feasibility and environmental analysis of biogas-based hybrid energy system using HOMER pro software: A case study for Hatay. *Energy Conversion and Management*, 326, 119480.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119480>
- Khalil, L., Liaquat Bhatti, K., Arslan Iqbal Awan, M., Riaz, M., Khalil, K., & Alwaz, N. (2021). Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro. *Materials Today: Proceedings*, 47, S110–S115.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.06.054>
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>
- Lambert, Tom Gilman Paul Lilienthal, P. (2006). Micropower system modeling with HOMER. In G. M. Farret, Felix A. Simoes (Ed.), *Integration of Alternative Sources of Energy* (pp. 379–418). John Wiley & Sons, Inc.
- Manolache, M., Manolache, A. I., & Andrei, G. (2025). Floating Solar Energy Systems: A Review of Economic Feasibility and Cross-Sector Integration with Marine Renewable Energy, Aquaculture and Hydrogen. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(8).
<https://doi.org/10.3390/jmse13081404>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Mbasso, W. F., Dzonde Naoussi, S. R., Jacques Molu, R. J., Saatong, K. T., & Kamel, S. (2023). Technical assessment

of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 100688. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100688>

Mojumder, Md. F. H., Islam, T., Rafi, Md. M. R., Asef, I. H., Hasan, M., & Chowdhury, N.-U.-R. (2025). Enhanced hybrid energy generation solutions for sustainable rural electrifications in Bangladesh: A system optimization and performance evaluation approach using HOMER Pro and MATLAB/Simulink. *Journal of Energy Storage*, 115, 115971. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115971>

Parida, B., Iniyana, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>

Ross-Hopley, D., Husband, R., Ugwu, Lord, & Ibrahim, H. (2025). Opportunities for renewable energy in large Saskatchewan irrigation projects evaluated in HOMER pro software. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 7, 100095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100095>

Stackhouse, P. W. (2017). *NASA Surface meteorology and Solar Energy*. https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=226093&lat=2.03&submit=Submit&hgt=100&veg=17&sitelev=&email=skip@larc.nasa.gov&p=grid_id&p=wspd50m&step=2&lon=45

Tiam Kapen, P., Medjo Nouadje, B. A., Chegnimonhan, V., Tchuen, G., & Tchinda, R. (2022). Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the

far north region of cameroon by using HOMER pro.
Energy Strategy Reviews, 44, 100988.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100988>

MODELLING AND OPTIMIZATION OF RENEWABLE POWER GENERATION SYSTEMS WITH HOMER PRO – PART II: CURRENT APPLICATIONS AND CASE STUDIES

Bahtiyar DURSUN¹

Sibel DURSUN²

Zafer Ömer ÖZDEMİR³

1. INTRODUCTION

Part I of this chapter established the theoretical and methodological basis of HOMER Pro modelling: the rationale for hybrid renewable energy systems (HRES), the structure of the HOMER Pro platform, the sequential modelling procedure, and the economic, technical, and environmental indicators used to rank candidate configurations. The present Part II uses that framework to examine how HOMER Pro is being applied in current research and to demonstrate its use through two detailed case studies. The aim is to connect methodology to practice — to show what optimal configurations look like in real applications, which trade-offs recur, and how results should be interpreted and reported for academic and engineering audiences.

¹ Assoc. Prof. Dr., Edunetsoft Educational Technology and Software Company, Altunizade Avenue, Üsküdar, Istanbul, Türkiye., ORCID: 0000-0002-6036-7408

² Msc., Department of Physics, Sentez VIP School, Bakırköy, Istanbul, Türkiye., ORCID: 0000-0002-8177-8214

³ Assoc. Prof. Dr., Department of Analytical Chemistry, Hamidiye Faculty of Pharmacy, University of Health Sciences Türkiye, Istanbul, Türkiye., ORCID: 0000-0002-8362-3136

The discussion proceeds in four stages. First, recent HOMER Pro applications are reviewed to identify methodological trends, with particular attention to biogas and hydrogen pathways and to validation beyond pure techno-economic screening. Second, a nursing-home hybrid system with hydrogen storage is analyzed as a critical-load application. Third, the Somalia–Türkiye Training and Research Hospital is examined as a reliability-driven case with multiple competing configurations. Finally, the findings are synthesized into recommendations for academic studies, engineering feasibility work, and publication-quality reporting.

2. CURRENT LITERATURE ON HOMER PRO APPLICATIONS

Table 1. Recent HOMER Pro applications relevant to hybrid renewable energy systems.

Study	System / context	Key indicators	Main contribution
(Mbasso et al., 2023)	Stand-alone HRES for residential fish farming and oxygen production	Renewable fraction, DPSP, emissions	Shows how HRES can support both electricity and productive local activity.
(Tiam Kapen et al., 2022)	PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas systems in Cameroon	LCOE, LCOH, NPC, unmet load	Demonstrates the cost impact of batteries versus hydrogen-storage pathways.
(Khalil et al., 2021)	Grid-connected wind–solar system for Baluchistan seashore	NPC, COE, emissions	Illustrates basic HOMER-based optimization of wind–solar–grid architectures.
(Babu & Ray, 2023)	Wind forecasting and HOMER microgrid sensitivity analysis	Forecast error, COE, NPC, emissions	Links short-term wind forecasting with sensitivity-based microgrid assessment.

Study	System / context	Key indicators	Main contribution
(Chisale et al., 2023)	School-scale solar PV, biogas, grid and MCDM analysis in Malawi	LCOE, payback, PROMETHEE II ranking	Integrates HOMER with multicriteria decision-making and human-excreta biogas.
(Hüner, 2025)	PV/electrolyzer/biogas/fuel-cell systems in Hatay, Türkiye	LCOE, LCOH, NPC, emissions	Compares on-grid and off-grid biogas–hydrogen hybrid scenarios.
(Mojumder et al., 2025)	PV–wind–battery–grid microgrid in Bangladesh	NPC, LCOE, SOC, LCA, Simulink validation	Combines HOMER optimization with MATLAB/Simulink and life-cycle assessment.
(Ross-Hopley et al., 2025)	Renewable energy for Saskatchewan irrigation	LCOE, capacity shortage, tariffs, carbon pricing	Highlights the role of grid interaction and sensitivity treatment in irrigation loads.
(Khazraji et al., 2026)	Campus HRES optimized using ABC and validated in HOMER	Annual cost, LCOE, emissions	Compares algorithmic optimization with HOMER validation for academic buildings.
(Hasan et al., 2026)	Grid-connected PV–wind–battery campus microgrid validated in DIgSILENT PowerFactory	NPC, COE, renewable fraction, CO ₂ , voltage stability	Couples HOMER Pro optimization with power-system dynamic validation (~69% lower CO ₂ , ~77% renewable fraction).

The current literature indicates a clear movement from simple PV–wind–diesel comparisons toward more integrated assessments. Recent papers increasingly combine HOMER Pro with forecasting models, MATLAB/Simulink validation, life-cycle assessment, multicriteria decision-making, and heuristic optimization algorithms. This trend is methodologically important because techno-economic feasibility alone may not capture power quality, long-term environmental burden, investor risk, or operational robustness.

A second pattern is the growing attention to biogas and hydrogen. Biogas can provide a dispatchable renewable or semi-renewable source where organic residues are available. Hydrogen systems can store excess renewable electricity and support clean hydrogen production, but their cost and conversion losses require careful interpretation. In several studies, adding fuel cells or hydrogen infrastructure improves autonomy and sustainability potential but increases NPC or LCOE relative to battery-supported alternatives (Hüner, 2025; Tiam Kapen et al., 2022).

3. CASE STUDY I: NURSING-HOME HYBRID SYSTEM WITH HYDROGEN STORAGE

The first application concerns a critical-load facility represented by a nursing home. Such buildings require continuous electricity for lighting, heating or cooling, communication, safety systems, medical devices, and general operations. In this case, the hybrid system combines PV panels, a wind turbine, an electrolyzer, a hydrogen tank, a fuel cell, and a power converter. The concept is to maximize renewable use while maintaining supply continuity through hydrogen storage.

The optimized system in the chapter data consists of a 30 kW PV system, a 20 kW wind turbine, a 20 kW fuel cell, a 50 kW electrolyzer, a 20 kW converter, and a 100 kg hydrogen tank. PV and wind systems operate as primary renewable sources. Excess electricity is converted into hydrogen by the electrolyzer, stored in the hydrogen tank, and reconverted to electricity by the fuel cell during periods of renewable deficit.

The system illustrates the principal value and limitation of hydrogen-based storage. It reduces dependence on fossil fuels and strengthens autonomy, but the electrolyzer, fuel cell, and hydrogen tank increase capital cost. The reported NPC of 607,298 USD and COE of 1.30 USD/kWh indicate that, under the given

assumptions, the system is technically attractive for continuity and emissions but economically demanding. This is consistent with broader literature showing that hydrogen pathways may require cost reductions or policy incentives to become widely competitive in small- and medium-scale applications(B. Dursun & Aykut, 2019).

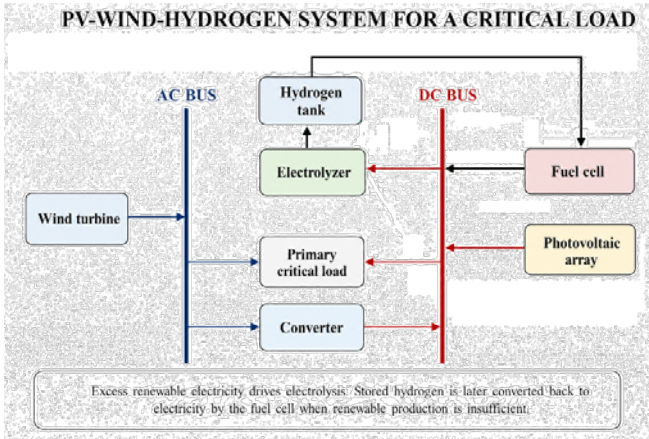


Figure 1. PV–wind–hydrogen hybrid system architecture for a critical nursing-home load.

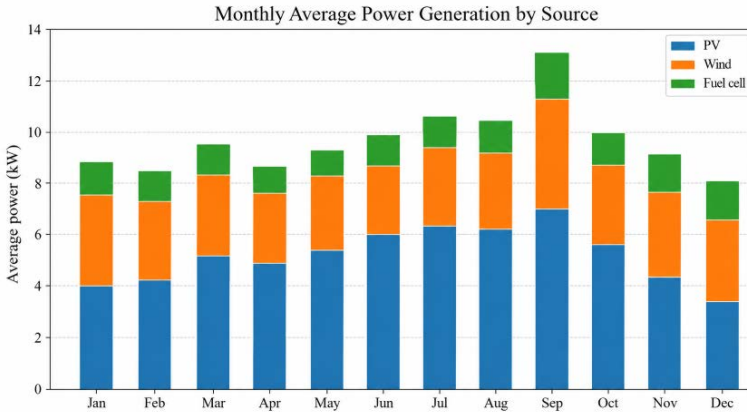


Figure 2. Monthly average power generation by PV, wind, and fuel cell in the nursing-home case.

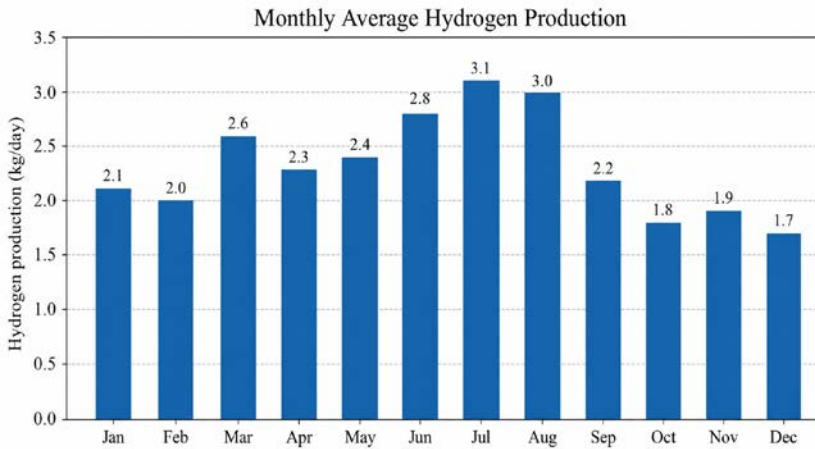


Figure 3. Monthly average hydrogen production in the nursing-home case.

4. CASE STUDY II: SOMALIA-TÜRKİYE TRAINING AND RESEARCH HOSPITAL

Hospitals are among the most demanding applications for hybrid energy systems because reliability is non-negotiable. Electricity interruptions may compromise operating rooms, laboratory systems, intensive-care units, cold-chain storage, medical imaging, ventilation, and information systems. For this reason, the Somalia-Türkiye Training and Research Hospital case evaluates several configurations that combine diesel generators, wind turbines, PV arrays, batteries, and converters (S. Dursun et al., 2021).

The assessed alternatives include diesel-only generation, wind-diesel, wind-diesel-battery, solar-diesel, solar-wind-diesel, and solar-wind-diesel-battery systems. The results show that the diesel-only system has the highest NPC, whereas adding renewable resources and storage improves both economic and environmental performance. The lowest NPC and COE are obtained for the wind-diesel-battery configuration, while the

lowest emissions are observed for the solar–wind–diesel–battery configuration.

The case demonstrates a common trade-off in hybrid-system design. The least-cost system may not always be the lowest-emission system. Decision-makers must therefore decide whether cost minimization, emissions reduction, fuel-security improvement, or a balanced multicriteria objective is most appropriate. For a hospital, the final decision should also consider redundancy, fuel logistics, maintenance capacity, and the consequences of power interruption(S. Dursun et al., 2021).

PV-WIND-DIESEL-BATTERY SYSTEM FOR A HOSPITAL LOAD

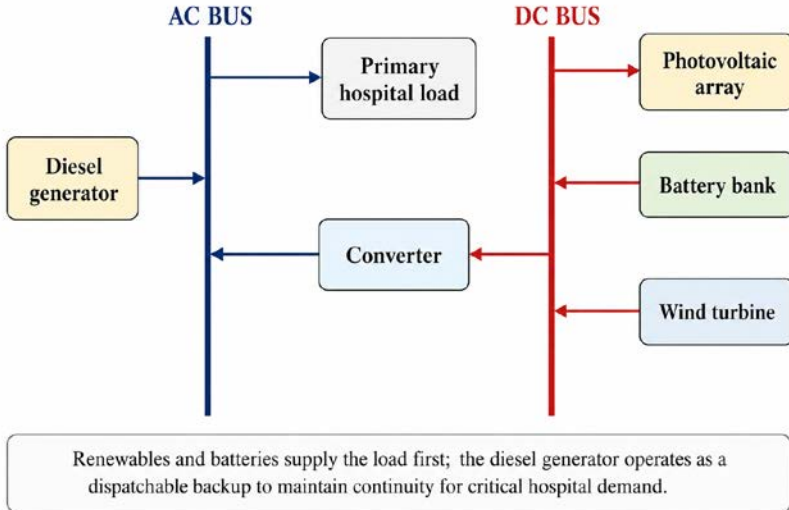


Figure 4. PV–wind–diesel–battery hybrid architecture for a hospital load.

Table 2. Economic comparison of energy-system alternatives for the Somalia hospital case.

System	NPC (USD)	COE (USD/kWh)	Interpretation
Diesel	9,608,750	0.360	Highest cost and highest fuel dependence.
Wind–diesel	5,663,186	0.213	Renewable integration substantially reduces cost.
Wind–diesel–battery	5,418,316	0.208	Lowest-cost configuration in the assessed scenarios.
Solar–diesel	7,989,642	0.308	PV reduces diesel use but remains less competitive than wind-based cases.
Solar–wind–diesel	6,836,281	0.258	Resource diversification improves performance.
Solar–wind–diesel–battery	6,302,950	0.238	Higher cost than wind–diesel–battery but lower emissions.

Table 3. Emission comparison of energy-system alternatives for the Somalia hospital case.

System	CO ₂ (kg/year)	CO (kg/year)	NO _x (kg/year)
Diesel	3,044,463	7,515	67,055
Wind–diesel	1,699,208	4,194	37,426
Wind–diesel–battery	1,536,476	3,793	33,841
Solar–diesel	1,960,666	4,840	43,184
Solar–wind–diesel	1,513,318	3,735	33,331
Solar–wind–diesel–battery	1,282,406	3,165	28,245

5. INTERPRETATION OF RECENT FINDINGS

The recent HOMER Pro literature supports four broad conclusions. First, optimal configurations are strongly site-specific. Solar-dominant systems are attractive where irradiation

is high and load coincides with daytime production; wind-dominant or wind-supported systems can be more competitive where wind resources are strong and complementary. Second, grid interaction can sharply change the economics of a project. Ross-Hopley et al. show that renewable integration for large irrigation loads is closely linked to the presence of grid connection and the tariff rules governing energy purchase and sellback(Ross-Hopley et al., 2025).

Third, storage selection is a decisive design issue. Batteries are generally effective for short-duration balancing and peak management; hydrogen pathways are more relevant for longer-duration storage and clean hydrogen production, but they often increase capital cost. The comparison shows that adding batteries to PV/biogas/fuel-cell/electrolyzer systems can greatly reduce LCOE and LCOH in certain demand categories, while maintaining zero unmet load (S. Dursun et al., 2021).

Fourth, HOMER optimization is increasingly complemented by other methods. MATLAB/Simulink and dedicated power-system tools such as DIgSILENT PowerFactory are used for dynamic technical validation, particularly to assess bus-voltage stability, battery state of charge, power balance, and power quality(Hasan et al., 2026). Multicriteria decision-making methods such as CRITIC-PROMETHEE II can incorporate environmental or social criteria alongside cost. Heuristic algorithms such as artificial bee colony, genetic algorithm, and particle swarm optimization may also be used to search the design space and compare results with HOMER outputs. A recent campus study by Hasan et al., for example, optimized a grid-connected PV–wind–battery microgrid in HOMER Pro and then validated voltage performance and robustness in PowerFactory, reporting roughly a 69% reduction in carbon dioxide emissions and a renewable fraction near 77%(Hasan et al., 2026).

6. RECOMMENDATIONS FOR ACADEMIC AND ENGINEERING USE

For academic studies, the methodology section should clearly report the source of load data, the source of meteorological data, the project lifetime, the discount or interest rate, component costs, replacement costs, operation and maintenance costs, fuel prices, grid tariffs, dispatch strategy, reliability constraints, and sensitivity variables. Without these details, the reproducibility and credibility of HOMER results remain limited.

For engineering feasibility studies, measured site data should be preferred where possible. At least one year of high-resolution load and resource data improves confidence, while multiyear meteorological datasets help capture long-term variability. Component costs should reflect local market conditions, import taxes, installation costs, and maintenance capacity. Sensitivity analysis should include the variables that are most likely to change during the project lifetime: fuel price, battery cost, inflation, discount rate, load growth, resource variability, carbon price, and grid tariff.

For critical facilities such as hospitals and nursing homes, cost-minimizing configurations should be evaluated against explicit reliability standards. Redundancy, maintainability, spare parts, fuel logistics, battery replacement, and emergency operating modes must be considered. A system that appears optimal under annualized cost may not be appropriate if it lacks operational resilience during prolonged low-resource events.

For publication-quality manuscripts or book chapters, HOMER outputs should not be presented only as software screenshots. Tables should be reconstructed clearly, figures should be labelled in the language of publication, and results should be interpreted in relation to the assumptions. In addition, references should be updated to include recent studies that reflect

the current direction of the field: integrated LCA, Simulink validation, hydrogen and biogas systems, multicriteria decision-making, and sensitivity-based policy analysis.

7. CONCLUSION

HOMER Pro is a mature and widely used platform for the preliminary and comparative design of hybrid renewable energy systems. Its value lies in the integrated treatment of load profiles, renewable resources, dispatchable generators, storage technologies, economic parameters, emissions, optimization, and sensitivity analysis. The software is especially useful where many alternative system architectures must be screened under a consistent methodological framework.

Taken together with Part I, this chapter has shown that PV, wind, batteries, biogas, diesel backup, hydrogen storage, fuel cells, and grid interaction can be combined in many ways depending on resource availability and load requirements. Recent studies confirm that hybrid systems can reduce emissions, lower operating costs, improve reliability, and support local development, but they also show that no universal configuration is optimal for all locations. Site-specific data, transparent assumptions, and sensitivity analysis remain essential.

The nursing-home and hospital examples illustrate two key lessons. Hydrogen-supported systems can increase renewable autonomy and reduce fossil-fuel dependence, yet their cost must be carefully justified. Hospital-scale hybrid systems demonstrate that the least-cost option and the lowest-emission option may differ, making multicriteria interpretation necessary. For future studies, HOMER Pro should be used alongside dynamic simulation, life-cycle assessment, and decision-analysis tools whenever the objective extends beyond simple cost minimization.

REFERENCES

- Babu, M. Ku., & Ray, P. (2023). Sensitivity analysis, optimal design, cost and energy efficiency study of a hybrid forecast model using HOMER pro. *Journal of Engineering Research*, 11(2), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100033>
- Chisale, S. W., Eliya, S., & Taulo, J. (2023). Optimization and design of hybrid power system using HOMER pro and integrated CRITIC-PROMETHEE II approaches. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100005>
- Dursun, B., & Aykut, E. (2019). An investigation on wind/PV/fuel cell/battery hybrid renewable energy system for nursing home in Istanbul. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 233(5). <https://doi.org/10.1177/0957650919840519>
- Dursun, S., Aykut, E., & Dursun, B. (2021). Assessment of Optimum Renewable Energy System for the Somalia–Turkish Training and Research Hospital in Mogadishu. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(3), 54–67. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.245232.1140>
- Hasan, M. M., Refat, K. A., Ali, Md. F., Alam, M. S., Obaidi, O., Ali, M., Islam, M. K., & Imran, I. H. (2026). Design and techno-economic validation of a university campus hybrid microgrid using HOMER Pro and DIgSILENT PowerFactory. *Scientific Reports*, 16(1), 17248. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-45872-9>
- Hüner, B. (2025). Feasibility and environmental analysis of biogas-based hybrid energy system using HOMER pro software: A case study for Hatay. *Energy Conversion and*

Management, 326, 119480.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119480>

Khalil, L., Liaquat Bhatti, K., Arslan Iqbal Awan, M., Riaz, M., Khalil, K., & Alwaz, N. (2021). Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro. *Materials Today: Proceedings*, 47, S110–S115.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.06.054>

Khazraji, O. T., Hussein, M. J., & Janabi, S. (2026). Optimization of a hybrid energy system based on the ABC algorithm and HOMER software programming for Mustansiriyyah University. *Next Energy*, 12, 100668.
<https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100668>

Mbasso, W. F., Dzone Naoussi, S. R., Jacques Molu, R. J., Saatong, K. T., & Kamel, S. (2023). Technical assessment of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 100688.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100688>

Mojumder, Md. F. H., Islam, T., Rafi, Md. M. R., Asef, I. H., Hasan, M., & Chowdhury, N.-U.-R. (2025). Enhanced hybrid energy generation solutions for sustainable rural electrifications in Bangladesh: A system optimization and performance evaluation approach using HOMER Pro and MATLAB/Simulink. *Journal of Energy Storage*, 115, 115971. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115971>

Ross-Hopley, D., Husband, R., Ugwu, Lord, & Ibrahim, H. (2025). Opportunities for renewable energy in large Saskatchewan irrigation projects evaluated in HOMER pro software. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 7, 100095.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100095>

Tiam Kapen, P., Medjo Nouadje, B. A., Chegnimonhan, V., Tchuen, G., & Tchinda, R. (2022). Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the far north region of cameroon by using HOMER pro. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100988. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100988>

REGENERATIVE BRAKING AND ITS SIMULATION IN ELECTRIC VEHICLE PROPULSION SYSTEMS

Serdar KAŞIKCI¹

Ercan KÖSE²

1. INTRODUCTION

The growing use of electric vehicles (EVs) is driven not only by their ability to reduce environmental impacts but also by the advanced functionality and features that can be derived from their electric propulsion systems. One of the key features among these is regenerative braking.

Regenerative braking is a method used to increase the range of electric vehicles. When the driver takes their foot off the accelerator for any reason, the kinetic energy generated by the vehicle's own inertia and/or the slope of the road is converted into electrical energy to recharge the battery. The reason the term “braking” is used here is that, as the motor switches to its generator role to recharge the battery, the current flowing through the motor windings creates torque in the opposite direction, thereby producing a braking effect.

Optimizing the energy consumption and regenerative braking potential of electric vehicles depends on the accurate modeling of multidisciplinary subsystems as a whole. All of the vehicle's linear motion behaviors—such as acceleration,

¹ Lecturer, Çukurova University, Adana Vocational School, Department of Electrical and Energy, ORCID: 0009-0000-7807-6919.

² Assoc. Prof., Tarsus University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering ORCID: 0000-0001-9814-6339.

deceleration, and speed stability—are governed by the complex force interactions between the wheels, the road surface, and the chassis. In this context, the longitudinal motion equation—which defines the balance between the thrust force generated by the wheels and environmental forces such as aerodynamic drag, rolling resistance, and gravity—forms the basis of the simulation.

2. VEHICLE DYNAMICS

The maximum amount of kinetic energy an electric vehicle can recover during braking depends on the equations of motion along the vehicle's longitudinal axis and the friction force it can transfer to the road. Longitudinal vehicle dynamics examines a vehicle's acceleration capacity in the direction of travel, braking distances, and weight transfer.

2.1. Longitudinal Equations of Motion

The dynamics of acceleration or deceleration of a vehicle of mass m moving in a longitudinal direction depend on the balance between the total traction/braking force applied to the wheels and the circumferential resistance forces acting in the direction opposite to the direction of motion. The fundamental equation of motion is as follows:

$$m \cdot \frac{dv_x}{dt} = F_t - F_{resist}$$

Here,

v_x : The vehicle's linear velocity

F_t : The total longitudinal force between the wheels and the road

F_{resist} : The total resistive force acting against the vehicle

The total resistance force (F_{resist}) consists of three components:

1. *Tire rolling resistance (F_{tire}):* This arises from the deformation of the tire on the road surface and is calculated based on the relationship between the road slope angle (θ) and the normal force (F_z).

$$F_{\text{tire}} = C_R F_z = C_R mg \cos(\theta)$$

Here, C_R is the tire rolling resistance coefficient, m is the vehicle mass, and g is the acceleration due to gravity.

2. *Aerodynamic Drag Force (F_{air}):* Depending on the vehicle's frontal area (A_f) and drag coefficient (C_D), it creates a drag force proportional to the square of the speed.

$$F_{\text{air}} = \frac{1}{2} C_D A_f \rho_a (v_x + v_w)^2$$

Here, ρ_a is the air density and v_w is the wind speed.

3. *Grade Force (F_{grade}):* This is the force that acts as resistance when climbing an incline and, when descending, converts potential energy into kinetic energy through gravitational acceleration, thereby providing additional potential energy for recovery.

$$F_{\text{grade}} = mg \sin(\theta)$$

2.2. Wheel Slip Ratio and Tire-Road Friction Limits

The percentage difference between the vehicle's linear speed and the tire's rotational speed is called the wheel slip ratio. This ratio indicates how firmly the tire grips the road during braking or how much it spins during acceleration. The wheel slip ratio (S), for braking conditions, is defined as follows:

$$S = 1 - \frac{r_w \omega_{\text{wheel}}}{v_x}$$

Here, r_w is the tire rolling radius and ω_{wheel} is the wheel's angular velocity. The wheel slip ratio during acceleration is as follows:

$$S = 1 - \frac{v_x}{r_w \omega_{wheel}}$$

A slip ratio of 0 indicates no slippage or skidding, while a ratio of 1 indicates full lockup or full skidding. On dry asphalt, this ratio typically ranges between 0.15 and 0.20. A value below this range indicates that maximum braking capacity has not yet been reached, while a higher value causes the tire to lose traction and skid. Systems such as the anti-lock braking system (ABS) and traction control system (TCS) continuously monitor this ratio and work to maintain it within the 0.15–0.20 range.

The maximum longitudinal force (F_x) that a tire can transfer to the road is the product of the normal force (F_z) and the coefficient of friction (μ):

$$F_x = \mu(S)F_z$$

The coefficient of friction between the tire and the road is not linear but is a function of the tire's slip ratio. This relationship is modeled in vehicle dynamics using experimental measurement methods or the Pacejka formula (also known as the “magic formula”). The “magic formula” is an empirical formula developed by Hans B. Pacejka and is widely used.

$$\mu(S) = D \sin \cdot \{C \tan^{-1}[BS - E \cdot (BS - \tan^{-1}(BS))]\}$$

Here, B is the hardness, C is the shape, D is the peak value, and E is the curvature coefficient.

The friction limits based on road conditions are as follows:

Dry asphalt : $\mu_{max} \geq 0.85$

Wet asphalt : $\mu_{max} \approx 0.4 - 0.6$

Snow-covered road : $\mu_{max} \approx 0.2 - 0.3$

Icy road : $\mu_{max} \leq 0.1$

Table 1. Magic formula coefficients by road conditions (Shakouri, Ordys, Askari, and Laila, 2010).

Road Surface	B	C	D	E
Dry asphalt	10	1.9	1.097	0.97
Wet asphalt	12	2.3	0.82	1
Snow-covered road	5	2	0.3	1
Icy road	4	2	0.1	1

In the MATLAB/Simulink simulation presented in Chapter 7 of this study, in order to reduce the computational load of the vehicle dynamics simulation, physical limit values—such as the tire’s nominal vertical load, the peak longitudinal force it can generate, and the corresponding peak slip ratio—were used instead of directly entering the “Magic Formula” coefficients.

2.3. Energy and Power

In the Simulink environment, the physical power equations are solved to track the instantaneous energy flow and losses in the vehicle's mechanical structure:

Rate of Change of Kinetic Energy ($P_{\dot{x}}$):

$$P_{\dot{x}} = m\ddot{x}\dot{x}$$

Rate of Change of Potential Energy (P_g):

$$P_g = -mg\dot{Z}$$

Here, \dot{Z} is the velocity component along the vertical axis.

Aerodynamic Drag Power Loss (P_{drag}):

$$P_{drag} = -F_{drag}\dot{x} = -\left(\frac{1}{2}C_dA_fP_{abs}\frac{(\dot{x} - \omega_x)^2}{R_{air}T}\right) \cdot \dot{x}$$

Here, P_{abs} represents absolute air pressure, ω_x represents wind speed, R_{air} represents the gas constant, and T represents ambient temperature.

3. MOTOR DRIVING TECHNIQUES

The EV traction motor is the most critical electromechanical component that enables both the propulsion and deceleration of the vehicle. The choice of motor and drive topology directly affects the vehicle's regenerative braking capacity. The motor and drive methods commonly used in EV applications are examined below.

3.1. Permanent Magnet DC (PMDC) Motor

Traditional brushed and DC motors (PMDC) serve as a good starting model for understanding the regeneration mechanism through linear equations, thanks to their simple structure and chopper circuits. Permanent magnets are used in their stator windings instead of excitation windings. The basic voltage equation for a PMDC motor is:

$$V_t = E_b + I_a \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

Electromagnetic torque produced by the motor:

$$T_e = K_t \cdot I_a$$

Back emf:

$$E_b = K_e \cdot \omega_m$$

Here:

V_t : Motor terminal voltage

E_b : Back emf

I_a : Armature current

R_a : Armature resistance

L_a : Armature inductance

K_t : Torque constant

K_e : Voltage constant

ω_m : Motor angular speed (rad/s)

In drive mode, the battery voltage is greater than the back-emf ($V_t > E_b$), and current flows from the battery to the motor. During braking, the terminal voltage drops. Since the vehicle continues to move due to its inertia during this time, a back-emf continues to be generated in the windings. When the back-emf in the windings is higher than the terminal voltage ($E_b > V_t$), the armature current reverses direction, and the motor acts as a generator, causing current to flow toward the battery.

3.2. Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

PMSMs are widely used in modern vehicle propulsion systems due to their high-power density, brushless design, low maintenance costs, and high torque stability across a wide speed range (Jamadar and Jadhav, 2021).

PMSMs are driven using field-oriented control (FOC). The FOC architecture reduces three-phase AC quantities to a two-axis rotating reference frame (d-q axes) using the Clarke and Park transformations, enabling the flux and torque components to be controlled independently of one another, just as in a separately excited DC motor. In a PMSM, the electromagnetic torque (T_e) is expressed by the following equation:

$$T_e = \frac{3}{2}P[\lambda'_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

Here, P is the number of pole pairs, λ'_m is the rotor magnetic flux, L_d and L_q are the d-axis and q-axis winding inductances, respectively, and i_d and i_q are the d-axis and q-axis currents, respectively.

Transition Dynamics to Generator Mode:

1. *Traction Mode*: To generate positive torque ($T_e > 0$), the current is maintained at a positive reference; current and power flow from the battery to the motor.

2. *Regenerative Mode*: When the driver presses the brake pedal, the speed PI controller generates a negative torque demand and the controller pulls the current reference into the negative region ($i_q^* < 0$). This reverses the torque direction, and current flows from the inverter to the battery.

To achieve maximum torque with minimum copper loss in operating regions below the base speed, the maximum torque per ampere (MTPA) algorithm is used to calculate the optimal i_d and i_q current references. When the vehicle speed increases and the back-emf generated by the motor approaches the battery terminal voltage limit, a negative i_d current is applied to artificially weaken the motor's rotor flux, thereby preventing the current control loops from saturating. To prevent the high back-emf generated at high speeds from damaging the semiconductor switches on the inverter and the battery busbar, the dynamic response speed of the field weakening controller must be designed on the order of milliseconds (Teasdale, Ishaku, Amaechi, Adelusi and Abdelazim, 2024).

3.3. Brushless Direct Current Motor (BLDC)

The advantages of BLDC motors are their high-power density and the fact that they are easier to control than PMSMs. However, they exhibit high torque ripple and low efficiency at high speeds. For this reason, they are not typically chosen as the

main motor in modern electric passenger cars (Tesla, BYD, Porsche, etc.). Nevertheless, they play a very significant role in the electric vehicle ecosystem. They are widely used in electric bicycles, e-scooters, three-wheeled light-duty vehicles (mopeds), and as auxiliary systems in automobiles (electric power steering pumps, air conditioning compressors, windshield wiper motors, and radiator fans).

They generate a trapezoidal back-emf in the stator windings and are typically controlled via 6-step commutation using Hall sensors that detect the rotor's position. During regenerative braking, the driver reduces the PWM duty cycle; this allows the back-emf generated by the motor to exceed the battery voltage, causing the current to flow back to the battery as a charge through the inverter diodes.

3.4. Synchronous Reluctance Motor (SynRM)

SynRMs, which have no magnets or windings in their rotors, generate torque based on the principle of magnetic reluctance. The absence of magnets eliminates the risk of demagnetization at high temperatures and provides the ability to weaken the magnetic field at high speeds, ensuring safe regenerative braking performance. Although the absence of magnets in the rotor provides cost and sustainability advantages compared to PMSMs and BLDCs, the power density is lower. Additionally, control complexity is higher.

In SynRM motors, the greater the difference between the d-axis (lowest reluctance) and the q-axis (highest reluctance), the higher the torque produced. The electromagnetic torque equation for SynRM is as follows:

$$T_e = \frac{3}{2}P(L_d - L_q)i_d i_q$$

Key Conclusions to Be Drawn from the Equation:

Only reluctance torque is present: The equation does not include the magnetic flux term found in PMSMs. Torque depends on the difference $L_d - L_q$.

Saliency Ratio: To achieve maximum torque, motor designers strive to keep the L_d/L_q ratio (saliency ratio) as high as possible through rotor barrier designs.

Current Control: To achieve maximum torque, the product of $i_d \times i_q$ must be optimized (typically, a current vector angle of 45° is selected).

To increase the power density of SynRM motors, magnet-assisted synchronous reluctance motors are produced by adding a very small quantity of magnets or low-cost magnets. Today, these motors—which are derivatives of SynRM—are used as drive motors in some models from manufacturers such as Tesla and BMW.

3.5. Induction Motor (IM)

In induction motors, regeneration occurs spontaneously when the mechanical speed of the motor's rotor (ω_r) is higher than the synchronous speed (ω_s). In this regime, the slip frequency is negative:

$$\omega_{s1} = \omega_e - \omega_r < 0$$

A negative slip reverses the direction of the current induced in the rotor windings, and the machine begins to feed energy back into the grid or the DC bus. In classic scalar voltage-to-frequency (v/f) control, the speed error loop generates a negative slip signal, driving the motor into the generator region.

Thanks to their brushless and magnet less design, they are mechanically durable. There is no risk of performance loss due to high temperatures. They have good field-weakening capabilities at high speeds. They also offer significant advantages in terms of

cost and sustainability. Their main drawbacks are low power density and poor efficiency in stop-and-go city traffic (at low speeds).

They were used as the main motor in Tesla's early models (Model S and Model X). Today, they are generally used as auxiliary motors in all-wheel-drive vehicles.

Table 2. Comparison of Regeneration in Different Motor Types (Liaw et al., 2019; Teasdale et al., 2024)

Motor Type	Power Density	Control Complexity	Field-weakening capability	Regeneration potential
PMDC	Low	Very Low	None	Low
PMSM	Very high	High	Medium	Very high
BLDC	High	Medium	Low	Medium
SynRM	Medium	Very high	Very high	High
IM	Medium	High	High	High

4. POWER ELECTRONICS

In electric vehicles, power electronics components manage the bidirectional energy flow between the battery and the motor. During regenerative braking, the inductance of the motor windings and the inverter semiconductors act together like a synchronous boost converter. When the motor rotates at low speeds, the back-emf (E_b) it generates is less than the battery terminal voltage (V_t). In this case, it is physically impossible to supply current to the battery via a direct connection. To address this, the inverter's lower MOSFETs are turned on to short-circuit the motor windings, thereby storing current in the inductance. Then, by turning these switches off, the polarity of the inductor is reversed, and the stored energy is discharged into the battery. Thus, the winding inductance acts as the coil of a step-up converter, charging the low-voltage back-emf to the high-voltage

battery terminal. The differential equations for the system's two different states are as follows:

$$\text{Conduction State} : E_b = L_a \frac{di_L}{dt} + R_a i_L$$

$$\text{Cut-Off State} : E_b + L_a \frac{di_L}{dt} = V_t + R_a i_L$$

Here, i_L is the coil current.

4.1. Synchronous Rectification

When analyzing the electrical behavior of brushed DC or multiphase AC motors in regenerative mode, the process of storing mechanical energy from the wheels in the winding inductance (L_a) and transferring it to the battery is fundamentally a synchronous boost converter mechanism. In BLDC or PMSM machines, synchronous rectification is achieved by switching the upper and lower MOSFETs of the inverter bridge in anti-phase. In conventional diode-based rectification, the current flows through the body diodes in parallel with the MOSFETs. The forward voltage drop of these body diodes is around $V_F \approx 0.7 - 1.2$ V, which causes high conduction losses. In the synchronous rectification method, the corresponding MOSFETs are actively driven into conduction by a gate trigger signal during the periods when the diodes conduct. Consequently, the current flows through the extremely low on-resistance of the MOSFET ($R_{DS(on)} \approx 2 - 10$ m Ω). This significantly reduces thermal loads and enhances efficiency.

4.2. DC Bus Overvoltage

One of the most critical hazards faced by power electronics designers during regenerative braking is the uncontrolled rise of the DC bus voltage. This phenomenon occurs when a decelerating or abruptly stopped motor acts as a generator, feeding its kinetic energy back to the power supply as electrical

energy, thereby causing a sudden spike in the motor supply voltage.

When the driver takes their foot off the accelerator pedal and applies the brakes suddenly, the inverter controller abruptly reduces the motor PWM duty cycle from value D_1 to a lower value, D_2 . Due to mechanical inertia, the motor speed cannot drop instantly, and the back-emf in the windings remains high. During this transient regime, the elevated voltage (V_{BST}) induced in the DC bus is calculated using the following equation:

$$V_{BST} = K \frac{D_1}{D_2} V_{VM}$$

Where K is a coefficient depending on the electrical time constants of the motor, and V_{VM} is the nominal motor supply voltage.

For instance, if the duty cycle is abruptly reduced from 90% to 30%, the DC bus voltage rises to three times the nominal supply voltage. If the battery management system (BMS) cannot absorb this high current or if the battery connection is disconnected due to a fault, the regenerative current can only charge the DC bus decoupling capacitors. The capacitor voltage rises rapidly, exceeding the maximum drain-source voltage limit (V_{DS}) of the inverter MOSFETs and leading to permanent burnout of the semiconductors due to avalanche breakdown. To mitigate this risk, two primary protection methods are implemented:

Hysteresis-Controlled Braking Resistor: When the DC bus voltage exceeds a safe threshold, a braking transistor is driven into conduction, dissipating the excess energy as heat across a ballast resistor.

TVS Zener Clamping: In low-power systems, transient voltage suppressor (TVS) diodes connected in parallel across the bus absorb overvoltage spikes.

5. BATTERY MODELING

Regeneration efficiency depends not only on the motor drive but also on the instantaneous charge acceptance capacity of the battery. For safe braking, the BMS must estimate the instantaneous state of charge (SoC) with high accuracy.

To preserve the battery's charge acceptance capability and electrochemical health during regenerative braking, a high-fidelity electro-thermal model must be utilized. Within the Simscape environment, the battery cell is modeled using the open-circuit voltage (V_{oc}), ohmic internal resistance (R_0), and parallel $R_p - C_p$ pairs (RC branches) that simulate the chemical polarization and diffusion delays of the battery. For a single-RC branch Thévenin model, the terminal voltage (V_t) is defined by the following set of differential equations:

$$V_t = V_{oc}(SOC, T) - I_{batt}R_0(SOC, T) - V_p$$
$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{V_p}{R_p C_p} + \frac{I_{batt}}{C_p}$$

Where V_p is the voltage drop across the polarization capacitor.

5.1. SOC Estimation Using Coulomb Counting and Temperature Effect

The battery's current state of charge (SoC) is calculated as the integral of the battery current over time:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{3600 \cdot C_{rated}} \int_{t_0}^t \eta_c \cdot I_{batt}(\tau) d\tau$$

Here, C_{rated} is the nominal capacity of the battery (Ah), the charge/discharge coulombic efficiency coefficient, and I_{batt} is the current flowing through the battery (the charge current is considered negative, and the discharge current is considered

positive). As temperature (T) decreases, the battery's internal resistance (R_0) and polarization resistances (R_p) increase exponentially, causing the terminal voltage to rapidly reach the maximum charge limit during regeneration and resulting in the premature termination of the charge current.

5.2. Electrothermal Energy Losses

The instantaneous heat generation rate (\dot{Q}_{gen}) in the battery is the sum of two main components: ohmic resistance losses and entropic heat:

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = I_{\text{batt}}^2 R_0(\text{SOC}, T) + \frac{V_p^2}{R_p} + I_{\text{batt}} \cdot T \cdot \frac{dOCV}{dT}(\text{SOC})$$

Here, $\frac{dOCV}{dT}$ is the entropic coefficient for the battery chemistry. The change in cell temperature is modeled using the convective cooling coefficient (k) and the cell surface area (A):

$$M_{\text{th}} \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{gen}} - k \cdot A \cdot (T - T_{\text{env}})$$

Here, M_{th} is the thermal mass of the battery.

5.3. Power Limiting and Lithium Plating Protection

When lithium-ion batteries are charged at high currents—especially at low temperatures or high SoC levels—lithium ions cannot be incorporated into the anode structure, resulting in the formation of a metallic lithium coating on the anode surface. This condition permanently reduces battery capacity and leads to internal short circuits and thermal runaways. To preserve battery health and prevent lithium plating during sudden high-current charging, the BMS must calculate an instantaneous power limit. To prevent this hazard, the power limit algorithm uses a Recursive Least Squares (RLS) estimator to instantly calculate the battery's dynamic internal resistance (R_{int}). Based on the estimated internal resistance value, the maximum safe

charging/regeneration current ($I_{\text{regen,max}}$) that the battery can handle is limited as follows:

$$I_{\text{regen,max}} = \frac{V_{\text{max_safe}} - V_{\text{oc}}(\text{SOC}, T)}{R_{\text{int}}}$$

Here, ($V_{\text{max_safe}}$) is the battery's overcharge protection threshold voltage. The brake control unit (ECU) instantly limits the maximum braking torque that the motor can generate based on this ($I_{\text{regen,max}}$) value. (*Method of Calculating Battery Coulomb Efficiency Accurately under Different Temperatures*, 2016; Naseri, Nordi, Spiliotopoulos and Schaltz, 2026).

6. BRAKE BLENDING

The braking design of an electric vehicle must ensure driving safety in accordance with international automotive standards. In this regard, the ECE R13H regulation (or ECE R13 for heavy-duty vehicles) published by the United Nations Economic Commission for Europe imposes strict geometric constraints on the braking force distribution of vehicles. The primary objective of the regulation is to absolutely prevent the rear wheels from locking up before the front wheels during braking; since early locking of the rear axle causes the vehicle to suddenly lose directional stability and skid. In accordance with ECE R13H, the front-to-rear axle brake force distribution ratios (f_x/f_r) must remain within the following limits, depending on the road friction coefficient (μ):

$$F_{bf} \leq \frac{z + 0.07}{0.85} \cdot \frac{G}{L} \cdot (b + z \cdot h_g)$$
$$F_{br} = G \cdot z - F_{bf}$$

Here, F_{bf} represents the front brake force, F_{br} represents the rear brake force, G represents the vehicle weight, z represents

the deceleration rate, L represents the wheelbase, b represents the distance from the center of gravity to the rear axle, and h_g represents the height of the center of gravity.

In accordance with the regulations, on all surfaces where the road friction coefficient (μ) is between 0.2 and 0.8, the front axle's adhesion curve (k_f) must remain above the rear axle's adhesion curve (k_r):

Since regenerative torque can only be applied to the axle to which the motor is connected, the brake blending controller must dynamically adjust the front/rear braking distribution ratio (β) within these limits (Gao, Ruan, Du, Walker, and Zhang, 2019; Lv, Zhang, Li, and Yuan, 2014).

The greatest engineering challenge in brake blending strategies is striking a balance between the goal of maximum energy recovery and directional stability and braking comfort. Particularly on slippery surfaces or while cornering, regenerative braking torque can increase the wheel slip ratio, thereby reducing lateral force capacity. To solve this complex multi-objective optimization problem, advanced control approaches are gaining prominence in the modern literature (reinforcement learning-based approaches, fuzzy logic optimized with particle swarms, and evolutionary networks with bat algorithms) (Yildirim, n.d.).

6.1. Brake Architectures

In parallel regenerative braking, the mechanical hydraulic brakes and the electric motor operate in parallel. When the driver presses the pedal, the mechanical brakes directly apply pressure to the discs; the motor engages only to fill the additional torque gap in the mechanical system. The setup is simple and inexpensive, but energy recovery efficiency is low. In series (cooperative) braking, there is no mechanical connection between the brake pedal and the hydraulic brake cylinders. The driver's

braking demand is measured by electronic sensors; the brake blending unit primarily utilizes the motor's regenerative capacity. Any torque gap that the motor cannot cover electrically is mechanically compensated by the hydraulic unit within milliseconds. Energy recovery efficiency is higher.

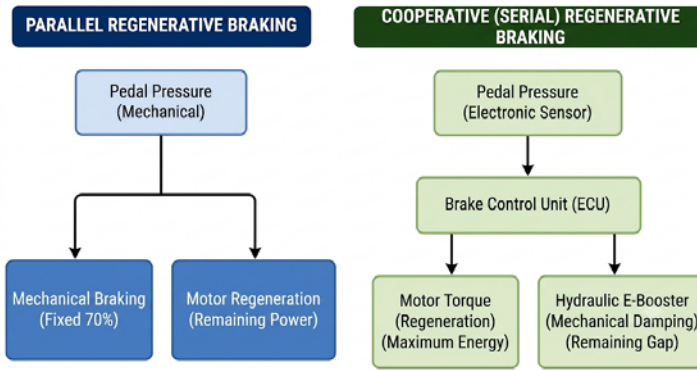


Figure 1. Parallel and series regenerative braking.

6.2. Jerk Control and Pedal Emulators

The biggest problem in terms of driver comfort is the jerk that occurs during transitions between engine braking torque and hydraulic brake pressure. To prevent this jerk, the jerk rate—which is the derivative of longitudinal acceleration—must be limited. A successful blending controller must keep the jerk rate during torque transition processes strictly within the following limit (Li, Wang, Huang, & Li, 2024):

$$\text{Jerk} = \frac{d^3x}{dt^3} < 0.15 \text{ m/s}^3$$

In addition, mechanically decoupled brake pedals are used in series braking systems to preserve pedal feel. Magnetorheological (MR) fluid-based haptic pedal emulators are being designed to provide the driver with a traditional pedal feel. The MR emulator modulates the fluid's flow pressure within the 0 – 100 kPa range by varying the coil current between 0 – 2 A,

thereby replicating the pedal force-stroke sensation that perfectly matches the driver's input (Zhang et al., 2013).

7. MATLAB/SIMULINK SIMULATION

A fully closed-loop model of an electric vehicle with a cooperative (serial) braking algorithm in MATLAB/Simulink was created based on the logic shown in Figure 2. In the model, the virtual driver's throttle and brake responses are determined according to the driving scenario. The throttle (AccelCMD) signal from the virtual driver is fed to the ref+ input of the PWM block, while the brake (DecelCMD) signal is processed by the series braking control algorithm in the MATLAB function block and then fed to the ref- input of the PWM block. The PWM block generates a PWM signal for the H-bridge based on the information received from the reference inputs. If the serial brake control algorithm determines that mechanical braking is required, the mechanical braking signal (P_friction) output from the MATLAB function block is sent directly to the disc brakes within the mechanical subsystem. A PMDC motor is used as the traction motor in the model.

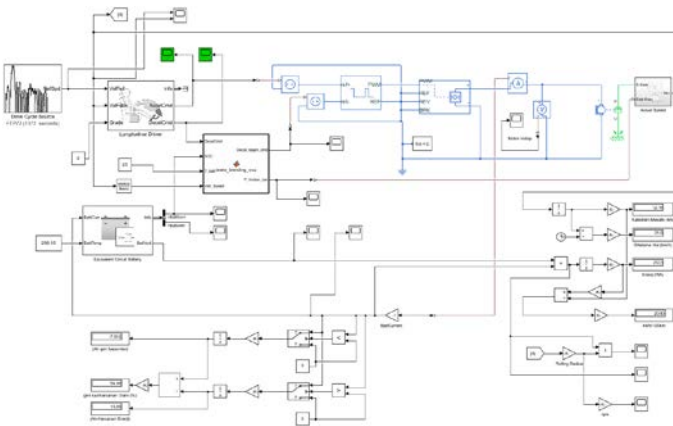


Figure 2. Simulink model of an electric vehicle with regenerative braking.

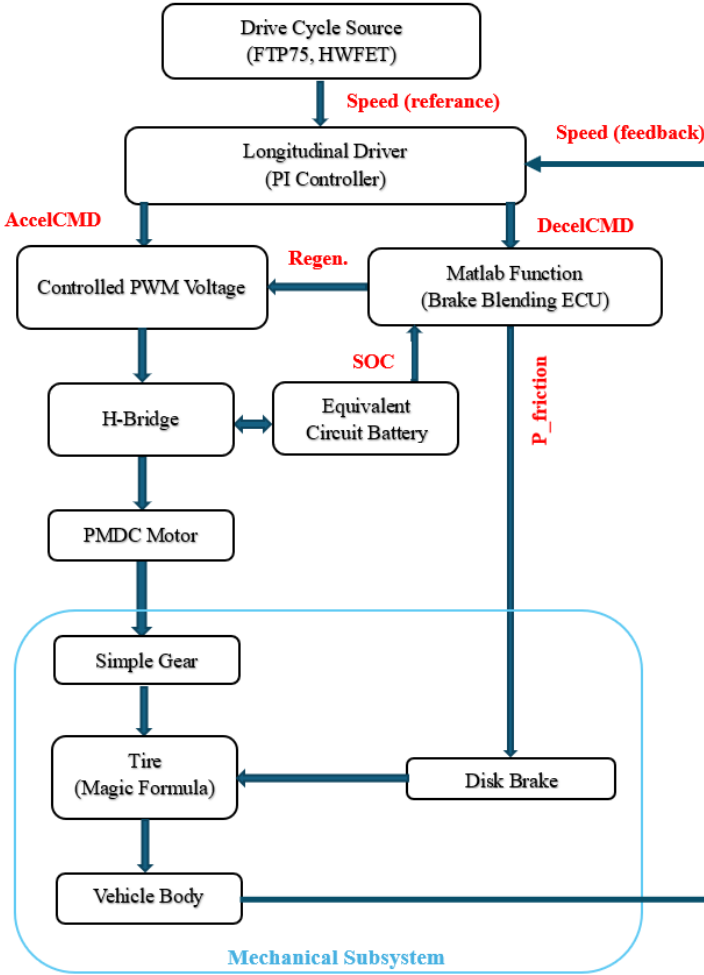


Figure 3. General block diagram of the electric vehicle simulation model developed

7.1. Configuring Block Parameters

7.1.1. Drive Cycle Source

The driving cycle generates the vehicle's longitudinal target speed profile over time in automotive simulations. It provides the vehicle with a reference speed profile for the

standardized evaluation of fuel economy, emissions testing, and overall system performance. For example, the Artemis Highway Cycle is a standardized laboratory test cycle developed to simulate real-world highway driving conditions for vehicles. Created as part of a European Union-funded project, this cycle is used to measure vehicles' emissions and fuel consumption values (Liu et al., 2017). Federal Test Procedure (FTP) is a standard test cycle in the U.S. automotive industry. The Artemis Highway Cycle simulates high-speed highway driving while also simulating a road with FTP-72 stop-and-go city traffic.

The speed signal generated by this block is fed as a reference speed input to the virtual driver block (Longitudinal Driver) that controls the vehicle. The Artemis Highway Cycle at 130 km/h, as well as the FTP-72 and WLTP Class 1 driving cycles, were used to test our model.

7.1.2. Longitudinal Driver Block

The longitudinal driver block is a speed-tracking controller that generates throttle and brake commands to minimize the error between the reference driving cycle and the vehicle's current speed. This block incorporates a Proportional-Integral (PI) control structure in the background. The parameters in this block determine when and how much to press the accelerator (AccelCmd) and brake (DecelCmd) pedals so that the "virtual driver" in the simulation can track the reference speed. This block operates in the background according to the following mathematical equation:

$$y = K_{ff} \frac{v_{ref}}{v_{nom}} + K_p \frac{e_{ref}}{v_{nom}} + \int \left(K_i \frac{e_{ref}}{v_{nom}} + K_{aw} e_{out} \right) dt + K_g \gamma$$

Nominal Vehicle Speed (v_{nom}): The driver block generates pedal commands between 0 and 1 to determine how much to apply to the accelerator and brake. The reference speed (v_{ref}) and speed error (e_{ref}) values are normalized by dividing

them by the v_{nom} value. This allows the controller gains (K_p ve K_i) to be scaled independently of the vehicle's absolute speed limits.

Feedforward (K_{ff}): This is the amount of throttle the driver applies based on the target speed. For example, let's say our nominal speed (v_{nom}) is 100 m/s and our K_{ff} value is 0.5. In this case, if our target speed (v_{ref}) is 40 m/s, the throttle must be opened by 0.2 [$0.5 \times (40/100) = 0.20$]. The remaining 0.8 of the power demand is handled by the feedback terms (K_p, K_i).

Anti-windup (K_{aw}): When the vehicle is climbing a steep hill, the driver may need to keep the accelerator pressed at 100% (AccelCmd=1) for an extended period. During this time, because the vehicle is struggling and cannot reach the target speed, the integral term can mathematically “wind up” uncontrollably in the background. The K_{aw} term is used to limit this windup. This allows the virtual driver to release the throttle without delay once the target speed is reached or when a sudden deceleration cycle begins.

Error Filter Delay (τ_{err}): The time constant of the low-pass filter that filters the speed error before sending it to the PI controller.

Saturation Error (e_{out}): A signal indicating the difference between the mathematical target of the driver command and the actual physical limits of the pedal.

$$e_{out} = y_{sat} - y$$

y: The raw output signal generated by the controller

y_{sat} : It is the saturated form of the y signal.

When the vehicle has not reached the pedal limit, the raw demand equals the saturated demand. Therefore, the saturation error is zero, and the integration proceeds normally. However, if

the pedal is locked at 100% but the engine power is insufficient, and the controller calculates the throttle demand to be, say, 150% to compensate for the error, the saturation error becomes -0.5. This negative value is multiplied by K_{aw} in the equation and added to the integral. In this case, a negative value is introduced into the integral expression to prevent the integral value from becoming excessively large.

Road Slope Ahead Feed-Forward Gain (K_g): A term used to counteract gravity, enabling the virtual driver to accelerate before reaching road inclines (without experiencing a loss of speed). A standard PI controller waits for a speed error to occur; however, this term ensures that the accelerator is applied in advance based directly on the road slope angle to prevent a speed error from occurring. For example, setting this value to 1% means that if the road's gradient increases by 1 degree, the virtual driver will press the gas pedal 1% harder without waiting for a speed error to occur.

Road Grade Angle (γ): This is a physical input that expresses the road's instantaneous vertical grade angle in degrees. It directly transmits information about uphill or downhill gradients—which vary according to the road profile—to the controller. This angle value is multiplied by the K_g gain and applied directly to the driver's accelerator or brake pedal as a preventive intervention.

Table 3. Driver controller parameters used.

Parameter	Settings
Longitudinal Control Type	PI
Proportional Gain (K_p)	40
Integral Gain (K_i)	16
Velocity Feed-forward (K_{ff})	0.2
Grade Angle Feed-Forward Gain (K_g)	0.02
Nominal Vehicle Speed (v_{nom})	40
Anti-Windup Gain (K_{aw})	1
Error Filter Time Constant-tauerr (s)	0.01

7.1.3. Brake Blending) Block

In some cases, regenerative braking alone is not sufficient to bring the vehicle to a complete stop, or it poses a risk of overcharging if the battery is already 100% full. For this reason, a program for the brake blending control unit (ECU) was developed using a MATLAB Function block.

The brake blending block transfers the braking demand from the driver to the disc brake block via regenerative braking. The enormous kinetic energy generated as the vehicle decelerates from high speeds cannot be fully recovered within the limits of regeneration (the maximum torque of the motor in generator mode and the maximum charging current limits of the battery). If the limits in these blocks are not updated, the motor windings may be exposed to excessive current during high-speed braking, or the mechanical disc brakes may prove insufficient, thereby dangerously increasing the vehicle's stopping distance. For this reason, the limits of the brake blending algorithm and the maximum torque capacities of the mechanical disc brakes have been determined based on high-speed driving scenarios.

Software Requirements:

- Maximum braking torque the motor can generate: 100 Nm
- Total torque requirement at full pedal depression: 150 Nm
- If the State of Charge (SoC) is above 90%, regeneration is disabled to protect the battery.
- At temperatures above 45 °C, regeneration is disabled to preserve battery health.
- Regenerative braking is disabled at speeds below 5 m/s.
- Operation of the serial braking distribution algorithm: If the total braking torque requirement exceeds the regenerative braking torque the motor can produce, a

signal is generated for the disc brake. If the regenerative braking torque alone is sufficient for braking, no signal is generated for the disc brake.

7.1.4. Power Electronics Block

In the MATLAB/Simulink simulation for this study, the Controlled PWM Voltage and H-Bridge blocks from the Simscape library were used to model the vehicle's motor drive and regeneration dynamics. The physical operating principles of the power electronics layer and its integration into the model are explained below under three headings.

H-Bridge and Differential Voltage Control:

An H-bridge circuit is a power electronics topology consisting of four switching elements (typically MOSFETs) used to control the speed and direction of rotation of a DC motor. In the simulation model, the Controlled PWM Voltage block was chosen to drive the H-bridge. This block calculates the voltage pulse width (duty cycle) required by the motor based on the acceleration and deceleration requests received from the virtual driver. The calculation is based on the differential voltage difference at the reference inputs of the H-Bridge block.

$$V_{ref} = V_{ref+} - V_{ref-}$$

In our model, the acceleration command from the virtual drive is connected to the ref+ port, while the regenerative braking command from the brake control ECU is connected to the ref- port. When the driver presses the accelerator, V_{ref} becomes positive and the motor propels the vehicle forward.

Regenerative Braking and Its Boosting Effect:

When the "Regenerative Braking" parameter is enabled in the H-Bridge block of the model, the system is ready to operate the motor as a generator. When the driver applies the brakes, the

throttle command is set to zero ($V_{ref+} = 0$), and the ECU applies a braking voltage to the ref port. In this case, the differential voltage becomes negative ($V_{ref} < 0$). The H-Bridge reduces the average terminal voltage (V_t) applied to the motor to a value below the counter-EMF generated by the motor's current speed ($E_b > V_t$). This potential difference, combined with the winding inductance ($L_a \cdot \frac{di}{dt}$), causes the circuit to behave like a boost converter. The current reverses direction, flowing from the motor back to the battery, and the kinetic energy is recovered as electrical energy.

Simulation Stability:

In real power electronics circuits, PWM signals enable switching at very high frequencies. Attempting to calculate each of these switching events with a precision of one-millionth of a second using the Simulink solver extends the simulation time to hours and causes the solver to lock up. To overcome this issue, the simulation mode for the Controlled PWM Voltage and H-Bridge blocks has been set to "Averaged." In this mode, instead of generating high-frequency square waves (pulses), the block produces a constant and smooth average voltage ($V_{out} = V_t \cdot D$) proportional to the calculated duty cycle. This method, which assumes that the current in the motor windings is steady-state, significantly reduces simulation runtime and improves numerical stability without compromising the system's energy flow or regeneration accuracy.

7.1.5. Motor Block

A PMDC motor was chosen for the simulation because the fundamental electromechanical dynamics (back-emf and torque-current relationship) can be observed more clearly through linear equations, due to the simplicity of the H-bridge driver design, and because of the low computational load of the simulation.

The PMDC motor's electrical ports (+, -) are connected to the output of the H-bridge, its mechanical C port is connected to the reference ground, and its R (Rotor) port is connected to the transmission components (Simple Gear).

Table 4. PMDC motor parameter settings.

Parameter	Settings
Armature inductance (μH)	12
Nominal output power (kW)	150
Nominal speed (rpm)	10000
Nominal voltage (V)	500
Rotor inertia (kgm^2)	0.01

7.1.6. Equivalent Circuit Battery Block

It is a dynamic power source that supplies all the electrical power required by the motor and the driver. To maintain the system's nominal voltage level when the motor's speed and power are increased, the battery pack's nominal voltage must be compatible with the nominal voltage of the H-bridge and the DC motor. If the battery voltage remains low, the current drawn to meet the motor's high-power demand will rise excessively. High current draw causes a significant voltage drop across the series internal resistance (R_0) in the equivalent circuit. This situation dramatically reduces the battery's terminal output voltage, thereby lowering the motor driver's supply voltage and preventing the motor from reaching high speeds in a stable manner.

Table 5. Equivalent circuit battery parameter settings.

Parameter	Settings
Open circuit voltage table data, $E_m(V)$	[378.4536 379.4688; 384.1884 384.9768; 388.8972 390.4524; 393.0444 394.9020; 396.8136 398.4012; 400.9068 401.9112; 409.7196 411.2424; 418.5324 420.6060; 428.7600 430.4772; 440.2512 440.8668; 452.7792 452.8440]
Series resistance table data, $R_o(\Omega)$	[0.030909 0.024300; 0.029802 0.024206; 0.030458 0.024639; 0.030337 0.024596; 0.029588 0.024183; 0.028927 0.023750; 0.028884 0.024063; 0.029475 0.024419; 0.028922 0.024432; 0.030520 0.024027; 0.031327 0.024033]
State of charge breakpoints, SOC_BP	[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]
Battery capacity table (Ah)	[200 200]
Initial battery capacity (Ah)	150
Network resistance table data, $R_1(\Omega)$	[0.010342 0.0012244; 0.0067316 0.0011396; 0.0051156 0.0012661; 0.0043447 0.0012265; 0.0038826 0.0011163; 0.0034226 0.0009968; 0.003346 0.0011458; 0.0033222 0.001345; 0.0033201 0.0013091; 0.0032886 0.0010986; 0.0028114 0.0010309]
Network capacitance table data, $C_1(F)$	[2287.7 11897; 6122 24515; 18460 42098; 20975 44453; 15254 33098; 10440 24492; 13903 32975; 16694 40007; 15784 35937; 12165 26430; 9118 24795]

7.1.7. Mechanical Subsystem

A. Vehicle Body) Block

This block is the primary mechanical center for calculating the vehicle's mass inertia and aerodynamic losses. Parameter settings such as vehicle mass, number of wheels per axle, vehicle center of gravity, gravitational acceleration, frontal area (A), and drag coefficient (C_d) are configured in this block. Figure 4 shows the parameter screen. The force signals applied to the model's front and rear axles are obtained from the vehicle

body block. The vehicle's speed output is also obtained from this block. Additionally, wind drag (σ) and road gradient data can be provided as inputs to this block.

The chassis block in the Simscape library calculates longitudinal dynamics using the following equation, based on the inputs of mass (m), pitch angle (β), and wind speed (W):

$$m\dot{V}_x = F_x - F_d - mg\sin\beta$$

Main		
> Mass	1200	kg
> Number of wheels per axle	2	
> Horizontal distance from CG to front axle	1.4	m
> Horizontal distance from CG to rear axle	1.6	m
> CG height above ground	0.5	m
Externally-defined additional mass	Off	
> Gravitational acceleration	9.81	m/s ²
Negative normal force warning	Off	
Drag		
> Frontal area	2.2	m ²
> Drag coefficient	0.26	
> Air density	1.18	kg/m ³

Figure 4. Vehicle body parameters window.

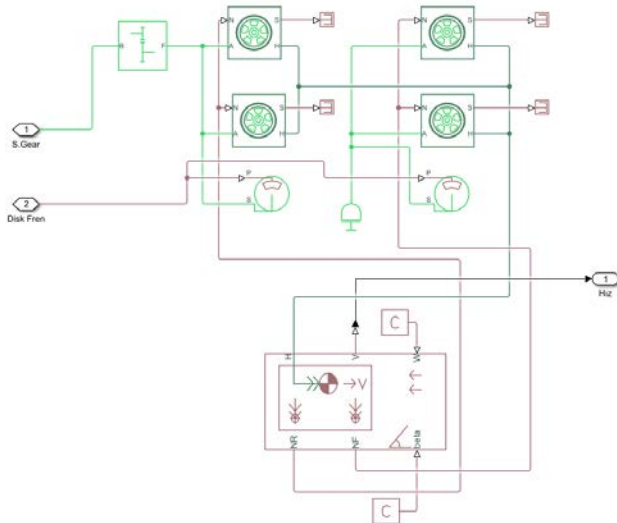


Figure 5. Mechanical subsystem.

B. Simple Gear Block

This unit transmits the engine's angular velocity and torque to the wheels at a specific gear ratio (N).

Follower (F) to base (B) tooth ratio (NF/NB): Represents the gear reduction ratio (N) used to transmit the rotational speed of the motor shaft to the wheel shaft. In the real world, mass-produced electric passenger vehicles typically use the following single-speed gear ratios to optimize their motors' high-speed capacity (8,000–16,000 rpm):

Tesla Model 3 : 9.00:1

Nissan Leaf : 8.192:1

Chevrolet Bolt : 7.05:1

The relationship between a vehicle's linear velocity (V_x), the engine's angular velocity (w_{motor}), the tire radius (r_w), and the gear ratio is calculated as follows:

$$V_x = \frac{w_{motor} \times r_w}{N}$$

For example, if we assume that the engine speed is 10,000 rpm (1047.2 rad/s), the tire rolling radius is 0.3 m, and the gear ratio is 8, then the vehicle's linear speed is:

$$V_x = \frac{1047.2 \times 0.3}{8} = 39.27 \frac{m}{s} = 141.37 \frac{km}{h} \text{ olur.}$$

A vehicle's drive torque is calculated by multiplying the engine's output torque by the gear ratio.

$$T_{whell} = T_{motor} \times N$$

C. Tire (Magic Formula) and Disc Brake

The vehicle model has front and rear axles. There are two wheels on each axle, for a total of four wheels.

Normal Force Connection (N): The N ports of the front axle wheels are connected in parallel to the front axle normal force (NF) port on the vehicle body block. Similarly, the N ports of the rear axle wheels are connected to the rear axle normal force (NR) port on the vehicle body block.

Drive Mechanism (A): The A ports of the rear axle wheels are connected in parallel to the follower (F) output of the gearbox (Simple Gear) block. The A ports of the front wheels are connected in parallel to the free-rotating end block. In this way, the vehicle is modeled as rear-wheel drive.

Braking System: The braking signal from the disc brake port is distributed in parallel to both the front and rear axle wheels.

Parameterization Method: This option determines how the longitudinal traction force (F_x) generated by the tire's interaction with the road surface is calculated. Pacejka's "Magic Formula" theory uses four dimensionless coefficients—B, C, D, and E—which are fundamentally based on empirical curve-fitting methods to calculate tire forces. The four options in the menu determine how these coefficients are fed into the solver.

1. Peak longitudinal force and corresponding slip:

Instead of entering the Magic Formula's abstract mathematical coefficients, this option allows us to directly enter the tire's physical and measurable properties. The Simscape solver automatically scales these values in the background using these physical values. If detailed test data from the tire manufacturer is not available, this option is used to create a fast and realistic model using only basic catalog data. This method was used in the model. When this option is selected, the parameter screen is shown in Figure 6.

Axial vertical load: The model has a total of four wheels—two per axle. The vehicle mass (m) is 1200 kg. In this case, the mass per wheel is 300 kg. If the acceleration due to gravity is taken as approximately 9.80 m/s^2 , the nominal vertical force per wheel will be $F_{z0} = 2940 \text{ N}$.

Maximum longitudinal force that can be generated under the load rating: This parameter limits the maximum longitudinal traction force that the tire can transfer to the road without slipping. It is defined as $F_{x0} = 3450 \text{ N}$.

Peak slip ratio at maximum force: defines the tire’s longitudinal grip characteristic curve; it remains constant unless the specific road surface or tire compound changes. It is defined as $\kappa_0 = \%10$.

Main		
Parameterize by	Peak longitudinal force and corresponding slip	
> Rated vertical load	2940	N
> Peak longitudinal force at rated load	3450	N
> Slip at peak force at rated load (percent)	10	
Geometry		
Rolling Resistance		
<input checked="" type="checkbox"/> Model rolling resistance		
Resistance model	Pressure and velocity dependent (Magic Formula)	
> Tire pressure	250e3	Pa
> Tire nominal pressure, NOMPRES	240e3	Pa
> Tire nominal vertical load for rolling res...	3700	N
> Hub nominal longitudinal velocity for ro...	16	m/s
> Q-coefficient parameters [qsy1 qsy2 qsy...	[.0082, 0, .0014, .001, 0, 0, 1.08, -5]	< 1x8 double >
> Velocity threshold for rolling resistance	0.001	m/s

Figure 5. Tire (Magic Formula) block parameters window

2. Constant Magic Formula Coefficients:

Allows us to enter the coefficients in the formula directly. Required inputs: Stiffness coefficient (B), Shape coefficient (C), Peak value coefficient (D), Curvature coefficient (E)

It is preferred when Pacejka coefficients derived from laboratory tests for a specific tire-road combination are available. In this option, the dynamic effect of vertical loads or sudden changes in road conditions on the coefficients is neglected.

3. Load dependent magic formula coefficients:

This is a much more advanced option that calculates how the formula coefficients will change in response to the load when the vertical load on the tire varies dynamically throughout the simulation. Pacejka parameter vectors, which define the trends in how the coefficients change in response to the vertical load, are entered. It is used to model tire grip limits with the highest accuracy in scenarios where vertical weight transfers between the front and rear axles are particularly intense, such as during high acceleration, hard braking, or climbing steep hills.

4. Physical signal magic formula coefficients:

This allows the formula coefficients to be dynamically modified from outside the simulation. When this option is checked, a physical M port is opened on the tire block. During the simulation, a 4-element signal vector is sent to the M port at every step. It is ideal for simulating situations where road conditions change while the vehicle is in motion. Instantaneous friction coefficients from an external road profile block are fed to the tire through this port, allowing dynamic traction loss to be tracked.

7.2. Simulation Results

The FTP72 model was tested for the WLTP Class 1 (WLTP) and Artemis Motorway 130 km/h (AM-130) driving scenarios. Table 4 provides information on the driving scenarios mentioned.

Table 6. Characteristics of the driving scenarios tested.

Parameters	FTP72	WLTP	AM-130
Drive Cycle Time (s)	1372	1022	1068
Distance Traveled (km)	12.16	8.113	28.76
Average Speed (km/h)	31.90	28.58	96.95
Maximum Speed (km/h)	91.26	64.40	131.80

Table 6 presents the consumption values and the amounts of energy recovered through regenerative braking for three driving scenarios, both in calm conditions and under headwind conditions of 5 m/s (18 km/h). The initial battery charge level is 0.75. As shown in Table 5, in the AM-130 driving cycle—where the average speed is high—energy consumption is 29.59 kW per 100 km, while in the other two driving cycles, where the average speed is lower, energy consumption is 20.83 kW and 21.56 kW per 100 km, respectively. Additionally, in the FTP-72 driving cycle—which simulates stop-and-go traffic—54.99% of the energy drawn from the battery was recovered through regenerative braking. Although the average speed was low in the WLTP driving cycle, the recovery rate was 29.79% because there was less stop-and-go traffic. In the high-speed highway driving cycle, however, the recovery rate remained at 16.78% because there was no stop-and-go traffic. Under headwind conditions, energy recovery rates through regeneration decreased to approximately 15–30%.

Table 7. Consumption and regeneration values.

	FTP72	WLTP	AM-130	FTP72	WLTP	AM-130
Wind (m/s)	0	0	0	5	5	5
Consumption (kWh/100km)	20.83	21.56	25.06	26.25	27.14	29.59
Consumption (Wh)	2533	1749	7209	3190	2201	8511
Consumed (Ah)	13.66	5.922	20.86	14.84	6.80	23.72
Regenerated (Ah)	7.512	1.764	3.499	7.121	1.566	3.19
Net Consumed (Ah)	6.148	4.158	17.361	7.719	5.234	20.53
Regenerated (%)	54.99	29.79	16.78	48	23.03	13.45
SOC (%)	71.90	72.90	66.3	71.10	72.40	64.70

Under real-world conditions, particularly when driving on highways, the impact of headwinds is much greater because a large portion of the route is in areas far from populated areas and average speeds on highways are high; this situation leads to an increase in the vehicle's energy consumption. In urban areas, however, the effect of headwinds is generally much less pronounced. As shown in Table 5, when headwinds are factored in, the driving scenario that increased consumption the most was FTP-72, at 25.94%. WLTP Class 1 ranked second at 25.84%, while AM-130 showed the smallest change in consumption, at 18.06%. In our simulation, when we applied the same headwind to all three scenarios, the reason the results turned out this way is that the high current draw during vehicle acceleration in stop-and-go traffic is further amplified by the headwind effect. In fact, in practice, it is highly unlikely that the same headwind would occur in the AM-130 driving scenario—where the average speed is approximately 97 km/h—as in the other two driving scenarios, which have average speeds of 28.58 and 31.9.

Upon examining Figures 6–8, it can be seen that the actual speed closely tracked the reference speed in all three driving cycles. The PI control ensured that appropriate throttle and brake signals were sent based on the reference speed. Additionally, the MATLAB function block containing the brake blending algorithm generated appropriate regenerative and mechanical brake signals. Upon examining Figures 10–12 (graphs a and b), it can be seen that the regeneration signal and the disc brake signal complement each other. This both contributed to the vehicle's speed tracking the reference speed and ensured regeneration.

An examination of graphs c and d in Figure 9-11 reveals that the battery charge level increases when the battery current turns negative; an examination of graphs e and f, on the other hand, shows that the battery voltage and motor voltage vary inversely to one another.

An examination of Table 8 reveals that during the AM-130 driving cycle—where the average speed is high—the motor voltage reaches a maximum of 350 volts, while in the FTP-72 cycle it reaches a maximum of 250 volts and in the WLTP cycle a maximum of 180 volts. Furthermore, it was observed that current fluctuations are significantly higher in the AM-130 driving cycle. This highlights the need for careful planning of battery modeling, battery management, and power electronics designs at high speeds in practical applications.

Table 8. Battery voltage and current values.

	FTP72	WLTP	AM-130
Wind (m/s)	0	0	0
Maximum Battery Voltage (V)	428.8	427	430.3
Minimum Battery Voltage (V)	415.2	420.2	408.2
Average Battery Voltage (V)	421.8	422.6	418
Median Battery Voltage (V)	421.8	422.5	417.5
RMS Battery Voltage (V)	421.8	422.6	418
Maximum Battery Current (A)	208.3	116.7	263.7
Minimum Battery Current (A)	-181.6	-113.2	-411.7
Average Battery Current (A)	13.10	13.11	49.78
Median Battery Current (A)	12.57	13.34	69.42
RMS Battery Current (A)	76.56	39.10	96.52

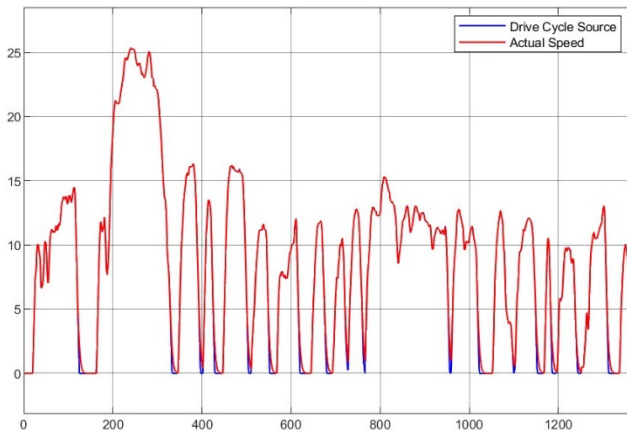


Figure 6. Graphs of reference and actual speeds during the FTP-72 driving cycle.

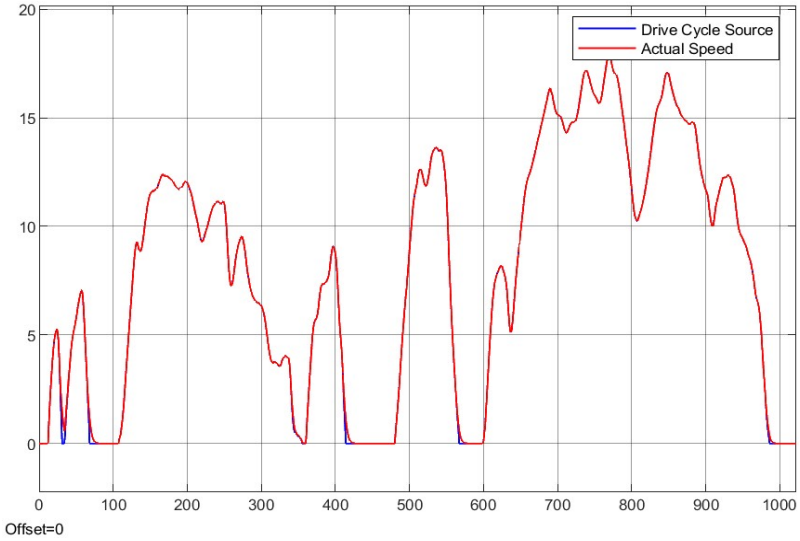


Figure 7. Graphs of reference and actual speeds during the WLTP driving cycle.

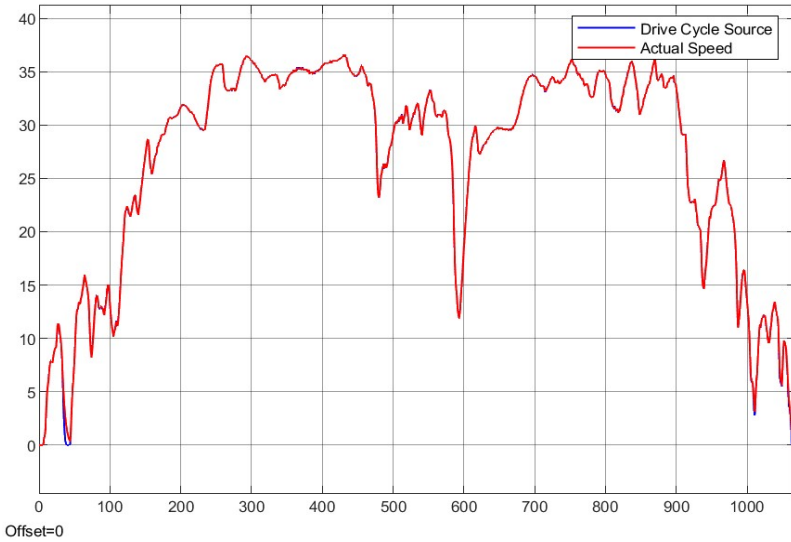


Figure 8. Graphs of reference and actual speeds during the AM-130 driving cycle.

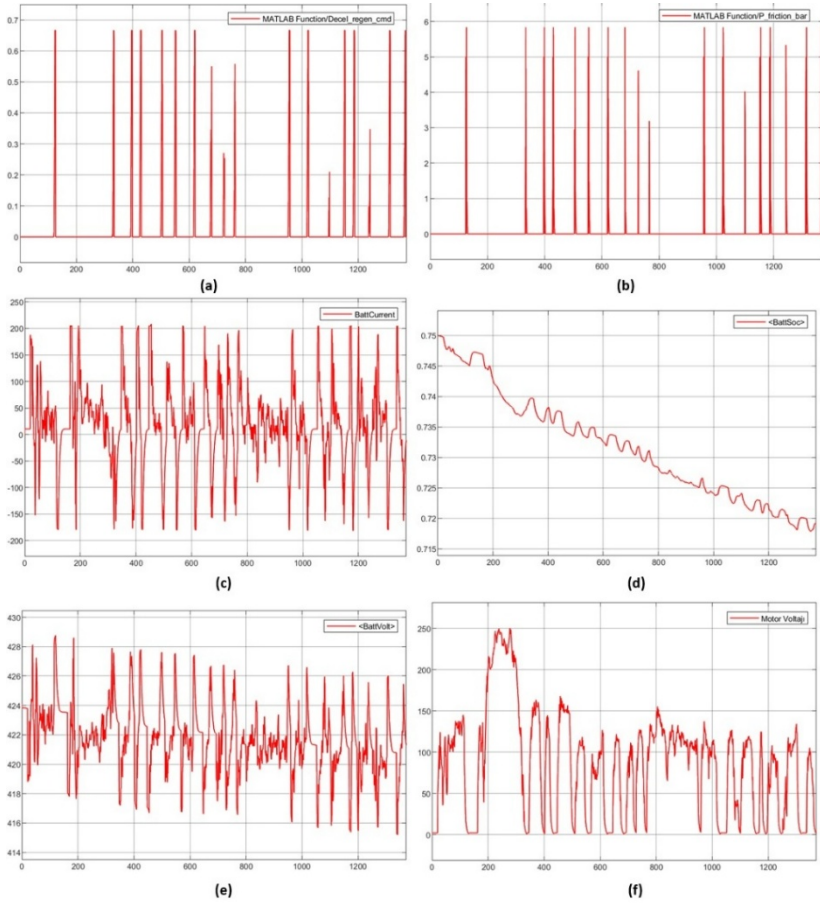


Figure 9. FTP-72 driving cycle: (a) regeneration signal, (b) disc brake signal, (c) battery current, (d) state of charge (SoC), (e) battery voltage, (f) motor voltage.

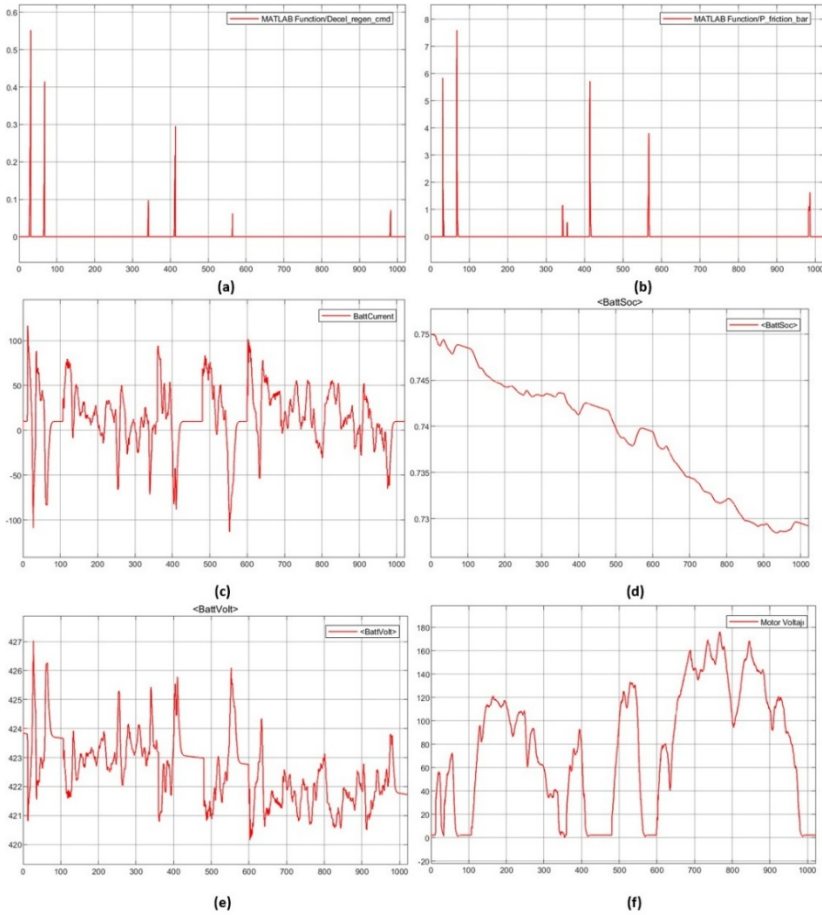


Figure 10. WLTP driving cycle: (a) regeneration signal, (b) disc brake signal, (c) battery current, (d) state of charge (SoC), (e) battery voltage, (f) motor voltage.

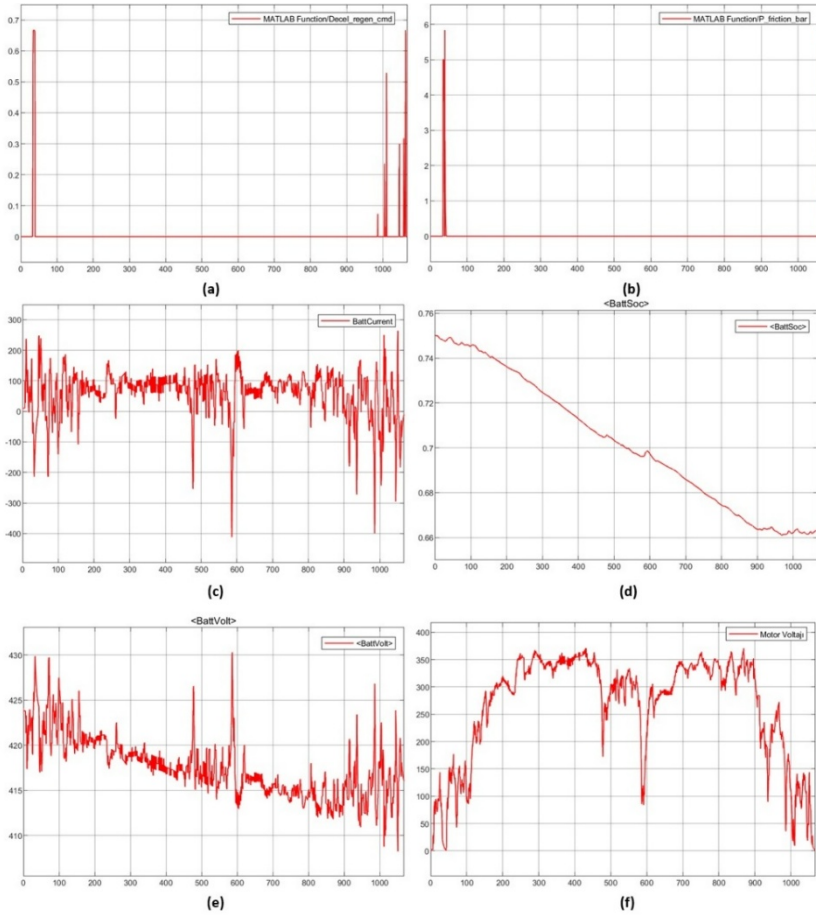


Figure 11. AM-130 driving cycle: (a) regeneration signal, (b) disc brake signal, (c) battery current, (d) state of charge (SoC), (e) battery voltage, (f) motor voltage.

KAYNAKÇA

- Gao, P., Ruan, J., Du, Y., Walker, P. D., & Zhang, N. (2019). The prediction of braking noise in regenerative braking system using closed-loop coupling disk brake model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(14), 3721–3735. <https://doi.org/10.1177/0954407019832766>
- Jamadar, N. M., & Jadhav, H. T. (2021). A review on braking control and optimization techniques for electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(9), 2371–2382. <https://doi.org/10.1177/0954407021996906>
- Li, W., Wang, M., Huang, C., & Li, B. (2024). A Survey of Hybrid Braking System Control Methods. *World Electric Vehicle Journal 2024, Vol. 15, Page 372, 15(8), 372*. <https://doi.org/10.3390/WEVJ15080372>
- Liaw, C.-M., Lu, M.-Z., Jhou, P.-H., Chou, K.-Y., Liaw, C.-M., Lu, M.-Z., ... Chou, K.-Y. (2019). Driving Control Technologies of New High-Efficient Motors. *Applied Electromechanical Devices and Machines for Electric Mobility Solutions*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.88348>
- Liu, Y., Martinet, S., Louis, C., Pasquier, A., Tassel, P., & Perret, P. (2017). Emission characterization of in-use diesel and gasoline Euro 4 to Euro 6 passenger cars tested on chassis dynamometer bench and emission model assessment. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(9), 2289–2299. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2017.02.0080>
- Lv, C., Zhang, J., Li, Y., & Yuan, Y. (2014). Regenerative braking control algorithm for an electrified vehicle

equipped with a by-wire brake system. *SAE Technical Papers*, 1. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1791>

Method of calculating battery coulomb efficiency accurately under different temperatures. (2016).

Naseri, F., Nordi, B. R. a., Spiliotopoulos, K., & Schaltz, E. (2026). Regenerative–Frictional Brake Blending in Electric Vehicles Considering Energy Recovery and Dynamic Battery Charging Limit: A Reinforcement Learning-Based Approach. *Machines*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/machines14040416>

Shakouri, P., Ordys, A., Askari, M., & Laila, D. S. (2010). Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab. *IET Seminar Digest*, 2010(4), 955–960. <https://doi.org/10.1049/IC.2010.0410>

Teasdale, A., Ishaku, L., Amaechi, C. V., Adelusi, I., & Abdelazim, A. (2024). A Study on an Energy-Regenerative Braking Model Using Supercapacitors and DC Motors. *World Electric Vehicle Journal 2024*, Vol. 15, Page 326, 15(7), 326. <https://doi.org/10.3390/WEVJ15070326>

Yildirim, M. (n.d.). *Vehicle Longitudinal Dynamics Model*.

Zhang, J., Lv, C., Yue, X., Qiu, M., Gou, J., & He, C. (2013). Development of the electrically-controlled regenerative braking system for electrified passenger vehicle. *SAE Technical Papers*, 2. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1463>

ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com