

Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde Batarya Entegrasyonu için Kapasite Optimizasyonu

İsmail Kayahan^{1*} ve Eylül Karaosmanoğlu¹

¹Endüstri Mühendisliği, Işık Üniversitesi, Türkiye

*ismail.kayahan@isikun.edu.tr

(Received: 12 May 2025, Accepted: 19 May 2025)

(7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2025, May 15-16, 2025)

ATIF/REFERENCE: Kayahan, İ. & Karaosmanoğlu, E. (2025). Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde Batarya Entegrasyonu için Kapasite Optimizasyonu. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(5), 202-209.

Özet – Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının doğasındaki değişkenlikten kaynaklanan üretim dalgalanmalarını dengelemek amacıyla enerji depolama sistemlerinin boyutlarının optimizasyonunu ele almaktadır. Yenilenebilir enerji üretimindeki süreksizlikler, enerji arz ve talebinin uyumlaştırılmasında önemli güçlükler neden olmaktadır. Çalışma kapsamında, bir rüzgâr enerji santralinin gerçek zamanlı üretim verileri kullanılarak, enerji depolama sistemlerinin performansını değerlendirmek için simülasyon modellemesi ve karma-tam sayılı doğrusal programlama olmak üzere iki farklı metodoloji incelenmiştir. Doğrusal programlama modeli aracılığıyla, enerji depolama sistemi için optimal kapasite ve güç değerleri belirlenmiş ve bu optimizasyonun toplam sistem maliyetlerinde bir düşüş sağladığı gözlemlenmiştir. Bu araştırma, depolama sistemlerinin kapasite ve işletim stratejilerinin optimize edilmesi yoluyla maliyetlerin düşürülmesine ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunabilecek yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Enerji Depolama, Rüzgâr Enerjisi, Optimizasyon, Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama, Dengesizlik Maliyeti.

I. GİRİŞ

Küresel enerji talebindeki artış ve fosil yakıtların çevresel etkilerine dair artan endişeler, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) olan yönelimi hızlandırmıştır [1]. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi YEK'ler, temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için umut vaat etse de, bu kaynakların doğası gereği kesintili ve değişken üretim profilleri, enerji sistemleri için önemli zorluklar yaratmaktadır. Üretimdeki bu öngörülemez dalgalanmalar, şebeke operatörleri için arz-talep dengesinin sağlanmasında ve enerji piyasalarında fiyat istikrarının korunmasında güçlükler neden olmaktadır [2],[3]. Özellikle, rüzgâr enerjisi santralleri (RES), rüzgâr hızındaki anlık değişimlere bağlı olarak üretimlerinde büyük farklılıklar gösterebilirler. Bu durum, enerji üretim şirketlerinin piyasaya taahhüt ettikleri enerji miktarlarını karşılayamamalarına ve sonuç olarak finansal cezalara maruz kalmalarına yol açabilmektedir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek ve YEK'lerin şebekeye daha güvenilir bir şekilde entegre olabilmesini sağlamak amacıyla enerji depolama sistemleri (EDS) kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bataryalı enerji depolama sistemleri (BEDS), üretimin fazla olduğu dönemlerde enerjiyi depolayarak ve üretimin yetersiz olduğu veya talebin yüksek olduğu zamanlarda bu depolanmış enerjiyi şebekeye vererek sistem

esnekliğini ve güvenilirliğini artırır. Bu sayede, YEK'lerin değişkenliğinden kaynaklanan olumsuz etkiler önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

EDS'lerin optimizasyonu hem teknik hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Optimal depolama kapasitesinin ve gücünün belirlenmesi, yatırım maliyetleri ile işletme sırasındaki faydalar arasında bir denge kurulmasını gerektirir. Bu çalışmada, Türkiye'deki bir rüzgâr enerji santrali özelinde, batarya enerji depolama sistemlerinin dengesizlik maliyetlerini azaltma ve toplam sistem maliyetini minimize etme potansiyeli incelenmiştir. Bu amaçla, simülasyon tabanlı bir yaklaşım ve karma-tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanılarak farklı depolama senaryoları analiz edilmiş ve optimal çözüm aranmıştır. Çalışmanın sonuçları, enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji santrallerindeki dengesizlik maliyetlerini azaltmadaki etkisini göstermekte ve optimal boyutlandırma için bir metodoloji sunmaktadır. Bu bulgular, yenilenebilir enerji yatırımcıları, şebeke operatörleri ve politika yapıcılar için değerli bilgiler sağlayacaktır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, literatürdeki çalışmalar, çalışmada kullanılan veri seti, maliyet parametreleri ve çözüm yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

A. Literatür Taraması

Enerji sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) olan yönelim, çevresel kaygılar ve arz güvenliğinin sağlanmasına yönelik artan gereksinimler nedeniyle son yıllarda hız kazanmıştır [1], [2]. Fosil yakıtlardan uzaklaşmak ve sürdürülebilir enerji sistemlerine ulaşmak, YEK yaygınlaşmasının ana motivasyonları arasındadır. Ancak rüzgâr ve güneş gibi kaynakların üretimdeki değişkenliği ve kesintiliği, elektrik sistemlerinde süreklilik ve dengeyi sağlamak açısından önemli teknik ve ekonomik zorluklar doğurmaktadır [2], [3]. Özellikle elektrik piyasalarında üreticiler bir gün önceden üretim tahmini yapmakta; gerçek zamanlı üretim ile tahmin arasındaki sapmaların artması ise üreticiler için ciddi maddi kayıplara yol açmaktadır. Nitekim yapılan çalışmalar, rüzgâr santrallerinde tahmin hatalarının gelirlerde %10-20 oranında kayıp oluşturduğunu göstermektedir [3].

Bu dezavantajları gidermek amacıyla EDS'den yararlanmak, sistemlerin esnekliğini ve güvenilirliğini artırmak için etkin bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Depolama sistemleri sayesinde, fazla üretim dönemlerinde enerji depolanabilmekte, yetersiz üretim veya yüksek talep anlarında ise bu enerji şebekeye verilerek kaynakların süreksizliği önemli ölçüde dengelenebilmektedir [3], [4].

Literatürde EDS optimizasyonu için çeşitli sayısal ve algoritmik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunların başında doğrusal programlama yöntemleri gelmektedir. Baker ve ark. [2], rüzgâr enerjisinin dalgalı üretim profilini dengelemek amacıyla geliştirdikleri doğrusal programlama modelinde enerji depolama kapasitesini ve güç oranını optimizasyon kapsamında değerlendirmiştir. Bu çalışmada, tahmin belirsizliklerinin ve çekimser ufuk yönetiminin, optimal depolama kapasitesi üzerinde belirleyici olduğu gösterilmiştir.

Stokastik optimizasyon ise özellikle rüzgâr tahmini hatalarının sistem maliyetine etkisini minimize etmeye dönük olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Pinson ve ark. [3], rüzgâr tahmin hatalarının istatistiksel yapısını dikkate alarak enerji depolamanın dinamik boyutlandırılmasını hedefleyen bir stokastik optimizasyon yöntemi sunmuştur. Bu sistemde, depolama kapasitesinin belirlenmesi yalnızca ortalama tahmin hatasına değil, aynı zamanda sapma ve varyans gibi istatistiksel parametrelere de dayandırılmıştır.

Kaba kuvvet (Brute-force) algoritması ile yapılan çalışmalarda, Shin ve Hur [1] depolama kapasite/güç parametrelerinin farklı kombinasyonlarını ayırık biçimde test ederek, kârı maksimize edecek optimal kombinasyonu belirlemişlerdir. Modelde deterministik bir yaklaşım ve farklı kapasite büyüklükleri ile simülasyon yapılmıştır.

Olasılıksal modelleme ve Monte Carlo yöntemleri ise özellikle kısa dönemli dalgalanmaların ve zamansal otokorelatif tahmin hatalarının sisteme etkisini kapsayan boyutlandırma çalışmalarında kullanılmıştır. Michiorri ve ark. [5], rüzgâr ve depolama güç santralleri kapsamında otokorelatif hataları dikkate alarak daha gerçekçi bir kapasite tayini gerçekleştirmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon teknikleriyle Li ve ark. [6], rüzgâr-hidroelektrik depolama hibrit sistemlerinin kapasite sorununu hem maliyet hem de sistem verimliliği açısından optimize etmiş; Yao ve ark. [7] ise açık deniz rüzgâr gücünün sistem entegrasyonu için quadratik programlama tabanlı deterministik bir optimizasyon modeli sunmuştur.

Kimi çalışmalarda karmaşık piyasa dinamiklerini dikkate almak üzere iç içe oyun teorisi yaklaşımları [8] veya olasılıksal birim taahhüt modelleri [9] de uygulanmaktadır. Bu yöntemler, aktörlerin karşılıklı etkileşimini ve sistemdeki belirsizlikleri bütüncül şekilde modellemeye olanak tanır.

Literatürde öne çıkan iki ana depolama türü bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Bahloul ve ark. [4] tarafından bir fotovoltaiik (PV) santralinin enerji sınırlandırma kayıplarını minimize etmek için batarya depolama boyutlandırma analizinde incelenen BEDS olup, bu sistemler hızlı yanıt süreleri ve yüksek verimlilikleri ile kısa vadeli enerji taleplerine çözüm sunmaktadır. İkinci ana tür ise Ma ve ark. [10], [11] tarafından fotovoltaiik enerji üretimi için tekno-ekonomik optimizasyonun incelendiği Pompaj Depolamalı Sistemleridir; bu sistemler büyük ölçekli enerji depolama kapasiteleri sayesinde uzun vadeli enerji taleplerini karşılamak için idealdir.

Literatürde karar değişkenleri olarak depolama enerji kapasitesi, şarj/deşarj gücü, PV panel/türbin sayısı gibi parametrelerin optimize edildiği çeşitli çok değişkenli çalışmalar bulunmaktadır [12], [13], [14], [7]. Üretim kaynağı türüne göre yapılan optimizasyonlarda bazı makaleler güneşi [4], [7], bazıları rüzgârı [15], [13], [6] bazıları ise her ikisinin hibrit entegrasyonunu merkeze almıştır [1], [8]. Kaynak karakteristiği, sistem mimarisi ve piyasa koşullarına bağlı olarak seçilen optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen sonuçların belirgin şekilde değişebildiği görülmektedir.

Coğrafi olarak da simülasyon çalışmaları farklı ülkelerde, farklı iklim ve piyasa koşullarında yürütülmüştür. Kapsali ve Kaldellis [16], Anagnostopoulos ve Papantonis [17] ve Papaefthymiou ve Papathanassiou [18] Yunanistan'da, Li ve ark. [6] ve Yao ve ark. [7] Çin'de, Pinson ve ark. [3] Danimarka'da, Baker ve ark. ise [2] IEEE test sisteminde analizler yapmıştır. Bu durum hem iklimsel hem de piyasa koşullarının, depolama optimizasyonuna doğrudan etki ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak; literatür, enerji depolama optimizasyonunda çeşitli modeller ve teknikler içermekte; saha gereklilikleri, piyasalar ve uygulama kapsamaları dikkate alınarak farklılaştırılmaktadır. Sürdürülebilir ve ekonomik enerji sistemlerini hedefleyen çalışmalarda EDS optimizasyonu konusunda disiplinler arası ve çok boyutlu bakış açılarının geliştirilmesinin önemi öne çıkmaktadır. Bu çalışma, Türkiye elektrik piyasasının özgün dengesizlik mekanizmalarını (EPIAŞ ceza katsayıları) içeren bir karışık-tam sayılı doğrusal programlama modelini, 55 MW kurulu güce sahip işletmedeki bir rüzgâr santralinin iki yıllık gerçek verileriyle entegre ederek literatürdeki metodolojik ve coğrafi boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca simülasyon ve matematiksel programlama yaklaşımlarının karşılaştırmalı analiziyle, Türkiye koşullarında BEDS'lerin tekno-ekonomik boyutlandırılmasına yönelik yerel literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

B. Veri Seti ve Maliyet Parametreleri

Bu çalışmada, Türkiye'nin Kırklareli ilinin Vize ilçesinde bulunan Airres-4 Rüzgâr Enerjisi Santrali'ne ait saatlik veriler kullanılmıştır. Santral 19 adet Siemens Gamesa (SG) türbiniyle toplam 55 MW kurulu güce sahiptir ve yıllık ortalama enerji üretimi yaklaşık 198 GWh düzeyindedir. Analizler için, 1 Ocak 2022 – 31 Aralık 2023 tarihleri arasındaki iki yıllık döneme ait saatlik veri seti, Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi (EPIAŞ) şeffaflık platformundan temin edilmiştir. Kullanılan veriler arasında, santralin fiili üretim miktarları, gün öncesi piyasasına (GÖP) sunulan teklif miktarları ve saatlik piyasa takas fiyatları (PTF) yer almaktadır.

Modellemede kullanılan maliyet parametreleri ise güncel literatür ve piyasa verilerine göre belirlenmiştir. Batarya enerji depolama sistemlerinin yatırım maliyeti (C_{kap}) 400.000 €/MWh olarak alınmış; batarya ömrü 10 yıl ve %10 iskonto oranı ile yıllık eşdeğer anüite maliyeti 64.755 €/MWh olarak hesaplanmıştır [19]. Toplam yıllık yatırım maliyeti, seçilen batarya kapasitesi ve bu birim maliyetin çarpılmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca, sabit işletme ve bakım maliyeti (C_{sabit}) ise şarj/deşarj gücüne bağlı olarak yıllık 10 €/MW-gün olarak esas alınmış ve toplam bedel sistem gücü ile çarpılarak bulunmuştur [19]. Değişken işletme ve bakım maliyeti ($C_{değişken}$) ise depolama sisteminden şarj edilen veyadeşarj edilen her bir MWh enerji için 0,5 €/MWh olarak belirlenmiştir [19].

Çalışmadaki önemli bir diğer maliyet kalemi ise ceza maliyeti ($C_{pen}(t)$) olarak tanımlanmaktadır. Bu maliyet, santralin belirli bir saat için gün öncesi piyasasına verdiği teklif ($P_{teklif}(t)$) ile şebekeye fiilen verdiği enerji miktarı ($P_{sebeke}(t)$) arasındaki farka ve o saatlik piyasa takas fiyatına ($F(t)$) bağlı olarak EPIAŞ yönetmelikleri çerçevesinde hesaplanmaktadır [20]. Pozitif dengesizlik (üretim fazlası) ve negatif dengesizlik (üretim açığı) için farklı ceza katsayıları ve uygulamaları bulunmakta olup, ilgili döneme ait mevzuata göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Böylece, analiz kapsamındaki tüm maliyet unsurları dikkate alınarak sistemin ekonomik performansı değerlendirilmiştir.

C. Yöntem

1. Simülasyon Modeli

Simülasyonun her bir saatlik adımı için belirli bir mantık izlenmiştir: İlk olarak, o saatteki fiili enerji üretim miktarı ile önceden taahhüt edilmiş olan enerji miktarı karşılaştırılmıştır. Eğer üretim, taahhüt edilen miktardan fazla ise, bu üretim fazlası enerjinin, bataryanın mevcut doluluk durumu ve maksimum kapasitesi göz önünde bulundurularak depolanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Tersine, eğer üretim taahhüt edilen miktarı karşılamaya yetmiyorsa ve bataryada depolanmış enerji mevcutsa, bu eksikliği gidermek amacıyla depodan enerji kullanımı yoluna gidilmiştir. Her bir saat sonunda, taahhüt edilen enerji miktarı ile şebekeye fiilen verilen enerji miktarı arasındaki fark hesaplanmış ve bu farka dayalı olarak oluşabilecek herhangi bir ceza maliyeti belirlenmiştir.

Her bir depolama kapasitesi ve güç kombinasyonu senaryosu için, simülasyon periyodu boyunca ortaya çıkan toplam ceza maliyetinin yanı sıra, ilgili senaryoya ait yatırım maliyeti ve işletme maliyeti de hesaplanmıştır. Tüm bu maliyet kalemleri toplanarak her bir senaryo için toplam sistem maliyeti elde edilmiş ve bu maliyetler karşılaştırılarak en düşük toplam maliyeti sağlayan senaryo tespit edilmiştir. Simülasyon yaklaşımı, farklı senaryoların hızlı bir şekilde değerlendirilmesine ve karşılaştırılmasına olanak tanımakla birlikte, elde edilen sonucun matematiksel olarak kesin optimal değer olduğunu garanti etmediği de not edilmelidir.

2. Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli

Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi üretimindeki dalgalanmaları dengelemek ve ceza maliyetlerini minimize etmek amacıyla bir enerji depolama sisteminin optimal kapasitesini belirlemek için doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Model; yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve ceza maliyetleri arasındaki dengeyi gözeterek, enerji depolama sisteminin hem kapasitesini hem de işletme stratejisini optimize etmektedir.

İndeksler

$t \in T$: Zaman periyotları (saatler), $T = 17.520$ saat (2 yıllık veri)

Parametreler

$P_{rüz}(t)$: t saatindeki rüzgâr enerjisi üretim miktarı (MWh)

$P_{teklif}(t)$: t saatinde taahhüt edilen enerji miktarı (MWh)

$F(t)$: t saatindeki piyasa takas fiyatı (€/MWh)

C_{kap} : Batarya enerji kapasitesi yatırım maliyeti

C_{sabit} : Sabit işletme ve bakım maliyeti

$C_{değişken}$: Değişken işletme ve bakım maliyeti

M : Çok büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

E_{mak} : Batarya maksimum enerji kapasitesi (MWh)

P_{bat} : Batarya maksimum güç kapasitesi (MW)

$E(t)$: t saatindeki batarya doluluk seviyesi (MWh)

$P_{bş}(t)$: t saatinde bataryadan şebekeye verilen enerji miktarı (MWh)

$P_{rş}(t)$: t saatinde rüzgârdan doğrudan şebekeye verilen enerji miktarı (MWh)

$P_{rb}(t)$: t saatinde rüzgardan bataryaya şarj edilen enerji miktarı (MWh)

$P_{\text{şebeke}}(t)$: t saatinde şebekeye verilen toplam enerji miktarı (MWh)

$C_{\text{pen}}(t)$: t saatindeki ceza maliyeti (€)

$Z_1(t), Z_2(t)$: Ceza hesaplaması için yardımcı değişkenler

$b_1(t), b_2(t)$: Bataryanın şarj ve deşarj modlarını kontrol eden ikili değişkenler (0 veya 1)

$$\min C_{\text{kap}} \cdot E_{\text{mak}} + C_{\text{sabit}} \cdot P_{\text{bat}} + C_{\text{değişken}} \cdot \sum_{t=1}^T (P_{rb}(t) + P_{bş}(t)) + \sum_{t=1}^T C_{\text{pen}}(t) \quad (1)$$

s.t

$$P_{\text{şebeke}}(t) = P_{rs}(t) + P_{bş}(t) \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_{rüz}(t) = P_{rs}(t) + P_{rb}(t) \quad \forall t \quad (3)$$

$$E(t+1) = E(t) + P_{rb}(t) - P_{bş}(t) \quad \forall t \quad (4)$$

$$0 \leq E(t) \leq E_{\text{mak}} \quad \forall t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{bş}(t) \leq P_{\text{bat}} \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq P_{rb}(t) \leq P_{\text{bat}} \quad \forall t \quad (7)$$

$$P_{bş}(t) \leq M b_1(t) \quad \forall t \quad (8)$$

$$P_{rb}(t) \leq M b_2(t) \quad \forall t \quad (9)$$

$$b_1(t) + b_2(t) \leq 1 \quad \forall t \quad (10)$$

$$Z_1(t) \geq P_{\text{teklif}}(t) - P_{\text{şebeke}}(t) \quad \forall t \quad (11)$$

$$Z_2(t) \geq -(P_{\text{teklif}}(t) - P_{\text{şebeke}}(t)) \quad \forall t \quad (12)$$

$$C_{\text{pen}}(t) = 0.03 \cdot F(t) \cdot Z_2(t) + 1.03 \cdot F(t) \cdot Z_1(t) \quad \forall t \quad (13)$$

Yukarıda formüle edilen doğrusal programlama modeli, rüzgâr santralının ve enerji depolama sisteminin birlikte optimum işletilmesini sağlayacak yatırım ve operasyonel stratejileri belirlemektedir. Amaç fonksiyonu, batarya yatırım maliyeti ile dengesizlik cezaları arasındaki dengeyi gözeterek toplam maliyeti minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu amaç fonksiyonu dört temel maliyet bileşenini içermektedir; batarya enerji kapasitesinin yatırım maliyeti, batarya güç kapasitesine bağlı sabit işletme ve bakım maliyeti, toplam şarj ve deşarj edilen enerji miktarına bağlı değişken işletme ve bakım maliyeti, dengesizlik nedeniyle oluşan toplam ceza maliyeti. Kısıt (2), her saat için şebekeye verilen toplam enerjinin doğrudan rüzgârdan şebekeye aktarılan enerji ile bataryadan şebekeye aktarılan enerjinin toplamına eşit olması gerektiğini ifade eder. Kısıt (3), her saat üretilen rüzgâr enerjisinin bir kısmının doğrudan şebekeye verildiğini, kalan kısmının ise bataryaya şarj edilebildiğini gösterir. Kısıt (4), bataryanın doluluk seviyesinin zaman içindeki değişimini modelleyerek, bataryanın ancak şarj edildiği kadar enerjiyi deşarj edebileceğini garanti eder. Kısıt (5), (6) ve (7) bataryanın fiziksel sınırlarını tanımlamaktadır. Kısıtlar (8), (9) ve (10), bataryanın aynı anda hem şarj hem de deşarj işlemini gerçekleştiremeyeceğini garanti eder. $b_1(t)$ veya $b_2(t)$ değişkenlerinden yalnızca biri herhangi bir t anında 1 değerini alabilir, bu da bataryanın ya şarj modunda ya da deşarj modunda çalıştığını gösterir. Kısıtlar (11), (12) ve (13) ise EPİAŞ'ın dengesizlik ceza mekanizmasını modelleyerek, sistemin dengesizlik maliyetlerini doğru şekilde hesaplamasını sağlar. Türkiye elektrik piyasasında, üretim taahhüdünü yerine getiremeyen (negatif dengesizlik) üreticiler PTF'nin 1,03 katı bir ücret öderken, fazla üretim yapan (pozitif dengesizlik) üreticiler PTF'nin 0,97 katı kadar bir gelir elde ederler ve pozitif dengesizlik durumunda elde edilemeyen %3'lük gelir, ceza maliyetine bir bileşen olarak eklenmiştir. Bu durum, modelde $Z_1(t)$ ve $Z_2(t)$ yardımcı değişkenleri ve kısıt (13) aracılığıyla temsil edilmektedir.

III. BULGULAR

A. Depolamasız Durum

Depolama sistemi kullanılmadığı durumda, rüzgâr santralinin enerji üretimi ile taahhüt edilen enerji miktarı arasındaki farklar nedeniyle ceza maliyetleri oluşmaktadır. Toplam 17.520 saatlik verinin analizi sonucunda, depolamasız durumda incelenen rüzgâr santrali için 2 yıllık toplam ceza maliyeti 4 591 560 € olarak hesaplanmıştır.

B. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon tabanlı yaklaşımda, enerji depolama sisteminin farklı kapasite ve güç değerleri altında nasıl bir performans göstereceği, Microsoft Excel ve VBA platformları kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemde, depolama sistemi kapasitesi için 2,5, 8, 10 ve 20 MWh, depolama gücü için ise 2, 5, 8 ve 10 MW olmak üzere çeşitli senaryo kombinasyonları ele alınmıştır. Her bir kombinasyon için toplamda 17.520 saatlik veri üzerinden simülasyon yürütülmüştür. Farklı depolama kapasiteleri (E_{mak}) ve güç (P_{bat}) değerleri için yapılan simülasyon sonucunda elde edilen maliyetler Tablo 1'de gösterilmekte olup en düşük toplam maliyet $E_{mak} = 5$ MWh ve $P_{bat} = 5$ MW senaryosunda 4.381.649 € olarak bulunmuştur.

Tablo 1. Simülasyon Sonuçları (2 yıl)

E_{mak} (MWh)	P_{bat} (MW)	Yatırım ve İşletme (€)	Ceza (€)	Toplam (€)
2	2	277.247	4.148.994	4.426.241
5	2	668.424	3.828.151	4.496.575
5	5	691.434	3.690.215	4.381.649
8	5	1.082.391	3.394.698	4.477.089
8	8	1.104.580	3.356.100	4.460.680
10	5	1.364.969	3.191.828	4.556.797
10	8	1.342.639	3.247.969	4.590.609
10	10	1.379.633	3.182.489	4.562.122
20	10	2.679.457	2.624.974	5.304.431

C. Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Sonuçları

Karma-tam sayılı doğrusal programlama modeli MATLAB ortamında çözüldüğünde, iki yıllık gerçek üretim ve piyasa verileri ışığında rüzgâr santrali için tek bir optimum noktaya ulaşılmıştır. Hesaplamalar, batarya enerji depolama sisteminin 4,48 MWh kapasiteye ve 4,48 MW güç sınırlamasına sahip olması durumunda toplam maliyetin en düşük seviyeye indiğini göstermiştir. Bu senaryoda batarya yatırım ve işletme giderleri toplamı 622.825 €'ya, dengesizlik cezaları ise 3.684.331 €'ya karşılık gelmiş; böylece iki yıllık toplam maliyet 4.307.156 € olarak gerçekleşmiştir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmanın bulguları, BEDS'lerin rüzgâr santrallerinde dengesizlik maliyetlerini azaltma potansiyelini niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Depolamasız senaryoda 4.591.560 € olan toplam

maliyetin, karma-tam sayılı doğrusal programlama ile belirlenen 4,48 MWh / 4,48 MW'lık BEDS kurulumu sayesinde 4.307.156 €'ya düştüğü görülmüştür. Yaklaşık %6,2 oranındaki bu tasarruf hem Baker ve ark. [2] hem de Pinson ve ark. [3] gibi çalışmalarda rapor edilen %5–10 aralığındaki maliyet iyileşmeleriyle tutarlıdır.

En iyi simülasyon senaryosu ($E_{mak} = 5$ MWh, $P_{bat} = 5$ MW) 4.381.649 € toplam maliyet üretirken, karma-tam sayılı doğrusal programlama modeli 74.000 €'ya varan ek tasarruf sağlamıştır. Bu fark, karma-tam sayılı doğrusal programlamanın sürekli karar değişkenleri üzerinde arama yapabilmesi ve böylece ayrık senaryo taramasının kaçırabileceği ara noktalara ulaşabilmesiyle açıklanabilir.

Elde edilen 4–5 MWh bandındaki optimal kapasite, mevcut lityum-iyon batarya yatırım maliyetlerinin (≈ 400.000 €/MWh) hâlâ yüksek, EPIAŞ dengesizlik ceza katsayılarının (0,97/1,03) ise nispeten sınırlı seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Pinson ve ark. [3] ve Li ve ark. [6] de benzer piyasa koşullarında “ekonomik optimumun, kurulu RES gücüne oranla beklenenden daha küçük bir depolama düzeyinde” gerçekleştiğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada batarya yaşlanması modele dâhil edilmemiştir. Literatüre göre lityum-iyon hücrelerde çevrim sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak yıllık %2–3 kapasite kaybı gerçekleşmektedir [19]. Degradasyon, uzun vadede efektif kapasiteyi azaltarak ceza tasarrufunu düşürebilir ve optimum kapasiteyi yukarı çekebilir. Ancak analizde yalnızca iki yıllık (17.520 saat) operasyon verisi kullanılmıştır; bu süre zarfında tipik çevrim sayısı sınırlı kalacağından degradasyon etkisi pratikte ihmal edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, bataryanın ekonomik ömrünün erken safhasına karşılık gelmekte; gelecekte yapılacak daha uzun veri setli çalışmalar, yaşlanmanın optimal kapasite üzerindeki kaydırıcı etkisini niceliksel olarak ortaya koymalıdır.

Son yıllarda lityum-iyon batarya birim maliyetlerinde devam eden düşüş (yılıda $\approx$ %10) [19] ve olası ceza katsayısı güncellemeleri, optimal kapasitenin büyümesine yol açabilir. Baker ve ark. [2] dinamik piyasa senaryoları altında depolama büyüklüğünün ceza oranına yüksek duyarlı olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, uygun fiyatlı batarya teknolojilerinin (ör. LFP, sodyum-iyon) ticarileşmesi veya dengesizlik cezasının artması durumunda, daha büyük BEDS yatırımları ekonomik olarak uygulanabilir hale gelebilir.

Sonuç olarak, iki yıllık veriye dayalı bu çalışma küçük ölçekli bir BEDS'in dengesizlik maliyetlerini kayda değer biçimde düşürebileceğini göstermiş, doğrusal programlamanın ayrık senaryolu yaklaşımlara göre üstün optimizasyon performansını doğrulamış ve Türkiye bağlamında uygulanabilir bir boyutlandırma metodolojisi sunmuştur.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji sistemlerinde üretim dalgalanmalarını dengelemek için enerji depolama sistemlerinin optimize edilmesi incelenmiştir. Kırklareli'nde bulunan Airres-4 Rüzgâr Enerji Santrali'nin verileri kullanılarak yapılan analizler sonucunda, optimal depolama kapasitesi 4,48 MWh ve optimal güç 4,48 MW olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın ana sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

1. Depolama sisteminin kullanılması, toplam maliyeti yaklaşık %6,2 oranında azaltmaktadır.
2. Karma-tam sayılı doğrusal programlama modeli, simülasyon yaklaşımına göre daha optimal bir çözüm sunmaktadır.
3. Depolama kapasitesinin artırılması, dengesizlik cezalarını azaltmakta ancak yatırım ve işletme maliyetlerini artırmaktadır.
4. Optimal kapasite, yatırım maliyeti ile dengesizlik cezaları arasındaki dengeye bağlıdır.
5. Batarya maliyetlerinin düşmesi veya dengesizlik ceza katsayısının artması, optimal kapasiteyi artıracaktır.

Bu çalışmanın kısıtlamaları arasında, batarya degradasyonunun dikkate alınmaması ve sadece dengesizlik maliyetlerinin azaltılmasına odaklanılması sayılabilir. Gelecek çalışmalarda, bu kısıtlamaların giderilmesi ve daha kapsamlı bir ekonomik analiz yapılması önerilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, bu kısıtlamaların giderilmesi amacıyla daha uzun vadeli veri setlerinin kullanılması, farklı yenilenebilir enerji kaynakları (güneş vb.) veya hibrit sistemlerin incelenmesi, farklı depolama teknolojilerinin (örneğin pompaj depolama, süperkapasitörler) karşılaştırılması ve Enerji arbitrajı ve yan hizmetler gibi ek gelir kaynaklarının da dikkate alındığı daha detaylı modellerin geliştirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, yenilenebilir enerji yatırımcıları, şebeke operatörleri ve politika yapıcılar için değerli bilgiler sağlamaktadır. Özellikle, depolama sistemlerinin boyutlandırılmasında ve ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde kullanılabilecek bir metodoloji sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Shin, H. & Hur, J., "Optimal energy storage sizing with battery augmentation for Renewable-Plus Storage power plants", IEEE Access, 8, 187730–187743, 2020.
- [2] Baker, K., Hug, G. & Li, X., "Energy Storage Sizing Taking Into Account Forecast Uncertainties and Receding Horizon Operation", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8(1), 331–340, 2017.
- [3] Pinson, P., Papaefthymiou, G., Klockl, B. & Verboomen, J., "Dynamic sizing of energy storage for hedging wind power forecast uncertainty", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2009.
- [4] Bahloul, M., Horan, D. & Khadem, S. K., "Energy storage sizing analysis and its viability for PV power plant clipping losses minimisation", Electric Power Systems Research, 225, 109837, 2023.
- [5] Michiorri, A., Kariniotakis, G. N. & Martini, A., "Forecasting for dynamic line rating: Application to wind energy integration", Applied Energy, 156, 485-492, 2015.
- [6] Li, C., Ge, X., Zheng, Y., Xu, C., Ren, Y., Song, C. & Wang, J., "Techno-economic feasibility analysis of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China", Energy, 55, 341-352, 2013.
- [7] Yao, L., Yang, H. & Tan, Y., "Economic analysis of a hybrid wind-photovoltaic-pumped storage system in China", Renewable Energy, 66, 270-276, 2014.
- [8] Wang, X., Wang, L. & Cheng, H., "Bilevel optimization for energy storage system planning considering wind power uncertainty", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8(1), 520-531, 2017.
- [9] Khorramdel, B., Haghifam, M. R., Siano, P., Gitizadeh, M. & Abapour, M., "Optimal scheduling of renewable micro-grids considering plug-in electric vehicle charging demand", Energy, 78, 904-915, 2014.
- [10] Ma, T., Yang, H. & Lu, L., "Pumped storage integrated hybrid energy system operation: The state-of-the-art", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 586-598, 2015.
- [11] Ma, T., Yang, H. & Lu, L., "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 527-537, 2015.
- [12] Ma, T., Yang, H. & Lu, L., "Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems", Applied Energy, 153, 252-261, 2015.
- [13] Lund, H. & Yuan, X., "Integration of renewable energy sources into the transport and electricity sectors through V2G", Energy Policy, 37(7), 2739-2747, 2009.
- [14] Zahedi, A., "Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 866-870, 2011.
- [15] Uzunoglu, M., Onar, O. C. & Alam, M. S., "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications", Renewable Energy, 34(3), 509-520, 2009.
- [16] Kapsali, M. & Kaldellis, J. K., "Renewable energy powered desalination plants: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 568-586, 2013.
- [17] Anagnostopoulos, J. S. & Papantonis, D. E., "Pumped storage power plants: Planning, design, and operation", Springer, 2003.
- [18] Papaefthymiou, G. & Papathanassiou, S., "Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous island grids", Renewable Energy, 34(11), 2559-2566, 2009.
- [19] Yang, Y., Ye, Y., Cheng, Z., Ruan, G., Lu, Q., Wang, X., & Zhong, H., "Life cycle economic viability analysis of battery storage in electricity market. Journal of Energy Storage, 70, 2023.
- [20] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2013). *Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği*. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12985&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>