



Raylı Sistemlerde Kullanılacak Depolama Aygıtı Ödünleşim Seçimi ve Yatırım Kararı

Mine SERTSÖZ[®]

*Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma MYO, Raylı Sistemler Elektrik Elektronik Bölümü,
Eskişehir, Türkiye*

msertsoz@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 23.10.2020, Kabul/Accepted: 09.12.2020, Yayımlama/Published: 31.01.2021)

Öz: Raylı sistemlerdeki enerji depolama sistemlerinde ilk akla gelen, rejeneratif frenleme enerjisini depolayarak daha sonra trenin hem kendi hem de hattaki diğer trenler için enerji sağlayabilmesidir. Dirençlerde yakılan, israf olan bu enerjiyi kurtarmak; hem çevresel hem de ekonomik olarak oldukça büyük bir faydaya sahiptir. Ayrıca voltaj düşüşlerinin ve yük dalgalanmalarının da önüne geçilebilmesi bu alanda yapılacak çalışmalara büyük önem atfetmektedir.

Dünyada raylı sistemlerde enerji depolama sadece teorik olarak kalmamış uygulaması da var olan bir çalışma alanıdır. Ancak bu tarz sistemlerin ödünleşim adı verilen iki veya daha fazla faydalı girdiden birinin diğerine tercih edilmesi, başka bir deyişle belli bir pozitif çıktıyı diğerine üstün tuttuğu sistemler olduğuna da dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada da bu alandaki en önemli projeler ve kullanılan depolama aygıtları özelliklerine göre ana hatlarıyla verilmiştir. Son olarak ise böyle bir sistemin kurulmasında seçilecek depolama aygıtının hem ekonomik hem çevresel etkilerini dikkate alan ve depolama yeri ve enerji kullanımı açısından yatırımın mantıklı olup olmayacağına karar veren bir akış şeması oluşturulmuştur. Bu akış şeması ile daha önce ele alınmamış raylı sistemlerde enerji depolama sistemine ödünleşim bir yaklaşım getirilmiştir. Böylelikle akış şemasında belirtildiği şekilde farklı depolama aygıtlarının hem emisyon hem yatırım maliyetleri hesaplanarak depolama aygıtı seçim yapılacak ve son olarak da seçilen bu aygıtın boyut olarak sisteme uygun olup olmadığına göre yatırım yapılıp yapılmamasına nihai bir karar verilecektir.

Anahtar kelimeler: Raylı Sistemler, Enerji Depolama, Demiryolu, Ulaşım

Tradeoff Selection of Storage Device in Rail Systems and Investment Decision

Abstract: The first thing that comes to mind in energy storage systems in rail systems is storing regenerative braking energy. Thereby, the train can provide energy for both itself and other trains on the line. It has great benefits both environmentally and economically to save this wasted energy that generally has to be changed to heat energy in the resistors. However, in addition to this benefit, the ability to prevent voltage drops and load fluctuations attaches great importance to studies that will be realized in this area.

Energy storage in rail systems in the world is not only a theoretical study but also there are many applications. However, it should be noted that such systems are the preference of one of two or more useful inputs called trade-offs, in other words, systems in which one positive output is superior to the other.

In this study, the most important projects and the storage devices used in these projects are outlined according to their characteristics. Finally, an algorithm has been created that takes into account both the economic and environmental effects of the storage device to be selected in regenerative energy then decides whether the investment will be reasonable or not in terms of storage location and energy use. With this flow chart, a tradeoff approach to energy storage system in rail systems, which has not been addressed before, is

Atif için/Cite as: M. Sertsoz, "Raylı sistemlerde kullanılacak depolama aygıtı ödünleşim seçimi ve yatırım kararı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 76-85, Jan. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.815238

declared. Thus, as indicated in the flow chart, the storage device will be selected by calculating both the emission and investment costs of different storage devices, and finally, a final decision will be made whether to invest or not, depending on whether this device is suitable for the system in terms of size.

Keywords: Rail Systems, Energy Storage, Railway, Transportation

1. Giriş

Enerji depolama aygıtlarına olan yoğun ilgi özellikle elektrik şebekesine uzak olan bölgeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanma gereksinimi ile son yıllarda önemi artarak devam eden bir konudur. Enerji ihtiyacını karşılayabilmek dışında bir de depolama aygıtı kullanmanın birçok faydası bulunmaktadır. Bunlar:

- Elektrik ücret tarifesinin yüksek olduğu saatlerde depolanan enerjiden faydalanarak daha ucuza enerji elde edebilmek
- Şebekenin çok yüklü olduğu zamanlarda enerji desteği yapabilmek
- Şebekeden alınan elektrik enerjisi kesildiği zaman sistemi elektriksiz bırakmamak
- İletim, dağıtım, trafo vb yerlerde meydana gelen kayıpların, depolamadan karşılanan enerji kullanılırken olmaması
- Enerji depolama sistemlerinin esnek olup kullanıcıya göre tasarlanabilmesi
- Güç kalitesinin kontrol edilebilmesi

Pek çok avantajı ile enerji depolama her ne kadar ekonomik çözüm sunması ve enerji marketinin bu konuya ilgisini çekse dahi dikkatsizce yapılacak olan uygulamaların emisyon değerlerini arttıracığı bilinmektedir. Depolamayla ilgili emisyonları etkileyen üç ana faktör şunlardır: cihazı şarj eden jeneratörün marjinal emisyonları, depolama deşarj olurken jeneratörün marjinal emisyonları ve depolamanın şarj/deşarj verimliliği [1] Hem maddi olarak faydası hem de -dikkatli tasarım yapılmazsa- çevreye zararı olacak bu sistemlerin ödünleşmesi ile ilgili bir problem söz konusudur. 2015 yılında, Hittinger ve Azevedo [2], toplu enerji depolamanın, geliri en üst düzeye çıkarmak için çalıştırılması halinde elektrik sistemi emisyonlarını sürekli olarak arttıracığını buldu. Başka bir çalışmada [3], 20 GW depolamanın bir sosyal yardım projesi olarak konut maliyeti gibi şebekeye entegre edilmesinin piyasada yıllık 2,5 milyar dolar elektrik ihtiyacını düşürdüğü görülmüştür. Ancak yazarlar depolama seçeneklerinin elektrik şebekesi için depolama alanı eklemenin yaşam döngüsü emisyonlarını analiz ettiklerinde sera gazı emisyonlarını kabul edilebilir derecede arttırdığını görmüştür. Benzer şekilde 2013 yılında Carson ve Novan [4], Teksas'ta, depolama teknolojisinin sosyal faydalarını modellerken yenilenebilir enerjinin az olması sebebiyle arbitrajı arttıracığı görülmüştür. Arbabzadeh vd. [5] yoğun bir şekilde araştırılan uygun depolama faktörleri hakkında tahminlerde bulunmanın CO₂ emisyonlarına neden olacağını bulmuştur. Yazarlar şarj-deşarj etkinliğinin, şarj teknolojisinin ve değiştirilen teknoloji ısı oran deneylerinin CO₂ emisyonları üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Yakın zamanda Fares ve Webber [6] tarafından yapılan bir çalışma, güneş enerjisini şebekeye geri göndermenin; enerjii evde bulunan depolama cihazlarında depolamaktan çevresel olarak daha faydalı olacağını bulmuştur. Evde depolamanın verimsiz olma sebebi jeneratörlerden kaynaklanan kayıplar ve şarj-deşarj zamanlarındaki kayıplardır. Enerji arbitrajının ve gerçek jeneratörlerin maliyetleri ve emisyonları nedeniyle birçok şebeke bölgesinde daha temiz yakıtların (doğal gaz) kirli yakıt (kömür) ile yer değiştirmesine neden olmuştur. Birleşik döngünün olduğu bölgelerde bile temel yük üretimini sağlayan doğal gaz, depolamanın verimsizliği sebebiyle kombine döngünün verimlilik avantajını yok etme eğilimindedir. Bu teori, yoğun olmayan üretimin yoğun olan üretimden yeterince temiz olmadığı duruma kadar geçerlidir.

Mevcut durumda, ABD enerjisi ile altyapısı, kârı maksimize etmek veya üretim maliyetlerini en aza indirmek için çalıştığı sürece depolamadan kaynaklanan CO₂ emisyonlarından kaçınmak zordur [2]. Sioshansi [7], alternatif araştırmasında, depolama uygulamasından kaynaklanan emisyonları sınırladığı ancak emisyonlu enerji depolama şeklinin gerçekleştirilmesi çok zor olduğu görmüştür. Rekabet etmenin etkilerini araştırmak için Teksas'ta bulunan elektrik şebekesindeki toplu enerji depolama şirketleri için bir model oluşturmuştur. Buna göre yenilenebilir enerji endüstrisinin kendi depolama alanına sahip olması durumunda depolamanın en az miktarda emisyon ürettiğini bulmuştur. Rüzgâr enerjisi üreticilerinin ortaklığı ve depolama tesisleri; yayılan hava kirleticileri miktarını sınırlamak için çok önemlidir. Başka bir rüzgâr enerjisi çalışmasında, Boer ve ark. [8] depolamanın yalnızca rüzgâr hızları ortadan yükseğe değişirse uygulamanın mantıklı olduğunu bulmuşlardır. Çünkü depolama sistemleri, yenilenebilir enerjinin şebekede olan payı düşükse, kar kaybına ve emisyonla neden olabilmektedir. Depolama sistemlerinden kaynaklanan ek emisyon miktarını sınırlamak için Lin ve ark. [9] şebeke simülatörüne kömür emisyonlarına sınırı koyan bir model geliştirmiştir. Önceki araştırmalar, kârı veya değeri maksimize etmenin en azından ABD'deki mevcut şebekeler için sistem emisyonlarını artırma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Ancak işletme stratejilerin değiştirilmesi ve depolama işleminin modelleri incelenmemiştir. Bu çalışmada [1] ise diğerlerinden farklı olarak ödünleşmeleri optimize etmek için depolama geliri ve sistem CO₂ emisyonlarındaki artışları olan bu iki faktöre göre değişen ağırlık atayan doğrusal bir programlama kullanılmıştır. Pareto-optimal ile saatlik marjinal emisyon faktörleri ve elektrik fiyatlarını girdi olarak kullanılmış olup; geliri maksimize etmek (emisyon etkilerini göz ardı ederek) ve CO₂ emisyonlarını minimize etmek (gelir göz ardı edilerek) suretiyle bir model oluşturmuştur.

Bu çalışma yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak sistem dinamiklerini de göz önünde bulundurarak raylı sistemlerde depolama aygıtı seçimi yapan bir akış şeması geliştirmiştir. Bu makalede planlama şu şekilde yapılmıştır: 1. Giriş bölümünde depolama aygıtlarıyla ödünleşim sistemi çalışması yapan literatürdeki çalışmalar verilmiş; sonrasında 2. Bölümde rejeneratif frenleme enerjisini kullanan dünyadaki raylı sistem uygulamalarına değinilmiş, 3. Metod bölümünde ise daha önce yapılmamış olan raylı sistemlerde depolama aygıtı seçiminde ödünleşim sistemi göz önünde bulunduran bir akış şeması tasarımı gerçekleştirilmiş, 4. Bulgular bölümünde iki farklı depolama aygıtı -Redoks Akış ve Kurşun Asit Bataryaları- kullanarak akış şeması çalıştırılmış ve sonuçlar paylaşılmış ve son olarak da 5. Sonuç bölümüyle bu yenilikçi çalışmanın faydalarından ve ilerde yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. Raylı Sistemlerde Kullanılan Rejeneratif Frenleme Enerjisi Depolama Aygıtları ve Uygulamaları

Başta metro sistemleri olmak üzere demiryollarında rejeneratif frenleme son yıllarda gelişmektedir [10, 11]. Metro sistemlerindeki bu önceliğin sebebi çok fazla istasyon olması ve çok fazla seferi olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple de yatırım maliyetini çok kısa sürede amorti edebilir. Buna örnek olarak da TCDD'den ve İstanbul Ulaşım AŞ'den alınan bilgiler kullanılarak yapılan hesaplamalara göre İstanbul-Ankara YHT hattında ortalama 38 km de bir istasyon varken; Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro hattında ortalama 1.25 km de bir istasyon bulunmasıdır.

Enerji depolamanın enerji verimliliği adına ve çevresel faydası gibi iki tane çok büyük avantajı bulunmaktadır. Enerji depolamalı yeni çekiş sistemi, bir modern hafif raylı araca [12] kıyasla %

30'a varan enerji tasarrufu ve hattan yaklaşık %50 oranında azalan maksimum güç talebi sağlar. Tren başına tasarruf edilen emisyonlar ise yılda 100t CO₂ aralığındadır [13, 14].

Raylı sistemlerde enerji depolama aygıtı olarak piller, volanlar, elektrik çift kat kapasitörler (EDLC) ve yeni yeni geliştirilen hibrid enerji depolama sistemleri (HESS) sayılabilir. Pillerin ve EDLCS'lerin kullanımları mevcut iken volan ve HESS'lere yönelik henüz bir uygulama gerçekleştirilememiştir.

HESS cihazları, depolamada daha esnek bir sistem sağlar; ultra kapasitörlerin kullanımı, rejeneratif frenleme ile ilişkili yüksek güç yoğunluğunu ve yüksek çalışma frekansını yakalamak için önemlidir ancak büyük boyutlu böyle bir sistemdeki bu enerjiyi depolayabilecek olan da ömrü her ne kadar daha kısa olsa da pillerdir. Ayrıca, ultra kapasitörlerin tüm sistem için kullanılması son derece pahalıdır. Bu sebeple hibrit bir çözüm bu problem için makul bir denge sağlayabilir [15].

Aşağıda bu konu ile ilgili dünyada yapılmış üç farklı projenin avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir. Projelerin karşılaştırılması da son olarak bir tablo ile paylaşılmıştır. Amaç birbirlerine göre güçlü ve zayıf yanlarının ifade etmektir.

2.1. MITRAC enerji kazandırıcı

Çevreye olan kötü etki ve enerji tüketim maliyetleri; toplu taşımanın temel endişelerinden ikisidir. MITRAC Enerji Kazandırıcı, frenleme ve hızlanma esnasında yüksek güçlü ve hızla şarj/deşarj olabilen yüksek performanslı EDLC'lerin seri bağlantılı bir şekilde kullanılması ile yapılmıştır. Ölçümlere göre çekiş enerjisinin %30'unun azalabileceği gösterilmiştir. Sonuçlar, MITRAC'ın hat akımı tepe noktasını ve voltaj düşüşünü de %50 azaltabileceğini bulmuştur. Metro sistemleri için, frenleme enerjisinin mevcut enerjinin yaklaşık %40'ı olacağı ve trenin hızlanması için gereken enerjinin mevcut elektrik enerjisinin %21'i olacağı tahmin edilmektedir [16]. Şekil 1.'de MITRAC treni verilmiştir.



Şekil 1. Mitrac treni [17]

2.2. SITRAS SES

SITRAS SES sistemi, Siemens Ulaşım Sistemleri tarafından üretilmiş olup, metro ve tramvay gibi toplu taşıma araçları için tasarlanmıştır. Bu sistem 1344 Maxwell EDLC ile kurulmuş olup yol kenarına monte edilmiştir [18]. SITRAS SES, enerjide yaklaşık %30 tasarruf sağlayabilir;

geçiş sistemleri ve tramvayların voltajını düzenleyebilir. Normalde, SITRAS SES'teki EDLC'lerin faydaları, Bombardier Ulaşım'ın MITRAC enerji tasarrufuna benzer. SITRAS SES'in MITRAC'tan farklı olarak sahip olduğu bir diğer avantaj; bu sistemin güç kaynağı sisteminin kısa süreli elektrik kesintilerini önlemesine yardımcı olabilmesi ve aynı zamanda aynı anda güce ihtiyaç duyan birçok tren veya tramvayın voltaj düşüşü üzerindeki etkisini azaltmasıdır. Simülasyon ve doğrulama testi, bu enerji depolama cihazının 1 yıl boyunca enerji talebini yaklaşık 500 MWh ve emisyon miktarını da 300 ton CO₂ olarak azaltabileceği sonucunu göstermiştir.

SITRAS SES, 3 km'ye kadar bir yarıçap içinde çalışan diğer trenleri destekleyebilmektedir. Temmuz 2003'ten beri Madrid, İspanya; Şubat 2001 ve 2003 arasında Almanya Köln'de bulunan Portland, Kölner Verkehrsbetriebe AG'de ve hatta ABD Oregon'da 2002'den beri SITRAS SES'in birçok uygulaması kullanılmıştır [18]. Sonuçlar, bir yılda istasyon başına 320 MWh enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir. 400 istasyon ve MWh başına yaklaşık 100 dolarlık enerji maliyeti için bu, SITRAS SES'in yılda 12,8 milyon dolara kadar enerji tasarrufu yapabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 2.'de SITRAS SES sistemini kullanan tren verilmiştir.



Şekil 2. Sitrass SES [19]

2.3. STEEM projesi

Maksimize edilmiş Enerji Verimliliği Tramvay Sistemi (STEEM); bir toplu taşıma operatörü olan (RATP), Alstom Taşımacılık (tramvay üreticisi), bir kamu araştırma laboratuvarı (INRETS)'nin iş birliği ile finansal desteğini Fransız Çevre ve Enerji Yönetimi Ajansı'nın (ADEME) yaptığı Kara Taşımacılığında Araştırma, Deney ve Yenilik üzerine Fransız Çerçeve Programı (PREDIT) kapsamında gerçekleştirilmiş bir projedir.

STEEM projesi için, yerleşik enerji depolama cihaz sistemi, seri ve paralel yerleştirmiş yaklaşık 48 modül EDLC'ye dayanmaktadır. Bu projenin amacı, tramvay sistemlerinin enerji verimliliğinin artırılması ve katener sistemine gerek duymadan çalıştırılmasına izin verilebilmesidir. Soğuk kış günlerinde, enerji tasarrufu sonuçları, tramvayların yardımcı cihazlara çekiş sisteminden daha fazla enerji sağlaması gerektiğinden enerji tüketiminde herhangi bir azalma olmadığını göstermiştir. Öte yandan, daha ılıman bir iklime sahip olan ilkbahar aylarında, ortalama günlük enerji tüketimini sırasıyla minimum %10 ve maksimum %18 olmak üzere

ortalama %13 azaltabildiği bulunmuştur [20]. Şekil 3.'de STEEM projesi sistemini kullanan tren verilmiştir.



Şekil 3. STEEM projesi [21]

Tablo 1. MITRAC, SITRAS SES ve STEEM projelerinin kıyaslanması

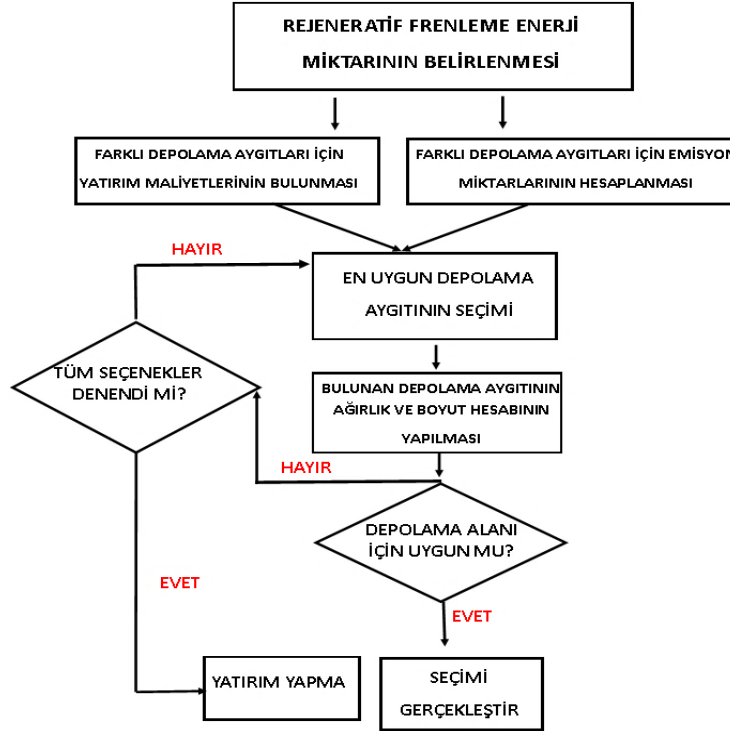
	MITRAC	SITRAS SES	STEEM
Depolama Yeri	Araç Üstü	İstasyon	Araç Üstü
Depolama Tipi	EDLCs	EDLCs	EDLCs
Teknik Bilgi	1kWh, 300kW	1,7 kWh-2,5kWh 1 MW, 1344 Maxwell	1,6 kWh, 54 V (her modül)
Ağırlık (Araç Üstü)& Boyut (İstasyon)	477 kg;	3x2,7 m	720 kg;
Avantaj	Aynı hattaki trenlerin seferler arası zamanını azaltmak, hatta daha uzun trenlerin kabulü	3 km yarıçapın içindeki tüm trenleri desteklemek	-
Dezavantaj	Ağırlığı %2 arttırmak, aracın üstünde yer gereksinimi	Kurulumu Maliyetli, mevcut sisteme entegrasyonu zor	Ağırlığı arttırmak, aracın üstünde yer gereksinimi, şarj işleminin deşarjdan uzun sürmesi
Enerji Tasarrufu	35%	30%	18%
Ülke	Kanada	Almanya	İsviçre

Tablo 1'de bu üç sistem karşılaştırılmış olup enerji tasarrufu miktarları verilmiştir. Burada dikkat çekici husus, bu üç sistemin çevresel ve ekonomik bedellerinin muallakta kalması olmuştur.

3. Metot

Raylı sistemlerde bir enerji depolama aygıtı seçimi ve bu yatırımın gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğine yönelik bir karar verirken aşağıda geliştirilmiş olan akış şemasını kullanmak mümkündür. Böylelikle, hem depolama aygıtının ekonomik ve çevresel etkileri göz

önüne alınarak depolama aygıtı seçimi yapılacak; hem de bu yatırımın yapılıp yapılmaması gerektiğine karar verilecektir. Şekil 4'te bu akış şeması gözükmektedir:



Şekil 4. Depolama aygıt seçimi ve yatırım kararı algoritması

Bu akış şemasının basamakları ayrıntılı olarak şu şekilde açıklanabilir:

- Rejeneratif Frenleme Enerji Miktarının Belirlenmesi: Burada iki yöntem bulunmaktadır. İlki, daha önceki verilere dayanarak oluşturulmuş matematiksel modelden veri elde etmek; ikincisi ise direk enerji analizöründen bu veriyi almaktır.
- Farklı Depolama Aygıtları için Yatırım Maliyetlerinin Bulunması: Bu analiz metotlarına birçok örnek eklenebilir.
- Farklı Depolama Aygıtları için Emisyon Miktarlarının Hesaplanması: Bu analiz metotlarına birçok örnek eklenebilir.
- En Uygun Depolama Aygıtının Seçimi: Burada bir optimizasyon metodunun kullanımına ihtiyaç vardır. Bu metot kullanılırken de cevaplanması gereken soru; bu iki parametre -yatırım maliyeti ve emisyon- aynı öneme mi sahiptir yoksa birinin diğerinden önceliği var mıdır? (Ödünleşim sistemi) Bu soruların yanıtı optimizasyon yöntemi kullanılırken belirlenmelidir. Belirlenen yöntem aracılığı ile en iyi seçenekler sıralanır.
- Bulunan Depolama Aygıtının Ağırlık ve Boyut Hesabının Yapılması: Ağırlık ve boyut hesaplamaları, depolama aygıtının özellikleri kullanılarak yapılır.
- Depolama alanı için uygun mu? : Hesaplanan alanın, planlanan depolama yerine -araç üstü mü yol kenarı mı- tercihlerini de göz önünde bulundurarak uygun olup olmadığına karar vermektir. Eğer araç üstü depolamaya karar verildiyse bu ağırlığın enerji tüketimini belli bir miktarda arttıracığı da göz önünde bulundurulması ve bu enerji tüketiminin belirlenen sınırı (MİTRAC treninde %2) geçip geçmeyeceğidir. Yanıt evet olursa seçilen depolama aygıtı ile yatırım yapılmasına karar verilecektir. Yanıt hayır ise akış diyagramı "Tüm seçenekler denendi mi?" sorusunu soracaktır. Yanıt hayır ise En Uygun Depolama Aygıtının Seçimi

Kısmına tekrar gelerek bu sefer ikinci en iyi tercihi yapacaktır. Aynı basamaklar tekrarlanacaktır.

- Tüm seçenekler değerlendirilip, Depolama alanı için uygun mu? Karar sekmesinden "Tüm seçenekler denendi mi?" karar sekmesine gelip yanıt evet olduğunda yatırım yapılmamasına karar verilecektir.

4. Bulgular

3. bölümde ayrıntıları verilen akış şeması işlem basamaklarına yöntem atamak suretiyle bir algoritmaya çevrilerek örnek bir çalışma yapılmıştır. Öncelikle basamağın ilk kısmı olana rejeneratif frenleme enerjisi belirleme de depolanacak rejeneratif frenleme enerjisi 1000 MWh olarak seçilmiştir. Sonrasında iki farklı enerji depolama aygıtı kullanılarak -Redoks Akış ve Kurşun Asit Bataryaları- hem maliyet hesabı hem de emisyon miktarı hesaplanmıştır. Algoritmada yer alan "farklı depolama aygıtları için yatırım maliyetlerinin bulunması" ve "farklı depolama aygıtları için emisyon miktarlarının hesaplanması" olarak adlandırılan bu kısmın hesabı için aşağıda verilen tablodan faydalanılmıştır:

Tablo 2. Redoks akış batarya ve kurşun asit bataryanın emisyon ve maliyet kıyaslaması

	Küresel Isınma Etkisi [22]	Toplam Proje Maliyeti [23]
Redoks Akış Batarya	53 CO ₂ eq/MWh	858000 \$/MWh
Kurşun Asit Batarya	149 CO ₂ eq/MWh	549000 \$/MWh

$$\text{Redoks Akış Batarya CO}_2 \text{ Miktarı} = 53 \times 1000 = 53 \text{ ton CO}_2 \quad (1)$$

$$\text{Kurşun Asit Batarya CO}_2 \text{ Miktarı} = 149 \times 1000 = 149 \text{ ton CO}_2 \quad (2)$$

$$\text{Redoks Akış Batarya Maliyeti} = 858000 \times 1000 = 858 \text{ milyon \$} \quad (3)$$

$$\text{Kurşun Asit Batarya Maliyeti} = 549000 \times 1000 = 549 \text{ milyon \$} \quad (4)$$

Sonuç olarak 1000 MWh depolama için redoks akış bataryası 53 ton CO₂ üretirken, kurşun asit 149 ton CO₂ üretmektedir. Bunun yanında redoks akış bataryası ile yapılan bir sistemin toplam maliyeti 858 milyon \$ iken kurşun asit bataryası ile kurulan sistemin toplam maliyeti 549 milyon \$ olacaktır.

Burada seçimi yapacak optimizasyon metodunda seçim için çevresel etkinin maliyetten üç kat daha önemli olduğu kıstasını getirmedikçe (çünkü Tablo 2'ye göre kurşun asit bataryasının küresel ısınma etkisi redoks akış bataryasından yaklaşık üç katıdır) kurulum kurşun asit ile yapılacaktır. Daha sonraki basamakta yer alan depolama alanı için uygun mu sekmesinde eğer depolama araç üstünde yapılacak ise hafif olmasından dolayı kurşun asit batarya ile yatırım yapmak -kullanıcının seçimine bağlı olmakla birlikte- daha muhtemel olacaktır.

5. Sonuç

Bu çalışmada öncelikli olarak enerji depolama aygıtı seçerken hem çevresel hem de ekonomik girdileri konu alan ödünleşim yapılar üzerinde durularak depolama aygıtlarının avantaj ve dezavantajlarına daha önce yapılan çalışmalar üzerinden örnekler verilmiştir. Sonrasında dünyada kullanılan raylı sistem enerji depolama aygıtlarından bahsedilerek bu yapıların enerji verimliliği olarak katkısı görülürken hem ekonomik hem de çevresel boyuttaki çalışmalarının çok net olmadığı gösterilmiştir.

Bu sebeple bu çalışmalara yenilikçi bir yaklaşım ile hem çevresel hem de ekonomik boyutta bir karar algoritması geliştirilerek sadece enerji boyutunda değil aynı zamanda ekonomik ve çevreci bir depolama aygıtının raylı sistemlerde nasıl seçileceği gösterilmiştir. Burada, hangi parametreye ne derecede önem vereceği tamamen kullanıcıya bırakılmıştır. Bu akış şeması aracılığı ile raylı sistemlerde enerji depolama aygıt seçimine ödünleşim bir yaklaşım getirilmiştir.

Yenilikçi akış şeması vasıtasıyla yapılan örnek çalışmada ekonomi ve çevreye aynı derecede önem atayacak olunursa kurulumun redoks akış bataryası yerine kurşun asit ile yapılacağı ve bir de ağırlık olarak kurşun asit bataryanın hafif olmasının seçimde daha avantaj sağlayacağı gösterilmiştir. Ancak, optimizasyon probleminde çevresel etkinin maliyetten üç kat daha önemli olduğu kıstası getirilirse; depolama alanı olarak da bir problem olmazsa yatırımın redoks akış bataryası ile yapılmasına karar verilecektir.

İleride yapılabilecek çalışmalarda bu yenilikçi akış şeması farklı optimizasyon metotları ve farklı depolama aygıt seçimleri kullanılarak çalıştırılacak ve her farklı uygulamada kullanıcıya çevresel, ekonomik ve verimli bir sistem kurmasına yardımcı olacaktır.

Kaynakça

- [1] L.M. Arciniegas, E. Hittinger, "Tradeoffs between revenue and emissions in energy storage operation," *Energy*, vol. 143, pp. 1-11, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.10.123
- [2] E.S. Hittinger, I.M. Azevedo, "Bulk energy storage increases United States electricity system emissions," *Environ Sci Technol*, vol. 49 no. 5, pp. 3203-3210, 2015, doi: 10.1021/es505027p
- [3] R. Lueken, J. Apt, "The effects of bulk electricity storage on the PJM market," *Energy Syst*, vol. 5, no. 4, pp. 677-704, 2014, doi: 10.1007/s12667-014-0123-7
- [4] R.T. Carson, K. Novan, "The private and social economics of bulk electricity storage," *J Environ Econ Manag*, vol. 66 no. 3 pp. 404-423, 2013, doi: 10.1016/j.jeem.2013.06.002
- [5] M. Arbabzadeh, J.X. Johnson, G.A. Keoleian, "Parameters driving environmental performance of energy storage systems across grid applications," *J Energy Storage*, vol. 12, pp. 11-28, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.03.011
- [6] R.L. Fares, M.E. Webber, "The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility," *Nat Energy*, vol. 2, no. 17001, pp. 1-11, 2017, doi: 10.1038/nenergy.2017.1
- [7] R. Sioshansi, "Emissions impacts of wind and energy storage in a market environment," *Environ Sci Technol*, vol. 45, no. 24, pp. 10728-35, 2011, doi: 10.1021/es2007353
- [8] H.S. de Boer, L. Grond, H. Moll, R. Benders, "The application of power-to-gas, pumped hydro storage and compressed air energy storage in an electricity system at different wind power penetration levels," *Energy*, vol. 72, pp. 360-70, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.047
- [9] Y. Lin, J.X. Johnson, J.L. Mathieu, "Emissions impacts of using energy storage for power system reserves," *Appl Energy*, vol. 168, pp. 444-56, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.061
- [10] M. D. Falvo R. Lamedica, R. Bartoni, G. Maranzano, "Energy saving in metro-transit systems: impact of braking energy management," *Proc. Int. Symp. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, Pisa, 2010, pp. 1374-1380, doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542105
- [11] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Diez, H. Biechl, "Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems," *Proc. IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symp. (CITSS)*, Bogota, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/CITSS.2012.6336687
- [12] M. Steiner, J. Scholten, "Energy storage on board of railway vehicles," *EPE*, Dresden, 2005, pp. 10 pp.-P.10, doi: 10.1109/EPE.2005.219410
- [13] P. Barrade, S. Pittet, A. Rufer, "Energy storage system using a series connection of supercapacitors with an active device for equalising the voltages," *IPEC*, Tokyo, 2000.
- [14] B. Engel, "The Innovative traction system with the flywheel of the LIREX," *WCRR*, Köln, 2001.

- [15] S. Torre, A.J. Sánchez-Racero, J.A. Aguado, M. Reyes, “Optimal sizing of energy storage for regenerative braking in electric railway systems,” *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 30, No. 3, pp. 1492–1500, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2340911
- [16] Bombardier Transportation, “Eco Active Technology,” 2020. [Online]. Available: https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-ECO4-MITRAC_Hybrid-EN.pdf [Accessed: 01.03.2020]
- [17] Railway Technology, “Bombardier’s MITRAC: creating a legacy system for energy conservation,” 2020. [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/features/bombardier-mitrac-traction-batteries/> [Accessed: 03.04.2020]
- [18] B. Maher, “Ultracapacitors provide cost and energy savings for public transportation applications,” *Battery Power Prod. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 6, pp. 1–2, 2006, doi: 10.1109/ICCEP.2007.384188
- [19] Railway Technology, “Siemens to install Sitras SES Energy Storage Unit on TriMet light rail line,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/news/newssiemens-install-sitras-ses-energy-storage-unit-trimet-light-rail-line> [Accessed: 03.04.2020]
- [20] J.P. Moskowicz, J.L. Cohuau, “STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation,” *Proc. Conf. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC)*, France, 2010, pp. 1–5, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729152
- [21] Railway Gazette International, “Supercapacitors to be tested on Paris STEEM tram,” 2009. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/supercapacitors-to-be-tested-on-paris-steem%20tram/34187.article> [Accessed: 03.04.2020]
- [22] C. Mostert, B. Ostrander, S. Bringezu, and T. Kneiske, “Comparing electrical energy storage technologies regarding their material and carbon footprint,” *Energies*, vol. 11, no. 12, pp. 3386, 2018, doi: 10.3390/en11123386
- [23] Hydro Wires, “Energy Storage Technology and Cost Characterization Report,” 2019. [Online]. Available: <https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-28866.pdf> [Accessed: 11.09.2020]

Özgeçmiş



Mine SERTSÖZ

1984 tarihinde Bilecik'in Pazaryeri ilçesinde doğdu. Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinden mezun oldu. Yüksek Lisansını Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde, Doktora eğitimini ise Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde tamamladı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Raylı Sistemler Elektriği Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmakta ve yine aynı alanda akademik çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve iki çocuk annesidir.

E-Posta: msertsoz@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.