



Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Uygulamaları için Uygun Teknoloji Seçimi Metodolojisi Önerilmesi

Suggesting Appropriate Technology Selection Methodology for Grid Level Energy Storage Applications

Rıfat Anıl Aydın¹, Şafak Baykal², Alper Terciyanlı³, Ertuğrul Çam⁴

¹Inavitas Enerji A.Ş.,

²Endoks Enerji Ltd

İnönü Mah. 1748. Sok. No: 1

Batıkent 06370 Yenimahalle/Ankara/TÜRKİYE

Başyuru/Received: 24/11/2020

Kabul / Accepted: 21/12/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2020

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2020

Öz

Klasik şebeke yapısında enerji üretimi ve tüketimi eş zamanlı olduğu için üretim, tüketim dengesinin anlık olarak gözetilmesi gereklidir. Özellikle yenilenebilir enerji tesislerinin kesintili üretim profiline sahip olması ve belirli durumlarda üretim yapamaması gibi durumlar yüzünden yenilenebilir enerji kaynaklı üretimin günün genelinde kullanılması için enerji depolama sistemleri için çalışmaları hızlandırmıştır. Enerji depolama sistemleri şebeke genelinde öncelikle araştırma seviyesinde şebekede çeşitli ihtiyaçları gidermek için kullanılması planlanmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile enerji depolama sistemlerinin şebeke seviyesinde uygulamaları açıklanmaya çalışılmış ve bu uygulamalara uygun enerji depolama teknolojisi seçimi için bir metodoloji ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Enerji Depolama Sistemleri, Şebeke Seviyesinde Depolama Uygulamaları, Depolama Teknolojileri, Teknoloji Seçimi ”

Abstract

Since energy production and consumption are simultaneous in the classical network structure, the balance of generation and consumption must be taken into consideration instantly. In particular, the fact that renewable energy facilities have an intermittent generation profile and cannot be produced in certain situations has accelerated the studies for energy storage systems to use renewable energy-based generation throughout the day. Energy storage systems are planned to be used throughout the network primarily at the research level to meet various needs in the network. With this study, the applications of energy storage systems at the network level were tried to be explained and a methodology was tried to be presented for the selection of energy storage technology suitable for these applications.

Keywords

“Energy Stotage Systems (ESS), Energy Storage Applications at Grid Level, Storage Technologies, Technology Selection ”

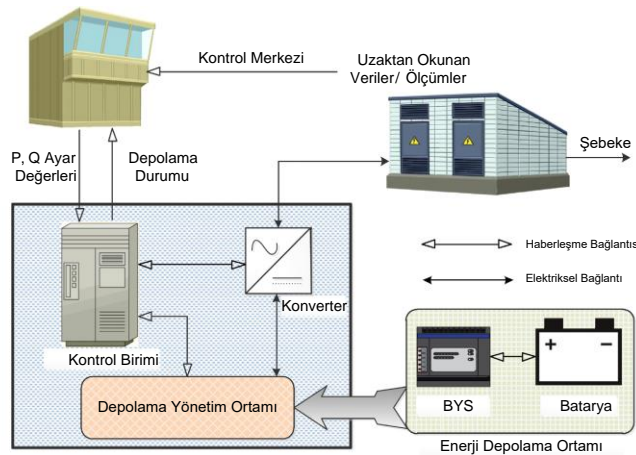
1. Giriş

Toplumların kalkınma düzeyleri ve toplumsal refahın sağlanmasında en önemli kriter nedir diye sorulduğunda kuşkusuz “Kesintisiz Enerji” kelimesi ön plana çıkmaktadır. Günümüzde endüstriyel büyüme ve teknolojik gelişmelere göre ele alacağımız enerji sektörü incelendiğinde, yapılan yatırımların hep artan enerji talebini karşılamaya yönelik olduğu görülmektedir. Artan nüfus ile birlikte enerji yönetimi açısından daha fazla elektrik enerjisine gereksinim olduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu enerji gereksinimini yalnızca fosil yakıtlardan karşılamaya kalkmak hem kısıtlı kaynakların yeryüzünde tükenmesine hem de iklim değişikliğinin artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla ülkeler, sosyal ve ekonomik gelişimlerine eşgüdümlü olarak yeni enerji politikaları geliştirip uygulamaya koymaktadırlar.

Günümüzde elektrik şebekeleri; sera gazı azaltma hedefleri, talep (demand) yönetimi, sıklık, güç kalitesi gereksinimleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının oranındaki artış, şebeke genişlemeleri ve güvenilirlik endişeleri gibi birbiriyle ilişkili faktörlerin neden olduğu kritik bir değişim dönemine girmiş bulunmaktadır. ABD Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI), dağıtım sisteminde meydana gelen aksaklıklar sebebiyle yaşanan elektrik kesintilerinin maliyetinin 100 milyar ABD doları seviyesinde olduğunu tahmin etmiştir (Amin SM, 2006). Enerji depolama sistemleri (ESS), dağıtım şebekeleri içerisinde teknik, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamak adına her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu avantajların başında güç kalitesi parametrelerinde iyileşmeler, gerilim profilinin iyileştirilmesi, frekans regülasyonu, yük kaydırma, yük seviyelendirme, talep yükün azaltılması, dağıtık üretim birimlerinin entegrasyonu konusunda esneklik sağlanması, yatırım ertelemeleri ve enerji sürekliliğinin sağlanması gelmektedir. Enerji depolama sistemlerinin, dağıtım ve iletim şebekesinde yaşanan güç salınımları ve yük değişimleri gibi problemlerin yarattığı olumsuzlukların hafifletilmesinde etkili olması beklenmektedir. Yapılan çalışmada öncelikle enerji depolama sistemlerinin elektrik şebekesinde sağlayabilecekleri faydalar gözetilerek gerçekleştirilen uygulamalar ortaya konulmuş, sonrasında bu uygulamalar için en uygun teknoloji seçimi için bir metodoloji önerilmeye çalışılmıştır.

2. Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Sistemleri

Elektrik şebekeleri için enerji depolama sistemlerinin temel amacı, elektrik enerjisini depolanacak forma dönüştürüp saklayarak, ihtiyaç duyulduğunda tekrar şebekeye elektrik enerjisi olarak aktarabilmektir. Enerji depolama sistemleri çoğunlukla güvenli ve güvenilir bir işletme sürecini desteklemek adına kontrol sistemleri ile birlikte tesis edilmektedir. Amaç yalnızca lokal bir kontrol sağlamak değil, şebeke genelindeki ekipmanların koordineli şekilde kontrolüne imkan sağlamaktır. Şebekede bağlı bulunan bir enerji depolama sisteminin güç elektroniği ekipmanları, gerilim ve akım dalga formunu gereken şekilde ayarlayabilir. Böylece kontrolcü ve konverter depolama sisteminin yönetimini ele alarak şebekenin ihtiyacı doğrultusunda aktif ve reaktif güç için çalışma noktaları (P-Q set points) belirleyerek karar verme süreçlerine katılabilmektedirler. Depolama sistemi için belirlenen bu çalışma noktaları, sistemin tasarımına göre uzaktan veya lokal olarak kontrol edilebilmektedir. Aşağıdaki şekil üzerinde Depolama Yönetim Ortamı olarak gösterilen kısım, enerji dönüşümü birimlerinin de yer aldığı herhangi bir depolama teknolojisinin kullanıldığı sisteme karşılık gelmektedir. Bu bölge içerisinde *Enerji Depolama Ortamı* olarak gösterilen kısım depolama birimleri ve batarya yönetim sisteminden oluşan ve bataryaların şarj/deşarj süreçlerini kontrol eden kısımlardır. Kontrol ve yönetim sistemleri tek bir birim için de tesis edilse de özellikle geniş çaplı uygulamalarda birimler arasında hiyerarşinin oluşturulması ve ana kontrol birimi ile yardımcı birimlerin belirlenmesi şarj/deşarj koordinasyonu ve verimlilik için kritiktir.



Şekil 1 - Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Sistemlerinin Konsept Tasarımı

Enerji depolama sistemleri maliyet yönünden fayda sağlamak veya talep yükü kontrol edebilmek amacıyla kendinideşarj edebilen enerji depolayan sistemlerdir (Denholm P, 2010). Enerji depolama sistemlerinin etkinliğinin karşılaştırması bazı başlıklar altında gerçekleştirilmektedir (Koochi-Kamali S, 2013). Bunlar;

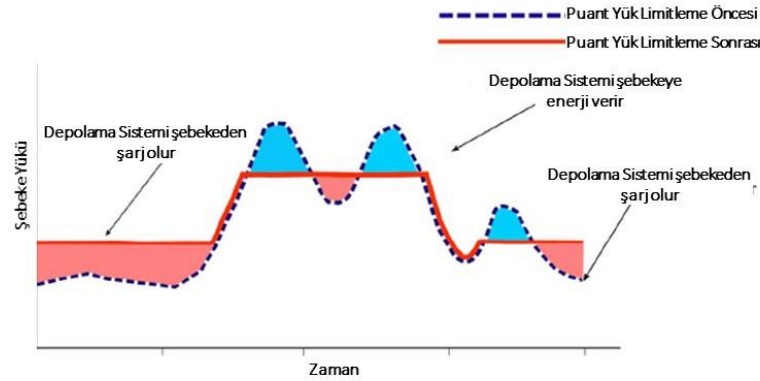
- **Ayrılabilirlik:** Kullanılan enerji depolama sistemi, günlük, haftalık veya sezonsal olarak değişen yük profiline ve talep yüküne karşılık uygun şekilde cevap verebilmelidir.
- **Kesintili Çalışma:** Rüzgâr ve solar enerji kaynakları gibi yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin kesintili üretim profiline ve diğer üretim birimlerinin çıkış gücünde yaşanabilecek dalgalanmalara karşılık uygun tepkileri hızlı şekilde verebilmelidir.
- **Verimlilik:** Enerji depolama sisteminin şarj/deşarj sürecinde meydana gelen kayıplar minimum düzeyde olmalıdır.

3. Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Sistemleri Uygulamaları

Enerji depolama sistemlerinin tarihçesi 20. yüzyılın başlarında DC yüklere enerji sağlayabilmek adına kurşun asit bataryaların kullanılması ile başlamıştır. O günden bu yana enerji depolama teknolojileri gelişerek şebeke içerisinde talep kontrolü, güç kalitesi parametrelerinin iyileştirilmesi, güvenilirliğin artırılması ve şebekenin daha stabil hale getirilebilmesi için kullanılmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üreten dağıtık üretim birimlerinin şebeke içerisinde yaygınlaşması ve bu üretim birimlerinin kesintili yapısı dağıtım şebekelerinin işletim yapısını oldukça değiştirmiştir. Yeni yapıda karşılaşılan işletim problemlerinin çoğunun üstesinden gelinebilmesinde enerji depolama sistemlerinin kullanımı hayati rol oynamakta ve şebekeyi daha stabil bir hale getirerek güvenilirliğini arttırmaktadır. Enerji depolama sistemleri konuyla ilgili yönetmeliklerin mevcut olmadığı sistemlerde arbitraj sağlamak ve dağıtık üretim birimleri tarafından üretilen enerjinin fiyatını arttırmak için de kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin uygulamalarına sistematik açıdan bakmak gerekirse bunları 6 ana başlık altında toplayabiliriz:

3.1 Puant Yük Limitleme ve Yatırım Öteleme

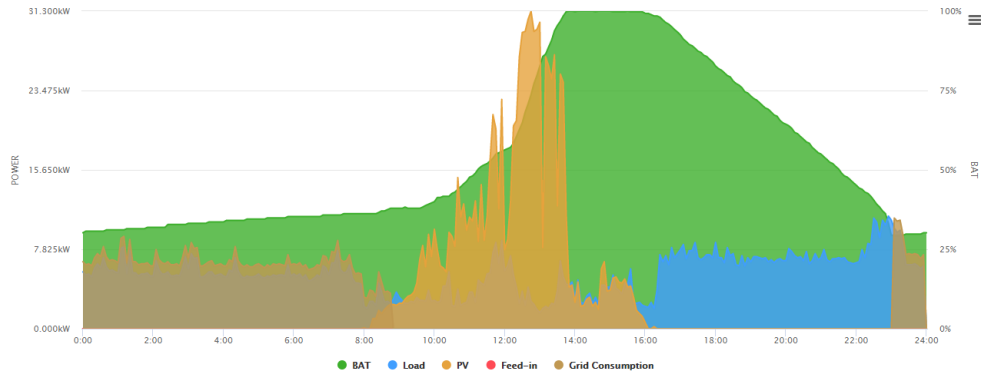
Puant yük limitleme kullanımı referans noktasındaki toplam yükün sabit tutulması ya da belirli bir limitin üzerine çıkılmasını engellemek için kullanılan operasyondur. Referans noktadaki yüklenme belirli bir değerin üzerine çıktığında batarya içindeşarj işlemi ve belirli bir değerin altında kaldığında ise şarj işlemi gerçekleştirilir. Puant yük limitleme operasyonu aşağıdaki şekilde gösterilebilir (M. Uddin, 2018).



Şekil 2 - Puant Yük Limitleme Operasyonu

3.2 Mikroşebeke Yönetimi

Mikroşebeke yönetimi iki farklı şekilde ele alınmaktadır. Bunlardan ilki enerji depolama sistemi aracılığıyla kendi kendine sürekli yetebilen ve ana şebekeden bağımsız bir şebeke kurulmasıdır. Bu durum sanal güç santrali (Virtual Power Plant – VPP) ya da şebekeden bağımsız (Off-Grid) sistemler olarak adlandırılmaktadır. Burada enerji depolama sistemi bu sistemin enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji santrali (veya bazı durumlarda jeneratör) kaynaklı enerjinin 24 saat boyunca kullanılabilmesini sağlamakla yükümlüdür. Burada gerçekleştirilen üretim öncelikle yükü karşılamakta, yükten fazla olan üretim ise üretimin az olduğu zamanlarda kullanılmak üzere depolanmaktadır. Kendi kendine yeten bir PV, jeneratör ve enerji depolama sisteminin güç-zaman grafiği enerji depolama sisteminin şarj yüzdesiyle birlikte aşağıda gösterilmiştir.



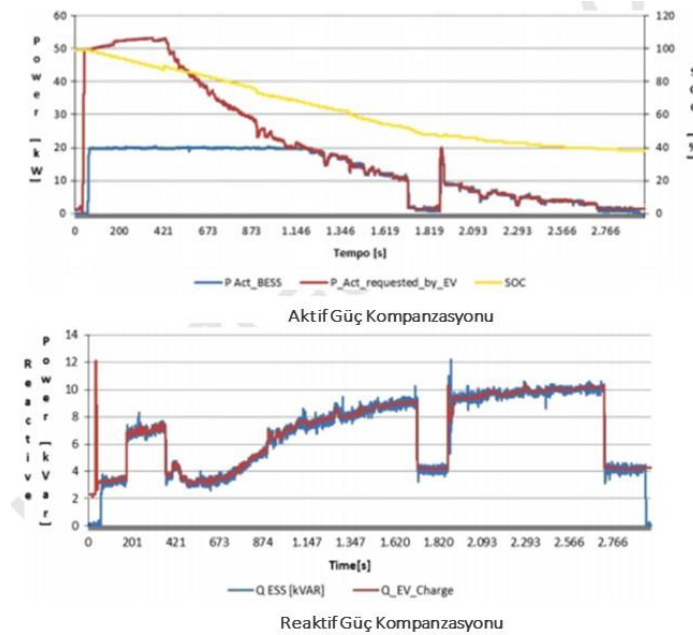
Şekil 3 -Şebekeden Bağımsız Sistemde Örnek Güç - Zaman Grafiği

Yukarıdaki şekilde ortadaki yüksek miktardaki değerler PV üretimini, sol taraftaki kısım jeneratör tarafından yüklerin beslenmesini, sağ taraftaki profil batarya tarafından yüklerin beslenmesini, arka plandaki değerler ise bataryanın şarj yüzdesini göstermektedir. Batarya tamamen dolu iken şebekeye enerji verilemeyeceği için PV üretimine izin verilmemekte, sistemin PV den beslenememesi durumunda jeneratörden beslenmesi sağlanmaktadır.

Mikroşebeke yönetiminde ele alınan ikinci durum ise enerji depolama sisteminin ana şebekede arıza olduğu durumda kendisine bağlı olduğu yüklerin tamamını sadece belirli bir süre beslemesi şeklindedir (Z. Cheng, 2018). Bu durum planlaması daha kolaydır. Çünkü sadece kısıtlı bir süre enerji sağlamak üzerine boyutlandırma yapılması gereklidir. Genel olarak operasyon bağlantı noktasındaki enerji kalitesinin sürekli ölçülmesi ve enerji kalitesinin düştüğü durumda şebekeden bir ayırıcı aracılığıyla tüm sistemin kopması ve şebekedeki enerji kalitesinin tekrar sağlandığı görülene kadar sistemin şebekeden bağımsız olarak çalışması esasına dayanmaktadır.

3.3 Güç Kalitesi Desteği

Güç kalitesi desteği enerji depolama sisteminin aktif ve reaktif gücünün bağlı olduğu noktadaki enerji kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılmasına verilen isimdir (D. A. Sbordone, 2016). Bu işlem için alternatif yöntemler bulunduğu için (gerilim regülatörleri, kompanzasyon tesisleri vb.) enerji depolama tesisleri tek başına bu kullanım amacı için kurulmamaktadır. Bu kullanım diğer kullanımların genellikle tamamlayıcısı olarak kullanılmaktadır. Aktif ve reaktif güç kompanzasyonu için çeşitli uygulamalar yapılmıştır, uygulamadaki depolama sisteminin davranışı için aşağıdaki görsel verilebilir (D. A. Sbordone, 2016).



Şekil 4 - Aktif ve Reaktif Güç Kalitesi Desteği

Buradaki mavi hat batarya inverterinin sağladığı sırasıyla aktif ve reaktif gücü göstermektedir. Kırmızı hat ise ihtiyaç duyulan güç miktarını göstermektedir. Yukarıdaki grafikten görüleceği gibi batarya sisteminin aktif gücü batarya inverteri ile sınırlıdır. Bu gibi kısıtlılıklar göz önünde bulundurularak uygulama özelinde depolama sisteminin davranışı belirlenmelidir.

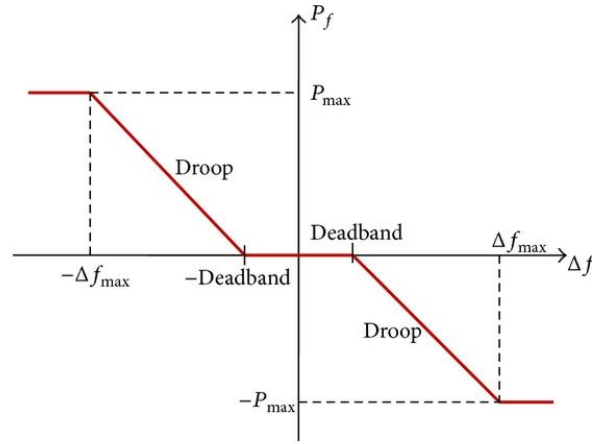
3.4 Sıkışıklık Yönetimi

Bu uygulama, Puant Yük Limitleme ve Yatırım Öteleme uygulamasıyla benzer nitelikler taşır. Buradaki amaç şebeke kısıtlılıklarının aktif olarak yönetilebilmesi için bataryanın şarj deşarj edilmesi şeklindedir (K. Spiliotis, 2016). Ölçek olarak burada takip edilen kısıtlılıklar dağıtım trafosu seviyesinden iletim trafosu seviyesine kadar çıkabilmekte, genellikle otonom algoritmalar yerine bir operatör tarafından kısıtlılığı önleyecek şekilde batarya sistemine komut verilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Otonom algoritma ile bunun yönetilmesi istendiğinde şebeke kısıtlılıklarında referans alınacak nokta sabit kalacağından karşımıza puant yük limitleme ve yatırım öteleme uygulaması çıkmaktadır. Ancak şebekede sadece bir noktada değil farklı noktalarda da kısıtlılıklar oluşabilir ve bu yüzden enerji depolama sisteminin kullanımı gerekebilir.

3.5 Yan Hizmetler

Enerji depolama sisteminin yan hizmetler için kullanılması yine yan hizmetleri en fazla kullanan yapı olan sistem operatörü tarafından gerçekleştirilmelidir. Ülkemizde TEİAŞ bu görevi üstlenmekte olup, bu uygulamalar aracılığıyla sağlanabilecek hizmetler yan hizmetler başlığı altında birleştirilmiştir. Bunlar sıcak rezerv sağlanması, frekans kontrol rezervi sağlanması, reaktif kontrol sağlanması şeklinde özetlenebilir (L. Maeyaert, 2020).

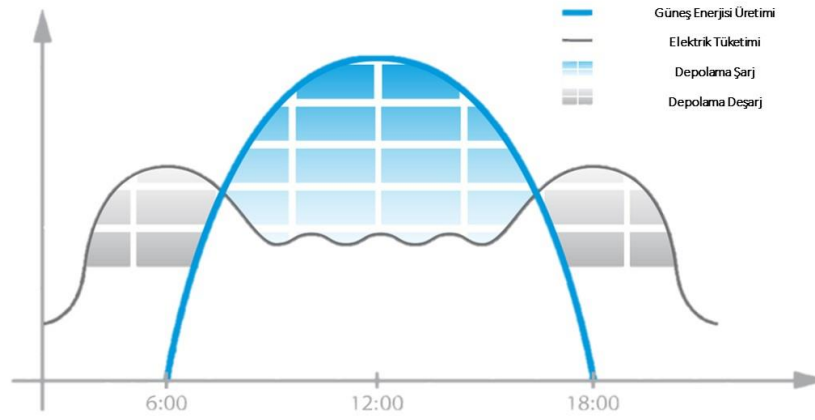
Sıcak rezerv şebekede ani yük üretim dengesizliği oluşması durumunda (arıza vb.) bataryaya komut verilerek anlık yük ya da üretim sağlanması senaryosuna verilen isimdir. Frekans kontrol rezervi şebeke frekansının sabit tutulabilmesi için enerji depolama sisteminin otonom şekilde şarj deşarj olmasıdır. Reaktif kontrol ise güç kalitesi desteğinin daha büyük ölçekte gerçekleştirilmesidir. Burada sıcak rezerv ve frekans kontrolü için bataryanın uygulaması gereken davranış aşağıdaki görselle özetlenmiştir (M. Delfanti, 2014).



Şekil 5 - Frekans Kontrolü için Depolama Sistemi Davranışı

3.5 Yenilenebilir Entegrasyonu

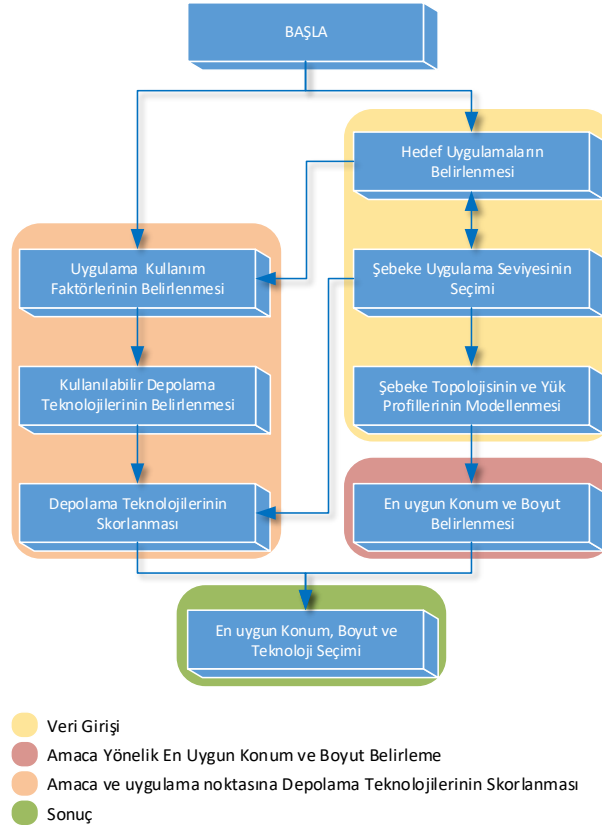
Yenilenebilir enerji sistemleri kesintili yapılarıyla gün içerisinde değişken ve bazen öngörülemez üretim profillerine sahiptir. Bunun en büyük sebebi üretim kaynaklarının (güneş, rüzgar) yenilenebilir enerji üretim tesislerine etkisinin sürekli değişken olmasıdır. Ancak karbon emisyonlarının azaltılmaya çalışıldığı dünyamızda yenilenebilir enerji kaynaklı üretimin sürekli hale getirilmesini ve şebekede daha az konvansiyonel enerji üretim tesisine ihtiyaç duyulmasını sağlamak için enerji depolama sistemleri benzersiz olanaklar sunmaktadır. Bu kullanım amacı gün içerisindeki fazla üretimin depolanması ve üretimin az olduğunda kullanılması şeklindedir. Kullanımın daha kolay anlaşılabilmesi için aşağıdaki görsel bir güneş santralinin tipik üretim profili göz önünde bulundurularak kullanılabilir (Kemiwatt, 2020).



Şekil 6 - Yenilenebilir Entegrasyonu için Enerji Depolama Tesisi Davranışı

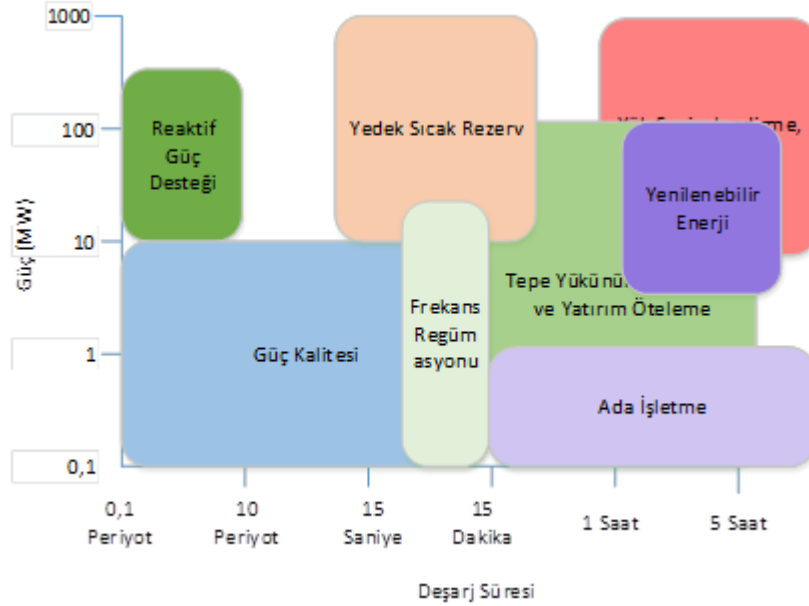
4. Enerji Depolama Sistemleri için En Uygun Konum, Boyut ve Teknoloji Seçimi

İşletmeciler mevcut dağıtım şebekeleri üzerindeki kontrol düzeylerini arttırmak için birçok yeni teknolojiyi entegre ederek büyük ölçüde değişikliklere neden olmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin de bu bağlamda önemli bir rolü olduğu aşikârdır. Enerji depolama sistemleri, tepe yükünün azaltılması, yenilenebilir enerji entegrasyonu, yatırım öteleme, gerilim regülasyonu, frekans regülasyonu ve kayıpların azaltılması gibi birçok uygulama olanağına sahiptir. Bu bağlamda, dağıtım sisteminde enerji depolama sistemlerinin kullanımıyla ilgili temel sorunlardan biri, şebekeye etkilerini en üst düzeye çıkarmak için en iyi konumlarını, boyutlarını ve teknolojiyi bulmaktır. Bu bağlamda, enerji depolama sistemlerini en uygun planlanması ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Metodolojinin amacı, enerji depolama cihazlarının işletme ve yatırım maliyetlerini en aza indirmek, performanslarını ise maksimum düzeye çıkarmaktır. Bu bağlamda, aşağıdaki bölümlerde en uygun konum, boyut, adet ve teknoloji seçimine dair belirlenen yaklaşım verilmiştir. Bu yaklaşım aşağıdaki şekil üzerinde gösterilen akış diyagramı çerçevesinde gerçekleştirilecektir.



Şekil 7 - En Uygun Konum, Boyut ve Teknoloji Seçimi Yöntemi Akış Şeması

Sonrasında bu uygulamalar için genellikle karşılaşılan güç ve deşarj süreleri göz önünde bulundurulmalıdır (World Energy Council, 2004).



Şekil 8 - Enerji Depolama Sistemi Şebeke Uygulamaları için Güç ve Deşarj Süresi Gereksinimleri

Bu grafiklerden de görülebileceği gibi her uygulama ve batarya tipi eşit talep ve performansa sahip değildir. Bu sebeple her bir uygulama için yeterli performansı sağlayabilecek depolama teknolojisinin belirlenmesi gerekir.

4.1 Kullanım Faktörlerinin Hesaplanması

Öncelikle enerji depolama sisteminin ne amaçlarla kullanılacağı belirlendikten sonra bu kullanım amaçlarına ne kadar ihtiyaç duyulacağına dair bir ağırlıklandırma yapılması gerekmektedir. Bu faktörlerin her birine kullanım faktörü ismi verilebilir.

Kullanım Faktörü - Bu faktör, ortak bir enerji depolama sisteminin belirli bir uygulama için ne kadar etkili bir şekilde kullanılabileceğini ifade eder. Bir depolama uygulamasının ortak bir depolama sistemini paylaşan diğer uygulamalarla birlikte sunulduğunda nominal değeri ile çarpılan, 1.00'e (% 100) eşit veya daha az olan bir çarpandır. Örneğin, tam güçte günlük enerji kaydırma uygulamasını sağlamak için bir depolama cihazı kullanıldığında, bu süre zarfında yan hizmetler uygulaması için kullanılamaz. Bu nedenle, her gün sınırlı bir süre boyunca yan hizmetler uygulaması yapılması, yan hizmetler uygulaması için gerçekleştirilebilir değeri azaltacaktır. Kullanım faktörü diğer dört faktörden etkilenmektedir:

- Uygulama önceliği
- Uygulama tipi
- Eş Zamanlılık
- Kullanılabilirlik Faktörü

Uygulama Önceliği – Seçilen uygulamaların öncelik sırasındır.

Uygulama Türü (veya Kullanım Şekli) – Depolama için bir uygulama kullanım şekli, üç ana türe ayrılabilir. Her bir depolama uygulaması ne zaman ve nasıl devreye gireceği konusunda benzersiz olsa da, basitlik için bu yaklaşım tüm şebeke uygulamalarını üç tipten birine ayrılır. Uygulamanın tipi, bir uygulamanın kullanım faktörünü belirleyen tepe zamanı uyumu ve varlık kullanılabilirliğini etkiler.

- **Tip 1** – Yük profili tepe noktası ile yüksek oranda hizalanmış deşarj karakteristiği olan uygulamalar(Arbitraj gibi)
- **Tip 2** – Sıklıkla depolama sistemine ihtiyaç duyan uygulamalar(yenilenebilir enerji çıkış gücü düzeltilmesi veya yan hizmetler uygulaması gibi)
- **Tip 3** – Depolama sistemine nadiren ihtiyaç duyan uygulamalar(Güç kalitesi uygulamaları gibi)

Eş Zamanlılık – Tepe yükünün azaltılması, ilave güç kapasitesi ve dağıtım yatırımlarının ötelenmesi gibi birçok Tip 1 uygulama yük profilinin en yüksek olduğu ve çoğu zaman birkaç saat süren zaman zarfında hizmet sağlamaktadır. Aynı veya örtüşen hizmet

zamanlamasına sahip uygulamalar birbirleriyle oldukça uyumlu olacaktır ve bu nedenle kullanım faktörleri bir araya geldiklerinde daha da fazla olacaktır.

Kullanılabilirlik Faktörü - Birden fazla uygulamanın hizmet zamanları arasında doğrudan bir ilişki olmadığında, düşük öncelikli uygulamalar, yalnızca daha yüksek öncelikli uygulamalar tarafından kendilerine sağlanan zaman içinde kendi hizmetlerini sunabilir. Bu gibi düşük öncelikli uygulamalar için kullanım faktörü, çoğu durumda, kullanılabilirlik faktörüne temelde eşittir. Örneğin, daha yüksek öncelikli bir uygulama bir günde zamanın % 35'inde bir depolama cihazını kullanıyorsa, bir sonraki uygulama bu depolama cihazını bir günde en fazla % 65 oranında kullanabilir.

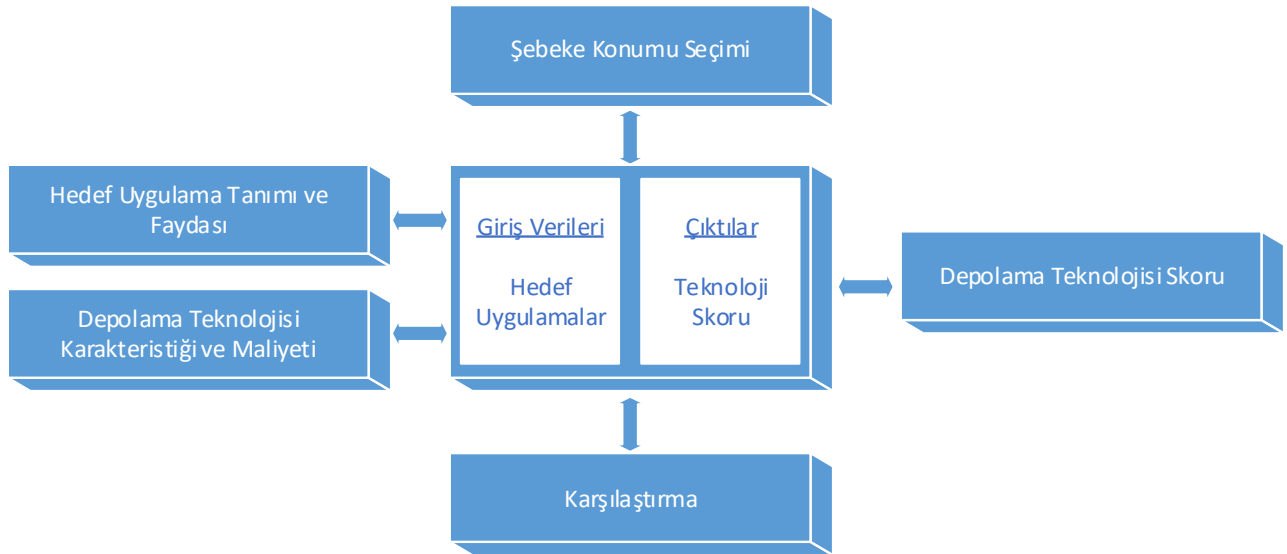
Buradaki faktörlerin hesaplanması ve uygulamalar arasındaki puanlamalar ışığında gerçekleştirilmesi planlanan uygulama için bir kullanım faktörü hesaplanmalıdır. Bu seçilecek teknoloji için en önemli parametrelerden birisidir.

4.2 Teknoloji Seçimi

Elektrik şebekesinde kullanılan diğer ekipmanların aksine, enerji depolama sistemleri çok çeşitli türlere(teknolojilere) ve yeteneklere sahiptir. Hem kontrol edilebilir bir yük hem de dinamik bir generatör olarak hareket edebilmeleri nedeniyle, şebekede nereye bağlı oldukları ve nasıl kontrol edildiklerine göre birçok farklı avantaj sunabilmektedirler.

Farklı enerji depolama sistemi sağlayıcıları aynı depolama teknolojisi için farklı işlevler ve farklı özellikler sunabilmektedir. Bu sebeple kesin bir teknoloji seçimi yönteminin geliştirilmesi mümkün değildir. Bu bölümde, en azından ön seçim için gerekli ihtiyaçlara cevap verecek bir yöntem önerilmiştir. Ön seçim için doğru bir yönlendirme yapabilmek için kesin girdileri zorunlu kılmayan, depolama sisteminin özellikleri ve maliyeti hakkındaki belirsizlikler ile birlikte çalışabilecek bir yöntem önerilmiştir.

Bu yöntemde, öncelikle uygulamanın yapılacağı konum belirlenmelidir. Sonrasında, yapılmak istenen uygulama veya uygulamalar seçilerek her bir enerji depolama sistemi teknolojisi için uygulama skoru belirlenir. Teknoloji uygulama skoru belirlenmesi için metodoloji aşağıdaki görselde özetlenmiştir.



Şekil 9 - Teknoloji Seçimi Hakkında Genel Prensi Şeması

4.2.1 Depolama teknolojisi karakteristiği ve maliyeti

Depolama teknolojisine bağlı olarak birçok farklı karakteristik ve uygulama maliyeti mevcuttur. Bu yaklaşımda 10 farklı enerji depolama teknolojisi veya türü için ayrıntılı bilgileri içeren bir veri tabanı kullanılmıştır (Mohammed, 2016). Bu yöntemde, her bir parametre için düşük ve yüksek olmak üzere geniş bir aralıktaki verilerin tamamı rastgele kullanılmaktadır.

Kullanılan veri tabanında önerilen karakteristikler Tablo-1'de verilmiştir (Mohammed, 2016):

- Depolama teknolojisi
- Nominal güçte deşarj süresi(düşük ve yüksek)
- Enerji yoğunluğu ve spesifik enerji(düşük ve yüksek)
- Verimi(düşük ve yüksek)
- Bekleme modundan tam kapasite şarj veya deşarj durumuna geçme süresi

Tablo 1 - Depolama Teknolojisi Karakteristikleri

Depolama Teknolojisi	Kısaltma	Deşarj Süresi (Saat) Düşük	Deşarj Süresi (Saat) Yüksek	Spesifik Enerji (kWh/ton) Düşük	Spesifik Enerji (kWh/ton) Yüksek	Enerji Yoğunluğu (kWh/m ³) Düşük	Enerji Yoğunluğu (kWh/m ³) Yüksek	Nominal Güçte ve %80 DoD'de Verim Düşük	Nominal Güçte ve %80 DoD'de Verim Yüksek	Tepki Süresi	Kapladığı Alan (m ² /kWh) Düşük	Kapladığı Alan (m ² /kWh) Yüksek
Lityum-İyon Yüksek Güç	LIB-p	0,25	1	70	120	60	90	0,85	0,99	ms	40	60
Lityum-İyon Yüksek Enerji	lib-e	1	4	150	240	90	130	0,85	0,99	ms	18	26
Nikel Bataryalar (NiCd, NiZn, NiMH)	Ni-batt	0,3	3	45	120	60	210	0,7	0,8	ms	26	93
Gelişmiş Kurşun Asit	LA-adv	2	5	30	50	50	80	0,70	0,90	ms	33	45
Valf Ayarlı Kurşun Asit	VRLA	2	4	18	25	30	60	0,68	0,78	ms	25	35
Vanadyum Redox Batarya	VRFB	3	10	10	30	16	33	0,60	0,85	ms	37	55
Gelişmiş Vanadyum Redox Akış Batarya	A-VRFB	3	6	17	21	25	30	0,65	0,7	ms	17	33
Çinko Bromür	ZnBr	2	10	30	50	30	60	0,60	0,75	ms	9	19
Sodyum Sülfür	NaS	6	7	150	240	150	250	0,70	0,90	ms	4	5
Sodyum Nikel Klorür	NaNiCl	2	4	100	150	170	190	0,82	0,87	ms	8	11
Çinko Hava Batarya	ZnAir	5	6	130	170	300	500	0,65	0,77	ms	5	6

Aynı şekilde yine batarya teknolojilerinin kullanım ömürleri ve maliyet parametreleri kullanılmalıdır. Aşağıdaki tabloda verilen kullanım ömrü ve maliyet parametreleri şunlardır (Mohammed, 2016);

- Depolama teknolojisi
- %80 ve %10 deşarj derinliğine kadar olan kullanım ömrü(düşük ve yüksek)
- Amaçlanan uygulamalar için tahmini yıllık operasyonel kayıplar(düşük ve yüksek)
- Tahmini yıllık bakım maliyeti(düşük ve yüksek)
- AC enerji depolama ekipmanları maliyeti(düşük ve yüksek)

Tablo 2 - Depolama Teknolojisi Kullanım Ömrü ve Maliyeti

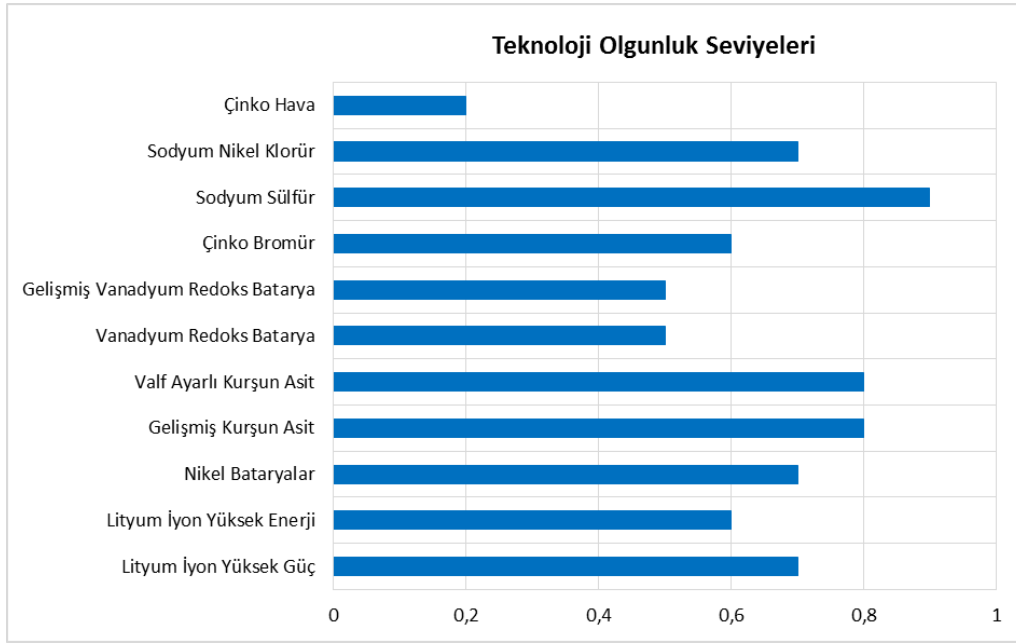
Depolama Teknolojisi	Kısaltma	%80 DoD Çevrim Ömrü Düşük	%80 DoD Çevrim Ömrü Yüksek	%10 DoD Çevrim Ömrü Düşük	%10 DoD Çevrim Ömrü Yüksek	Yıllık İşletme Kaybı (kWh/yr/kW) Düşük	Yıllık İşletme Kaybı (kWh/yr/kW) Yüksek	Yıllık Bakım veya Garanti Maliyeti (\$/yr/kW) Düşük	Yıllık Bakım veya Garanti Maliyeti (\$/yr/kW) Yüksek	Fabrika Çıkışı Depolama Birim Maliyeti (\$/kW) Düşük	Fabrika Çıkışı Depolama Birim Maliyeti (\$/kW) Yüksek
Lityum-İyon Yüksek Güç	LIB-p	5000	7000	50000	110000	110	250	7	35	800	1200
Lityum-İyon Yüksek Enerji	lib-e	3500	6000	50000	100000	120	250	7	25	2500	3500
Nikel Bataryalar (NiCd, NiZn, NiMH)	Ni-batt	300	1000	1000	3000	150	500	2,25	40,5	500	1500
Gelişmiş Kurşun Asit	LA-adv	200	300	20000	30000	250	900	10	30	2200	3900
Valf Ayarlı Kurşun Asit	VRLA	600	1000	2000	4000	300	900	10	40	1600	2500
Vanadyum Redox Batarya	VRFB	6000	8000	160000	200000	300	875	9	15	2200	3100
Gelişmiş Vanadyum Redox Akış Batarya	A-VRFB	6000	8000	160000	200000	100	300	10	14	2000	2500
Çinko Bromür	ZnBr	1500	2500	15000	25000	570	670	10	30	700	2500
Sodyum Sülfür	NaS	2500	4000	40000	50000	200	625	15	60	1000	3000
Sodyum Nikel Klorür	NaNiCl	3000	5000	50000	100000	85	145	10	22	2000	3000
Çinko Hava Batarya	ZnAir	5000	10000	10000	20000	540	750	15	40	1200	1400

4.2.2 Depolama teknolojilerinin derecelendirilmesi

Amaçlanan şebeke uygulamalarına uygun olacak bir enerji depolama teknolojisi seçeneği seçmek için her depolama teknolojisi fizibilitesi aşağıdaki dört kritere dayanan bir skorlamaya göre belirlenebilir:

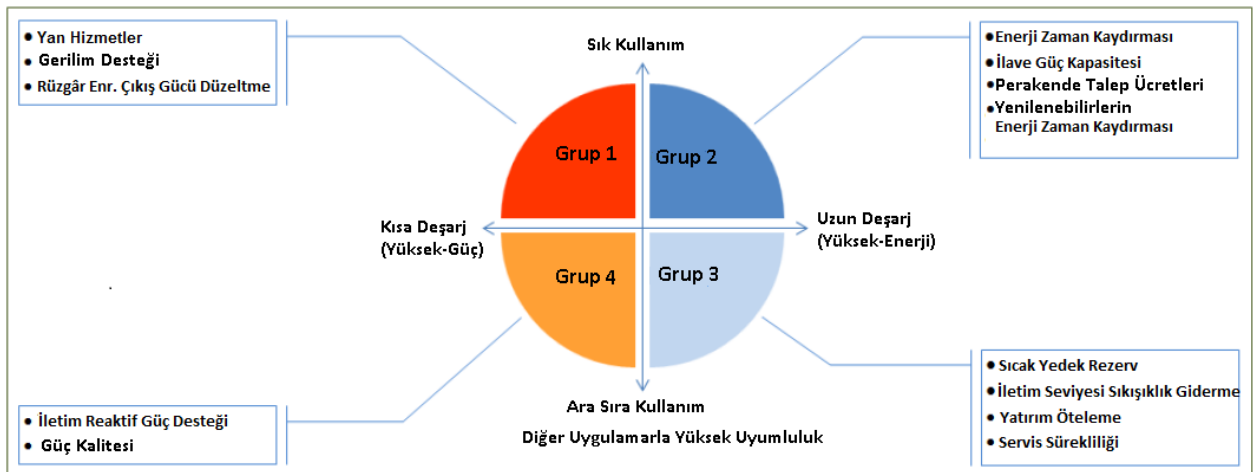
- Teknoloji olgunluk seviyesi
- Seçilen şebeke konumu için uygunluk (boyut, ağırlık, ölçeklenebilirlik vb.)
- Uygulama gerekliliklerini karşılama (deşarj süresi, kullanım ömrü, verimlilik vb.)
- \$/kW veya \$/kWh bazında kurulum maliyeti

Bu dört farklı kriter için ağırlık puanları verilerek toplam fizibilite skoru çıkartılmaktadır. Teknoloji olgunluk seviyesine göre enerji depolama teknolojileri Şekil 10'da verilmiştir (Sreekanth ve diğ., 2018).

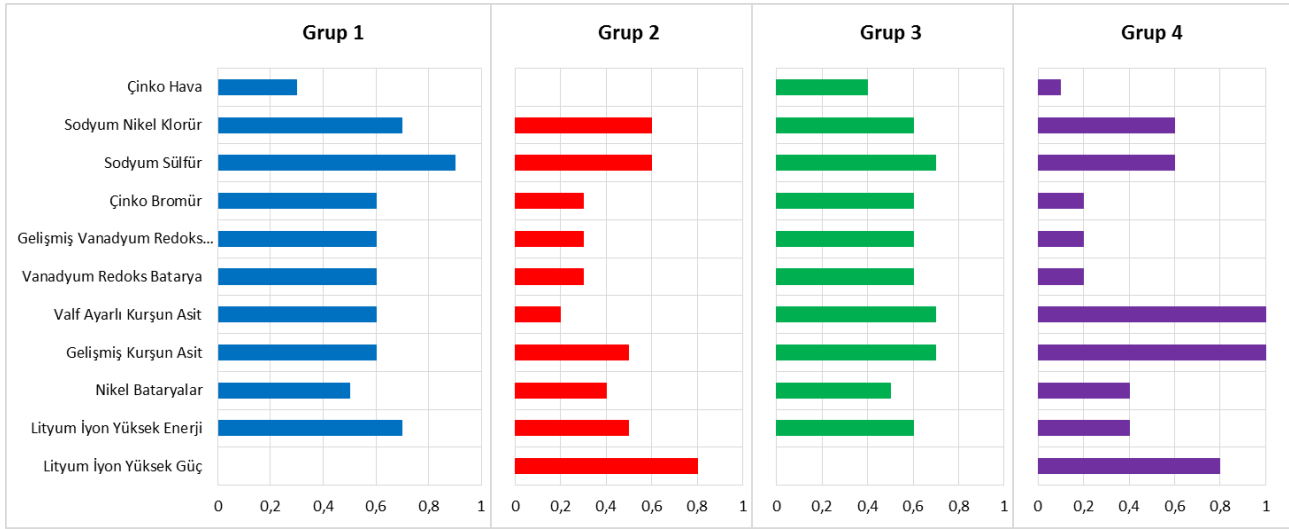


Şekil 10 - Enerji Depolama Teknolojileri Olgunluk Seviyeleri

Enerji depolama teknolojilerinin uygulama gerekliliklerini karşılayıp karşılamadıklarını değerlendirmek içindeşarj süresi, çevrim sayısı gibi birçok değişkenin değerlendirilmesi gerekecektir. Bu yaklaşımda basitleştirilmiş değerlendirme önerilmiştir. Bu basitleştirme sürecinde, tüm uygulamalar Şekil 11'de gösterildiği gibi dört ana gruba ayrılmıştır. Gruptaki uygulamalar sağlıklı değerlendirme için yukarıda bahsedilen uygulamalardan daha detaylı uygulamalara bölünmüştür. Enerji depolama teknolojilerinin bu dört uygulama grubu için fizibilite skorları, Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 11 - Enerji Depolama Sistemleri için Dört Uygulama Grubu



Şekil 12 - Enerji Depolama Teknolojilerinin Seçilen Uygulama İçin Fizibilite Skorları

Her bir depolama teknolojisi seçeneğinin maliyet skoru ise kurulum maliyeti ile ters orantılıdır ve istenen uygulama değerine bağlı olarak \$/kW veya \$/kWh istenen hedef değerlerine göre normalleştirilebilir.

4.2.3 Çoklu uygulama amaçlarına göre fizibilite skorlarının birleştirilmesi

Çoklu fizibilite puanlarını birleştirmek için aritmetik ortalama yerine geometrik ortalama tercih edilir.

$$\text{Aritmetik Ortalama} = (S_1 + S_2 + \dots + S_n) / n$$

$$\text{Geometrik Ortalama} = (S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n)^{(1/n)}$$

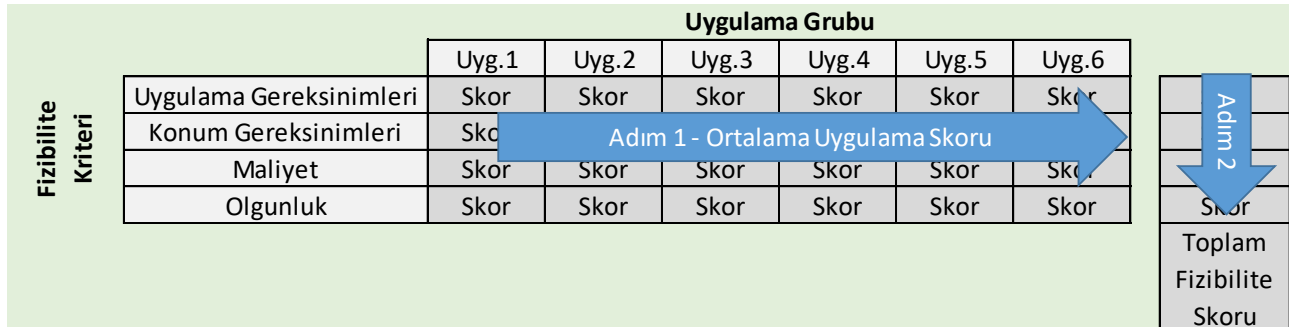
Burada, S_1, S_2, \dots, S_n ortalaması alınacak “n” adet bireysel fizibilite skorlarının her biridir. İki ortalama yöntemi arasındaki temel fark, geometrik ortalamanın düşük sayılara (puanlara) aritmetik ortalamasından daha duyarlı olmasıdır. Örneğin, tek bir “sıfır” puanı, aritmetik ortalamayı biraz düşürecek iken, geometrik ortalamayı sıfıra eşitler. Bir depolama seçeneği, fizibilite kriterlerinden herhangi biri için sıfır puan alması, istenilen uygulamaların bu teknoloji ile gerçekleştirilemeyeceği ve bu eksikliğin birleşik fizibilite puanına doğru bir şekilde yansıtılması gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle, çoklu fizibilite puanlarını birleştirmek için geometrik ortalama tercih edilir.

Bu yaklaşımda, bu fizibilite skorlarını birleştirirken farklı ölçüt puanlarına farklı ağırlıklar uygulayabilmek için, aşağıdaki geometrik ortalama denklemini kullanılır:

$$\text{Birleştirilmiş Fizibilite Skoru} = (S_1^a \times S_2^b \times S_3^c \times \dots)^{1/(a+b+c+\dots)}$$

Burada, “a” “ S_1 ” puanının ağırlık derecesi, “b” ise “ S_2 ” puanının ağırlık derecesini ifade etmektedir.

Aşağıdaki şekilde birden fazla şebeke uygulaması tercih edilmesi durumunda, her depolama teknolojisi seçeneğini puanlamak için öncelikle dört farklı kriter özelinde tüm uygulamalar için bir ortalama puan, sonrasında ise bu eşdeğer dört kriterin ortalaması alınarak toplam fizibilite skorunun hesaplandığı iki aşamalı süreç gösterilmektedir. Burada Adım 1’deki uygulamaların ağırlık dereceleri yukarı ki bölümlerde bahsedilen kullanım faktöründen belirlenmektedir. Adım 2’deki ağırlık dereceleri ise isteğe bağlıdır.



Şekil 13 - Her Depolama Teknolojisi Seçeneğinin Toplam Fizibilite Skoru için Hesaplama Süreci

5. Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada öncelikle şebeke seviyesinde enerji depolama sistemlerinin uygulama amaçlarından bahsedilmiş ve bu uygulama amaçlarıyla birlikte elde edilen faydalar ortaya konulmuştur. Enerji depolama sistemleri enerji üretim ve tüketim zamanlarının farklılaştırılmasıyla benzersiz bir şebeke elemanı olarak karşımıza çıkacak ve elektrik şebekemizde de yer alacaktır. Ancak enerji depolama sistemlerinin halen yüksek maliyetler içermesi bu uygulamalar yapılmadan önce derin fizibilite çalışmalarının yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Uygun depolama teknolojisi, kapasitesi ve noktası seçimi bu noktada kullanım amacının belirlenmesinden sonraki ilk aşamadır. Depolama sistemleri yine bu maliyetleri sebebiyle fizibilitelerinin mümkün olabilmesi için birden fazla kullanım amacının bir araya getirilmesini de gözetmek zorundadırlar. Bu amaçla uygun teknolojinin seçimi amacıyla önerilen metodoloji oluşturulmuş ve detaylıca açıklanmıştır.

Uygun seçim yapılması gerçekleştirilecek yatırımın sebeplendirilmesinde önemli bir noktaya sahiptir. Bu sebeple gerçekleştirilen işlemlerin bir metodoloji dahilinde yapıldığını göstermek hem yatırımcıyı hem de yükleniciyi güvenli hissettirecektir. Bahsekonu metodoloji ile 5 farklı elektrik dağıtım şirketi için enerji depolama uygulama teknolojileri belirlenmiş olup, belirlenen teknolojiler ile birlikte dağıtım şirketleri alıma çıkmıştır, halen kurulum süreci devam etmektedir.

Referanslar

- Amin SM, G. C. (2006). The North American power delivery system: balancing market restructuring and environmental economics with infrastructure security.
- D. A. Sbordone, L. M. (2016). Reactive Power Control for and Energy Storage System: A Real Implementation in a Micro-Grid. *Journal of Network and Computer Applications*, vol 59, p. 250 – 263.
- Denholm P, E. E. (2010). *The role of energy storage with renewable electricity generation*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- K. Spiliotis, S. C. (2016). Utilizing local energy storage for congestion management and investment deferral in distribution networks. *13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, (s. pp. 1-5). Porto.
- Kemiwatt. (2020, 12 14). *Renewable & Integration*. Kemiwatt: <https://kemiwatt.com/renewable-integration/> adresinden alındı
- Koohi-Kamali S, T. V. (2013). emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: a review. *Renew Sustain Energy Rev*, 25:135–65. .
- L. Maeyaert, L. V. (2020). Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids. *Journal of Energy Storage* , vol. 30 ISSN 2352-152X.
- M. Delfanti, D. F. (2014). Distributed Generation Integration in the Electric Grid: Energy Storage System for Frequency Control. *Computational Science in Smart Grids and Energy Systems*.
- M. Uddin, M. R. (2018). A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, Part 3, p 3323-3332.
- Mohammed, M. F. (2016). Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 1953-1961.
- Sreekanth, K. J., Al Foraih, R., Al-Mulla, A., & Abdulrahman, B. (2018). Feasibility Analysis of Energy Storage Technologies in Power Systems for Arid Region. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(1), 011901. doi:10.1115/1.4040931
- World Energy Council. (2004). *Energy End-Use Technologies for the 21st Century*.
- Z. Cheng, J. D. (2018). o Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 6-24.