



Sıvı Hava ile Enerji Depolama Sistemi

Tonguç Gökçeer¹

1. ÖZET

Sıvı Hava ile Enerji Depolama (SHED), havanın faz değişimi sırasında gösterdiği genişlemenin elektrik üretimi için kullanıldığı bir enerji depolama teknolojisidir. Enerji rezervi olarak yalıtılmış, düşük basınçlı bir tankta $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında depolanan sıvı hava kullanılır. Bu sıvı havanın atmosferik sıcaklığa maruz bırakılıp tekrar gaz haline geçmesiyle birlikte hacimsel genişleme sağlanır ve kızdırılmış havanın türbini çevirmesi vasıtasıyla elektrik üretilmiş olur. Gece elektriği kullanılarak sıvılaştırılan hava, elektrik ihtiyacının ve fiyatının arttığı puant zaman diliminde tanktan alınarak yüksek basınca basılır ve elektrik üretimi için kullanılır. Hem SHED çevriminin içindeki ısıl depolama döngüleri, hem de atık soğuktan (sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) şebekeye verilmesi esnasında açığa çıkan soğutma potansiyeli) veya atık ısıdan (çevrede bulunan endüstriyel tesisin egzoz enerjisi) faydalanabilme özelliği,

bu enerji depolama metodunun dikkat çeken özelliklerindedir.

Bu makalede, SHED sistemi incelenmiştir. Farklı enerji depolama teknolojileriyle kıyaslanıp, akış şeması üstünden enerji depolama ve üretme aşamaları tanıtılmıştır.

2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Küresel elektrik üretimi geçtiğimiz on yılda hızlı bir artış göstermiştir. Bu artış, elektrik şebekelerine yapılan yatırımlar için birçok yeni alan yaratmıştır. Hiç şüphesiz, bu yatırımlardan sürdürülebilir ve kârlı olanları, enerji fiyatlama, iklim değişikliği ve artan yenilebilir enerji üretimi ile dengelenmesi daha da zor hâle gelen konvansiyonel elektrik şebekelerinin dengelenmesi gibi elektrik üretim sektörünün güncel problemlerine akılcı ve yenilikçi bakış açıları geliştirecek olanlardır. Sera gazı emisyonlarını azaltmak ve enerjide bağımsızlığı sağlamak için teşvik

¹ PwC Danışmanlık Hizmetleri – tongucgokceer@gmail.com

edilen yenilenebilir enerji santralleri, gösterdikleri günlük ve mevsimsel varyasyonlar sebebiyle iletim ve dağıtım hatlarında dengesizlikler yaratmaktadır. Sadece 2017 yılında, yenilenebilir üretim kapasitesi dünya genelinde 167 GW artmış [1] ve bu artışın yaklaşık %85'ini güneş ve rüzgar santralleri oluşturmuştur. Daha az karbon içeren bir enerji üretim portföyü elde etmek için artan yenilenebilir enerji yatırımları, elektrik enerjisi depolama teknolojilerini elektrik üretim, iletim ve dağıtım sektörlerinin ilgi odağı hâline getirmiştir. Düşük talep periyotlarında ihtiyaç fazlası enerjinin depolanıp, bu enerjinin ihtiyaç durumunda kullanılabilmesini mümkün kılan enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerjinin şebeke entegrasyonunu arttırmada kilit bir rol üstlenmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin verimliliği, deşarj sırasında elde edilen enerjinin depolama sırasında harcanan enerjiye oranı ile ifade edilebilir. SHED sisteminin verimi aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\eta = \frac{(W_t - W_p) * t_D}{W_c * t_c} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde η verimliliği, w_t türbinin ürettiği gücü, w_p kriyojenik pompanın tükettiği gücü, t_D deşarj süresini, w_c kompresörlerin güç tüketimini ve t_c şarj süresini ifade etmektedir.

Bazı enerji depolama teknolojileri dünya çapında ticarileşmişken, diğerleri henüz gelişme/ilk kurulum aşamasındadır. Toplam kurulu gücü 140 GW'yu aşan Pompaj Depolamalı Hidroelektrik (PDH) santraller, kurulu enerji depolama kapasitesinin %95'ini oluşturmaktadır [2, 3]. Var olan PDH santraller 1 MW – 3003 MW arasında kurulu güce sahip olup, %70–85 verimlilikte [4] çalışmakta ve 40 seneden fazla ömre sahiptirler. PDH'nin en büyük dezavantajı, coğrafi kısıtlar, buna bağlı olarak görece yüksek inşaat maliyetleri ve geniş arazi kullanımları nedeniyle artan çevresel kaygılardır.

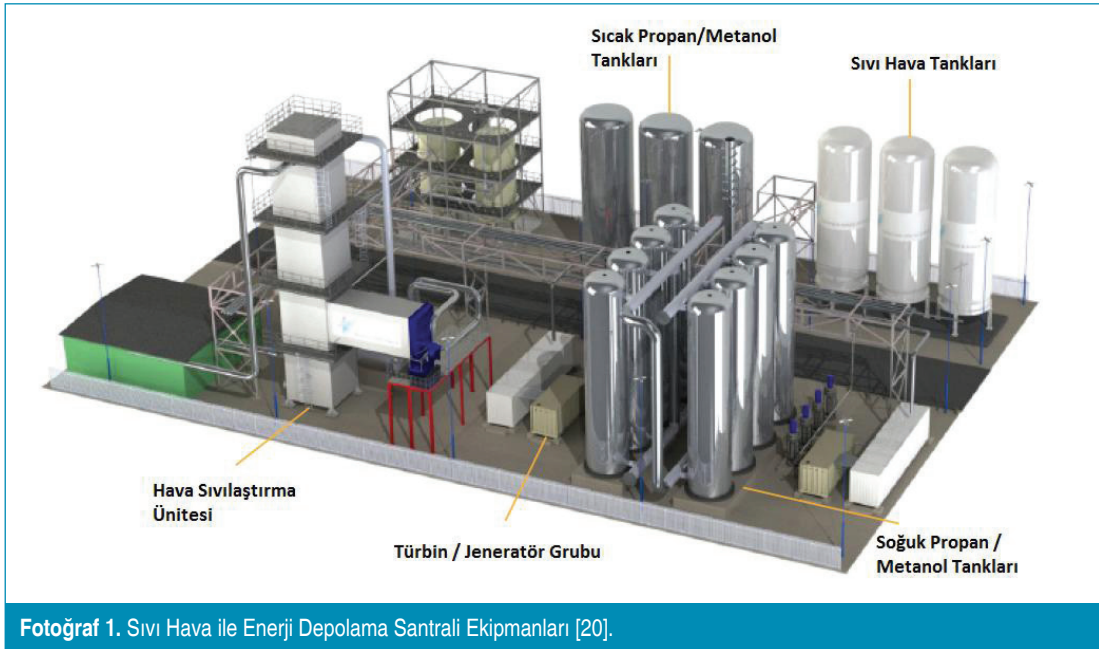
Elektrokimyasal Depolama (piller) ulaşım ve elektronik cihazlarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılıp, %60–95 verimlilikte [5] çalışmalarına rağmen elektrik şebekelerindeki uygulama alanları günümüze kadar sınırlı kalmıştır. PDH'deki gibi coğrafi kısıtlara bağımlı olmayan pil sistemleri, modülerleştirilebilir ve yükteki ani değişimlere çok

hızlı tepki verebilir; ancak kısa periyodik işletme ömürleri ve yüksek bakım maliyetleri, bu teknolojilerin yayılmasının önündeki ana engellerdir [2, 6]. Buna ek olarak, bazı zehirli kimyasallar içeren pillerin geri dönüşümü/bertaraf edilmesi kritik bir çevresel sorun olarak ön plana çıkmaktadır.

Bir başka ticarileşmiş enerji depolama teknolojisi olan Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama² sistemlerinde basınçlı hava çeşitli yer altı (mağaralar, aküferler veya terk edilmiş madenler) ve yer üstü depolama tesislerinde depolanır ve bu sistemler kısa sürede inşa edilebilirler [7, 8]. Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemlerinde ısı geri kazanımı ve sistemin termal yönetimi çok önemlidir; depolama tesisinden çıkan soğuk hava türbinde buzlanmaya sebep olabileceğinden ısıtılması gerekmektedir. Bu sistemlerin verimlilikleri %42–54 arasında değişmektedir [9, 10]. Isı alışverişi olmayan, gelişmiş sistemlerde ise havanın basınçlandırılması sırasında açığa çıkan ısı enerjisi enerji üretimi sırasında kullanılmak üzere depolanır ve bu sistemlerde verimliliğin %70 civarına çıkması mümkündür [2]. PDH'de olduğu gibi, bu sistemlerde de bir coğrafi bağımlılık söz konusudur.

Kompresör boyutunu ve buna bağlı olarak işletme giderlerini minimize etmek için, CAES sistemlerinde hava 100 bar [11] basıncın altında depolanır. SHED sistemlerinde ise, CAES ekipmanlarına göre daha pahalı kriyojenik ekipmanlar kullanılmasına karşın, sıvı havanın sıkıştırılmış havya (100 bar altı değerler) göre yaklaşık 10 kat daha fazla ekserjetik yoğunluğa [12] sahip olmasından yararlanır. Sıvı hava/nitrojen, sıvı hidrojen veya sıvı doğal gaz gibi birçok farklı kriyojenik sıvı enerjiyi depolamak için kullanılabilir. SHED sistemleri, hava sıvılaştırma tesislerinde hâlihazırda kullanılan teknolojileri [13] kullanabilir. Farklı enerji depolama teknolojilerinde deşarj (enerji depolandıktan sonra kullanılabilecek kadar geçen süredeki enerji kaybı) depolama sürelerini kısıtlarken, SHED sistemlerinde kullanılan kriyojenik sıvılar düşük basınçta ve yalıtılmış tanklarda günde sadece %0,05 civarında [14] hacimsel kayba uğrarlar. Aynı zamanda SHED sistemleri her yere kurulabilir; PDH ve CAES sistemlerindeki gibi bir coğrafi bağımlılık söz konusu değildir. Bahsi geçen bu avantajlar sebebiyle SHED, ticarileşme potansiyeline sahip, önemli bir enerji depolama teknolojisidir.

² Compressed Air Energy Storage, CAES

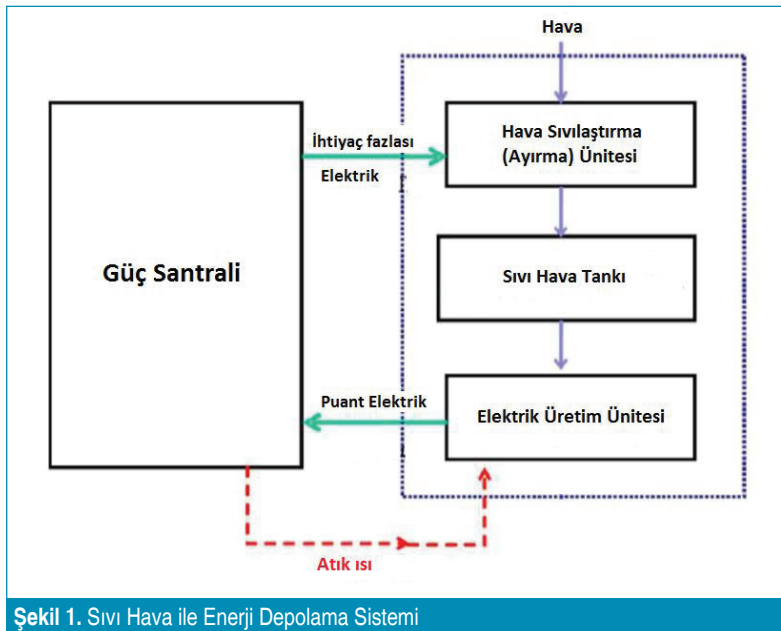


Fotoğraf 1. Sıvı Hava ile Enerji Depolama Santrali Ekipmanları [20].

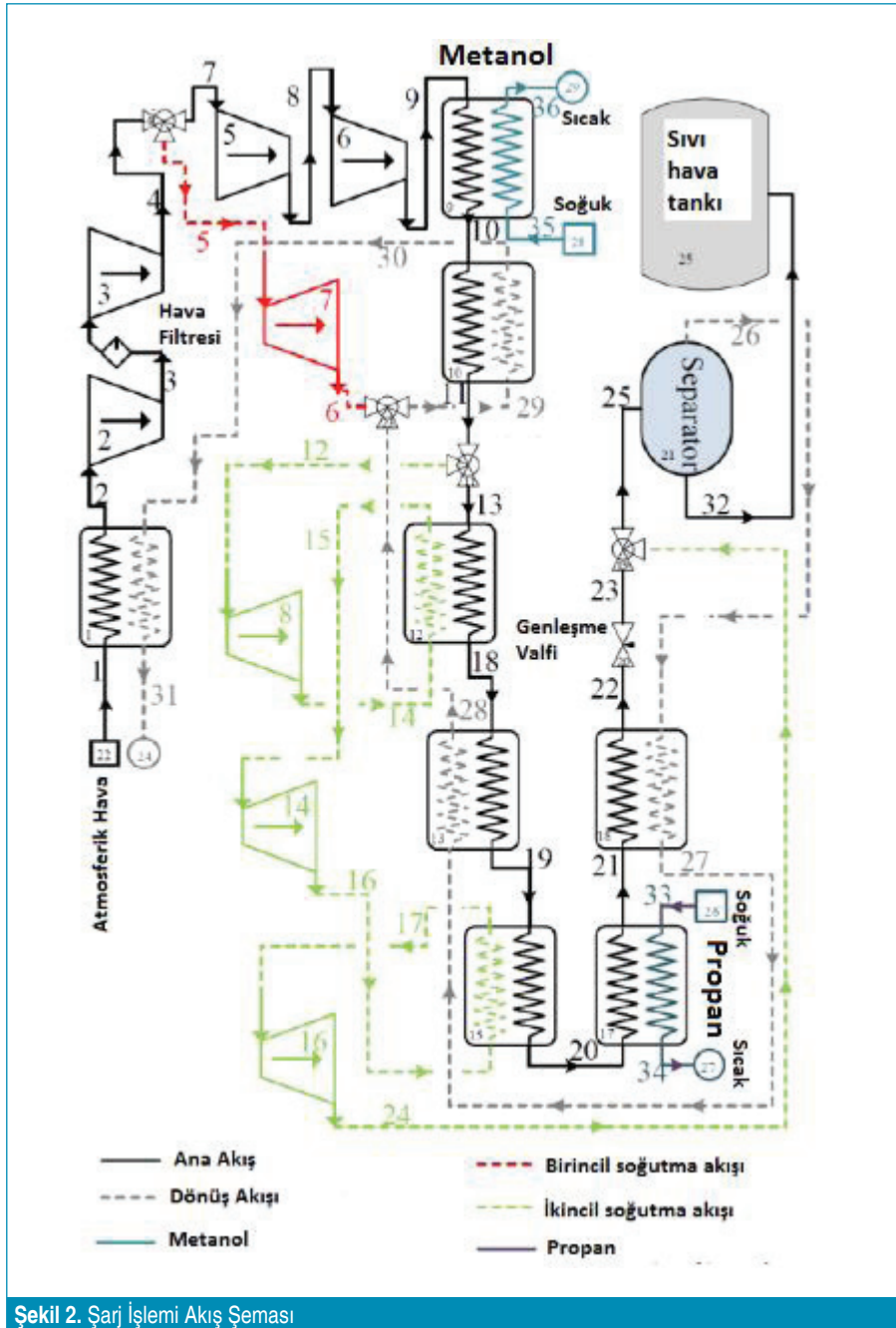
3. SİSTEM KONFİGÜRASYONU

Diğer enerji depolama teknolojilerinde olduğu gibi, SHED işlemi de 3 ana başlıkta incelenebilir; yükleme, depolama ve deşarj. İhtiyaç fazlası elektriği kullanarak havayı sıvılaştırmak için Linde çevrimi ya da Claude çevrimi [15] gibi farklı soğutma çevrimleri kullanılabilir. Bu iki ileri soğutma çevrimi arasındaki temel fark, Claude çevriminde soğutma etkisinin Joule-Thompson (J-T) valfine ek olarak türbin tarafından da sağlanmasıdır. Linde

çevriminde de görülen J-T etkisine ek olarak Brayton çevriminden de faydalanılarak ön soğutmanın türbinler vasıtasıyla sağlanması sistem verimini artırır. Değişken sistem gereksinimleri için türbin sayısı artırılabilir, paralel/seri genişleme düzenleri uygulanabilir. SHED santrallerinde kullanılan ekipmanlar ve prosesler, günde en az 1000 ton [16] LNG elde edebilecek boyuttaki LNG tesislerindeki benzerdir. Şarj/deşarj işlemleri arasında bir köprü işlevi gören ve sistemin verimini arttırmada önemli bir rol oynayan ısı depolama döngülerinde ısı enerjisinin depolanması için kaya, çeşitli tuzlar veya ısı transfer sıvıları kullanılabilir. Literatürdeki çalışmalar [17] göstermektedir ki, konvansiyonel, iki türbinli Claude çevriminin kullanıldığı tasarımlar ısı depolama döngüsünü (soğuk geri dönüşümü) kısıtlamaktadır. Bu yüzden bu çalışmada, farklı basınç seviyelerinde 4 türbin kullanılmıştır. Isıl depolama döngüsünde -190 ila 15°C çalışma aralığını kapsayan ısı transfer sıvılarından propan ve metanol seçilmiştir. Isı transfer sıvılarının kaya veya çeşitli tuzlar yerine seçilmesinin temel sebebi, sistem içindeki hedef sıcaklıklara bu sıvıların debilerini ayarlayarak kolayca ulaşabilmektir. Kaya veya çeşitli tuzların ısı enerjisi depolama için kullanıldığı durumlarda, sistem içerisindeki sıcaklık kontrolü daha zor olacaktır. SHED santralindeki şarj/deşarj işlemlerinin akış şemaları, sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

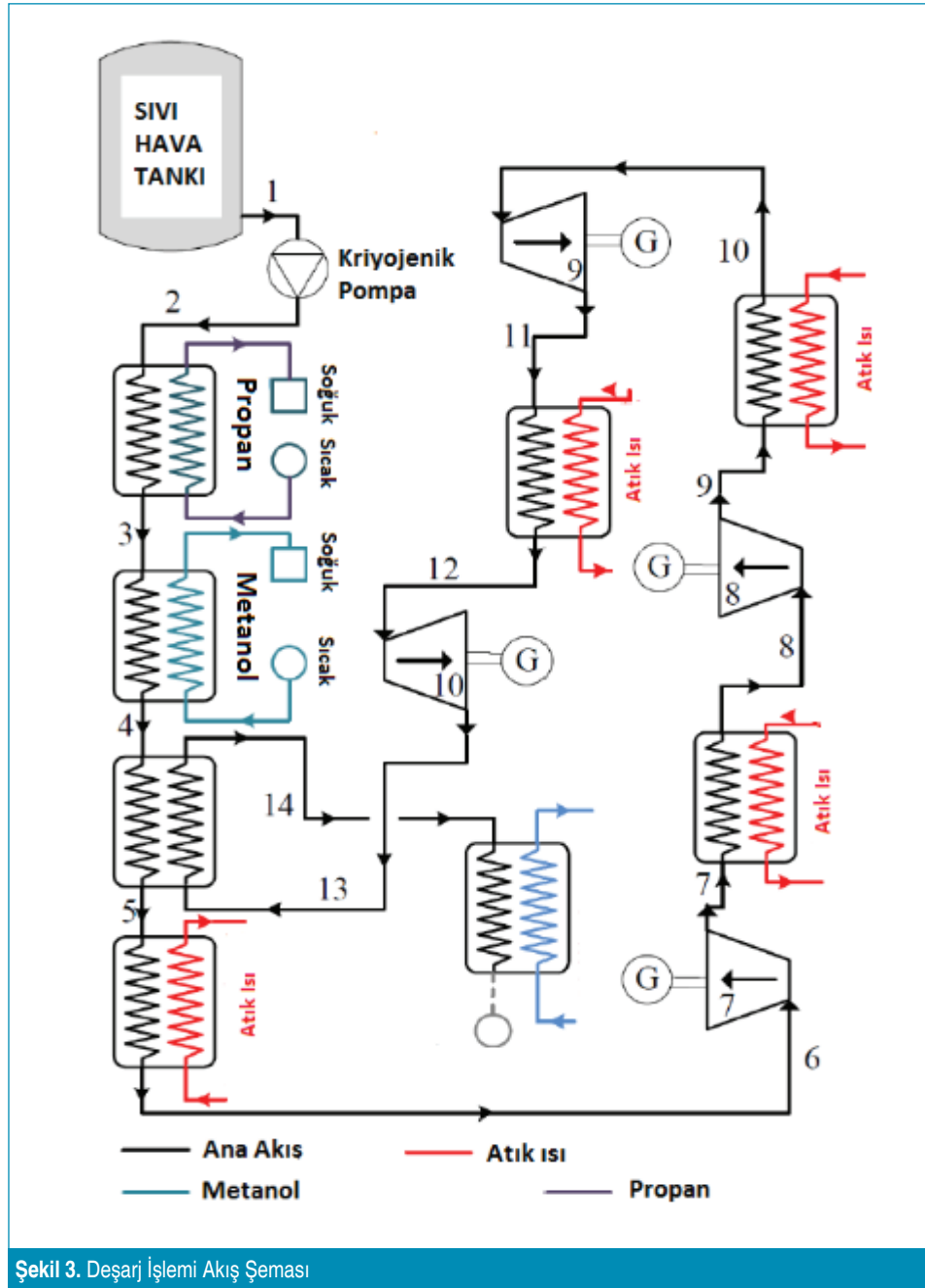


Şekil 1. Sıvı Hava ile Enerji Depolama Sistemi



Şarj işlemindeki amaç, faz ayırıcıda sıvı hava elde etmektir. Hava kompresörüne (2) girmeden önce atmosferik hava (1), faz ayırıcıya giren sıvı-gaz hava karışımından (25) gaz olarak ayrılan hava (30) tarafından soğutulur. Kompresör girişinde sıcaklığının düşmesiyle havanın özkütlesi artar; birim hacimde daha fazla havanın sıkıştırılabilmesi sonucunda verim yükselir ve daha küçük boyutta kompresörler seçilerek ilk yatırım maliyeti azaltılmış olur. İlk sıkıştırma sonrası hava, içindeki CO₂ ve H₂O (nem) bileşenlerinden hava arıtma ünitesi vasıtasıyla ayrılır. Hava ikinci

kompresörde (3) tekrar sıkıştırılır ve bu kompresör sonrası akış ikiye ayrılır. Akışın bir kısmı daha da basınçlandırılmak üzere kompresörlere (5, 6) giderken, kalan kısmı türbinde (7) genişler, bu genişleme sonucu yoğunlaşma sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta, ana akışı soğutmak için kullanılmak üzere eşanjöre (29) yollanır. Yüksek basınçtaki ana akış (9), metanol vasıtasıyla soğutulur. Soğuk geri dönüşüm, metanol ve propan sıvılarıyla gerçekleştirilir. Deşarj sırasında sıvı hava gaz hâline geçerken yüksek bir soğutma potansiyeline sahiptir. Deşarj sırasında havayı ısıtan ve



bunun sonucunda soğuyan metanol ve propan, şarj sırasında gelen ana akışı soğutmak için kullanılır. Eşanjör kademeleri arasında ana akışın bir kısmı türbinlere (8, 14, 16) gönderilir. Türbinlerde genişleşip daha düşük sıcaklıklarda çevrime dönen bu kısım, ana akışın soğutmasında kullanılır. Soğuyan, yüksek basınçtaki ana akış (22), J-T valfinde genişler ve kısmi olarak yoğunlaşma sağlanır. Sıvı-gaz karışımı en sonunda faz ayırıcıya girer, sıvı olan kısım sıvı hava tankına giderken, gaz kalan kısım gelen ana akışı soğutmak için tekrar çevrime döner.

Düşük basınçlı, yalıtılmış tankta depolanan sıvı hava, elektriğe ihtiyaç duyulduğu zaman kriyojenik pompa vasıtasıyla yüksek basınca basılır (2). Propan ve metanol sıvı havayı eşanjörlerde (3, 4) ısıtır. Havanın kritik basıncından yüksek bir basınca sahip olan bu akışta standart sıvı-gaz özellikleri gözlenmez. Hava eşanjörlerde atık ısı kaynağı (yakın bir santralin egzozu) kullanılarak kızdırılır. Yüksek basınçlı kızgın hava türbinde dört kademeli ve her kade-me arası yeniden ısıtmaya tabii tutulacak şekilde genişler ve elektrik üretimi gerçekleşir.

4. SHED SANTRALLERİ

SHED santralleri tek başlarına çalışabileceği gibi, atık ısı veya mevcut soğutma potansiyeli olan kaynakların kullanımıyla daha verimli ve rekabetçi sistemlere dönüştürülebilir. SHED santrallerinin verimlilikleri tek başlarına çalıştıkları senaryoda soğutma çevriminde çıkılabilen en yüksek basınca bağlı olarak %40–50 arasında [18] değişmektedir. Atık ısıdan veya soğutma potansiyelinden faydalanan bir SHED santralinde ise verim %60–75 arasında [19] değişmektedir.

Günümüzde İngiltere’de 2 adet SHED santrali kurulmuştur. Bunlardan ilki bir pilot santraldir ve 2011–2014 yılları arasında çalıştıktan sonra, sıvı hava ile enerji depolama üstüne araştırmaların ilerlemesi adına İngiltere’de bir üniversitenin araştırma laboratuvarına bağışlanmıştır. Pilot santral 350 kW/2,5 MWh olup, teknolojinin kanıtlanması amacıyla inşa edilmiştir. Yukarıdaki paragrafta verilen teorik verimlilik değerlerinin aksinde, bu santralin verimi %25’den düşüktür [17]. Bunun sebebi, küçük boyutlarda hava sıvılaştırıcıda kullanılan kompresörlerin optimum basınç aralığından çok daha düşük basınçlarda sıkıştırma yapmasıdır. Bu santral US PJM regülasyon ve UK STOR³ performans testlerini [20] başarıyla tamamlamıştır.



Fotoğraf 2. Pilsworth 5 MW/15 MWh Sıvı Hava ile Enerji Depolama Santrali [20].

İkinci SHED santrali, teknolojinin şebeke ölçeğinde kanıtlanması amacıyla kurulmuştur. Nisan 2018’de devreye alınan santral 5 MW/15 MWh kapasitesindedir. Atık ısı kaynağı olarak aynı yerleşkede bulunan çöp gazı santralının egzozunu kullanmaktadır. Bu santrale, İngiltere şebekesindeki ani frekans değişimlerine hızlı tepki verme yeteneğinin kanıtlanması [20] için volanlar ve süper kapasitörler eklenecektir.

5. SONUÇ

Sıvı hava ile enerji depolama santralleri, kurulu gücü her geçen gün artan yenilebilir enerji santrallerinin şebekede yol açtığı dengesizlikleri gidermede, doğal gaz santrallerinin daha verimli/esnek çalışmasında ve atık ısı/soğutma potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Fazla enerjiyi düşük talep zaman aralıklarında depolayıp elektrik talebinin arttığı zamanlarda şebekeye geri vererek düşük verimli sıvı yakıt santrallerinin daha az çalışmasını mümkün kılarak karbondioksit emisyonlarını düşürmede kilit rol oynama potansiyeline sahiptir. SHED santralleri kurmak için yüksek teknolojik bilgi gerekmez, kullanılan ekipmanlar bakım gereksinimleri iyi bilinen, uzun ömürlü, yaygın olarak senelerdir elektrik santrallerinde ve en-

düstriyel tesislerde (hava ayırıcı santraller) kullanılırlar. Sıvı hava ile enerji depolamak için büyük mağaralara ya da yükseklik farkı bulunan rezervuarlara ihtiyaç yoktur. Herhangi bir yanma olmadığı için, zararlı emisyonlar gözlenmez. Şarj/Deşarj sürelerinin birbirinden bağımsız tasarlanabilmesi, sisteme ekstra bir esneklik kazandırır. Özellikle kış aylarında doğal gaz arzında yaşadığımız sorunlar göz önüne alındığında, uygun ekonomik koşulların oluşması durumunda arz çeşitliliğini arttırmada büyük rol oynayacak LNG terminallerinin artması, bu teknoloji için önemli bir kullanım alanı yaratacaktır.

³ Short Term Operating Reserve

KAYNAKÇA

1. IRENA. 2018. "Renewable Capacity Highlights," p. 1-2.
2. **Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J.** 2015. "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol.137, p. 511-536.
3. I. H. Association, "Hydropower Status Report," IHA, London, 2016.
4. **Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., Ding, Y.** 2009. "Progress in electrical Energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, p. 291-312.
5. **Dodds, P., Garvey, S.** 2006. "The Role of Energy Storage in Low-Carbon Energy Systems," *Storing Energy: with Special Reference to Renewable Energy Resources*, p. 3-22.
6. I. M. S. Board, "Electrical Energy Storage," International Electrotechnical Commission, 2011.
7. **Safaei, D., Keith, D., Hugo, R.** 2013. "Compressed air Energy storage (CAES) with compressors distributed at heat loads," *Applied Energy*, vol.103, p. 165-179.
8. **Karellas, S., Tzouganatos, N.** 2014. "Comparison of the performance of compressed-air and hydrogen energy storage systems: Karpathos island case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 865-882.
9. **Donadei, S., Schneider, G.** 2016. "Chapter 6 – Compressed Air Energy Storage in Underground Formations," *Storing Energy*, p. 113-133.
10. Department of Energy. 2018. "Kraftwerk Huntorf," <http://www.energystorageexchange.org/projects/1245>, son erişim tarihi: 13.09.2018.
11. **Barbour, E., Mignard, D., Ding, Y., Li, Y.** 2015. "Adiabatic Compressed Air Energy Storage with packed bed thermal energy storage," *Applied Energy*, p. 804-815.
12. **Ding, Y., Tong, L., Zhang, P., Li, Radcliffe, J., Wang, L.** 2016. "Chapter 9 – Liquid Air Energy Storage," *Storing Energy*, p. 167-181.
13. **Morgan, R., Nelmes, S., Castellucci, N., Brett, G.** 2013. "Method and apparatus for power storage". Patent: WO2014/006426.
14. **Yang, L.** 2006. "Development of the worlds largest above ground full containment LNG storage tank," 23rd World Gas Conference.
15. **Alekseev, D.** "Basics of Low-temperature Refrigeration," Linde AG, Münih
16. **Hwang, J., Lee, K.** 2014. "Optimal liquefaction process cycle considering simplicity and efficiency for LNG FPSO at FEED stafe," *Computers and Chemical Engineering*, p. 1-33.
17. **Morgan, R., Nelmes, S., Gibson, E., Brett, G.** 2015. "Liquid air energy storage-Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant," *Applied Energy*, p. 845-853.
18. **Sciacovelli, A., Navarro, H., Li, Y., Ding, Y.** 2016. "Liquid air Energy storage – Operation and performance of the first pilot plant in the World," *Proceedings of ECOS, Slovenia*.
19. **Gökçeer, T., Demirkaya, G., Padilla, R.** 2017. "Thermo-economic analysis of liquid air Energy storage system," *Proceedings of the ASME 11th International Conference on Energy Sustainability, USA*.
20. Highview Power. 2018. "Highview Power Plant," www.highviewpower.com/plants/, son erişim tarihi : 08.09.2018.