



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

**PİL ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İLE ENTEGRE
RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ
AÇISINDAN OPTİMUM YÖNETİMİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Osman KURTULUŞ

**Danışman
Doç. Dr. Hasan EROĞLU**

**RİZE
2025**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Hasan EROĞLU danışmanlığında, Osman KURTULUŞ tarafından hazırlanan *Pil Enerjisi Depolama Sistemleri ile Entegre Rüzgâr Santrallerinin Enerji Verimliliği Açısından Optimum Yönetimi* adlı bu tez çalışması, 22/01/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Doç. Dr. Hasan EROĞLU	
Üye	: Doç. Dr. Murat TÖREN	
Üye	: Doç. Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU	

ETİK BEYAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Pil Enerjisi Depolama Sistemleri ile Entegre Rüzgâr Santrallerinin Enerji Verimliliği Açısından Optimum Yönetimi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

23 /01 /2025

Osman KURTULUŞ

ÖN SÖZ

“Pil Enerjisi Depolama Sistemleri ile Entegre Rüzgâr Santrallerinin Enerji Verimliliği Açısından Optimum Yönetimi” başlıklı bu tez çalışmasında, enerji sektöründe giderek artan enerji talebine yanıt vermek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı ve verimlilik artışı hedeflenmiştir. Çalışmada, gerçek üretim verileri üzerinden analizler ve geliştirmeler yapılmış, bu doğrultuda gelecekte enerji yönetiminin öneminin daha da artacağı öngörülerek enerji verimliliğine yönelik yenilikçi bir bakış açısı sunulmuştur.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde Bursa ilinde faaliyet gösteren Sanko Enerji firmasına ait Güney-1 RES santraline ait üretim verileri kullanılmış olup, çalışmanın veri desteğinden ötürü Sanko Enerji firmasına teşekkür ederim. Maddi ve manevi katkılarıyla yanımda olan aileme, desteğini esirgemeyen ve bana akademik bir bakış açısı katan danışmanım Doç. Dr. Hasan Eroğlu’na ve değerli katkılarıyla çalışmama yön veren tüm akademik danışmanlarıma minnettarım.

Osman KURTULUŞ
RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. RÜZGÂR SANTRALLERİ.....	7
1.1. Rüzgâr Enerjisinin Temel Prensipleri	7
1.2. Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı	7
1.2.1. Türbin Kanatları (Blade)	8
1.2.2. Rotor ve Göbek (Hub).....	8
1.2.3. Şaft (Shaft)	8
1.2.4. Dişli Kutusu (Gearbox).....	8
1.2.5. Jeneratör (Generator)	9
1.2.6. Nasel (Nacelle).....	9
1.2.7. Kule (Tower)	9
1.2.8. Kontrol Sistemleri ve Yaw Mekanizması.....	10
1.3. Rüzgâr Enerjisinin Dünyadaki Durumu.....	10
1.4. Rüzgâr Enerjisinin Türkiye’deki Durumu	12
1.5. Rüzgâr Enerjisinin Zorlukları	13
2. BATARYA ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	15
2.1. Bileşenler.....	16
2.2. Uygulamalar	16
2.3. Avantajlar	17
2.4. Zorluklar.....	17
2.5. Batarya Enerji Sistemlerinde Dünyada ve Türkiye’deki Durum	19

3. HİBRİT RÜZGÂR DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	21
3.1. Hibrit Rüzgâr Depolama Sisteminin Yapısı	21
3.2. Enerji Depolama Özelliklerinin Modellenmesi	22
4. BATARYA A İÇİN STRATEJİLERİN GELİŞTİRİLMESİ.....	26
4.1. Şebekeye Aktarılan Dalgalı Enerjinin Düzeltilmesi için Önerilen İşletme Stratejisi	27
4.2. Piyasa Elektrik Fiyatına Göre Önerilen İşletme Stratejisi	29
4.3. Dengesizlik MWh Miktarının ve Piyasa Fiyatının Birlikte Değerlendirilmesi Sonucu Önerilen İşletme Stratejisi.....	31
4.4. Dengesizlik Fiyatına ve Piyasa Fiyatına Bağlı Olarak Önerilen İşletme Stratejisi	33
4.5. Dengesizlik Fiyatının Azaltılması Öncelikli Olarak Dengesizlik Fiyatına ve Piyasa Fiyatına Bağlı Olarak Önerilen İşletme Stratejisi.....	36
5. BATARYA A İÇİN KAPASİTE YAPILANDIRMASI	39
5.1. Optimal Kapasite Yapılandırması İçin Doğrusal Programlama	40
5.2. Batarya Performans Ömrü.....	40
6. VAKA ÇALIŞMASI	42
6.1. Farklı Stratejiler Altında Yapılan Modellemelerin Sonuçları.....	42
6.2. Kapasite Optimizasyon Yapılandırma Sonuçları.....	44
6.2.1. Enerji Stratejilerine Göre P Optimizasyon Değeri Analizi	47
6.2.2. Stratejilerin Enerji Dengesizliği Üzerindeki Etkisi.....	48
6.2.3. Kazanç Analizi	50
6.2.4. Dengesizlik ve Piyasa Fiyatlarına Odaklanan Stratejiler.....	50
6.2.5. SOC Versiyonlarının Performansı.....	51
6.2.6. Kazanç ve Dengesizlik Arasındaki Denge.....	51
7. SONUÇLAR.....	52
KAYNAKÇA.....	54

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Hasan EROĞLU

Hazırlayan : Osman KURTULUŞ

Yıl : 2025

Sayfa Sayısı : 59

ÖZET

PİL ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İLE ENTEGRE RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN OPTİMUM YÖNETİMİ

Gelişen teknoloji ile enerji talebi hızla artmaktadır ve bu durum ülkeleri yeni yatırımlar ve yeni kaynaklar aramaya yönlendirmiştir. Her zaman yeni bir kaynak bulmak zor olduğundan ve yenilenebilir enerjinin kararsız durumlarının çok fazla olmasından dolayı, mevcut üretilen enerjinin daha doğru kullanılması gerekir. Bu doğrultuda doğru stratejiler izlenerek santral veriminin ve üretim-tüketim dengesinin daha verimli yönetilmesi sağlanabilir. Yenilenebilir enerji, bu stratejilerin merkezinde yer almaktadır. Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi üretim santralleri ile hibrit çalışan batarya tesislerinin sinerjik etkisi üzerinde odaklanılarak, farklı üretim ve tüketim stratejilerinin geliştirilmesiyle elde edilebilecek artı değerler hakkında öneriler sunulmuştur. Enerji depolama sistemlerinin etkin kullanımı, esnek talep yönetimi, enerjiyi depolayarak kullanabilen hibrit sistemlerin kurulması gibi yöntemler de önemlidir. Bu çeşitlendirilmiş yaklaşım, enerji sistemlerinin daha dengeli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlamaktadır. Çalışma sonucunda batarya destekli rüzgâr santrallerinin önemi ve verimli bir şekilde yönetimi için çeşitli stratejiler önerilmiş ve farklı durum çalışmalarıyla etkinlikleri ortaya konulmuştur. Aynı zamanda bu stratejilerden yola çıkarak ilgili rüzgâr santraline ait en optimum kurulu güç hesabı da yapılarak literatüre sunulmuştur. Çalışma gerçek zamanlı veriler üzerinden değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya, Enerji, Rüzgâr, Hibrit, Strateji

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Electrical and Electronics Engineering

Thesis Type : Master's Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hasan EROĞLU

Author : Osman KURTULUŞ

Year : 2025

Pages : 59

ABSTRACT

OPTIMUM MANAGEMENT OF WIND FARMS INTEGRATED WITH BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR ENERGY EFFICIENCY

With advancing technology, energy demand is rapidly increasing, prompting countries to invest in new sources. Given the challenges in consistently finding new resources and the inherent variability in renewable energy, it is crucial to use the energy produced more effectively. By implementing appropriate strategies, it is possible to achieve better management of plant efficiency and the production-consumption balance. Renewable energy plays a central role in these strategies. This study focuses on the synergistic impact of battery facilities operating in hybrid mode with wind energy generation plants and provides recommendations on the additional value that can be gained through different production and consumption strategies. Key methods include the effective use of energy storage systems, flexible demand management, and the establishment of hybrid systems capable of storing and using energy. This diversified approach contributes to a more balanced and sustainable energy system. As a result of this study, several strategies are proposed for the efficient management of wind farms supported by batteries, and their effectiveness is demonstrated through various case studies. Additionally, based on these strategies, the optimal installed capacity for the relevant wind farm is calculated and presented to the literature. The study is evaluated based on real-time data, and the obtained results are analyzed in detail.

Keywords: Battery, Energy, Wind, Hybrid, Strategy

KISALTMALAR

BESS	:	Batarya Enerjisi Depolama Sistemi
IDSMS	:	Akıllı Talep Yönetim Sistemi
SOC	:	Şarj Durumu
PV	:	Fotovoltaik Sistem
MinCA	:	Yatırım Giderleri
haz.	:	Hazırlayan
No.	:	Numara
S	:	Sayı
s.	:	Sayfa
vb.	:	Ve benzeri ve benzerleri ve bunun gibi
Doç.	:	Doçent
Dr.	:	Doktor
RES	:	Rüzgâr Enerji Santrali
SMF	:	Sistem Marjinal Fiyat
PTF	:	Piyasa Takas Fiyat
MW	:	Mega Watt
MWh	:	Mega Watt Saat
GWEC	:	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi
GW	:	Giga Watt
GWh	:	Giga Watt Saat
IRENA	:	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
TÜREB	:	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
YEKDEM	:	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
DC	:	Doğru Akım
AC	:	Alternatif Akım

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Optimizasyonda kullanılan sabit katsayılar.....	45
---	----



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Örnek bir rüzgâr türbini modeli.....	10
Şekil 2. Batarya destekli hibrit rüzgâr üretim tesisi şeması.....	21
Şekil 3. Batarya destekli enerji piyasası ve çalışma stratejileri.....	26
Şekil 4. Önerilen stratejinin şematik gösterimi	27
Şekil 5. Önerilen stratejinin akış diyagramı	28
Şekil 6. Önerilen stratejinin şematik gösterimi	29
Şekil 7. Önerilen stratejinin akış diyagramı	30
Şekil 8. Önerilen stratejinin şematik gösterimi	31
Şekil 9. Önerilen stratejinin akış diyagramı	32
Şekil 10. Önerilen stratejinin şematik gösterimi	33
Şekil 11. Önerilen stratejinin akış diyagramı.....	34
Şekil 12. Önerilen stratejinin şematik gösterimi	36
Şekil 13. Önerilen stratejinin akış diyagramı	37
Şekil 14. Geliştirilen stratejilerin dengesizlik fiyatına göre analizi.....	42
Şekil 15. Geliştirilen stratejilerin üretim gelirine göre analizi	43
Şekil 16. Toplam karlılık sonucu	44
Şekil 17. Stratejilere göre elde edilen sonuçlar	46
Şekil 18. Stratejilere göre oluşan P optimizasyon değerleri ve buna karşılık gelen yatırım maliyeti.....	47
Şekil 19. P optimizasyon değerleri ve buna karşılık gelen dengesizlik kazançları ...	48
Şekil 20. (4.5) Stratejisine bağlı 0-100 MW P değerine karşılık gelen dengesizlik ve toplam kazanç	49
Şekil 21. Stratejilere göre kazanç durumları	50

GİRİŞ

Enerji, modern dünyanın vazgeçilmez unsurlarından biridir ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu talep, sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda enerji depolama ve dağıtımında da yenilikçi çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, batarya enerjisi, hem taşınabilir hem de sabit enerji depolama sistemleri için kritik bir rol oynamaktadır. Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayarak, ihtiyaç duyulduğunda bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri, bataryaları yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve birçok diğer uygulama için ideal bir enerji depolama çözümü haline getirmektedir.

Günümüzde, batarya teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, enerji depolama kapasitesinin artmasına ve maliyetlerin düşmesine olanak tanımıştır. Lityum-iyon bataryalar, bu alanda en yaygın kullanılan batarya türlerinden biri olup, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömürleri ve geri dönüşüme imkan sağlayan yapıları(Kaya, 2022) ile öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, yeni nesil batarya teknolojileri, daha çevre dostu malzemeler kullanılarak üretilmekte ve geri dönüştürülebilirlik oranları artırılmaktadır. Bu gelişmeler, batarya enerjisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Batarya enerjisinin önemi, sadece yenilenebilir enerji sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılmasında değil, aynı zamanda enerji güvenliğinin sağlanmasında da kendini göstermektedir (Sun vd., 2015). Geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltan batarya sistemleri, enerji arzındaki kesintiler sırasında kritik altyapıların kesintisiz olarak çalışmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, mikro şebekeler (Sreekala vd., 2024) ve akıllı şebekeler (Mihet-Popa, 2023) gibi modern enerji dağıtım sistemlerinin verimliliğini artırmak için de batarya teknolojileri kullanılmaktadır. Bu sistemler, enerji talebindeki dalgalanmaları dengeleyerek ve aşırı yüklenmeleri önleyerek enerji dağıtımının daha stabil ve güvenilir olmasını sağlamaktadır.

Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya enerjisinin kullanım alanlarının genişlemesinde önemli bir etken olmuştur. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri, temiz ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

Elektrikli araçlar, bataryalar sayesinde fosil yakıtlara kıyasla daha düşük emisyonlu ve daha verimli bir alternatif sunmaktadır (Mansuri vd., 2020). Bu dönüşüm, sadece ulaşım sektöründe değil, aynı zamanda enerji altyapısının genelinde de önemli değişikliklere yol açmıştır. Elektrikli araçların şarj edilmesi için gerekli olan altyapının kurulması (Bose & Sivraj, 2020), enerji şebekelerinin yönetimi ve batarya geri dönüşüm sistemleri gibi konular, batarya enerjisinin modern dünyadaki rolünü daha da pekiştirmektedir.

Bataryaların taşınabilir elektronik cihazlarda akıllı kullanımı (Hild vd., 2014), modern yaşam tarzının bir parçası haline gelmiştir. Yapılan çalışmalarda akıllı telefonlar, tabletler, dizüstü bilgisayarlar ve giyilebilir teknolojiler gibi cihazlar, bataryalar sayesinde uzun süreli kullanım imkânı sunmaktadır (K. Liu vd., 2022). Bu cihazlar, günlük yaşamın vazgeçilmez unsurları haline gelmiş olup, batarya teknolojilerinin sürekli olarak iyileştirilmesi ve inovasyonun sürdürülmesi gerekmektedir. Bataryaların enerji yoğunluğunun artırılması, şarj sürelerinin kısaltılması ve güvenlik standartlarının yükseltilmesi, kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Namboothiri vd., 2024).

Yapılan çalışmalar batarya enerjisinin modern enerji sistemlerindeki rolünü ve önemini ortaya koymaktadır. Literatürdeki araştırmalar, batarya enerji depolama sistemlerinin (BESS) çeşitli uygulama alanlarında nasıl kullanıldığını ve bu sistemlerin sağladığı avantajları detaylı bir şekilde incelemektedir (Fotescu vd., 2021). Bu kapsamda, batarya enerjisinin enerji piyasalarında etkin karar verme süreçlerine, operasyonel kontrol yöntemlerine, hibrit enerji sistemlerine ve daha birçok alana olan katkıları literatürde geniş bir yer bulmaktadır. Literatürdeki güncel gelişim yönleri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Rüzgâr enerjisi, batarya depolama ve IDSMS (Intelligent Demand Side Management System - Akıllı Talep Yönetim Sistemi) gibi bileşenlerin bir araya getirildiği hibrit mikro şebeke güç sistemi için bulanık mantık tabanlı bir koordineli denetleyici (Li vd., 2010)'de önerilmiştir. Bu denetleyici, güç kalitesini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan simülasyonlar, önerilen kontrol stratejisinin belirli bir bölgedeki frekans dalgalanmalarını ve pilin depolama kapasitesini etkili bir şekilde denetleyebildiğini ve düzenleyebildiğini göstermektedir.

Bir aşamalı öğrenme sistemi sayesinde, elektrik piyasalarında karar verme sürecindeki etkinlik (Basso & Du, 2023a) 'deki çalışmada incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, simüle edilmiş bir Batarya Enerji Depolama Sistemi'nin (BESS), geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek kar elde ettiği gösterilmiştir. Özellikle dalgalı piyasalarda, önerilen sistemin fiyat değişimlerine hızlı uyum sağlamasının, sezgisel kontrol yöntemlerine göre önemli bir kar avantajı sunduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sistemin enerji piyasalarında etkin karar verme ve enerji kullanımını optimize etme potansiyelini vurgulamaktadır.

Batarya depolama sistemine farklı bir yaklaşım getiren ve sistem kontrolünü bulut tabanlı bir sistem üzerinden gerçekleştiren çalışma (Gonçalves vd., 2023)'de incelenmiştir. Bu yöntem, operasyonel kontrollerin daha akıllı bir şekilde yapılmasını ve yerinde operatörlere ihtiyaç duyulmamasını sağlamıştır. Sonuç olarak, bu yaklaşım sayesinde belirli kazançlar elde edilmiştir.

Hibrit enerji sistemlerinde pil ömrünün uzatılması ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesi, (Wu vd., 2023) 'teki çalışmada amaçlanmıştır. Türbin çıkışı ve dış güç şebekesinden alınan elektriğin, farklı zaman dilimlerinde ayarlanması yoluyla ekonomik işletim sağlandığı görülmüştür. Bu optimizasyonun, kullanıcı taleplerini karşılamak ve pil ömrü azalma maliyetlerini düşürmek için gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

Batarya ömrü üzerine yapılan çalışmaların hem tekil hem de grup batarya sistemleri için yürütüldüğü görülmektedir. BESS gruplarının güç şebekesi bağlantısını ve yerel yenilenebilir enerji tüketimini artırma potansiyeli, (Mao vd., 2023a) 'te incelenmiştir. Çalışmada, güvenli ve etkin işletim için pil ömrü kaybını dikkate alan bir BESS grup planlama stratejisi önerilmiştir. Bu stratejinin, pil ömrü kaybını minimize ettiği ve BESS'ler arasında pil sağlık durumunu eşitleyerek etkili bir şekilde işlediği belirtilmiştir.

Lityum-iyon pillerin kalan ömrünü tahmin etmede, nöral ağlar gibi teknolojilerin kullanıldığı, (X. Liu vd., 2023) 'te yapılan çalışmada ortaya konulmuştur. Çalışmada, batarya şarj durumu tahmini için Levy uçuş adımını içeren yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemin, arama hızını artırdığı ve kullanılan nöral ağın avantajlarını koruyarak güç bataryasının SOC (State of Charge) değerini daha doğru bir şekilde tahmin ettiği gözlemlenmiştir.

Araştırmacıların (Galli vd., 2024a) 'de yaptıkları çalışmada, farklı ekonomik fiyat aralıklarında belirli enerji fiyatlarının sistem konfigürasyonlarına etkisi incelenmiştir. Örneğin, enerji fiyatlarının belirli bir seviyenin altındayken pil veya ek enerji kısıtlamaları için yatırım yapmanın ekonomik açıdan haklı olmadığı, ancak belirli bir fiyat aralığında pil entegrasyonunun ekonomik olarak uygun hale geldiği belirtilmiştir. Bu nedenle, farklı ekonomik fiyat aralıklarında, pil entegrasyonunun veya güç düzeltme stratejilerinin ekonomik olarak uygun hale gelip gelmediği belirlenmektedir. Bu analiz, sistemin ekonomik performansını belirlemek için fiyatların rolünü vurgulamaktadır.

Rüzgâr enerjisi dalgalanmalarının neden olduğu sorunları çözmek için iki grup enerji depolama yöntemi (Ma vd., 2023)'de yapılan çalışma ile önerilmiştir. İlk olarak, güç sistemlerinde dengesiz güç ve ani yüklerin sorununu çözmek için 1.gurup pilin kooperatif bir telafi stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, negatif dengesiz güç ve ani yükleri tamamen telafi edebilmektedir. İkinci olarak, birleşik değişken mod adapte frekans bölme yöntemi, telafi gücünü süper kondansatörün yüksek frekans aralığında ve 2.gurup pilin düşük frekans aralığında çalışmasını sağlayacak şekilde iyileştirilmiştir. Bu yöntem, telafi gücünü etkin bir şekilde bölerek orijinal sinyalin özelliklerini koruyabilmektedir. Son olarak, rüzgâr enerjisi ağındaki dalgalanmayı azaltmak için iki katmanlı bir model önerilmiştir. Bu model, rüzgâr enerjisi dalgalanmalarını azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Araştırmacıların (Jan vd., 2021) 'de yaptıkları çalışmada, pil-süperkapasitör hibriti tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Çalışmada, basit bir kontrol stratejisi kullanılarak enerji depolama birimlerinin güç dağıtımının optimize edilebileceği gösterilmiştir.

Darbeli yükler için bir pil-ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi, (Wasim vd., 2022)'deki çalışmada önerilmiştir. MATLAB/Simulink modeli kullanılarak geliştirilen kontrol stratejisi, pil ömrünü etkileyen faktörleri en aza indirmek amacıyla tasarlandığı belirtilmiştir.

Batarya sistemlerine farklı bir gelişim yönünden bakıldığında, (Deutsch vd., 2020) 'deki çalışma, otonom su altı araçları için enerji yönetimi stratejilerini yakıt hücreli batarya hibrit güç sistemleriyle karşılaştırmıştır. Gelişmiş enerji yönetimi stratejilerinin enerji tüketimini azaltabileceği, yakıt hücresi bozulmasını

sınırlayabileceği ve güvenilirliği artırabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, bu stratejilerin farklı birimlere entegre edilebilme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir.

Çift aşamalı bir enerji yönetim stratejisinin, işletme maliyetlerini en aza indirerek küresel anlamda üst düzey bir optimizasyon sağladığı,(Jani vd., 2021) 'deki çalışmada önerilmiştir. Bunun yanı sıra, sistemin güvenli ve verimli bir şekilde işletilmesi için pil ömrü kaybını dikkate alan çalışmaların da (Mao vd., 2023b)'de yapıldığı ifade edilmiştir.

Diğer bir çalışmada ise yazarlar daha farklı bir durumu irdeleyerek, enerji yönetiminin ev içerisine kadar girmesini sağlamış ve batarya enerji depolama sistemlerinden kişisel boyutta ne derece faydalanabileceğimizi ortaya koymuşlardır (Abbasi vd., 2023).

Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli yararlanabilmek için batarya enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunun önemi, Leonardo ve arkadaşlarının çalışmasında vurgulanmıştır. (Guiducci vd., 2024) 'te, batarya sistemlerinin etkinliğinin şarj ve deşarj süreçlerini yöneten kontrol mekanizmalarına bağlı olduğu, bu nedenle kural tabanlı kontrolörlerin sınırlamalarının ele alındığı belirtilmiştir. Ayrıca, PV sistemlerinin bulunduğu düğümlere özel uyarlanmış optimal bir kontrol çerçevesi sunulmuştur.

Batarya enerjisini ilgilendiren bir diğer çalışmada ise; batarya sistemlerindeki dengesizlik sorununu çözmek için hızlı ve esnek bir dengeleme yöntemi sunularak, ekstra ekipman gerekmeden sistemin dayanıklılığını ve kullanım ömrünü artıran yeni bir batarya yapılandırma tekniğini (Huang vd., 2024) 'deki çalışmada ortaya konulmuştur.

Batarya kapasitesinin batarya ömrüyle ilişkisi (Khoury vd., 2024)'te ele alınmıştır. Araştırmada, mikro şebeke sistemlerinde batarya kapasitesinin yaşlanma nedeniyle düştüğü, ancak kapasitenin artırılmasının bataryanın sağlık durumunu önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir.

Rüzgâr enerjisi ve batarya depolama sistemlerinin hibritleşmesinin yenilenebilir enerji sektöründe önemli bir gelişme olduğu vurgulanmıştır. Bu sistemlerin bir araya getirilmesinin, enerji arzında istikrarı artırdığı ve enerji depolama kapasitesi ile enerji talebi arasındaki dengesizliği gidererek elektrik şebekelerinin güvenilirliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Ancak, bu hibrit sistemlerin etkin bir şekilde

tasarlanması ve işletilmesi için uygun stratejilerin geliştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

İşletme stratejilerinin gelişen sistemlerle çok yönlü olarak uygulanabilir olduğu görülmüştür. Bu stratejiler, güç yumuşatma tekniklerini ve ani, dengesiz yükler karşısında alınacak önlemleri kapsamaktadır. Aynı zamanda, güç kalitesinin iyileştirilmesi ve batarya kapasite optimizasyonu konularında da önemli adımlar atıldığı belirtilmiştir.

Hibrit rüzgâr ve batarya entegrasyonunda güç dalgalanmasının azaltılması (Mahesh & Sandhu, 2016), yükün sürekli ve kesintisiz beslenebilmesi (Housseini vd., 2016) ve pil ömrünün doğru kullanılmasına (Amini vd., 2023a) ait yapılmış çalışmaların yanında ilave olarak işletme açısından ekonomik süreklilik bakış açısı da kazandırılması gerekmektedir. Bu yapılan çalışmada aynı zamanda işletme maliyetleri de analize dahil edilmiştir ve dolayısıyla yatırımcı açısından da çok önemli bir değeri bulunmaktadır.

Sonuç olarak, batarya depolama sistemleri ve bunların yönetimi gün geçtikçe gelişmektedir. Yapılan çalışmalar, batarya enerjisinin modern toplumda giderek artan bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, elektrik üretimi, depolaması ve gerektiğinde kullanımı konularında önemli eksikliklerin olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki bu boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

Batarya depolama sistemlerinin enerji şebekesine entegrasyonu artış göstermektedir. Ancak, bu sistemlerin doğru stratejilerle daha verimli ve maliyet etkin kullanılabileceği açıktır. Çalışmada önerilen stratejilerle normal çalışma durumuna kıyasla olumlu kazançlar elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, bu stratejilerden yola çıkarak batarya sisteminin optimum kapasitesinin kavramsal olarak belirlenmesi hedeflenmiş ve literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmanın, ülkelerin ekonomisine olumlu katkı sağlayacağı için kritik bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

1. RÜZGÂR SANTRALLERİ

1.1. Rüzgâr Enerjisinin Temel Prensipleri

Rüzgâr enerjisi, rüzgârın kinetik enerjisinin türbinlerin kanatları aracılığıyla mekanik enerjiye, ardından jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır. Rüzgâr, atmosferdeki basınç farkları nedeniyle oluşur ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlidir. Türbinlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için rüzgâr hızının belirli bir aralıkta olması gerekir.

Rüzgâr türbinleri, genellikle 3-25 m/s hız aralığında çalışır ve en yüksek verim, nominal hız olarak adlandırılan belirli bir hızda elde edilir. Türbin firmalarının tasarım durumuna göre rüzgârdan elde edilen enerji miktarı değişkenlik gösterir. Günümüzde rüzgâr türbinleri tasarım farklılıkları ile 8 MW kurulu güce ulaşmıştır. Teknolojinin artması ile bu rakamın dahada yukarılara çıkması beklenmektedir.

Türbinlerin yerleştirileceği alanın topografyası, rüzgâr hızını ve enerji üretim kapasitesini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, rüzgâr santrallerinin kurulacağı alanlar, detaylı bir fizibilite analizi sonucunda belirlenir. Rüzgâr türbini kurulmadan önce, ilgili sahanın rüzgâr rejimini belirlemek amacıyla ölçüm direkleri kullanılır. Yaklaşık iki yıl boyunca toplanan verilerle saha modellemesi yapılır ve bu modelleme, kurulacak türbinin tipi ve özelliklerinin belirlenmesine katkı sağlar.

1.2. Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı

Rüzgâr türbinlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için kullanılan ekipmanların doğru bir şekilde seçilmesi ve maksimum verim sağlayacak şekilde tasarlanması büyük önem taşır. Türbinlerin tasarımı sırasında, aerodinamik yapı, mekanik dayanıklılık, malzeme seçimi ve çevresel koşullara uyum gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Özellikle kanat tasarımı, rüzgâr hızından en iyi şekilde yararlanmak için aerodinamik prensiplerle optimize edilmelidir. Türbin gövdesi ve kule yapısı ise, hem türbinin ağırlığını taşıyacak şekilde güçlü hem de uzun ömürlü olacak malzemelerle inşa edilmelidir. Ayrıca, jeneratör, dişli kutusu ve kontrol sistemlerinin performansı, türbinin genel enerji üretim kapasitesini doğrudan etkilediğinden, bu bileşenlerin uyum içinde çalışması sağlanmalıdır.

1.2.1. Türbin Kanatları (Blade)

Kanatlar, rüzgârın kinetik enerjisini yakalayarak türbinin dönmesini sağlayan temel bileşenlerdir. Aerodinamik olarak tasarlanan bu yapılar, rüzgâr enerjisinin büyük bir kısmını mekanik enerjiye dönüştürür. Modern türbinlerde genellikle üç kanat bulunur ve uzunlukları 20 ila 80 metre arasında değişir. Kanat boyutlarının artması, enerji üretim kapasitesini de artırır. Üretici firmaların tasarımlarına bağlı olarak, kanatlar yıldırım koruma ve gürültü azaltıcı sistemlerle donatılabilir.

1.2.2. Rotor ve Göbek (Hub)

Kanatlar, rotor adı verilen bir yapıya monte edilir. Rotor, kanatlardan gelen mekanik enerjiyi şaft aracılığıyla jeneratöre iletir. Göbek (hub), kanatların rotora bağlandığı merkezi yapıdır. Rüzgâr türbinine karşıdan bakıldığı zaman kanatların bağlanmış olduğu kısmi küre şeklindeki yapıdır.

1.2.3. Şaft (Shaft)

Rotorun dönme hareketi, şaft aracılığıyla dişli kutusuna ve jeneratöre aktarılır. Hub kısmının jeneratör ve dişli kutusuyla mekanik bağlantı kurduğu bölüm şafttır. Kanatlar vasıtasıyla hub'un dönmesi sonucu oluşan hareket, rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek dişli kutusuna aktarır.

1.2.4. Dişli Kutusu (Gearbox)

Dişli kutusu, türbinin mekanik enerji üretim sürecinde kritik bir rol oynar. Rotorun düşük hızdaki dönüş hareketini, jeneratörün çalışması için gereken yüksek hıza dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu dönüşüm, türbinin verimli bir şekilde enerji üretmesini sağlar. Dişli kutuları genellikle farklı dişli oranlarına sahip olup, bu sayede rüzgâr hızındaki değişikliklere uyum sağlayabilir. Dişli kutusunun dayanıklılığı, sistemin genel performansı açısından büyük önem taşır. Rüzgâr türbinleri genellikle 20-25 yıl boyunca çalışacak şekilde tasarlandığı için, dişli kutularında kullanılan malzemelerin yüksek mukavemete sahip olması ve düzenli bakımlarının yapılması gerekir. Ayrıca, dişli kutusunda oluşabilecek titreşim ve ısınma gibi problemlerin önlenmesi amacıyla yağlama ve soğutma sistemleri de entegre edilmiştir. Bu sistemler, aşınmayı en aza indirerek dişli kutusunun ömrünü uzatır.

1.2.5. Jeneratör (Generator)

Jeneratör, türbinin elektrik enerjisi üretim sürecinin merkezinde yer alır. Şafttan gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için çalışan bu bileşen, türbinin toplam verimliliğini belirleyen ana unsurlardan biridir. Genellikle senkron ve asenkron olmak üzere iki tür jeneratör tercih edilir.

- *Senkron jeneratörler* sabit bir hızda çalışarak şebekeye doğrudan bağlanabilir. Daha hassas kontrol imkânı sunan bu jeneratörler, özellikle büyük ölçekli türbinlerde tercih edilir.
- *Asenkron jeneratörler* ise değişken hızlarda çalışabilir ve genellikle daha küçük türbinlerde kullanılır. Bu jeneratör türü, değişken rüzgâr hızlarına daha iyi uyum sağlar ve üretim maliyetlerini düşürebilir.

Jeneratörlerin tasarımı, türbinin gücüne, çalışma koşullarına ve şebeke bağlantı şekline göre değişiklik gösterir. Modern jeneratörler, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sunmanın yanı sıra, titreşim, ısı ve akustik gürültü gibi sorunları en aza indirmek için gelişmiş soğutma ve yalıtım sistemleri ile donatılmıştır. Ayrıca, rüzgâr hızındaki dalgalanmalardan kaynaklanan yük değişimlerini dengeleyebilmek için güç elektroniği bileşenleriyle birlikte çalışabilirler.

1.2.6. Nasel (Nacelle)

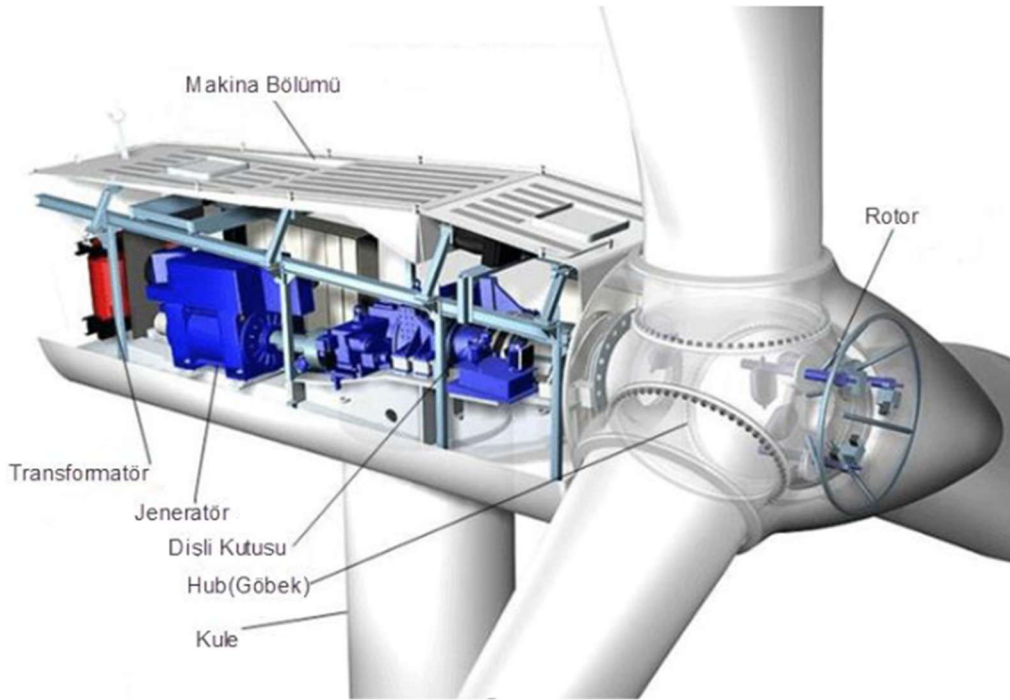
Nasel, türbinin jeneratör, dişli kutusu ve şaft gibi kritik bileşenlerini barındıran koruyucu bir kabindir. Kuleye monte edilen bu yapı, iç mekanizmaları çevresel koşullardan korur. Nasel tasarımları, üretici firmalara göre değişiklik gösterebilir.

1.2.7. Kule (Tower)

Kule, türbinin yüksekliğini sağlayarak rüzgârın daha güçlü ve kararlı olduğu seviyelere ulaşmasını sağlar. Genellikle çelik veya beton malzemeden üretilir ve 80 ila 150 metre arasında bir yüksekliğe sahiptir. Kule içerisinde, nacelle'e ulaşımı sağlayan merdiven veya asansör sistemleri bulunur. Aynı zamanda elektrik enerjisinin taşındığı ana hatlar kulede yer alır.

1.2.8. Kontrol Sistemleri ve Yaw Mekanizması

Kontrol sistemleri, türbinin optimum hızda çalışmasını sağlamak için rüzgâr hızını ve yönünü sürekli izler. Gelişmiş sensörler yardımıyla rüzgâr yönü, rüzgâr hızı ve atmosfer sıcaklığı gibi veriler ölçülerek türbinin en verimli şekilde çalışması sağlanır. Çoğu modern türbin, tamamen otomatik kontrol yazılımlarıyla çalışır. Yaw mekanizması, türbini rüzgâr yönüne çevirmek için kullanılır. Kule üst kısmına ve nacelle'in alt kısmına monte edilen dişliler yardımıyla türbin, rüzgârın geliş yönüne döndürülerek maksimum verim elde edilir.



Şekil 1. Örnek bir rüzgâr türbini modeli (Yavuz vd., 2020)

1.3. Rüzgâr Enerjisinin Dünyadaki Durumu

Rüzgâr enerjisinin dünyadaki durumu son yıllarda önemli bir büyüme ve gelişme katettiği görülmüştür. Küresel anlamda rüzgâr enerjisi ile gelişimleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Kurulu Güç bazında rüzgâr enerjisinin kurulu gücü dünya çapında istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (GWEC)'ne göre, rüzgar enerjisinin toplam kurulu kapasitesi 2021'in sonunda 743 gigawatt'a (GW), 2022 sonunda 906 GW'a ve 2023 sonu itibari ile 1023 GW'a ulaşarak önceki yıllara göre

önemli bir artış gerçekleştirmiştir (GWEC.NET Associate Sponsors Podcast Sponsor Leading Sponsor Supporting Sponsor Co-Leading Sponsor, n.d.).

2024 yılı itibarıyla Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA)'nın verilerine göre, rüzgâr enerjisi kapasitesi dünya genelinde kıtalar arasında farklılık göstermektedir. Asya, 1.017 GW'lık kapasite ile bu alanda lider konumda olup, Çin başta olmak üzere bölgedeki yenilenebilir enerji projelerinin büyümesi bu başarıyı desteklemektedir. Avrupa, enerji üretiminin %35,7'sini rüzgâr enerjisinden karşılayarak karasal ve açık deniz türbinlerinde önemli bir teknoloji liderliği göstermektedir. Kuzey Amerika ise ABD ve Kanada'nın öncülüğünde yenilenebilir enerji üretiminde %27 oranına ulaşmıştır. Güney Amerika'da yenilenebilir enerji üretiminin büyük bir kısmı hidroelektrikten sağlansa da rüzgâr enerjisi hızla büyüyen bir alan olarak dikkat çekmektedir. Afrika kıtasında toplam yenilenebilir enerji kapasitesi 62 GW seviyesinde olmakla birlikte, rüzgâr enerjisi yatırımları potansiyelini tam olarak gerçekleştirememiştir. Okyanusya ise %14,1 oranında büyüme kaydederek bu alanda önemli bir artış göstermiştir. Bu dağılım, rüzgâr enerjisinin küresel olarak büyüyen bir enerji kaynağı olduğunu ortaya koyarken, özellikle gelişmekte olan bölgelerde altyapı yatırımlarının hızlandırılması gerektiğini de vurgulamaktadır (Renewable Energy Agency, 2024).

Offshore rüzgâr enerjisi son yıllarda önemli bir ilgi kazanmıştır. Birleşik Krallık, Almanya, Danimarka, Hollanda ve Çin gibi ülkeler, denizde mevcut olan daha yüksek rüzgâr hızlarından ve daha büyük enerji potansiyelinden yararlanarak açık deniz rüzgâr santrallerine önemli yatırımlar yapmıştır. Teknolojik gelişmeler, açık deniz rüzgâr enerjisini daha uygulanabilir ve uygun maliyetli hale getirmiştir.

Rüzgâr türbini teknolojisinde daha büyük rotor çapları, daha uzun kuleler ve daha verimli türbin tasarımları gibi sürekli gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler, artan enerji tasarrufuna, gelişmiş kapasite faktörlerine ve üretilen elektrik birimi başına düşen maliyetlere yol açmıştır.

Rüzgâr enerjisinin maliyeti, geleneksel fosil yakıt kaynaklarına kıyasla giderek daha rekabetçi hale gelmiştir. Teknolojik gelişmeler, ölçek ekonomileri ve azalan ekipman maliyetleri, rüzgâr enerjisi üretim maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunarak birçok ülke tarafından cazip bir seçenek haline gelmektedir.

Dünyanın dört bir yanındaki hükümetler, rüzgâr enerjisi dağıtımını desteklemek için politikalar ve teşvikler uygulamıştır. Bu önlemler, tarife garantilerini, vergi kredilerini, yenilenebilir enerji hedeflerini ve rüzgâr enerjisi projeleri için ihaleleri içerir. Bu tür bir politika desteği, küresel olarak rüzgâr enerjisinin büyümesinde çok önemli bir rol oynamıştır.

Genel olarak, rüzgâr enerjisi, artan kurulu kapasite, teknolojik ilerlemeler ve uygun politika desteği ile dünya çapında kayda değer bir büyümeye yaşanmıştır. Rüzgâr enerjisi altyapısına, şebeke entegrasyon çözümlerine ve araştırma ve geliştirmeye devam eden yatırımların, küresel enerji geçişinde rüzgâr enerjisinin rolünü daha da artırması beklenmektedir.

1.4. Rüzgâr Enerjisinin Türkiye’deki Durumu

Türkiye son yıllarda rüzgâr enerjisinde önemli ölçüde yatırım yapmış olup ciddi oranda bir büyüme yaşamış ve rüzgâr enerjisi geliştirme konusunda bölgenin önde gelen ülkelerinden biri haline gelmiştir. Türkiye’de rüzgâr enerjisinin genel durumu aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Son 10 yıl içinde Türkiye, rüzgâr enerjisi kapasitesinde önemli bir gelişim göstermiştir. 2014 yılında yaklaşık 3.600 MW olan kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi, 2024 itibarıyla yaklaşık 12.000 MW’a ulaşarak üç katına çıkmıştır. Bu büyüme, Türkiye’nin enerji arz güvenliğini artırma ve yenilenebilir enerji kaynaklarını teşvik etme stratejisinin bir parçasıdır. Özellikle Batı Anadolu, Çanakkale, İzmir ve Balıkesir gibi bölgeler, yüksek rüzgâr potansiyeli sayesinde bu büyümeye büyük katkı sağlamıştır (TUREB, 2024).

Türkiye, özellikle Ege ve Marmara kıyı bölgeleri ve yüksek rakımlı alanlar boyunca bol miktarda rüzgâr kaynağı sunan elverişli bir coğrafi konumda yer almaktadır. Bu bölgeler, rüzgâr santrallerinin gelişimi için güzel bir ortam sağlamaktadır.

Son yıllarda Türkiye’deki rüzgâr enerjisi projeleri hem kara hem de deniz üstü türbinler için hız kazanmıştır. Ülke, 2035 yılına kadar deniz üstü rüzgâr enerjisinde 5 GW kurulu kapasite hedeflemiştir. Bu doğrultuda, Dünya Bankası’nın desteğiyle kapsamlı bir yol haritası hazırlanmış ve bölgedeki uygun alanlar belirlenmiştir. Ayrıca, yerli ekipman üretimine yönelik teşvikler, rüzgâr enerjisindeki büyümeyi destekleyen

önemli bir faktör olmuştur (Haber, 2024). Aynı zamanda rüzgâr enerjisi gelişimini teşvik etmek için çeşitli teşvik ve destek mekanizmalarını uygulamaya koymuştur. Bunlar, garantili tarifeleri, yatırım teşviklerini ve rüzgâr santrallerinden üretilen elektrik için garantili bir satın alma sözleşmesini içermektedir.

Türkiye, kullanılmayan önemli rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün tahminlerine göre, Türkiye'nin teknik rüzgâr enerjisi potansiyeli 48 GW'ın üzerindedir ve bu, rüzgâr enerjisi kapasitesinde daha fazla büyüme için önemli bir alan olduğunu göstermektedir.

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi gelişimi, aynı zamanda teknolojik altyapı ve uluslararası iş birlikleri ile güçlendirilmiştir. TÜREB (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği)'in raporlarına göre, sektör, uluslararası fuar ve kongrelerde temsil edilerek global ölçekte rekabet gücünü artırmaya devam etmektedir. YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması) ve yerli aksam teşvikleri, bu büyümenin temel destek mekanizmaları arasında yer almaktadır. Ancak, maliyet artışları ve uluslararası pazarlardaki rekabet, sektörün karşı karşıya olduğu temel zorluklar arasındadır.

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi alanındaki yatırımları hem yenilenebilir enerji hedeflerini desteklemekte hem de enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Bu başarı, güçlü teşvik mekanizmaları, yerel üretim kapasitesinin artışı ve uluslararası iş birlikleri ile mümkün olmuştur. Önümüzdeki dönemde, deniz üstü projelerin de devreye alınmasıyla Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kapasitesinde önemli bir sıçrama beklenmektedir. Genel olarak, Türkiye elverişli rüzgâr kaynaklarından ve politika desteğinden yararlanarak rüzgâr enerjisinin geliştirilmesinde önemli ilerleme kaydetmiştir. Ülkenin yenilenebilir enerji taahhüdü ve daha fazla kapasite artırma potansiyeli, Türkiye'yi bölgedeki rüzgâr enerjisi sektöründe önemli bir oyuncu olarak konumlandırılmaktadır.

1.5. Rüzgâr Enerjisinin Zorlukları

Rüzgâr santralleri, yenilenebilir enerji kaynağı olmaları sebebiyle yatırımcıların ilgisini çekmektedir. Ancak, bu santrallerin işletilmesi sırasında bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklar genel olarak üç ana başlık altında incelenebilir:

- Rüzgâr kesintileri
- Şebeke entegrasyonu
- Güvenilir ve İstikrarlı Elektrik Arzı

Rüzgâr enerjisinin doğası gereği sürekli ve kararlı bir kaynak olmaması, rüzgâr santrallerinin karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir. Rüzgâr kesintileri ve akıştaki dalgalanmalar, santrallerin üretim kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Bu durum, enerji üretiminin öngörülemez hale gelmesine neden olarak, hem planlama hem de yönetim süreçlerini karmaşıktırmaktadır. Yeterli yedek enerji depolama sistemleri veya alternatif enerji kaynaklarının entegrasyonu sağlanmadığı takdirde, üretim ve tüketim arasındaki dengenin korunması mümkün olamayabilir. Dengesiz üretim ise enterkonnekte şebeke üzerinde ani yük değişimlerine ve dalgalanmalara yol açarak sistemin genel kararlılığını tehdit edebilir.

Rüzgâr santrallerinin yüksek verimle çalışabilmesi için, rüzgâr hızının güçlü ve kararlı olduğu alanlara kurulması gerekmektedir. Bu durum genellikle zorlu coğrafi koşulları beraberinde getirir. Özellikle dağlık veya ulaşımı zor bölgelerde kurulan türbinlerde, üretilen elektriğin şebekeye aktarılması, bakım ve arıza durumlarında türbinlere erişim gibi konular önemli zorluklar oluşturmaktadır. Elektrik iletim hatlarının uzunluğu ve altyapı yetersizlikleri de şebekeye entegrasyon sürecini karmaşık hale getirebilmektedir. Ayrıca, şebeke bağlantı noktalarındaki yük dengesizliği ve harmonik distorsiyon gibi sorunlar, uzun vadede sistemin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Rüzgâr santrallerinde üretilen elektrik, genellikle ulusal şebekelere aktarılmaktadır. Şebeke kullanıcılarının kaliteli, kararlı ve kesintisiz bir elektrik arzı talep ettiği göz önüne alındığında, bu süreçte karşılaşılan teknik ve operasyonel zorluklar büyük bir önem kazanmaktadır. Rüzgâr hızındaki ani değişiklikler, enerji arzında dalgalanmalara yol açabilir. Bu tür sorunlar, sadece bireysel kullanıcıları değil, aynı zamanda sanayi ve ticaret sektörlerini de etkileyerek ekonomik kayıplara neden olabilir. Bu bağlamda, enerji yönetimi stratejilerinin ve şebeke dengeleme mekanizmalarının geliştirilmesi gereklidir. Modern şebeke sistemlerinde kullanılan akıllı şebeke teknolojileri ve enerji depolama sistemleri, bu tür dalgalanmaların etkisini azaltmada kritik bir rol oynayabilir.

2. BATARYA ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Batarya enerjisi depolama sistemleri, elektrik enerjisinin daha sonra kullanılmak üzere pillerde depolanmasını sağlayan teknoloji ve altyapıyı temsil etmektedir. Bu sistemlerin, enerji yönetiminde, özellikle yenilenebilir enerjinin entegrasyonunda, şebeke istikrarının sağlanmasında ve pik yüklerin yönetiminde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir.

Bu sistemlerin, düşük talep dönemlerinde ya da yüksek yenilenebilir enerji üretimi zamanlarında ortaya çıkan enerji fazlasını depolamak amacıyla tasarlandığı görülmektedir. Depolanan enerjinin, talebin arttığı veya üretimin azaldığı dönemlerde şebekeye geri kazandırılması sayesinde, enerji arzı ve talebi arasında denge sağlanmaktadır. Böylece, elektrik şebekelerinin daha güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesine olanak tanınmaktadır.

Batarya enerjisi depolama sistemlerinin sağladığı en önemli katkılardan biri, şebeke frekansının ve gerilim seviyelerinin istikrarlı bir şekilde korunmasıdır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği üretimde meydana gelen dalgalanmaların etkilerinin azaltılmasında bu sistemler kritik bir role sahiptir. Aynı zamanda, pik yük yönetimi sayesinde, enerji talebinin en yüksek olduğu saatlerde şebeke üzerindeki baskı azaltılmakta ve böylece daha az fosil yakıtlı enerji santrali devreye alınarak karbon salınımı düşürülmektedir.

Bunun yanı sıra, bu sistemler enerji verimliliğini artırmakta ve enerji iletim hatlarının kapasite sorunlarının giderilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle mikro şebekelerde ve adalar gibi izole bölgelerde kullanılan batarya enerjisi depolama sistemleri, enerji arzının sürekliliğini sağlamak için bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, enerji ticareti ve ekonomik kazançlar açısından da bu sistemlerin sunduğu fırsatlar dikkat çekmektedir. Talebin düşük olduğu dönemlerde enerji maliyetlerini düşürmek için elektrik depolanmakta ve talebin yüksek olduğu dönemlerde daha yüksek fiyatlarla enerji satışına olanak tanınmaktadır. Bu ekonomik faydalar, batarya enerjisi depolama sistemlerinin hem bireysel tüketiciler hem de enerji şirketleri için cazip bir yatırım haline gelmesini sağlamaktadır.

2.1. Bileşenler

Tipik bir batarya depolama sistemi, aşağıdakiler de dahil olmak üzere birkaç temel bileşenden oluşur:

Bataryalar: Sistemin kalbi olan piller, elektrik enerjisini kimyasal formda depolamaktadır. Lityum iyon, kurşun asit, sodyum kükürt, akış pilleri gibi çeşitli pil teknolojileri bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Her pil türü, kapasite, verimlilik, ömür ve maliyet açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Bu çeşitlilik, sistemin uygulama alanına uygun bir teknoloji seçilmesine olanak tanımaktadır.

Güç Dönüşüm Sistemi: Piller ve şebeke arasındaki elektrik akışını düzenleyen bu sistem, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürmek için invertörler, dönüştürücüler ve diğer güç elektroniği bileşenlerini içermektedir. Bu dönüşüm, şebeke entegrasyonu ve güvenilir enerji iletimi için kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, enerji kayıplarını minimize ederek sistemin genel verimliliğini artırmaktadır.

Kontrol ve İzleme Sistemleri: Bataryaların şarj ve deşarj süreçlerini düzenlemek, sistem performansını optimize etmek ve güvenli çalışmayı sağlamak için tasarlanmış bu sistemler, enerji yönetimi ve arıza önleme açısından hayati bir rol üstlenmektedir. İleri izleme yazılımları, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yoluyla operasyonel kararların iyileştirilmesine katkı sunmaktadır.

2.2. Uygulamalar

Batarya depolama enerjisi, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklar tarafından üretilen fazla enerjiyi depolayabilir ve düşük üretim dönemlerinde serbest bırakabilme özelliğine sahiptir. Bu, kesintileri düzeltmeye ve yenilenebilir enerji arzının güvenilirliğini artırmaya yardımcı olmaktadır.

Batarya sistemlerinde 3 önemli yön bulunur. Bunlardan ilki daha çok maliyet ile alakalı olarak, elektrik fiyatının düşük olan saatlerde bataryalarda depolanıp yüksek olan saatlerde sisteme gönderilmesidir. Bu sayeden enerjiden daha fazla verim almaya çalışılır. Bir diğer metot ise güç yumuşatılmasıdır. Özellikle rüzgâr santrallerinde, rüzgâr rejiminin sürekli değişkenlik göstermesinden kaynaklı olarak santralin ortak güç çıkışının batarya sistemleri ile desteklenerek daha yumuşak bir şekilde sisteme gönderilmesi sağlanır.

Bir diğerk önemli yöntem ise batarya sistemlerinin elektrik piyasası içerisinde oluşan dengesizlikleri minimum seviyeye indirme performansdır. Batarya içerisindeki enerji veya boş enerji sayesinde şarj-deşarj işlemleri yapılarak santralin dengesizlik zararları minimize edilmeye çalışılmaktadır.

2.3. Avantajlar

Batarya enerji sistemleri, şarj vedeşarj oranlarındaki yüksek esneklikleri sayesinde dinamik enerji yönetimi ve şebeke desteğı için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemler, ihtiyaç anında hızlı bir şekilde güç çıkışı sağlayarak talep veya arzda meydana gelen dalgalanmalara anında yanıt verebilmektedir.

Depolama kapasitesi gereksinimlerine bağılı olarak kolayca ölçeklendirilebilen batarya enerji sistemleri, bu özellikleri sayesinde farklı uygulamalara ve sistem boyutlarına uyum sağlayabilmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş bir ölçekte entegrasyonunu desteklemesi, enerji üretiminde sürdürülebilirliğı artırmaktadır.

Ayrıca, yoğun talep dönemlerinde fosil yakıtlı enerji üretiminin yerini alarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmakta ve çevresel etkilerin minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu çok yönlü özellikler, batarya enerji sistemlerini modern enerji altyapısının önemli bir bileşeni haline getirmektedir.

2.4. Zorluklar

Pillerin ve ilgili bileşenlerin maliyeti, batarya enerji sistemlerinin büyük ölçekli dağıtımı önündeki önemli engellerden biri olarak görölmektedir. Ancak son yıllarda, batarya maliyetlerinde kayda değerk bir düşüş yaşanmaktadır. Bu durum, batarya sistemlerini daha ekonomik ve erişilebilir hale getirerek yenilenebilir enerji projelerinde ve şebeke uygulamalarında kullanımını teşvik etmektedir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, batarya enerji sistemlerinin kapasite, ömür ve maliyet etkinliğı açısından daha da gelişmesi beklenmektedir.

Bataryaların ömrü ve verimliliğı, kullanılan teknolojiye bağılı olarak önemli ölçüde değışiklik gösterebilir. Örneğın, lityum iyon bataryalar uzun ömür ve yüksek verimlilik sunarken, diğerk batarya teknolojileri daha düşük maliyet veya belirli uygulamalara uygunluk gibi farklı avantajlar sağlayabilir. Ancak, uzun vadeli

performansı artırmak ve bataryaların zamanla enerji depolama kapasitelerinde meydana gelebilecek kayıpları en aza indirmek, sektördeki önemli zorluklar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, batarya ömrünü uzatmaya ve uzun süreli yüksek verimlilik sağlamaya yönelik çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışması sürdürülmektedir (Song vd., 2019).

Batarya enerji sistemlerinin çevresel etkileri, üretimden bertarafa kadar tüm süreçlerde dikkatle ele alınması gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir. Batarya üretimi sırasında kullanılan hammaddelerin çıkarılmasının, genellikle yoğun enerji tüketimine yol açtığı ve bu süreçte su kaynaklarının kirlenmesi, habitatların tahrip edilmesi ve sera gazı emisyonlarının artması gibi çevresel sorunlara neden olduğu bilinmektedir. Özellikle lityum, kobalt ve nikel gibi stratejik metallerin çıkarılması sırasında yerel ekosistemler ve topluluklar üzerinde olumsuz etkilerin ortaya çıkabileceği rapor edilmektedir.

Kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların uygun şekilde bertaraf edilmediği durumlarda, tehlikeli atıkların çevreye ve insan sağlığına zarar verebileceği belirtilmektedir. Bataryaların içerdiği ağır metaller ve diğer toksik maddelerin toprağa ve yeraltı sularına karışarak uzun vadeli çevresel sorunlara yol açabileceği vurgulanmaktadır. Bu nedenle, etkin geri dönüşüm sistemlerinin kurulmasının ve geliştirilmesinin büyük önem taşıdığı ifade edilmektedir. Geri dönüşüm teknolojilerinin ilerlemesiyle, bataryalardan geri kazanılan değerli metallerin yeniden üretim süreçlerine dahil edilmesiyle doğal kaynak kullanımının azaltılabileceği öngörülmektedir.

Ayrıca, çevresel etkilerin azaltılması amacıyla çevresel yönetmeliklerin güçlendirilmesi, endüstriyel uygulamaların daha sorumlu hale getirilmesi ve yenilikçi malzeme araştırmalarına öncelik verilmesi gerektiği dile getirilmektedir. Örneğin, çevresel etkisi daha düşük batarya kimyalarının geliştirilmesi ve biyobozunur malzemelerin kullanımının artırılmasıyla bu etkilerin en aza indirilebileceği belirtilmektedir.

Batarya enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin yönetiminin sadece geri dönüşüm ve bertaraf süreçleriyle sınırlı kalmaması gerektiği, aynı zamanda yaşam döngüsü boyunca çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hedefleyen bir yaklaşımı içermesi gerektiği ifade edilmektedir. Bu doğrultuda, uluslararası iş birliğinin artırılması ve

yenilikçi politikaların geliştirilmesiyle çevresel ve sosyal açıdan daha sürdürülebilir bir batarya enerji ekosistemi oluşturulabileceği öngörülmektedir.

2.5. Batarya Enerji Sistemlerinde Dünyada ve Türkiye’deki Durum

Batarya enerjisinin durumu, özellikle batarya enerjisi depolama sistemleri bağlamında dünya çapında hızla gelişmektedir. Henüz beklenen oranda gelişim göstermemiş olmasına rağmen yakın gelecekte ciddi oranda potansiyelinin artacağı beklenmektedir. Batarya Enerjisinin Küresel Durumuna bakacak olursak, batarya enerji depolama sistemleri dünya çapında önemli bir büyüme yaşamaktadır. Hizmet ölçeğinde batarya enerji sistemi projelerinin yanı sıra dağıtılmış ve sayaç arkası kurulumların konumlandırılması çeşitli ülkelerde artmaktadır.

Batarya teknolojilerinin, özellikle lityum iyon pillerin maliyeti, üretimdeki gelişmeler, ölçek ekonomileri ve artan talep nedeniyle yıllar içinde düştüğü gözlemlenmektedir. Bu maliyet düşüşü, batarya enerjisi depolamayı ekonomik olarak daha uygun ve geleneksel fosil yakıta dayalı üretim ve diğer depolama teknolojileriyle rekabet edebilir hale getirmektedir.

2023 yılında dünya çapında batarya enerji depolama sistemlerinin piyasa değeri yaklaşık 40 milyar dolar olarak hesaplanmış olup, pazarın %90’ı Çin, AB ve ABD tarafından domine edilmektedir.

2030 yılına kadar küresel kurulu batarya enerji depolama kapasitesinin 358 GW’a ulaşması beklenmektedir. 2022 itibarıyla bu kapasite yaklaşık 46 GW idi, bu da yıllık %23’lük bir büyüme oranını göstermektedir (İklim Haber, 2024).

Lityum-iyon bataryalar, düşük maliyetleri ve uzun ömürleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle lityum-demir-fosfat (LFP) ve lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit (NMC) bataryalar ön plandadır.

Türkiye’de batarya enerjisine baktığımız zaman, Türkiye, batarya enerji depolama sistemlerinin önemini ve bunların enerji sektörüne potansiyel katkılarını kabul etmiştir. Ülkede batarya enerjisi depolama projeleri geliştirmeye hem hükümetten hem de özel sektör kuruluşlarından artan bir ilgi gözlemlenmektedir.

Türkiye’de batarya enerjisinin depolanmasına odaklanan çok sayıda pilot proje ve tanıtım alanı başlatılmıştır. Bu projeler, batarya enerji sisteminin şebekeye

entegrasyonunun teknik ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmeyi ve Türkiye enerji sistemine özgü potansiyel faydaları ve zorlukları keşfetmeyi amaçlamaktadır.

Şebeke ölçeğinde kurulu batarya enerji depolama tesisleri henüz bulunmamakla birlikte, 2024 itibarıyla 32 GW ön lisanslı kapasite başvurusuyla depolama yatırımlarında hareketlilik görülmektedir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarını desteklemek amacıyla 2035 yılına kadar 7,2 GW/28,8 GWh kapasiteli batarya depolama sistemleri kurması bekleniyor. Bu sistemlerle yılda 6,9 TWh'lik yenilenebilir enerji kesintisi önlenebilir ve 369 milyon dolar doğal gaz ithalatı tasarrufu sağlanabilir. 2053 hedeflerinde ise Türkiye'nin enerji sisteminde şebeke esnekliği sağlayacak 30 GW/120 GWh batarya enerji kapasitesine ihtiyacı olduğu öngörülmektedir (Türkiye enerji dönüşümü görünümü, 2024).

Ülkemiz, batarya enerjisi depolama dağıtımını desteklemek için düzenleyici bir çerçeve oluşturmak için adımlar atmaktadır. Batarya depolamanın enerji piyasasına ve şebeke altyapısına entegrasyonunu kolaylaştırmak için düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları geliştirilmektedir. Batarya enerjisi depolama sistemleri, Türkiye'nin yenilenebilir enerji gelişimine artan odaklanması ile uyumludur. Batarya enerji sistemi, yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu geliştirebilir, şebeke istikrarının yönetilmesine yardımcı olabilir ve ülkenin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşılmasını destekleyebilir potansiyele sahiptir.

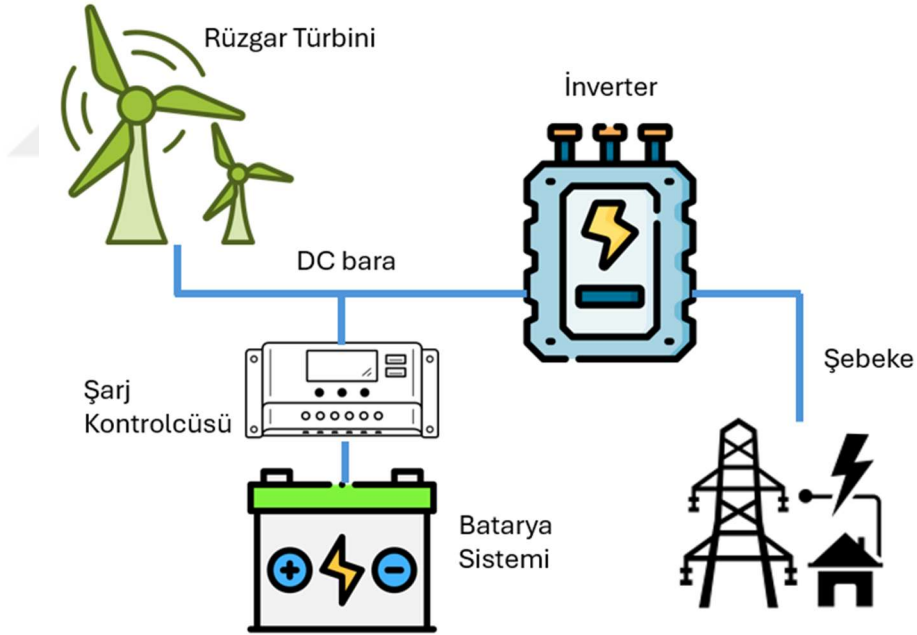
Türkiye elverişli bir coğrafi konuma, bol miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarına ve artan enerji talebine sahiptir. Bu, batarya enerjisi depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji entegrasyonunu desteklemede, şebeke güvenilirliğini artırmada ve Türkiye'deki enerji sistemini optimize etmede önemli bir rol oynaması için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Batarya enerji depolaması, Türkiye'de henüz gelişiminin ilk aşamalarında olsa da potansiyeli ve enerji sistemine entegrasyon ihtiyacı giderek daha fazla kabul görülmektedir. Devam eden yatırımların, destekleyici politikaların ve teknolojik ilerlemelerin önümüzdeki yıllarda Türkiye'de batarya enerji depolama sistemlerinin daha fazla benimsenmesine yol açması beklenmektedir.

3. HİBRİT RÜZGÂR DEPOLAMA SİSTEMLERİ

3.1. Hibrit Rüzgâr Depolama Sisteminin Yapısı

Enerji depolama sistemleri, gelişen dünyada akıllı enerji ve sıfır emisyon hedefleri için önemli bir yapı taşıdır (Leon vd., 2021). Rüzgâr enerjisi mevcut olduğu potansiyel ile batarya sistemleri ile geliştirilebilecek bir yapısı bulunmaktadır (Sagi vd., 2018). Hibrid rüzgâr depolama sistemleri, rüzgâr enerjisi üretimindeki dalgalanmaları dengelemek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen karmaşık yapılar olarak dikkat çekmektedir. Bu sistemler genellikle bir rüzgâr santrali ile bir batarya depolama sistemi içermektedir. Rüzgâr santrali, rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektriği üretirken, aynı anda batarya sistemi bu elektriği depolar ve ihtiyaç duyulduğunda geri dönüş yapmaktadır. Böylece, rüzgârın değişken doğası nedeniyle ortaya çıkan enerji dalgalanmaları hafifletilir ve sistemin istikrarı sağlanır. Örnek bir model Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Batarya destekli hibrit rüzgâr üretim tesisi şeması (De Siqueira & Peng, 2021)

Batarya sistemleri, yalnızca rüzgâr enerjisi üretimindeki dalgalanmaların dengelenmesinde değil, aynı zamanda enerji talebinin zaman içindeki değişimlerine yanıt verilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgâr santralinden gelen enerji,

bataryalarda depolanarak talep yoğunluğunun arttığı dönemlerde ek güç sağlanmakta ya da aşırı enerji üretimi durumunda depolanarak ilerleyen zamanlarda kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu sayede, enerji tüketimindeki dalgalanmaların dengelenmesi ve enerji verimliliğinin artırılması sağlanmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişkenliğini dengelemek ve güç sistemlerinin direncini artırmak amacıyla farklı pil teknolojilerinin performanslarının daha ayrıntılı şekilde araştırılması hedeflenmektedir (Yang vd., 2018).

Hibrid rüzgâr depolama sistemleri, genellikle yerel elektrik şebekeleri ile entegre edilmektedir (Padmadewi vd., 2023). Bu entegrasyon sayesinde, rüzgâr santralinden elde edilen enerji fazlalıklarının şebekeye aktarılması ya da şebekeden sağlanan enerjinin ihtiyaçların karşılanmasında kullanılması mümkün hale gelmektedir. Bu durum, şebeke istikrarını artırarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir.

Batarya destekli sistemlerin boyutlandırılması, toplam karlılık üzerindeki etkisi ve batarya ömrü açısından büyük bir önem taşımaktadır (Qian vd., 2021). İstikrarlı bir işletme açısından gerçekleştirilen hesaplamaların, uzun vadede pozitif katkılar sağladığı görülmektedir.

3.2. Enerji Depolama Özelliklerinin Modellenmesi

Enerji depolama, enerjiyi kullanım zamanı kaydırmak, fazla enerjiyi depolamak ve ihtiyaç duyulduğunda sisteme göndermek için etkili bir yöntemdir. Enerji depolamak bir takım bilimsel temellere dayanmaktadır (Haider vd., 2021). Aynı zamanda enerji santrallerinde kullanılacak olan batarya sistemleri uzun ömürlü olması gerekmektedir (Zhang vd., 2021). Bir diğer önemli unsur maliyet kısmıdır. Bataryaların zaman içerisinde ömrünü tamamlayacak olması aslında maliyet olarak da karşımıza çıkmaktadır (Amini vd., 2023b). Literatüre de bakıldığında zaman bu hassasiyetlere önem verilmiş ve birtakım öğrenme yöntemleri kullanılarak sistem oluşturulmuştur (Basso & Du, 2023b). Tüm bu hususlar dikkate alındığında bu makalede, rüzgâr santrallerinde enerji depolama üzere oluşturulmuş batarya A olarak isimlendirilen hibrit bir yapı oluşturulmuştur. Hibrit enerji depolama, rüzgâr gücü çıkışını optimize etmek ve enerjinin verimli kullanımını sağlamak amacıyla kullanılır.

Yapılan çalışmalarda bir batarya tesisi için dikkate alınması gerek minimum maliyet analizini (MinCA) olarak paylaşılmıştır (Ma vd., 2023). Bu noktadan yola çıkarak, yapılacak olan çalışmada minimum maliyetlin çok büyük bir önem arz ettiği düşünülürse, MinCA'nın kesinlikle hesaba katılması gerekmektedir. Bu yapı incelendiğinde, yapılan bir yatırımın sadece ekipman bazlı düşünmekten ziyade, yatırımın yapılacak olduğu yerin toprak maliyetlerinin (C_{LC}) de hesaba katılması gerekmektedir. Günümüzde çok önemli fizibiliteye sahip lokasyonlar toprak maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile gelişim kaydedememektedir. Dolayısıyla MinCA aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir.

$$minCA' = \frac{r(1+r)^{yA}}{(1+r)^{yA}-1} \cdot (Cbp \cdot PA + Cbe \cdot EA + Crb \cdot EA) + C_{LC} \quad (1)$$

r Yıllık faiz oranı

yA Batarya A'nın hizmet ömrü

Cbp Bataryanın bir birim güç maliyeti (EU/kW)

Cbe Bataryanın bir birim kapasite maliyeti (EU/kWh)

Crb Bataryanın bakım maliyeti (EU/kWh)

EA A Bataryasının Kapasitesi

PA A Bataryasının Gücü

C_{LC} Yatırımın toprak maliyeti (EU)

Bir rüzgâr santralinde;

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + \dots + P_n(t) + P_A(t) \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada 1'den n'e kadar olan ifade, bir rüzgâr santralindeki her bir türbine ait anlık gücü ifade etmektedir. $P_A(t)$ ise A bataryasının anlık olarak sisteme gönderdiği veya sistemden çektiği gücü ifade eder.

Dolayısı ile;

$$P(t) = \sum_{x=1}^n P_x(t) + P_A(t) \quad (3)$$

olarak ifade edilir.

Bir üretim santralinde t süre sonunda oluşan E üretimine ait finansal cari gelir ifadesi;

$$\beta(t) = E(t).C(t) \quad (4)$$

olarak ifade edilmektedir. $C(t)$ ifadesi, t zamanına ait elektrik piyasa fiyatını ifade etmektedir.

Dengesizlik miktarı ise üretim tesisleri için kontrolde tutulması gereken önemli bir ifadedir. Bir sistemin stabilitesi, devamlılığı ve aynı zamanda güvenilirliği ile mukayese edilebilir. Üretim tesisleri belirli bir plan doğrultusunda üretim yapmak zorunluluğundadırlar. Bu planın altında veya üstünde üretim gerçekleşmesi durumunda bir takım cezai müeyyideler ile karşı karşıya kalınmaktadır. Planlanan üretimin üzerinde gerçekleşmiş olan dengesizlikler pozitif dengesizlik, altında gerçekleşenler ise negatif dengesizlik olarak ifade edilir.

$$\gamma = \begin{cases} x.y.(0,97) - x.z & , \quad x > 0 \\ x.y.(1,03) - x.z & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

X dengesizlik miktarı (MWh),

Y PTF ve SMF fiyatları arasında saatlik olarak min değer

Z PTF fiyatı olarak ifade edilir.

$$\gamma = \begin{cases} (E - E') \times (0,97) \times \min(Z:W) - (E - E') \times Z & , \quad (E - E') > 0 \\ (E - E') \times (1,03) \times \max(Z:W) - (E - E') \times Z & , \quad (E - E') < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Bütün bu açıklamalar ışığı doğrultusunda, bir rüzgâr üretim tesisi için, t süre içerisinde incelendiği zaman net durumda pozitifte kalması gerekir. T süresi yatırımcılar için ve yapılan yatırımın niteliğine göre kısalmış uzayabilir ama sonuç olarak bakıldığı zaman bir yatırımın aşağıdaki koşulu sağlaması gerekir.

$$\sum_{t=0}^t (\beta(t) - \min CA - \gamma) > 0 \quad (7)$$

Bu sonuçtan yola çıkarak net 0 noktasının altında kalan yatırımların geleceği sorgulanabilmektedir. Aynı zamanda yatırım kararı biraz düşük bir ihtimal olarak öngörülmektedir.

Tüm bunların yanı sıra, bir yatırımın başlangıç maliyetleri dışında, işletme şeklinin belirlenmesi de enerji projelerinin başarısı açısından kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Yatırımın uzun vadede sürdürülebilir olması ve hedeflenen getirilerin elde edilebilmesi için yalnızca başlangıç aşamasındaki harcamaların değil, aynı zamanda işletme süreçlerinin verimli bir şekilde yönetilmesinin de büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Özellikle batarya-rüzgâr hibrit enerji tesisi gibi yenilikçi ve karmaşık projelerde, tesisin devreye alındıktan sonraki işletim stratejilerinin titizlikle planlanması gerekmektedir.

Bu planlama süreci, enerji talebindeki dalgalanmalar, meteorolojik koşullar ve bataryaların enerji depolama kapasitelerinin optimize edilmesi gibi pek çok faktörü göz önünde bulundurmayı zorunlu kılmaktadır. Tesisin hangi durumlarda enerji üretimi yapacağı, hangi koşullarda beklemede kalacağı ve hangi senaryolarda enerji depolama modunda çalışacağı detaylı analizlerle belirlenmelidir. Aksi takdirde, hatalı işletim kararları enerji kayıplarına, gereksiz maliyet artışlarına ve yatırımın beklenen getirilerinin düşmesine neden olabilmektedir. Örneğin, enerji talebinin düşük olduğu saatlerde gereksiz yere üretim yapılması veya bataryaların kapasitelerinin üzerinde çalıştırılması hem ekonomik kayıplara hem de ekipman ömrünün kısılmasına yol açabilmektedir.

Bu bağlamda, yatırımın fizibilite aşamasından itibaren işletme süreçlerine yönelik detaylı analizlerin yapılması ve en uygun stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. İşletme stratejilerinin doğru şekilde belirlenmesi, yalnızca tesisin ekonomik performansını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji arz güvenliğine ve şebeke istikrarına da katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, bahsedilen gereklilikler doğrultusunda beş farklı işletme stratejisi geliştirilmiştir. Söz konusu stratejiler, enerji talep eğilimleri, hava durumu değişkenlikleri, piyasa fiyat dalgalanmaları ve batarya depolama kapasiteleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Devam eden bölümlerde, bu stratejilerin detayları, simülasyon sonuçları ve uygulama süreçlerine ilişkin kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Böylece, her bir stratejinin etkinliği ve uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve yatırım kararlarının optimize edilmesine katkı sağlanmıştır. Bu yaklaşım, hibrit enerji tesislerinin hem teknik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için rehber niteliği taşımaktadır.

4. BATARYA A İÇİN STRATEJİLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Batarya tesisleri, elektrik enerjisini depolamak ve istenildiğinde geri vermek için kullanılan kritik altyapılardır. Bu tesislerin verimli bir şekilde çalışması için doldurma (şarj) ve boşaltma (deşarj) stratejileri önem taşımaktadır. Aynı zamanda karmaşık yapıları kontrol edebilmek için akıllı batarya sistemleri geliştirilmiştir (Prakash vd., 2023). Doldurma stratejileri, bataryanın enerjiyi depolama kapasitesini artırmak için kullanılırken; boşaltma stratejileri ise depolanan enerjinin ihtiyaç duyulduğunda sistemden çıkarılmasını sağlamaktadır. Bu durumu doğru bir şekilde yürütebilmek için makine öğrenmesine dayalı sistemler de geliştirilmiştir (Gupta & Mishra, 2023). Bu makale içerisinde birden fazla aşamalı olarak bir batarya tesisi için optimal doldurma ve boşaltma stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejilerin doğru bir şekilde tasarlanması ve uygulanması, enerji depolama sistemlerinin performansını artırabilir, enerji verimliliğini optimize edebilir ve elektrik şebekelerinin istikrarını sağlayabilmektedir. Çalışma için belirlenen farklı stratejileri içine alan çerçeve Şekil 3 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Batarya destekli enerji piyasası ve çalışma stratejileri

4.1. Şebekeye Aktarılan Dalgalı Enerjinin Düzeltilmesi için Önerilen İşletme Stratejisi

Rüzgâr enerji çıkışını yumuşatma yöntemi, santral çıkışında şebekeye aktarılan enerjinin sabit bir seviyede gönderilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemin, mesafeye bağlı olarak geliştirilebildiği belirtilmektedir (Lyu vd., 2020). Şebekeye aktarılan dalgalı enerjinin düzeltilmesine yönelik stratejiler, yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen dalgalı elektrik üretiminin düzenlenmesi ve şebekeye entegrasyonunun optimize edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Bu stratejiler kapsamında, akümülatör bataryaların kullanılması, enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, akıllı şebeke yönetimi ve güç elektroniği tabanlı düzeltme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Söz konusu yöntemlerin, şebekeye entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini artırdığı, enerji akışını daha istikrarlı hale getirdiği ve şebekenin güvenilirliğini sağladığı ifade edilmektedir. Çalışma için belirlenen stratejiye ait çerçeve Şekil 4'te ve denklem 8'de gösterilmektedir.



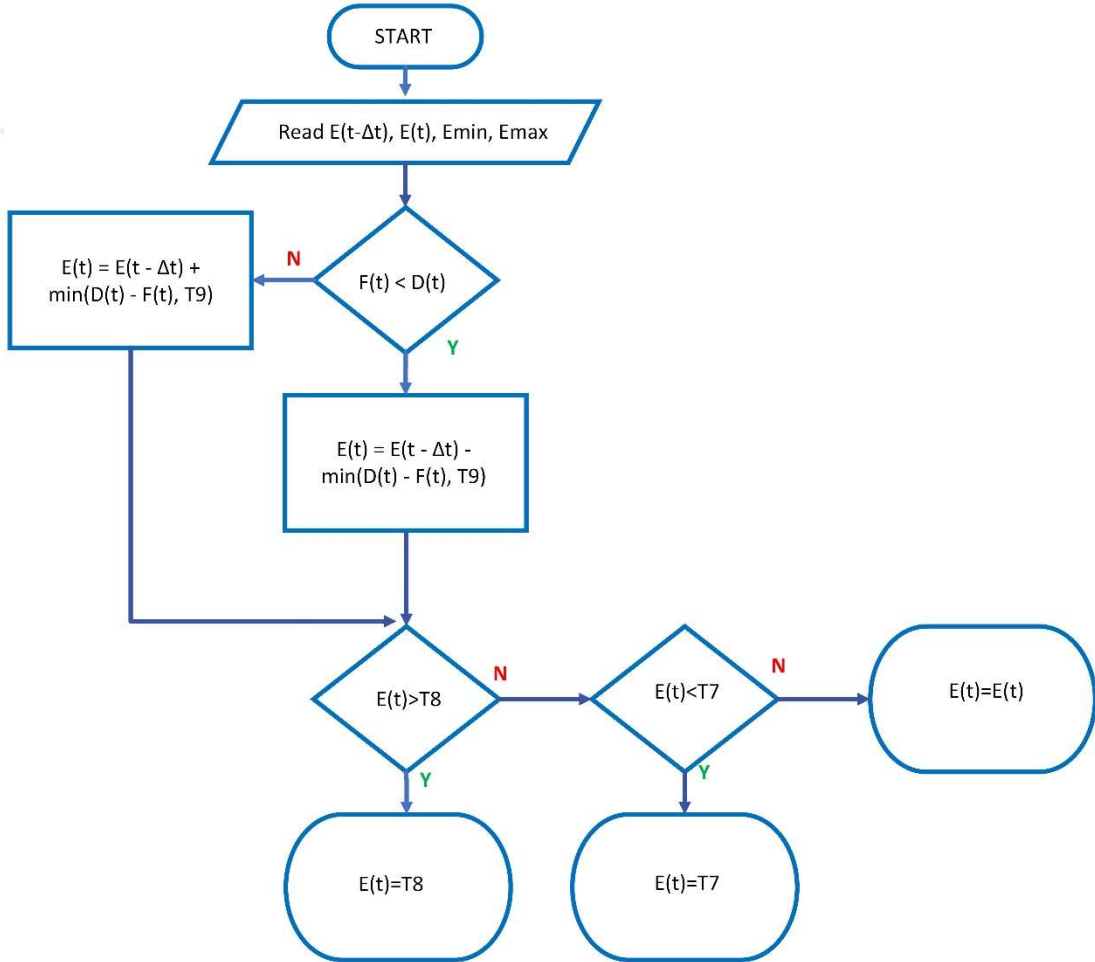
Şekil 4. Önerilen stratejinin şematik gösterimi

Batarya doldurma stratejisi daha genel bir matematiksel denklem olarak ifade edilecek olursa;

$$E(t) = \min(\max(E(t - \Delta t) + \Delta E_{ekle}, E_{min}), E_{max}) \quad (8)$$

- $E(t)$ Bataryadaki enerji seviyesini zaman t olarak gösterir (MWh).
- Δt Zaman adımını temsil eder (t).

- ΔE_{ekle} Bataryaya eklenecek veya çıkarılacak enerji miktarını belirtir. Bu miktar, doldurma veya boşaltma stratejisine bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir (MWh).
- E_{min} Bataryanın minimum kapasitesini belirtir. Batarya bu değerin altına düşemez (MWh).
- E_{max} Bataryanın maksimum kapasitesini belirtir. Batarya bu değerin üstüne çıkamaz (MWh).



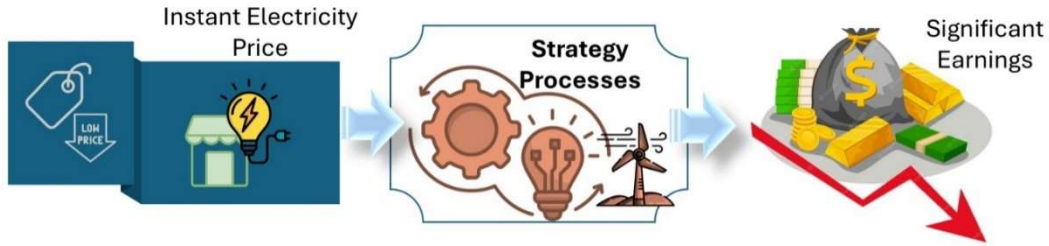
Şekil 5. Önerilen stratejinin akış diyagramı

Bu denklemde, bataryanın yeni enerji seviyesi $E(t)$, bir önceki zaman adımındaki enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ ile ΔE_{ekle} olarak belirlenen enerji miktarının eklenmesi veya çıkarılmasıyla hesaplanır. Elde edilen değer, E_{min} ve E_{max} arasında

bir değere sınırlandırılır. Bu şekilde, bataryanın belirli bir aralıkta kalması sağlanır ve doldurma/boşaltma işlemleri kontrol altında tutulur. Çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 5 'de gösterilmiştir.

4.2. Piyasa Elektrik Fiyatına Göre Önerilen İşletme Stratejisi

Bir önceki başlıkta, fiyattan tamamen bağımsız olarak santral çıkışında MW bazlı bir güç yumuşatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, bazı durumlarda fiyatın daha önemli hale geldiği görülmektedir. Örneğin, elektrik şebekesinde enerji ihtiyacının olduğu durumlarda, fazla üretilen enerjinin sisteme gönderilmek yerine bataryada depolanmasının maliyet açısından işletmeyi olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, bu başlık altında depolama stratejisi fiyat bazlı olarak Şekil 6'da gösterildiği gibi geliştirilmiştir.

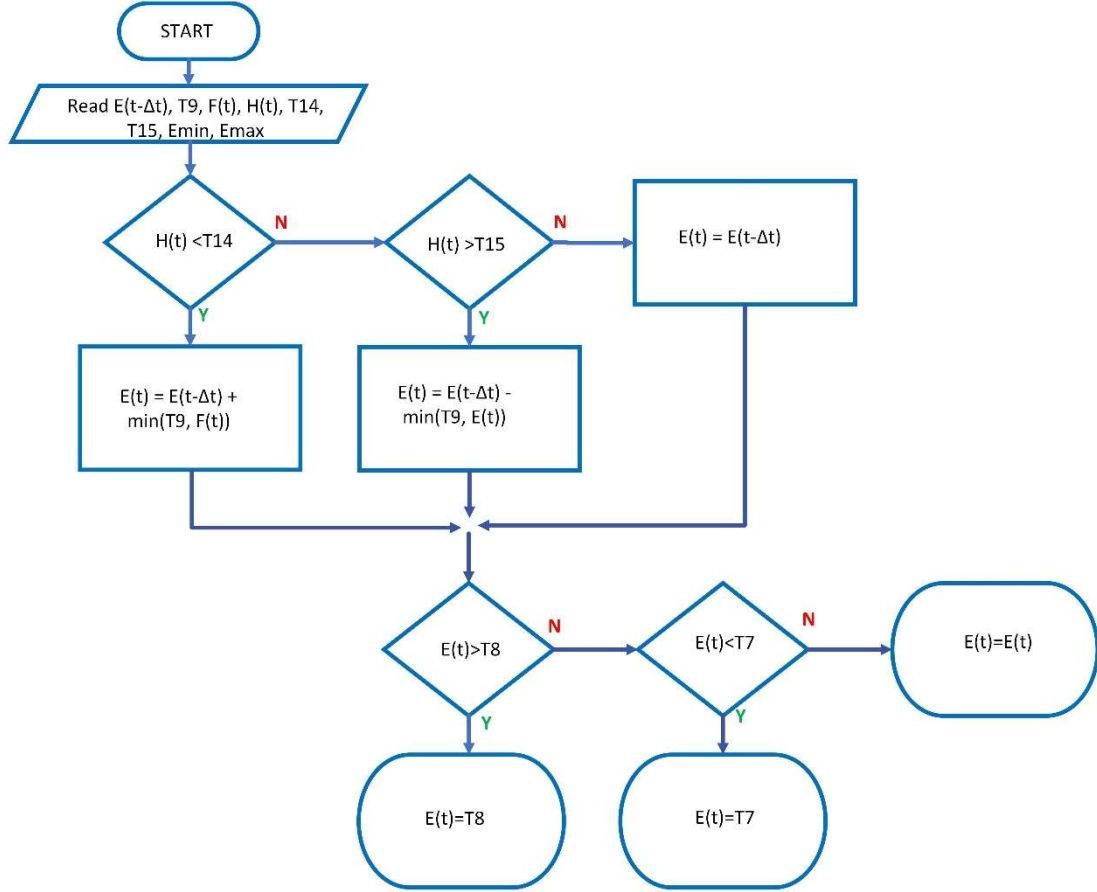


Şekil 6. Önerilen stratejinin şematik gösterimi

$$E(t) = \min \left\{ \max \left\{ \begin{cases} E(t - \Delta t) + \min(T_9, F(t)), & H(t) < T_{14} \\ E(t - \Delta t) - \min(T_9, E(t)), & H(t) > T_{15} \\ E(t - \Delta t), & \text{otherwise} \end{cases}, E_{\min} \right\}, E_{\max} \right\} \quad (9)$$

- $H(t)$ t anındaki elektrik piyasa fiyatı (USD).
- $F(t)$ t anında Bataryaya eklenecek enerji miktarı (USD).
- T_7 Bataryanın düşük enerji sınırı, bu değer altına düşülmesi durumunda batarya kritik seviyededir ve acil dolum veya müdahale gerekmektedir (MWh).
- T_8 Bataryanın maksimum enerji sınırı, bu değer üstüne çıkılması durumunda batarya aşırı dolum durumundadır ve zarar görebilmektedir (MWh).

- T_9 Bataryaya eklenecek veya çıkarılacak maksimum enerji miktarı (MWh).
- T_{14} ve T_{15} Fiyat eşik değerleri. $H(t) < T_{14}$ ise doldurma, $H(t) > T_{15}$ ise boşaltma yapılır (USD/hr).



Şekil 7. Önerilen stratejinin akış diyagramı

Eğer $H(t) < T_{14}$ ise, bataryanın enerji seviyesi artırılmalıdır. Bu durumda, mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ ile bataryaya eklenecek minimum enerji miktarı arasında daha küçük olanı seçilir. Eğer bataryaya eklenecek minimum enerji miktarı, T_9 sınırını aşarsa, sadece T_9 kadar enerji eklenilir.

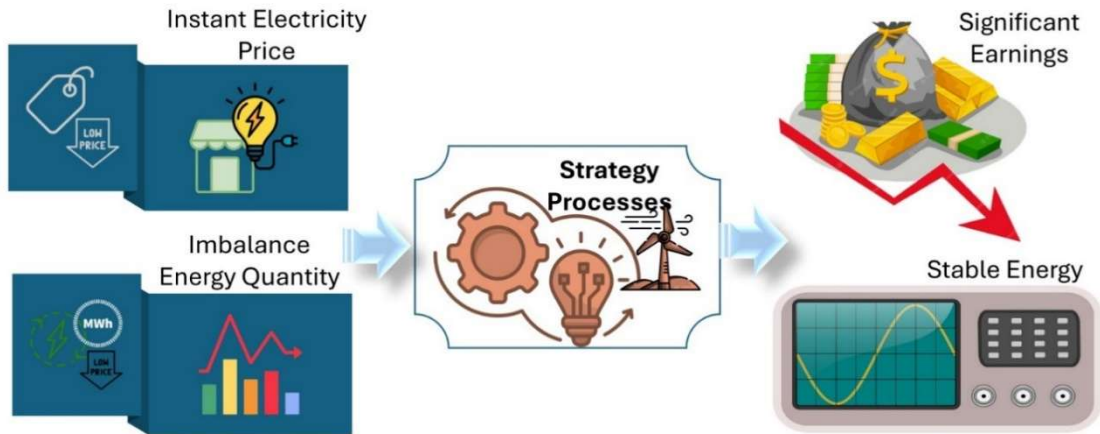
Eğer $H(t) > T_{15}$ ise, bataryadan enerji çıkartılması gereklidir. Bu durumda, mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ ile bataryadan çıkartılacak minimum enerji miktarı arasında daha küçük olanı seçilir. Eğer bataryadan çıkartılacak minimum enerji miktarı, T_9 sınırını aşarsa, sadece T_9 kadar enerji çıkartılır.

Diğer durumlarda, bataryanın enerji seviyesi değiştirilmez ve mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ olarak kalmaktadır.

Önerilen stratejinin akış diyagramı Şekil 7’de gösterilmiştir.

4.3. Dengesizlik MWh Miktarının ve Piyasa Fiyatının Birlikte Değerlendirilmesi Sonucu Önerilen İşletme Stratejisi

İlk iki başlık altında incelenen stratejiler, yalnızca MW bazlı ya da yalnızca fiyat bazlı olarak ele alınmıştır. Ancak, elektrik şebekesinde anlık gelişen durumların ve gün içerisindeki farklı koşulların, birden fazla kez aksiyon alınmasını gerektirdiği görülmektedir. Bu bağlamda, bir üretim santralinde üretilen enerji miktarının fazla veya eksik olması, elektrik fiyatıyla paralel şekilde değerlendirildiğinde, hem santral çıkışında güç yumuşatma sağlanarak hem de kazanç açısından daha yüksek karlılık elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu başlık kapsamında hem dengesizlik hem de maliyet açısından ortak bir strateji Şekil 8’de geliştirilmiştir.

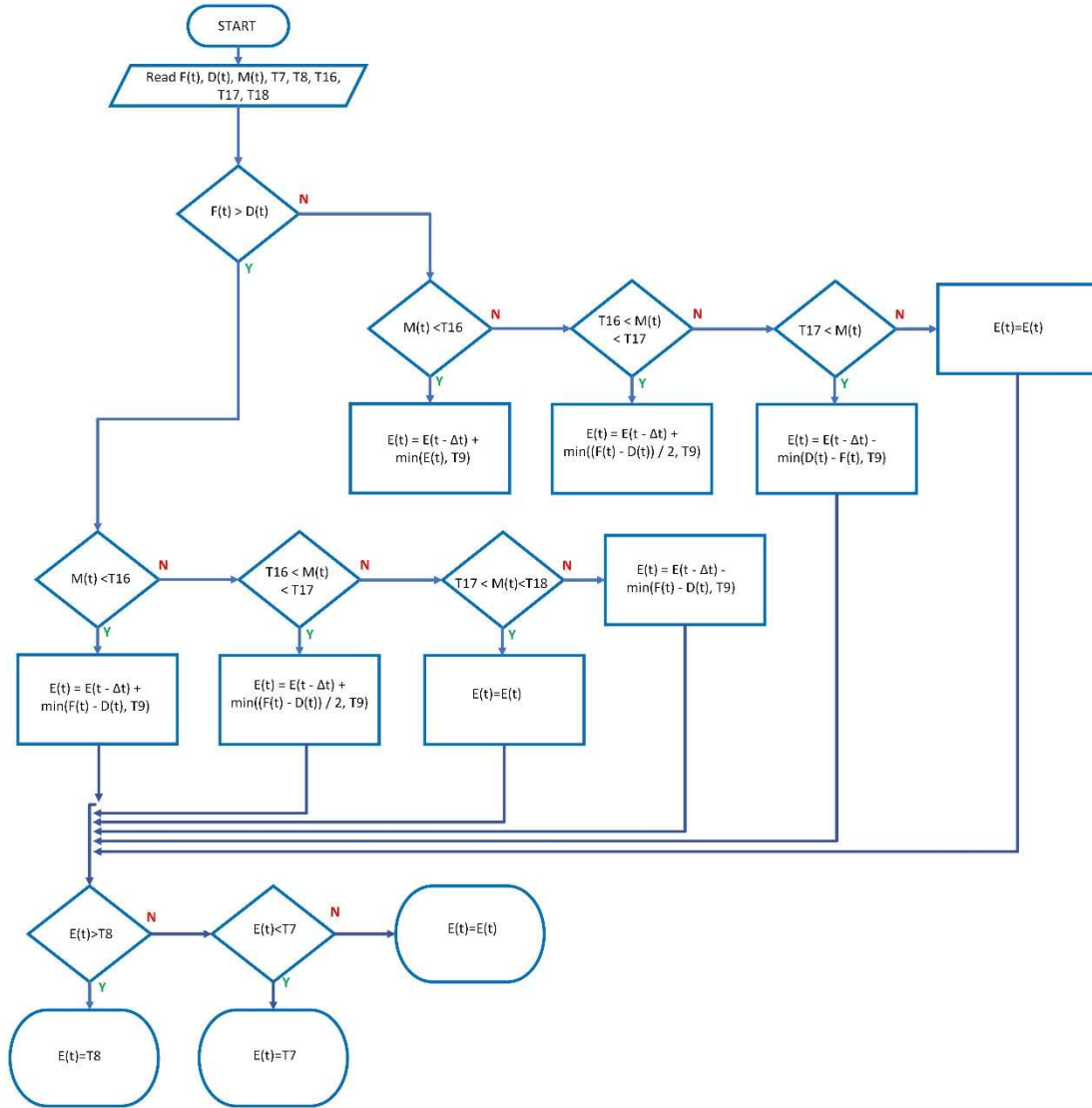


Şekil 8. Önerilen stratejinin şematik gösterimi

$$E(t) = \max \left\{ T_7, \min \left\{ T_8, E(t - \Delta t) + \min \left\{ \begin{array}{ll} \frac{F(t) - D(t)}{2}, & M(t) < T_{16} \\ 0, & T_{16} < M(t) < T_{17} \\ -F(t) - D(t), & T_{17} < M(t) < T_{18} \\ \text{otherwise} \end{array} \right\} \right\} \right\} \quad (10)$$

Burada:

- $M(t)$ Zaman t için dengesizlik seviyesi (MW).
- $D(t)$ Zaman t için bataryadan çıkarılacak enerji miktarı (MW).
- T_{16} , T_{17} ve T_{18} Dengesizlik seviyesi eşik değerleri (USD/hr).



Şekil 9. Önerilen stratejinin akış diyagramı

Eğer $M(t)$ değeri T_{16} eşliğinin altındaysa, bataryaya enerji eklemek gerekmektedir. Bu durumda, mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ ile bataryaya eklenecek minimum enerji miktarı arasında daha küçük olanı seçilir. Eğer bataryaya eklenecek minimum enerji miktarı, T_9 sınırını aşarsa, sadece T_9 kadar enerji eklenilir.

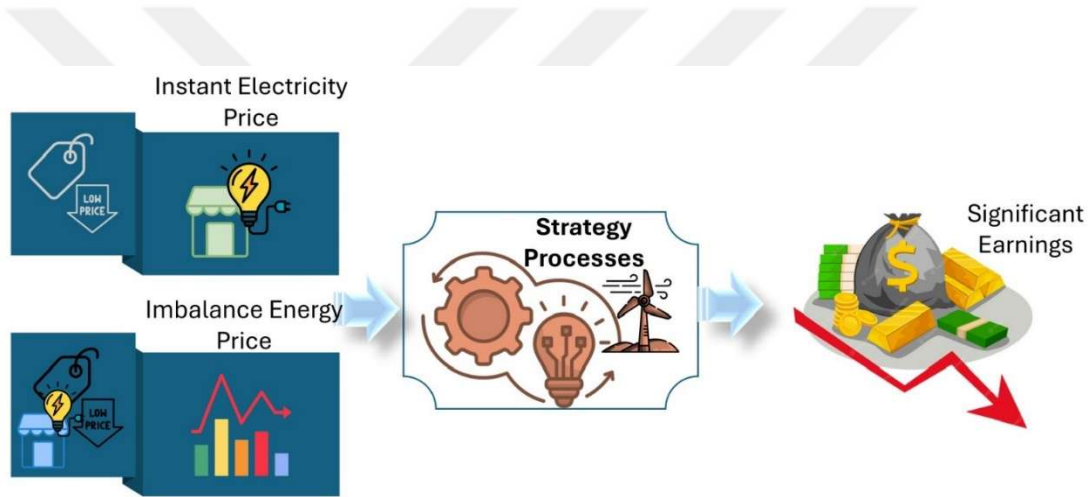
Eğer $M(t)$ değeri T_{16} eşliğinin üstünde ve T_{17} eşliğinin altındaysa, bataryaya eklenecek enerji miktarı $\frac{F(t)-D(t)}{2}$ ile sınırlandırılır. Yani, bataryaya eklenecek enerji miktarı, gelen ve giden enerji farkının yarısı ve T_9 arasında daha küçük olanı seçilir.

Eğer $M(t)$ değeri T_{17} eşiğinin üstünde ve T_{18} eşiğinin altındaysa, bataryanın enerji seviyesi değiştirilmez ve mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ olarak bırakılır.

Diğer durumlarda, bataryadan enerji çıkartılması gerekir. Bu durumda, mevcut enerji seviyesi $E(t - \Delta t)$ ile bataryadan çıkartılacak minimum enerji miktarı arasında daha küçük olanı seçilir. Eğer bataryadan çıkartılacak minimum enerji miktarı, T_9 sınırını aşarsa, sadece T_9 kadar enerji çıkartılır.

Önerilen stratejinin akış diyagramı Şekil 9’da gösterilmiştir.

4.4. Dengesizlik Fiyatına ve Piyasa Fiyatına Bağlı Olarak Önerilen İşletme Stratejisi

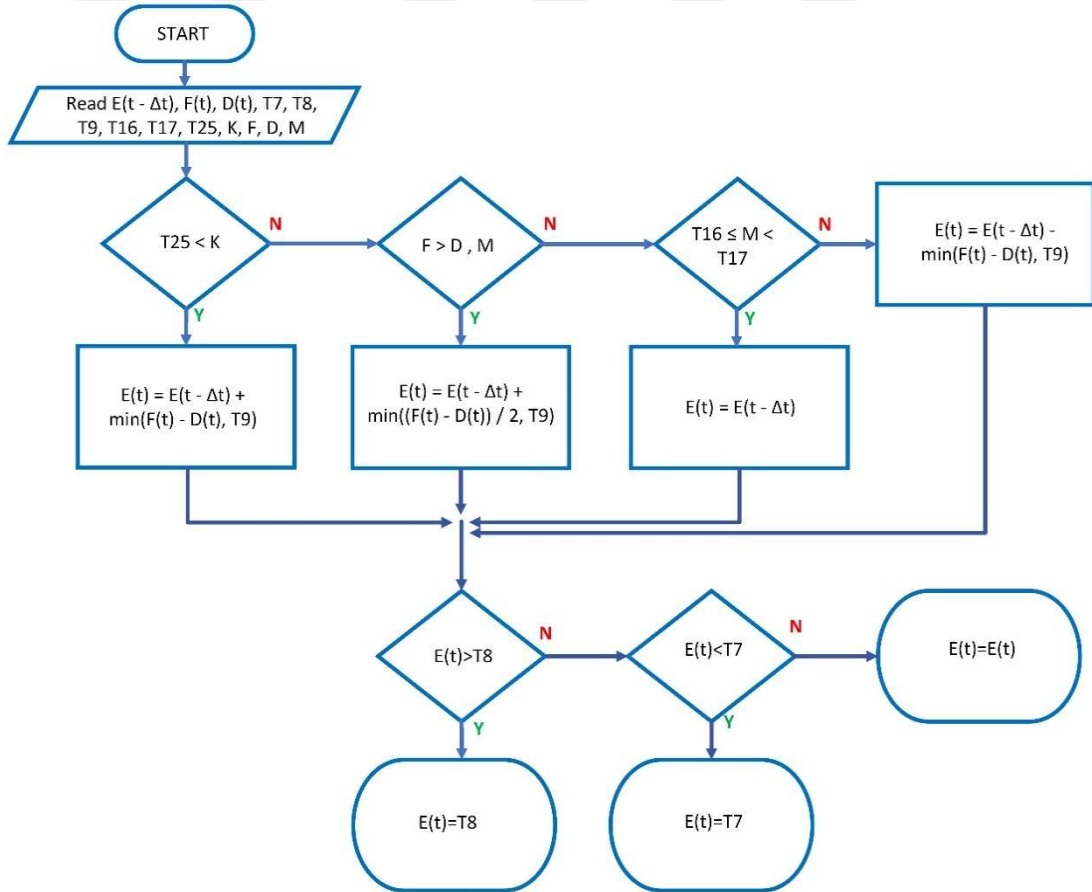


Şekil 10. Önerilen stratejinin şematik gösterimi

Bu stratejide, 4.3. nolu başlık altında incelenen konunun enerji bazlı bir yaklaşım olmasından ziyade, sistem tamamen aynı tutulmuş ve yalnızca enerji içeren kısımların fiyat karşılığının denkleme dahil edilmesi sağlanmıştır. Daha açıklayıcı bir ifadeyle, güç yumuşatma sırasında karşılaşılan dengesizlik miktarı (MWh), fiyat karşılığı alınarak ve bu fiyat karşılığının piyasa fiyatı ile birleştirilerek işleme dahil edilmesi yoluyla ortak bir maliyet hesabı oluşturulmaktadır. Bu nedenle, bu başlık altında fiyat ağırlıklı bir strateji geliştirilmiştir. Şekil 10’da bu stratejiye ait görsel belirtilmiştir.

$$E(t) = \max \left\{ T_7, \min \left\{ T_8, \begin{cases} E(t - \Delta t) + \min(F(t) - D(t), T_9), & T_{25} < K \\ E(t - \Delta t) + \min\left(\frac{F(t) - D(t)}{2}, T_9\right), & F > D, M \\ E(t - \Delta t), & T_{16} \leq M < T_{17} \\ E(t - \Delta t) - \min(F(t) - D(t), T_9), & \text{otherwise} \end{cases} \right\} \right\} \quad (11)$$

- T_{25} Bataryasız dengesizlik eşik değeri (USD/hr).
- K Bataryasız dengesizlik miktarı (MWh).
- F Bataryasız üretim miktarı (MWh).
- M Bataryasız kazanç miktarı (USD/hr).
- D Programlanan üretim planı (MWh).
- H Elektrik Piyasa Fiyatı (USD/hr).



Şekil 11. Önerilen stratejinin akış diyagramı

İlk olarak, bataryasız dengesizlik (K) değeri, bataryasız dengesizlik eşik değeri olan T_{25} ile karşılaştırılır. Eğer bu değer eşik değerinden küçükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 12'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) + \min(F(t) - D(t), T_9) \quad (12)$$

Bu durumda, bataryaya eklenen veya çıkarılan enerji miktarı, belirli bir sınıra (T_9) kadar sınırlandırılır.

Eğer bataryasız üretim (F) değeri, bataryasız dengesizlikten büyükse ve bataryasız kazanç (M) değeri belirli bir dengesizlik eşik değeri olan T_{16} 'dan küçükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 13'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) + \min\left(\frac{F(t) - D(t)}{2}, T_9\right) \quad (13)$$

Bu durumda, bataryaya eklenen veya çıkarılan enerji miktarı, $F(t) - D(t)$ değerinin yarısından az olacak şekilde sınırlandırılır.

Eğer bataryasız kazanç (M) değeri, belirli iki eşik değeri T_{16} ve T_{17} arasında ise, bataryanın enerji seviyesi değişmez, yani zaman adımı boyunca sabit kalır:

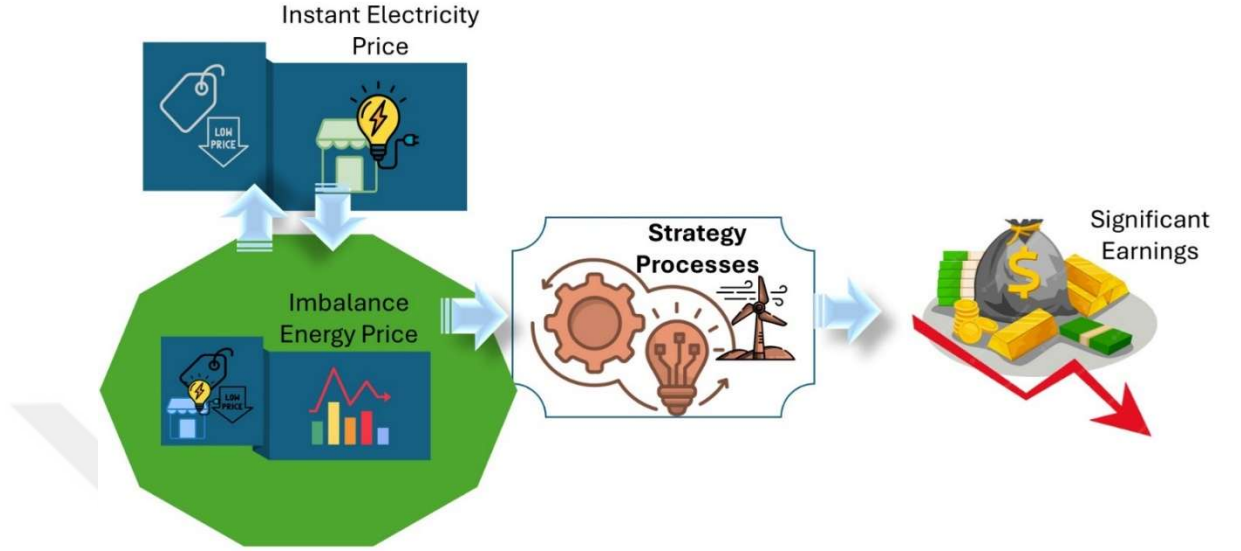
$$E(t) = E(t - \Delta t) \quad (14)$$

Yukarıdaki koşullar sağlanmazsa, yani bataryasız kazanç (M) değeri, T_{17} 'den büyükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 15'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) - \min(F(t) - D(t), T_9) \quad (15)$$

Bu durumda, bataryaya eklenen veya çıkarılan enerji miktarı negatif bir değer olabilir. Bu stratejiye ait akış şeması Şekil 11'da gösterilmiştir.

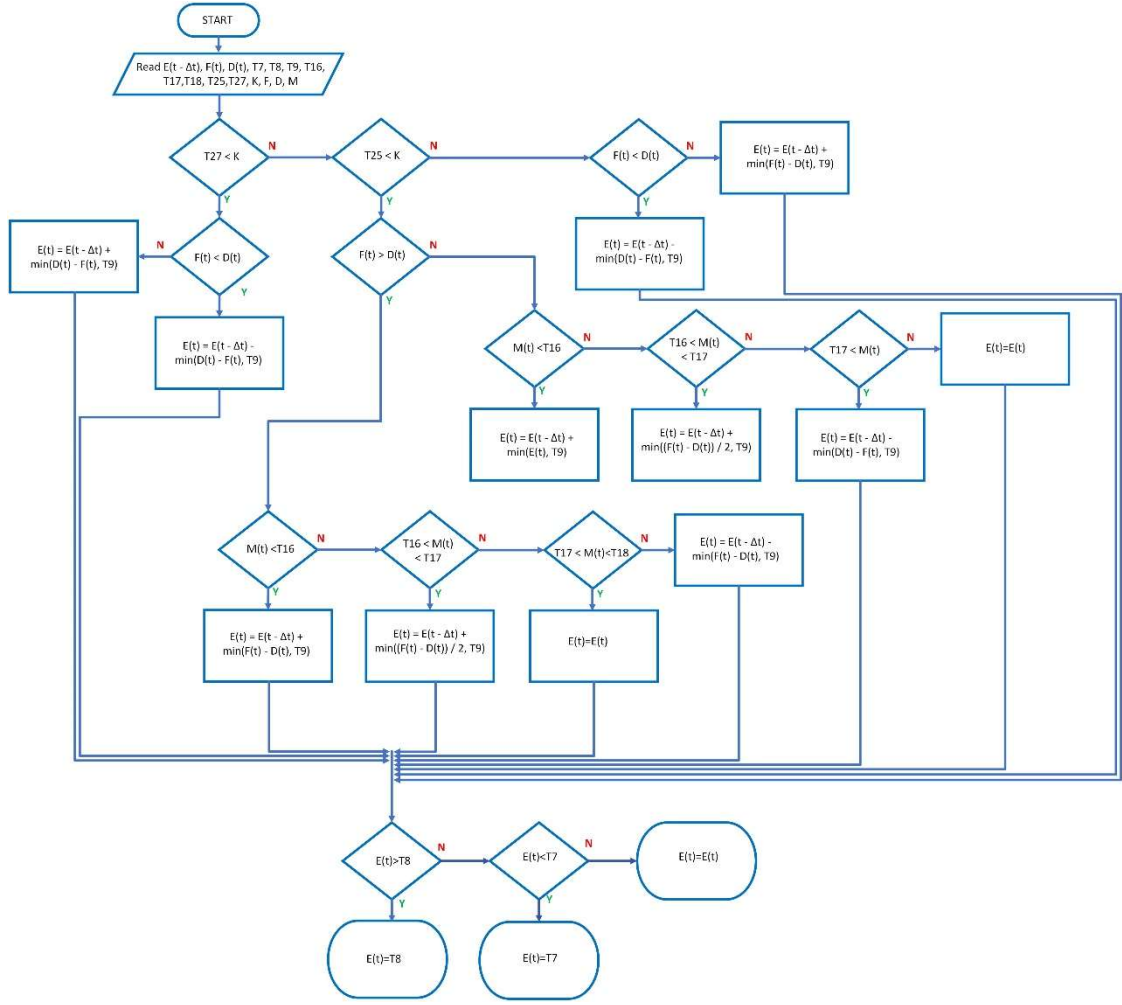
4.5. Dengesizlik Fiyatının Azaltılması Öncelikli Olarak Dengesizlik Fiyatına ve Piyasa Fiyatına Bağlı Olarak Önerilen İşletme Stratejisi



Şekil 12. Önerilen stratejinin şematik gösterimi

Bu strateji, diğer stratejilerden yola çıkarak tamamen maliyet ağırlıklı bir yaklaşımla geliştirilmiş ve toplam karlılığı artırmayı hedefleyen bir çalışma olarak tasarlanmıştır. Dengesizlik fiyatı ile piyasa fiyatının koordineli bir şekilde değerlendirilmesi sonucunda, dengesizliğin azaltılmasını ana hedef olarak belirleyen ve hassasiyetin arttığı durumlarda piyasa fiyatını işleme dahil eden bir yöntem geliştirilmiştir. Belirlenen hedef fiyatlara göre, öncelikli olarak güç yumuşatma işleminin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Limitlerin aşıldığı durumlarda, piyasa fiyatı devreye alınarak toplam karlılığı artırmayı amaçlayan bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu durum, Şekil 12’de görsel olarak vurgulanmıştır.

$$E(t) = \min \left\{ T_8, \min \left\{ T_7, \left\{ \begin{array}{ll} E(t - \Delta t) - \min(F(t) - D(t), T_9), & T_{27} < K \text{ ve } F < D \\ E(t - \Delta t) + \min(F(t) - D(t), T_9), & T_{27} < K \text{ ve } F < D \\ E(t - \Delta t) + \min(F(t) - D(t), T_9), & T_{25} < K \text{ ve } F > D \text{ ve } T_{16} > M \\ E(t - \Delta t) + \min\left(\frac{F(t) - D(t)}{2}, T_9\right), & T_{25} < K \text{ ve } F > D \text{ ve } T_{16} < M < T_{17} \\ E(t - \Delta t), & T_{25} < K \text{ ve } F > D \text{ ve } T_{17} < M < T_{18} \\ E(t - \Delta t) - \min(F(t) - D(t), T_9), & T_{25} < K \text{ ve } F > D \text{ ve } M > T_{18} \\ E(t - \Delta t) + \min(F, T_9), & H < T_{14} \\ E(t - \Delta t) - \min(T_9, E(t - \Delta t)), & H > T_{15}, T_{12} \\ E(t - \Delta t), & \text{otherwise} \end{array} \right\} \right\} \right\} \quad (16)$$



Şekil 13. Önerilen stratejinin akış diyagramı

İlk olarak, bataryasız dengesizlik (K) değeri, bataryasız dengesizlik eşik değeri olan T_{25} ile karşılaştırılır. Eğer bu değer eşik değerinden küçükse, bataryanın enerji seviyesi belirli bir şekilde güncellenir. Eğer bataryasız üretim (F) değeri, bataryasız dengesizlikten küçükse ve bataryasız kazanç (M) değeri, bataryasız dengesizlikten küçükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 17'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) - \min(D(t) - F(t), T_9) \quad (17)$$

Bu durumda, bataryaya çıkarılan enerji miktarı, belirli bir sınıra (T_9) kadar sınırlıdır.

Eğer bataryasız üretim (F) değeri, bataryasız dengesizlikten büyükse ve bataryasız kazanç (M) değeri, belirli bir eşik değeri olan T_{16} 'dan küçükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 18'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) + \min(F(t) - D(t), T_9) \quad (18)$$

Bu durumda, bataryaya eklenen enerji miktarı, belirli bir sınıra (T_9) kadar sınırlıdır.

Eğer bataryasız üretim (F) değeri, bataryasız dengesizlikten büyükse ve bataryasız kazanç (M) değeri, belirli bir eşik değer olan T_{16} 'dan büyükse, bataryanın enerji seviyesi denklem 19'daki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) + \min(\frac{F(t)-D(t)}{2}, T_9) \quad (19)$$

Bu durumda, bataryaya eklenen enerji miktarı, belirli bir sınıra (T_9) kadar sınırlıdır, ancak bu miktar, dengesizlik eşiğine göre ayarlanır.

Diğer durumlarda, yani bataryasız üretim (F) değeri, bataryasız dengesizlik değerine eşit veya bataryasız kazanç (M) değeri, belirli bir eşik değer olan T_{16} 'dan büyük değilse, bataryanın enerji seviyesi denklem 20'deki gibi güncellenir:

$$E(t) = E(t - \Delta t) \quad (20)$$

Bu durumda, bataryanın enerji seviyesi sabit kalır, yani herhangi bir dolum veya boşaltma işlemi yapılmaz. Şekil 13'te akış diyagramı gösterilmiştir.

Geliştirilen tüm bu stratejiler, hibrit tesisin daha yüksek verimlilikle işletilmesini hedeflemektedir. Ancak bu noktada göz ardı edilmemesi gereken bir diğer önemli husus, batarya kapasitesinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Batarya kapasitesi, sabit bir değer olduğundan, yalnızca tesisin performansını değil, aynı zamanda geliştirilen tüm strateji süreçlerini de doğrudan etkiler. Eğer kapasite yanlış belirlenirse, tesisin verimliliği azalabilir ve stratejiler ne kadar iyi olursa olsun, istenilen sonuçlar elde edilemeyebilir. Bu nedenle, batarya kapasitesinin belirlenmesi, yatırımın başarısı için stratejilerin önemi kadar kritiktir. Batarya kapasitesinin doğru tespit edilmesi hem enerji üretimi hem de depolama süreçlerinin optimize edilmesini sağlar. Ayrıca, gelecekteki enerji talep artışlarına veya ani dalgalanmalara karşı tesisin dayanıklılığını da artırır. Sonuç olarak, doğru batarya kapasitesi seçimi, stratejilerin etkinliğini maksimize ederek, hibrit tesisin uzun vadede sürdürülebilir bir başarıya ulaşmasına katkıda bulunur.

5. BATARYA A İÇİN KAPASİTE YAPILANDIRMASI

Bir batarya tesisinin kapasite yapılandırmasının, dikkatli bir planlama ve analiz süreci gerektirdiği belirtilmektedir. İlk adımda, tesisin kullanım amacı ve depolama ihtiyaçlarının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Depolama kapasitesi ve güç gereksinimlerinin, beklenen kullanım senaryolarıyla uyumlu olacak şekilde belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu süreçte, lityum-iyon piller gibi farklı enerji depolama teknolojilerinin maliyet, enerji yoğunluğu ve ömür gibi özelliklerinin dikkatle değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bataryaların yapılandırılması ve bağlanması, tesisin voltaj ve enerji depolama gereksinimlerine uygun olarak gerçekleştirilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Ayrıca, güvenlik ve çevresel faktörlerin de önemli bir yer tuttuğu, özellikle atık yönetimi ve yangın risklerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir (Wang vd., 2023) (Feng vd., 2023). Bununla birlikte, yerel düzenlemelerin ve uluslararası standartların takip edilmesinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Tesisin özel amaçlarına bağlı olarak yedek güç sağlama veya güç kalitesini artırma gibi ek işlevlerin de değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir.

Batarya tesisinin etkili çalışabilmesi için düzenli bakım ve izleme süreçlerinin planlanması gerektiği belirtilmektedir (Zhou vd., 2021). Projenin tüm adımlarının, özel gereksinimlere göre uyarlanması önerilmektedir. Bu aşamada doğrusal programlama tekniklerinin devreye alındığı ifade edilmektedir. Doğrusal programlamanın, özellikle batarya kapasite yapılandırmasında karşılaşılan çok sayıda değişken ve kısıtla başa çıkmada güçlü bir araç sunduğu belirtilmektedir. Literatürde bu yöntemin, karmaşık enerji sistemlerinin optimize edilmesinde etkin bir şekilde kullanıldığına dair çeşitli çalışmalar vardır. Örneğin, Hüseyin Abdellatif ve çalışma arkadaşlarının, yenilenebilir enerji sistemlerinde karmaşık yapıları birden fazla amaç açısından optimize etmek için doğrusal programlama yöntemini kullandıkları ifade edilmiştir (Abdellatif vd., 2023). Benzer şekilde, Yujian Zhang, Mingde Li ve Fei Tong'un yaptıkları çalışmalarda, enerji verimliliğini ve yük profil yönetimini doğrusal programlamaya dayalı olarak ele aldıkları belirtilmiştir (Zhang vd., 2022).

Bu bağlamda, batarya tesisinin kapasite yapılandırması için doğrusal programlama yönteminin seçilmesinin, tesisin operasyonel verimliliğini artırmak ve

maliyetleri optimize etmek amacıyla rasyonel bir adım olarak değerlendirildiği ifade edilmektedir. Doğrusal programlama yönteminin kullanılmasıyla, tesisin enerji depolama sistemlerinin optimal bir şekilde yapılandırılabilceği ve böylece hem ekonomik hem de teknik açıdan en iyi sonuçların elde edilebileceği vurgulanmaktadır.

5.1. Optimal Kapasite Yapılandırması İçin Doğrusal Programlama

Bataryanın enerji kapasitesinin belirlenmesi ve maliyet açısından en uygun değerinin bulunması için önerilen matematiksel model, doğrusal programlama tekniğine dayalı olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımın amacı, yapılan bir yatırım için en optimum kapasite değerini belirlemektir.

Amaç Fonksiyonu

Denklem (7)'de $\sum_{t=0}^t (\beta(t) - \min CA - \gamma) > 0$ ifadesi belirtilmiştir. Bu ifadenin max değere ulaşabilmesi için;

$\beta(t)$ değeri max, $\min CA$ değeri ve γ değeri min hedefi bizim için ulaşmak istediğimiz nokta olacaktır.

Denklem (4)'deki $\beta(t) = E(t) \cdot C(t)$ ifadesi ve denklem (1)'deki $\min CA = \frac{r(1+r)^{yA}}{(1+r)^{yA}-1} \cdot (Cbp \cdot PA + Cbe \cdot EA + Crb \cdot EA) + C_{LC}$ ifadesi E'ye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği için ve E değeri bizim için ulaşmak istenen P güç ifadesinin zamana bağlı değişkeni olduğundan P'nin zamana bağlı değişimi için değişkeni P(t) ve amaç fonksiyonu;

$$\max f_t \{ \sum_{t=0}^t (\beta(t) - \min CA - \gamma) \}, \quad t = 1, 2, 3, 4, \dots, t_{max} \quad (21)$$

olarak ifade edilir.

Kısıtlar

Hedef kapasite değeri ;	$P(\min) < P(t) \leq 100$
T Zaman sabit periyodu	$t = 30$ gün

5.2. Batarya Performans Ömrü

Batarya performansı ve ömrü, bu teknolojilerin verimliliği ve kullanım sürekliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bataryaların durumu ve kullanım süresini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan SOC, bataryanın anlık enerji

seviyesini ifade etmektedir. SOC, bataryanın verimli bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi için temel bir gösterge olup hem enerji yönetim sistemleri hem de kullanıcılar için önemli bilgiler sağlamaktadır. SOC'nin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi, batarya ömrünün uzatılması, enerji verimliliğinin artırılması ve güvenli kullanım koşullarının sağlanması açısından büyük bir öneme sahiptir.

Enerji sistemlerinde SOC'nin etkisi, son yıllarda yapılan çalışmalarda daha fazla dikkate alınmaya başlanmıştır. Kademeli enerji depolama sistemlerinde pillerin tepki önceliklerini düzenlemeye yönelik bir strateji önerilmiştir (Chen vd., 2023). Bu strateji, pillerin şarj ve deşarj işlemlerini pil sağlık durumlarına göre ayarlayarak optimize etmekte; sağlıklı pillerin derin deşarj, daha az sağlıklı pillerin ise sığ deşarj yapmasını sağlayarak geleneksel yöntemlere kıyasla pil ömrü ve performansını artırmaktadır. Ayrıca, pillerin çevrim ömrünü ve şarj-deşarj anahtarlama sıklığını azaltarak enerji depolama sistemlerinin verimliliğini yükselttiği belirtilmektedir. Gelecekteki araştırmaların, bu stratejinin öncelik sıralamasını etkileyen faktörlere odaklanması beklenmektedir.

Batarya yönetiminde, bataryaların SOC seviyesinin %20 ile %80 arasında tutulması, performansı ve ömrü maksimize etmek için önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Bu aralıkta çalıştırılan bataryalar, kimyasal ve mekanik strese daha az maruz kaldıkları için daha verimli bir enerji dönüşümü sağlamakta ve uzun vadede dayanıklılıklarını korumaktadır. Bunun aksine, SOC'nin %20'nin altına düşmesi veya %80'in üzerine çıkması durumunda bataryalar, aşırı deşarj ve aşırı şarj riskleriyle karşı karşıya kalmakta ve bu durum, kapasite kaybı ve ömrün kısalması gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Galli ve çalışma arkadaşlarının (Galli vd., 2024b) araştırmasında, SOC'nin bu optimum aralıkta tutulmasının enerji depolama sistemlerinin genel verimliliğini artırmak ve batarya ömrünü uzatmak açısından stratejik bir önlem olduğu vurgulanmıştır.

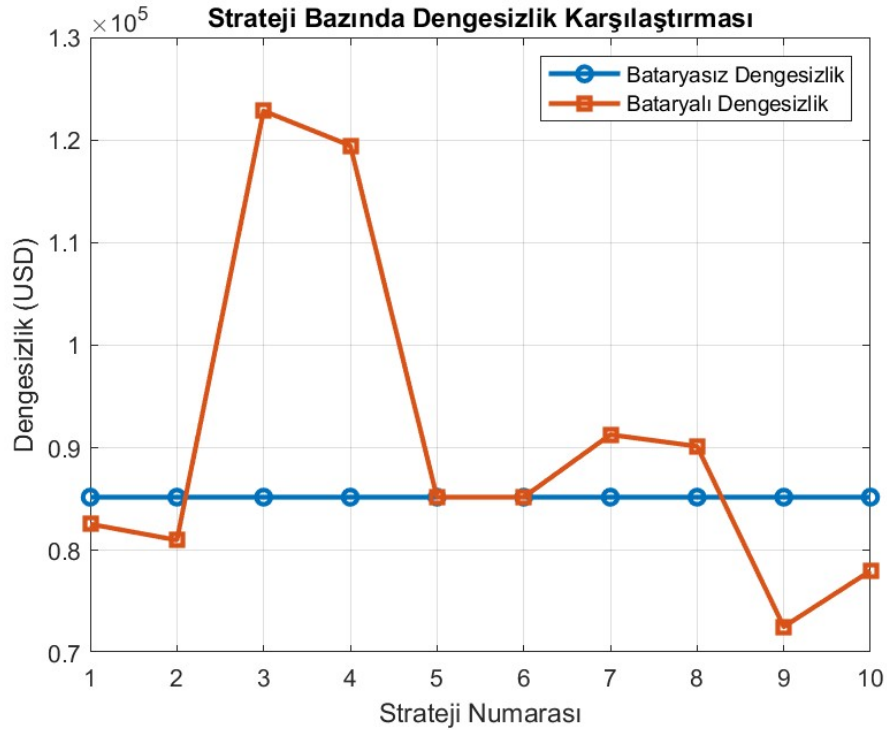
Bu kapsamda, 3. bölümde geliştirilmiş olan tüm stratejilere SOC parametresi de entegre edilerek iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Sonuç bölümünde, mevcut durum ile SOC dikkate alınarak geliştirilen durum karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Böylece, enerji alanında kullanılan bir batarya tesisi için mevcut durum ile geliştirilmiş durum arasındaki farklar somut bir şekilde ortaya konulmuştur.

6. VAKA ÇALIŞMASI

Bu bölümde enerji depolama sistemlerinin rüzgâr enerjisi üretimine olan etkileri ve bu sistemlerin uygulanabilirliği detaylı bir şekilde örneklendirilmeye çalışılmıştır. Türkiye enterkonnekte sistem içerisinde Bursa ili Karacabey ilçesine ait özel bir rüzgâr enerji santrali 'ne ait 2023 yılı aralık ayı verileri üzerinden çalışma gerçekleştirilmiştir. Kıyaslama doğru yapılabilmesi açısından tüm analizler bataryalı ve bataryasız olmak üzere 2 farklı durum üzerinden gerçekleştirilmiştir.

6.1. Farklı Stratejiler Altında Yapılan Modellemelerin Sonuçları

Bataryasız dengesizlik durumunda yani sistemde herhangi bir batarya eklemesi yapılmayan durumdaki üretimden kaynaklanan dengesizlik maliyeti ($t=0$) ile batarya sistemleri eklenmiş ve belirli stratejilere göre oluşturulmuş olan işletme stratejilerine ait sonuçlar aşağıdaki gibi verilmiştir. Başlık numarasına göre stratejiler eklenmiş olup aynı stratejiye ait SOC'li strateji hemen akabinde belirtilmiştir.

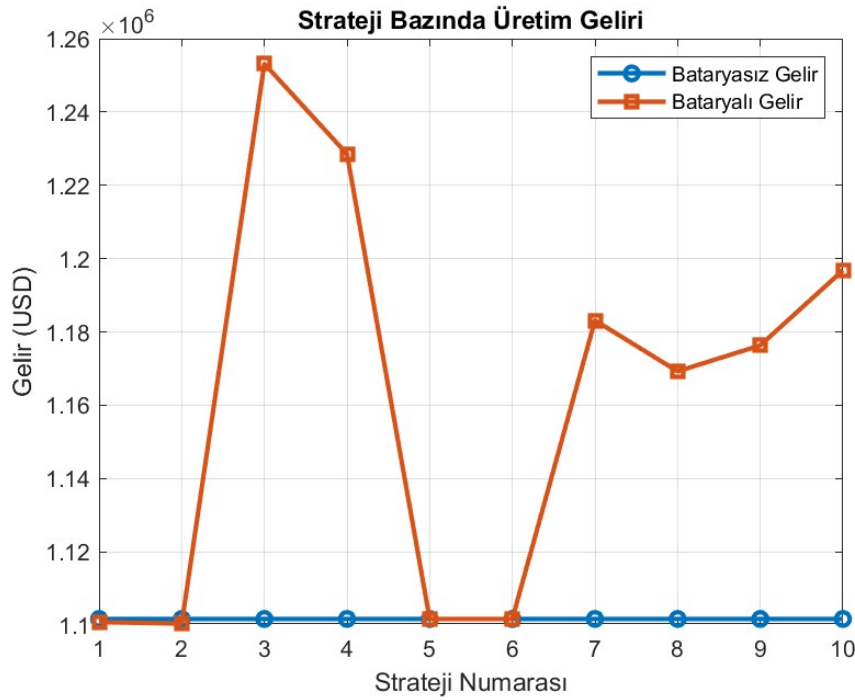


Şekil 14. Geliştirilen stratejilerin dengesizlik fiyatına göre analizi

Şekil 14’de 3 ve 4 numara ile indislenmiş olan stratejilerde, dengesizlik maliyeti $t=0$ durumuna göre daha fazla bir maliyet çıktığı görülmektedir. Diğer stratejilerin tamamında ise daha iyi bir maliyet oluştuğu gözlenmektedir.

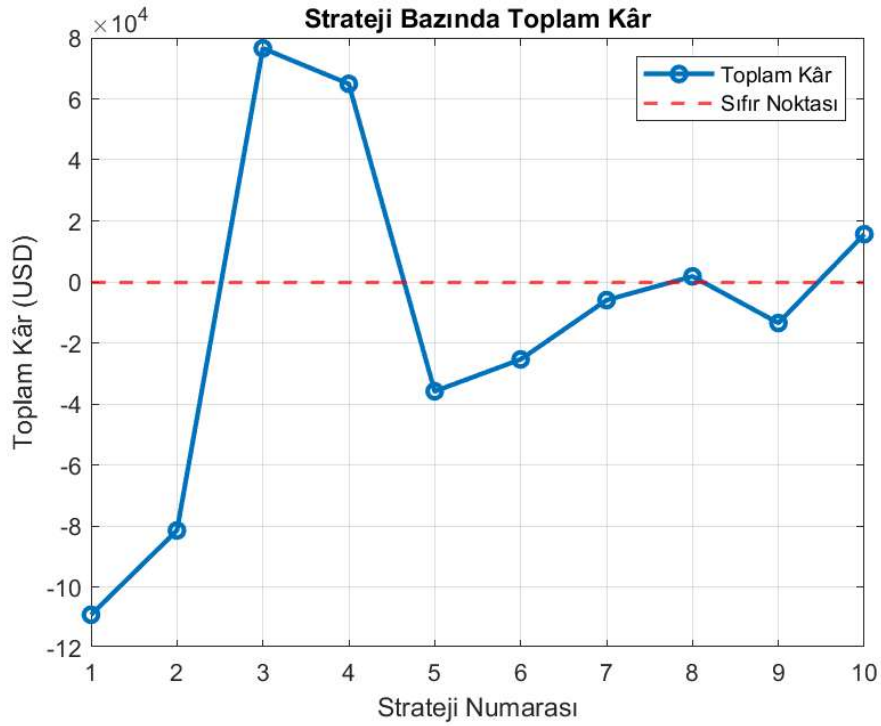
Birçok işletmede veya yatırımcıda öncelikli olarak dikkate alınan başlıca faktör, üretim geliri başlığıdır. Yatırımcılar, yaptıkları yatırımlarda ana gelir kalemi olarak bu veriyi değerlendirmektedirler. Üretim gelirin yüksek olması hem karlılık açısından hem de yapılan yatırımın geri dönüşü açısından büyük önem taşımaktadır. Üretim gelirin artması, yatırımın getirisinin yüksek olmasını sağlar ve bu da yatırımcıların kararlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 15’teki grafiğe bakıldığında, rüzgâr santralinin batarya ile desteklenmesi durumunda, 3,4 ve 7 numaralı stratejilerde toplam kazanç durumunda olumlu bir değişim olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle 3 ve 4 numaralı stratejilerde, diğer stratejilere kıyasla daha belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Bu stratejilerde üretim gelirindeki artış, batarya entegrasyonunun rüzgâr santrallerinin verimliliği üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, batarya destekli stratejilerin, yatırımın geri dönüş süresini kısaltarak ve karlılığı artırarak, yatırımcılar için daha cazip hale geldiği söylenebilir.



Şekil 15. Geliştirilen stratejilerin üretim gelirine göre analizi

Şekil 16'deki durum incelendiğinde, daha özet ve anlaşılır bir tablo sunulmaktadır. Bu tabloda, yatırım maliyetleri ve toplam durum birlikte ele alınmıştır. Yatırım maliyetlerinin değerlendirilmesinde, maliyetler 1 aylık bir süreye indirgenmiştir. Yani, yatırımın mali yükü ve geri dönüşü, bir aylık periyotlar halinde incelenmiş ve bu şekilde genel bir değerlendirme yapılmıştır. 3 ve 4 numaralı stratejiler diğer stratejilere göre daha kazançlı gözükmektedir.



Şekil 16. Toplam karlılık sonucu

6.2. Kapasite Optimizasyon Yapılandırma Sonuçları

Geliştiren stratejiler 6.1 bölümünde verilmiş olan sonuçlara bağlı olarak ortaya konulmuştur. Buradan hareketle toplam karlılığı max düzeyde tutabilmek için olması gereken kapasite nedir sorusuna cevap aranarak optimizasyon işlemi denkleme sokulmuştur. Denklemlerde kullanılan sabit katsayılar Tablo 1'de olduğu gibi verilmiştir.

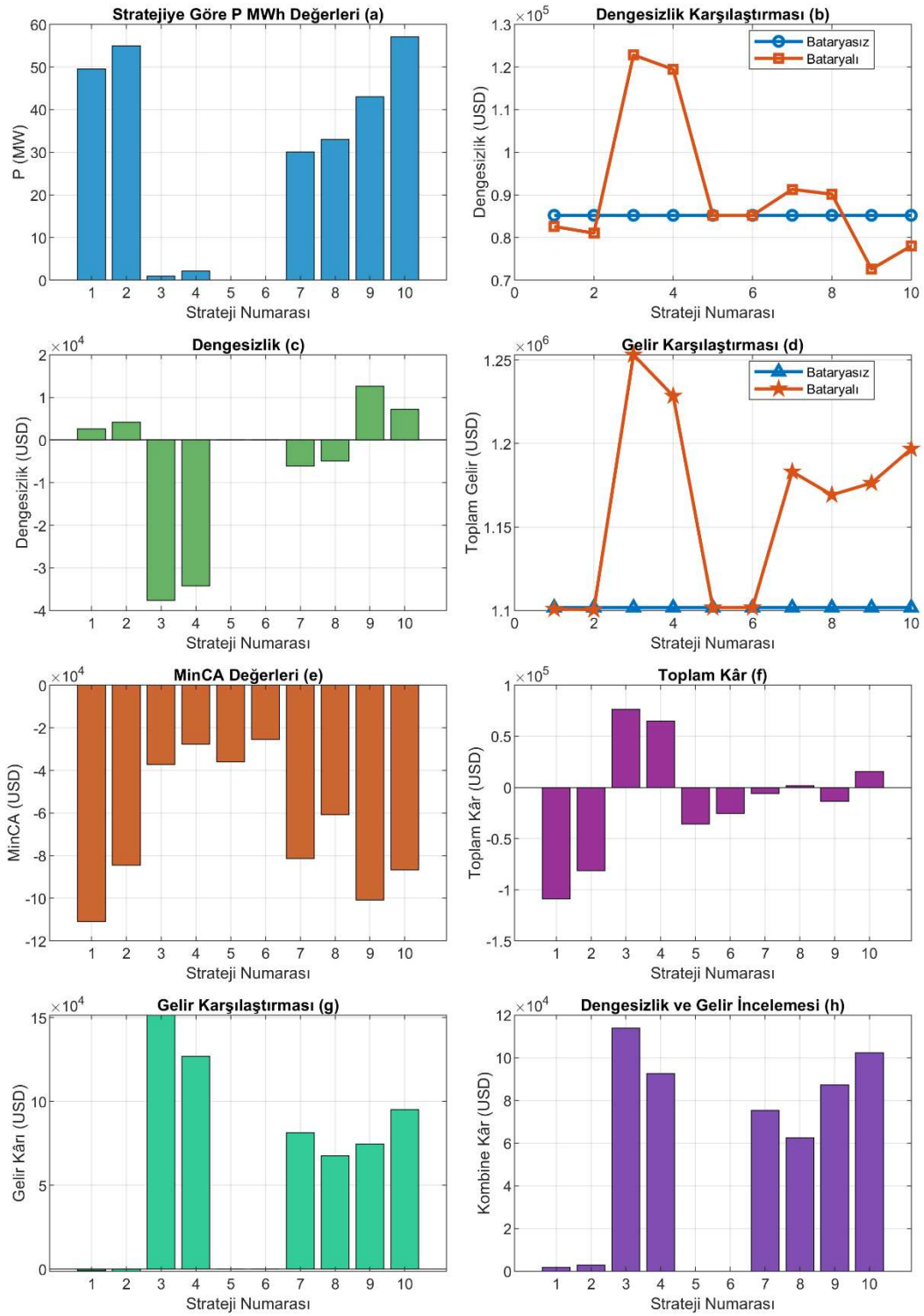
Tablo 1. Optimizasyonda kullanılan sabit katsayılar

T14	Piyasa min Fiyat	51,98	USD
T15	Piyasa max Fiyat	73,33	USD
T16	Kazanç Fiyat 1	50,21	USD
T17	Kazanç Fiyat 2	106,19	USD
T18	Kazanç Fiyat 3	117,37	USD
T25	Dengesizlik Fiyat 1	151,51	USD
T27	Dengesizlik Fiyat 2	303,03	USD

Şekil 17’de sunulan sonuçlar, enerji stratejilerine göre optimizasyona tabi tutulan P değerlerinin değişimini ve bu değişimlerin toplam kazançlara etkisini göstermektedir. "Piyasa Elektrik Fiyatına Göre Oluşan İşletme Stratejisi," en yüksek P değerine sahip olmasıyla dikkat çekerken, "Dengesizlik MWh Miktarının ve Piyasa Fiyatının Birlikte Değerlendirilmesi Stratejisi," neredeyse sıfıra yakın bir P değeri sunarak farklı bir eğilim göstermektedir. Toplam kazançlar açısından da stratejiler arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Yüksek kazanç sağlayan stratejiler arasında, "Piyasa Elektrik Fiyatına Göre Oluşan İşletme Stratejisi" öne çıkmakta ve ekonomik açıdan en verimli sonuçları sunmaktadır.

Diğer stratejilerin kazançlarının ise görece daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, SOC versiyonlarının, standart stratejilere kıyasla daha iyi performans sergilediği dikkat çekmektedir. SOC versiyonlarının, batarya kullanımını daha etkin bir şekilde optimize ettiği ve bu sayede toplam kazançları artırdığı görülmüştür. Bu bulgular, enerji stratejilerinin yalnızca kısa vadeli kazançlar değil, uzun vadeli verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından da dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

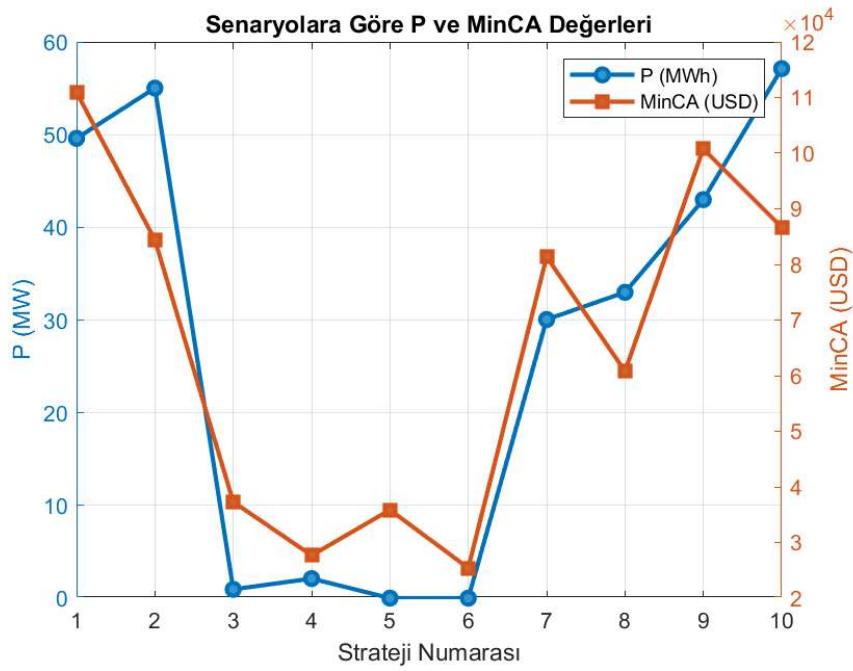
Ayrıca, Şekil 17’de sunulan veriler, stratejilerin hem teknik hem de ekonomik parametreler açısından ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Strateji performanslarının bu şekilde detaylandırılması, enerji yönetimi kararlarının daha bilinçli ve veriye dayalı bir şekilde alınmasına katkı sağlamaktadır. Devam eden başlıklarda, strateji analizlerine ilişkin daha kapsamlı yorumlar sunulmaktadır.



Şekil 17. Stratejilere göre elde edilen sonuçlar a. P optimizasyon sonuçları b. Bataryalı-bataryasız dengesizlik maliyeti c. Dengesizlik kazancı d. Toplam gelir durumu e. CAPEX giderleri f. Toplam kazanç g. Gelir kazancı h. Dengesizlik ve gelir kazancının total durumu

6.2.1. Enerji Stratejilerine Göre P Optimizasyon Değeri Analizi

Stratejiler arasındaki P (MW) değerinin farklılık göstermesi, stratejilerin enerji sistemine olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır. P, enerji sisteminde oluşan dalgalı enerji miktarını yansıtır ve stratejinin bu dalgalı enerjiyi nasıl yönettiğini gösterir. Daha düşük P değeri, stratejinin enerji dengesizliğini daha etkin bir şekilde kontrol ettiğini, yani piyasa koşullarına daha uyumlu olduğunu gösterirken, yüksek P değeri dengesizliğin daha fazla olduğunu ve stratejinin bu durumda daha fazla enerji sapmasıyla karşı karşıya kaldığını ifade eder.



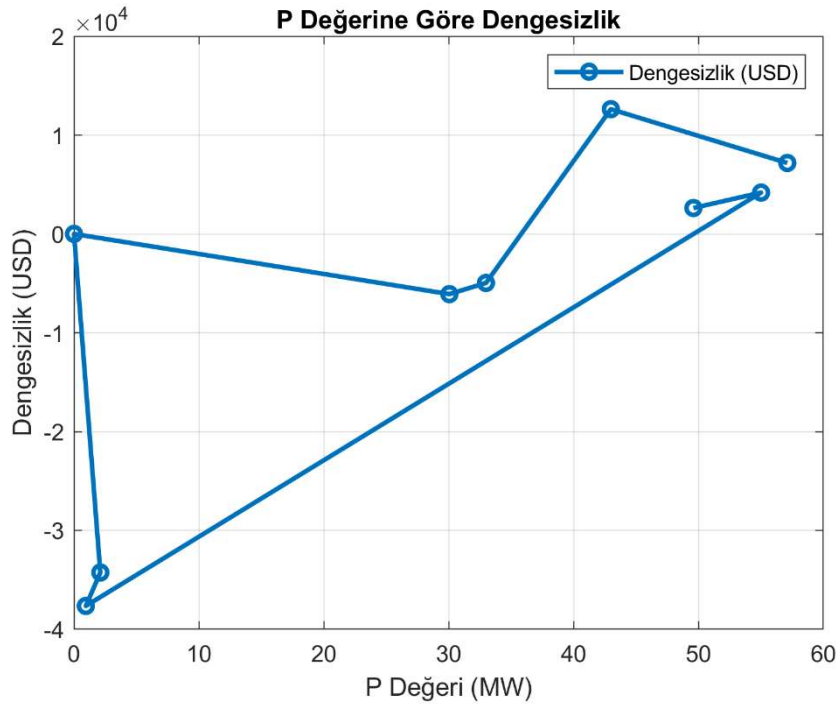
Şekil 18. Stratejilere göre oluşan P optimizasyon değerleri ve buna karşılık gelen yatırım maliyeti

Bazı stratejilerde (4.1) P'nin optimizasyon değeri daha yüksek çıkarken, diğer stratejilerde (4.3) neredeyse sıfıra yakın bir P değeri gözlenmiştir. Bu, stratejilerin belirlenen hedeflere ve piyasa fiyatlarına göre enerji dengesini farklı şekilde optimize ettiklerini göstermektedir. Piyasa elektrik fiyatına göre oluşturulan stratejiler, fiyat oynaklığını dikkate alarak enerji dengesizliğini azaltmada daha az etkin olabilirken, dengesizlik fiyatlarına odaklanan stratejiler dalgalı enerjiyi daha etkin yönetmektedir. Aynı zamanda P değerinin miktarı doğrudan ilk yatırım giderlerini etkilemektedir.

Şekil 18’de görüleceği üzere P’deki değişimler yatırım maliyetinde de etkileşime neden olmaktadır.

Bu bağlamda, P değerlerinin farklılaşması, enerji yönetim stratejilerinin esnekliğini ve piyasaya adaptasyon yeteneklerini değerlendirmek açısından kritik bir göstergedir.

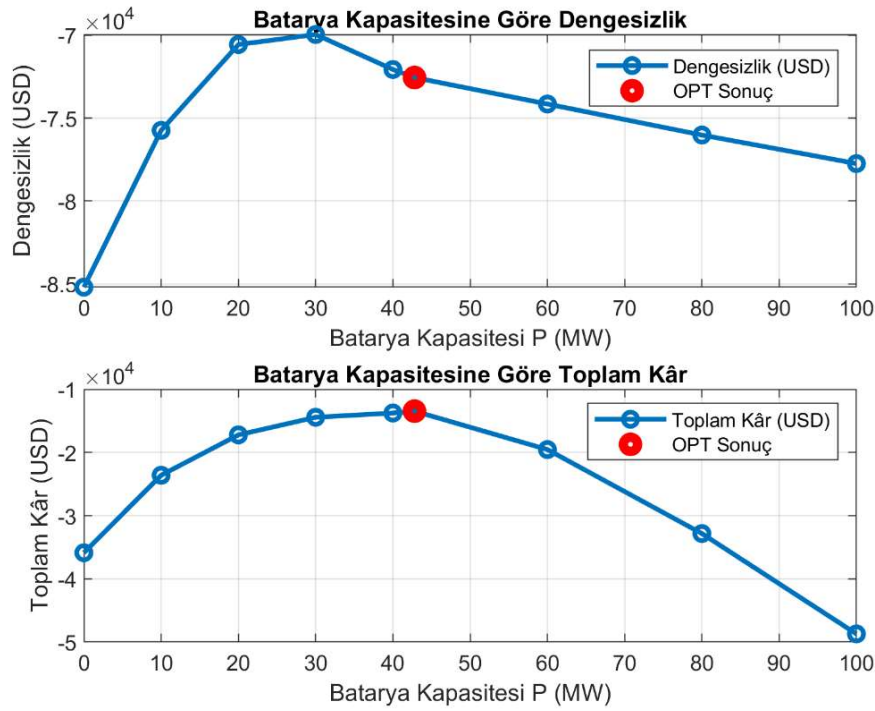
6.2.2. Stratejilerin Enerji Dengesizliği Üzerindeki Etkisi



Şekil 19. P optimizasyon değerleri ve buna karşılık gelen dengesizlik kazançları

Her bir strateji, enerji dengesizliğini farklı şekillerde yönetmiş ve P (MW) optimizasyon değerleri buna paralel olarak değişiklik göstermiştir. Dengesizliğin minimize edilmesi, stratejilerin verimliliğini belirlemede önemli bir gösterge olmuştur. Piyasa fiyatına göre oluşturulan stratejilerde (4.3 ve 4.4) dengesizliğe çok fazla dikkat edilmediği için maruz kalınan zarar 30-40 bin USD bandında olurken, doğrudan dengesizlik hassasiyetli stratejilerde ise bu rakam pozitif seviyelere çıkmaktadır. Bu bulgu, piyasadaki dengesizliğin kontrol edilmesi gerektiği durumlarda bu tür stratejilerin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Stratejiler herhangi bir akış veya sistematığe göre oluşturulmadığından grafiklerde de parabolik veya doğrusal bir sonuç elde edilmemesi normal bir durumdur. Şekil 19’a bakıldığı zaman bu durumu daha net olarak görülmektedir. Stratejilerin tamamen oluşum senaryosuna göre sonuçlar elde edilmektedir. Ancak daha detaylı bir örnek incelemesi yapılacak olunursa, örneğin en yüksek dengesizlik kazancı 42,8 MW batarya kapasitesi ile (4.5) başlığı altında incelenen stratejide elde edilmiştir. Burada P optimizasyon değerini 0-100 MW bandında değiştirildiğinde Şekil 20’deki görünümüne ulaşılmıştır.

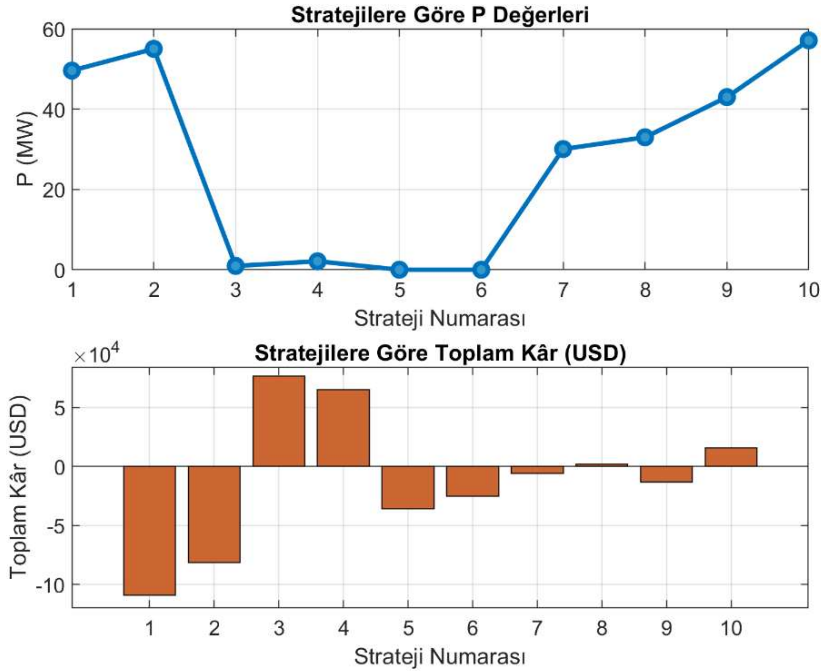


Şekil 20. (4.5) Stratejisine bağlı 0-100 MW P değerine karşılık gelen dengesizlik ve toplam kazanç

Dengesizlik ve toplam kazanç grafikleri bir arada incelendiğinde, her iki değişkenin de 42.8 MW kapasitesinde belirgin bir ilişki sergilediği açıkça görülmektedir. Şekil 19’da da görüleceği üzere dengesizlik değerinin bu noktada en düşük seviyeye ulaşması, sistemin enerji dengesizliğini etkin bir şekilde kontrol edebildiğini göstermektedir; bu değer 72,556 USD civarındadır. Aynı zamanda, 42.8 MW kapasitesindeki toplam kazanç 13,495 USD olarak kaydedilmektedir. Bu iki sonuç, 42.8 MW kapasitesinin, enerji yönetim stratejilerinin optimize edilmesi açısından kritik bir denge noktası olduğunu ortaya koymaktadır.

6.2.3. Kazanç Analizi

Toplam kazanç açısından bakıldığında, stratejiler arasındaki farklar oldukça belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Piyasa Elektrik Fiyatına Göre Oluşan İşletme Stratejisi ve SOC versiyonu, toplam kazanç açısından en yüksek değerleri oluşturmuştur. Bu durum piyasa fiyatlarını öncelikli olarak değerlendiren stratejilerin, enerji dengesizliğini tam olarak minimize edemese bile yüksek kazanç sağlayabildiğini göstermektedir. Strateji seçiminde kazanç odaklı yaklaşımların, özellikle dalgalı piyasa koşullarında daha fazla gelir elde etme potansiyeli sunduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 21’de bu duruma ait görsel verilmiştir. Her bir stratejinin kendi özelinde farklı kazanç durumları olduğu gözükmemektedir.



Şekil 21. Stratejilere göre kazanç durumları

6.2.4. Dengesizlik ve Piyasa Fiyatlarına Odaklanan Stratejiler

Bazı stratejiler, dengesizlik ve piyasa fiyatlarını birlikte değerlendirmiştir. *Dengesizlik Fiyatına ve Piyasa Fiyatına Bağlı Olarak Oluşturulan İşletme Stratejisi*, P optimizasyon değerini minimize edememiş olsa bile, kazanç açısından tatmin edici sonuçlar elde etmiştir. Bu strateji hem enerji dengesizliğini yönetmede hem de piyasa koşullarından kazanç sağlamada dengeli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

6.2.5. SOC Versiyonlarının Performansı

SOC versiyonları, genellikle standart stratejilerden daha farklı kazanç ve dengesizlik sonuçları üretmiştir. Örneğin, Dengesizlik Fiyatını Azaltma Öncelikli Olarak Piyasa Fiyatının Değerlendirilmesi Stratejisi SOC, P optimizasyon değeri daha düşük olmasına rağmen toplam kazanç açısından standart versiyonuna kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuç, enerji yönetiminde SOC stratejilerinin dengesizlik ve kazanç optimizasyonunda daha etkin olabileceğini vurgulamaktadır.

6.2.6. Kazanç ve Dengesizlik Arasındaki Denge

Sonuçlar, her stratejinin farklı seviyelerde kazanç ve dengesizlik ürettiğini göstermektedir. Yüksek kazanç sağlayan stratejiler genellikle daha büyük enerji dalgalanmalarıyla karşı karşıya kalırken, düşük dengesizlik üreten stratejiler kazanç açısından daha mütevazı sonuçlar üretmiştir. Bu da strateji seçiminde kazanç ve dengesizlik kontrolü arasındaki dengenin önemini vurgulamaktadır.

7. SONUÇLAR

Grafikler ve vaka çalışmasında görüldüğü üzere, bataryalı stratejiler, farklı senaryolarda değişken sonuçlar ortaya koymuştur. Bu çalışma, bataryalı stratejilerin yatırım maliyetlerinin, sağlanan fayda ve elde edilen gelirlerle dengelendiğinde stratejik bir öneme sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Enerji yönetiminde, piyasa fiyatlarının dalgalandığı dönemlerde yüksek kazanç hedefleyen stratejiler ön plana çıkarken, enerji dengesizliğinin minimize edilmesi gereken koşullarda düşük P optimizasyon değerine sahip stratejiler daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, SOC versiyonları genel performans açısından dengeli bir çözüm sunmakta ve bu nedenle gelecekteki çalışmalarda daha derinlemesine araştırılmayı hak etmektedir.

Bataryalı stratejilerin sunduğu avantajlar, enerji depolama ve yönetimi alanındaki ilerlemelerin yatırım maliyetlerini düşürme potansiyelini göstermektedir. Bu durum, yatırımcılar için uzun vadede hem sürdürülebilir hem de kârlı bir yatırım anlamına gelmektedir. Bataryalı stratejiler sadece maliyet avantajı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel verimlilik açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır.

Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler:

Bu çalışma, bataryalı stratejilerin enerji sektöründeki potansiyelini ortaya koyarken, gelecekte yapılacak araştırmalar için de önemli alanlar belirlemiştir. İlk olarak, enerji depolama teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte batarya sistemlerinin kapasite, maliyet ve verimlilik üzerindeki etkileri daha ayrıntılı incelenmelidir. Bu bağlamda, farklı batarya teknolojilerinin (örneğin lityum-iyon, katı hal bataryaları) strateji performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

Ayrıca, piyasa koşullarının öngörülemezliğine karşı daha esnek ve adaptif stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmalar kullanılarak, gelecekte enerji fiyatlarındaki dalgalanmaları tahmin eden ve bataryalı sistemlerin anlık karar alma mekanizmalarını optimize eden yeni yaklaşımlar geliştirilebilir. Bu tür teknolojiler, enerji dengesizliğini daha etkin bir şekilde yönetme ve daha büyük kazanç elde etme potansiyeli sunmaktadır.

Son olarak, çevresel faktörlerin ve karbon ayak izi azaltma hedeflerinin giderek daha fazla önem kazandığı bir dönemde, bataryalı stratejilerin çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda, bu stratejilerin karbon emisyonlarına olan etkisi analiz edilerek hem çevresel hem de ekonomik açıdan en verimli çözümler belirlenebilir. Böylece enerji sektöründe hem maliyet avantajı sağlayan hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunan stratejiler oluşturulabilir.



KAYNAKÇA

- Abbasi, O. U. R., Bukhari, S. B. A., Iqbal, S., Abbasi, S. W., Rehman, A. ur, AboRas, K. M., Alshareef, M. J., & Ghadi, Y. Y. (2023). Energy management strategy based on renewables and battery energy storage system with IoT enabled energy monitoring. *Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-02133->
- Abdellatif, H., Syed, M. N., Hossain, M. I., & Abido, M. A. (2023). Standalone Hybrid Renewable Energy System Optimization Using Linear Programming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(5), 6361–6376. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07363-7>
- Amini, M., Nazari, M. H., & Hosseinian, S. H. (2023a). Optimal energy management of battery with high wind energy penetration: A comprehensive linear battery degradation cost model. *Sustainable Cities and Society*, 93, 104492. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104492>
- Amini, M., Nazari, M. H., & Hosseinian, S. H. (2023b). Predictive energy management strategy for battery energy storage considering battery degradation cost. *IET Renewable Power Generation*, 17(5), 1119–1138. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12669>
- Basso, E., & Du, Y. (2023a). Battery Energy Storage Control Using Reinforcement Learning. 2023 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IFEEEC58486.2023.10458579>
- Basso, E., & Du, Y. (2023b). Battery Energy Storage Control Using Reinforcement Learning. 2023 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IFEEEC58486.2023.10458579>
- Bose, P., & Sivraj, P. (2020). Smart Charging Infrastructure for Electric Vehicles in a Charging Station. 2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 186–192. <https://doi.org/10.1109/ICICCS48265.2020.9121010>
- Chen, L., Fu, Z., Zhu, J., & Yuan, Y. (2023). Optimal Control Strategy of Echelon Battery Energy Storage System Based on Battery Health State. 2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 1837–1842. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia58343.2023.10294974>
- De Siqueira, L. M. S., & Peng, W. (2021). Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 35). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102252>

- Deutsch, C., Chiche, A., Bhat, S., Lagergren, C., Lindbergh, G., & Kutteneuler, J. (2020). Energy Management Strategies for Fuel Cell-Battery Hybrid AUVs. 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)(50043), 1–6. <https://doi.org/10.1109/AUV50043.2020.9267932>
- Feng, X., Ren, D., & Ouyang, M. (2023). Safety of lithium battery materials chemistry. *Journal of Materials Chemistry A*, 11(46), 25236–25246. <https://doi.org/10.1039/D3TA04182D>
- Fotescu, R.-P., Burciu, L.-M., Constantinescu, R., & Svasta, P. (2021). Advantages of Using Battery Cell Balancing Technology in Energy Storage Media in Electric Vehicles. 2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 129–132. <https://doi.org/10.1109/SIITME53254.2021.9663575>
- Galli, C., Superchi, F., Papi, F., Ferrara, G., & Bianchini, A. (2024a). Innovative power smoothing techniques for wind turbines using batteries and adaptive pitch regulation. *Journal of Energy Storage*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110964>
- Galli, C., Superchi, F., Papi, F., Ferrara, G., & Bianchini, A. (2024b). Innovative power smoothing techniques for wind turbines using batteries and adaptive pitch regulation. *Journal of Energy Storage*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110964>
- Gonçalves, D., Soares Callegari, J. M., De Barros, R. C., Cupertino, A. F., & Pereira, H. A. (2023). Advanced Battery Energy Storage System Employing Cloud-based Platform. COBEP 2023 - 17th Brazilian Power Electronics Conference and SPEC 2023 - 8th IEEE Southern Power Electronics Conference, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SPEC56436.2023.10408153>
- Guiducci, L., Palma, G., & Rizzo, A. (2024). Optimizing Energy Efficiency in Smart Factories: Battery Energy Storage Systems Integration Analysis. 2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 1–7. <https://doi.org/10.1109/MECO62516.2024.10577839>
- Gupta, S., & Mishra, P. K. (2023). Machine Learning based SoC Estimation for Li-Ion Battery. 2023 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEPE57949.2023.10201546>
- GWEC.NET Associate Sponsors Podcast Sponsor Leading Sponsor Supporting Sponsor Co-leading Sponsor. (n.d.). www.gwec.net
- Haber, Y. (2024). Türkiye rüzgar sektörü 2024: İlk yarı değerlendirme toplantısı, yeni yasalar ve enerji depolama vurgusu. <https://yesilhaber.net/turkiye-ruzgar-sektoru-2024-ilk-yari-degerlendirme-toplantisi-yeni-yasalar-ve-enerji-depolama-vurgusu/>

- Haider, S., Haider, A., Khodaei, M., & Chen, L. (Eds.). (2021). Energy Storage Battery Systems - Fundamentals and Applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91100>
- Hild, S., Leavey, S., Graf, C., & Sorazu, B. (2014). Smart Charging Technologies for Portable Electronic Devices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 328–336. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2281853>
- Housseini, B., Okou, A. F., & Beguenane, R. (2016). Energy management strategy of on-grid/off-grid wind energy battery-storage system. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2016.7726804>
- Huang, H., Ghias, A. M. Y. M., Acuna, P., Dong, Z., Zhao, J., & Reza, M. S. (2024). A fast battery balance method for a modular-reconfigurable battery energy storage system. *Applied Energy*, 356, 122470. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.122470>
- İklim Haber. (2024). Batarya Enerji Depolama Sistemleri Türkiye'nin Enerji İthalatını Azaltabilir. <https://www.iklimhaber.org/batarya-enerji-depolama-sistemleri-turkiyenin-enerji-ithalatini-azaltabilir/>
- Jan, K. U., Dubois, A. M., & Diallo, D. (2021). Hybrid Battery-SC and Battery-Battery Multistage Design and Energy Management for Power Sharing. *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589603>
- Jani, A., Karimi, H., & Jadid, S. (2021). Hybrid energy management for islanded networked microgrids considering battery energy storage and wasted energy. *Journal of Energy Storage*, 40, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102700>
- Kaya, M. (2022). State-of-the-art lithium-ion battery recycling technologies. In *Circular Economy* (Vol. 1, Issue 2). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2022.100015>
- Khoury, D., M'Sirdi, N. K., Naamane, A., Aubepart, F., Akiki, T., & Nehme, B. (2024). Development of a Battery Energy Storage System Physical Model. 2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCAD60883.2024.10553753>
- LEON, J. I., Dominguez, E., Wu, L., Marquez Alcaide, A., Reyes, M., & Liu, J. (2021). Hybrid Energy Storage Systems: Concepts, Advantages, and Applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(1), 74–88. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3016914>

- Li, X., Hui, D., Lai, X., Ouyang, M., & Min, Y. (2010). Fuzzy logic based coordinated controller for wind/battery/IDSMS hybrid micro-grid power system. 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, 4, V4-263-V4-267. <https://doi.org/10.1109/ICCET.2010.5485606>
- Liu, K., Wei, Z., Zhang, C., Shang, Y., Teodorescu, R., & Han, Q.-L. (2022). Towards Long Lifetime Battery: AI-Based Manufacturing and Management. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(7), 1139–1165. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105599>
- Liu, X., Li, J., & Wang, Y. (2023). Research on Battery Energy Control Strategy Based on Neural Network. 3rd IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications, ICMNWC 2023. <https://doi.org/10.1109/ICMNWC60182.2023.10435801>
- Lyu, X., Jia, Y., Xu, Z., & Ostergaard, J. (2020). Mileage-Responsive Wind Power Smoothing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(6), 5209–5212. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2927188>
- Ma, L., Xie, L., Ye, L., Ye, J., & Ma, W. (2023). A wind power smoothing strategy based on two-layer model algorithm control. *Journal of Energy Storage*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106617>
- Mahesh, A., & Sandhu, K. S. (2016). ANFIS based energy management strategy for PV/Wind/Battery hybrid energy system. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), 1–5. <https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077221>
- Mansuri, M. F., Saxena, B. K., & Mishra, S. (2020). Shifting from Fossil Fuel Vehicles to H2 based Fuel Cell Electric Vehicles: Case Study of a Smart City. 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM), 316–321. <https://doi.org/10.1109/ICACCM50413.2020.9213043>
- Mao, S., Zeng, X., & Li, X. (2023a). Battery Energy Storage Station Group Scheduling Strategy Considering Battery Life Loss. 2023 2nd International Conference on Smart Grids and Energy Systems, SGES 2023, 311–315. <https://doi.org/10.1109/SGES59720.2023.10366926>
- Mao, S., Zeng, X., & Li, X. (2023b). Battery Energy Storage Station Group Scheduling Strategy Considering Battery Life Loss. 2023 2nd International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), 311–315. <https://doi.org/10.1109/SGES59720.2023.10366926>
- Mihet-Popa, L. (Ed.). (2023). *Smart Grids Technology and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97969>

- Namboothiri, K. M., Sundareswaran, K., Nayak, P. S. R., & Simon, S. P. (2024). State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Long Short-Term Memory and Bi-directional Long Short-Term Memory Neural Networks. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 105(1), 175–182. <https://doi.org/10.1007/s40031-023-00947-3>
- Padmadewi, A. L., Halimi, B., & Sihite, L. P. (2023). Modeling PV-Wind-Battery Hybrid System for Guest House in Matakus Island. 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 654–659. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257467>
- Prakash, R. B. R., Srinivasa Varma, P., Ravikumar, C., Vijay Muni, T., Srinivasulu, A., Bagadi, K., Rajesh, A., & Sathish, K. (2023). Intelligent Energy Management for Distributed Power Plants and Battery Storage. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/6490026>
- Qian, Z., Jiang, S., Zhang, L., Mao, L., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, J. (2021). Optimal Sizing of Hybrid Wind-Storage System for Load Shifting. 2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 558–563. <https://doi.org/10.1109/ICPES53652.2021.9683979>
- Renewable Energy Agency, I. (2024). RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2024 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2024 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2024 About IRENA. www.irena.org
- Sagi, D. R., Ganireddy, G., Padmarao, V., Burra, R., & Landa, B. (2018). Wind-Storage Hybrid Turbine - Field Deployment Experience. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 1–6. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707676>
- Song, Z., Feng, S., Zhang, L., Hu, Z., Hu, X., & Yao, R. (2019). Economy analysis of second-life battery in wind power systems considering battery degradation in dynamic processes: Real case scenarios. *Applied Energy*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113411>
- Sreekala, V., Karun, A. S., & George, A. (2024). Review on Microgrids, Control Strategies and DC Microgrids. 2024 Second International Conference on Smart Technologies for Power and Renewable Energy (SPECon), 1–6. <https://doi.org/10.1109/SPECon61254.2024.10537302>
- Sun, Y., Li, Z., Shahidehpour, M., & Ai, B. (2015). Battery-Based Energy Storage Transportation for Enhancing Power System Economics and Security. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(5), 2395–2402. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2390211>
- TUREB. (2024). Turkish Wind Energy Statistics Report - January 2024. TUREB. <https://tureb.com.tr/eng/haber/turkish-wind-energy-statistics-report-january-2024/235>

Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2023. (2024). www.shura.org.tr

Wang, T.-W., Liu, T., & Sun, H. (2023). Direct recycling for advancing sustainable battery solutions. *Materials Today Energy*, 38, 101434. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101434>

Wasim, M. S., Habib, S., Amjad, M., Bhatti, A. R., Ahmed, E. M., & Qureshi, M. A. (2022). Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System to Increase Battery Life Under Pulse Loads. *IEEE Access*, 10, 62173–62182. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3182468>

Wu, X., Hua, H., Wang, Y., Chen, X., & Wang, R. (2023). Battery Lifetime Extension Optimization in Integrated Energy System. *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Energy Internet, ICEI 2023*, 17–22. <https://doi.org/10.1109/ICEI60179.2023.00013>

Yang, Y., Menictas, C., Bremner, S., & Kay, M. (2018). A Comparison Study of Dispatching Various Battery Technologies in a Hybrid PV and Wind Power Plant. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585803>

Yavuz, İ., Özbay Vestas Rüzgar Enerji Sistemleri, H., Bölge Müdürlüğü, E., Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, T., & ve Doğa Bilimleri Fakültesi, M. (2020). Rüzgar Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği *Installation and Maintenance Processes in Wind Turbines: The Case of Bandırma Article history*.

Zhang, Y., Li, M., & Tong, F. (2022). An Energy-Efficient Load Balancing Scheme in Heterogeneous Clusters by Linear Programming. *2022 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/ICCCN54977.2022.9868847>

Zhang, Y., Su, Y., Chen, L., Liu, F., & Li, C. (2021). Robust Allocation of Battery Energy Storage Considering Battery Cycle Life. *2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, 296–301. <https://doi.org/10.1109/PSGEC51302.2021.9542715>

Zhou, J., Chen, C., Yao, L., Ke, D., Liao, S., & Liu, Y. (2021). A Multi-dimensional Status Evaluation System of Battery Energy Storage for Efficient Operation and Maintenance Decision-Making. *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, 857–862. <https://doi.org/10.1109/AEEES51875.2021.9403116>