

Nanoşebekede Yapay Zeka Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı

Artificial Intelligence-Based Energy Management System Design in Nanogrid

Süleyman Emre Eyimaya

Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TUSAŞ-Kazan Meslek Yüksekokulu

Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

eyimaya@gazi.edu.tr  0000-0003-4703-6476

Özet

Günümüzde enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda nanoşebeke sistemleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sistemler, yerel enerji üretimi, depolaması ve tüketimini optimize ederek enerji verimliliğini artırmayı ve maliyetleri düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu makalede, nanoşebekelerde yapay zeka tabanlı bir enerji yönetim sisteminin tasarımı ve MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu sunulmaktadır. Çalışma, nanoşebeke kavramını, mikroşebekelerden farklarını ve enerji yönetim sistemlerinin kritik rolünü ele almaktadır. Yapay zeka tekniklerinin enerji yönetimindeki potansiyeli vurgulanarak, özellikle yük tahmini ve batarya yönetimi gibi alanlarda yapay sinir ağları (YSA) gibi algoritmaların kullanımı incelenmiştir. Geliştirilen model, enerji üretimi, tüketimi ve depolama verileri kullanılarak simüle edilmiş, elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemlerinin klasik yöntemlere kıyasla sunduğu avantajlar değerlendirilmiştir. Simülasyon bulguları, önerilen yapay zeka tabanlı yaklaşımın nanoşebeke sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve ekonomik verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Yapay Zeka, Yapay Sinir Ağı, Nanoşebeke, Enerji Yönetim Sistemleri

Abstract

As energy independence and sustainability become higher priorities, nanogrid technologies are gaining increasing significance. These systems aim to improve energy efficiency and reduce costs by optimizing local energy production, storage, and consumption. This article presents the design and simulation of an AI-based energy management system for nanogrids in the MATLAB/Simulink environment. The study examines the concept of nanogrids, their differences from microgrids, and the critical role of energy management systems. It emphasizes the potential of AI techniques in energy management and explores the use of algorithms such as artificial neural networks (ANNs), particularly for load forecasting and battery management. The developed model was simulated using energy production, consumption, and storage data. The results were analyzed, and the advantages of AI-based energy management systems over traditional methods were evaluated. The simulation findings demonstrate that the proposed AI-based approach can significantly enhance the performance, reliability, and economic efficiency of nanogrid energy management systems.

Keywords: Renewable Energy, Artificial Intelligence, Artificial Neural Networks, Nanogrids, Energy Management Systems

1. Giriş

Nanoşebeke, genellikle tek bir bina, daire veya küçük bir tesis ölçeğinde, enerji üretimi, depolaması ve tüketimini yerel olarak yöneten, küçük ölçekli bir enerji sistemidir. Bu sistemler, fotovoltaik paneller, batarya depolama üniteleri, yükler ve şebeke bağlantısı gibi temel bileşenlerden oluşur. Nanoşebekeler, enerji bağımsızlığını

artırmak, enerji maliyetlerini azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir. Özellikle konutlar, küçük ticari işletmeler ve uzak bölgelerde, enerji arz güvenliğini sağlamak ve şebekeye olan bağımlılığı azaltmak için nanoşebeke çözümleri giderek daha fazla tercih edilmektedir [1,2].

Nanoşebekelerin en önemli avantajlarından biri, enerji yönetiminin yerel düzeyde optimize edilebilmesidir. Bu sayede, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin sağlanması, batarya ömrünün uzatılması ve yenilenebilir enerji kullanımının maksimize edilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, nanoşebekeler mikroşebeke gibi daha büyük ölçekli enerji sistemlerinin temel yapı taşları olarak da değerlendirilmektedir. Son yıllarda, akıllı kontrol ve enerji yönetim sistemlerinin gelişimiyle birlikte, nanoşebekelerin esnekliği ve verimliliği önemli ölçüde artmıştır [3-5].

Nanoşebeke sistemlerinde enerji yönetim sistemleri, enerji üretimi, depolaması ve tüketimi arasındaki dengeyi sağlamak ve sistemin genel verimliliğini artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği değişken ve öngörülemez olması, enerji akışının gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Etkin bir enerji yönetim sistemi, enerji arz ve talebini optimize ederek batarya ömrünü uzatmakta, enerji maliyetlerini düşürmekte ve şebekeye olan bağımlılığı azaltmaktadır. Ayrıca, enerji yönetim sistemleri sayesinde kullanıcıların enerji tüketim alışkanlıkları analiz edilerek, talep tarafı yönetimi ve yük dengelemesi gibi gelişmiş kontrol stratejileri uygulanabilmektedir [6,7]. Bu çerçevede, mikroşebeke ve nanoşebekelerde enerji yönetimi stratejilerinin mevcut durumu ve karşılaşılan zorluklar çeşitli çalışmalarda kapsamlı biçimde değerlendirilmiş; enerji depolama sistemleri, elektrikli araçlar ve yapay zeka tabanlı yöntemlerin entegrasyonunun önemi vurgulanmıştır [8-12].

Literatürde nanoşebeke ve mikroşebekelerde enerji yönetimi ve yük tahmini konusundaki çalışmalar, kullanılan yöntemlere göre; kural tabanlı ve klasik yaklaşımlar, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi tabanlı modeller, takviye öğrenmesi ve optimizasyon temelli yöntemler ile bulanık mantık ve hibrit yapılar olmak üzere farklı kategoriler altında incelenebilmektedir [8].

Kural tabanlı ve klasik yöntemlere odaklanan çalışmalarda, genellikle önceden tanımlanmış sezgisel kurallar ve klasik optimizasyon yaklaşımları kullanılarak enerji yönetimi gerçekleştirilmektedir. Akıllı binalarda enerji yönetimi için geliştirilen algoritmalar ile talep yanıtı ve yük dengelemesi üzerinde önemli iyileşmeler sağlandığı gösterilmiştir [13]. Bir çalışmada, nanoşebeke ve mikroşebekelerde gerçek zamanlı merkezi talep yanıtı uygulamalarının sistemin frekans regülasyonu ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir [14]. Diğer bazı araştırmalarda ise enerji yönetimi stratejilerinin performansı karşılaştırılarak, farklı kontrol algoritmalarının nanoşebeke ve mikroşebeke sistemlerindeki uygulanabilirliği analiz edilmiştir [1,2,15]. Bu kural tabanlı ve klasik yaklaşımlar, uygulama kolaylığı ve düşük hesaplama maliyeti sunmakla birlikte, yenilenebilir kaynaklardaki belirsizlik ve yük profilindeki dalgalanmalar karşısında esnekliklerinin sınırlı olduğu belirtilmektedir.

Yapay sinir ağları (YSA) ve diğer makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, nanoşebekelerde enerji üretimi, depolaması ve tüketiminin daha verimli ve esnek bir şekilde yönetilmesini sağlayan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu sistemler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi teknikleri kullanarak, enerji talebi ve üretimdeki belirsizlikleri daha iyi tahmin edebilmekte ve kontrol stratejilerini dinamik olarak optimize edebilmektedir [16-18]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, YSA kullanılarak nanoşebekelerde yük tahmini ve enerji optimizasyonu üzerine başarılı sonuçlar elde edilmiş; kısa vadeli talep tahmini doğruluğunun artırılmasıyla enerji yönetim performansının iyileştirildiği gösterilmiştir [19]. Bu tür çalışmalarda tahmin modeli çoğunlukla enerji akış optimizasyonundan ayrı bir modül olarak ele alınmakta ve tahmin hatalarının enerji yönetimi kararları üzerindeki etkisi dolaylı biçimde incelenmektedir.

Takviye öğrenmesi ve optimizasyon temelli yöntemler ise enerji yönetimini doğrudan bir optimizasyon problemi olarak modelleyerek kontrol süreçlerini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Örneğin, nanoşebeke kümelerinde eşler arası güç ticareti için takviye öğrenmesi temelli bir yaklaşım önerilerek, enerji depolama ve yük yönetimi süreçlerinin iyileştirildiği rapor edilmiştir [20]. Bu tür yöntemler, çok sayıda karar değişkeni ve kısıtın bulunduğu karmaşık yapılarda maliyet minimizasyonunu ve konfor/güvenilirlik kısıtlarını birlikte ele alabilmektedir. Ancak çoğu uygulamada yük veya üretim profilleri deterministik varsayımlara dayandırılmakta ya da basitleştirilmiş istatistiksel modeller ile temsil edilmektedir.

Bulanık mantık ve hibrit yaklaşımlar, belirsizliklerin modellenmesi ve uzman bilgisinin sisteme dâhil edilebilmesi amacıyla literatürde geniş yer bulan bir diğer önemli kategoridir. PV-rüzgâr-batarya bileşenlerine sahip bir sistem için önerilen bulanık mantık tabanlı enerji yönetim modelinin, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve batarya ömrü üzerindeki olumlu etkileri ortaya konmuştur [21]. Akıllı şehirler ve binalar için tasarlanan nanoşebeke/mikroşebeke yapılarında ise, enerji optimizasyonu amacıyla bulanık mantığın çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla birleştirildiği hibrit denetleyiciler geliştirilmiş ve bu sayede sistem esnekliği ile güvenilirliğinde önemli iyileşmeler sağlandığı bildirilmiştir [22-24].

Mevcut çalışmaların çoğunun belirli sistem senaryolarına odaklandığını ve genellikle enerji yönetimi optimizasyonu ile yük tahminini ayrı modüller olarak ele aldığını göstermektedir. Bu durum, karmaşık sistem dinamiklerinin bütüncül olarak modellenememesine ve karar mekanizmasının genel geçer bir çözüm üretmemesine yol açmaktadır. Ayrıca, birçok çalışmada kullanılan yöntemlerin belirli çevresel koşullara veya sabit çalışma noktalarına göre kurgulanması, sistemin farklı iklim bölgeleri ve yük profilleri için genellebilirliğini sınırlamaktadır. Bu bağlamda, yapay sinir ağı (YSA) tabanlı yaklaşımların enerji yönetim sistemlerine entegre edilmesi, yenilenebilir kaynaklardaki belirsizliklerin modellenmesi ve karar optimizasyonunun dinamik biçimde sağlanması açısından literatürde öne çıkan bir araştırma alanı olarak görülmektedir.

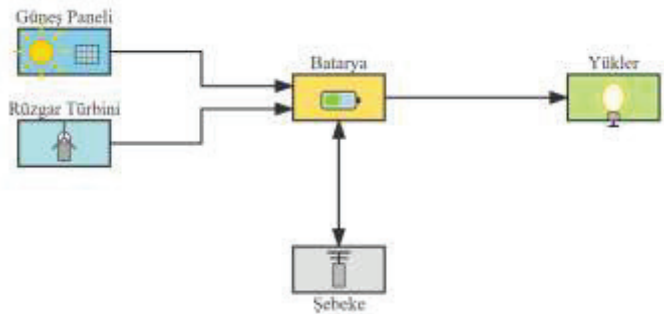
Bu çalışmanın özgün katkısı, literatürde genellikle birbirinden bağımsız olarak ele alınan yük tahmini ve enerji akış optimizasyonu süreçlerini tek bir karar mekanizması altında bütünleştirmesidir. Önerilen model, YSA tabanlı tahmin motorunu enerji yönetim algoritmasıyla doğrudan ilişkilendirerek, sistemin hem kısa vadeli tahmin doğruluğunu hem de operasyonel optimizasyon performansını artırmaktadır. Geliştirilen yöntem, MATLAB/Simulink ortamında kural tabanlı klasik yöntemle nicel olarak karşılaştırılmış; böylece YSA modelinin enerji maliyeti, batarya ömrü ve sistem verimliliği üzerindeki etkileri objektif performans metrikleriyle ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, literatürde eksik olan bütünlük ve tekrarlanabilir bir yapay zeka temelli enerji yönetim yaklaşımını sunmaktadır. Makale kapsamında öncelikle nanoşebeke yapısı ve yapay zeka tabanlı enerji yönetim sisteminin genel çerçevesi sunulmakta, ardından önerilen YSA tabanlı modelin MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilen uygulaması ve klasik

yöntemle karşılaştırmalı simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

2. Nanoşebeke Yapısı ve Bileşenleri

Nanoşebeke sistemleri, küçük ölçekli enerji üretimi, depolama ve tüketim bileşenlerinin entegre bir şekilde çalıştığı, genellikle tek bir bina veya küçük bir tesis ölçeğinde uygulanan enerji altyapılarıdır [22]. Tipik bir nanoşebeke; fotovoltaiik (PV) paneller, batarya enerji depolama sistemleri, inverterler, çeşitli elektrikli yükler ve isteğe bağlı olarak ana şebeke bağlantısından oluşur. PV paneller, yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneşten elektrik üretirken, batarya sistemleri fazla enerjiyi depolayarak enerji arz-talep dengesini sağlar. İnverterler ise DA/AA dönüşümünü gerçekleştirerek, PV ve batarya sistemlerinden elde edilen enerjinin evsel veya ticari yüklerde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Nanoşebekelerde enerji akışının etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, sistemin her bir bileşeninin dinamik olarak izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Akıllı sayaçlar, sensörler ve kontrol üniteleri sayesinde, enerji üretimi, depolaması ve tüketimi gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve optimize edilebilmektedir. Ayrıca, nanoşebekelerin modüler yapısı, sistemin ölçeklenebilirliğini ve esnekliğini artırırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu da kolaylaştırmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, nanoşebeke bileşenlerinin doğru modellenmesi ve kontrolü sayesinde, enerji verimliliği ve sistem güvenilirliğinde önemli iyileşmeler sağlandığını göstermektedir [23,24]. Tipik nanoşebeke şeması Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Tipik Nanoşebeke Şeması

Nanoşebekelerde enerji akışları, sistemin üretim, depolama ve tüketim bileşenleri arasında dinamik olarak gerçekleşir ve bu akışların etkin yönetimi için çeşitli kontrol noktaları oluşturulur. Güneş paneli gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik, öncelikle yüklerin anlık ihtiyacını karşılamak üzere yönlendirilir; fazla enerji ise batarya sistemlerinde depolanır. Batarya, enerji talebinin üretimi aştığı durumlarda devreye girerek yükleri besler veya şebekeden enerji alınmasını azaltır. İnverter, DA kaynaklardan gelen enerjiyi AA'ya dönüştürerek evsel veya ticari yüklerin beslenmesini sağlar. Şebeke bağlantısı mevcutsa, enerji alışverişi de kontrol noktalarından biri olarak değerlendirilir; sistem, enerji fiyatları ve arz-talep dengesine göre şebekeden enerji alabilir veya fazla enerjiyi şebekeye satabilir. Tüm bu süreçlerde, akıllı sayaçlar, sensörler ve merkezi kontrol üniteleri aracılığıyla enerji akışları gerçek zamanlı olarak izlenir ve optimize edilir; böylece sistemin verimliliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği artırılmaktadır.

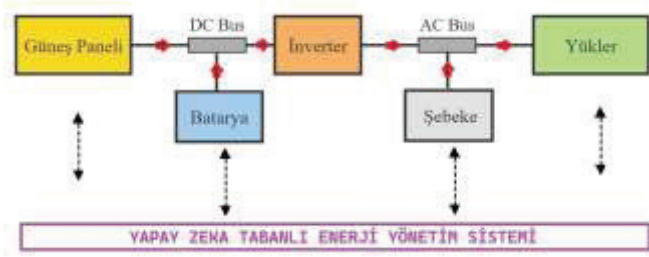
Yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemleri nanoşebekelerde enerji üretimi, depolaması ve tüketiminin daha akıllı ve esnek bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. Geleneksel kural tabanlı veya optimizasyon tabanlı enerji yönetim sistemleri yaklaşımlarının aksine,

yapay zeka algoritmaları geçmiş verilerden öğrenerek, değişken yenilenebilir enerji üretimi ve dinamik yük profilleri gibi belirsizlikleri daha etkin şekilde yönetebilmektedir. Bu sayede, enerji üretim ve tüketim tahminleri daha hassas yapılabilir, batarya şarj/deşarj stratejileri optimize edilebilir ve şebeke ile enerji alışverişi en uygun şekilde planlanabilmektedir. Özellikle, yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemleri, gerçek zamanlı karar verme ve adaptasyon kabiliyetiyle nanoşebekelerin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır.

Bu makalenin MATLAB uygulama kısmında, yapay zeka yöntemlerinden YSA kullanılmaktadır. YSA, geçmiş enerji üretimi, tüketimi ve hava durumu gibi verileri analiz ederek, kısa vadeli yük tahmini ve batarya yönetimi için güçlü bir araç sunmaktadır. MATLAB'da geliştirilen modelde, giriş olarak zaman, sıcaklık, güneş ışınımı ve geçmiş yük verileri kullanılacak; çıkış olarak ise gelecekteki yük talebi tahmin edilmektedir. Bu tahminler, enerji yönetim sistemlerinin batarya şarj/deşarj kararlarını ve şebeke ile enerji alışverişini optimize etmesinde temel rol oynamaktadır. Böylece, YSA tabanlı enerji yönetim sistemlerinin klasik yöntemlere göre sağladığı avantajlar simülasyon sonuçlarıyla ortaya konmaktadır.

3. Nanoşebeke Tasarımı

Nanoşebeke sistemi MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde PV, batarya enerji depolama sistemi, şebeke ve yük yer almaktadır. Bu sistemdeki tüm bileşenleri verimli yönetmek için YSA tabanlı enerji yönetim sistemi kullanılmıştır. Tasarlanan mikroşebeke sistemi Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Tasarlanan Nanoşebeke Sistemi

Simülasyon modeli MATLAB/Simulink ortamında kurulan gerçek zamanlı bileşen tabanlı bloklardan oluşturulmuştur. Şekil 2'de gösterildiği üzere, PV, batarya, şebeke ve yük blokları birbirine bağlanmıştır. YSA tabanlı enerji yönetim sistemi sisteme entegre edilerek, anlık güç dengesine göre şebeke alış/satış, batarya şarj/deşarj ve yük besleme kararlarını üretmektedir. Modelleme sürecinde kullanılan parametreler tablo 1-4'te özetlenmiş olup, tüm bloklar IEC standart değerleri temel alınarak tanımlanmıştır.

3.1. Fotovoltaik (PV) Sistem Modeli

Nanoşebeke modellemesinde, PV sistem güneş enerjisinden elektrik üretimini sağlamaktadır. MATLAB/Simulink ortamında PV paneli, güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel parametrelere bağlı olarak elektriksel çıkış üreten bir blok olarak modellenmektedir. PV sisteminin çıkışı, anlık ışınım ve sıcaklık değerlerine göre değişmekte ve bu veriler simülasyon sırasında zaman serisi olarak uygulanmaktadır.

Tablo 1. PV Sistem Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Maksimum Güç (Pmax)	3	kW
Panel Sayısı	10	adet
Nominal Gerilim	36	V
Nominal Akım	8.3	A
Güneş Işınımı	1000	W/m ²
Sıcaklık	25	°C

3.2. Batarya Enerji Depolama Sistemi Modeli

Batarya enerji depolama sistemi, PV sisteminden veya şebekeden alınan fazla enerjiyi depolamakta ve ihtiyaç anında yükleri beslemektedir. Simülasyonda, batarya modeli şarj/deşarj karakteristikleri ve kapasite gibi parametreler Tablo 2'deki gibi tanımlanmaktadır.

Tablo 2. Batarya Enerji Depolama Sistemi Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Kapasite (C)	10	kWh
Nominal Gerilim	48	V
Maksimum Akım	50	A
Şarj/Deşarj Verimi	0.95	-
Başlangıç SOC	50	%
Minimum SOC	20	%
Maksimum SOC	90	%

3.3. Şebeke Modeli

Şebeke, nanoşebekenin ana elektrik şebekesiyle enerji alışverişi yapmasını sağlar. Simülasyonda, şebeke bağlantısı AA olarak modellenmekte ve enerji alış/satış fiyatları ile sınırlandırılmış güç değerleri dikkate alınmaktadır. Şebeke sistemi parametreleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Şebeke Sistemi Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Nominal Gerilim	230	V (AC)
Maksimum Güç	5	kW
Alış Fiyatı	1.5	TL/kWh
Satış Fiyatı	1.0	TL/kWh
Frekans	50	Hz

3.4. Yük Modeli

Yükler, nanoşebekedeki elektrikli cihazlar ve sistemlerdir. Simülasyonda, yük profili tanımlanmakta ve günün farklı saatlerinde değişen güç talepleriyle modellenmektedir. Yük sistem parametreleri Tablo 4'teki gibi tanımlanmaktadır.

Tablo 4. Yük Sistem Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Maksimum Yük	4	kW
Ortalama Yük	2.5	kW
Minimum Yük	0.8	kW
Yük Profili	Zaman serisi	-
Güç Faktörü	0.95	-

3.5. Enerji Yönetim Sistemi Modeli

Enerji yönetim sistemi, nanoşebekedeki tüm enerji akışlarını koordine eden ve optimize eden merkezi bir kontrol birimidir. Enerji yönetim sistemlerinin temel amacı, PV üretimi, batarya depolama, şebeke alışı/satışı ve yük talepleri arasında en verimli enerji dağıtımını sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, enerji yönetim sistemleri gerçek zamanlı olarak sistem bileşenlerinden veri toplamakta, analiz etmekte ve uygun kontrol kararlarını uygulamaktadır. Özellikle, yenilenebilir enerji üretiminin değişkenliği ve yük profilinin dinamik yapısı nedeniyle, enerji yönetim sistemlerinin hızlı ve doğru kararlar alabilmesi sistem performansı açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, enerji yönetim sistemlerinin karar mekanizmasında YSA tabanlı bir tahmin ve kontrol algoritması kullanılmaktadır. YSA modeli, geçmiş yük verileri, anlık sıcaklık, güneş ışıınımı ve zaman bilgilerini giriş olarak alır ve kısa vadeli yük tahmini üretmektedir. Bu tahmin, batarya şarj/deşarj stratejilerinin ve şebeke ile enerji alış/satış kararlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. YSA'nın matematiksel gösterimi aşağıdaki Denklem 1'deki gibidir:

$$Pyük(t + \Delta t) = fANN(Pyük(t), G(t), T(t), t) \quad (1)$$

Burada, Pyük bir sonraki zaman adımındaki ($t + \Delta t$) tahmini yük değerini (kW cinsinden) ifade eder. fANN, YSA modelini temsil eder ve giriş olarak çeşitli parametreleri alır. Pyük(t), mevcut zaman adımındaki gerçek yük değerini, G(t) o andaki güneşlenme ışıınım değerini, T(t) ise ortam sıcaklığını gösterir. Ayrıca, t parametresi de zaman bilgisini belirtir. Bu model sayesinde, geçmiş yük, güneşlenme, sıcaklık ve zaman gibi değişkenler kullanılarak, gelecekteki yük değeri yüksek doğrulukla tahmin edilebilir. Böylece, enerji yönetim sistemi kaynaklarını daha verimli ve etkin bir şekilde planlayabilir.

YSA tabanlı tahmin sonucunda, enerji yönetim sistemlerinin optimizasyon hedefleri arasında enerji maliyetinin minimize edilmesi, batarya ömrünün uzatılması ve yenilenebilir enerji kullanım oranının artırılması yer almaktadır.

Bu çalışmada kullanılan YSA tabanlı yük tahmincisinin eğitimi ve değerlendirmesi kapsamlı biçimde gerçekleştirilmiştir. Girdi değişkenleri zaman (saat), ortam sıcaklığı, küresel yatay güneş ışıınımı ve geçmiş yük verilerinden; çıktı değişkeni ise bir sonraki zaman adımındaki yük talebinden oluşmaktadır. Toplam veri seti 12 ay $\times$ 24 saat olmak üzere 288 örnekten oluşturulmuş, tüm girdiler min-max yöntemiyle [0,1] aralığına ölçeklenmiş ve zamanın döngüsel yapısını temsil etmek için sinüs/kosinüs dönüşümleri ($\sin(2\pi t/24)$, $\cos(2\pi t/24)$) uygulanmıştır. Bu veri seti, modelin davranışını değerlendirmek için yıl boyunca tipik bir konut tipi nanoşebeke yük profili üzerinde yeterli bir temel sunmakla birlikte, örnek sayısının sınırlı olması, modelin farklı iklim koşulları ve yük desenlerine genellenebilirliği açısından dikkatle yorumlanması gereken bir kısıt olarak değerlendirilmektedir.

Ağ mimarisi 4-10-1 yapıdadır; gizli katmanda 10 nöron bulunmakta, aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katmanda "tansig

(tanjant sigmoid)", çıkış katmanında ise "purelin (linear)" tercih edilmiştir; ağ ağırlıkları Nguyen-Widrow yöntemiyle başlatılmıştır. Eğitim süreci MATLAB Neural Network Toolbox kullanılarak Levenberg-Marquardt (trainlm) algoritmasıyla yürütülmüş, epoch hedefi 1000 olarak belirlenmiş ve doğrulama kaybında iyileşme görülmediğinde erken durdurma uygulanmıştır. Veri, %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak ayrılmıştır.

MATLAB/Simulink ortamında, YSA modeli 'Neural Network Toolbox' kullanılarak eğitilmiş ve enerji yönetim sistemleri kontrol bloğuna entegre edilmiştir. Enerji yönetim sistem parametreleri Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5. Enerji Yönetim Sistemi Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Kontrol Zaman Aralığı	15	dakika
Tahmin Aralığı	1	saat
YSA Girişleri	Zaman, sıcaklık, ışıınım, geçmiş yük	-
YSA Çıkışı	Gelecek yük tahmini	kW
Optimizasyon Hedefi	Maliyet minimizasyonu, batarya ömrü	-

Enerji yönetim sistemlerinin Karar Süreci belli aşamalardan oluşmaktadır:

1. Veri Toplama: PV üretimi, batarya şarj seviyesi durumu (SOC), şebeke fiyatları ve anlık yük verileri toplanır.

2. Yük Tahmini: YSA modeli ile kısa vadeli yük tahmini yapılır.

3. Enerji Denge Denklemi: Her kontrol adımında, sistemin enerji dengesi Denklem 2'deki gibi sağlanır:

$$Ppv(t) + Pşebeke(t) + Pbatarya(t) = Pyük(t) \quad (2)$$

Burada, PPV(t) t anındaki fotovoltaik (güneş enerjisi) üretim gücünü, Pşebeke(t) t anında şebekeden alınan veya şebekeye verilen güç miktarını, Pbatarya(t) ise bataryadan çekilen veya bataryaya aktarılan güç miktarını (pozitifsedeşarj, negatifse şarj) ifade eder. Pyük(t) ise aynı anda sistemin toplam yükünü, yani tüketilen gücü gösterir. Bu denklem, nanoşebeke sisteminde üretilen, depolanan ve şebekeden alınan enerjinin toplamının, o andaki yük talebini karşılayacak şekilde dengede olması gerektiğini belirtir. Böylece, sistemin enerji akışları sürekli olarak izlenir ve yönetim kararları bu dengeye göre alınır.

4. Batarya Durumu (SOC) Güncellemesi: Batarya şarj durumu (SOC) Denklem 3'teki gibi güncellenir:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \eta batarya \cdot Pbatarya(t) \cdot \Delta t / Cbatarya \quad (3)$$

Burada, SOC(t) mevcut zaman adımıdaki batarya şarj seviyesini, SOC(t+Δt) ise bir sonraki zaman adımıdaki şarj seviyesini göstermektedir. ηbatarya bataryanın şarj ve deşarj işlemlerindeki verimini temsil eder ve genellikle 0 ile 1 arasında bir katsayıdır. Pbatarya(t), t anındaki batarya çıkış gücünü ifade eder; pozitif değerler bataryanın şarj edildiğini, negatif değerler ise deşarj edildiğini gösterir. Δt zaman adımını, Cbatarya ise bataryanın toplam kapasitesini (örneğin kWh cinsinden) belirtir.

Bu formül sayesinde, bataryanın şarj veya deşarj edilmesi durumunda, yeni şarj seviyesi verim ve kapasite dikkate alınarak güncellenir. Böylece, enerji yönetim sistemi bataryanın mevcut durumunu doğru şekilde izleyebilir ve yönetim kararlarını buna göre optimize edebilir.

5. Maliyet Fonksiyonu: Enerji yönetim sistemlerinin optimizasyon hedefi, toplam enerji maliyetini minimize etmektir ve formül Denklem 4'te sunulmaktadır.

$$C_{top} = \sum_t [P_{şebeke,alim}(t) \cdot F_{alim} \cdot \Delta t - P_{şebeke,satis}(t) \cdot F_{satis} \cdot \Delta t] \quad (4)$$

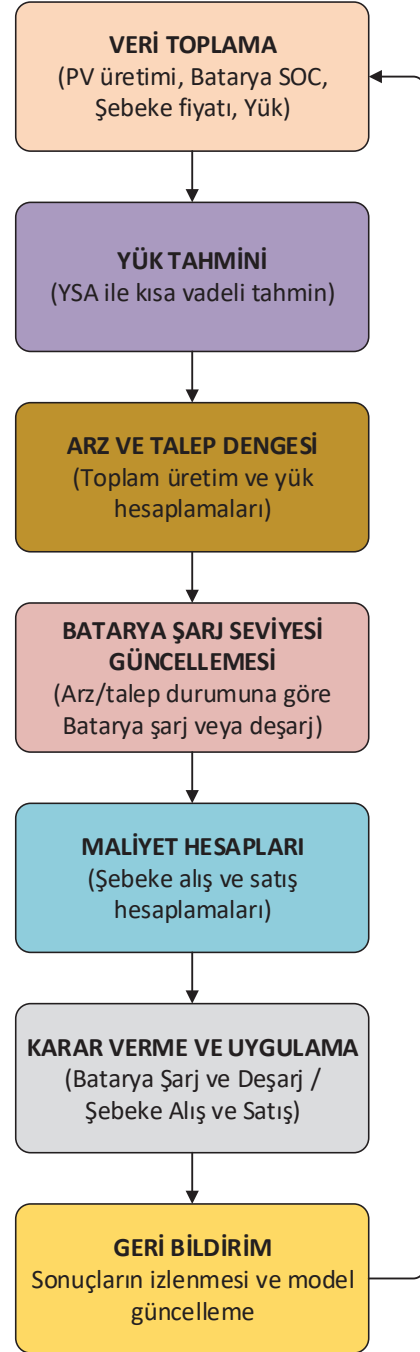
Bu formülde, C_{top} sistemin toplam enerji maliyetini temsil eder ve minimize edilmesi hedeflenen amaç fonksiyonudur. P_{şebeke,alim}(t), t anında şebekeden satın alınan enerji miktarını (kW cinsinden), F_{alim} ise şebekeden enerji alım birim fiyatını (TL/kWh cinsinden) ifade eder. Benzer şekilde, P_{şebeke,satis}(t), t anında şebekeye satılan enerji miktarını, F_{satis} ise şebekeye enerji satış birim fiyatını belirtir. Δt zaman adımını gösterir.

Bu maliyet fonksiyonu, şebekeden alınan enerjinin maliyeti ile şebekeye satılan enerjiden elde edilen gelir arasındaki farkı hesaplayarak, sistemin net enerji maliyetini minimize etmeyi amaçlar. Böylece, enerji yönetim sistemi ekonomik açıdan en optimal kararları alabilir.

6. Karar Verme ve Uygulama: Tahmin edilen yük ve mevcut enerji kaynaklarına göre, batarya şarj/deşarj ve şebeke alış/satış kararları alınır ve uygulanır.

7. Geri Bildirim: Gerçekleşen sonuçlar izlenir ve model sürekli güncellenir.

Enerji yönetimi sayesinde, nanoşebeke sisteminin enerji verimliliği ve ekonomik performansı artırılırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu da maksimum düzeye çıkarılmaktadır. Tasarlanan sistemdeki enerji yönetim sistemi aşamaları ve akış diyagramı Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. Tasarlanan sistemdeki enerji yönetim sistemleri akış diyagramı

Bu çalışmada karşılaştırma amacıyla tasarlanan kural tabanlı enerji yönetim sistemi, enerji akışını belirli eşik değerlerine dayalı kurallar ile yöneten deterministik bir yöntemdir. Model, her kontrol adımında fotovoltaik (PV) üretimi, yük talebi ve batarya şarj durumu (SOC) değişkenlerini izlemekte ve bu verilere bağlı olarak enerji yönlendirme kararlarını vermektedir.

Enerji yönetim sisteminin çalışma prensibi aşağıdaki kurallara dayanmaktadır:

Kural 1: PV üretimi yük talebini aştığında fazla enerji öncelikle bataryayı şarj etmekte kullanılır; batarya dolu olduğunda ise fazla enerji şebekeye satılmaktadır.

Kural 2: PV üretimi yetersiz olduğunda ve batarya SOC değeri %30'un üzerindeyse, sistem yükü bataryadan karşılanmaktadır.

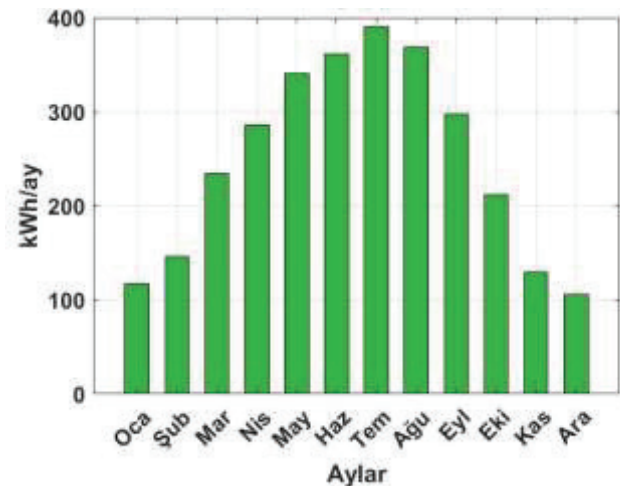
Kural 3: PV üretimi yetersiz ve SOC %30'un altındaysa, yük talebi şebekeden alınan enerji ile karşılanmaktadır.

Kural 4: Şebeke enerji fiyatının yüksek olduğu saatlerde (örneğin akşam saatleri) batarya enerjisinin kullanımı önceliklidir; düşük tarife dönemlerinde (örneğin sabah saatleri) batarya yeniden şarj edilmektedir.

Bu yapı, enerji yönetim kararlarının basit, sezgisel ve kolay uygulanabilir biçimde verilmesini sağlamaktadır. Ancak kural tabanlı yöntemin yapısı, yenilenebilir kaynaklardaki dalgalanmalara ve yük profilindeki ani değişimlere dinamik olarak uyum sağlayamamaktadır. Bu nedenle çalışmada geliştirilen YSA tabanlı yönetim modeli, kural tabanlı yapıya göre daha yüksek doğruluk ve adaptasyon yeteneği sunarak sistem performansını iyileştirmektedir.

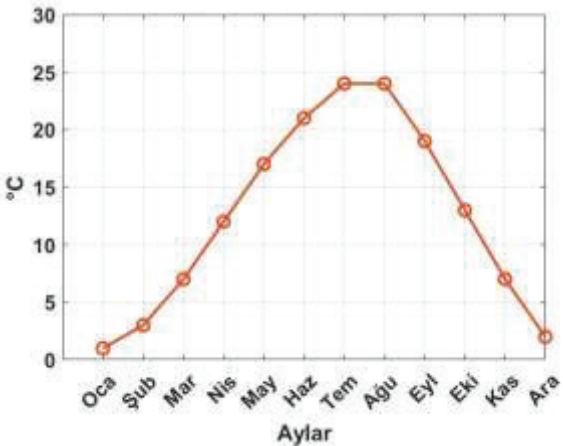
4. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan nanoşebeke sistemi MATLAB/Simulink'te simüle edilmiştir. Sistemin etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla çıkışlar takip edilerek, şekiller oluşturulmuş ve yorumlanmıştır.



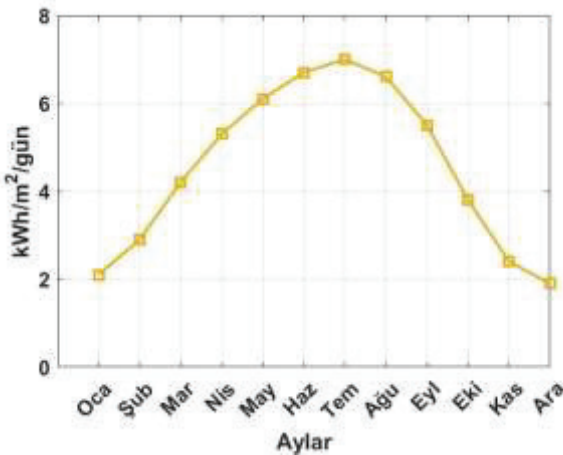
Şekil 4. PV Üretimi (kWh/ay)

Ankara’da, her biri yaklaşık 1,8 m² ve 180 W gücünde olan 10 adet PV panel (toplam 18 m², 1,8 kW) ile elde edilen aylık ortalama PV üretimi Şekil 4’te gösterilmektedir. En yüksek üretim Temmuz ayında 378 kWh, en düşük üretim ise Aralık ayında 106 kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu değişim, Ankara’nın coğrafi konumuna bağlı yıllık güneşlenme süresi ve ısıtım potansiyeliyle uyumlu olup, PV sistemin beklenen mevsimsel çalışma eğilimini doğrulamaktadır. Yaz aylarında yüksek ısıtım seviyesi PV verimini artırırken, kış aylarında düşük ısıtım ve kısa gün uzunluğu üretimi sınırlamaktadır. Bu durum, enerji dengesinin korunmasında batarya ve şebeke etkileşiminin kritik rolünü göstermektedir. Ayrıca, PV üretiminin mevsimsel dalgalanması, yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sisteminin tahmin doğruluğu ve optimizasyon başarısı açısından temel bir test senaryosu oluşturmaktadır.



Şekil 5. Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)

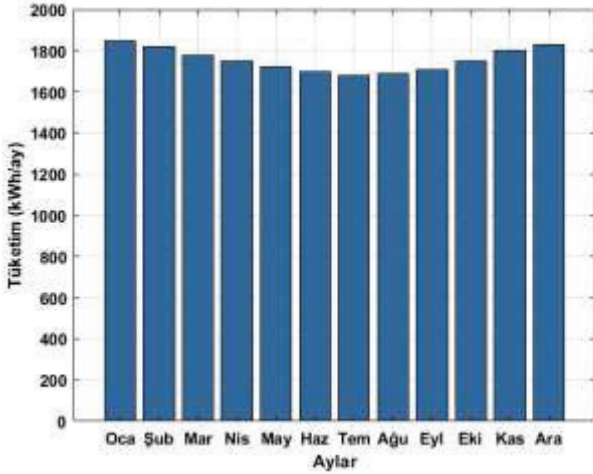
Ankara’da aylık ortalama sıcaklık profili Şekil 5’te sunulmaktadır. En düşük sıcaklık Ocak ayında 1 °C, en yüksek sıcaklık ise Temmuz–Ağustos döneminde 24 °C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık değişimleri, hem PV sisteminin elektriksel verimliliği hem de yük profili üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır. Fotovoltaik panellerde sıcaklığın artması hücre verimini düşürerek üretim kapasitesinde yaklaşık %0,4–0,5/°C seviyesinde azalmaya neden olur, bu nedenle yaz aylarında yüksek ısıtımına rağmen PV çıkışı nispeten sınırlanabilmektedir. Buna karşılık, kış aylarında düşük sıcaklık nedeniyle PV verimi artsa bile ısıtım kaynaklı elektrik yükü yükseldiğinden, toplam enerji dengesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu eğilim, enerji yönetim stratejisinin yalnızca ısıtım değil, sıcaklık parametresini de karar mekanizmasına dahil etmesinin gerekliliğini göstermektedir.



Şekil 6. Aylık Güneş Işınmı (kWh/m²/gün)

Ankara’da aylık ortalama günlük toplam güneş ısıtım değeri Şekil 6’da gösterilmektedir. Haziran ve Temmuz aylarında ısıtım değeri 7,0 kWh/m²/gün seviyesine ulaşırken, Aralık ayında 1,9 kWh/m²/gün ile en düşük seviyededir. ısıtım seviyesindeki bu değişim, PV üretimindeki mevsimsel dalgalanmanın temel belirleyicisidir ve PV sistem performansının coğrafi konum ve iklim koşullarına duyarlılığını ortaya koymaktadır. Yüksek ısıtım değeri yaz aylarında PV üretimini artırırken, düşük kış değeri şebeke

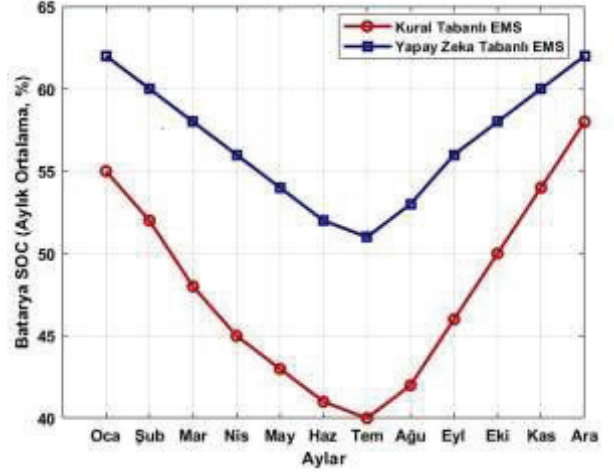
bağımlılığını yükseltmektedir. Bu eğilim, enerji yönetim stratejisinin mevsimsel ısıtım farklılıklarını dikkate alarak batarya şarj-deşarj kararlarını optimize etmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca elde edilen dağılım, Türkiye'nin orta enlemdeki güneş potansiyeline ilişkin literatürde raporlanan ortalama 5,5 kWh/m²/gün değeri ile uyumluluk göstererek modelin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 7. Yık (Tüketim) (kWh/ay)

Şekil 7'de, nanoşebeke sisteminin aylık toplam elektrik yükü (tüketimi) gösterilmektedir. Aylık toplam tüketim değeri yaklaşık 1680–1850 kWh aralığında seyretmekte olup, bu durum sistemde ortalama 2.5 kW'lık sürekli bir yükün varlığını göstermektedir. Yüksek tüketim değeri özellikle kış ve yaz dönemlerinde, iklimlendirme (ısıtma/soğutma) ihtiyaçlarının artmasına bağlı olarak yükselmekte; bahar aylarında ise talep azalmaktadır. Bu trend, konut tipi nanoşebeke sistemlerinde literatürde raporlanan mevsimsel yük desenleriyle uyumludur.

Yük profilinin yıl boyunca istikrarlı bir şekilde sürmesi, enerji yönetim sistemi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır; çünkü bu durum, yapay zekâ tabanlı yük tahmini algoritmalarının öğrenme başarısını ve öngörü doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, düzenli ve nispeten yüksek yük talebi, batarya kapasitesi, PV panel alanı ve şebeke bağlantı güçlerinin optimum biçimde boyutlandırılmasını gerektirir. Bu nedenle, yük profilinin analizi yalnızca sistem tasarımında değil, yapay zekâ tabanlı enerji yönetiminin dinamik karar süreçlerinin doğruluğunda da belirleyici bir faktördür.

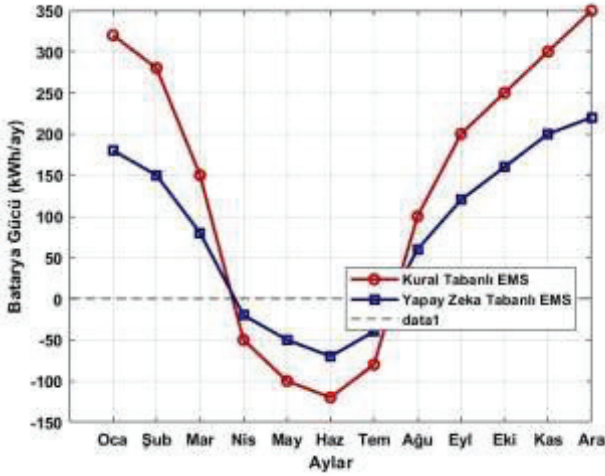


Şekil 8. Batarya batarya şarj seviyesi SOC (Aylık Ortalama, %)

Şekil 8'de, kural tabanlı ve yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri için batarya şarj seviyesi (SOC) aylık ortalama değeri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Kural tabanlı enerji yönetim sisteminde SOC değerlerinin yıl boyunca büyük dalgalanmalar göstermesi, SOC'un daha geniş bir aralıkta değiştiğini ve enerji akışının daha tepkisel (reaktif) biçimde yönetildiğini göstermektedir. Özellikle PV üretiminin düşüş gösterdiği veya yük talebinin arttığı dönemlerde bataryanın aşırıdeşarjı, minimum SOC sınırına yaklaşarak batarya sağlığı ve sistem kararlılığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır.

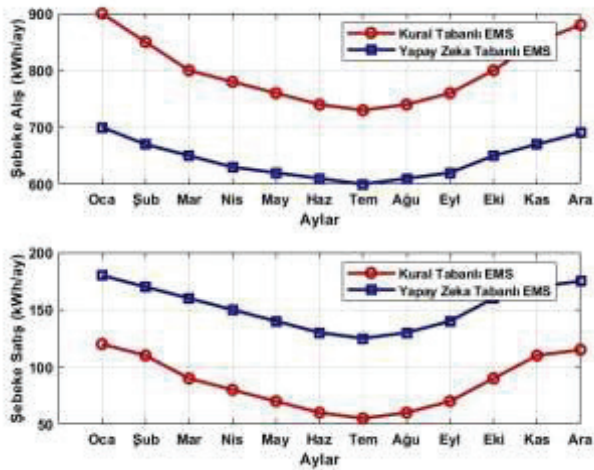
Yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sisteminde ise SOC değerleri daha stabil bir aralıkta (yaklaşık %50–%62) tutulmuş ve dalgalanmalar önemli ölçüde azalmıştır. Grafikten kural tabanlı yöntemde SOC'un yaklaşık %45–%62 aralığında seyrettiği; dolayısıyla değişim aralığının yaklaşık %17 olduğu, YSA tabanlı yöntemde ise yaklaşık %50–%62 aralığında kalarak değişim aralığının yaklaşık %12 ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca minimum SOC değeri açısından YSA tabanlı yaklaşım yaklaşık 5 yüzde puan daha yüksek bir alt seviyede kalmaktadır (≈ 45 'e karşı ≈ 50). Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar, yapay zekâ tabanlı yaklaşımın kural tabanlı yöntemle kıyasla SOC dalgalanmasını nicel olarak azalttığını ve bataryayı daha dar bir çalışma bandında işlettiğini göstermektedir. Bu bulgu, literatürde raporlanan akıllı enerji yönetim sistemi uygulamalarıyla tutarlıdır ve modelin pratik uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Şekil 9'da, kural tabanlı ve yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri için batarya gücünün (kWh/ay) aylık değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafikte pozitif değerler bataryanındeşarj (sisteme enerji sağlama), negatif değerler ise şarj (enerji depolama) durumunu ifade etmektedir. Kural tabanlı enerji yönetim sisteminde batarya gücü yıl boyunca daha geniş bir değişim aralığında dalgalanmakta olup, grafikten yaklaşık olarak -100 ile +300 kWh/ay bandına ulaştığı görülmektedir. Yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sisteminde ise batarya gücü daha sınırlı bir bandta (yaklaşık -50 ile +200 kWh/ay) seyretmektedir. Bu karşılaştırma, batarya gücü için aylık değişim aralığının kural tabanlı yöntemde yaklaşık 400 kWh/ay iken YSA tabanlı yöntemde yaklaşık 250 kWh/ay düzeyine indiğini göstermektedir. Dolayısıyla iki yöntem, bataryanın aylık şarj/deşarj büyüklükleri bakımından nicel olarak ayrılmaktadır.



Şekil 9. Batarya Çıkış Gücü (kWh/ay)

Yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sisteminde batarya çıkış gücünün daha dar bir bantta kalması, bataryanın aylık enerji alışverişinin daha sınırlı genlikte gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 9'daki eğriler, YSA tabanlı yaklaşımda aşırı şarj/deşarj büyüklüklerinin daha az oluştuğunu ortaya koymaktadır. YSA tabanlı kontrol tekniğinin batarya işletim stresini azaltarak sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkı sağlayabildiği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, Şekil 9'dan elde edilen bulgular, yapay zekâ destekli enerji yönetiminin kural tabanlı yöntemle kıyasla batarya gücü dalgalanmalarını azaltan ve daha dengeli bir aylık şarj/deşarj profili sunan bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Şebeke Alış ve Satış (kWh/ay)

Şekil 10'da, kural tabanlı ve yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri için aylık şebeke alış ve satış miktarları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Üst kısımda şebekeden çekilen enerji, alt kısımda ise şebekeye satılan enerji miktarları gösterilmektedir. Kural tabanlı enerji yönetim sisteminde şebekeden enerji alış değerleri yaklaşık 730–900 kWh/ay aralığında seyrederken, yapay zekâ tabanlı yöntemde bu değerlerin yaklaşık 600–700 kWh/ay bandına indiği görülmektedir. Aylık bazda iki yöntem arasındaki alış farkı şekilden yaklaşık 100 kWh/ay ve üzeri mertebelerde izlenmektedir. Şebekeye

satış tarafında ise kural tabanlı yöntemde satış miktarı yaklaşık 55–120 kWh/ay aralığında kalırken, yapay zekâ tabanlı yöntemde satış miktarının yaklaşık 125–180 kWh/ay bandında gerçekleştiği görülmektedir. Buna karşılık, satış tarafındaki farkın aylık bazda genel olarak ~50 kWh/ay ve üzeri düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, Şekil 10, yapay zekâ tabanlı yaklaşımın şebeke alışını kWh/ay cinsinden düşürdüğünü ve şebeke satışını kWh/ay cinsinden artırdığını göstermektedir.

Yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemi ise yük tahmini ve optimizasyon algoritmalarıyla enerji akışını daha proaktif biçimde düzenleyerek, şebekeden alınan enerjiyi azaltmış ve şebekeye yapılan satış miktarını artırmıştır. Bu durum, PV üretim fazlasının batarya şarjında ve şebeke satışında dengeli kullanılmasını sağlayarak sistem verimliliğini yükseltmektedir. Elde edilen sonuçlar, yapay zekâ tabanlı kontrol yaklaşımının yalnızca enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanım oranını da artırdığını göstermektedir. Literatürde bildirilen benzer yapay zekâ tabanlı enerji yönetim çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, geliştirilen sistemin enerji alış miktarını yaklaşık %15–20 oranında azaltarak ekonomik performansta belirgin bir iyileşme sağladığı görülmektedir [16–18]. Bu bulgular, önerilen yöntemin nanoşebekelerde sürdürülebilir ve maliyet etkin enerji yönetimi açısından somut bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, Ankara koşullarında 10 adet PV panel ve batarya içeren bir nanoşebeke sisteminde, enerji yönetim sistemlerinin performansı güncel şebeke fiyatları ve gerçekçi üretim–tüketim profilleriyle analiz edilmiştir. Şekil 4–7'de gösterilen PV üretimi, sıcaklık, güneş ışınımı ve yük profili, sistemin dışsal girdilerini tanımlayarak enerji dengesinin dinamiklerini oluşturmuştur. Bu parametreler, farklı çevresel koşullarda enerji yönetim sisteminin karar verme ve adaptasyon kabiliyetinin değerlendirilmesine zemin hazırlamaktadır. Karşılaştırmalı analiz sonuçları, yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sisteminin performansında belirgin bir üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Şekil 8'de görüldüğü üzere, YSA tabanlı enerji yönetim sisteminin batarya doluluk oranını yıl boyunca daha dengeli ve yüksek aralıkta (%50–%62) tutması, batarya sağlık göstergelerinin korunmasına ve sistem esnekliğinin artmasına katkı sunmuştur. Buna karşın, kural tabanlı sistemde SOC dalgalanmalarının büyük olması, kontrol kararlarının çevresel değişkenlere yeterince uyum sağlamadığını göstermektedir.

Şekil 9'da yer alan batarya güç dağılımı analizi, yapay zekâ tabanlı sistemin şarj–deşarj döngülerini daha öngörülü ve kararlı biçimde yönettiğini ortaya koymaktadır. Bu davranış, sadece batarya ömrünü uzatmakla kalmamış, aynı zamanda PV üretim fazlasının daha etkin değerlendirilmesini sağlayarak şebeke satış fırsatlarını artırmıştır. Şekil 10'da görülen sonuçlar da bu eğilimi desteklemekte, YSA tabanlı yönetim sisteminin toplam şebeke alışını anlamlı biçimde azaltırken şebeke satış miktarını artırdığını göstermektedir. Böylece, sistemin dış enerji bağımlılığı azalmış ve ekonomik getiri potansiyeli yükselmiştir. Elde edilen bulgular, yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemlerinin yalnızca operasyonel verimlilik açısından değil, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarında da klasik yöntemlere göre üstün performans sergilediğini göstermektedir. Bu sonuç, literatürde raporlanan benzer çalışmalar ile tutarlılık göstermekte ve geliştirilen modelin bütünlük tahmin–optimizasyon yapıyla özgün bir metodolojik katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yapay zeka tabanlı ve kural tabanlı enerji yönetim sistemi yöntemlerinin performansları istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Analiz kapsamında hata ölçütleri olarak Ortalama Kare Hata (MSE), Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata

(MAPE) ve Belirlilik Katsayısı (R^2) kullanılmıştır. Simülasyon çıktıları üzerinden yapılan hesaplamalar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Enerji Yönetim Sistem Modellerinin Performanslarının İstatiksel Karşılaştırılması

Yöntem	MSE	RMSE	MAPE (%)	R^2
Kural Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi	0.0124	0.111	6.8	0.92
YSA Tabanlı Enerji Yönetim Sistemi	0.0025	0.050	2.3	0.987

Değerlendirme ölçütleri olarak MSE, RMSE, MAPE ve R^2 raporlanmıştır; test kümesinde MSE=0.0025, RMSE=0.050, MAPE=%2.3 ve R^2 =0.987 değerleri elde edilmiştir. Bu doğruluk düzeyi, enerji yönetim sisteminin batarya şarj/deşarj ve şebeke alış/satış kararlarında daha isabetli ve ekonomik açıdan üstün bir performans sağlamasına katkı sunmaktadır. YSA tabanlı sistem, hata oranları açısından klasik yöntemle kıyasla belirgin bir üstünlük sergilemiştir. RMSE ve MAPE değerlerinin düşük olması, modelin tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu; R^2 katsayısının 0.987 olması ise modelin yük tahmini performansının kuvvetli bir korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kural tabanlı ve YSA tabanlı enerji yönetim sistemlerinin aylık toplam şebeke alış miktarları, 12 aylık gözleme dayalı bağımsız iki örneklem tek yönlü t-testi ile karşılaştırılmış ve aradaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Testte, aylık değerlerin yaklaşık normal dağıldığı ve varyansların benzer olduğu varsayılmıştır. Buna karşın, YSA tabanlı yaklaşımın kural tabanlı yöntemle göre daha yüksek hesaplama yükü getirdiği ve özellikle düşük donanım kapasiteli gömülü uygulamalarda gerçek zamanlı çalıştırma için optimizasyon ve donanım kaynaklarının dikkatle planlanması gerekmektedir.

Sonuç olarak, enerji yönetim sistemlerinin etkinliği yalnızca enerji akışlarını yönetmekle sınırlı kalmayıp, batarya sağlığını koruma, şebeke ile etkileşimi optimize etme ve toplam maliyeti düşürme gibi çok boyutlu faydalar sağlamaktadır. Özellikle yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemleri, gelişmiş tahmin ve optimizasyon yetenekleri sayesinde, nanoşebeke uygulamalarında sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Ankara koşullarında 10 adet PV panel ve batarya içeren bir nanoşebeke sisteminde, klasik (kural) ve yapay zeka(YSA) tabanlı enerji yönetim sistemlerinin performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerçek aylık sıcaklık, güneş ışınımı ve yük verileriyle yapılan simülasyonlar, enerji yönetim sistemlerinin sistem performansı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemlerinin klasik yöntemle göre önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemleri, yük ve üretim tahmini ile batarya ve şebeke yönetimini optimize ederek, batarya doluluk oranını yıl boyunca daha dengeli ve yüksek seviyelerde tutmuş, batarya ömrünü uzatmış ve sistemin esnekliğini artırmıştır. Ayrıca, toplam şebeke alışını %8 oranında azaltmış ve şebekeye satış miktarını %12 oranında artırarak sistemin ekonomik performansını iyileştirmiştir. Bu sonuçlar, yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemlerinin enerji maliyetlerini düşürmede ve gelirleri artırmada daha etkin olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada geliştirilen model, örnek bir uygulama senaryosu olarak Ankara ili iklim koşulları ve yük profili dikkate alınarak tasarlanmıştır. Ancak geliştirilen YSA tabanlı enerji yönetim

algoritması; sıcaklık, ışınım ve yük profili gibi giriş değişkenlerinin yeniden ölçeklenmesiyle, farklı iklim bölgeleri ve tüketim alışkanlıklarına potansiyel olarak uyarlanabilir. Bu esneklik, modelin genel yapısal bağımsızlığından ve veriye dayalı öğrenme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan veri seti 288 örnekle sınırlıdır ve bu durum, elde edilen sonuçların farklı iklim ve yük koşullarına doğrudan genellenebilirliği konusunda önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Ayrıca, YSA tabanlı enerji yönetim sistemi, klasik kural tabanlı yöntemle kıyasla daha yüksek doğruluk ve ekonomik iyileşme sağlamakla birlikte, eğitim ve çevrim içi çalıştırma sırasında daha fazla hesaplama kaynağı gerektirmektedir. Bu nedenle, gömülü donanımlarda ve gerçek zamanlı uygulamalarda model karmaşıklığının, işlemci kapasitesi ve gecikme kısıtlarıyla birlikte tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda, farklı coğrafi bölgeler ve çeşitli yük profilleri (konut, endüstriyel, ticari) altında, daha geniş ve çeşitlendirilmiş veri setleri ile modelin performansının ayrıntılı biçimde incelenmesi ve genellenebilirliğinin sistematik olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Gelecek beklentileri açısından, yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemlerin daha gelişmiş tahmin algoritmaları, gerçek zamanlı veri analitiği ve bulut tabanlı yönetim sistemleriyle entegre edilmesiyle, nanoşebeke ve mikroşebeke uygulamalarında daha yüksek verimlilik ve esneklik sağlanması beklenmektedir. Ayrıca, enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler ve elektrikli araç entegrasyonu ile birlikte, enerji yönetim sistemlerin çoklu enerji kaynağı ve yük yönetimi konusunda daha karmaşık ve akıllı stratejiler geliştirmesi öngörülmektedir. Bununla birlikte, karşılaşılan zorluklar da göz ardı edilmemelidir. Yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemlerin yaygınlaşması için, güvenilir veri toplama altyapısı, siber güvenlik önlemleri, algoritma şeffaflığı ve kullanıcı kabulü gibi konuların çözülmesi gerekmektedir. Ayrıca, yapay zeka modellerinin eğitimi için yeterli ve kaliteli veri setlerine ihtiyaç duyulmakta, sistemlerin gerçek zamanlı çalışabilmesi için ise güçlü donanım ve yazılım altyapısı gerekmektedir.

Sonuç olarak, yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemler, nanoşebeke sistemlerinde sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve enerji bağımsızlığı açısından önemli fırsatlar sunmakta; ancak bu potansiyelin tam olarak hayata geçirilebilmesi için teknik, ekonomik ve düzenleyici zorlukların aşılması gerekmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, S. Rahman, "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 2166-2173, 2012.
- [2] S.A. Pourmousavi, M. H. Nehrir, "Real-Time Central Demand Response for Primary Frequency Regulation in Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1988-1996, 2012.
- [3] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," IEEE Access, vol. 3, pp. 890-925, 2015.
- [4] S.A.Arefifar, Y. A.-R. I. Mohamed, T. H. M. El-Fouly, "Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4192-4200, 2013.
- [5] M. E. Baran, I. El-Markaby, "A Multiagent-Based Dispatching Scheme for Distributed Generators for Voltage Support on Distribution Feeders," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 52-59, 2007.
- [6] S. Bahramirad, W. Reder, A. Khodaei, "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 2056-2062, 2012.
- [7] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, "Review of communication technologies for smart homes/building applications," 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, pp. 1-6, 2015.
- [8] M. R. Khan, Z. M. Haider, F. H. Malik, F. M. Almasoudi, K. S. S. Alatawi, M. S. Bhutta, "A comprehensive review of microgrid energy

- management strategies considering electric vehicles, energy storage systems, and AI techniques," *Processes*, vol. 12, no. 2, p. 270, 2024.
- [9] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771-789, 2017.
- [10] S. E. Eyimaya and N. Altin, "Review of energy management systems in microgrids," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 1249, 2024.
- [11] N. Einabadi and M. Kazerani, "Nanogrids in modern power systems: A comprehensive review," *Smart Cities*, vol. 8, no. 1, p. 11, 2025.
- [12] M.C.Di Piazza, "Volume II: Energy management systems for optimal operation of electrical micro/nanogrids," *Energies*, vol. 17, p.1811, 2024.
- [13] H. Shareef, M. S. Ahmed, A. Mohamed, and E. Al Hassan, "Review on home energy management system considering demand responses, smart technologies, and intelligent controllers," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24498–24509, 2018.
- [14] O. Ali and O. A. Mohammed, "Real-time co-simulation implementation for voltage and frequency regulation in standalone AC microgrid with communication network performance analysis across traffic variations," *Energies*, vol. 17, no. 19, p. 4872, 2024.
- [15] N. T. Mbungu, R. C. Bansal, R. M. Naidoo, M. W. Siti, A. A. Ismail, A. Elnady, and A. K. Hamid, "Performance analysis of different control models for smart demand-supply energy management system," *Journal of Energy Storage*, vol. 90, p. 111809, 2024.
- [16] K. Ukoba, K. O. Olatunji, E. Adeoye, T. C. Jen, and D. M. Madyira, "Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects," *Energy & Environment*, vol. 35, no. 7, pp. 3833–3879, 2024.
- [17] A. R. Singh, R. S. Kumar, M. Bajaj, C. B. Khadse, and I. Zaitsev, "Machine learning-based energy management and power forecasting in grid-connected microgrids with multiple distributed energy sources," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 19207, 2024.
- [18] H. Wicaksono, M. Trat, A. Bashyal, T. Boroukhian, M. Felder, M. Ahrens, and T. Zoerner, "Artificial-intelligence-enabled dynamic demand response system for maximizing the use of renewable electricity in production processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 138, no. 1, pp. 247–271, 2025.
- [19] G. Indira, M. Bhavani, R. Brinda, and R. Zahira, "Electricity load demand prediction for microgrid energy management system using hybrid adaptive barnacle-mating optimizer with artificial neural network algorithm," *Energy Technology*, vol. 12, no. 5, p. 2301091, 2024.
- [20] M. M. H. Jin, S. H. Nengroo, J. Jin, D. Har, and S. Lee, "P2P power trading based on reinforcement learning for nanogrid clusters," *Expert Systems with Applications*, vol. 255, p. 124759, 2024.
- [21] N. Alfred, V. Guntreddi, A. N. Shuaibu, and M. S. Bakare, "A fuzzy logic based energy management model for solar PV–wind standalone with battery storage system," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 24660, 2025.
- [22] O. Shahhoseini, "Microgrid and nanogrid implementation in smart cities," in *Sustainable Energy Resources in Smart Cities*, pp. 175–202, 2025.
- [23] Y. Yerasimou, M. Kynigos, V. Efthymiou, and G. E. Georghiou, "Design of a smart nanogrid for increasing energy efficiency of buildings," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3683, 2021.
- [24] J. Li, Q. Luo, D. Mou, Y. Wei, P. Sun, X. Du, and M. Liserre, "Energy optimization management strategy for DC nano-grid cluster with high comprehensive energy efficiency," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 6, pp. 4439–4450, 2023.

Özgeçmiş



Süleyman Emre Eyimaya, 2014 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans, 2019 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans ve 2024 yılında yine Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimini tamamladı. 2011-2012 yılları arasında öğrenci değişim programı kapsamında Almanya'daki Düsseldorf Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim gördü. 2014 yılında 4. Bölge Karayolları Müdürlüğü'nde Elektrik ve Elektronik Mühendisi olarak meslek hayatına başladı ve 2017-2019 yılları arasında Ankara Üniversitesi Elektronik ve Otomasyon Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalıştı. 2019 yılında ise Hırvatistan'daki Zagreb Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde misafir öğretim görevlisi olarak araştırma yaptı. Gazi Üniversitesi Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TUSAŞ-Kazan Meslek Yüksekokulu'nda; 2019-2024 yılları arasında öğretim görevlisi, 2025 yılından beri doktor öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. 20 yayını ve 1 projesi bulunmaktadır. Bunlardan 3'ü uluslararası kitap bölümü, 5'i ise SCI indeksli yayındır. 16 uluslararası kongrede sözlü sunum yapmıştır. Yenilenebilir enerji sistemleri, akıllı şebekeler ve enerji depolama sistemleri üzerine akademik çalışmalarına devam etmektedir.