

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması

Abdullah Kürşat AKTAR^{1*}  Murat KARAKILIÇ² 

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

²Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Iğdır, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 14/08/2024
Revision: 16/09/2024
Accepted: 15/10/2024

Keywords

Electric vehicle
Energy storage
Dynamic pricing,
Microgrid
Renewable energy

Makale Bilgisi

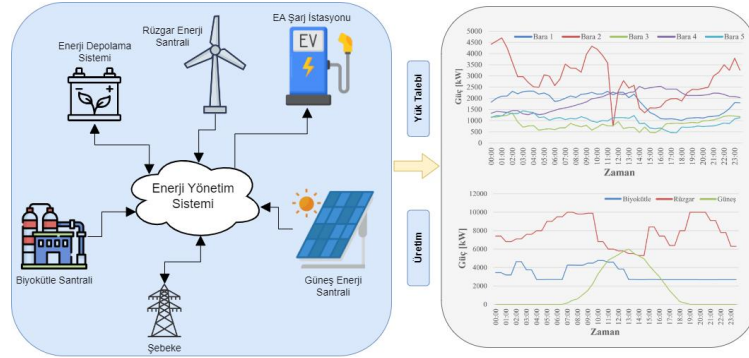
Araştırma makalesi
Başvuru: 14/08/2024
Düzeltilme: 16/09/2024
Kabul: 15/10/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araç
Enerji depolama
Dinamik fiyatlandırma
Mikro şebeke
Yenilenebilir enerji

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, kendine yetmesi amaçlanan fakat şebeke bağlantısı mevcut, elektrikli araç yükünü de karşılayacak bir mikro şebekenin tasarımı yapılmaktadır. Oluşturulan optimizasyon algoritması ile enerji santrallerinin sisteme vermeyi teklif ettikleri enerji miktarı ve fiyat bilgisi alınıp, yük talebi ve enerji depolama sistemlerinin mevcut durumları analiz edilerek optimum şebeke şartlarının oluşması hedeflenmektedir. /In this study, a microgrid which is intended to be self-sufficient but has a grid connection, is designed to meet the load demand of electric vehicles. Optimization algorithm aims to create optimum grid conditions by obtaining the amount of energy and price information that power plants offer to the system and analyzing the current conditions of load demand and energy storage systems.



Şekil A: Tasarlanan sistemin grafik gösterimi /Figure A: Graphical representation of the designed system

Önemli noktalar (Highlights)

- Günlük yük talebinin güvenilir şekilde karşılanması / Reliable supply of daily load demand.
- Mevcut yenilenebilir enerji sistemlerinin daha etkin kullanımı. / More effective use of existing renewable energy systems.
- Etkin şebeke yönetimi ile tüketici lehine avantajlı piyasa fiyatlarının sağlanması / Providing advantageous market prices in favor of the consumer through effective grid management.

Amaç (Aim): Yakın bölge yenilenebilir enerji santrallerinden faydalanarak teknik ve ekonomik olarak sürdürülebilir, kendine yeten bir sistem elde etmektir. / To achieve a technically and economically sustainable, self-sufficient system by utilizing renewable energy plants in the surrounding region.

Özgünlük (Originality): Elektrikli araç, yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemleri içeren çevreye duyarlı, verimli ve sürdürülebilir bir sistem oluşturulması / Creating an environmentally friendly, efficient and sustainable system that includes electric vehicles, renewable energy and energy storage systems

Bulgular (Results): ED sistemi işletmecisinin en fazla ekonomik faydayı 1463.896 \$ ile Durum 2'de elde edildiği görülürken, tüketici açısından en ekonomik şartlar Durum 3'te ortaya çıkmakta, ED sistemi işletmecisinin kazancında Durum 2'ye göre %45.59 düşüş gerçekleşmektedir. / While the most economic benefit for the ED system operator is obtained in Case 2 with \$1463,896, the most economic conditions for the consumer occur in Case 3, with a 45.59% decrease in the ED system operator's earnings compared to Case 2.

Sonuç (Conclusion): Arz talep dengesinin tüm durumlarda sağlandığı, ekonomik faydaların ise bazı durumlarda üretici bazı durumlarda tüketici lehine gerçekleştiği görülmektedir. / It is observed that the supply-demand balance is achieved in all cases and that economic benefits are realized in favor of the producer in some cases and the consumer in others.

Optimal Operation of a Microgrid Powered by Renewable Energy Sources with the Support of Energy Storage Systems

Abdullah Kürşat AKTAR^{1*}  Murat KARAKILIÇ² 

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

²Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Iğdır, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 14/08/2024

Revision: 16/09/2024

Accepted: 15/10/2024

Keywords

Electric vehicle

Energy storage

Dynamic pricing,

Microgrid

Renewable energy

Abstract

The depletion of conventional fossil fuels, which are the main energy source of the electricity grid, and the international environmental concerns about them, as well as the challenges brought by the increasing installed power ratio of renewable energy sources (RES), which have an intermittent nature, in the system, are increasing the interest of system operators on the subject. Besides, especially in the first phase, the electrification of the light vehicle part of the transportation sector increases the pressure on the grid to an additional extent. In this study, a microgrid which is intended to be self-sufficient but has a grid connection, is designed to meet the load demand of electric vehicles (EV). The optimization algorithm aims to create optimum grid conditions by obtaining the amount of energy and price information that power plants offer to the system and analyzing the current conditions of load demand and energy storage (ES) systems. The economic and technical results of the algorithm designed through 4 different case studies are analyzed in terms of both producers and consumers. The results show that the supply and demand balance is achieved in all cases and economic benefits are realized in favor of the producer in some cases and the consumer in others.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 14/08/2024

Düzeltilme: 16/09/2024

Kabul: 15/10/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araç

Enerji depolama

Dinamik fiyatlama

Mikro şebeke

Yenilenebilir enerji

Öz

Elektrik şebekesinin temel enerji kaynağı olan geleneksel fosil yakıtların tükenmesi ve onlara dair uluslararası çevresel kaygılar ile süresiz karaktere sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) sistem içerisindeki kurulu güç oranının her geçen gün artmasının getirdiği zorluklar sistem yöneticilerinin konu üzerine ilgisini artırmaktadır. Diğer yandan ulaşım sektörünün özellikle ilk aşamada hafif vasıta kısmının elektrikli hale gelmesi şebeke tarafında yükü bir miktar daha artırmaktadır. Bu çalışmada, kendine yetmesi amaçlanan fakat şebeke bağlantısı mevcut elektrikli araç (EA) yükünü de karşılayacak bir mikro şebekenin tasarımı yapılmaktadır. Oluşturulan optimizasyon algoritması ile enerji santrallerinin sisteme vermeyi teklif ettikleri enerji miktarı ve fiyat bilgisi alınıp, yük talebi ve enerji depolama (ED) sistemlerinin mevcut durumları analiz edilerek optimum şebeke şartlarının oluşması hedeflenmektedir. Oluşturulan 4 farklı durum çalışması üzerinden tasarlanan algoritmanın üretici ve tüketici açısından hem ekonomik hem teknik sonuçları analiz edilmektedir. Elde edilen sonuçlar oluşturulan algoritma sayesinde arz talep dengesinin tüm durumlarda sağlandığını, ekonomik faydaların ise bazı durumlarda üretici bazı durumlarda tüketici lehine gerçekleştiğini göstermektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji talebinin beklentilere uygun şekilde yıllık %1.3 artış göstermesi ve enerji tedarik zincirinin aksamasına sebebiyet veren bölgesel çatışma seviyesini aşmış uluslararası anlaşmazlıklar, enerji fiyatları üzerinde önemli etki üretmektedir [1]. Artan tüketimi ve politik kaygılarla bağlantılı olarak enerji güvenliği konuları dikkate alındığında yenilenebilir enerji

kaynaklarından (YEK) üretilen elektrik enerjisinin her geçen gün payını büyütmesi beklenmektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi tarafındaki büyüme ile birlikte 2050 yılında birincil enerjinin fosil yakıt dışı payının %34 seviyesine kadar yükselebileceği öngörülmektedir [2]. YEK alanındaki teknolojinin gelişme hızı, kamuoyunun yaklaşımı vb. etkenler de fosil yakıt dışı kaynaklara yönelimi artıracaktır.

Elektrik şebekesinde sadece fosil yakıtlardan beslenen merkezi büyük enerji santralleri bulunduğu şebeke yönetimi daha az değişken dikkate alınarak yapılırken, farklı kurulu güç seviyesinde YEK içeren enerji üretim tesislerinin dahil olması ile yönetim zor hale gelmektedir. Bu zorlukları elektrik şebekesini dijitalleştirerek aşmak ve şebekeye daha fazla YEK tesisi entegrasyonu sağlamak adına akıllı şebeke kavramı ortaya çıkmaktadır [3]. Ayrıca bu şebekelerde, üretim, iletim, dağıtım ve yeni gelişmekte olan depolama teknolojileri arasında bir bağ kurularak tüm paydaşlar açısından ekonomik ve teknik faydalar elde edilebilir [4]. Kurulu güç içerisinde YEK oranının artması elektrik şebekesinin hava koşullarındaki değişime daha duyarlı hale gelmesine sebebiyet verirken, buna bağlı olarak şebeke frekansının yönetilmesinde zorluklar meydana getirmektedir. Teknolojinin getirdiği avantajlar sayesinde, bu tarz karmaşık yapıya sahip şebekelerin analiz edilerek frekans kararlılığını geliştirmek için çevrimiçi araçlar geliştirilebilmektedir [5].

Farklı bir bakış açısı ile YEKlerin kesintili doğasından kaynaklı belirsizlikleri azaltmak ve çok amaçlı kullanımı teşvik etmek için nükleer enerji gibi farklı tip kaynaklarla desteklenen entegre enerji sistemleri kullanarak elektrik enerjisi yanında hidrojen ve temiz su üretimi yapılabilir [6]. Ayrıca bu tarz sistemlerde uzaktan kontrol edilen yükler, sabit ve mobil enerji depolama (ED) sistemleri ve rota planlaması yapılan elektrikli araçlar (EA) bulunduğu karmaşık yapının getirdiği zorluklar için akıllı şebeke yönetimi sayesinde esneklik oluşturulabilir [7]. Diğer yandan, otobüs ve tren gibi toplu taşıma faaliyetlerinin ihtiyaç duyduğu enerjinin elektrik şebekesinden sağlıklı şekilde temin edilmesi taşıma kapasitesi, bataryanın doluluk durumu, şebekenin yük seviyesi gibi değişkenler dikkate alınarak çevrimiçi optimizasyon yöntemleri ile mümkün olabilir [8]. Talep tarafının akıllı sistemlerle yönetimi tüketici tarafında enerjiye güvenli erişimi sağlarken, elektrik şebekesinin daha etkili kullanılması ile üretim ve iletim tarafında yapılacak yeni yatırımların daha ilerideki bir zamana geciktirilmesini de sağlayabilir [9].

Uluslararası çerçevede değerlendirildiğinde, şebekenin dönüşümü sırasında ekonomik, teknik ve özellikle çevresel kaygıların aynı anda giderilmesi düşüncesi ortak bir hedef olarak kendini göstermektedir. Bu yüzden yapılan birçok araştırmada belirsizlikleri dikkate alarak işletme maliyetlerini düşürmek, CO2 salımını azaltmak ve gerilim kalitesini yükseltmek amacıyla şebeke

optimizasyonu yapılmaktadır [10,11]. Şebeke modellerinin birçoğunda ED sistemleri mekanik, termal, elektrokimyasal, elektriksel ve kimyasal kategorileri altında kendini göstermektedir. Çeşitli depolama teknolojileri üzerinde çalışmalar yoğun bir şekilde sürmekte ve bu teknolojilerden mS mertebesinde cevap zamanına sahip, batarya olarak bilinen elektrokimyasal depolayıcılar ile süper kapasitör olarak bilinen elektriksel depolayıcılar sistem içerisinde kullanımda bir adım önde görünmektedir [12]. Diğer yandan ülkelerin sahip oldukları yerel imkanlar dahilinde depolama teknolojileri hibrit olarak da kullanılabilir. Buna örnek olarak Avustralya'nın yüksek YEK potansiyelinin sisteme entegre edilmesi için önerilen pompalı hidro enerji, sıkıştırılmış hava ve yeşil hidrojen enerji depolama sistemlerinin hibrit olarak kullanıldığı çalışma gösterilebilir [13]. Diğer yandan, Endonezya'nın karbon sıfır hedefi üzerine yapılan çalışmada 2021 – 2045 yılları arasındaki senaryolar çalışarak 2045 yılına ulaşıldığında enerji güvenliği konusunda zafiyet oluşturmadan %100 YEK üretimi ile beslenen sistemin sahip olması gereken ED sistem boyutları tespit edilmektedir [14].

Geleneksel şebekeden akıllı şebekeye geçiş hem üretim hem tüketim tarafında meydana gelen çeşitliliğin sonucu olarak zorunlu hale gelmektedir. Şebeke optimizasyonu, tahmin doğruluğu ve bilinçli karar verme gibi önemli konu başlıklarında büyük veriyi işleyerek önemli kararların verilmesinde makine öğrenmesi gibi teknikler kullanılabilir [15]. Şebekenin enerji akış seçenekleri, sistem bileşenleri, YEK kaynaklarının kurulu olduğu sahalara ait meteorolojik veriler, şebekedeki YEK payı gibi birçok değişken ve parametre analiz edilerek şebekenin optimum işletilmesi sağlanabilir [16]. Geniş çerçeveden değerlendirme yapılmadan akıllı şebekeye veya EA'lar için akıllı şarj yöntemlerine geçilmesi durumunda sistemdeki yetersiz YEK oranı nedeniyle CO2 salımında azalma yerine artışla karşılaşılabilir [17].

Bireysel kullanıcıların şebeke bağımlılığını azaltmak ve çeşitli faydalar sağlamak amacıyla sahip oldukları YEK sistemlerini, EA ve küçük kapasiteli ED sistemini kullanarak dinamik elektrik fiyatlarının işlediği bir piyasada akıllı ev sistemlerini kullanmaları önemli yöntemlerden biridir [18]. Diğer yandan bahsedilen sistemlerin mikro şebeke boyutunda yönetilmesi daha fazla teknik ve ekonomik avantajlar sağlayabilir. Dahası nesnelerin interneti uygulamaları kullanılarak YEK içeren, akıllı, kablosuz EA şarj yönetim sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı düşünüldüğünde çok

sayıda EA'nın bu teknolojiyi kullanması ile ortaya çıkan yük talebinin toplu bir şekilde yönetilmesi gerekliliği de anlaşılmaktadır [19].

Sistemde kayda değer sayıda EA'nın ve ED sistemlerinin bulunması, değişken karaktere sahip güneş ve rüzgâr enerjisini dengeleme, pik yük zamanını kaydırarak şebeke üzerindeki baskıyı azaltma ve piyasa fiyatlarını olumlu etkileme konusunda büyük ve yeni bir esneklik kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır [20]. Böylece artan EA yükü nedeniyle şebekelerde gerekli hale gelen altyapı geliştirmelerinin ötelenmesi hatta iptal edilmesi imkanına kavuşulurken, yeni teknolojiler üzerine yapılan araştırmaların olgunlaşması için zaman kazanılır [21,22,23].

1.1. İçerik ve Katkılar (Content and Contributions)

Bu çalışmada, çeşitli tüketici türlerinin bulunduğu, ana kaynak olarak biyokütle, rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinden beslenen, ED sistemlerine sahip şarj istasyonları bulunan mikro şebeke ele alınmaktadır. Biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjisi tesisi işletmecileri gün içinde değişken üretim ve fiyat teklifleri ile piyasaya elektrik enerjisi satmaktadır. Güneş enerjisi tesisi işletmecisinin sahibi olduğu ED sistemleri çift yönlü enerji akışı ile dilediği zaman dilimlerinde elektrik enerjisini piyasadan satın alıp veya piyasaya satabilmektedir. ED sisteminin operasyonları mikro şebekenin enerji dengesini sağlamada ve piyasa fiyatlarının yükselmesini engellemede kullanılmaktadır. Şarj istasyonu işletmecisi EA kullanıcılarının hizmet talebine sahip olduğu soket sayısına en üst düzeyde yanıt vermeye çalışmaktadır.

Çalışmanın amacı mikro şebekeden beslenen kullanıcıların enerji güvenliğini temin ederken, piyasa fiyatlarının yine kullanıcılar lehine minimum düzeyde kalmasını sağlamaktır. Bu nedenle, yük talebini ve enerji santrallerine ait enerji üretim fiyat ve miktar teklifini toplayarak optimum işletimi tespiti hedefleyen bir kısıtlı optimizasyon algoritması geliştirilir. Sistem tasarımında, enerji arzında yaşanabilecek beklenmeyen durumların üstesinden gelebilmek adına şebeke bağlantısı olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, YEK kaynaklı üretimin ED sistemleri sayesinde farklı zaman diliminde kullanım amaçlı depolanması hedeflenir.

Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibidir:

- Amaçlanan enerji yönetim algoritması, oluşturulan mikro şebekenin ada sistemi uygulaması gibi sadece YEK ile beslenerek ve ED

sistemleri yardımıyla güvenli enerji tedariki sunmasını araştırmaktadır.

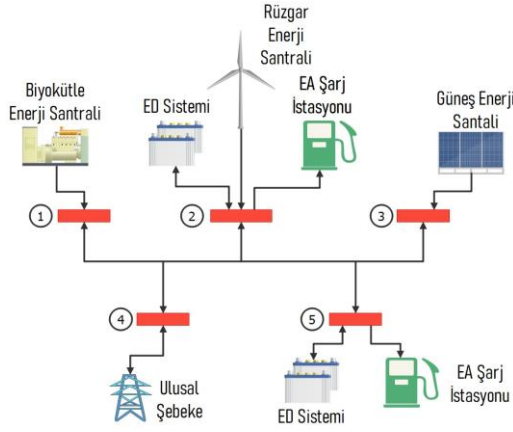
- ED sisteminin ekonomik operasyonları incelenerek bataryadan şebekeye ve şebekeden bataryaya işlemleri ile farklı durum incelemeleri üzerinden karlılığı analiz edilmektedir.

- Tamamı YEK kurulu gücüne sahip bir sistemdeki güneş enerjisi kurulu güç oranı değişiminin hem üretici hem tüketici açısından teknik ve ekonomik sürdürülebilirliğe etkisi irdelenmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu şekilde organize edilmektedir. Bölüm 2'de, tasarlanan sistemin yapısı eşitlikleri ile sunulmaktadır. Bölüm 3'te, optimizasyon algoritmasının etkinliği 4 farklı durum üzerinden değerlendirilmektedir. Son olarak, Bölüm 4'te çalışmanın sonuçları sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada önerilen modelde Şekil 1'de gösterildiği gibi, çeşitli yükleri içeren 5 baralı bir dağıtım sistemi ele alınmaktadır. Sistemdeki yük talebinin karşılanması için farklı bara noktalarına bağlı rüzgâr, güneş ve biyokütle yenilenebilir enerji kaynaklarını (YEK) kullanan enerji santralleri bulunmaktadır. Biyokütle enerji santralinin mikro şebekeye yakın bölgedeki evsel ve ticari işletmelere ait atık veya artık maddelerden sürekli olarak beslendiği varsayılmaktadır. Bu nedenle enerji üretim değerlerinin sürekli olması beklenmektedir. Diğer yandan, rüzgâr ve güneşin değişken yapısından kaynaklanabilecek üretim yetersizliği problemlerini aşabilmek için sistemde 2 adet enerji depolama (ED) sistemi yer almaktadır. Tasarlanan sistemin kendine yeten bir sistem olması öncelenirken, beklenmeyen durumların enerji teminini sekteye uğratmaması için şebeke bağlantısı olması dikkate alınmaktadır. Güneş enerjisi santralleri, ED sistemlerinin işletmecisi tarafından yönetilmektedir. Ayrıca, bu sistemler enerji piyasa fiyatlarının oluşumunda rol üstlenerek fiyatların daha aşağı seviyelerde kalması ve ekonomik fayda elde edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Günümüz elektrik sistemlerinin doğal yükleri haline gelmek üzere olan elektrikli araçlar (EA) için de her biri aynı anda 25 EA şarj kapasitesine sahip 2 adet şarj istasyonu bulunmaktadır.



Şekil 1. Önerilen modele ait blok diyagram (Block diagram of the proposed model)

Tasarlanan sistemin amacı liyakat sistemine göre oluşan piyasa fiyatını en alt sınırdaki tutmak ve ED sistemi operasyonlarını en ekonomik şekilde gerçekleştirmektir. Bu amaç için geliştirilen optimizasyon algoritmasına ait matematiksel ifadeler Eşitlik (1) – (13) ile verilmektedir.

Eşitliklerde alt indis olarak yer alan i , ea ve t kümeleri sırasıyla bara, elektrikli araç ve zamanı ifade etmektedir. Karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama yöntemine dayalı çalışan Eşitlik (1)'de verilen amaç fonksiyonunda yer alan $PP_{i,t}$ enerji santrallerine ait üretilen güç değerlerini, $\lambda_{i,t}^{PP}$ santrallerin fiyat tekliflerini, $u_{i,t}$ teklifi kabul edilen santrali ayırt eden ikili değişkeni, $P_{i,t}^{ED\text{şarj}}$ ED'nin şarj gücünü, $P_{i,t}^{EDdeşarj}$ ED'nin deşarj gücünü ve $\lambda_{i,t}^{Piyasa}$ oluşan piyasa fiyatını temsil etmektedir. Min GD adı verilen eşitlik tüm bara ve zaman aralıklarındaki güç değerini minimize etmeyi temsil eder. Eşitlik (2)'de P_t^G değişkeni ile her t zaman diliminde dağıtım sistemine arz edilen güç hesaplanırken, Eşitlik (3) sayesinde evsel ve ticari yükler $P_{i,t}^{Yük,toplam}$, $P_{i,t}^{ED\text{şarj}}$ ve EA kaynaklı şarj gücü $P_{i,ea,t}^{I,şarj}$ dikkate alınarak toplam talep P_t^L tespit edilir.

Şarj olmak amacıyla istasyonlardan birine bağlanan EA'nın durumu, $u_{i,ea,t}^{EAşarj}$ ikili değişkeni ile kontrol edilerek Eşitlik (4)'te gösterildiği gibi bir şarj soketinin sağlayabileceği gücü açmayacak şekilde şarj olması sağlanır. Diğer yandan ED sistemine ait güç akışı Eşitlik (5) ve (6)'da sırasıyla şarj ve deşarj operasyonlarını yönetmek üzere kısıtlanır. İkili değişkenler $u_{i,t}^{EDşarj}$ ve $u_{i,t}^{EDdeşarj}$ sayesinde Eşitlik (7)'de ifade edildiği gibi herhangi bir baradaki ED sisteminin t zaman diliminde sadece şarj veya

deşarj olması temin edilir. Yapılan operasyonlar ile optimum işletme yapısının tespiti için ED sisteminin Enerji Doluluk Durumunun (EDD) sürekli takip edilmesi gerekmektedir. ED sisteminin Şarj Verimliliği $\$V^{ED}$ ve Deşarj Verimliliği DV^{ED} dikkate alınarak ve şarj ile artan, deşarj ile azalan enerji miktarı bir önceki zaman dilimine ait $EDD_{i,t(t-1)}^{ED}$ ile işleme tabi tutularak son durumdaki $EDD_{i,t}^{ED}$ Eşitlik (8)'e göre hesaplanır. Ayrıca, Eşitlik (9) ile ED sisteminin kapasitesi ve deşarj olabileceği minimum seviye tanımlanırken, Eşitlik (10) ile algoritmaya başlangıç değeri atanır.

$$\text{Min GD} = \sum_t \sum_i (PP_{i,t} \cdot \lambda_{i,t}^{PP} \cdot u_{i,t} + (P_{i,t}^{ED\text{şarj}} - P_{i,t}^{EDdeşarj}) \cdot \lambda_{i,t}^{Piyasa}) \quad (1)$$

Aşağıdaki denklemlere bağlı olarak:

$$P_t^G = \sum_i (PP_{i,t} \cdot u_{i,t} + P_{i,t}^{EDdeşarj}) \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_t^L = \sum_i (P_{i,t}^{Yük,toplam} + P_{i,t}^{ED\text{şarj}}) + \sum_{ea} \sum_i P_{i,ea,t}^{I,şarj} \quad \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq P_{i,ea,t}^{I,şarj} \leq R_i^{I,şarj} \cdot u_{i,ea,t}^{EAşarj} \quad \forall i, ea, t \quad (4)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{EDşarj} \leq R_i^{EDşarj} \cdot u_{i,t}^{EDşarj} \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{EDdeşarj} \leq R_i^{EDdeşarj} \cdot u_{i,t}^{EDdeşarj} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$u_{i,t}^{EDşarj} + u_{i,t}^{EDdeşarj} \leq u_{i,t}^{ED} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$EDD_{i,t}^{ED} = EDD_{i,t(t-1)}^{ED} + \sum_i \left(\$V^{ED} \cdot P_{i,t}^{EDşarj} - \frac{P_{i,t}^{EDdeşarj}}{DV^{ED}} \right) \cdot \Delta T \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$EDD_{i,t}^{ED,min} \leq EDD_{i,t}^{ED} \leq EDD_{i,t}^{ED,max} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$EDD_{i,t}^{ED} = EDD_{i,t}^{ED,ilk} \quad \text{if } t = 1 \quad (10)$$

$u_{i,ea,t}^{EAşarj}$ ikili değişkeni kullanılarak yönlendirme ve bağlantı yapma ile ilgili bazı kısıtlar oluşturulur. Eşitlik (11)'de görüldüğü gibi herhangi bir t zaman diliminde bir istasyona yönlendirilen araç sayısının istasyonun soket kapasitesinin aşmaması sağlanır. Ayrıca, EA'nın bulunduğu yer tespit edildiğinden ilgili EA'ya sağlanacak enerji miktarının güç eşitliklerinde hangi bara noktasından temin edildiği de tespit edilir. Diğer yandan şarj talebinde bulunan bir EA'nın sadece i barasına bağlı olması Eşitlik (12) ile sağlanır. Son olarak hizmet verilen EA sayısının tüm istasyonların soket sayısına eşit veya küçük olması Eşitlik (13) ile temin edilir.

$$\sum_{ea} u_{i,ea,t}^{EAşarj} \leq n_{soket_i} \quad \forall i, t \quad \text{if } i = 2 \text{ and } i = 5 \quad (11)$$

$$\sum_i u_{i,ea,t}^{EAşarj} \leq 1 \quad \forall ea, t \quad (12)$$

$$\sum_{ea} \sum_i u_{i,ea,t}^{EAşarj} \leq n_{soket_top} \quad \forall t \quad (13)$$

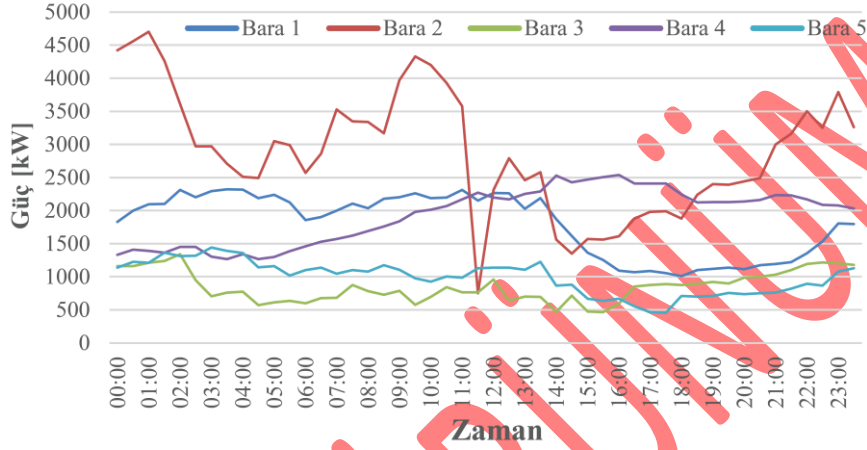
Tasarlanan sisteme ait güç akışı ve EA yönlendirmesine ait eşitlik ve kısıtlar (1) – (13) arasında açıklanmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

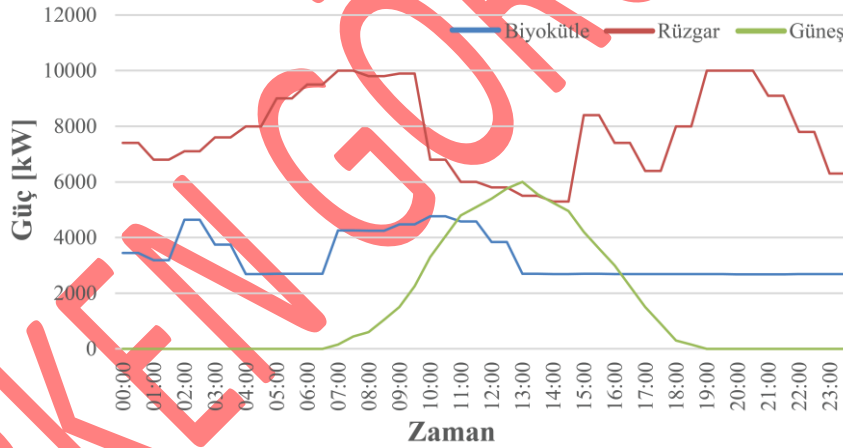
3.1. Giriş Verisi (Input Data)

Türkiye’de yerel bir elektrik dağıtım firmasından temin edilerek oluşturulan 5 baralı dağıtım

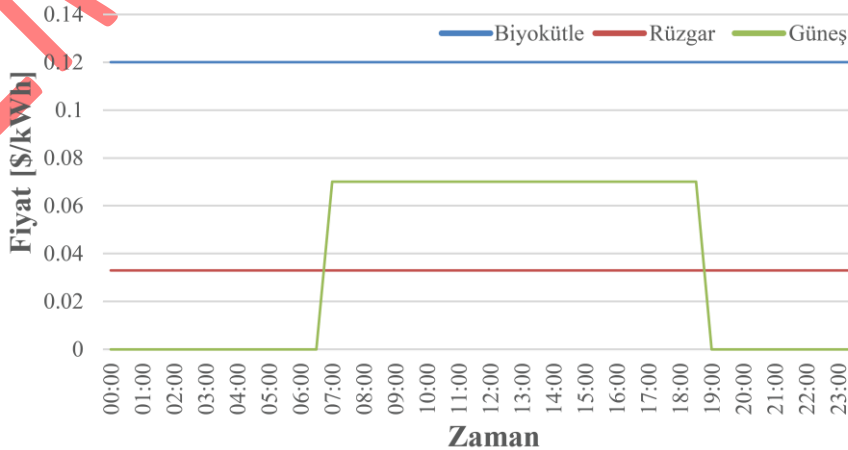
sisteminde yer alan evsel ve ticari yüklere ait yük talebinin zamana göre değişimi Şekil 2’de görülmektedir. Dağıtım sisteminin 1 nolu noktasına bağlı biyokütle enerji santrali, 2 nolu noktasına bağlı rüzgâr enerji santrali ve 3 nolu noktasına bağlı güneş enerji santralinin sisteme vermeyi teklif ettikleri güç miktarları ve fiyat teklifleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmektedir. Ayrıca kendine yeten bir sistem amaçlanmış olsa da 4 nolu noktadan ulusal şebekeye bağlı olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2. Evsel ve ticari kullanıcıların yük talebi (Load demand of residential and commercial users)



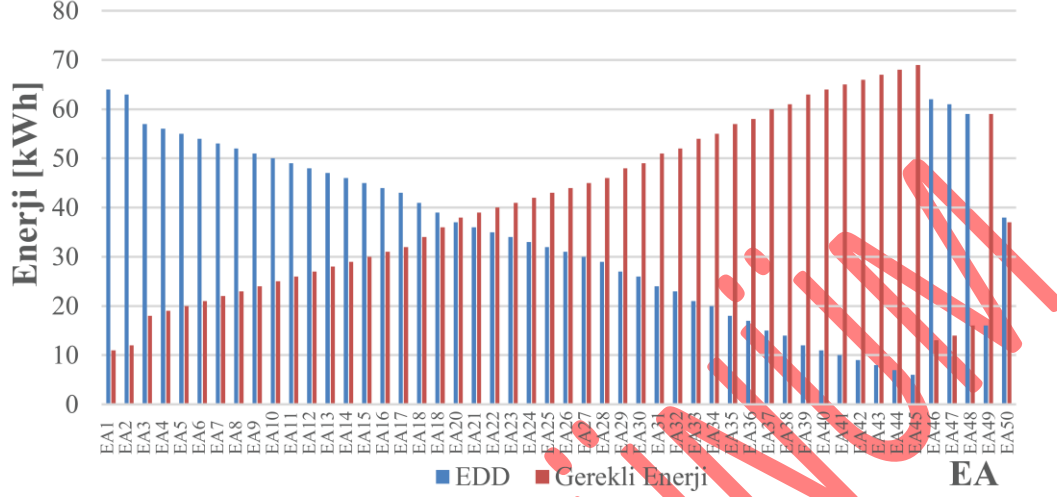
Şekil 3. Enerji santrallerine ait güç üretim teklifleri (Power generation bids for power plants)



Şekil 4. Enerji santrallerinin fiyat teklifi (Price bids for power plants)

Sistem tasarımı esnasında piyasada yer alan ve yaygın kullanılan EAlar incelenip 75 kWh bataryaya sahip Tesla Model Y [24] aracı tercih edilmektedir. Sistem karmaşıklığı oluşturmamak adına tek tip araç tercih edilirken, istenildiği takdirde

birden fazla batarya karakteristiğine sahip araç sisteme entegre edilebilir. Diğer yandan, şarj talebinde bulunan EAların farklı EDD'ye sahip bataryaları olduğu ve buna bağlı olarak talep ettikleri enerji miktarının Şekil 5'te gösterildiği gibi birbirinden farklı olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 5. EAların EDD ve tam şarj için gereken enerji miktarı (SOE of EVs and the amount of energy required for a full charge)

EAların bağlandıkları şarj soketinden çekeceği güç miktarı tam şarj için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı ile ilişkilidir. Diğer yandan sistemde yer alan 2 adet ED sisteminin elektrik şebekesine verebileceği ve şebekeden alabileceği güç miktarı kurulu sistemin izin verdiği ölçüde gerçekleşmektedir. Şarj soketleri ve ED sistemine ait güç akış parametreleri ve kısıtlar Tablo 1'de gösterilmektedir. ED sisteminin kapasitesi 15000 kWh, minimum doluluk değeri 1500 kWh olarak tanımlanırken, test periyoduna başlangıç değeri 7500 kWh olarak belirlenir. ED sistemin seçiminde mikro şebekeye yeterli olabilmesi adına şebekeye enerji sağlayan santrallerin kurulu güç değeri üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Değişken kurulu güç

değerlerinin uygulandığı durum çalışmalarında en düşük 15000 kW ve en fazla 27000 kW değeri uygulanırken, 27000 kW durum çalışmasında 12000 kW güneş enerjisinden oluşmaktadır. Güneş enerjisi santralının kapasite faktörünün düşük olduğu dikkate alındığında ED sisteminin en yüksek kurulu güç değerinde yeterli olması beklenir. Test periyodunun bitiminde net sıfır enerji durumunu oluşturabilmek adına ED sisteminin başlangıç EDD değerinde olması temin edilir. Enerji alışverişi verimliliği %95 ve her bir soketin şarj gücü 150 kW olarak seçilir. Tasarlanan sistem farklı çalışma özelliklerine sahip durumlar üzerinden değerlendirilerek ada sistemi olarak çalışabilirlik, ekonomik işletim ve teknik yeterlilik açısından analiz edilmektedir.

Tablo 1. Şarj soketi ve ED sistemine ait parametreler (Parameters of charging plug and ES system)

Parametre	Soket	ED Sistemi
\mathcal{V}	0.95	0.95
DV	0.95	0.95
$R^{ED\text{şarj/Soket}}$	150 kW/soket	3500 kW/soket
$R^{ED\text{deşarj}}$	-	3500 kW/soket
$EDD^{ED,ilk}$	-	7500 kWh
$EDD^{ED,min}$	-	1500 kWh
$EDD^{ED,maks}$	-	15000 kWh

3.2. Durum Çalışmaları (Case Studies)

Tasarlanan sistemin etkinliğini test etmek amacıyla Tablo 2’de detayları belirtilen 4 farklı durum oluşturulur:

- **Temel Durum:** Şarj istasyonu yok. ED sistemi ve YEK var.
- **Durum 1:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve güneş enerjisi hariç YEK var.
- **Durum 2:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve güneş enerjisi dahil YEK var.

- **Durum 3:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve daha büyük güneş enerjisi içeren YEK var.

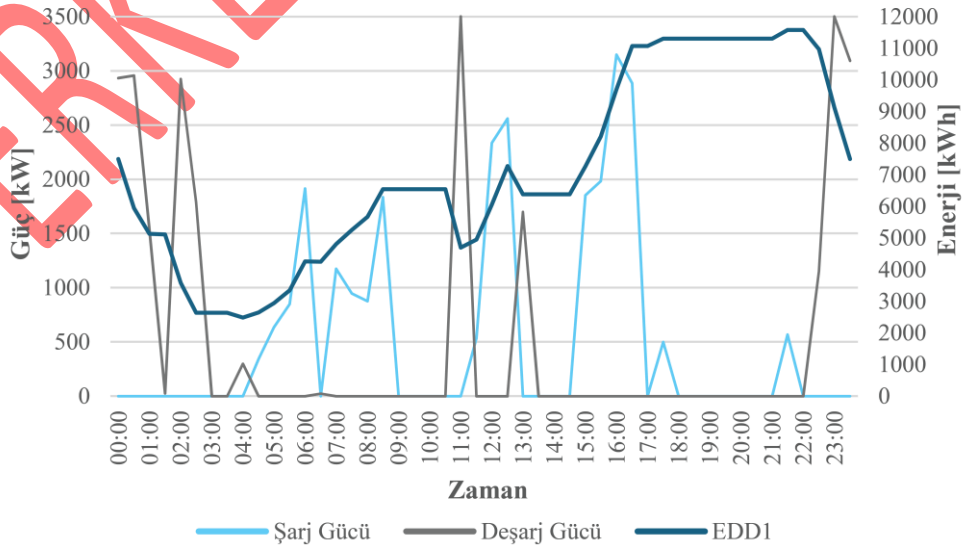
Dört vakanın tamamında 1 günlük test süresi 30 dakikalık zaman dilimi örneklemeleri üzerinden değerlendirilmektedir. Tasarlanan kısıtlı optimizasyon algoritması General Algebraic Modeling System (GAMS) programının 25.1.3 versiyonunda DICOPT çözücüsü kullanılarak test edilmektedir.

Tablo 2. Durum çalışmalarında incelenen durumlara ait detaylar (Details of the cases examined in case studies)

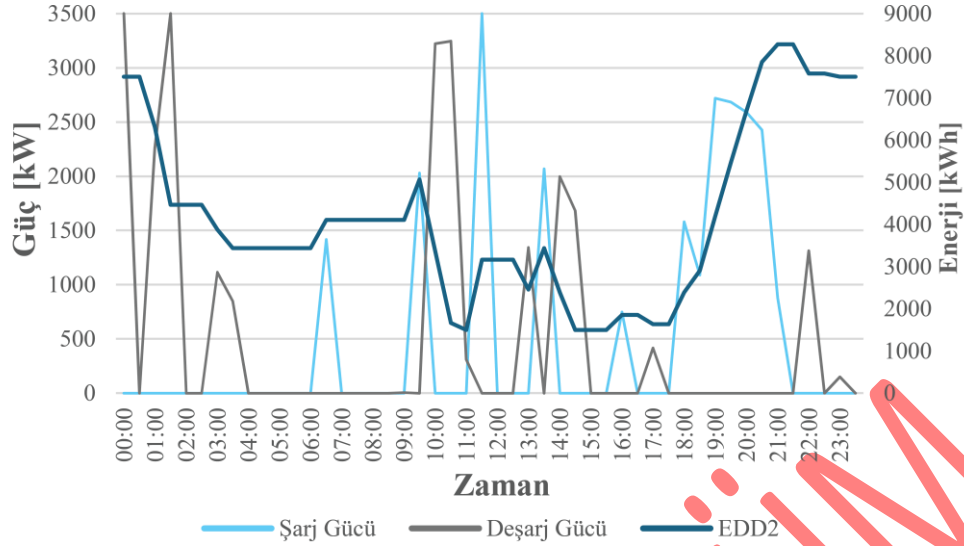
	Temel Durum	Durum 1	Durum 2	Durum 3
Şarj İstasyonu	-	+	+	+
Enerji Depolama Sistemi	+	+	+	+
Biyokütle Enerjisi	5 MW	5 MW	5 MW	5 MW
Rüzgâr Enerjisi	10 MW	10 MW	10 MW	10 MW
Güneş Enerjisi	6 MW	-	6 MW	12 MW

Temel Durumda, sistem ilk aşama olarak tasarlanırken, EAların henüz sistemde olmadığı sadece YEK içeren elektrik şebekesinin ED sisteminden faydalanarak ada modunda çalışabilirliğinin irdelendiği bir durum olması amaçlanır. Diğer yandan bu tarz bir sistemin çalışmasının sürdürülebilir olması çevresel kaygıların üst düzey olduğu bir dönemde dikkate değer avantajlar getirebilir. Optimizasyon

sonuçlarından da görüldüğü üzere Bara 2 ve Bara 5’e bağlı 2 eşdeğer ED sistemi test süresi boyunca efektif olarak kullanılmakta ve sonuçlar üzerinde olumlu veya olumsuz etki üretmemesi amacıyla tüm şarj ve deşarj işlemlerinin sonunda başlangıç EDD değerine sahip olmaktadır. Bara 2 ve Bara 5’e bağlı ED sistemlerine ait EDD ve şarj – deşarj eğrileri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmektedir.



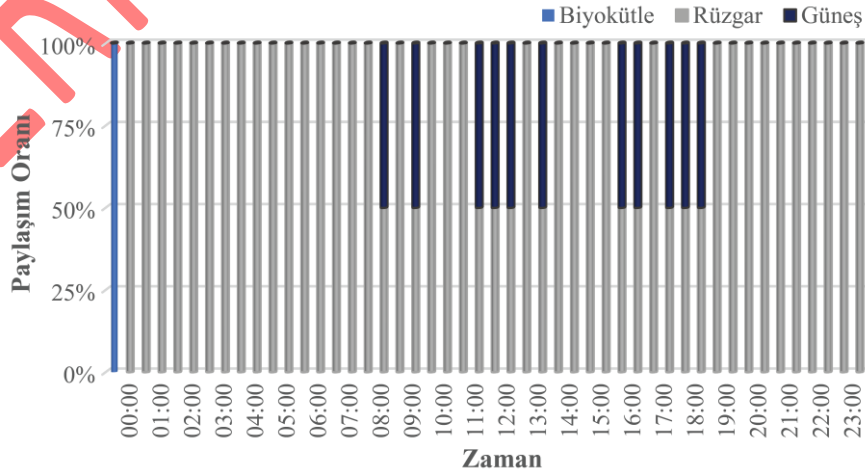
Şekil 6. Temel Durumda Bara 2’deki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Base Case)



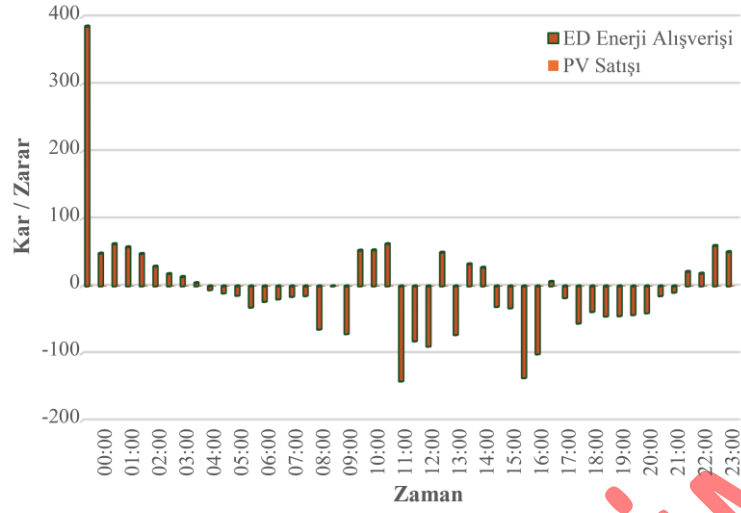
Şekil 7. Temel Durumda Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Base Case)

Temel durumda, yük talebi teklif veren enerji santrallerinden seçim yapılarak karşılanmaya çalışılırken, ED sistemlerinin de yardımıyla piyasa fiyatı en alt seviyede tutulmaya çalışılır. Biyokütle enerji santralının fiyat teklifi tüm zaman dilimlerinde yüksek olduğundan ve ED sistemlerinin kullanımıyla daha ucuz olan rüzgâr ve güneş enerjisi teklifleri değerlendirilmektedir. Rüzgâr enerjisinin neredeyse tüm zaman dilimlerinde, güneş enerjisinin ise güneşlenme süresindeki çoğu zaman diliminde tercih edildiği Şekil 8'de görülmektedir. Hiçbir enerji santrali için önceden bir alım garantisi bulunmaması güneşlenme süresi içerisinde bazı zaman aralıklarında güneş enerjisi santralının teklifinin değerlendirilmemesi sonucunu doğurmaktadır. Diğer bir ifade ile optimizasyon algoritması karar alma sırasında yük talebi, ED sistemi doluluk oranı ve santrallerin fiyat tekliflerini değerlendirerek

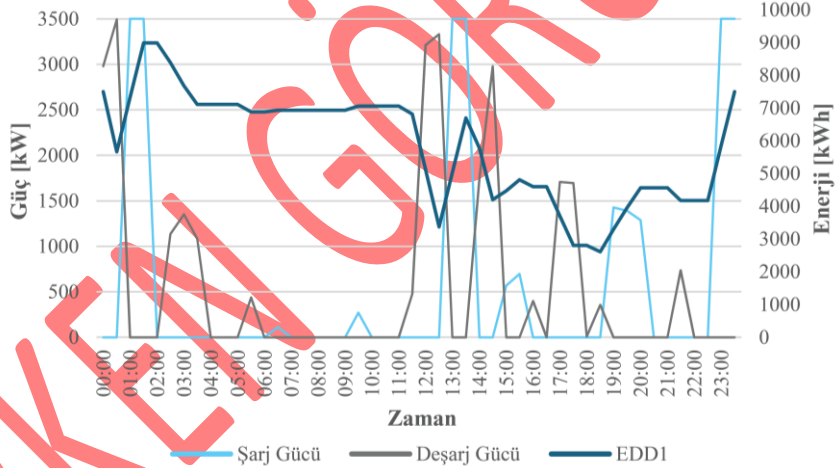
optimum kararı verirken herhangi bir enerji santraline öncelik tanımamaktadır. Ayrıca her zaman diliminde elektrik şebekesinin arz talep dengesi ve piyasa fiyatının minimizasyonu hedeflendiğinden ED sisteminin kar veya zarar etmesi mümkün olabilmektedir. Şekil 9'da ED sistemlerinin şebekeye enerji verdiği zaman dilimlerinde kazanç elde ettiği, enerji dengesi sağlamak amacıyla enerji aldığı zaman dilimlerinde ödeme yaptığı görülmektedir. Ayrıca güneş enerjisinin santrallerinin şebekeye elektrik enerjisi vermesine rağmen Şekil 9'da kar olarak görünmemesi sistem fiyatının daha yukarıda gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. İşletme karının mümkün olduğu fakat ek bir kar olmadığı şeklinde de ifade edilebilir. Temel durumda test periyodu sonunda ED sisteminden kaynaklı toplamda 151.147\$ ödeme yapılmaktadır.



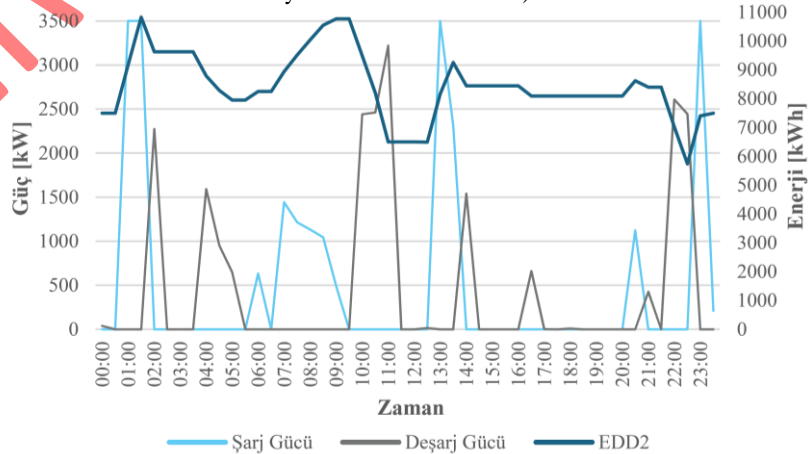
Şekil 8. Temel Durumda optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Base Case)



Şekil 9. Temel Durumda enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in the Base Case) Durum 1’de EAların şarj talebi için yerleştirilen şarj istasyonları elektrik şebekesine yük olarak eklenirken, güneş enerjisi santrali sistem dışı bırakılmaktadır. Bu durumda daha fazla yük talebi ve daha az enerji santralinin bulunduğu bir elektrik şebekesi ortaya çıkmaktadır. Bu şebekede yer alan ED sistemlerinin kesintisiz enerji temini açısından daha fazla rol oynaması beklenir. Bu durumda elde edilen sonuçlar 2 farklı ED sistemi için Şekil 10 ve Şekil 11’de görülmektedir. Bara 2’deki ED sisteminin test süresi boyunca 3000 kWh ile 9000 kWh arasında değişen EDD değerine sahip olduğu ve 14:00 – 22:00 saatleri arasında daha aktif kullanıldığı görülmektedir. Diğer yandan Bara 5’teki ED sisteminde EDD değerinin 5750 kWh ile 11000 kWh arasında değiştiği ve gereksiz şarj deşarj işlemlerinden kaçınıldığı görülmektedir.



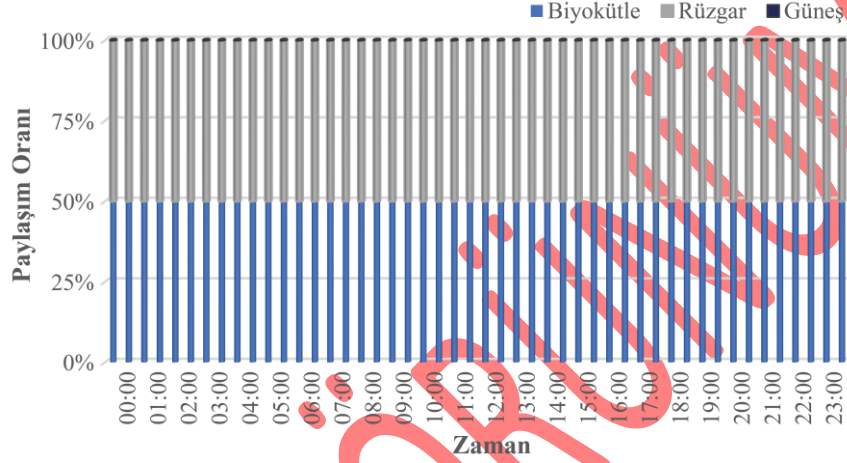
Şekil 10. Durum 1’de Bara 2’deki ED sisteminde güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 1)



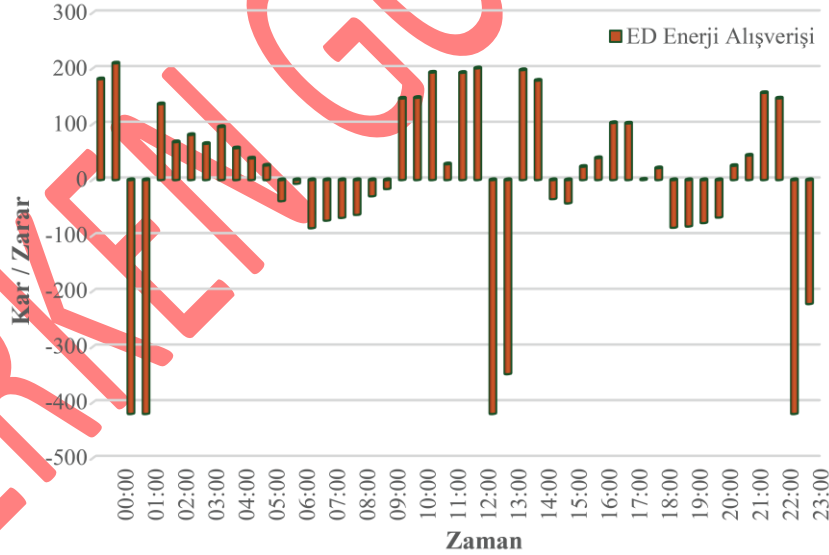
Şekil 11. Durum 1’de Bara 5’teki ED sisteminde güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 1)

Şebekede güneş enerjisinin olmaması ve kısıtlı sayıda enerji santralının bulunması, enerji piyasa fiyatının kolayca yükselmesine sebebiyet vermektedir. Durum 1'de tüm zaman dilimlerinde, teklif veren iki santral de Şekil 12'de görüldüğü üzere şebekeye enerji vermekte ve piyasa fiyatı en yüksek fiyat olan 0.12 \$/kWh olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca arzın düşük talebin ise yüksek olduğu bir durumda ED sistemlerinin güç dengesini sağlamak için yaptığı operasyonlarda her bir zaman dilimine ait kar zarar işlemleri Şekil 13'te görülürken, toplamda 113.371 \$ ödeme yaptığı hesaplanmaktadır. Günün 3 farklı zaman diliminde

eksi yönde meydana gelen büyük değerler, bu zaman dilimlerinde büyük miktarda enerji depolanması gerçekleştiğini göstermektedir. Bu zaman dilimlerinin algoritma tarafından tercih edilmesi, enerji fiyatındaki ve arz – talep arasındaki optimum dengenin sağlanması ile ilgilidir. Ayrıca, depo edilen enerji diğer zaman aralıklarında ihtiyaca göre daha az miktarlarda şebekeye destek amacı ile geri verilmektedir. Temel Durum'a kıyasla şartların daha zor olduğu dikkate alındığında güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde enerji temin edilirken ödenen ücrette %24.99 azalma meydana gelmektedir.



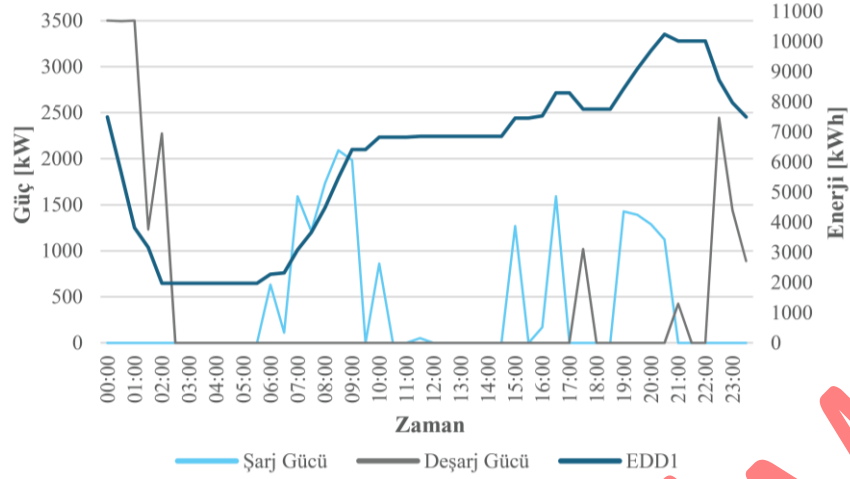
Şekil 12. Durum 1'de optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 1)



Şekil 13. Durum 1'de enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 1)

Durum 2'de bir önceki duruma ek olarak piyasada teklif veren santral sayısında ve toplam kurulu güç değerinde artış sağlamak amacıyla güneş enerjisi sistemleri dahil edilmektedir. Diğer yandan yeni durumda farklı bir fiyat teklifi de sunulduğundan, piyasadaki enerji fiyatı oluşumunda daha gerçekçi bir ortama yaklaşılması hedeflenmektedir. Baralarda yer alan ED sistemlerinin Şekil 14 ve Şekil 15'te verilen grafiklerinden de anlaşıldığı üzere ilk olarak minimum EDD değerine kadar

deşarj olmaktadır. Daha sonra güneş enerjisinden alınan enerjinin sisteme dahil olması ile her iki ED sisteminin şarj olmaya başladığı görülmektedir. Son olarak, akşam periyoduna gelindiğinde tekrardeşarj olarak başlangıç EDD değerinde süreci tamamlamaktadır. Yapılan tüm şarj vedeşarj işlemleri sayesinde arz ve EAların getirdiği yük de dahil olmak üzere talep arasındaki denge tutturulmaktadır.



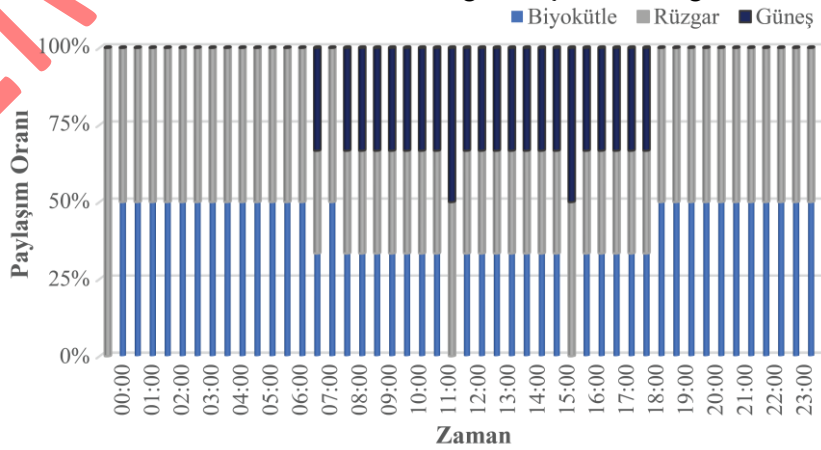
Şekil 14. Durum 2'de Bara 2'deki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 2)



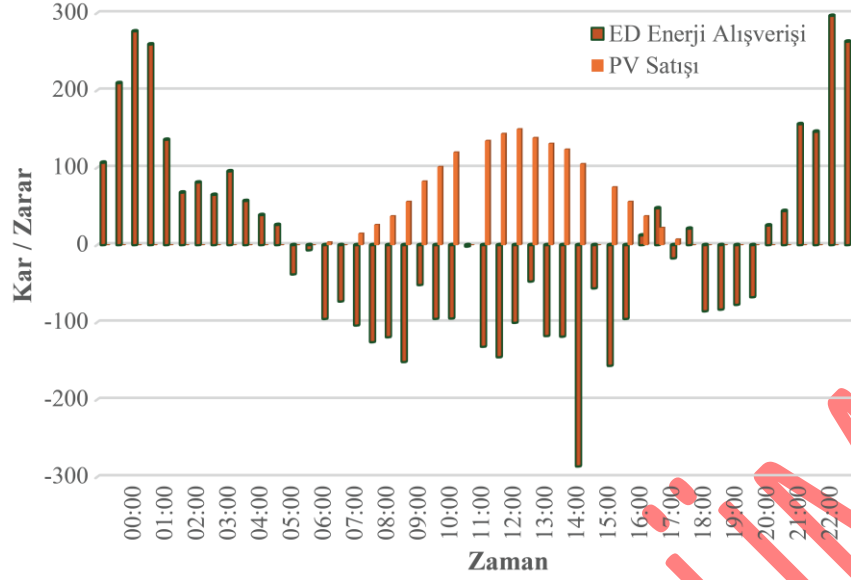
Şekil 15. Durum 2'de Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 2)

Kısıtlı optimizasyon algoritması tarafından seçilen enerji santralleri Şekil 16'da gösterilmektedir. Güneş enerjisinin teklif verdiği aralıklarda sisteme enerji vermesi uygun görülmektedir. ED sistemlerinin kapasitesinin imkân verdiği ölçülerde işletmecinin kar etmesi amacıyla da işlemler gerçekleştirilmektedir. Güneş enerjisi santrali aktif iken daha yüksek teklif veren bir santral kabul edildi ise

piyasa fiyatı daha yukarıda olduğundan, aradaki fiyat farkı işletmeciye kar olarak yansımaktadır. Durum 2'de ED sistemlerinin operasyonları ile 105.104 \$ ödeme yapma zorunluluğu ortaya çıkarken, güneş enerjisi sistemlerinden 1569 \$ ekstra kazanç sağlayarak toplamda 1463.896 \$ gelir elde eder. Her bir zaman dilimine ait kâr zarar değerleri Şekil 17'de gösterilmektedir.



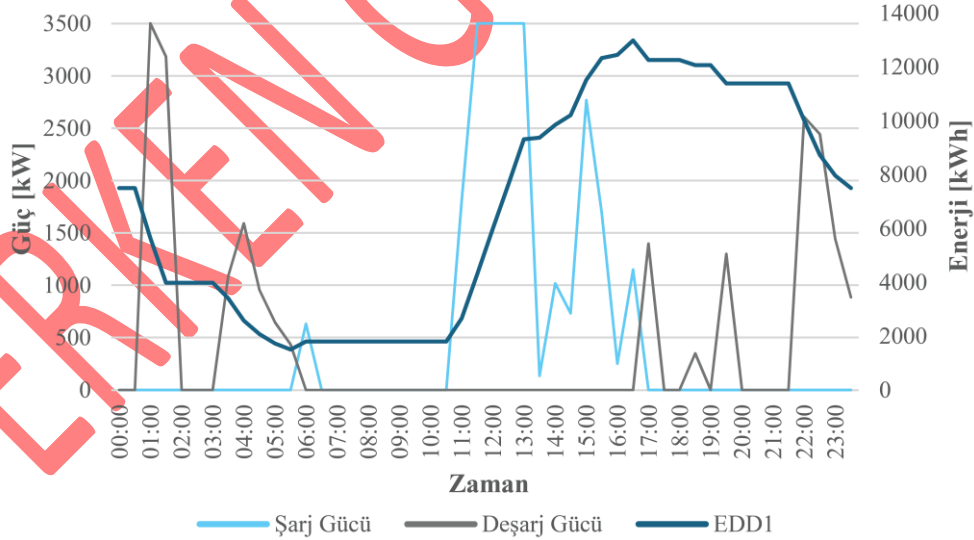
Şekil 16. Durum 2'de optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 2)



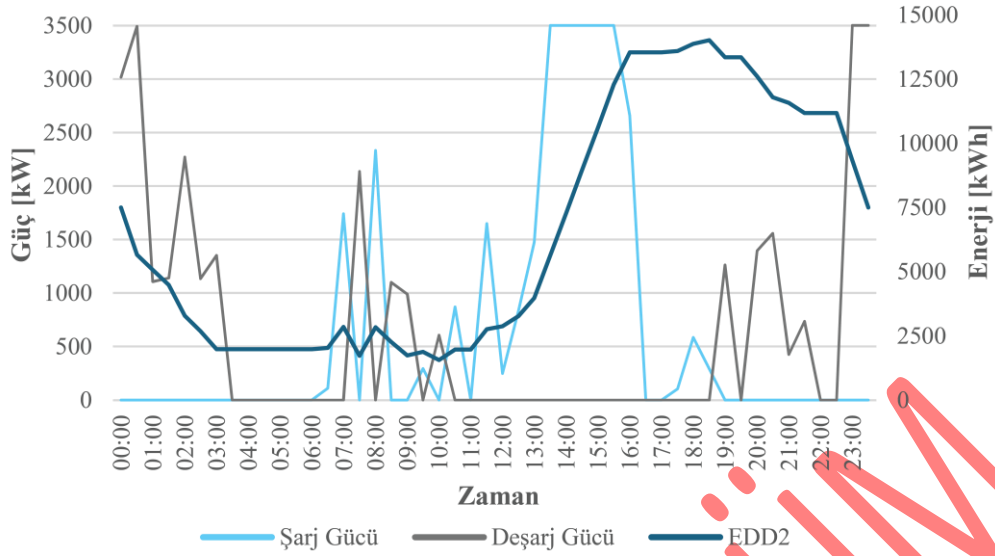
Şekil 17. Durum 2'de enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 2)

Durum 3'te bir önceki durumdan farklı olarak güneş enerjisi kurulu gücü 2 katına çıkarılmaktadır. Daha önce biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjisi kurulu güç değerleri sırasıyla 5 MW, 10 MW ve 6 MW olarak tasarlanmıştır. Kurulu güç içerisindeki oranı %28.57'den yeni durumda %44.44 değerine yükselmektedir. Bilindiği üzere güneş enerjisinden günün belirli bir periyodunda faydalandığından, kurulu güç içerisindeki payının yükselmesi hatta içerisinde bulunduğu sistemin eşik değerinin üzerinde olması enerji temininde ve şebeke

yönetiminde bazı sıkıntıların oluşmasına yol açabilir. Bu tarz sistemlerde ED sistemlerinden faydalanarak şebekeye teknik anlamda destek oluşturmak önemlidir. Durum 3'te ED sistemlerinin şarj deşarj işlemlerine ait eğriler Şekil 18 ve Şekil 19'da verilmektedir. Her iki ED sisteminin de kapasitesi imkanları dahilinde şarj ve deşarj işlemlerini yaptığı ve test süresi sonunda başlangıç değerine ulaşarak net sıfır enerji alışverişi ile süreci tamamladığı anlaşılmaktadır.



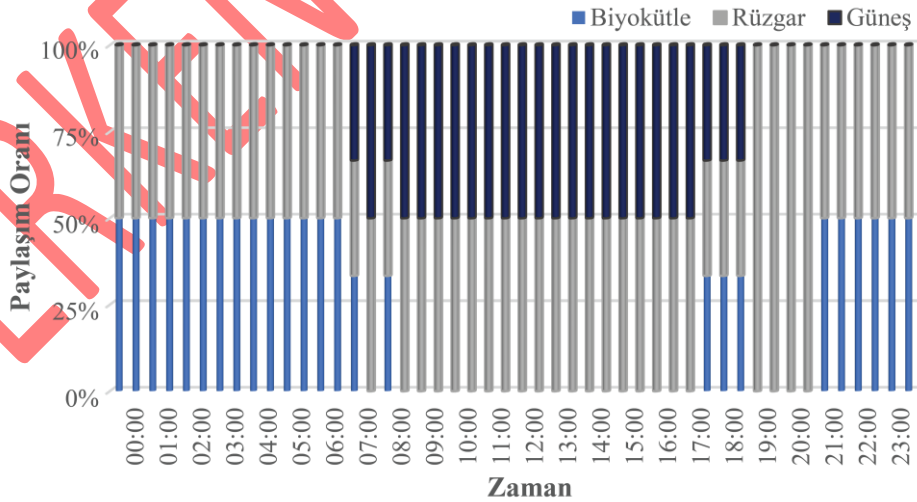
Şekil 18. Durum 3'te Bara 2'deki ED sisteme ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 3)



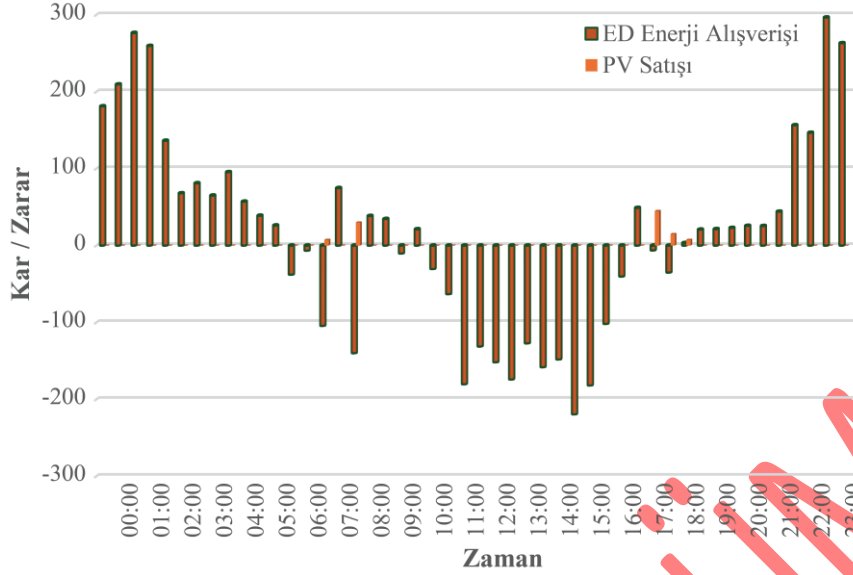
Şekil 19. Durum 3'te Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 3)

Yüksek kurulu güç oranına sahip bir güneş enerjisi santralının sistemde yer alması, oluşturacağı teknik ve ekonomik değişimler açısından farklı bir bakış sunabilir. Durum 2'de gerçekleşen santral seçimi grafiği ile Durum 3'teki karşılaştırıldığında güneş enerji kapasitesindeki artışın biyokütle enerji santralının teklifleri üzerinde büyük düşüş olarak etki ürettiği Şekil 20'de görülmektedir. En yüksek teklife sahip biyokütle enerji santralının tercih edilmemesi piyasa fiyatının daha düşük seviyede oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum tüketici açısından bakıldığında avantajlı olarak görünse de güneş enerjisinin olmadığı zaman dilimlerinde hem

fiyatlar yüksek seyredecek hem de ilgili kurulu güç devre dışı kalacaktır. Diğer yandan güneş enerjisi işletmecisi, piyasa fiyatı kendi teklifi üzerinde oluştuğunda ekstra kar etmekteyken, güneş enerjisi kurulu gücünün artmasıyla birlikte piyasa fiyatının daha düşük seyrettiği zaman dilimlerinde ekstra kar edememekte, piyasa fiyatının yüksek olduğu zaman dilimlerinde ise üretimi olmadığından satış yapamamaktadır. Şekil 21'de görüldüğü üzere güneş enerjisi kaynaklı kar 105 \$ seviyesinde çok düşük ve ED sistemi işlemleri ile elde edilen kazanç 691.52 \$, toplamda ise 796,52 \$ olarak gerçekleşmektedir.



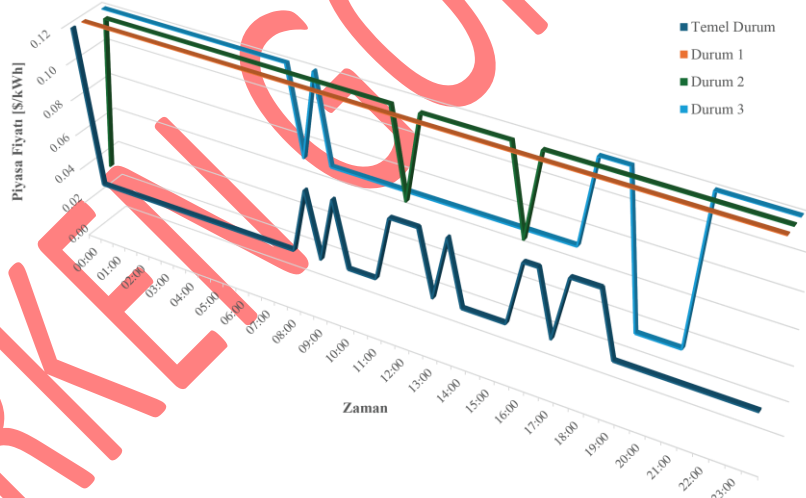
Şekil 20. Durum 3'te optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 3)



Şekil 21. Durum 3'te enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 3)

Yük talebi aynı olan farklı çalışma şekillerine sahip durumlar incelendiğinde piyasa fiyat oluşumunun birbirinden farklı olduğu gözlenmektedir. Şekil 22'de verilen zamana göre değişen piyasa fiyat grafiğinde en iyi fiyat oluşumunun Durum 3'te gerçekleştiği görülmektedir. Burada kısıtlı optimizasyon algoritmasının seçimleri ile güneş enerjisinden daha fazla faydalanılması etkili

olmaktadır. Tablo 3'te verilen ED sistemleri ve güneş enerji santrali işletmecisinin kar ve zarar durumu analiz edildiğinde, sadece zarar edilen durumlar olduğu gibi yüksek kar edilen durumlar da mevcuttur. Bu farklılıklar aynı zamanda elektrik şebekesinin teknik olarak sürdürülebilirliği öncelendiğinde değişkenlik göstermektedir.



Şekil 22. Durumlara ait piyasa fiyatlarının zaman göre değişimi (Variation of market prices by time in all cases)

Tablo 3. Durumlara ait kar / zarar değerleri (Profit/Loss values in all cases)

	ED Sistemi (\$)	Güneş Enerjisi (\$)	Toplam (\$)
Temel Durum	-151.147	-	-151.147
Durum 1	-113.371	-	-113.371
Durum 2	-105.104	1569	1463.896
Durum 3	691.52	105	796.52

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrik şebekesi işletilmesinde, YEK ve EAların sistem içerisindeki payının artması ile farklı bakış açılarına sahip yeni çalışma şekillerinin araştırılması kaçınılmaz bir durum olmaktadır. Her geçen gün teknik, yasal imkanların gelişmesi ve sosyal kabul oranının artması ile şebeke yönetimi klasik yöntemlerin dışına çıkmaktadır. Yakın geleceğe kadar merkezi enerji santrallerinden beslenen elektrik şebekesi günümüzde YEKler ile dağıtık enerji sistemlerinin yaygınlaştığı bir noktaya doğru evrilmektedir. Bu çalışmada, merkezi bir şebekeye bağlı fakat ada şeklinde yani kendi kendine yetebilen bir mikro şebeke tasarımının teknik ve ekonomik çalışabilirliği incelenmektedir.

Tasarlanan sistemde yer alan 2 adet ED sistemi, 50 EA'ya aynı anda hizmet verebilen şarj altyapısı, biyokütle, rüzgâr ve güneş enerji sistemleri kısıtlı optimizasyon algoritması tarafından yönetilerek optimum çalışma koşulları saptanmaktadır. Arz ve talep arasındaki denge sağlanırken, en uygun piyasa fiyatının oluşması amaçlanmaktadır. Tüm durumlarda ada sistemi şeklinde çalışmayla enerji dengesi sağlanırken, ED sistemi işletmecisinin ekonomik faydası açısından en iyi sonucun 1463.896 \$ ile Durum 2'de elde edildiği görülmektedir. Bunun sonucun elde edilmesinde enerji santrallerinin toplam kurulu gücü ile enerji depolama sistemi kapasitesi arasındaki dengenin etkili olduğu söylenebilir. Sistemde Durum 3'teki gibi güneş enerjisi kurulu gücünün daha fazla olması piyasa fiyatının daha düşük oluşmasına neden olmakta ve ED sistemi işletmecisinin ek ekonomik fayda elde etmesini engellemektedir. Diğer yandan tüketici açısından en ekonomik şartlar Durum 3'te ortaya çıkmakta, bu durumda ED sistemi işletmecisinin kazancında Durum 2'ye göre %45.59 düşüş gerçekleşmektedir. Durum 3'te tüketicinin daha fazla güneş enerjisi kurulu gücü sayesinde daha uygun elektrik enerjisine ulaşabildiği görülmektedir. Sistem içerisinde birim enerji üretim maliyeti düşük santrallerin yer alması son tüketici açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, yapılan farklı durum çalışmaları mevcut elektrik şebekelerinde kurulu güç içerisindeki YEK oranının değişiminin üretebileceği sonuçlar hakkında da ipuçları sunmaktadır.

Dahası, elde edilen sonuçlar ile ED sisteminin net enerji değişimi sıfır olacak şekilde tüm durumlarda kullanılarak ve ekonomik kaygılardan bağımsız hareket edilerek, teknik olarak kendine yeten bir mikro sistem içerisinde önemli görev üstlendiği

ispat edilmektedir. Gelecek çalışmalar kapsamında, daha büyük kapasiteli ED sistemlerinin sağlayacağı teknik ve ekonomik faydalar irdelenebilir. Ayrıca, mikro şebekelerin ekonomik analizine ve maliyet optimizasyonuna odaklanarak, ilk yatırım, bakım ve işletme giderleri gibi unsurların daha derinlemesine incelenmesini içerebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle hidrojen ve jeotermal gibi alternatiflerin entegrasyonu ve performansı da araştırılmalıdır. Diğer yandan, kullanıcı tabanlı talep yönetimi ile enerji tüketimindeki dalgalanmaların etkisi optimize edilebilir. Mikro şebekelerin güvenliği, siber güvenlik ve doğal afetlere karşı performansları da önemli araştırma konuları arasında yer aldığı farklı durum çalışmaları ile sistem dayanıklılığı incelenebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Abdullah Kürşat AKTAR: Test düzeneğinin oluşturulması, yazılım ve simülasyon çalışmaları, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım işlemi.

Murat KARAKILIÇ: Literatür taraması, veri setinin hazırlanması, görselleştirme ve sonuçların analiz edilmesi.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "World Energy Outlook 2023," IEA Publ., 2023.
- [2] Enerji Bilgi Dairesi (EIA), "International Energy Outlook 2023," ABD Enerji Bakanlığı, pp. 1–70, 2023.
- [3] M. Khalid, "Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges," 2024. doi: 10.1016/j.esr.2024.101299.
- [4] Z. Zheng, M. Shafique, X. Luo, and S. Wang, "A systematic review towards integrative energy management of smart grids and urban energy systems," 2024. doi: 10.1016/j.rser.2023.114023.

- [5] F. Sattar, S. Ghosh, Y. J. Isbeih, M. S. El Moursi, A. Al Durra, and T. H. M. El Fouly, "A predictive tool for power system operators to ensure frequency stability for power grids with renewable energy integration," *Appl Energy*, vol. 353, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122226.
- [6] R. S. El-Emam, A. Constantin, R. Bhattacharyya, H. Ishaq, and M. E. Ricotti, "Nuclear and renewables in multipurpose integrated energy systems: A critical review," 2024. doi: 10.1016/j.rser.2023.114157.
- [7] K. Liang, H. Wang, D. Pozo, and V. Terzija, "Power system restoration with large renewable Penetration: State-of-the-Art and future trends," 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109494.
- [8] S. Liu et al., "Joint operation of mobile battery, power system, and transportation system for improving the renewable energy penetration rate," *Appl Energy*, vol. 357, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122455.
- [9] Q. Yang, J. Wang, J. Liang, and X. Wang, "Chance-constrained coordinated generation and transmission expansion planning considering demand response and high penetration of renewable energy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 155, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109571.
- [10] M. Al-Dhaifallah, M. M. Refaat, Z. Alaas, S. H. E. A. Aleem, E. E. El-kholy, and Z. M. Ali, "Multi-objectives transmission expansion planning considering energy storage systems and high penetration of renewables and electric vehicles under uncertain conditions," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4143–4164, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.03.060.
- [11] M. I. Saleem and S. Saha, "Assessment of frequency stability and required inertial support for power grids with high penetration of renewable energy sources," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110184.
- [12] A. Emrani and A. Berrada, "A comprehensive review on techno-economic assessment of hybrid energy storage systems integrated with renewable energy," 2024. doi: 10.1016/j.est.2024.111010.
- [13] Wangmo, A. Helwig, and J. Bell, "What energy storage technologies will Australia need as renewable energy penetration rises?," *J Energy Storage*, vol. 95, p. 112701, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.112701.
- [14] A. Amiruddin, A. Liebman, R. Dargaville, and R. Gawler, "Optimal energy storage configuration to support 100 % renewable energy for Indonesia," *Energy for Sustainable Development*, vol. 81, p. 101509, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.ESD.2024.101509.
- [15] A. D. A. Bin Abu Sofian, H. R. Lim, H. Siti Halimatul Munawaroh, Z. Ma, K. W. Chew, and P. L. Show, "Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage," 2024. doi: 10.1002/sd.2885.
- [16] M. Alhuyi Nazari, V. Blazek, L. Prokop, S. Misak, and N. Prabaharan, "Electric vehicle charging by use of renewable energy technologies: A comprehensive and updated review," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 118, p. 109401, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.COMPELECENG.2024.109401.
- [17] Z. Zhong, W. Hu, and X. Zhao, "Rethinking electric vehicle smart charging and greenhouse gas emissions: Renewable energy growth, fuel switching, and efficiency improvement," *Appl Energy*, vol. 361, p. 122904, May 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.122904.
- [18] D. Kanakadhurga and N. Prabaharan, "Smart home energy management using demand response with uncertainty analysis of electric vehicle in the presence of renewable energy sources," *Appl Energy*, vol. 364, p. 123062, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.123062.
- [19] S. Iqbal, N. F. Alshammari, M. Shouran, and J. Massoud, "Smart and Sustainable Wireless Electric Vehicle Charging Strategy with Renewable Energy and Internet of Things Integration," *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 2487, vol. 16, no. 6, p. 2487, Mar. 2024, doi: 10.3390/SU16062487.
- [20] M. Jansen, R. Gross, and I. Staffell, "Quantitative evidence for modelling electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, p. 114524, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114524.
- [21] J. Gerlach et al., "Navigating the energy transition: Identifying critical success factors for ancillary services provision and sustainable energy solutions in Germany," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e27643, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27643.
- [22] A. K. Aktar, A. Taşçıkaraoğlu, and J. P. S. Catalão, "Scheduling of mobile charging stations with local renewable energy sources," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 37, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2023.101257.
- [23] M. Karakılıç and M. N. Almalı, "Design of Hybrid Switched Diode Multilevel Inverter Using Single DC Source," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, pp. 1–12, Feb.

2024, doi: 10.1007/S42835-024-01832-9/FIGURES/16.

[24] Elektrikli Araç Özellikleri Çevrimiçi
Erişim: <https://ev-database.org/>

ERKEN GÖRÜNÜM