

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDA ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARININ VERİMLİLİĞİ

Şule KUŞDOĞAN

Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi

e-mail: kusdogan@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Elektrik genel olarak depolanamaz sayılmaktadır. Son zamanlarda artan ihtiyaçlar doğrultusunda, güç şebekelerinin verimliliğini arttırmak için enerji depolama sistemlerine, depolama tekniklerine ve modern depolama aygıtlarına odaklanılmıştır. Güç sistemlerinde geri alınabilir enerji ve depolamanın verimli ve etkili metotları için hala yoğun araştırmalar sürmektedir. Şebekelerin talep kısmında, pik zamanlarında ve üretim tesislerinin hızlı bir şekilde büyümesi ile birlikte bir artış yaşanmaktadır. Sistemde bazı durumlarda sorunlar gözlemlenmektedir. Son on yılda farklı sebeplerle, var olan şebekelerde yenilenebilir enerji uygulamaları hızlanmıştır. Ancak, yenilenebilir kaynaklarda, aralıklı ve gün boyunca değişen çıkış enerjisi vardır. Elektrik depolama teknolojileri, uygun şekilde tasarlandığında ve entegre edildiğinde bu değişkenliği düzeltmek için, daha sonraki bir zamanda elektriğin gönderilmesine müsaade eder. Elektrik kaynağı rüzgar, güneş gibi yenilenebilir kaynaklar olduğunda, bir yıl boyunca elektrik enerjisi için gerekli olacak enerji depolama kapasitesi veya ikisinin kombinasyonu, yıllık toplam talebin % 10 - % 20'sidir. Global biyokütle primer enerjisi potansiyeli, sürdürülebilir ve mevsimsel enerji taleplerini karşılayabilir. Mevsimsel depolama ihtiyaçlarını karşılamak için biyokütle ve hidrojen kullanıldığında, başka bir depolama olasılığı olan sıkıştırılmış hava ve yükseltilmiş su, önemli ölçüde daha düşük yer tutar. Bu bildiri, şebekeyi daha verimli, kararlı ve güvenilir yapmak için, uygun maliyetli olarak enerji depolama teknolojilerine yoğunlaşmaktadır. Bu bildiri, enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması, değişik enerji depolama aygıtlarının karşılaştırması ve sistem gereksinimleri ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle potansiyeli, enerji depolama, yenilenebilir enerji, mevsimsel enerji depolama, enerji depolama sistemleri.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların kullanılmadığı durumlarda, yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama kullanılmaktadır. Fosil yakıtların rezervlerinin sonuna yaklaşıldığında böyle sistemler önem kazanmaktadır. Rezervler çok büyük olmakla beraber, kullanım da oldukça büyüktür. Dolayısıyla, fosil yakıtların uzun süreli kullanımı da kaynaklarla sınırlıdır. Bu yüzden nükleer üretim fisyon enerji sistemlerine yönelim ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber, maliyet, güvenlik ve silahlanma kaygıları gibi nedenlerle bu teknolojinin gelişimi yavaşlamıştır. Bundan dolayı, yenilenebilir kaynaklardan enerji sağlama çalışmaları hızla devam etmektedir. Bu geçişler sayesinde, önemli ölçüde yabancı petrole olan bağımlılığımız azalacak ve sektörde

karbon salınım değerleri düşecektir. Gelecekte, hidrojen ve elektrik, birincil sıfır karbonlu ulaşım yakıtı haline gelecektir.

Enerji depolama, kısa süreli depolamada, birkaç günde saniyeler periyodu içinde, uzun dönem mevsimsel depolamada birkaç günden birkaç yıla kadar olan dönemlerde değişmektedir. Örneğin, güneş enerjisi hem kısa dönemde değişimlidir; hem de uzun dönemde yaz-kış gibi mevsimsel değişimlidir. Birçok durumda, birkaç saat için yükü düşürerek kısa vadeli değişimlerle başa çıkmak mümkündür. Daha sonraki bir zamanda kullanılacak evsel su ısıtma veya enerji depolama gibi. Çok daha uzun dönemlerde depolanan enerjide mevsimsel değişimler, çok daha büyük miktarlar içermektedir. Böylece depolama teknolojisi

seçiminde, boyut ve fiyat önemli olmaktadır.

Enerji depolama teknolojilerinin maliyetleri özetlenebilir. Büyük ölçekli enerji depolama ihtiyacı için, yenilenebilir enerji sistemlerinde güç iletiminde elektrikten daha çok hidrojen kullanımı önerilir. Depolama teknolojileri; özellikle mevsimsel depolamada, odunsu biyokütle, sıkıştırılmış hava, hidro pompalamalı ve hidrojen olarak sınıflandırılabilir.

Bu bildiriye, şebeke ölçekli enerji depolama teknolojileri sunulmaktadır (Bölüm II). Güneş, rüzgar veya her ikisinin kombinasyonundan elde edilen elektrik enerjisi için gerekli olan enerji depolama kapasitesinin bir hesabı yapılmaktadır (Bölüm III). Biyokütle kolayca depolanır, global potansiyel geçerliliği vardır. Orman ürünleri ve çevre olanakları için biyokütle, bölüm IV'de incelenmektedir. Bölüm V'te doğal gaz kullanılmayan verimli ekonomik sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi geliştirmenin önemi belirtilmektedir. Bölüm VI'da birkaç kısa süreli depolama teknolojisi için maliyet ve verimlilik sunulmaktadır. Mevsimsel depolama için, değerlendirme teknolojilerinde 10 EJ için verimlilik ve gerekli depolama birimleri bölüm VII'de sıkıştırılmış hava enerji depolama, hidrojen, yüksek su ve biyokütle için karşılaştırılmaktadır.

II. ŞEBEKE ÖLÇEKLİ ENERJİ DEPOLAMA

Depolama olanakları, artan talebe bağlı olarak, talep ve arz arasındaki dengeyi daha iyi sağlamak için uzun dönem uygulamaları ve dinamik performans geliştirmek için desteklenmeye, büyümeye devam etmektedir. Bundan dolayı, izin verilebilen artan kullanım, yenilenebilir kaynakların etkisini basitleştirip kolaylaştırmakta ve esneklik, güvenilirlik ve şebeke performansının genel verimliliğini arttırmaktadır. Şebeke ölçekli depolama, pompalamalı hidroelektrik depolama (PHS), sıkıştırılmış hava enerji depolama

(CAES), bataryalar, volanlar, süperiletken magnetik enerji depolama (SMES) ve ultrakapasitör gibi farklı teknolojileri kapsar. Çeşitli uygulamalar için bu teknolojilerin açıklamaları ve analizleri incelenmektedir. Tipik şebeke ölçekli enerji depolamanın temel karakteristikleri aşağıda tanımlanmıştır:

- **Enerji depolama kapasitesi (kWh):** depolanan enerjinin miktarı.
- **Enerji yoğunluğu (Wh/L):** birim hacimdeki nominal depolama, hacimsel enerji yoğunluğu gibi.
- **Güç yoğunluğu (W/L):** birim hacimdeki faydalı maksimum güç.
- **Şarj/deşarj süresi:** depolamanın tam şarj/deşarj için gerekli süresi.
- **Tipik güç çıkışı (MW):** tipikdeşarj süresindedeşarj edilen gücün miktarı.
- **Cevap zamanı:** Güç çıkışını sağlayarak depolamaya başlamak için gerekli zaman.
- **Yaşam süresi (yıl veya devir):** Bir depolama teknolojisinin çalışmaya devam edeceği yıl veya döngüler, özel depolama teknolojisinin devirleri, yıllar açısından değerlendirmeye bağlıdır.
- **Çevrilmiş verimlilik (%):** Her bir çevrimde sistemde şarj için kayıplar dahil olmak üzere, gerekli enerjinin sistemdekideşarj oranı.
- **Sermaye maliyeti (\$/kW veya \$/kWh):** Enerji depolama kapasitesi (\$/kWh) veya güçdeşarjının her biriminde enerji depolamanın yatırım maliyeti (\$/kW). Genellikle kabul edilen diğer enerji depolama karakteristikleri şunlardır: donanım, teknolojinin fiyatı, santral fiyatları, çevresel faktörler.

Tablo 1, kurşun asit (L/A) bataryalar, lityum iyon(Li-ion) bataryalar, sodyum sülfür bataryalar (NaS), vanadyum redoks bataryalar (VRB), süper kapasitörler, SMES, yüksek güçlü volanlar, PHS ve CAES için performans karakteristiklerini vermektedir [1],[2],[3],[4]. Bu örnekler, farklı şebeke ölçekli depolama teknolojilerinin farklı geniş aralıklarını vurgular. Şebeke servislerinin sayısını sağlayan enerji depolamanın yenilenebilir kaynaklardan güç (kısa süreli) olarak zaman ölçeği veya enerji (uzun süreli) servisleri olarak genişçe sınıflandırılarak gerekli kaynaklar elde edilerek sağlanabilir. Aşağıda, genel şebeke servislerini enerji depolama ile sağlayan güç ve enerji uygulamaları sınıflandırılmıştır:

- **Güç kalitesi servisleri:** Müdahale veya kesinti olmadan elektrik enerjisinin hizmet desteği kullanımı. Genellikle güç kalitesi sınırları içinde gerilim seviyelerini koruma ile ilgilidir.

- **Geçici kararlılık hizmetleri:** Sistemdeki ani bozukluklarda (büyük potansiyelde) şebekenin senkron çalışmasını korumak için yardımcı olur.

- **Dönme rezervi:** 10 dakika içinde elektrik talebini karşılar, çevrim içi rezerv kapasitesini sağlar.

- **Gerilim kontrolü:** Ana spesifik gerilim seviyesini muhafaza eden ve reaktif gücü absorbe eden veya üretilen gerilimin kontrolünü sağlar.

- **Enerji arbitrajı:** Pik yüklere hizmet eden, pik olmayan saatler sırasında üretilen, kullanılan gücün arbitrajı, pik olmayan zamanlarda enerji depolama şarjı veya yük kaymasını sağlamak için pik yükler arasında deşarj.

- **Yük izleme (dengeleme):** Sistemde ana güç dengesini sağlamak için talep dalgalanmalarında yük çıkışını ayarlamak.

- **Kapasite:** Pik güç talebini karşılamak için enerji kapasitesini sağlamak.

- **Tıkanma takviyesi:** Elektrik için alternatif yollar sağlayarak hatların kapasitesinin artması ile iletim sistemlerinde şebekede akışın azalması.

- **İyileştirme ertelenmesi:** Üretim ya da iletimin ertelenmesi; örneğin sistemde enerji depolamayı kullanarak yükü azaltmak.

Tablo 2’de enerji depolama teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları verilmektedir [1].

Tablo 2. EDS’nin avantaj ve dezavantajları

	Avantajlar	Dezavantajlar
Kurşun asit batarya	Düşük fiyat, yüksek geri kazanım	Düşük enerji yoğunluğu, sınırlı deşarj derinliği
Lityum İyon batarya	Yüksek verim, yüksek enerji yoğunluğu	Fiyat, fazla ısınma, sınırlı deşarj derinliği
NaS batarya	Yüksek enerji yoğunluğu, hızlı cevap, verim	Güvenlik
VRB akış batarya	Yüksek deşarj oranı, yüksek devir toleransı	Düşük enerji yoğunluğu, düşük verim
Ultra-kapasite	Hızlı cevap zamanı, yüksek güç yoğunluğu	Fiyat
SMES	Yüksek verim	Fiyat, düşük enerji yoğunluğu
Yüksek güçlü volan	Hızlı cevap zamanı, düşük bakım, yüksek devir	Fiyat, gerilme direnci sınırlamaları
Pompalı hidro	Hızlı cevap zamanı, geniş kapasite	Coğrafik yapı
CAES	Hızlı cevap zamanı	Düşük verim, coğrafik yapı

III. MEVSİMSSEL DEPOLAMA

Mevsimsel depolamanın gerekli büyüklüğü, birçok faktöre bağlıdır ve bu yüzden tespit etmek zordur. Bununla beraber, gerekli mevsimsel elektriksel depolama, güneş, rüzgar ve hidrojen üretiminden yapılabilir. Elektrik enerjisi tüketimi de, aylık verilere dayanarak hesaplanır. Örneğin Amerika’da belli bir periyod için güneş kolektörlerinden gelen elektrik enerjisi, yıllık tüketimin % 21-% 27’sini depolamayı sağlamaktadır [5]. Yine gerekli yıllık tüketimin % 5 - % 13’ü rüzgardan; % 7 - % 16’sı hibrid (% 50 güneş+% 50 rüzgar)

olarak yapılması gereklidir [5]. Gerçek değer, havaya, bölgeye, arz ve talebe, iletim sistemine, v.b. bağlıdır. Mevsimsel depolamanın oldukça büyük olması istenmektedir. Amerika'da 10 EJ sağlayan depolamanın, yıllık tüketimin % 10'unu karşılaması beklenmektedir [5].

Mevsimsel depolama ve üretim kapasitesi arasında bir ticaret vardır. Örneğin, 2007'de rüzgardan sağlanan bütün enerji, üretim kapasitesini % 51 arttırmıştır [5]. Böylece mevsimsel depolamaya ihtiyaç kalmamıştır. Eğer Üretim kapasitesi, yıllık tüketimi üretmek için yeterli olmak zorundadır. Aylık talep ve kaynak, aydan aya değişir; üretimde bazı aylarda, arz-talep dengesinde, daha az talep olabilir. Yıllık talebi karşılayan üretim, mevsimsel depolama kapasitesi ile aylık dalgalanmaları tolere edebilir. Eğer üretim kapasitesi arttırılırsa, gereken depolama miktarı azaltılır. Bazı aylarda, aşırı üretim olacaktır. Depolamanın optimal miktarı, depolamanın birim fiyatına, üretimin birim fiyatına, mevcut üretim kapasitesi ile gerekli depolamanın değişimine, fazla üretime bağlıdır. Her iki şekilde, mevsimsel depolama veya fazla üretim kapasitesi veya ikisinin karışımı, aylık talep ve aylık üretim sonuçlarında arasındaki denge eksikliği, bir maliyet ile sonuçlanır. Aşırı üretim varsa, iyi bir depolama yapılabilir. Önemli olan optimizasyonu sağlamak ve mevsimsel depolama ile, aylık talep ve üretim arasındaki dengeyi sağlamaktır.

IV. BİYOKÜTLE SEÇENEĞİ

Fosil enerjide arzu edilen özelliklerden biri, hava ile reaksiyona girdiğinde, sahip olduğu yüksek enerjiyi bırakması ve süresiz depolanabilen kimyasal yakıt formuna girmesidir. Gerçekte, kolaylıkla depolama ile talepteki mevsimsel değişiklikler karşılanmalıdır. Yenilenebilir enerji sisteminde, kömür, petrol ve doğal gaz biyokütle ile değiştirilebilir olarak düşünülebilir ve üretimlerden sıvı ve/veya gaz yakıtlara dönüştürülebilen, yanabilir

katı olarak geçerlidirler. Böyle bir sistemde, enerji depolama, pahalı olmayan tanklarla yapılabilir.

A. Biyokütle Primer Enerji Potansiyeli

Yıllık global primer enerji tüketimi 495 EJ (Amerika'da 100 EJ), yakıt ve elektrik için yaklaşık 7 EJ ve yanan odun kullanıldığında sadece 38 EJ sağlarken; biyokütle, kömür, petrol ve gazdan yaklaşık 426 EJ sağlanır [5]. Primer enerji tüketiminin, 2030'da 712 EJ'e artacağı tahmin edilmektedir. Belli ki biyokütle kullanımı artık fosil yakıtlardan elde edilen tüm primer enerji yerinde olsaydı, biyokütle büyük ölçüde genişletilmiş olurdu. Primer enerji miktarının potansiyeli olarak biyokütle, gıda ve orman üretimini biyoçeşitliliği etkilemeden her yıl üretilebilir. Tahminlere göre, 2050 yılında, biyoenerji potansiyeli 370-450 EJ arasında olabilir.

Biyoenerji potansiyeli 2100'de çok değişiklik gösterebilir. Düşük teknoloji (GNP = 243 trilyon \$), ve yüksek nüfus (15 milyar) ile 395 EJ; yüksek teknoloji (GNP = 529 trilyon \$), ve azalmış nüfus (7 milyar) ile 1115 EJ olarak hesaplanmaktadır. Sırasıyla birinci senaryo 1895 Mha, ikincisi, terk edilmiş tarım arazisi 830 Mha gerektirir. Bu tahminler arasında dikkate değer bir belirsizlik vardır. Biyokütle primer enerji potansiyeli, beklenen primer enerji tüketiminden daha az ise, mevsimsel depolama yeterli olabilir. Mevsimsel depolama gereksinimi, yıllık tüketimin % 10'u kadardır [5].

B. Diğer Koşullar

Sıvı yakıtın üretiminde, ulaşım için biyokütle potansiyel olarak güçlü bir taleptir. Çekici taşıma sistemleri için adaylar, elektrik ve hidrojenidir.

Biyokütlenin temel yiyecek bileşenleri ayrılmasıyla, gıda üretiminde rekabet azaltılabilir, şeker v.b. enerji

bileşenlerinden, proteinler v.b. Örneğin, günümüzde mısırdan, hayvan yeminden etanol yakıtı üretimi ayrılır ve hayvanlar beslenir. Ayrıca vejetaryen diyetlere yönelimle, hayvan üretimi için toprak kullanımını azalacaktır. Bununla beraber şu anda genellikle pek çok kişi yetersiz beslenmekte ve artan gıda üretimi için, ek arazi tahsisine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin daha fazla potansiyel üretim biyoküttele tarım alanı terk edildiğinde, ekonomik talep olduğunda, gıda üretimi için bu toprakları geri getirmek mümkün olmazdı. Ekonomik sistemdeki eşitsizlikler, enerji için biyokütle üretiminden bağımsızdır, açıkçası yiyeceğin dağıtımındaki bölümde önemli rol oynar.

CO₂ emisyonları ile ilgili olarak, biyokütle yakıldığında CO₂ açığa çıkardığını kabul etmek gerekir. Tabii ki atmosferden CO₂'nin emilmesiyle biyokütle yeniden yetişme özelliğine sahiptir. Yıllık bitkiler bu yerleşme ile hızlı, fakat ormanların büyümesi bir yüzyıl veya daha uzun sürebilir. Bununla birlikte, CO₂ emilimleri ormanlar tarafından sağlanır; bu oranın azaltılması, bitki yetiştirmede pozitif etki yapamaz. Bitki kaynaklarının büyümesi ve kaldırılması arasında bir denge sağlanmalıdır, ama buna ulaşmak muhtemelen zor olmaktadır. Hatta ölü ve ölmekte olan ağaçların kaldırılması, besinler de kaldırıldığı için negatif bir etki yaratmaktadır. Bu hat boyunca, ormancılık nadiren gübre kullanımını içerecek şekilde uygulanmaktadır.

Biyoyakıtların içerisindeki karbon, bitkilerin havadaki karbondioksiti parçalaması sonucu elde edildiği için, biyoyakıtların yakılması, Dünya atmosferinde net karbondioksit artışına neden olmaz. Bu nedenle, pek çok insan atmosferdeki karbondioksit miktarının artışına engel olabilmek için, fosil yakıtlar yerine biyoyakıtların kullanılması gerektiği görüşünü savunmaktadırlar. Biyokütle, besin zincirinde kullanılır. Besin zincirinde, üreticilerden tüketicilere doğru gidildikçe,

biyokütle azalır, biyokütlesi en çok olan canlılar üreticilerdir.

C. Isıtma İçin Biyokütle

Odunsu biyokütle, ısıtma talebi, güçlü mevsimsel değişim, kolayca depolama amaçları için kullanılmaktadır. Biyokütlenin kullanımı, büyük ölçüde doğalgaz ve fuel oil ile yer değiştirmiştir. Amerika'daki konut sektöründeki doğal gaz Ocak 2008'de 1.0 EJ/mo iken, Ağustos 2008'de 0.105 EJ/mo olarak değişmektedir. Ticari sektörde Ocak 2008'de 0,55 EJ/mo iken, Ağustos 2008'de 0,13 EJ/mo olarak değişmektedir. Bu etkiler, ısıtma ve klima ihtiyacını yansıtmaktadır. 2008'de, konut ve ticari sektörde doğal gaz tüketimi 9,23 EJ'dur [5]. Bazı ülkelerde ormanlar, ısıtma için mevsimsel depolama sağlayabilirler. Diğer kullanımlar için orman üretimi kullanımı, elektrik üretimi gibi, kısıtlama gerektirebilir. Bu durumda, kombine ısı ve güç üretimi hafifletilebilir.

V. SIKIŞTIRILMIŞ HAVA ENERJİ DEPOLAMA

Kurulan süreçte, basınç ile arttırılan sıcaklığa sebep olarak hava sıkıştırılır. Depolama sırasında, sıcaklık düşüşü ve ısı kaybı olur. Gaz türbini vasıtasıyla genişleme sırasında kazanılan artışla doğalgazın yanmasındaki ısı toplanarak, sıcaklığı düşürmek için kullanılır. İlk santral, 1978 Huntorf, Almanya'da (290 MW kapasite) ve ikincisi Alabama (ABD)'da 1990'larda kuruldu. Her ikisi de yer altı depolamayı içeriyordu. Şu anda da Avrupa Birliği içindeki bir çalışma gurubu ile doğalgaz elimine edilerek izotermal sıkıştırma ve genişletme yaklaşımı amaçlanmaktadır. Sıkıştırma sırasında oluşan ısı depolanmaya çalışılmakta ve hava türbininde genişleme sırasında tekrar ısıtılarak depolanan ısının kullanılması planlanmaktadır. İkinci bir yaklaşım ise, sıkıştırma ve genişleme sırasında, direkt olarak soğutma ve ısıtmanın gerçekleştirildiği bir yaklaşımdır.

Yaklaşımlar, izotermal genişlemeye ilaveten ısı ile genişleme aşaması, izotermal basınç ile ara soğutma ile basınç aşamasıdır[5].

Sıkıştırılmış hava, yeraltında mağaralarda depolanabilir. Dolayısıyla büyük ölçekli depolama mümkündür. Geniş ölçekli enerji depolama için tercih edilen depolama teknolojilerinden biri de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla, enerji depolamadır.

VI. DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN FİYAT KARŞILAŞTIRMALARI

Birkaç depolama tekniğinin fiyatı ve verimi tablo 3'de sunulmaktadır[5]. Doğalgaz ile hava kompresörlü enerji depolama, hidro pompalı sistemler; hidrojen sistemlerine göre önemli ölçüde büyük maliyetler sunar. Isı enjeksiyonu olmadan hava kompresörlü enerji depolama sisteminin maliyet tahminleri henüz yayınlanmamıştır. Tablo 3'deki değerlerde, depolanan enerji hafta içi her gün 6 saat için 50 MW/h oranında aşağıya çekilmiştir. Daha sonra kalan zamanlarda kısa süreli depolama olarak kullanılır. Temel olarak pompalamalı hidro, günlük olarak kullanımda tercih edilen bir sistem olmaktadır. Yeraltında düşük rezervuar olduğunda, yenilenebilir enerji sistemleri yaygın olarak kullanılacaktır. Söz

konusu mevsimsel depolama olduğunda, uygulanamaz.

Tablo 3'deki fiyatlar, rezervuarlı pompalı hidroelektrik sistemler içindir, rezervuar yılda yalnızca bir kez dolaşılır. Mevsimsel depolama için günlük olarak doldurulur ve boşaltılır. Bu nedenle, insan yapımı rezervuarlar ile ilişkili olarak büyük maliyet ödemek zor olmaktadır.

VII. MEVSİMSEL DEPOLAMA İÇİN GEREKLİ DEPOLAMA HACMİ KARŞILAŞTIRMASI

A. Sıkıştırılmış Hava

Sıkıştırılmış hava hacmi enerjisini belirli bir miktarda depolamak için aşağıdaki izotermal ilişkiden hesap yapılmaktadır [5]:

$$V = E / (p \ln(b))$$

Burada E depolanan enerji; p çevresel basınç; b sıkıştırma oranı.

$E = 10 \text{ EJ}$ (ABD enerji tüketiminin % 10'u), $p = 1 \text{ atm.}$, ve $b = 300$.

$$1 \text{ atm.} = 101.3 \times 10^{-15} \text{ EJ/m}^3$$

$$V = 10 \text{ EJ} / (101.3 \times 10^{-15} \text{ EJ/m}^3 \times 300 \times \ln(300))$$

$$= 5.78 \times 10^3 \text{ m}^3 = 5.78 \text{ km}^3$$

Gerekli hacim, % 80 verimle bir genişleme ile $5.78 / 0.8 = 7.225 \text{ km}^3$. Bu gerekli minimum hacim, izotermal işletim ile hesaplanabilir.

Tablo 3. Fiyat ve verim olarak depolama özeti [5],[6].

Teknoloji	sent/kWh (elektrik fiyatı)	Verim %
H2O elektroliz, yer üstü H2 depolama+Yakıt pili	28	34
Aynı, ancak yerin altında H2 depolama	24	35
H2 genişleme/yanmalı türbin ile aynı	19	48
NiCd Batarya	83	59
NaS Batarya	25	77
Vanadyum batarya	28	72
Pompalamalı hidro	13	75
Hava kompresörlü enerji depolama	10	53

Anahtar parametreler: Yaşam: 40 yıl

Faiz oranı: % 10, Borç finansmanı: % 100

Pik dışı yenilenebilir elektrik fiyatı: 3,8 sent/kWh

Doğalgaz fiyatı: 7 \$/MMBTU

Orta durumda yakıt hücresi verimliliği değerleri= % 50, elektroliz = % 68, birleştirildiğinde= % 34 J.

B. Sıkıştırılmış Hidrojen

Yanma ısısı, 120 MJ/kg, ve 300 bar yoğunlukta 20 kg/m³'tür. Bundan dolayı, yanma üzerine çıkan ısı 2.4x10⁶ kJ/m³. Depolanan hidrojen, sıkıştırılmış hava ile karıştırılır ve bir genişleme/yanma türbini ile yakılır. Hidrojen yanmalı türbin için, elektrik üretiminde depolanan enerjiden verim % 70 varsayılır, depolama enerjisinin her m³'ünden elde edilen çıkış enerjisi 1.68x10⁶ kJ'dür. Dolayısıyla, gerekli depolama hacmi 5.95 km³'tür.

C. Yüksek Su

1 kg'ı 1000 m yükseltmeye çalışmak için = 9.81 x 10³ Nm = 9.81 kJ gereklidir. Bu nedenle, gerekli su kütlesi, 10 EJ/9.81 kJ/kg = 1.02 x 10¹⁵ kg'dir. Suyun hacmi 1.02 x 10¹⁵ kg/1 x10³ kg/m³ = 1020 km³. % 90 verimde, bu 1133 km³'tür. Üst ve alt iki rezervuar gerekli olduğundan, sonuç 2266 km³ olur.

D. Biyokütle

$$20 \text{ MJ/kg} \times 600 \text{ kg/m}^3 = 12 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3$$

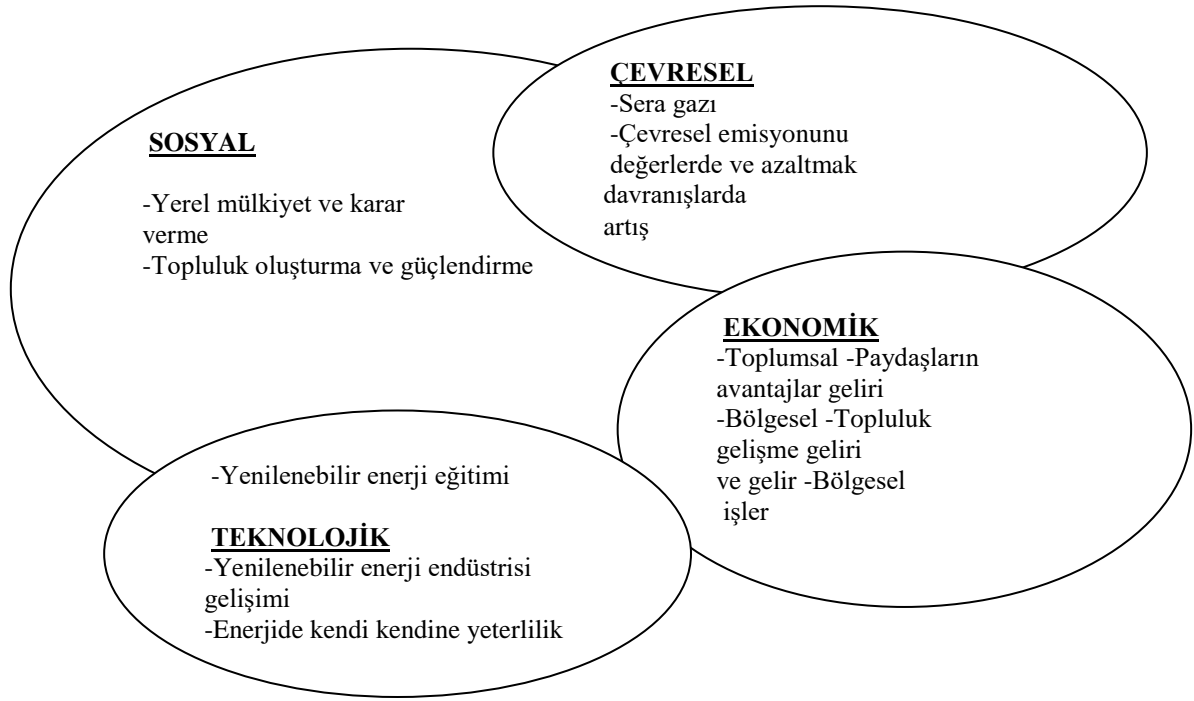
$$10 \text{ EJ}/12 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3 = 8.3 \times 10^8 \text{ m}^3$$

$$= 0.83 \text{ km}^3$$

$$\% 30 \text{ verimde} = 0.83 / 0.3 = 2.77 \text{ km}^3$$

Tablo 4. 10 EJ için depolama hacmi karşılaştırması

Teknoloji	Verim %	Hacim km ³	Depolama Sermaye Fiyatı \$/kWh
300 atm. Hava sıkış.	80	72	10
300 atm. Hidrojen sıkış.	70	6	0.058- 0.029
1000 m yükselt. su	90	2300	16.8
Odun	30	2.8	-



Şekil 1. Yenilenebilir enerji üretiminin küresel faydaları

Bu sonuçlar tablo 4’de, depolama sermaye maliyet tahminleri ile birlikte verilmektedir [5]. Odunsu biyokütle kullanımının avantajı dikkat çekicidir, hidrojen en iyi ikincidir, hava kompresörlü enerji depolama üçüncü ve yüksek su en zayıftır.

Yenilebilir enerji topluma çeşitli faydalar sağlar. Karbondioksit azaltılmasına ek olarak, potansiyel istihdam olanakları ile hükümetlerin yenilenebilir enerji politikaları, yerel faydalar ve sağlık faydaları da dahil olmak üzere bir dizi hedefleri karşılamak için özellikle kırsal alanlar için erişim, enerji güvenliğinin artırılması ve enerji teknolojilerinin portföyünü çeşitlendirerek sosyal ve ekonomik kalkınmanın gelişmesine katkı sağlamaktadır. Şekil 1’de genel olarak tüm yenilenebilir enerji üretiminin çevresel, sosyal, ekonomik ve teknolojik faydaları sunulmaktadır [7].

VIII. SONUÇLAR

Günümüzde, arz ve tüketim modellerine göre, enerji depolama kapasitesi, toplam yıllık talebin % 10-% 20 olduğu tahmin edilmekte, güneş rüzgar veya her ikisinin

kombinasyonundan elektrik enerjisi sağlanması gerekmektedir.

Global biyokütle primer enerji potansiyeli, fosil yakıtların tüm kullanımını değiştirmek için yeterince büyüktür, bu ancak mevsimsel enerji taleplerini karşılayabilir. Yarı izotermal işletim, doğal gazın yanması ısı enjeksiyonu olmadan sıkıştırılmış hava enerji depolamada, % 60 - % 70 bir verim elde etmek için gerekir. Bir yarı izotermal sistemin yapımında, maliyet ve verimliliğin deneysel tespiti, yüksek önceliğe sahiptir. Mevsimsel depolama için, bu teknolojileri ele almak amacıyla, 10 EJ enerji depolama gereken depolama hacmi ve verim, CAES, hidrojen, yüksek su ve biyokütle için karşılaştırılmıştır. Biyokütle ve hidrojen için gerekli hacim, basınçlı hava veya yükseltilmiş su için gerekene göre önemli ölçüde daha küçüktür. İletim tesislerinin izin ve inşa edilmeleri uzun zaman alabildiği durumlarda, yenilenebilir enerjinin entegrasyonuna ve daha fazla uygulamalarına önerilen enerji depolama teknolojileri uygun şekilde tasarlanabilir. Uygulanan efektif çözümlerle pik talep ve iletim kapasitesinin büyüme oranları arasındaki farkın çözümü depolama ile

üretilek enerji depolama teknolojilerinin hızla ilerlemesi sağlanabilir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin ihtiyaçları için geçiş sistemleri gün geçtikçe önem kazanacaktır. Gelişmiş elektrik enerji depolama teknolojileri, düzgün kullanıldığı zaman, sisteme çevresel, ekonomik ve enerji verimliliği açısından avantajlar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Castillo, D.F.Gayme, “Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration : A survey”, Energy Conversion and Management, 87, p.885-894, 2014.
- [2] X.Luo, J. Wang, et al, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, Applied Energy, 137, p.511-536, 2015.
- [3] T. Kousksou, P. Bruel, “Energy Storage: Applications and challenges”, Solar energy Materials&Solar Cells, 120, p.59-80, 2014.
- [4] B. Zakari, S.Syri, “Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, p.569-596, 2015.
- [5] A. Converse, “Seasonal Energy Storage in Renewable Energy System”, Proceeding of the IEEE, Vol.100, No.2, p.401-409, 2012.
- [6] T. Mahlia, “A review of available methods and development on energy storage : technology update”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, p.532-545, 2014.
- [7] O.Ellabban, H. AbuRub, “Renewable energy sources: Current status, future prospects and their enabling technology”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, p.748-764, 2014.