

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN
ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM TASARIMI,
PLANLANMASI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Mehmet BOLAT

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cenk YAVUZ

Kasım 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLER İÇİN
ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM TASARIMI,
PLANLANMASI VE TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Mehmet BOLAT

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 11/11/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mehmet BOLAT

11.11.2021

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Cenk YAVUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Siirt Üniversitesi Kimya Mühendisliği Öğr. Üyesi Doç. Dr. Mustafa KAYA'ya, Bölümümüz öğretim üyeleri Doç. Dr. Sabit HOROZ'a, Dr. Duygu Elma KARAKAŞ'a, Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR'e ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Saadettin AKSOY'a teşekkür ederim. Son olarak her zaman ve her şekilde yanımda olan canım aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler ve Literatür Özeti	1
1.2. Problemin açıklaması.....	4
1.3. Çalışmanın amacı.....	8
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
2.1. Enerji Depolama Sistemleri	11
2.1.1. Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.....	21
2.1.1.1. Mekanik enerji depolama sistemleri	23
2.1.1.1.1. Hidroelektrik enerji depolama sistemleri	24
2.1.1.1.2. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi.....	28
2.1.1.1.3. Volan enerji depolama	35
2.1.1.1.4. Mekanik enerji depolama sistemlerinin analizi	39
2.1.1.2. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri	40
2.1.1.2.1. Akış pilleri.....	43
2.1.1.2.2. İkincil (Şarj edilebilir) piller	50

2.1.1.2.3. Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin analizi	84
2.1.1.3. Kimyasal enerji depolama sistemleri	86
2.1.1.3.1. Kimyasal enerji depolama sistemlerinin analizi	95
2.1.1.4. Elektrik enerji depolama sistemleri.....	96
2.1.1.4.1. Süper kapasitör enerji depolama sistemleri.....	100
2.1.1.4.2. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri	107
2.1.1.4.3. Elektrik enerji depolama sistemlerinin analizi	111
2.1.1.5. Termal enerji depolama sistemleri	111
2.1.1.5.1. Termal enerji depolama sistemlerinin analizi	125
2.1.1.6. Hibrit enerji depolama sistemleri	125
2.1.1.6.1. Hibrit enerji depolama sistemlerinin analizi ...	136
 BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	137
3.1. Materyal	138
3.2. Yöntem.....	139
3.2.1. Kullanılan araç-gereçler	139
3.2.2. Kullanılan kimyasal çözeltiler.....	139
3.2.3. Mısır sapı atığından hidrojen üretimi için Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün hazırlanması	141
3.2.4. Mısır sapı atığından süper kapasitör elektrotlarının hazırlanması	143
3.2.5. Analizler	145
3.2.5.1. Mısır sapı-kalay (sn) destek malzemesinin hcl ile muamele edilerek sentezlenen katalizörün hidrojen üretiminde kullanımı	145
3.2.5.1.1. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) katalizörünün karakterizasyonu	145
3.2.5.1.2. Asit konsantrasyonunun metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi.....	149

3.2.5.1.3. Metal konsantrasyonunun metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi.....	151
3.2.5.1.4. Farklı yanma sürelerinin metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi.....	152
3.2.5.1.5. Farklı yanma sıcaklıklarının metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi.....	153
3.2.5.2. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) destek malzemesinin süper kapasitörler için elektrot malzemesi olarak kullanımı	154
3.2.5.2.1. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) süper kapasitör elektrotunun elektrokimyasal karakterizasyonu	154
3.2.6. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) çift işlevli malzemenin HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilen bir mikro şebeke tasarımında hibrit enerji depolama sistemi olarak kullanılması	158
3.2.6.1. Türkiye’de Siirt ili için planlanan hibrit enerji sisteminin HOMER Pro ile modellenmesi.....	158
3.2.6.1.1. Homer Pro yazılımı.....	160
3.2.6.1.2. PVsyst yazılımı	164
3.2.6.1.3. Siirt lokasyonu	165
3.2.6.1.4. Siirt ili için Hibrit enerji sistemi tasarımda yer alan yük profili, enerji üretim ve depolama sistemleri	165
 BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI	184
4.1. Maliyet özeti ve nakit akışı	184
4.2. Tekno-ekonomik analiz	186
4.3. Yakıt pili enerji depolama sistemi benzetim sonuçları	190
4.4. Süper kapasitör enerji depolama sistemi benzetim sonuçları	191
4.5. Hidroelektirik enerji depolama sistemi benzetim sonuçları.....	192
4.6. Hidro-solar enerji depolama sistemi benzetim sonuçları.....	192

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE SONUÇ	197
-------------------------	-----

KAYNAKLAR	200
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	237
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AB	: Akış pilleri
CNT	: Karbon nanotüpler
CV	: Döngüsel voltametri
DMYP	: Direkt methanol yakıt pilleri
EA	: Elektrikli araçlar
EBM	: Enerji birim maliyeti
ECYP	: Erimiş karbon yakıt pilleri
EDLC	: Elektriksel çift katmanlı kapasitör
EIS	: Empedans spektroskopisi
ESS	: Enerji depolama sistemi
FAYP	: Fosforik asit yakıt piller
FTIR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
GCD	: Galvanostatik şarj/deşarj
GSR	: Güneş radyasyon değerleri
HDS	: Hidroelektrik enerji depolama sistemi
HPR	: Hidrojen üretim hızı
HSS	: Hibrit enerji depolama sistemi
İB	: İkincil piller
KOYP	: Katı oksit yakıt pilleri
NBD	: Net bugünkü değer
NMP	: N-Metil-2-pirolidon
NREL	: Amerikan ulusal enerji laboratuvarı
PCM	: Faz değiştiren malzemeler
PDMYP	: Proton değişim membran yakıt pilleri
PVDF	: Polyvinylidene flüoride
RAB	: Redoks akış pilleri

RES	: Rüzgâr enerjisi sistemleri
RYP	: Rejenaratif yakıt pilleri
SC	: Süper kapasitör
SHDS	: Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi
SMEDS	: Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi
TEDS	: Termik enerji depolama sistemi
UPS	: Kesintisiz güç kaynağı
VAKA	: Valf ayarlı kurşun asit piller
XRD	: X-ışını güç difraktometresi
YP	: Yakıt pili



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 24 saatlik bir süre boyunca tüketici enerji talepleri (yük profili). Üstteki şekil, tipik, verimsiz bir enerji depolama uygulamasını göstermektedir. Alttaki şekilde olduğu gibi enerji depolamanın nihai amacı ise yük dengelemedir	14
Şekil 2.2. A. Kurulu ESS'lerin toplam kapasitesi (MW). B, Diğer tüm ESS biçimlerinin kapasiteleri (MW)	19
Şekil 2.3. Farklı ülkelerin ESS'lerinin şebekeye bağlı toplam kapasitesi (MW) ...	19
Şekil 2.4. Enerji depolama sistemleri ragone grafiği	20
Şekil 2.5. Enerji depolama sistemleri sınıflandırılması	22
Şekil 2.6. Tablo 2.1.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak mekanik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm mekanik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır.....	24
Şekil 2.7. HDS genel şeması	25
Şekil 2.8. Kapalı döngü HDS genel akış şeması	25
Şekil 2.9. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi	30
Şekil 2.10. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi akış şeması	31
Şekil 2.11. Volan enerji depolama sistemi ve akış temel şeması.....	36
Şekil 2.12. Temel bir elektrokimyasal enerji depolama sisteminin çalışma prensibi	41
Şekil 2.13. Farklı elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin şebekeye bağlı kurulu güç dağılımı.....	42
Şekil 2.14. Akış pilleri enerji depolama sistemi genel şeması	43
Şekil 2.15. Vanadyum redoks akış pilleri depolama sistemi genel şeması.....	45
Şekil 2.16. Zn-Br redoks akış pilleri depolama sistemi genel şeması.....	47

Şekil 2.17. Tablo 2.4.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak akış pilleri enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm akış pilleri enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır.....	48
Şekil 2.18. Tablo 2.5. ve Tablo 2.6.'daki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak İB pillerdeki kimyasal enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi şeklinde gösterilen HDS, diğer tüm İB enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır.....	51
Şekil 2.19. Basit bir Kurşun asit (Pb-asit) enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı: a) Şarj esnasında b) Deşarj esnasında ve c) KA prototipi	59
Şekil 2.20. Basit bir Nikel bazlı enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı: a) Şarj esnasında b) Deşarj esnasında ve c) Nikel nazlı pil prototipi	61
Şekil 2.21. Basit bir $ZnBr_2$ enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı ..	66
Şekil 2.22. Basit bir Çinko-hava enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı a) Deşarj esnasında b) Şarj esnasında c) Çinko-hava enerji depolama sistemi prototipi	72
Şekil 2.23. Basit bir Sodyum sülfür enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı a) Şarj/deşarj esnasında b) Na-S teknoloji depolama sisteminin boru tipi tasarımı c) Na-S enerji depolama sistemi prototipi.....	74
Şekil 2.24. ZEBRA enerji depolama sisteminin basit prototip tasarımının şeması	78
Şekil 2.25. Lityum iyon enerji depolama sisteminin kimyasal tepkimelerini ve yapısını a) Şarj/deşarj esnası b) Silindirik bir Li-iyon prototip tasarımının görünümü.....	82
Şekil 2.26. Tablo 2.10.'daki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak YP pillerdeki kimyasal enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm yakıt pilleri enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır.....	87

Şekil 2.27. Yakıt pili enerji depolama sisteminin kimyasal tepkimeleri ve yapısı (yeniden düzenlenmiştir)	92
Şekil 2.28. Farklı YP teknolojilerine ait çalışma sıcaklığı-güç çıkışı grafiği	93
Şekil 2.29. PDMYP enerji destekleme sistemi şeması	94
Şekil 2.30. Tablo 2.11.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak elektrik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm elektrik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır	98
Şekil 2.31. Basit bir çift katmanlı SC enerji depolama sistemi şeması ve eş devresi	103
Şekil 2.32. Süper kapasitöre air elektrokimyasal performans eğrileri a) İdeal bir süperkapasitör CV eğrisi b) Şematik EIS eğrisi çizimi c) İdeal bir süperkapasitör GCD eğrisi	106
Şekil 2.33. Basit bir süper iletken manyetik enerji depolama sistemi şeması	109
Şekil 2.34. Genel bir TEDS şeması	113
Şekil 2.35. Çeşitli faz değişim malzemelerinin şematik gösterimi	115
Şekil 2.36. Tablo 2.15.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak TEDS'lerin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm elektrik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır	117
Şekil 2.37. PCM'ler için sıcaklıkla- enerji girişi (solda) ve gizli ve duyulur ısı depolama miktarının sıcaklıkla değişimi (sağda)	118
Şekil 2.38. Akifer enerji depolama sistemi şeması	121
Şekil 2.39. Kimyasal ve sorpsiyon depolama sistemlerinin sınıflandırılması	122
Şekil 2.40. Termokimyasal enerji depolama döngüsünde yer alan süreçler	123
Şekil 2.41. Pil ve SC'den oluşan bir HSS mimarisi	130
Şekil 2.42. Wang ve ark. tarafından önerilen HSS mimarisi	130
Şekil 2.43. Hibrit ESS'nin şematik yapıları (a) doğrudan bağlantı ve (b)-(d) dolaylı bağlantı	131

Şekil 2.44. HSS topoloji sınıflandırması (a) pasif topoloji ve (b) yarı- aktif topoloji (c) seri aktif topoloji (d) paralel aktif topoloji (e) izole aktif topoloji (f) çoklu topoloji	135
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan materyal ve yöntemin akış şeması.	138
Şekil 3.2. HSS tasarımında gerçekleştirilecek işlemler a) Mısır sapının kimyasal malzemelerle karıştırılması, b) Kurutma işlemi, c) Yakma işlemi, d) Yıkama işlemi, e) Numunenin toz haline getirilmesi f) Katalizör ve elektrotun deney için hazırlanması, g) Elektrotun süper kapasitör test kiti, h) Elde edilen karakteristik verilerin işleneceği benzetim yazılımı.	139
Şekil 3.3. Hidrojen üretimi için katalizör deney düzeneğinin şematik gösterimi ve fotoğrafı	142
Şekil 3.4. Elektrot malzemesinin eldesi için uygulanan ultrasonik ve manyetik karıştırma işlemi.	143
Şekil 3.5. Elektrot malzemesi için elde edilen karışımın nikel foam üzerine püskürtülme yöntemiyle uygulanması.	144
Şekil 3.6. a,b) Elektrotların oluşturulması, c) Elektrotların test hücresine yerleştirilmesi, d) Elektrota elektrolit sıvısı uygulanması, d) Alüminyum kapasitör test hücresi bağlantıları, e) Test hücresi yazılım ara yüzü.....	144
Şekil 3.7. Saf mısır sapı (siyah çizgi) ve Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün (kırmızı çizgi) FTIR spektrumları.	146
Şekil 3.8. (a) Saf mısır sapının SEM görüntüleri, (b) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM görüntüleri, (c,e) Saf mısır sapının SEM-EDX görüntüleri (d, f) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM-EDX görüntüleri.	148
Şekil 3.9. XRD analizinin sonuçları (a) Saf mısır sapı (b) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü.	149
Şekil 3.10. Farklı HCl konsantrasyonları içeren ortama ait HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH ₄ , katalizör = 0,1 g, T = 30 °C, V _{metanol} = 10 mL).....	150

Şekil 3.11. Farklı Sn^{+2} konsantrasyonları içeren ortama ait HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH_4 , katalizör = 0,1 g, $T = 30^\circ\text{C}$, $V_{\text{metanol}} = 10\text{ mL}$).....	151
Şekil 3.12. Farklı yanma süreleri için HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH_4 , katalizör = 0,1 g, $T = 30^\circ\text{C}$, $V_{\text{metanol}} = 10\text{ mL}$).....	152
Şekil 3.13. Farklı yanma sıcaklıkları için HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH_4 , katalizör = 0,1 g, $T = 30^\circ\text{C}$, $V_{\text{metanol}} = 10\text{ mL}$).....	153
Şekil 3.14. Tasarlanan süper kapasitör hücresi için çeşitli tarama hızlarındaki CV eğrileri.	154
Şekil 3.15. Tasarlanan süper kapasitör hücresinin empedans eğrisi ve Randal eşdeğer devre şeması.	155
Şekil 3.16. 1 A/g akım yoğunluğunda tasarlanan süper kapasitör hücresi için 10 çevrimlik GCD eğrileri.	156
Şekil 3.17. Farklı akım yoğunluklarında tasarlanan süper kapasitör hücresinin GCD eğrileri.	157
Şekil 3.18. Siirt ili için tasarımı planlanan hibrit enerji sistemi şeması.	159
Şekil 3.19. Siirt ili için tasarımı planlanan hibrit enerji sistemi blok diyagramı. ..	159
Şekil 3.20. Benzetim, optimizasyon ve duyarlılık analizi arasındaki bağlantı şeması.	161
Şekil 3.21. Tasarımı planlanan mikro şebekenin HOMER Pro şeması	162
Şekil 3.22. Homer Pro metodoloji işlem basamakları.....	163
Şekil 3.23. Siirt iline ait bir yıllık yük profilinin aylık dağılımı.	167
Şekil 3.24. Yeni çift işlevli hibrit enerji depolama sistemi akış şeması.....	168
Şekil 3.25. H_2 yakıt tüketim eğrileri a) H_2 planet firmasına ait 5 kW YP yakıt eğrisi, b) Tasarımda 50 adet yığın şeklinde bağlanan bu ürünün H_2 çıkış eğrisi.....	173
Şekil 3.26. HOMER Pro YP yakıt tüketim eğrisi giriş ekranı.	174
Şekil 3.27. HOMER Pro YP yakıt maliyeti giriş ekranı.	175
Şekil 3.28. HOMER Pro YP karakteristik veri giriş ekranı.	175
Şekil 3.29. HOMER Pro SC karakteristik veri giriş ekranı.	176

Şekil 3.30. HOMER Pro HDS karakteristik veri giriş ekranı.	178
Şekil 3.31. Güneş potansiyeli haritaları a) Dünya, b) Türkiye, c) Siirt ili.	180
Şekil 3.32. Siirt ili aylık bazda GSR ve güneşlenme süreleri grafikleri.	181
Şekil 3.33. Tasarlanan Hidro-solar GES karakteristik parametreleri giriş ve HOMER Pro bağlantı ekranı.	182
Şekil 3.34. Siirt ili Alkumru HDS üzerinde hibrit enerji sisteminin bir parçası olan hidro-solar enerji sistemi planlamasını gösteren çizim.	183
Şekil 4.1. Hibrit enerji sisteminin proje ömrü boyunca kümülatif nakit akış grafığı.	186
Şekil 4.2. Hibrit sistem tasarımının farklı enerji kaynakları ve ESS'lerin birleşiminin toplam enerji üretim miktarları.	187
Şekil 4.3. Hibrit sistem tasarımının farklı enerji kaynakları ve ESS'lere ait üretim yoğunluğu grafikleri.	188
Şekil 4.4. Önerilen hibrit sistem tasarımının enerji karşılama oranları.	189
Şekil 4.5. Önerilen ve diğer sistem arasındaki indirgenmiş ve nominal nakit akış farkı.	189
Şekil 4.6. Tasarım bileşenlerinden YP tarafından kullanılan hidrojen yakıt tüketim miktarının yıllık eğrisi.	191
Şekil 4.7. Tasarımdaki bileşenlerden SC'ye ait yıllık şarj durumunu grafığı.	192
Şekil 4.8. Hidro-solar GES'e ait benzetim sonucunda elde edilen enerji akış ve kayıp diyagramı.	194
Şekil 4.9. Tasarım bileşenlerinden HDS'ye ait aylık akış hızları.	196

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. On dört farklı metriğe dayalı mekanik enerji depolama sisteminin karşılaştırılması.....	23
Tablo 2.2. Gelişmiş ilk beş ülke ve bu ülkelere ait hidroelektrik enerji depolama sistemlerinin kurulu kapasiteleri	27
Tablo 2.3. Dünyada kurulan ve proje aşamasında olan SHDS'ler.....	34
Tablo 2.4. On üç farklı metriğe dayalı akış pilleri enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması.	49
Tablo 2.5. On dört farklı metriğe dayalı İB pil enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması.....	55
Tablo 2.6. On dört farklı metriğe dayalı İB pil enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması.....	56
Tablo 2.7. ZEBRA enerji depolama sistemlerinin özellikleri.....	76
Tablo 2.8. Bazı gelişmiş ülkelerde uygulanan Na-S tesisleri	78
Tablo 2.9. Özelliklerine göre YP sınıflandırılması	89
Tablo 2.10. On iki farklı metriğe dayalı YP enerji destek sistemlerinin karşılaştırılması.....	91
Tablo 2.11. On dört farklı metriğe dayalı elektrik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması.	97
Tablo 2.12. Gizli termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan PCM'lerin ısı transfer özelliklerinin karşılaştırılması	113
Tablo 2.13. Katı-sıvı faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması karşılaştırılması (yeniden düzenlenmiştir).....	114
Tablo 2.14. Duyulur termal enerji depolama sistemlerine ait farklı ortamların karşılaştırılması	115
Tablo 2.15. On dört farklı metriğe dayalı TED'lerin karşılaştırılması.	116
Tablo 2.16. Olası HSS konfigürasyonlarının tablosu	127

Tablo 3.1. Siirt iline ait bir yıllık enerji tüketim değerlerini içeren tablo.	166
Tablo 3.2. Siirt ilinde bulunan diğer HDS ve kurulu güçlerini içeren tablo.	176
Tablo 3.3. Siirt ilinde bulunan Alkumru Limak A.Ş. HDS yıllık üretim ve il/ülke yük talebini karşılama oranları.	177
Tablo 4.1. Önerilen tasarımın Homer Pro ile kategorize edilmiş sonuçları.	185
Tablo 4.2. Homer Pro kategorize edilmiş tasarımın detaylandırılmış maliyetleri.	185
Tablo 4.3. Homer Pro ile kategorize edilmiş tasarımın elektrik enerji üretim sonuçları.	186
Tablo 4.4. Tasarım bileşenlerinden YP ESS'ye ait detaylı benzetim sonuçları.	190
Tablo 4.5. Tasarım bileşenlerinden SC EES'ye ait detaylı benzetim sonuçları.	191
Tablo 4.6. Tasarım bileşenlerinden HDS EES'ye ait detaylı benzetim sonuçları.	192
Tablo 4.7. Tasarım bileşenlerinden hidro-solar GES'e ait detaylı benzetim sonuçları.	193
Tablo 4.8. Tasarım bileşenlerinden hidro-solar GES sisteminin PVsyst programı benzetimi ile elde edilen aylık enerji üretim miktarları.	193

ÖZET

Anahtar kelimeler: Hibrit enerji depolama, HOMER Pro, süper kapasitör, yakıt pili, katalizör, mikro şebeke, dağıtık üretim.

Bu çalışmada, hidrojen üretimini hızlandırmak için HCl destekli Kalay (Sn) ile Mısır Sapı işlenerek sentezlenen Mısır sapı-HCl-Kalay katalizörünün, aynı zamanda elektriği depolamak amacıyla aktif bir süper kapasitör malzemesi olacak şekilde çift görevli bir enerji destek birimi gibi kullanılması planlanmıştır. Üretilen prototiplerin galvanostatik şarj/deşarj (GCD), Döngüsel voltametri (CV) ve empedans spektroskopisi (EIS) eğrileri gibi elektrokimyasal bulgular sonucunda yapılan karşılaştırmalarda literatürdeki süper kapasitör eğrilerine büyük ölçüde benzediği, dikkate değer bir kapasitif değere sahip olduğu (146,253 F/g) ve literatürdeki katalizörlerde olduğu gibi katalizör etkisi göstererek hidrojen üretimini hızlandığı tespit edilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında, dağıtık üretim sistemlerini içeren şebekelerde enerji ihtiyacının anlık olarak tepe yaptığı durumlarda, yine PV sistemler gece üretim dışı kaldığında, tahmin edilemeyen bulutlanma ve meteorolojik koşullarda bu çift fonksiyonlu malzemeden üretilen prototip hibrit enerji destek kaynağı, şebekeden bağımsız sistemlerde yakıt pili (YP)/batarya depolama sistemlerinin tasarımında kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Gerekli enerji miktarını sağlamak amacıyla üretilen prototip yığın şeklinde seri ve paralel bağlanarak geniş kapasiteli hibrit bir enerji kaynağı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu enerji kaynağı Siirt ilinde Alkumru hidroelektrik santrali ve üzerinde 50 MW hidro-solar güneş enerji santrali ile yeni çift işlevli malzemeden tasarlanan süper kapasitör ve yakıt pillerini içeren hibrit bir enerji depolama sistemiyle birlikte bir mikro şebekede HOMER Pro yazılımı kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, önerilen hibrit kombinasyonun, mevcut seçeneğe (0,139 \$/kWh, 983M \$) kıyasla nispeten düşük enerji birim maliyeti (EBM), (0,138 \$/kWh) ve net bugünkü değer (NBD), (984M \$) nedeniyle tekno-ekonomik olarak daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. İncelenen iki güç sistem konfigürasyonunda tasarlanan YP'nin SC ile birlikte bulunduğu sistemde oluşan güç talebinin bir miktarının YP ile karşılandığı böylelikle olası güç kesintilerinin engellendiği bir tasarım ortaya konulmuştur. Ayrıca YP nin güç konfigürasyonunda olmaması durumunda SC içeren güç sisteminin işletme ve bakım maliyetlerinin arttığı analizler ile ortaya konulmuştur.

ENERGY STORAGE SYSTEM DESIGN, PLANNING AND IMPLEMENTATION FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

SUMMARY

Keywords: Hybrid energy storage, HOMER Pro, supercapacitor, fuel cell, catalyst, microgrid, distributed generation.

In this study, it is planned to use the Corn Stalk-HCl-Tin catalyst, which is synthesized by treating HCl-supported Tin (Sn) with Corn Stalk to accelerate hydrogen production, as a dual-functional energy support unit, as an active supercapacitor material to store electricity at the same time. In the comparisons made as a result of electrochemical findings of the produced prototypes such as galvanostatic charge/discharge (GCD), Cyclic voltammetry (CV) and impedance spectroscopy (EIS) curves, it was found that they were largely similar to the supercapacitor curves in the literature, had a remarkable capacitive value (146.253 F/g) and it has been determined that it accelerates hydrogen production by showing a catalyst effect as in the catalysts literature. In the light of all this information, the produced prototype hybrid energy support system from this dual-functional material is used as fuel cell/battery under unpredictable clouding and meteorological conditions, when the energy demand peaks instantaneously in the grids containing distributed generation systems or when the power supply is out of production at night in systems containing PV. It is intended to be used in the design of storage systems. In order to provide the required amount of energy, a large-capacity hybrid energy storage system was designed by connecting serial and parallel in the form of prototype stacks. This designed energy source has been simulated in a microgrid with the Alkumru hydroelectric power plant and a 50 MW hydro-solar solar power plant in Siirt province, together with a hybrid energy storage system including super capacitor and fuel cells designed from new dual-function material, in a microgrid with HOMER Pro software. As a result of the analysis, the proposed hybrid combination is techno-economic due to its relatively low energy unit cost (COE), (\$0.138/kWh) and net present value (NPC), (\$984M) compared to the other option (0.139\$/kWh, 983M\$) was found to be more appropriate. The annual total energy productions for the two system designs are considered on the basis of system components. In the two power system configurations, a design has been put forward in which a part of the power demand in the system where the FC is located together with the SC is met by the FC, thus preventing possible power cuts. In addition, it has been demonstrated by the analyzes that the operation and maintenance costs of the power system containing SC increase in the absence of FC in the power configuration.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler ve Literatür Özeti

Petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar enerji üretiminde en etkili ekonomik parametrelerden olup uzun vadede bu durumun daha da artması beklenmektedir. Bu enerji kaynaklarının ekonomik kazanımlarının yanında çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin de olması güncel bilimsel çalışmaların sonuçları ile ortaya konulmaktadır.

Günümüzde hammadde olarak fosil yakıtların kullanıldığı santrallerin çevresel etkileri rahatsız edici boyutlara ulaşmıştır. İnsanların bu olumsuz etkilere karşı artan hassasiyetleri, bilim insanlarını alternatif enerji kaynakları araştırmaya yöneltmiştir (Wikipedia[Erişim 20-03-2007]). Bu etkinin gelecekteki planlamalara etkisi, enerji politikası analiz edilerek kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Avrupa Birliği 2009 yılında, 2020 yılı için bir strateji yayınlamış ve bu stratejiye göre ilk olarak karbon salınımlarının %20 azaltılması, %20 enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir enerji kullanımının %20 artırılması planlanmıştır (European Commision). 2014 yılında bu strateji 2030 yılı için %40 karbon salınım azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında %27 artış ve enerji verimliliğinde %7 artış olacak şekilde revize edilmiştir (European Commision).

Türkiye'nin, gelişmekte olan bir ülke olarak, Avrupa Birliği katılım beklentilerini karşılamak amacıyla bu stratejiye uygun hareket etmesi beklenmektedir. Belirlenen stratejik hedeflere ulaşmak için dağıtık yenilenebilir enerji üretiminin ulusal elektrik enerjisi ağına dâhil edilerek CO₂ salınım azaltılması hedeflenmektedir. Bu hedeflerin aksine, hidroelektrik enerji hariç yenilenebilir enerjinin kullanımı dünya genelinde halen istenilen seviyelerde değildir. Yenilenebilir Enerji Politikaları Topluluğu

tarafından 2017 yılı sonunda yayınlanan Yenilenebilir Enerji Küresel Deklarasyon Raporuna göre, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %75,5'nin halen fosil yakıtlardan veya nükleer enerji kaynaklarından sağlandığı görülmektedir (Appavou ve ark., 2017). Buradan da anlaşılabileceği üzere Türk enerji politikasının küresel ısınma probleminin üstesinden gelebilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları kullanımıyla ilgili düzenlenmeler yapması gerekmektedir. Bununla birlikte ithal enerji kaynaklarına bağımlı olan ülkemizin bu bağlamda var olan yüksek enerji bağımlılığı da azaltılmalıdır. Türkiye'nin daha çok alternatif enerji sistemleri ile ilgili dönüşüm çabalarına rağmen, hibrit enerji sistemlerinin bu sistemlere adaptasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirilememiş ve günümüzde Avrupa Birliği standartlarının çok gerisinde kaldığı gözlemlenmektedir (Simsek ve Simsek, 2013). Bu nedenle yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemlerinin verimli bir şekilde yaygınlaştırılması etkin ve uygun bir hamle olacaktır.

Hibrit enerji sistemlerine yönelik birçok çalışmada, yeni pil enerji depolama teknolojileriyle hibrit sistemlerinin ne kadar uygulanabilir olduğu açıklanılmaya çalışılmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Li ve ark., 2018) 5 kW PV/Pil sistemlerinin başa baş noktasını herhangi bir teşvik politikası olmaksızın 18 yıl olarak tahmin etmişler, aynı zamanda PV/Pil sistemlerinin Japonya'daki net yük pikinde %1,1'lik bir azalma sağlayabileceği sonucuna varmışlardır. Bir diğer çalışmada ise (Chade ve ark., 2015) İrlanda'nın bir adasında 40 binadan oluşan bir bölge için tek bir dizel sistemi ile Rüzgâr/Yakıt pilleri/Dizel/Hidrojen bileşenlerinden oluşan bir hibrit sistemi karşılaştırmışlardır. Enerji kablolarını su altından götürmek maliyetli olacağı için adalılara dizel sisteme kıyasla yenilenebilir enerji çözümlerini tercih etmeleri önerilmiştir. 2015 yılında (Kalinci, 2015) Türkiye'de ulusal şebeke ağına bağlı Bozcaada için altı farklı hibrit sistem senaryosu tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda şebekeden bağımsız olarak 0,86 \$/kW'lık PV/Rüzgâr/Yakıt pili hibrit sisteminin ve mevcut şebekeye bağlı olarak ise 0,10 \$/kW'lık Şebeke/Rüzgâr sisteminin en ekonomik sistem olduğu tespit edilmiştir. 2017 yılında yapılan bir çalışmada ise (Singh ve ark., 2017) Hindistan'ın Bhopal kentindeki bir akademik araştırma binasının enerji ihtiyacına yönelik çalışmada PV/Yakıt pili sisteminin uygulanabilirliğin ve tekno-ekonomik analizini içeren bir tasarım ortaya konulmuştur.

PV/Yakıt pili/Pil/Hidrojen depolama sistemi ile optimum tasarım elde edilmiştir. Ancak, sadece pil depolama sistemine sahip daha uygun olabilecek bir tasarıma değinilmemiştir. Bir başka çalışmada ise Tahran, İran'daki kullanıcıların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için (Fazelpour ve ark., 2016) PV/Rüzgâr/Yakıt pilleri/Hidrojen depolama sistemlerinin beş farklı hibrit sistem tasarımı (PV/Rüzgâr/Yakıt pilleri/Hidrojen, PV/Rüzgâr/Pil, Rüzgâr/Yakıt pilleri/Pil+Hidrojen, Rüzgâr/Yakıt pilleri/Hidrojen, Rüzgâr/Pil) araştırılmış ve Rüzgâr/Pil/Hidrojen'in en verimli sistem tasarımı olduğu sonucuna varılmıştır.

Malezya'da yer alan Tioman Adası için bir hibrit sistem tasarımı olarak PV/Rüzgâr/Yakıt pilleri ile sadece dizel sistemi karşılaştırılmıştır (Ashourian ve ark., 2013). Bir diğer önemli çalışma, tatil sezonu ve diğer zaman dilimi için iki ayrı mevsimsel yük profilini karşılaştıran PV/Rüzgâr/Yakıt pilleri/Pil sisteminin mevcut dizel yakıt maliyetleriyle ekonomik açıdan uygun bulunmadığı Ashourian ve ark. çalışmasıdır. Duyarlılık analizi sonuçları, dizel fiyatlarının 2,1 \$/L'den 1,5 \$/L'ye düştüğünde durumun tersine döndüğünü göstermektedir. Benzer şekilde (Silva ve ark., 2013) Tocantins, Brezilya'da izole bir Amazon topluluğu için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı hakkında ve PV/Pil ve PV/Yakıt pilleri/Pil tasarımlarını karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda pil depolama sisteminin hidrojen depolama sistemine göre ekonomik açıdan daha uygun olduğu görülmüştür. Benzer bir çalışma da ise PV/Dizel+Hidrojen/Yakıt pili/Pil sistemleri önerilmiş (Dursun, 2012) ve sistem daha geniş bir bakış açısı ile ele alınarak, Türkiye'de Kırklareli ilinin bir kampüsünde elektrik enerjisi ihtiyacı, hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız olarak değerlendirilmiştir. En uygun sistem tasarımının Şebeke/PV sisteminin olduğu öngörülmüştür. Bununla birlikte, tüm şebeke dışı seçenekler arasından, PV/Pil sisteminin PV/Yakıt pilleri/Pil sisteminden daha uygulanabilir olduğu öngörülmüştür. Benzer şekilde (Türkay ve Telli, 2011), bir fakülte binası için şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız hibrit enerji sistem tasarımlarını tekno-ekonomik açıdan analiz edilmiştir. 2011 yılı sonunda Şebeke/PV ve PV/Rüzgâr/Yakıt pilleri/Pil hibrit tasarımlarının enerji üretim maliyetleri sırasıyla 0,307 \$/kWh ve 3,391 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Şebekeden bağımsız sistem tasarımından elde edilen toplam enerji üretimi fazlası hidrojen olarak depolanmıştır.

1.2. Problemin açıklaması

Çevre dostu enerji depolama sistemleri (ESS) ile ilgili araştırmaların artmasıyla birlikte, PV/Pil, SC/YP gibi diğer değişkenlerle çok daha sistematik bir yaklaşım belirlenebilecektir. 2000’li yılların başından itibaren, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin enerji politikalarının oluşturulmasında gerek imzalanan uluslararası anlaşmalar nedeniyle gerekse dışa bağımlılığın azaltılarak milli enerji üretiminin artırılması amacıyla çevre dostu, yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu ilginin artmasıyla birlikte ülkelerin ulusal elektrik ağına güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının bağlantıları da doğrudan artmaktadır. Bu gelişmeler neticesinde enerji arzında dalgalanmaların da gün geçtikçe artacağı kaçınılmaz bir gerçektir.

GES (Güneş Enerji Santralleri) ve RES (Rüzgâr Enerji Santralleri) aşırı rüzgâr, rüzgârsızlık, beklenmeyen hava durumları veya güneş enerjisinin gece üretim dışı kalması, ani arıza durumları gibi sorunlardan dolayı anlık istenmeyen kesintilerle karşılaşabilmektedir. Elbette bu durumun ulusal elektrik ağı için istenmeyen adalanma (çökme) gibi daha büyük sistem arızalarına bile sebebiyet verebileceği öngörülmektedir. Bu da ülkelerin ulusal elektrik ağının kararlılık, güvenilirlik ve sürekliliği açısından büyük risk anlamına gelmektedir. Bu nedenle son zamanlarda, araştırmacılar enerji arzının sürekliliği alanın da en uygun optimizasyon, kontrol, yerleşim algoritmaları gibi yaklaşımlar ile çalışmalar da bulunarak bu problemin üstesinden gelebilmeyi hedeflemektedirler. Bahsedilen sorunlardan dolayı ESS çok önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Verimli, sürdürülebilir ve güvenilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve artan talep nedeniyle enerji depolama sistemleri alanındaki araştırmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Literatür taramasında da anlaşılacağı üzere, enerji depolama sistemlerinin kullanılması son zamanlarda yaygın olan bir alternatif yöntemdir.

YP ve SC gibi yeni teknoloji ESS’ler bunlara en güzel örneklerdendir. SC’ler, milisaniyeler içinde enerji depolamak ve aktarmak için özel olarak tasarlanmış tek teknolojidir. SC’ler akıllı elektrot malzemesi ve hücre tasarımı sayesinde hem yüksek

enerji hem de güç yoğunluğu elde edebilmeye olanak sağlamaktadır. Bu ileri teknoloji yeni sistemlerin çoğu henüz büyük kapasiteler için Ar-Ge aşamasında olup hammadde maliyetinin yüksek ve aktif karbon sentezinin zor olması sebebiyle tam anlamıyla ticari olarak rekabet edebilecek konumda değildir (Ma ve ark., 2013, Novoselov ve ark., 2012, Patel ve ark., 2002).

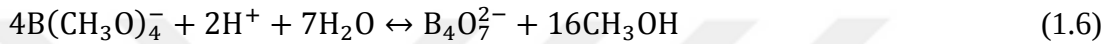
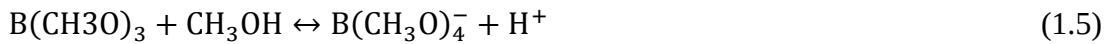
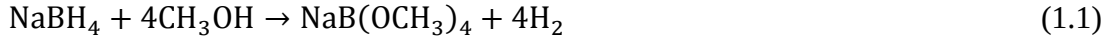
ESS'ler de kullanılan performans yüksek sistemlerden olan SC'ler, sırasıyla elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC) ve pseudo (kapasitörüksü) kapasitörler olmak üzere iki tipten oluşmaktadır (Simon ve Gogotsi, 2010). Bu farklılık enerji depolama mekanizmasına göre oluşmaktadır. EDLC malzemelerinde, elektrot/elektrolit ara yüzünde iyon emilimi meydana gelmekte ve yükler elektrostatik olarak depolanmaktadır (Béguin ve ark., 2014). Elektrot malzemelerinin verimliliği ve kararlılığı, yüksek performanslı SC tasarımı için kritik bir öneme sahiptir (Sun ve ark., 2013). Gözenekli karbonlar, uyumlu elektriksel özellikleri, geniş yüzey alanı, çeşitli yüzey özellikleri, iyi bir kararlılık düzeyi, uzun şarj-deşarj ömrü ve olağanüstü güç çıkışı nedeniyle en çok tercih edilen EDLC elektrot malzemeleridir.

Literatürde yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere, aktif karbonlar, karbon nanotüpler ve grafen gibi gelişmiş karbon nano malzemeler yüksek seviyede kapasitif performansa sahiptir (Chee ve ark., 2016). Ancak bu aktif karbon malzemeler zor sentezlenmekte ve hammadde maliyetleri de yüksektir (Liu ve ark., 2017). Bu durum, üretimlerinin istenilen kapasitede ve etkinlikte olmasının önündeki en önemli engeldir. Buna karşın alternatif aktif karbon hammaddesi olarak kullanılan biyokütlenin maliyeti ise düşüktür. Bulunması kolay olan biyokütleler yüksek karbon içeriği ile de yenilenebilir bir özelliğe sahiptir. Bahsedilen tüm bu avantajlarından dolayı, elektrot malzemeleri üretmek için kullanılan aktif karbon malzemelerin ideal bir alternatifidir (Seman ve ark., 2017). Biyokütle temelli gözenekli karbonlarla SC hücresi tasarımı ile ilgili literatürde çay (Ma ve ark., 2013), bezelye (Novoselov ve ark., 2012), kimyon bitkisi atığı (Patel ve ark., 2002), portakal kabuğu (Jain ve ark., 2016), söğüt yaprağı (Tang ve ark., 2017), soya fasulyesi artıkları (Inal ve ark., 2015), akvaryum bengalesi (Inal ve Aktas, 2020) gibi atıklarla yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu karbon

malzemelerin SC elektrotları olarak elektrokimyasal performansları, büyük ölçüde hammadde türüne ve üretim yöntemlerine bağlıdır.

Biyokütle atıklarının içerisinde bulunan selülozik yapılar yanma, kâğıt endüstrisi, biyoyakıt üretimi, yüksek mikro gözenekli yapıda olan aktif karbon üretimi, enerji gibi alanlarda kullanılabilirken, lignin yapı ise yanma, yapıştırıcı, yakıt sanayi, makro gözenekli yapıda olan aktif karbon üretimi için kullanılabilir. Bu atıkların kimyasal olarak barındırdıkları karbon ve hidrojen enerji üretimi noktasında önemlidir. Biyokütle atığı, yüksek karbon içeriğine sahip, ucuz, kolayca bulunabilen ve yenilenebilir bir materyaldir. Bu özelliklerinden dolayı, elektrot malzemeleri üretmek için kullanılacak aktif karbon malzemeler için ideal bir öncüdür (Jain ve ark., 2016, Tang ve ark., 2017). Bu bağlamda son zamanlarda yapılan umut verici çalışmalar ile önlerindeki en büyük sorun olan maliyet problemlerinin aşılabileceği öngörülmektedir. Özellikle atık malzemelerden elde edilen aktif karbon malzemenin etken madde olarak kullanılmasıyla elde edilen SC hücresi tasarım çalışmaları bu alanda dikkat çekmektedir. Örnek verecek olursak araştırma grubumuzun son çalışmalarından ve tezimizin kaynak noktası olan Mısır sapı-Kalay (Sn) destekli yenilikçi malzemenin üretiminde hem SC hem de katalizör özelliğine değinilmiştir (Bolat ve ark., 2021). Yapılan çalışmalar, prototiplerin ticari olarak üretiminin teşviki, cesaretlendirilmesi ve araştırmacılar için yeni çalışmalara ışık tutabilmesi noktasında önem arz etmektedir.

Bir diğer alternatif enerji destek sistemi olan hidrojen temelli yakıt pillerine değinecek olursak, bu sistemlerde hidrojenin yanması sonucu ortaya çıkan zararlı gaz salınımı olmaması sebebiyle temiz enerjinin birincil kaynaklarından biridir. Bu durumun aksine, bu enerji kaynağının depolama, güvenlik ve nakliye sorunları gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Hidrojen depolama sistemlerinin bu problemleri göz önünde bulundurulduğunda; yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahip olan sodyum bor hidrür, hidrojen depolaması için avantajlı bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Ahmed ve ark., 2018, Inal ve ark., 2018). Ek olarak sodyum bor hidrürden hidrojen elde edilirken Denklem 1-6'da belirtilen metanoliz reaksiyonuna göre uygun katalizörler kullanılması gerekmektedir (Saka ve ark., 2020).



Bor hidrürler yüksek hidrojen depolama kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadır. NaBH_4 'te, yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahip bahsi geçen bor hidrür türlerinden biridir. NaBH_4 çözeltisinden katalizör kullanarak H_2 üretmenin yanıcı olmaması, reaksiyon sonucu çıkan ürünlerin çevre dostu olması, üretim hızının kolaylıkla kontrol edilebilmesi, NaBO_2 gibi geri dönüşümlü ürün çıktısı, düşük sıcaklıklarda aktivasyon gösterebilmesi gibi birçok avantajı bünyesinde bulunmaktadır (Liu ve ark., 2009). Sodyum bor hidrür çözücü maddeleri olarak NH_3 (amonyak), H_2O (su), CH_3OH (metanol) sayılabilir. Son yapılan çalışmalarda, çözelti hazırlanırken su yerine metanol kullanımının hidrojen üretiminin daha verimli bir şekilde sağlanması noktasında tercih edilen bir seçenek haline geldiği görülmektedir.

Denklem 1.1-1.6 gösteriyor ki elde edilen hidrojen üretiminin yarısı sodyum bor hidrürden elde edilirken diğer yarısı metanolden elde edilmektedir. Ayrıca hidrojen üretilirken hız önemli olması metanolü daha hızlı reaksiyona girmesi açısından ön plana çıkarmaktadır. Genelde hidrojen üretim hızını artırmak için katalizör, asit ya da yüksek sıcaklık gibi aktivasyonu artıracak yöntemler seçilmektedir. Yüksek sıcaklığa gerek kalmadan oda sıcaklığında hidrojen üretimine olanak sağlayan katalizörler, aktivasyona girdiği şekilde hiçbir yapısal değişiklik yaşamadan kimyasal reaksiyonun hızını artıran maddelerdir (Kojima ve ark., 2002). Pt (platin), Ru (rutenyum), Pd (paladyum) katalizör olarak bilinen bazı değerli metallerdir. Ancak, yüksek maliyet,

zor hazırlanması, yüksek enerji gereksinimi ve temininin zor olması gibi nedenler araştırmacıları daha ucuz ve etkin katalizör malzemesi araştırmaya yöneltmiştir. Yapılan çalışmalardan da anlaşılabileceği üzere bazı metal bazlı, asidik ve bazik katalizörler kullanılmaktadır. Buna güçlü bir alternatif olan biyolojik ve organik materyaller; doğada bol bulunmaları, sağlığa zararsız ve ucuz olmaları nedeniyle düşük maliyetli ve yüksek verimli katalizörler üretmek için kullanılabilmektedir (Kaya ve Bekirogullari, 2019).

Bu tarz üretim sistemlerine ait verimlilik, süreklilik ve maliyet/fayda analizinin öngörülebilirliği özel yatırımcılar, enerji yatırım politikalarının oluşturulması ve devlet teşviki gibi noktalarda büyük öneme sahiptir. Araştırmacılar Ar-Ge aşamasında prototip üretirken bile maddi teşvik ve ekipman desteğine ihtiyaç duymaktadır. Her şeye rağmen bu tarz ileri teknoloji alanları için benzetim, analiz ve tahminleme programları da bir yol gösterici olarak öngörülebilirlik açısından kritik katkı sunabilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ön tasarımında kullanılabilecek benzetim programlarına baktığımızda; rüzgâr enerjisi üretim sistemi modelleme ve benzetim programı olarak Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen SOFWA ve FAST bunların yanında QBlade, Ashes, DFIG gibi programlar bulunmaktadır. Güneş enerjisi üretim sistemi modelleme ve benzetim programı olarak ise yine Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen System Advisor Model (SAM) bunun yanında PV F-Chart, pvPlanner, PVsyst, RETscreen, Solar Pro, Helioscope ve PVSol gibi programlarda bulunmaktadır. Helioscope, PVsyst, gibi programlarla da entegre olarak çalışan yine Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilen HOMER Pro da güncel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.3. Çalışmanın amacı

Tüm bu bilgiler ışığında, bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları içeren bir mikro şebekenin Siirt ilinde ulusal şebeke ağından bağımsız olarak tasarlanması

hedeflenmektedir. Tasarımda hidroelektrik santrali, yüzer güneş enerji santrali gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ek olarak enerji talebinin yoğun olduğu tepe dönemlerinde şebekenin desteklenmesi amacıyla çift fonksiyonlu hibrit bir enerji depolama sisteminin yer alması planlanmaktadır.

İki kısımdan oluşacak bu çalışmada sırasıyla; çalışmanın yenilikçi ve önem arz eden noktası olan hibrit enerji depolama sistemi için deneysel olarak atık Mısır sapı-Kalay (Sn) destekli aktif karbon malzemeden bir SC hücresi tasarlanacaktır. Bu aktif karbon malzemenin ayrıca katalizör olarak yakıt pillerinin H_2 üretimindeki hızlandırıcı etkisinden çift fonksiyonlu olarak faydalanılacak ve bir prototip hücre elde edilecektir. İkinci olarak ise; gerekli elektriksel ve kimyasal parametreleri elde edilen bu prototip hücre HOMER Pro yazılımında kullanılacak ve gerekli enerji depolama sistemi için seri/paralel bağlanarak yığın halinde YP+SC sistemi oluşturulacaktır. Siirt ili için planlanan şebekeden bağımsız bir mikro şebeke benzetimi yazılım ile gerçekleştirilecek ve sonuçlar tekno-ekonomik açıdan analiz edilerek literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanacaktır.

Materyal ve metot bölümü, doğrudan Mısır sapı-Sn'yi destek materyali olarak kullanarak daha verimli bir katalizörün nasıl sentezleneceğini ve maliyetin nasıl düşürüleceğini açıklamaktadır. Bu nedenle atık malzemelerden katma değerli ürünlerin üretilmesinde ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesinde çevre dostu bir yöntemle alternatif enerji depolama sistemi elde edilebileceği düşünülmektedir.

Bunlara ek olarak, SC elektrot malzemesi olarak kullanılan ve yukarıda bahsi geçen geliştirilmiş yüksek verimli Sn destekli çift fonksiyonlu materyal aynı zamanda hidrojen üretimi için katalizör olarak kullanılmıştır. Bildiğimiz üzere, şimdiye kadar hibrit enerji sistemleri için elektrot malzemesi olarak kullanılan materyal aynı zamanda katalizör olarak kullanılmamıştır. Bu nedenle hem hidrojen üretimi için katalizör hem de SC için bir elektrot malzemesi olan çift işlevli bir malzeme ile hibrit bir enerji depolama sistemi olarak tasarımı hedeflenmiştir. SC'ler için maliyet etkin şekilde biyokütle atıklarından elektrot üretilip aynı zamanda nakliye, güvenlik, depolama gibi problemleri bünyesinde barındıran yakıt pillerinin bu kısıtlarının

aşılması hedeflenmektedir. Ayrıca, yakıt pilleri ve SC hibritlemesi ile enerji ve güç yoğunluğu açısından sağlanacak alternatif sayesinde tek bir hibrit enerji depolama sistemi ile anlık olarak (yüksek güç yoğunluğu) veya uzun süreli olarak (yüksek enerji yoğunluğu) gibi farklı taleplere cevap verilebilecektir.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Enerji Depolama Sistemleri

Fosil yakıt temelli enerji kaynakları, talebe göre enerji sağlamak için kullanılabilen, yani gerekmediğinde kolayca depolanabilmektedir. Yapılan bazı araştırma sonuçlarına göre, bilinen bazı rezervlerden; petrol için 34-40 yıl, kömür için 106-200 yıl ve doğal gaz için 36-70 yıl içinde tükeneceği öngörülmektedir (Shafiee ve Topal, 2009). Ancak güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilebilir temelli enerji kaynakları mevcut olduğunda enerjinin elde edilebilmesi ve ihtiyaç duyulana kadar depolanabilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, enerji depolama sistemleri enerji üretim sistemleri için kritik öneme sahiptir. Enerji depolama sistemleri yük dengeleme, tepe noktası tıraşlama, frekans düzenleme, enerji salınımlarını sönümleme, güç kalitesi düzenleme ve güvenilirliğini artırmaya olanak sağlamaktadır (Koochi-Fayegh ve Rosen, 2020).

Merkezi güç üretim sistemleri, çevresel zorlukları bünyesinde barındıran, düşük verimli ve yüksek kirletici sistemler olarak göze çarpmaktadır (Lehtola ve Zahedi, 2019). Bu noktada, enerji depolama sistemleri (ESS), bir güç sisteminden gelen elektrik enerjisinin, gerektiğinde tekrar elektrik enerjisi olarak kullanabilmek amacıyla depolanabilir bir forma dönüştürülme sürecini ifade etmektedir (Baker ve Collinson, 1999, McLarnon ve Cairns, 1989, Chen ve ark., 2009). ESS'ler merkezi depolama, enerji dönüşüm aşaması ve kontrol aşaması olarak üç bölümde incelenebilmektedir. Merkezi depolama biriminde enerji dönüşümü tamamlandıktan sonra depolanmaktadır. Enerji dönüşümü aşaması, merkezi depolama birimi ile enerji sistemi arasında çift yönlü iletim ile bir ara yüz görevi görmektedir. Son olarak da kontrol aşamasında şarj/deşarj seviyeleri sensörler ve diğer ölçüm cihazları tarafından belirlenmektedir. Bununla birlikte ESS'ler ideal enerji kaynakları değildir ve

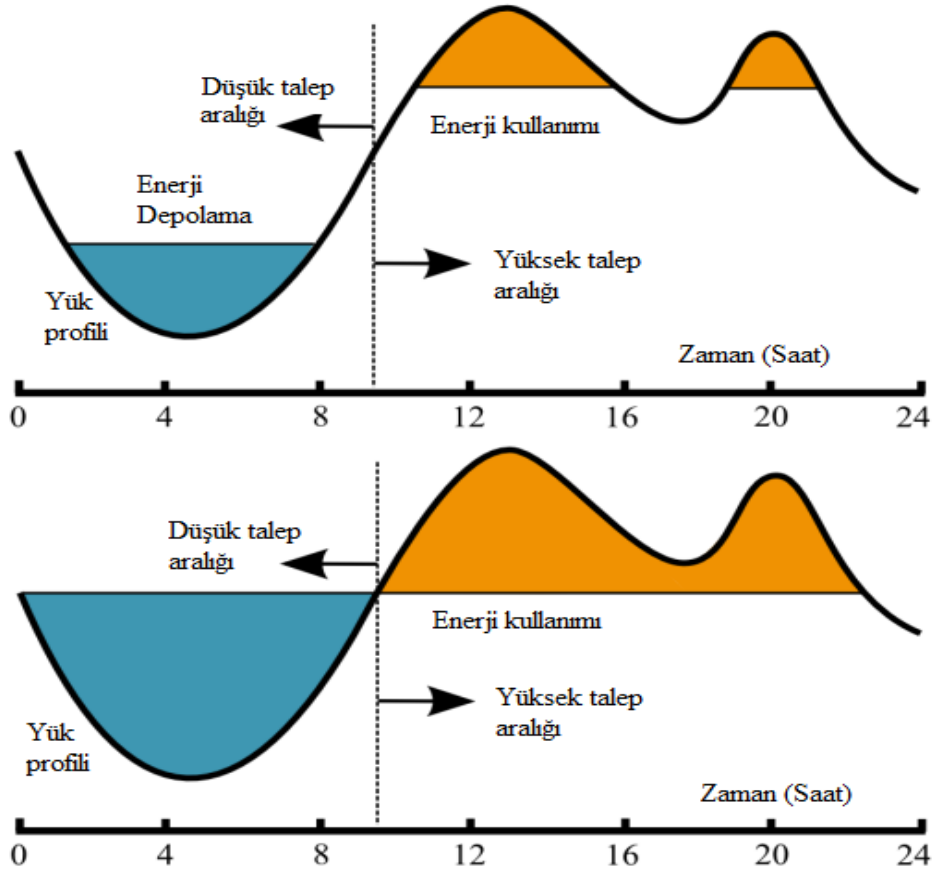
sürecinin her aşamasında muhtemel kayıplar ihtiva etmektedirler (Palizban ve Kauhaniemi, 2016). Bu süreçte, enerji talebinin ve üretim maliyetinin düşük olduğu durumlarda veya kesintili üretim yapan enerji kaynaklarından talep fazlası üretim yapıldığında depolama amaçlı olarak kullanılabildiği gibi aynı zamanda, yüksek enerji talebi, yüksek üretim maliyeti olan veya başka hiçbir üretim kaynağının olmadığı durumlarda da enerji talebini karşılamak amacıyla kullanılabilmektedirler (Walawalkar ve ark., 2007, Baker ve Collinson, 1999, Mclarnon ve Cairns, 1989, Chen ve ark., 2009).

Yerleşik ESS'lerin tarihi 20. yüzyılın başlarına kadar dayanmaktadır. Bu sistemler, üretim sistemleri kısa süreli üretim dışı kaldığında, gündüz üretim halindeyken depolanan enerji ile şebekeyi beslemektedirler (Baker ve Collinson, 1999, Chen ve ark., 2009). HDS 1929 yılından itibaren dünya genelinde kullanılmaya başlanmıştır (Wikipeda[Erişim 20-03-2007]). Yakın zamana kadar, enerji kaynağı endüstrisinde, temel olarak bu tip ESS'ler, tamamlayıcı ve dallanmış iletim ve dağıtım ağlarına sahip büyük enerji santralleri olarak yer almaktaydı. Ancak, gün geçtikçe enerji depolama sistemlerinin şebekeye sağladığı esneklik ve yadsınamaz katkı enerji dağıtıcıları tarafından daha iyi anlaşılmıştır. 2005 itibarıyla, dünya çapında kullanımda olan ve toplam 100 GW'tan fazla güç üretim kapasitesi sağlayan 200'den fazla hidroelektrik enerji sistemi bulunmaktaydı (Wikipeda[Erişim 20-03-2007], Van Der Linden, 2003). Bununla birlikte, ekonomiye bağlı yasal düzenlemelerin ve çevresel sorunların baskısı, büyük ölçekli HDS ve ESS sistemlerinin fiili kullanımına yönelik yapılan yatırımlarda bir azalmaya neden olmuştur. Yine de dünya genelinde hükümetler tarafından yapılan yasal düzenlemelerdeki değişiklikler de dâhil olmak üzere çeşitli nedenlerle son zamanlarda uygulamaya olan ilgi yeniden artmaktadır. Çevre, endüstri, ticaret ve hane halkının giderek artan şekilde enerji gereksinimi, ticari ve teknik kalite beklentisi, yeni ve önemli bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesini ve zorunlu hale gelen çevresel gereksinimlerle tarafları alternatif enerji sistemlerini araştırmaya ve kullanmaya mecbur kılmaktadır.

Çoğu gelişmekte olan ülke, teknolojik gelişme hızının birim maliyetlerde oluşturacağı düşüşü beklemektedir. Böylece önümüzdeki birkaç yıl içinde bu sistemlerin pratik

uygulamalarının çok daha çekici hale geleceği düşünülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (Van Der Linden, 2006, Swaminathan, Baker ve Collinson, 1999, Makansi ve Abboud, 2002, McLarnon ve Cairns, 1989, Weinstock, 2002), Avrupa Birliği (Author, 2004, Ahearne, 2004), Japonya (Kondoh ve ark., 2000, Ahearne, 2004), ve Avustralya (Office, 2005) gibi birçok gelişmiş ülke yaklaşık olarak 15-20 yıl önce ulusal ESS sistemleri üzerindeki planlarını onaylamışlardır. Tahmini kapasitelerin Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkelerinde yakın gelecek için yaklaşık olarak %15 artması beklenmektedir. Bu oranın Japonya'da ise daha da yüksek olacağı öngörülmektedir. (Office, 2005, Ahearne, 2004).

Tüm bu değerlendirmeler neticesinde ESS'lere geleneksel elektrik üretim endüstrisi tarafından acilen ihtiyaç duyulmaktadır (Dobie, 1998, Baker ve Collinson, 1999, Author, 2004, Office, 2005, Walawalkar ve ark., 2007). Günümüzde geleneksel enerji üretim tesislerinin ihtivasında enerji depolama sistemleri çok az sayıda bulunmakta veya hiç bulunmamaktadır. Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri, enerjinin her zaman tamamının tüketilmesi gerektiği anlamına gelecek şekilde tek yönlü olarak planlanmaktadır. Ancak, enerji talebi anlık, günlük ve mevsimsel olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Yani maksimum talep süresi yıl içinde sadece birkaç saat bile olabilmektedir. Bu verimsiz, maksimum talebe göre tasarlanmış ve pahalı üretim tesislerinin kurulmasına sebebiyet vermektedir. ESS, enerji üretiminin kendi kaynağından ayrılmasına, şarj-deşarj ile bir nevi üretim-tüketim dengesine katkı sağlamaktadır. Bu kolaylık sayesinde mevcut olan sistem planlayıcıları herhangi bir zamanda, tepe taleplerden farklı olarak ortalama enerji talebini karşılamak için yalnızca yeterli üretim kapasitesi oluşturmaya ihtiyaç duyacaklardır (Van Der Linden, 2006). Bu nedenle, ESS, yük takibi, maksimum güç ve depolama rezervi dâhil olmak üzere önemli faydalar sağlayabilmektedir. Şekil 2.1.'den de anlaşılacağı üzere verimli bir ESS sistemi entegrasyonunun faydası yükün dengelenmesini noktasında olacaktır.



Şekil 2.1. 24 saatlik bir süre boyunca tüketici enerji talepleri (yük profili). Üstteki şekil, tipik, verimsiz bir enerji depolama uygulamasını göstermektedir. Altteki şekilde olduğu gibi enerji depolamanın nihai amacı ise yük dengelemidir (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2015)).

Bunların yanında, en önemli ayrıntılardan biri de ESS, dağıtılmış enerji kaynağı (DER) sistemleri için zorunlu bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Dobie, 1998, Baker ve Collinson, 1999, Author, 2004, Office, 2005, Walawalkar ve ark., 2007, Kashem ve Ledwich, 2007, Mcdowall, 2001, Xue ve ark., 2006). Büyük, merkezi birimlere sahip geleneksel enerji üretim sistemlerinde DER'ler genellikle dağıtım seviyesinde, kullanım yerine yakın bir yerde kurulup, tipik olarak birkaç kW ile birkaç MW arasındaki küçük aralıkta güç üretmektedir (Kashem ve Ledwich, 2007). Bir DER, geleneksel enerji sistemine sürdürülebilir, verimli, güvenilir ve çevre dostu bir alternatif olarak kabul edilmektedir (Kashem ve Ledwich, 2007, Alanne ve Saari, 2006). Gün geçtikçe ulusal şebeke ağları, DER'lerin daha yüksek penetrasyonuna maruz kalarak merkezi ve dağıtılmış alt sistemlerin bulunacağı şekilde değişime uğramaktadır (Alanne ve Saari, 2006). Ancak, geleneksel güç sistemine göre daha küçük kapasite ve daha yüksek hata olasılığı nedeniyle DER sistemlerinden kaynaklı

daha şiddetli yük dalgalanmaları ve anlık gerilim düşüşleri olabilmektedirler. Tam bu noktada ESS, güç esnekliğini telafi etmek ve kesintisiz güç sağlamak için önemli bir çözüm olarak sunulabilmektedir. Enerji değer zinciri açısından değerlendirecek olursak; geleneksel olarak enerji kaynağı, üretim, iletim, dağıtım ve tüketici tarafı olmak üzere beş kısımdan oluşmaktadır. Gelecekte ESS'ler bu zincirin altıncı parçası olarak yer alacağı kaçınılmaz bir gerçektir (Makansi ve Abboud, 2002). Bir ESS, talep düşük olduğunda gücü depolamakta ve talep yüksek olduğunda şebekeye vermektedir. Bu da elektrik şebekesine büyük operasyonel esneklik sağlamakta ve enerji kesintilerini azaltmaktadır. (Walawalkar ve ark., 2007, Killer ve ark., 2020, Braeuer ve ark., 2019, Baker ve Collinson, 1999).

Bir enerji depolama sistemi için ulaştırma, taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrik şebekesi tipik kullanım alanlarındandır (Mehrerdi, 2020, Hemmati ve Saboori, 2016, Koot ve ark., 2005, Weinstock, 2002, Lazzeroni ve ark., 2019). ESS'lerin üretimin temelinden yani büyük geleneksel üretici kısmından başlayarak zincirin son kısmına yani tüketici kısmına kadar farklı uygulama alanlarının olduğu birçok çalışma bulunmaktadır (Chen ve ark., 2009, Baker ve Collinson, 1999, Dobie, 1998, Moore ve Douglas, 2006, Office, 2005, Van Der Linden, 2006, Ratering-Schnitzler ve ark., 1997).

ESS'lerin ekonomik analizi ve tasarımı noktasında değerlendirilmesi gereken kullanım kısıtlarından birisi olan zamana ve şarj/deşarj bozunmalarına bağlı olarak iki tür kullanım ömründen bahsetmek gerekmektedir (Barré ve ark., 2013). Zamana bağlı kısıtlama, depolama modundayken kapasite kaybını ifade etmekte ve büyük ölçüde sistemin sıcaklığına ve şarj durumuna (SOC) bağlıdır (Zhang ve ark., 2004, Kassem ve ark., 2012). Öte yandan, döngüsel yaşlanma kısıtlaması ise, pilin şarj veyadeşarj modunda meydana gelebilecek kayıpları ifade etmektedir. Zamana bağlı yaşlanmayı etkileyen parametreler, yanı zamanda döngüsel yaşlanmayı da etkilemektedir. Bunlara ek olarak, yüksek akım pikleri, voltaj seviyeleri vedeşarj derinliği döngüsel yaşlanmayı etkileyen diğer parametrelerdir.

Enerji depolama teknolojilerinin teknik ve ekonomik yönleriyle ilgili de birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğu; ESS'lerin teknik özelliklerini (Amirante ve ark., 2017, May ve ark., 2018, Ibrahim ve ark., 2008, Díaz-González ve ark., 2012, Poullikkas, 2013), farklı ESS'lerin boyutlandırılmasını (Soloveichik, 2011, Akinyele ve Rayudu, 2014, Fossati ve ark., 2015, Bucciarelli ve ark., 2017, Palizban ve Kauhaniemi, 2016, Yang ve ark., 2018) ve uygulamalarının zorluklarını (Figgener ve ark., 2020, Zidar ve ark., 2016, Yan ve ark., 2015, Mahlia ve ark., 2014, Beaudin ve ark., 2010, Kousksou ve ark., 2014, Soloveichik, 2011) incelemişlerdir. Bu çalışmalar verimlilik, güç ve enerji yoğunluğu, deşarj derinliği, kullanım ömrü vb. detayları içermektedir. ESS'lerin enerji şebekelerinde nasıl daha verimli kullanılabileceğini, yatırım maliyetlerini, kullanım ömrü maliyetlerini belirlemek için tekno-ekonomik analizler (TEA), ve enerji üretim maliyetleri incelenmiştir.

Lityum-iyon, kurşun-asit, sodyum sülfür ve vanadyum redoks olmak üzere dört tip ESS sistemi ile yapılan bir çalışmada sistemlerin akışına odaklanılarak, girdi belirsizliğinin elektrokimyasal depolama sistemlerinin kullanım ömrü maliyetleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir (Battke ve ark., 2013). Ancak bu çalışma, mekanik, hidrojen veya termal enerji depolama teknolojilerini (TEDS) içermemektedir. Bir diğer çalışmada ise belirsizlik analizi ile enerji depolama sistemlerinin teknik analizini gerçekleştirilmiştir (Zakeri ve Syri, 2015). Araştırmacılar bu çalışmada çeşitli maliyet bileşenleri hakkında faydalı bilgiler ortaya koymuşlardır. Koohi Fayegh ve Rosen tarafından yakın zamanda yapılan bir çalışmada ise farklı ESS'lerin teknik yönlerine ve uygulamalarına kapsamlı ve genel bir bakış getirecek şekilde, ESS'lerin ekonomik yapısı hakkında kısa bir araştırma ve inceleme yapmışlardır (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Ancak maliyet parametreleri ve bunların teknik analizde nasıl kullanıldığı hakkında ayrıntılı bilgi vermemişlerdir.

Çalışmaların çoğunda değinilmeyen çevresel faktörlerde incelemeye dâhil edilmemiştir. Artan çevresel kaygılar ve hükümetlerin politika düzenlemeleri ile, elektrik şebekesinde enerji üretim sistemleri belirlenirken enerji tüketimini ve ekolojik ayak izini ölçebilmekte giderek daha önemli hale gelmektedir. Bir ESS'nin ekonomik

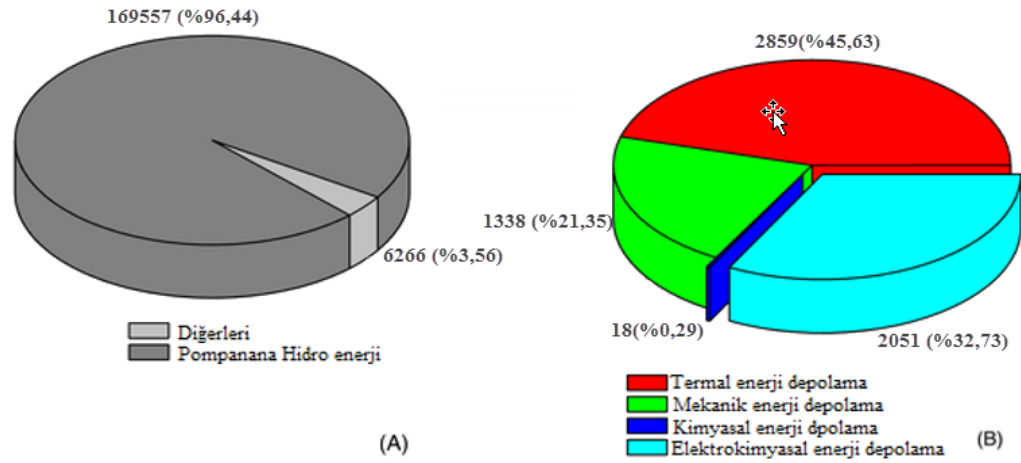
uygulanabilirliği ile çevresel etkisi arasındaki dengeyi anlamak, sürdürülebilirlik için temel etkindir ve uygulanabilirliği için çok büyük öneme sahiptir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş ve rüzgar sistemlerinin kurulu gücü, dünya çapında, 2009 yılında 182GW iken 2015 yılında 660 GW'a çıkarak kayda değer bir büyüme göstermiştir (Rahman ve ark., 2020). Kyoto ve Paris antlaşmalarının hedefi, 2060 yılına kadar fosil kaynaklardan elde edilen enerjiye bağlı olarak atmosfere salınan zararlı gaz emisyonlarını azaltmaktır. Bu hedefin gerçekleşmesi için, enerjinin nasıl elde edildiği ve kullanıldığı konusunda ciddi bir inovasyon yapılması gerekmektedir. Bu hedefe ancak güneş, rüzgâr vb. yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen diğer enerji türlerinin entegrasyonu ile ulaşılabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu doğası gereği kesintili olduğundan, mevcut enerji şebekesine entegrasyonları verimlilik, kararlılık ve güvenilirlik açısından bazı olumsuzluklar içermektedir (Luo ve ark., 2015, Ourahou ve ark., 2020, Bajaj ve Singh, 2020, Sinsel ve ark., 2020, Basit ve ark., 2020, Colmenar-Santos ve ark., 2020). Bu zorluklar, elektrik şebekesine ESS'ler dahil edilerek hafifletilebilir (Headley ve Copp, 2020, Suberu ve ark., 2014, Barton ve Infield, 2004, Lu ve ark., 2009, Abbey ve Joos, 2007). ESS'lerin güç sistemlerine entegrasyonu enerji kalitesini ve arz sürekliliğini artırmaktadır. Teknolojideki son gelişmeler sayesinde güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve enerji depolama çözümlerinin kombinasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır (Chen ve ark., 2017). ESS, güç sistemlerinin frekansının düzenlenmesi ve iletim hattı kapasitesinin yükseltilmesi açısından yük taleplerinin karşılanmasında, elektrik şebekesine sürekli desteği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının penetrasyonunu artırmada öncü bir rol oynamaktadır (Hasan ve ark., 2013). Özellikle, ESS sistemlerinin değerlendirilemeyen yenilenebilir enerjinin (RE) daha verimli bir entegrasyonu ve optimizasyonu, mikro şebeke ada işletimi (Wu ve ark., 2014), tepe yükü azaltarak sistem işletimini iyileştirme (Uddin ve ark., 2018), frekans regülasyonu (Shi ve ark., 2017) veya arıza desteği (Daoud ve ark., 2015) gibi olanaklar sağlayarak (Akinyele ve Rayudu, 2014) güç kalitesi artırma, enerji yönetimi ve koruma (Ruiz-Calvo ve ark., 2015) gibi yeni işlevler kazandırdığı bilinmektedir.

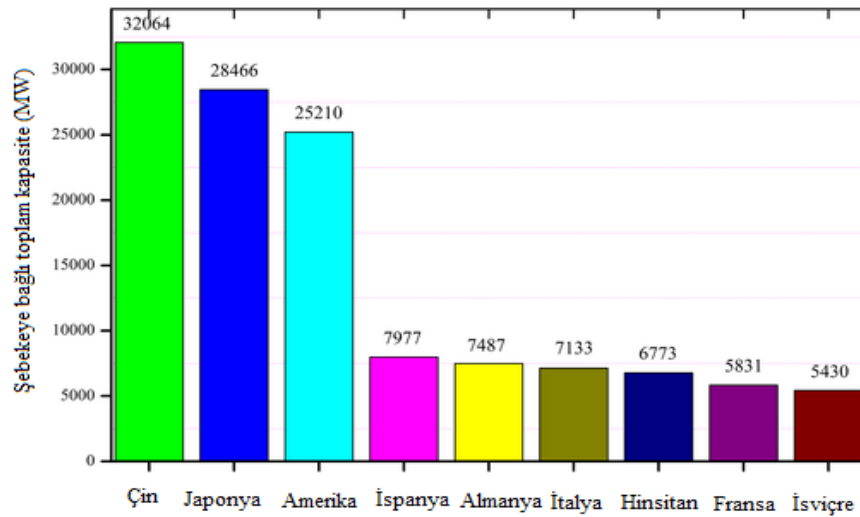
Sonuç olarak, ESS'li hibrit rüzgâr santralleri (Zhao ve ark., 2015a) veya ESS'li hibrit fotovoltaik (PV) santraller (Bullich-Massagué ve ark., 2017) gibi yeni kavramlar, bilimsel çalışmalarda giderek daha fazla araştırılmakta ve sahada uygulanmaktadır. PV ve rüzgâr enerjisi, 2005 yılında Avrupa kurulu elektrik kapasitesinin yaklaşık %6'sını temsil ederken, 2017'de (Europe, 2018) %19,5'e yükseldiği görülmektedir. Benzer eğilimler diğer coğrafi bölgelerde de görülebilmektedir. Küresel enerji ihtiyacının, yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya geneli enerji arzının yüzde 40'ını karşılamasının beklendiği 2040 yılına kadar dörtte bir oranında artacağı tahmin edilmektedir. Bu tarihte, yenilenebilir enerji kaynaklarının güvenilirliği, enerji talebi ve arzı arasındaki uyumsuzluk nedeniyle büyük bir zorluk olarak karşımıza çıkacaktır. ESS'ler gelecekte gündüz elektrikli araçların (EA) hızlı şarjlarına bağlı hem anlık güç artışları sebebiyle çok yüksek kapasite gereksinime bağlı olarak maliyetli güç üretim tesislerinin planlanmasına gerek kalmaması noktasında hem de yenilenebilir enerji penetrasyonunun doğasına bağlı kesintili güç üretiminde devreye girerek üretim sistemlerinin tasarımına farklı bir bakış açısı getirecektir (Cho ve Gabbar, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecek perspektifinde yapılan araştırmalara ek olarak ilerde bu sistemlere entegrasyonu kaçınılmaz olacak ESS'ler ile ilgili IEA verilerine göre; 2014 yılında 140 GW olan bu sistemler 2050 yılına kadar 450 GW'a artırılabilirse küresel ısınmanın 2 °C daha azalacağı da tahmin edilmektedir (IEA Reports (Erişim 1 ağustos 2020)). Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından ESS'ler için yayınlanan son rapora göre, ESS'lerin toplam kurulu şebekeye bağlı kapasitesi 2014'te 140 976 MW idi (Khan ve ark., 2019). Bu oranın neredeyse %99,3'ü pompalanan hidroelektrik depolama (HDS) şeklinde oluşmuştur ve yaklaşık olarak %1'i ise geri kalan diğer tüm teknoloji türlerini kapsamaktadır. ESS'lerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır ve şimdiye kadar ESS'lerin küresel kurulu şebekeye bağlı kapasitesi 2018'de neredeyse 175 823 MW'a yaklaşmıştır (Khan ve ark., 2019). Bu durumda, HDS, tüm enerji depolama yöntemlerinin toplam kurulu kapasitesinin %96'sı olan yaklaşık 169 557 GW'ı oluşturmaktadır. Diğer depolama türlerinin payı ise yaklaşık %4'e yükselmiştir. Enerji depolama sistemlerinin kullanımı artıyor olsa da gelecek vizyonunda halen keskin bir artış beklenmektedir.



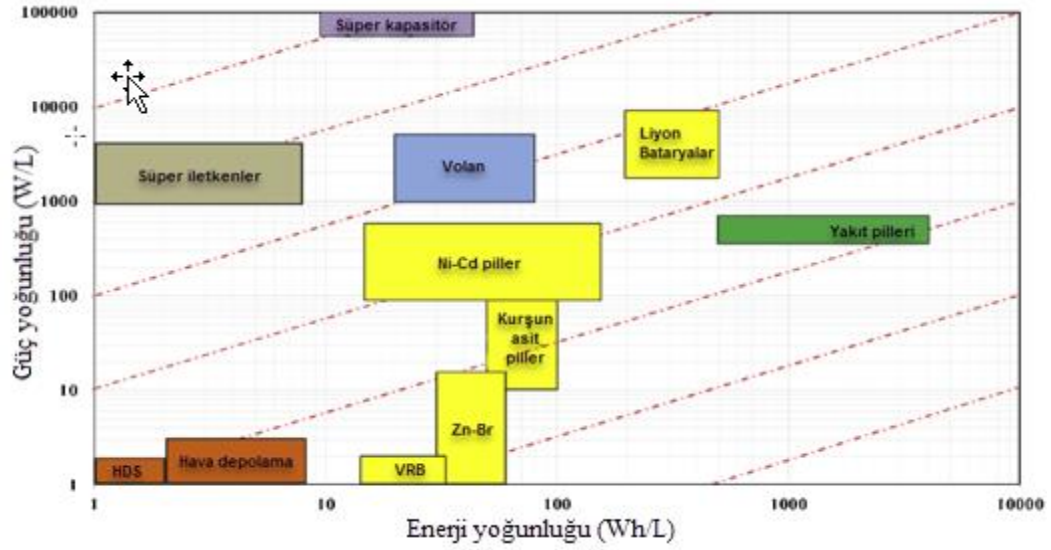
Şekil 2.2. A. Kurulu ESS'lerin toplam kapasitesi (MW). B, Diğer tüm ESS biçimlerinin kapasiteleri (MW) (yeniden düzenlenmiştir (Khan ve ark., 2019)).

Kurulu ESS'lerin ayrıntılı pasta grafiği Şekil 2.2. A,B'de gösterilmektedir. ESS'lerin diğer tüm türleri; elektrokimyasal, mekanik (HDS hariç), kimyasal (hidrojen) ve TEDS sırasıyla 2051, 1338, 18 ve 2859 MW depolama kapasitesine sahiptir (Khan ve ark., 2019).



Şekil 2.3. Farklı ülkelerin ESS'lerinin şebekeye bağlı toplam kapasitesi (MW) (yeniden düzenlenmiştir ((Khan ve ark., 2019)).

En yüksek enerji depolama sistemine sahip ülkelerdeki şebekeye bağlı kapasiteler (MW) Şekil 2.3.'te gösterilmektedir. Çin, toplam kurulu gücü 32 064 MW ile dünya lideridir, bu kapasitenin büyük bölümünü Çin'deki HDS tesisleri oluşturmaktadır. Japonya ve ABD ise sırasıyla 28 466 ve 25 210 MW kurulu güce sahiptir.



Şekil 2.4. Enerji depolama sistemleri ragone grafiği (yeniden düzenlenmiştir (Hajiaghasi ve ark., 2019)).

Genel olarak enerji üretim sistemleri tarafından arz edilen enerji uzun süre sürdürülebilir olmadığında, büyük miktarda enerji depolayabilen yüksek enerji yoğunluklu bir sistem ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Enerji depolama sistemleri depolama süresine göre sınıflandırılabilir. Kısa süreli enerji depolaması tipik olarak enerjinin saatler ile günler arasında depolanması olarak düşünülürse, uzun süreli depolama ise, enerjinin birkaç aydan bir sezona (3-6 ay) kadar depolanmasını ifade eder. Şekil 2.4.'te gösterilen farklı teknolojilere ait depolanan enerji yoğunluğu, birim hacim veya kütle başına biriken enerjiyi ifade ederken güç yoğunluğu ise, birim hacim veya kütle başına enerji aktarım hızı olarak ifade edilebilmektedir.

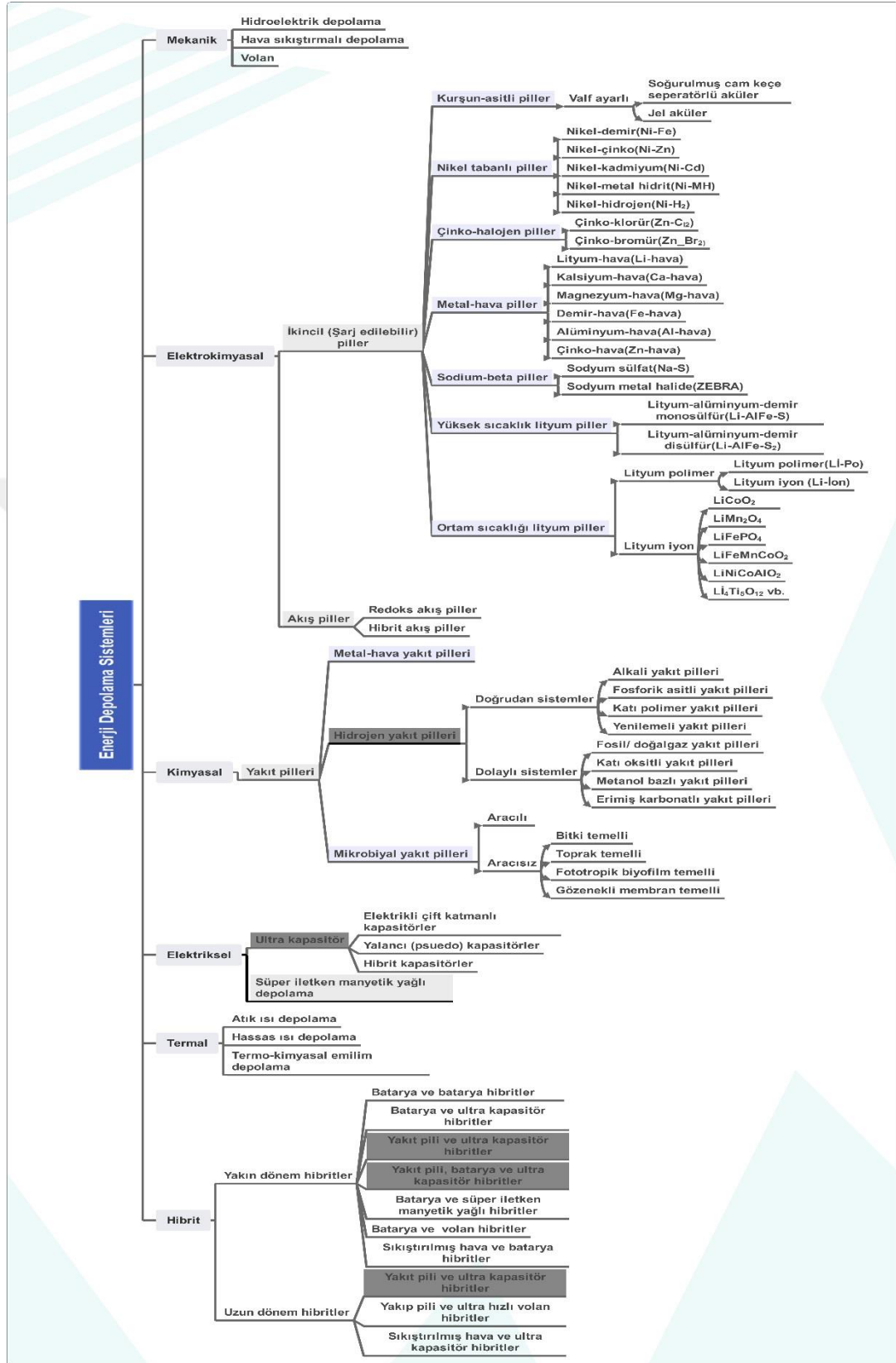
Bu bölümde, HDS (Wikipedia[Erişim 20-03-2007], Van Der Linden, 2003, Bueno ve Carta, 2006), sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi (SHDS) (Wang ve ark., 2006, Bullough ve ark., 2004, Najjar ve Jubeh, 2006, Sears, 2004, Najjar ve Zaamout, 1998), piller (Karpinski ve ark., 1999, Kluiters ve ark., 1999, Kashem ve Ledwich, 2007, Chalk ve Miller, 2006, Cook ve ark., 1991), akışkan temelli piller (Author, 2004, Office, 2005, Van Der Linden, 2006), yakıt pilleri (Chalk ve Miller, 2006, Weinmann, 1999), güneş enerjisi (Office, 2005), süper iletken manyetik enerji depolama sistemi (SMEDS) (Xue ve ark., 2006, Koshizuka, 2006, Kolkert ve Jamet, 1999), volan temelli enerji sistemleri (Suzuki ve ark., 2005, Kondoh ve ark., 2000, Van Der Linden, 2006), Kondansatörler ve SC'ler (Kondoh ve ark., 2000, Office,

2005) TEDS (Chen ve ark., 2016a, Wen ve ark., 2006, Chen ve Ding, 2006, Kishimoto ve ark., 1998, Kessling ve ark., 1998, Ordonez ve Plummer, 1997, Akbari ve Sezgen, 1995, Ameri ve ark., 2005, Rosen, 1999) ve Hibrit enerji depolama sistemi (HSS) dâhil olmak üzere ESS teknolojisindeki en son gelişmelerin özetlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca belirli uygulamalar veya ihtiyaçlar için en uygun enerji depolamasının seçilmesindeki kriterler incelenecektir.

2.1.1. Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması

ESS'leri sınıflandırılırken işlevleri ve kullanıldığı yapısal formları göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Storage, 2011). Bu sistemler oluşumlarına ve bileşenlerine göre farklı türlere ayrılmaktadır (Chau ve ark., 1999, Storage, 2011). İşlevsellik açısından; ESS teknolojisine, yüksek performanslı ancak nispeten düşük enerjili bir teknoloji olan UPS veya güç kalitesi ve enerji yönetimi için tasarlanmış bazı sistemler örnek olarak verilebilir. Enerjinin direkt olarak düşük maliyetlerde depolanması kolay olmasa da başka formlara dönüştürülerek kolayca depolanabilmektedir ve gerektiğinde tekrar elektriğe dönüştürülerek kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, elektriksel ve kimyasal enerji depolama sistemlerini kategorilerinde yeni bir yaklaşımla hibrit bir enerji depolama sistemini çift fonksiyonlu çevre ve dostu yeni bir enerji depolama sistemi planlanmıştır. Şekil 2.5., enerji depolama teknolojileri için tarafımızca önerilen çevreci ve yenilikçi ESS'nin, gri renkle işaretlendiği ESS sınıflandırmasını ayrıntılı olarak sunmaktadır. Ayrıca, enerji arzını desteklemek amacıyla kullanılan depolama teknolojileri, depolama biçimlerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Mekanik enerji depolama
- Elektrokimyasal depolama
- Kimyasal enerji depolama
- Elektrik enerjisi depolama
- Termal enerji depolama
- Hibrit enerji depolama



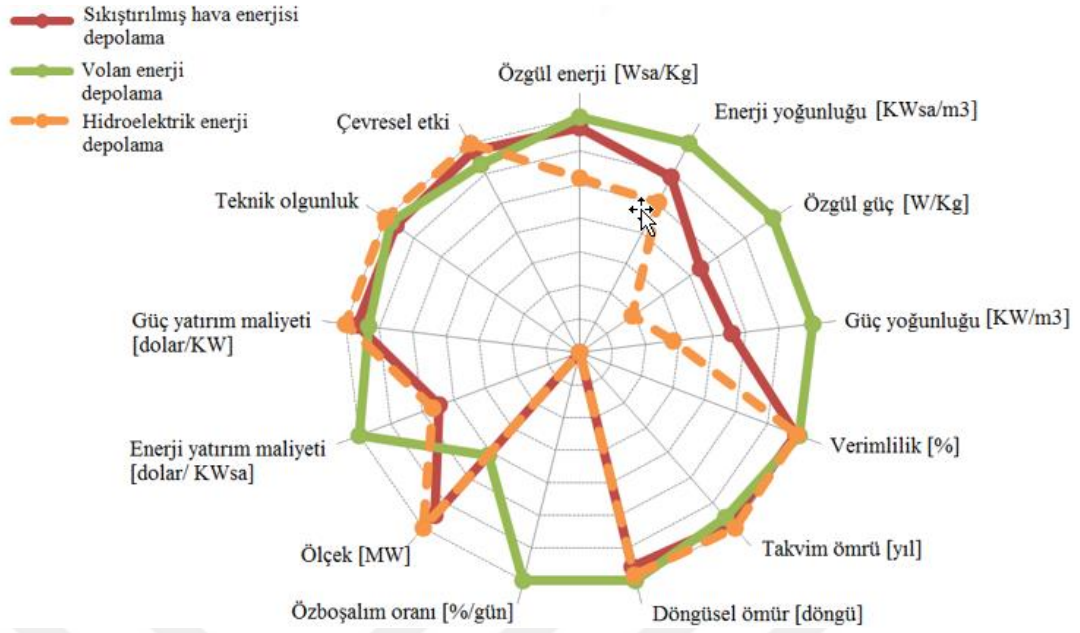
Şekil 2.5. Enerji depolama sistemleri sınıflandırılması (yeniden düzenlenmiştir (Hannan ve ark., 2017).)

2.1.1.1. Mekanik enerji depolama sistemleri

Mekanik enerji depolama sistemleri, reaksiyon süreleri, güç veya enerji yoğunluk seviyelerine göre üç temel kategoriye ayrılabilir. Reaksiyon süresi olarak yavaş olanlar HDS ve SHDS sistemleridir. Reaksiyon süresi hızlı ESS sistemleri ise volanlardır. Bu sistemlerde, talebin düşük olduğu zamanlarda, elektrik enerjisi potansiyel, kinetik veya basınçlı gaz prensibi ile mekanik enerjiye dönüştürülür. Talebin yoğun olduğu zamanlarda ise bu mekanik enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Prantil ve Decker, 2015). Tablo 2.1. ve Şekil 2.6.'da mekanik enerji depolama sistemlerinin teknik özelliklerine dayalı metrik verileri ele alınarak grafiksel ve numerik analizi yapılarak detaylı bir karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.1. On dört farklı metriğe dayalı mekanik enerji depolama sisteminin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		Hidroelektrik enerji depolama aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Sıkıştırılmış hava enerjisi depolama aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Volan enerji depolama aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[Wh/Kg]	0,30–1,33	3,20–60,00	5,00–200,00
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	0,48/0,87/0,78/6	19,89/28,50/30,00/11	56,94/58,16/30,00/19
Özgül güç	[W/Kg]	0,50–1,3	0,40–20,	0,25–424,00
Güç yoğunluğu	[W/Kg]	0,45/1,07/1,15/6 3	6,65/7,19/5,00/9 00	137,36/95,16/20,00/12
Verimlilik	[kW/m ³]	0,01–0,12	2,20–24,0	400,00–30,000,00
Takvim Ömrü	[%]	0,05/0,05/0,04/4	12,10/16,13/22,20/3	8,631/6,592/3,250/12
Döngüsel ömrü	[yıl]	0,01–0,12	0,04–10,00	40,00–2,000,00
Öz boşalım oranı	[%]	0,05/0,05/0,04/4	3,81/3,03/1,90/7	814,40/816,29/707,00/7
Ölçek	[%]	20,00–80,00	57,00–89,00	70,00–96,00
Enerji yatırım maliyeti	[yıl]	23,14/49,20/45,00/12	12,28/68,30/70,00/23	6,31/89,36/90,00/22
Güç yatırım maliyeti	[döngü]	20,00–80,00	20,00–40,00	15,00–20,00
		23,14/49,20/45,00/12	8,66/30,00/30,00/9	2,89/17,50/17,50/4
		10,000–60,000	8,000–30,000	10,000–100,000
		19,070/29,000/20,000/7	9,712/16,000/12,000/7	35,667/41,100/20,500/10
		0,00	0,00	24,00–100,00
		0,00/0,00/0,00/5	0,00/0,00/0,00/4	39,92/64,61/72,00/7
		10,00–8,000,00	0,01–3,000,00	0,001–10,00
		1,998/1,542/800/28	792,14/467,72/150/33	4,62/1,96/0,20/25
		1,00–291,20	1,00–140,00	200,00–150,000,00
		66,51/57,94/33,00/19	41,41/35,67/11,88/18	31,071/12,454/900/26
		300,00–5,288,00	400,00–2,250,00	30,28–700,00
		1,133/1,414/1,000/25	412,19/649,55/500/21	149,29/296,14/290,0/16



Şekil 2.6. Tablo 2.1.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak mekanik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm mekanik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2014)).

2.1.1.1.1. Hidroelektrik enerji depolama sistemleri

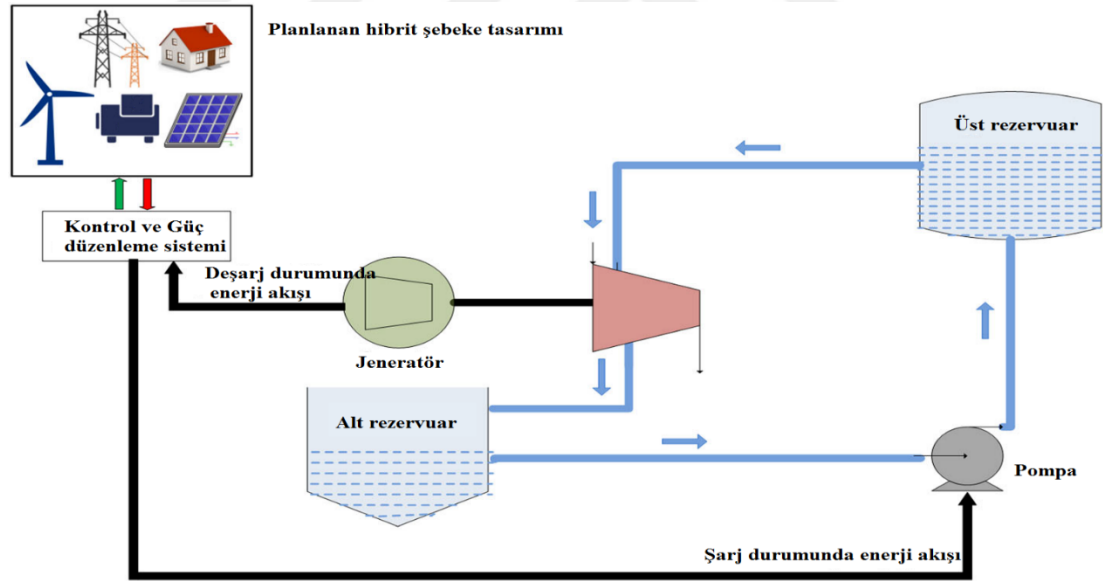
HDS dünya genelindeki en yaygın uygulanan enerji depolama sistemi olarak toplam enerji depolama kapasitesinin %95-99'luk kısmına karşılık gelmektedir (Khan ve ark., 2019, Breeze, 2018). Bu sistemde enerji üretimi gerekli olduğu durumda farklı iki rezervuar arasındaki potansiyel enerjinin yer değiştirmesi ile jeneratörlerden enerji elde edilmesi prensibine dayanmaktadır (Alami, 2020).

HDS'lerin genel performansı, düşük enerji talebi olan dönemlerde suyun bir alt rezervuardan bir üst rezervuara taşınmasıyla (Rehman ve ark., 2015) yerçekimi potansiyel enerjisinin yönetimine dayanmaktadır. Bu potansiyel, enerji talebinin yoğun olduğu dönemlerde ise tekrar üst rezervuardan alt rezervuar akıtılarak türbinlerin harekete geçirilmesiyle elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Barbour ve ark., 2016). HDS'lerde alt rezervuar olarak boş yer altı madenleri, denizlerin veya nehirlerin kullanılması sistem tasarımında maliyet avantajı sağlamaktadır (Ahearne, 2004). Şekil 2.7. HDS'nin temsili bir şemasını göstermektedir. Sistemin bileşenleri;

türbin, santral odası, denge odası, ana erişim tüneli, trafo tonozu, giriş-çıkış olarak alt ve üst rezervuar, asansör, ziyaretçi merkezi ve şalt sahasından oluşmaktadır.



Şekil 2.7. HDS genel şeması (yeniden düzenlenmiştir (Chen ve ark., 2009).)



Şekil 2.8. Kapalı döngü HDS genel akış şeması (yeniden düzenlenmiştir (Krishan ve Suhag, 2019).)

Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere üretilen enerjinin temeli iki rezervuar arasındaki yükseklik farkı olup sistemin enerji kapasitesini belirleyen temel unsur depolanmış suyun kütlesidir. Denklem 2.1'de verilen eşitlik depolama kapasitesinin karşılığı olan enerji miktarını ifade etmektedir.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

Burada E depolanan enerjiyi (J), m su kütlesini (kg), g yerçekimi kuvvetini (9,8 m/saniye²) ve h ise iki rezervuar arasındaki yükseklik farkını (m) ifade etmektedir. HDS ve SHDS'ler birkaç saatlik yüzlerce MW'lık sistemler olarak tasarlanabilirken, volanlar ise sadece birkaç dakikalığına birkaç yüz kW civarında üretim yapabilecek depolama kapasiteleri ile sınırlıdır (Alami, 2020). Ayrıca ESS'ler ile karşılaştırıldığında en büyük avantajlarından birisi kendi kendine boşalma (öz boşalım) seviyelerinin çok düşük olmasıdır.

HDS'ler, yüksek enerji depolama potansiyeli, uzun depolama süresi, yüksek verimlilik ve birim enerji üretiminde nispeten düşük sermaye maliyetine sahip olgun bir teknolojidir. Düşük buharlaşma, sistemin depolama süresinin saatlerden günlere ve hatta yıllara kadar uzun olmasına imkân vermektedir. Ancak bu avantajların yanında sistemin rezervuarları için geniş alan sıkıntısı ve bu alanların tesisi için doğaya verilen zarar, sistemin uzun inşa süresi ve yüksek maliyet sistemin önemli kısıtlarındandır (Denholm ve Holloway, 2005). Genelde bu sistemlerin kullanım ömrü yaklaşık olarak 30-50 yıl arasında olup verimlilikleri %65-75 gibi kabul edilebilir bir aralıktadır. Ancak bahsedilen kurulum maliyeti yapılan çalışmalara göre 500-1500 \$/kW ve 10-20 \$/kWh olarak hesaplanmıştır (Kaldellis ve Zafirakis, 2007). Bu sistemlerin bu kadar büyük güç rezervine sahip olmasının yanında nispeten hızlı reaksiyon sürelerine (1 dakikadan daha az (Díaz-González ve ark., 2012)) sahip olması bir diğer dikkat çekici özelliğidir.

HDS'ler uzak bölgelere güç sağlamak amacıyla zorlu arazi şartlarında yenilenebilir enerji ile hibrit bir şebeke tasarımına olanak sağlayan (100 kW) mikro ve hatta (5 kW) piko mertebelerinde tasarlanabilmektedir (Rehman ve ark., 2015). 2017 yılında 322 adet bulunan ve toplam kurulu gücü 164,63 GW olan HDS'lerin yaygın tasarımları 1000 MW (100 MW- 3000 MW) civarındadır ve halen dünya genelinde yılda 5 GW kadar yeni HDS kurulmaktadır. ESS'ler arasında kapasitesi en yüksek olan bu sistemler, bu özellikleri sayesinde enerji yönetim, frekans kontrolü ve rezerv kullanımı amacıyla kullanılabilirler. İlk olarak İsviçre ve İtalya'da 1890'da kullanılmaya

başlansa da, sistemin büyük ölçekli ilk ticari uygulaması 1929 yılında ABD’de gerçekleştirilmiştir (Ahearne, 2004). Tablo 1’de bazı gelişmiş ülkelerdeki kurulu HDS’ler verilmiştir.

Tablo 2.2. Gelişmiş ilk beş ülke ve bu ülkelere ait hidroelektrik enerji depolama sistemlerinin kurulu kapasiteleri (yeniden düzenlenmiştir (KRISHAN VE SUHAG, 2019).).

Ülkeler	Net üretim Değeri (GW)	Toplam Kurulu Kapasite Açısından Yüzdelik Dilimi
Çin	32,1	%1,9
Japonya	28,5	%8,7
Amerika	24,2	%1,8
İspanya	8	%7,37
İtalya	7,1	%5,9

Yapılan birçok araştırmada bu tekniğin önemine detaylı bir şekilde değinilmiş ve sistem üç ana depolama türüne ayrılmıştır:

- Kapalı döngü: Başka bir su kütesine bağlı olmayan, dikey bir açıklıkla ayrılmış iki rezervuardan oluşmaktadır.
- Yarı açık: Sürekli akışı olan bir yapay veya değiştirilmiş rezervuar ve bir değiştirilmiş göl veya nehir barajından oluşmaktadır.
- Açık sistem: Hem üst hem de alt rezervuardan sürekli su akışının olduğu bir sisteme dayanmaktadır (Wänn ve ark., 2012).

Güç sistemine bağlanan HDS’nin faydaları, aşağıda özet olarak gösterildiği üzere literatürlerde de açık bir şekilde vurgulanmıştır (Wang ve ark., 2018, Kiran ve Kumari, 2016).

- Talebin yüksek olduğu zamanlarda enerji sağlayabilmekte ve ana yük santrallerinin (kömür santrali ve nükleer santral gibi) talebin düşük olduğu dönemlerde de yüksek verimle çalışmasına olanak sağlamaktır.
- Ayrıca esnek olan bu sistem, enerji üretim sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kararsız üretimini dengeleyebilecek şekilde kontrol sağlamaktadır.
- Sistemin hızlı reaksiyon özelliği, onu güç sistemin toparlanması için ideal kılmakta ve rezervin sürekli ve kararlı kalmasına olanak sağlanmaktadır.

- Yüksek ataletli nükleer enerjiyi tamamlamak için hızlı reaksiyon verebilen tepe seviye tesis olarak kullanılabilmekte ve değişken rüzgâr/güneş enerjisi için bir tamamlayıcı olarak görev yapabilmektedir.

Tüm bu yoğun enerji talebine rağmen yeni HDS projelerinde bir direnişle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu direniş gruplarının nehir akışlarının yönünü değiştirme, yapay su kütleleri oluşturma, su kalitesi, güç ve iletim hattı güzergâhı, kötü kokular, sivrisinek vebaları, baraj patlaması riskleri ve deprem riskleri gibi sorunlar konusunda endişeleri bulunmaktadır (Droste-Franke, 2012, Steffen, 2012, Yang ve Jackson, 2011). Ayrıca, maddi tazminata bağlı inşa etme zorluğu ve inşa süresi sistemin analiz parametrelerindendir (Steffen, 2012). Tüm bu endişelerin bazıları, farkındalık eksikliğinin bir sonucudur (Yang ve Jackson, 2011). Bu endişe ve yüksek maliyet kısıtlamalarının giderilmesi noktasında çalışmalar yer altı HDS sistemlerine doğru kaymaktadır. Böylece ekolojik canlılar korunabilecek, çevresel etkiler azaltılacak, rezervuar oluşturma maliyeti ve uygun arazi bulamama gibi kısıtlara çözüm getirilebileceği düşünülmektedir.

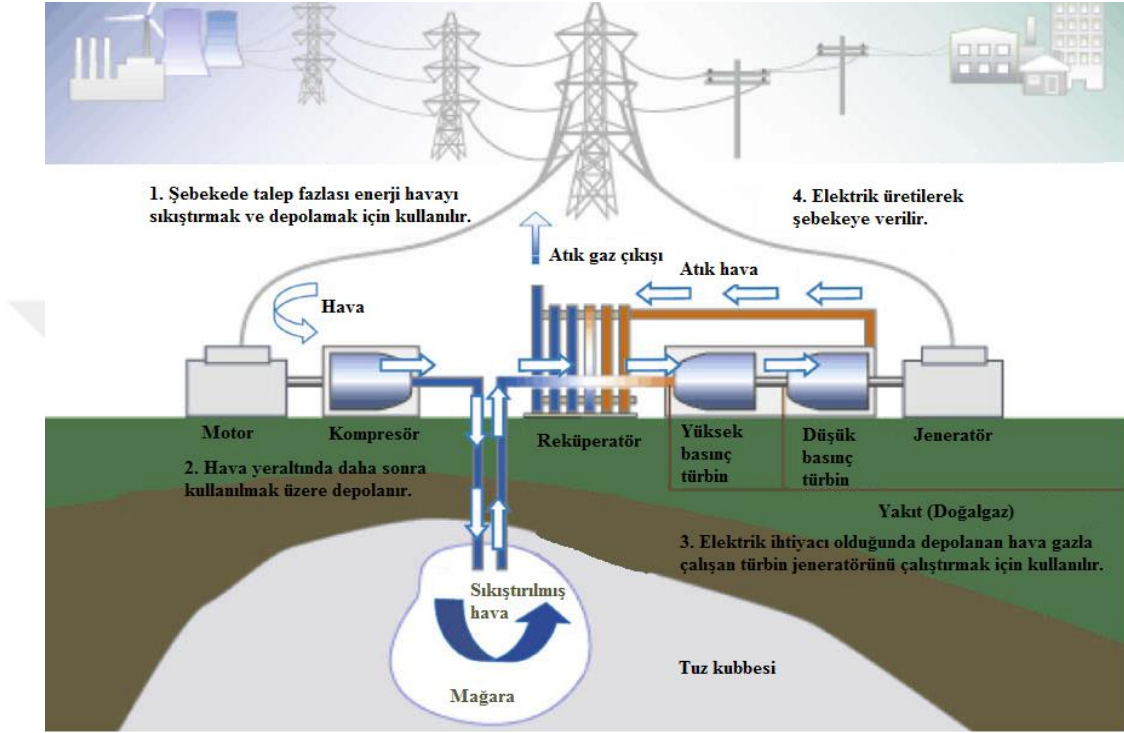
2.1.1.1.2. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi

SHDS'lerde, talep fazlası enerji mevcut olduğunda hava sıkıştırılır ve bir yeraltı mağarasında, kullanılmayan maden gibi alanlarda veya yapay olarak depolanması ve enerji ihtiyacı olduğunda ise, bu basınçlı havanın tekrar elektrik üretmek üzere bir türbine gönderilmesi prensibiyle çalışan sistemlerdir. Bu mağaralar, mevcut tuz veya kaya oluşumları ile akifer katmanları gibi boşluklar şeklinde doğal yollardan oluşabilmektedir. Ancak bu jeolojik oluşumların her yerde bulunamaması sebebiyle sistemin bu ihtiyacını giderebilmek için yüksek basınçlara dayanabilen, yüksek maliyetli büyük çelik tanklar yeraltında kurulmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için, düşük deşarj verimliliği sorunuyla da karşı karşıya olan gelişmiş bir adyabatik SHDS kurulumu önerilmiştir. Ayrıca bu gibi dezavantajları gidermek için diğer bir uygulama olarak 2016 yılında soğutma, ısıtma ve elektrik sistemleri birleştirilmiştir (Yao ve ark., 2016). Yakın zamanda SHDS'lerin, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye geçici olarak bağlanabilmesi noktasında dengeleyici

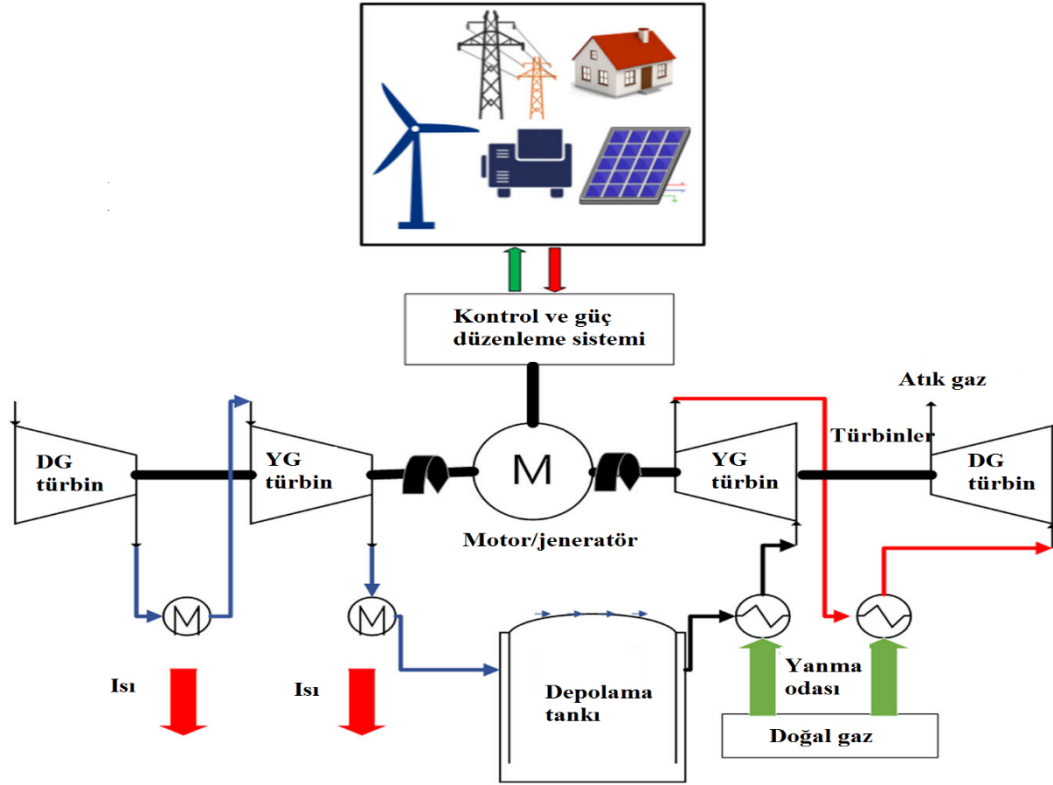
sistemlere ihtiyaç duyulması ve bu sistemlerin enerji kullanım sürelerini değiştirme yetenekleri sayesinde ekonomik olarak çekici bir seçenek olabileceği düşünülmektedir (Budt ve ark., 2016). Büyük ölçekli SHDS'lerde ekonomik uygulanabilirlik açısından uygun bir jeolojik yeraltı mağarası ihtiyacının zorunluluk olmasına rağmen küçük ölçekli SHDS'ler, yapay yer üstü depolama imkânına sahiptir. Bu nedenle, küçük ölçekli tasarlanan dağıtık üretim (DÜ) enerji sistemleri de dâhil her yerde kullanılabilir. Böylece yanlış kullanıldığında geri dönüşümü kolay olmayan ve tehlikeli olan bu sistemlerin yerini küçük ölçekli SHDS'ler alabilecektir (Matters, Jannelli ve ark., 2014). Bu sistemlerde enerjinin depolanması noktasında bir diğer seçenek olarak sıvılaştırılmış havayı kriyojenik sıcaklıklarda yalıtılmış düşük basınçlı tanklarda depolamaktır. Basınçlı hava ile karşılaştırıldığında, sıvılaştırılmış hava orta basınçlarda muhafaza edilebildiğinden daha düşük kayıp oranlarına sahiptir. Bu nedenle daha yoğun ve daha küçük tanklarda saklanabilen bu seçenek, uzun süreli depolama için basınçlı havadan daha iyi bir alternatif olabilmektedir. Örnek verecek olursak yapılan bir araştırmaya göre 5000 m³'lük bir tanktaki belirli bir sıvılaştırılmış hava miktarı için, yaklaşık 310 000 m³'lük bir SHDS hacmine karşılık geldiği gösterilmiştir (Krawczyk ve ark., 2018). Şekil 2.9. ve 2.10.'da şeması ve çalışma prensibi detaylı olarak gösterilen bu sistemler beş temel bileşenden oluşmaktadır;

- Kompresör veya türbin dizilerine alternatif bağlantı sağlamak için kavramalar kullanan bir motor/jeneratör sistemi.
- Sıkıştırma maliyetini iyileştirmek ve basınçlı havanın nem içeriğini azaltmak için ara soğutucular ve son soğutucular ile iki veya daha fazla aşamalı bir hava kompresörü sistemi.
- Hem yüksek hem de düşük basınçlı türbinleri içeren bir türbin dizisi sistemi.
- Sert kaya oluşumlarının kazılmasıyla oluşturulan yeraltı mağaraları, tuz oluşumlarının çözelti veya kuru madencilik ile oluşturulan tuz mağaraları, su taşıyan akiferler tarafından oluşturulan gözenekli ortam rezervuarları, basınçlı havayı depolamak için konteyner veya tükenmiş gaz veya petrol sahaları.
- Yakıt depolama ve ısı eşanjör üniteleri gibi ekipman kontrolörleri ve yardımcı sistemlerdir.

Gaz türbini, havayı sıkıştırmak için türbin jeneratörünün güç çıkışının %60'ını kullanmaktadır. Bu nedenle, bir SHDS kullanılarak bu enerji ihtiyacı gaz türbini jeneratörünün çıkışından kullanılmaz, bunun yerine SHDS'de önceden depolanmış basınçlı havadan bu ihtiyaç karşılanmaktadır.



Şekil 2.9. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi (yeniden düzenlenmiştir (Mcdowall, 2004).)



Şekil 2.10. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi akış şeması (yeniden düzenlenmiştir (Krishan ve Suhag, 2019).)

SHDS'ler HDS'ler dışında ticari olarak sunulan ve yüksek enerji depolama kapasitesine (tek ünite başına 100 MW) sahip tek teknolojidir. Kapasiteleri 50-300 MW arasında değişebilen bu sistemler, sık başlatma/kapatma döngülerini sürdürmek üzere tasarlandıkları için yük takibi esnasında gerçekleşen yük değişikliklerine kolaylıkla yanıt verebilmektedirler. SHDS sistemleri ayrıca geleneksel ara üretim destek birimlerine kıyasla pozitif çevresel etkilere sahiptir. Ayrıca, nispeten uzun bir depolama süresine, düşük yatırım maliyetlerine ve yüksek verimliliğe sahiptir. SHDS'lerin bu verimliliği %70-89 aralığında ve kullanım ömürleri yaklaşık 40 yıl civarındadır (Zhang ve ark., 2019). Bu sistemlerin yatırım maliyeti, genelde kW başına 400 ila 800 \$ arasında olup yeraltı depolama maliyetlerine göre değişmektedir (Chen ve ark., 2009). Yapılan tekno-ekonomik analizlere göre doğal gaz fiyatları düşük ve elektrik fiyatları yüksek olduğunda ekonomik fizibiliteleri yüksektir (Lund ve Salgi, 2009). Yani SHDS'lerin ekonomik karlılığı diğer ara üretim destek sistemlerinin üretim maliyet değişkenlerine bağlı olarakta değişmektedir.

Bu sistemlerde kullanılacak basınçlı havayı depolamanın iki yolu bulunmaktadır. Bunlardan birincisi adyabatik ve ikincisi diyabatiktir. Adyabatik SHDS (A-SHDS) ile hava, ısı kazancı veya kaybı olmadan sıkıştırılmaktadır. Diyabatik sistemde ise gaz soğutucudan geçtikten sonra depolanmaktadır. Diyabatik SHDS (D-SHDS) işleminde kompresör havayı sıkıştırırken aynı anda hava ısıtılmaktadır (Cleveland ve Morris, 2005). Bir hava soğutucusu ısıyı dağıtarak basınçlı havayı depolamaktadır. Diyabatik sistem tahliyesi ile soğutulan hava daha sonra yanma odasında yakıtla tekrar ısıtılmaktadır (Lund ve ark., 2015, Zakeri ve Syri, 2015). Bu ısıtıcı türbini tahrik etmek için kullanılmaktadır. Son olarak ise jeneratörlerde elektrik enerjisi üretilmektedir (Chen ve ark., 2009, Zakeri ve Syri, 2015). A-SHDS, sistemin verimini yaklaşık %20 artırmaktadır (Fuchs ve ark., 2015). Bu nedenle, SHDS için yeraltı depolama tesisleri sistem tasarımında öncelik haline gelmektedir.

Bu sistemlerin verimliliğini artırmak için alternatif depolama materyali olarak sıvılaştırılmış havanın sistemdeki ek enerji ile üretilmeye yönelik en basit yaklaşımı, genişleme için bir Joule-Thompson etki valfinin kullanıldığı Linde-Hampson döngüsüne dayanmaktadır. Bu çevrimin diğer varyasyonu olarak, genişleme için kriyojenik türbinleri de içerebilir (örneğin, Claude ve Collins çevrimleri), bu da daha düşük çalışma basınçlarına, daha yüksek sıvılaştırılmış hava üretim oranlarına ve dolayısıyla yüksek verimliliğe olanak sağlayabilmektedir (Abdo ve ark., 2015). Deşarj sırasında, yüksek basınçlı hava sağlamak için sıvılaştırılmış hava pompalanıp, buharlaştırılarak yüksek basınç altında ısıtılmaktadır. İhtiyaç olunan bu ısı, dış hava gibi herhangi bir ortam sıcaklığından veya doğal gaz dan da sağlanabilmektedir. Hava sıcaklığındaki bir artış, sistemin spesifik performansını ve verimliliğini artırmakta ve onu diğer enerji depolama teknolojileriyle rekabet edebilir hale getirmektedir.

Sistem verimliliğini artırmak için sıvılaştırma atıklarının geri dönüşümünü ve sıvılaştırılmış havanın yeniden gazlaştırılmasının harici enerji gereksinimlerini azaltmaya yönelik yöntemler önerilmiştir (Peng ve ark., 2018b, She ve ark., 2019, Antonelli ve ark., 2017). Örneğin, sıvılaştırılmış hava buharlaştırma aşamasından gelen atık soğutma gücünün diğer çevrimlerde (örneğin Rankine) kullanılması sistem verimliliğini %80'in üzerine çıkarabilmektedir (Antonelli ve ark., 2017). Soğutulan

hava, bir Brayton döngüsünde veya bir kriyojenik organik Rankine döngüsünde bir ısı emici olarak kullanılabilir. Sıvılaştırılmadan önce havayı sıkıştırırken oluşan atık ısı depolanabilir ve türbinlerden geçerken havayı yeniden ısıtmak veya ayrıca bir Brayton çevriminde bir ısı kaynağı olarak işlev kazandırma amacıyla kullanılabilir. Brayton çevrimini öneren bir çalışmada (She ve ark., 2019) hava sıvılaştırmasından sağlanan ısıyı kullanılmakta ve sıvılaştırılmış doğal gaz depolama sisteminin buharlaştırıcısına ısı verilmekte, böylece daha yüksek verimlilik için iki sistemi birleştirilmektedirler. Araştırmacılar, sistem gidiş-dönüş verimliliğinin yaklaşık %70 olduğunu ispatlamışlardır. Başka bir çalışmada (Peng ve ark., 2018a), sıvılaştırmanın sıkıştırma aşamasında fazla ısıyı toplamak ve deşarj yaparken genleşme esnasında bu ısıyı havaya salmak için doğrudan temaslı ısı eşanjörleri olarak paketlenmiş bir yataklama sistemi önerilmektedir. Yapılan bir diğer çalışmada ise (Xie ve ark., 2018) atık ısıyı kullanmadan sıvılaştırılmış hava enerji depolama sistemleri için ekonomik uygulanabilirliğin mümkün görünmediği ve daha büyük tesis kurulumları ile fizibilitenin iyileştirilebileceği öne sürülmektedirler.

Sıkıştırma esnasında (yani ısı salımı) ve genleşme aşamasından önce (yani ısı absorpsiyonu) ısının nasıl işlendiğine bağlı olarak, izotermal, diyabatik ve adyabatik olmak üzere üç tip SHDS bulunmaktadır. Dolgu sıkıştırma işleminden kaynaklanan termal enerji, daha önce de değinilen diyabatik tipte dağıtılmaktadır ve deşarj süresince ihtiyaç olmaktadır. Ancak deşarj sırasında kullanılmak üzere adyabatik tip bir termal depoda tutulmaktadır. Bu durum, diyabatik SHDS sistemlerini daha düşük verimli hale getirmektedir. Çünkü basınçlı havayı enerji çıkışı için türbine yönlendirilmeden önce ısıtmak için genellikle doğal gaz gibi bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek olarak Almanya'daki Huntorf gaz türbini tesisi, ilk şebeke ölçekli SHDS diyabatik bir tesis idi ve üretilen 1 kWh elektrik başına kalorifik değer yaklaşık olarak 1,6 kWh doğal gaz tüketmektedir. İzotermal SHDS sistemlerinde ise, sıkıştırma ve genleşme sırasında sıcaklık oda sıcaklığına yakın tutulmaktadır. Bu sayede sıkıştırma için gereken enerji termodinamik olarak mümkün olduğunca düşük ve genleşme sırasında üretilen enerji ise optimum olmaktadır. Bir diğer çalışmada ise, Budt ve ark. bu üç farklı SHDS hakkında daha geniş ve kapsamlı bir çalışma yapmışlardır (Budt ve ark., 2016).

SHDS sistemleri olgun teknolojiler olmasına rağmen, halen mevcut verimliliklerinin nasıl artırılabilirliğini belirlemeyi hedefleyen çalışmalar devam etmektedir (Budt ve ark., 2016, Aneke ve Wang, 2016). Birkaç adyabatik SHDS konfigürasyonu için bir şarj ve deşarj döngüsünün verimliliği ile SHDS verimliliğini etkileyen ana faktörlerinin incelendiği çalışmada (Hartmann ve ark., 2012) enerji dengeleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Yapılan bir başka çalışmada ise (Raju ve Khaitan, 2012) mağaraların içindeki diyabatik SHDS için depo içindeki kütle ve enerji dengelerinin formüle edilmesini içeren, doğru bir dinamik benzetim modeli geliştirilmiştir. Modeli doğrulamak için Huntorf gaz türbini tesisinin ve SHDS'nin tipik bir günlük çalışma programı kullanılmıştır. Mağara içindeki adyabatik ve izotermal varsayımlar kullanılıp elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak daha fazla öngörü sağlanmıştır. HDS'de olduğu gibi, SHDS'in uygulanmasındaki en büyük engel olan elverişli bir coğrafi alana duyulan ihtiyaç ve bu sorun genelinde yalnızca yakınlarda bulunan kaya madenleri, tuz mağaraları, akiferler veya tükenmiş gaz sahalarının bulunduğu enerji santrallerine ait alanlar için ekonomik olarak uygulanabilir kılınmaktadır. Ek olarak, modern SHDS sistemleri kimyasal pillerin enerji yoğunluğuna yakın yoğunlukta olabilmekte hatta ihtiyaç duyulması halinde daha yüksek enerji yoğunluklarını da sağlayabilmektedirler. Böylece daha verimli çalışabilmektedirler (Alami, 2015, Xia ve ark., 2015, Brown ve ark., 2014). Sırasıyla, Almanya ve Amerika'da, 110 MW ve 290 MW olmak üzere iki adet proje bulunmaktadır (İbrahim, 2008). Bununla birlikte, SHDS teknolojisi şu anda çok fazla ilgi görmektedir. Dünyada toplam kurulu gücü 5 198 MW mevcut ve proje aşamasında olan SHDS'lerin bazıları Tablo 2.3.'te verilmiştir (Mcgrail ve ark., 2013, Leszczynski ve Grybos, 2019, Zobaa, 2013, Chen ve ark., 2016b, Wang ve ark., 2017).

Tablo 2.3. Dünyada kurulan ve proje aşamasında olan SHDS'ler (yeniden düzenlenmiştir (Krishan ve Suhag, 2019).)

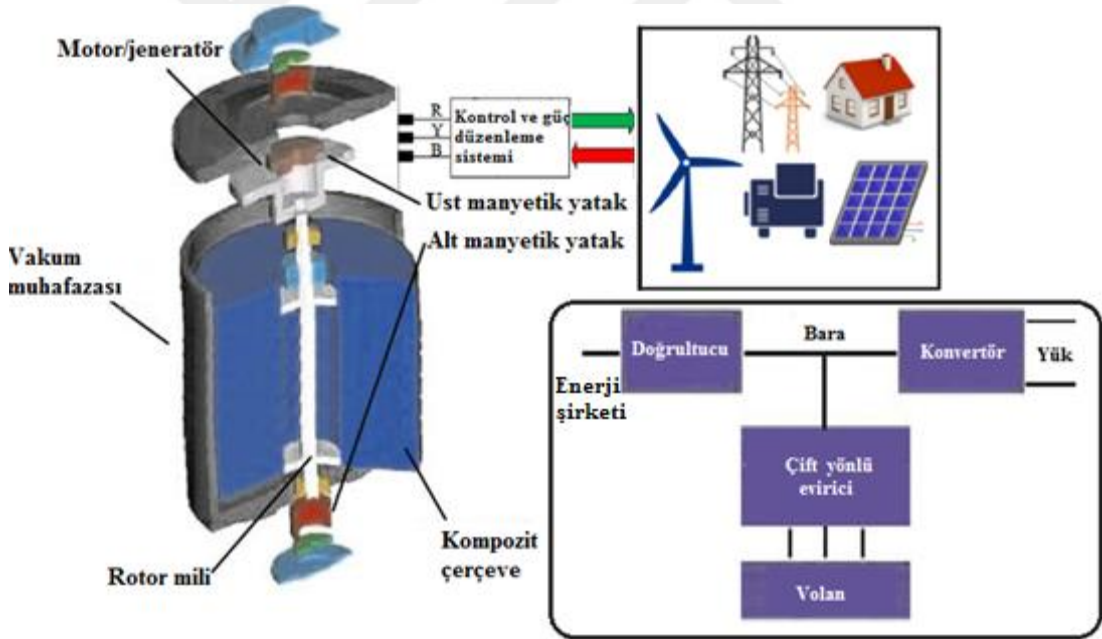
Ülkeler	Kapasite (MW)	Yıl
Huntorf, Almanya	290	1978
McIntosh, AL, Amerika	110	1991
Sachsen Anholt, Almanya	90	2010
Norton, OH, Amerika	2700	Proje aşamasında
Markham, TX, Amerika	540	Proje aşamasında
Utah, Amerika	1200	Proje aşamasında
Larne, Kuzey İrlanda, İngiltere	268	Proje aşamasında

Bu sistemler; yük kaydırma, tepe değerini azaltma, voltaj ve frekans kontrolü için şebeke uygulamalarını içeren büyük tasarımlar için uygundur ve reaksiyon süreleri kısadır. Tablo 2.1.'de görüldüğü üzere, SHDS ayrıca HDS'ye kıyasla daha yüksek hacimsel ve kütsel enerji ve güç çıktıları vermektedir (Saadat ve Li, 2012). Bunun yanında, HDS'nin SHDS'ye göre iki belirgin avantajı vardır. Birincisi, HDS'nin CO₂ emisyonları çok düşükken, SHDS genellikle (her zaman değil) doğal gaz veya başka bir yakıt kullanmaktadır. İkincisi, SHDS tam kapasite çıkışına ulaşmak için 10 dakikaya varan önemli rampa süreleri gerektirmektedir (Sabihuddin ve ark., 2014). Bunların yanında SHDS'ler RES üretim tesislerinin enerji üretimini kalitesini iyileştirebilir, bu nedenle SHDS akademik ve endüstriyel sektörlerin dikkatini çekmektedir. Tüm bu çalışmalar ışığında SHDS alanındaki en son gelişme, geleneksel SHDS sorunlarının üstesinden gelen ve sistem verimliliğini artıran süper kritik basınçlı hava veya sıkıştırılmış CO₂ kullanımıdır.

2.1.1.1.3. Volan enerji depolama

Hızlı reaksiyon süresi ile ön plana çıkan ve enerjiyi dönen kinetik enerji formunda depolayan bu mekanik enerji depolama sistemi binlerce yıldır kullanılmaktadır (Alami, 2020, Weinstock, 2002, Lazarewicz ve Arseneaux, 2005). Kinetik enerji depolaması olarak da bilinen volan enerji depolama, yüksek güç ve enerji yoğunluğu sağlamaya uygun bir mekanik enerji depolama sistemidir. Volanlar Şekil 2.11.'de gösterildiği üzere şarj durumunda motor, deşarj durumunda ise jeneratör olarak işlev görmektedir. Bu teknolojiye yer alan konvertör, elektriksel bir ara yüz görevi görmektedir. Referans (Gurumurthy ve ark., 2016)'de, sıfır gerilim geçişi ve sıfır akım geçiş teknikleri kullanılarak Şekil 2.11.'de görüldüğü üzere çift yönlü geliştirilmiş bir evirici topoloji mekanizması geliştirilmiştir. Bu çalışmadan da anlaşıyor ki önerilen topoloji mekanizması kullanılarak tasarruf edilen gücün kapsamı %2,5-3,5 civarında olmaktadır. Bu nedenle, bu depolama sisteminin şarj ve deşarj kalitesini optimize etmek için gelişmiş bir kontrolör kullanılabilmekte ve bu da enerji tasarrufu yönetimini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Volan enerji depolama sistemlerinin çeşitli avantajları olmasına rağmen, yüksek yatırım maliyetleri ve yüksek öz boşalım oranları (saatte %3-20) gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Patel ve Beik, 2021). Ayrıca yüksek

güç yoğunluğu ve düşük enerji yoğunluğu bu sistemlerin uygulanmasını sınırlamaktadır. Sınırlamalar aşarak bu sistemler, azaltılmış CO₂ emisyonları ve güç sistemlerinde geliştirilmiş kararlılık katkısı ile son derece güvenilir ve sürdürülebilir hale gelebilmektedirler. Sistemin toplam enerji çıkışı ise; motor/jeneratör çevrim oranı, rotorun büyüklüğü ve hızına bağlıdır (Chen ve ark., 2009). 5 Joule/Kg'lık özgül enerjisi ile volanın hızları sırasıyla, 600 devir/dakika ve 50 000 devir/dakika düşük ve yüksek hızlarda çalışarak üretilen enerjiyi belirlemektedir (Tester ve ark., 2012). Ayrıca enerji kapasitesi yaklaşık olarak 19 MWh civarındadır. Bu enerji ile 1,65 MW yükü 10 saat boyunca besleyebilmekte veya daha az güç talebine bağlı olarak daha uzun enerji arzı sunabilmektedir (Díaz-González ve ark., 2012). Yapılan bir diğer çalışmada ise ekonomik karlılık açısından bakım maliyeti 19 \$/kWh olarak düşük iken buna karşın toplam maliyet 5000 \$/kWh yüksek olarak ortaya konmuştur (Luo ve ark., 2015).



Şekil 2.11. Volan enerji depolama sistemi ve akış temel şeması (yeniden düzenlenmiştir (Lazarewicz ve Arseneaux, 2005).)

Bu sistemlerde, kalıcı mıknatıslı makineler, yüksek verimleri, yüksek güç yoğunlukları ve düşük rotor kayıpları sayesinde volan enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Faraji ve ark., 2017). Asenkron, rulmansız ve değişken relüktanslı şekilde olan diğer elektrikli makineler, tatbik hızı, rölan

kayıpları, titreşim, gürültü ve maliyet kısıtlamaları açısından farklılık göstermektedir. Yükleme enerjisi, bir volanın dönen kütesine girilmekte ve kinetik enerji olarak depolanmaktadır. Döner kütle, uzun soluklu depolama ve güvenlik sorunlarına karşın sürtünme kayıplarını ortadan kaldırmak için vakumda çalışan manyetik yataklar tarafınca desteklenmektedir (Bolund ve ark., 2007). Rotor yatak sistemi, tüm volan sistemlerinin kuvvetli yönlerinden istifade etmek için mekanik, manyetik ya da her ikisinin hibrit olarak tasarlandığı akışkan, diyamanyetik, elektromanyetik, süper iletken ve ferroakışkan bir sistem olabilmektedir. Mekanik yataklarda %5 olan kayıplar manyetik yataklarda %1'e kadar düşebilmektedir (Liu ve Jiang, 2007). Manyetik yatağın sürtünme kaybı olmadığı için yağlama ihtiyacı yoktur, sadece karmaşık kontrol sistemleri vardır ve bazı ek enerji gereksinimleri bulunmaktadır. Bu sistemlerin geliştirmeleri genelde motor/jeneratör, hibrit yatak sistemlerinde ve volan alt sistemlerinde yapılmaktadır. Süper iletken manyetik yataklar (SMY'ler) yüksek hızlı uygulamalar için uygun olup sadece kriyojenik soğutma sistemini çalıştırmak için fazladan bir enerji gerektirmektedir. Denklem 2.2'deki bağıntıdan da anlaşılacağı üzere volanlarda yüksek güç yoğunluğu ile yüksek dönme hızının elde edilmesi, depolanan enerji hızın karesi ile orantılı, fakat kütle ile sadece doğrusal orantılı olduğundan anlaşılmaktadır.

$$E_{fw} = \frac{1}{2} J \omega^2, \frac{1}{2} m r^2 = \frac{1}{2} \rho x h x \pi r^4 \quad (2.2)$$

Burada; E_{fw} , çarkta depolanan enerji; J eylemsizlik momenti, ω , m , r , ve h sırasıyla y çarkının açısal hızı, kütlesi, yarıçapı, kütle yoğunluğu ve uzunluğudur. Bu nedenle, depolanan enerjinin hacmini artırmak için volan hızının veya ataletinin artırılabilceğini göstermektedir. Bir başka deyişle şekil ve kütle, çarkın ataletini belirlemektedir.

Bu sistemlerde anahtar role sahip teknolojiler sistem mühendisliği ve malzeme bilimidir (Baker, 2008). Volan rotoru ve onu içeren muhafaza için çelik, alaşımlar (mesela titanyum ya da alüminyum alaşımları) ve kompozitler şeklinde kuvvetli malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle rotor tasarımı için kompozit malzemelerin kullanımı, kimyasal pillerden daha yüksek güç yoğunlukları ile düşük atalete rağmen,

yüksek dönme hızları (100 000 rpm'e kadar) sağlamaktadır. Çoğu araştırma rotor için kullanılan malzemelere ve bunların tasarımına odaklanmaktadır. Bu sistemler ulaşım ve uzay sanayinde kullanılmaktadır. Ulaşımında volanın kullanılması, aracın rejeneratif frenlemesi, yük ortalaması ve ana enerji kaynağı gibi üç ana işlevini gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, bir diğer tür ise 10 000 rpm'e kadar hızlara ulaşılabilen metal rotorlu volanlardır (Faraji ve ark., 2017). Bu tarz düşük hızlı, yüksek ataletli metal rotorlu geleneksel sistemler, gereken enerji desteğinde eksik ve nispeten büyük depolama kayıplarına sahiptirler. Bu sistemler genelde şebekelerde kısa süreli güç kalitesi düzenlemede kullanılabilmektedir. Bu nedenle tipik olarak kısa süreli (10–100 s) uygulamalar için daha uygundur. Hızlanırken büyük bir tepe gücünün gerektiği ve frenleme esnasında kısa bir süre zarfında depolama için büyük bir gücün mevcut olduğu araçlarda yüksek güç yoğunluğu arzulanmaktadır. Yapılan bir araştırma, bir volan enerji depolama sisteminin yenilenebilir enerji kaynaklı bir enerji santrali sistemi ile entegrasyonunu içermektedir (Tester ve ark., 2012). Yüksek enerji ve güç yoğunluğuna ek olarak, yüksek döngüsel ömür (on binlerce), uzun kullanım ömrü, yüksek döngü verimliliği %90-95 ve düşük çevresel etkileri volanları cazip kılan etmenlerdir. (Amiryar ve Pullen, 2017). Bunların aksine, piller ve SC'lerle karşılaştırıldığında, daha düşük güç yoğunluğu, maliyet, gürültü, bakım zorlukları ve güvenlik endişeleri ise volan enerji depolama sistemlerinin dezavantajlarından bazılarıdır (Toodeji, 2019, Meishner ve Sauer, 2019). Diğer ESS'lerle karşılaştırıldığında da nispeten kısa süreli enerji arzı, yüksek sürtünme kaybı, düşük enerji yoğunluğu ve yüksek maliyetleri volan sistemlerinin enerji yönetiminde kullanımını zorlaştırmaktadır.

Bu sistemler 15 s'ye kadar olan geçiş sürecinde enerji sağlamak ya da bir güç kaynağından diğerine geçişi köprüleme amacıyla güç kalitesi noktasında hizmet verebilmektedir. Bu tür sistemler, yedek jeneratörlerle (mesela dizel jeneratörler) hibrit bir konfigürasyon içerisinde de kullanılabilmektedir. Volanlar, elektrikle çalışan toplu ulaşım sistemlerinde enerji talebini azaltma ve enerji geri kazanımı için de kullanılmaktadır. MW seviyelerindeki volanlarda manyetik kaldırma yatağı kullanılarak iletişim servisleri ve bilgisayar sunucu merkezleri ile hassas müşteriler için güç kalitesine noktasında reaktif güç desteği, eğirme rezervi ve voltaj regülasyonu

noktasında destek süresi onlarca dakikaya kadar çıkarılabilmektedir. Urenco Güç Teknolojileri RES'lerin enerji çıktısının kısa sürede düzenlenmesi ve küçük ölçekli mikro şebeke kararlılığı için volan uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca raylı taşımacılık endüstrisi, özellikle volan enerji depolama sistemleri ile hat boyu enerji desteği sağlanması diğer önemli ve yüksek katma değerli uygulama olarak gösterilmektedir (Weinstock, 2002, Suzuki ve ark., 2005).

Güç yoğunluğunu artırmak için Toodeji (Toodeji, 2019), SC'leri volan dönen diskin içerisine yerleştirildiği birleşik hibrit sistem için yeni bir tasarım önermektedir. Bu, darbeli gücün değiştirilmesine ve büyük oranda enerjinin depolanmasına olanak sağlamaktadır. Tüm bu çalışmalar neticesinde şu an dünyada birkaç tanesi hariç tamamı 20 MW'ı geçmeyen 43 adet uygulanabilir volan enerji depolama sistemi projesi bulunmaktadır.

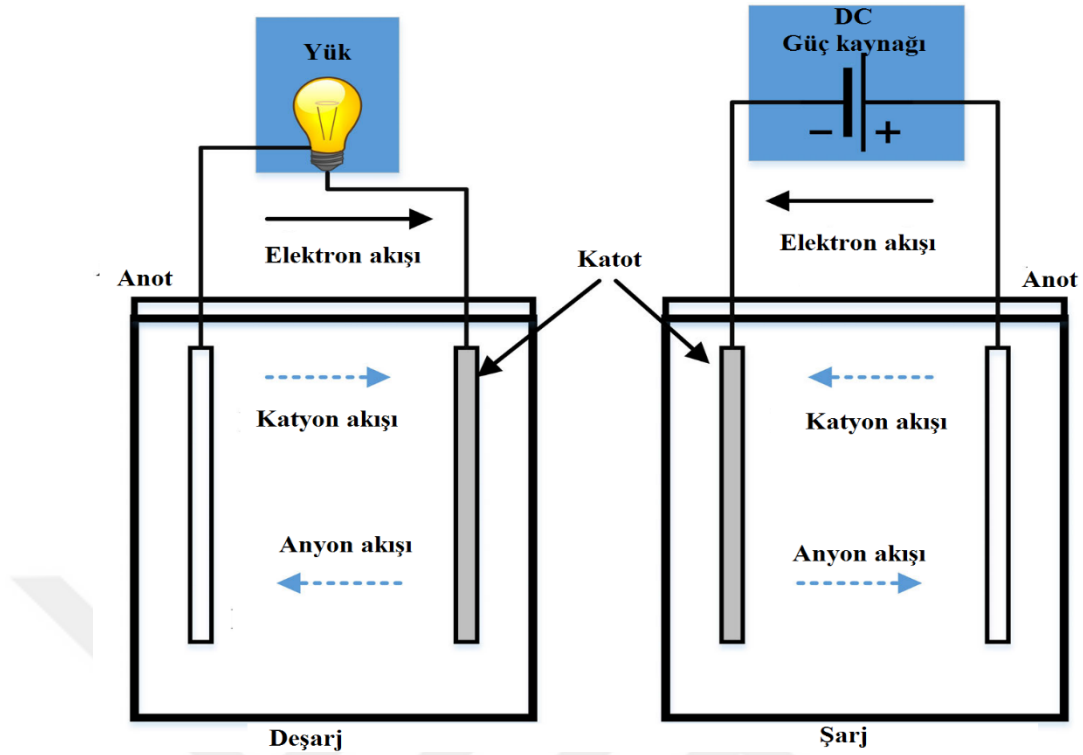
2.1.1.1.4. Mekanik enerji depolama sistemlerinin analizi

Gün geçtikçe azalan uygulanabilir sahaların kısıtlılığı, belirsiz karlılık oranları, yüksek sermaye maliyetleri, negatif çevresel etkiler ve düşük enerji ve güç yoğunlukları giderek artan bir şekilde HDS'den farklı bir enerji depolama sistemlerine geçme ihtiyacını ortaya koymaktadır. SHDS, daha fazla enerji ve güç yoğunluğu ve daha düşük çevresel etkilerin yanı sıra daha fazla uygulanabilir saha olanağına sahiptir. Ne yazık ki, bu sistemlerinde bir yakıt maliyetinin olması ve ticari uygulanabilirlik açısından henüz teorik olup tam olarak ticarileştirilememiştir. SHDS'ye kıyasla volan sistemleri oldukça olgun ve ticari olarak ta kendisini ispatlamıştır. Hem HDS'ler hem de SHDS çözümlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu sistemlerle ilgili güvenlik endişeleri hafifletilebilmekte ancak bunun maliyeti yüksek olmaktadır. Hem enerji hem de güç yoğunlukları ortalama olarak hem HDS'den hem de SHDS'den daha yüksektir ve son yapılan çalışmalara göre daha da büyük gelişmeler öngörülmektedir. Ancak volanlar halen nispeten küçük ölçekte ve çok kısa süreler için kullanılabilmektedir. Yeni pozitif gelişmelerin, uygulanabilirliğini daha büyük ölçekli, orta vadeli çözümlere genişletmek için halen yeterince iyi olup olmayacağı net olmayan bazı zorlukların aşılması gerektiği de öngörülmektedir. Küçük ölçekli

olmaları nedeniyle bu sistemler, dağıtılmış şebeke altyapısı için dağıtım seviyesinde uygulanması daha olası görülmektedir. Volan sistemlerinin, enerji santrali ayarları için, kesintisiz güç kaynağı veya hibrit yenilenebilir güç destek çözümleri olarak uygulamaları bulunmaktadır.

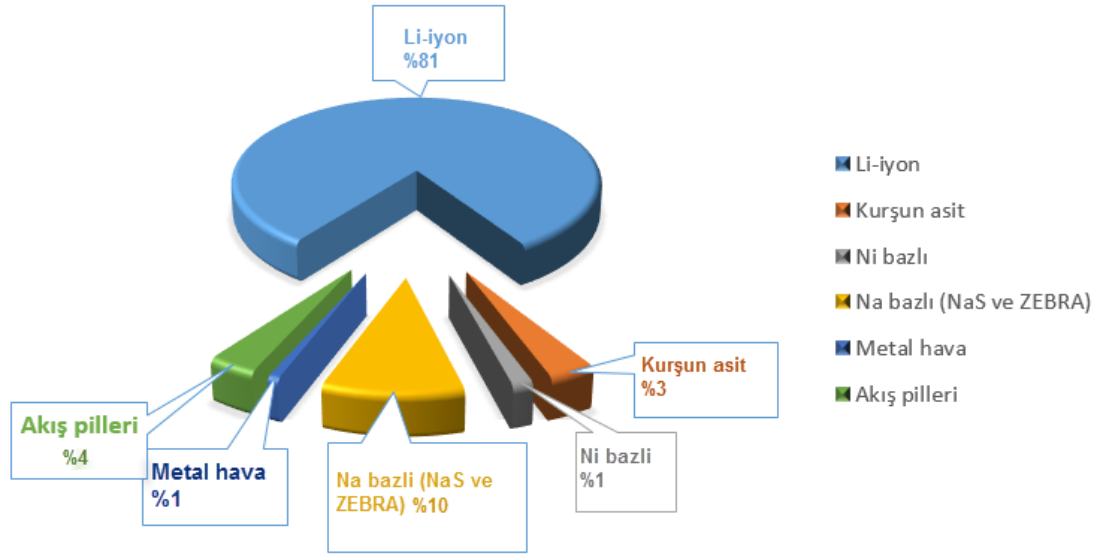
2.1.1.2. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri

Bu ESS türünde elektrik enerjisinin piller üzerinde elektrokimyasal olarak depolanması mümkün olmaktadır. Piller, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek gerilim sağlama özellikleriyle en eski teknolojilerden biridir (Mclarnon ve Cairns, 1989, Baker ve Collinson, 1999). Bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir pil veya her bir hücre, bir pozitif elektrot (anot) ve bir negatif elektrot (katot) ile bir sıvı, macun veya katı elektrolitten oluşmaktadır. Deşarj sırasında, iki elektrotta, bir harici devre boyunca bir elektron akışı oluşturan elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Reaksiyonlar tersine çevrilebilir ve elektrotlara harici bir voltaj uygulanarak pilin yeniden şarj olması sağlanabilmektedir. Gerilim ve akım, farklı seviyelerde hücrelerin seri/paralel bağlanması ile elde edilebilmektedir (Dunn ve ark., 2011). Konvansiyonel şarj edilebilir piller ve akış pilleri (AB'ler), enerjiyi elektrokimyasal biçimde depolayan iki farklı elektrokimyasal tekniktir. Bu piller için çok düşük bakım maliyetleri olmasına rağmen, kimyasal reaksiyon pilin ömrünü ve enerjisini azaltmaktadır (İbrahim ve ark., 2008).



Şekil 2.12. Temel bir elektrokimyasal enerji depolama sisteminin çalışma prensibi (yeniden düzenlenmiştir (Khan ve ark., 2019).)

Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde hem giriş hem de çıkış elektrik enerjisi şeklinde olup bu elektrik enerjisi, pillerde kimyasal enerji şeklinde depolanmaktadır. Piller; akış pilleri (AB) ve şarj edilebilir (ikincil) piller olarak ikiye ayrılmaktadır. İkincil piller (İB) genelde büyük ölçekli enerji depolaması için kullanılmaktadır. Pillerin enerji geri kazanım verimliliği, pil türlerine bağlı olarak %75 ile %95 arasında değişmektedir. En basit bir pil, bir anot, bir katot ve bir paket içine alınmış elektrolitten oluşmaktadır. Katyonların boşaltılması sırasında katyonlar katoda doğru ve anyonlar anoda doğru akmakta ve bir yük bağlandığında anottan katoda elektron akışına olanak sağlanmaktadır. Şarj durumunda, elektrik enerjisi akışı tersinir olarak pilde depolanmaktadır. Basit bir elektrokimyasal enerji depolama sisteminin tipik şarj/deşarj şeması Şekil 2.12.'de gösterilmektedir



Şekil 2.13. Farklı elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin şebekeye bağlı kurulu güç dağılımı (yeniden düzenlenmiştir (Doe, 2018).)

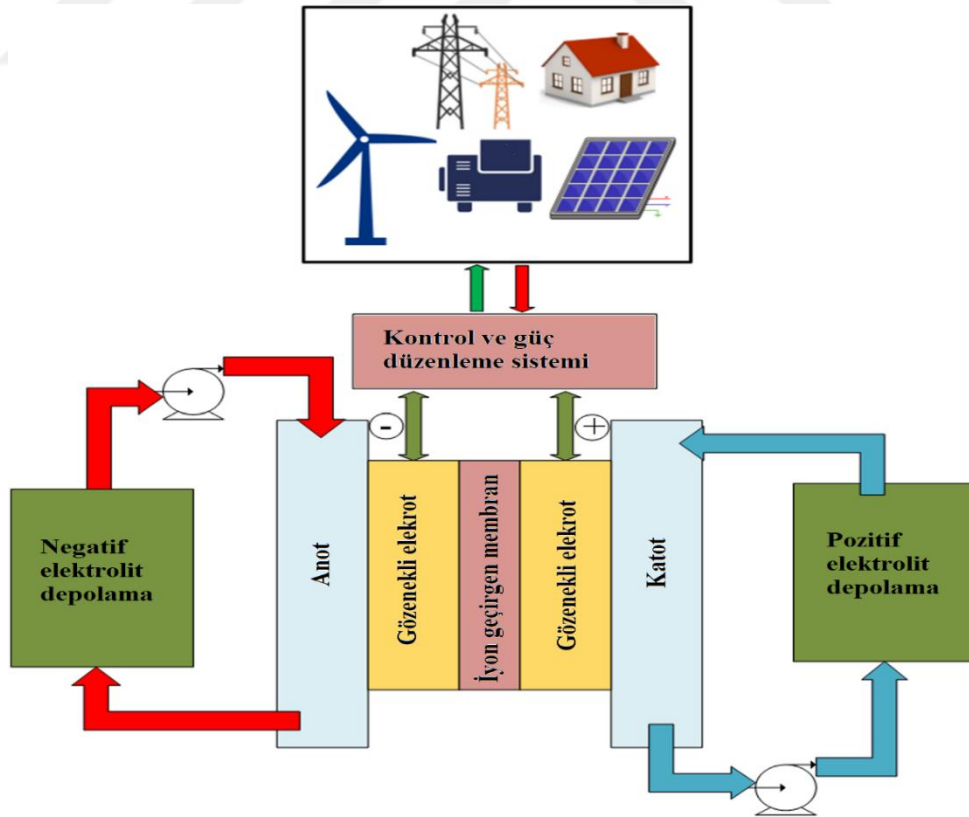
Elektrokimyasal enerji sistemlerinin şebekeye bağlı operasyonel kurulu gücü grafiksel olarak Şekil 2.13.'de gösterilmektedir. Li-iyon tabanlı pillerin 1629 MW şebekeye bağlı kurulu güç kapasitesine ve geri kalan tüm elektrokimyasal cihazların ise yaklaşık olarak 405 MW kapasiteye sahip olduğu görülmektedir (Doe, 2018).

Piller, bazı özellikleri sayesinde ESS uygulamaları için daha uygundur. Sadece enerji esnekliği ve çevresel faydalar sağlamakla kalmazlar, aynı zamanda elektrik tedarikçilerine bir dizi önemli işletme faydası da sunmaktadırlar. Örneğin; anlık yük değişikliklerine çok hızlı yanıt verebilmektedirler.

Lityum iyon (Li-iyon), sodyum-kükürt (Na-S), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), kurşun asit (Pb-asit), kurşun-karbon piller, ayrıca zebra piller (Na-NiCl₂) ve AB'ler dâhil olmak üzere çeşitli türleri bulunmaktadır. Katı elektrotlu piller, düşük enerji yoğunluğuna sahip olup rüzgâr veya güneş enerjisi çıktılarını yalnızca kısa bir süre için dengeleyebilmektedirler. Başka bir elektrokimyasal enerji depolama türü olan akış pili bu noktada daha iyi bir performans sergilemektedir.

2.1.1.2.1. Akış pilleri

Enerjiyi elektroaktif olarak depolayabilen AB'ler tekrar şarj edilebilir özelliğe sahip ESS'lerdir. Elektroaktif bu türler, tanklardaki sıvı elektrolit içinde çözülmekte ve bu sıvı, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için elektrokimyasal hücreden pompalanmaktadır. Geleneksel pillerin aksine, AB'ler elektrolit çözeltilerinde enerji depolamaktadırlar. Elektrokimyasal diğer İB'lerden temel farkı hareketli elektrotla sahip olmalarıdır. Yani İB'lerde reaksiyonlar sonucunda elektrotlar üzerinde kalıntılar birikerek performansını etkilerken akış pillerinde şarj/deşarj sırasında oluşan bu yan ürünler elektrolit çözeltisinde çözünerek pil performansını etkilememektedir. Elektroaktif kimyasalların (örneğin hidrojen, metanol ve oksijen) reaktörden aktığı ve elektrolitin her zaman reaktör içinde YP'nin aksine, AB'lerin elektroliti reaktörden akmaktadır. Redoks-Akış (RAB) ve Hibrit-Akış (HAB), AB'nin alt türleri olup RAB tankının toplam boyutu, pilin toplam enerjisini olarak tanımlanabilmektedir (Storage, 2011). Şekil 2.14., AB'nin genel yapısını göstermektedir (Noack ve ark., 2015).

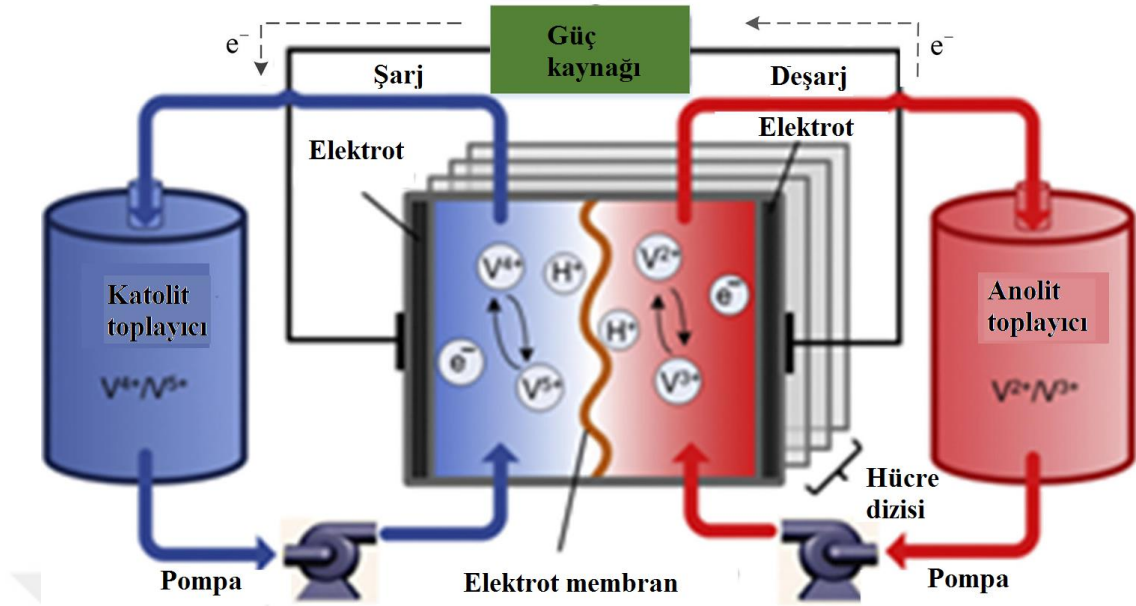


Şekil 2.14. Akış pilleri enerji depolama sistemi genel şeması (yeniden düzenlenmiştir (Krishan ve Suhag, 2019).)

RAB'ler, yüksek döngüsel kararlılık, yüksek verimlilik, yüksek performans ve kapasite gereksinimleri açısından esnek özelliklere sahiptirler. Bu durum RAB'leri herhangi bir bağımsız ve otonom ağ sistemi için çekici kılmaktadır (Noack ve ark., 2015). Ayrıca, RAB'lar şebeke ölçeğinde yenilenebilir enerji depolama uygulamaları için de uygundur. RAB'ların bir farklı varyasyonu olan vanadyum redoks akış pil teknolojisinde de (VRAB) çözünmüş metal iyonlarına sahip iki sıvı elektrolit hücrenin ters tarafına pompalanmaktadır. Gözenekli elektrotlar, yani katolit ve anolit birbiri ile çakışmaktadır. Bu işlem sırasında membranın protonların içinden geçtiği varsayılmaktadır. Şarj olurken elektrotlardan akım geçerken, deşarj olurken tanklardan gelen çözünmüş aktif maddeler elektrotları beslemektedir (Storage, 2011). RAB'lerin tipik örnekleri Fe-Ti, Fe-Cr ve Poli-SBr (polisulfit bromit) sistemleridir (Gong ve ark., 2015, Zhao ve ark., 2015b, Er ve ark., 2015). Poli-SBr ve VRAB'lar için Reaksiyonlar;

- Pozitif elektrot: $V^{4+} \leftrightarrow V^{5+} + e^-$
- Negatif elektrot: $V^{3+} + e^- \leftrightarrow V^{2+}$
- $3NaBr + Na_2S_4 \leftrightarrow 2Na_2S_2 + NaBr_3$

şeklinde basitçe ifade edilebilmektedir. VRAB'lar ve Poli-SBr piller için hücre voltajları ve verimlilikler sırasıyla 1,4–1,6 V, 1,5 V ve %85, %75 şeklindedir (Chen ve ark., 2009). VRAB'ların temel avantajı çok kısa reaksiyon sürelerine (0,001 s) ve 10 000'den 16 000 döngüye kadar döngüsel ömürlere sahip olmalarıdır. Poli-SBr'ler neredeyse ihmal edilebilir öz boşalım, yaklaşık 15 ila 20 yıl kullanım ömrü, 15 000 ila 20 000 döngü ömrü ve üretiminin gerektirdiği malzemenin doğası gereği bol miktarda bulunabilirliği nedeniyle çok düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Şekil 2.15., VRAB'nin genel yapısını göstermektedir.



Şekil 2.15. Vanadyum redoks akış pilleri depolama sistemi genel şeması (yeniden düzenlenmiştir (Kaldellis ve Zafirakis, 2007).)

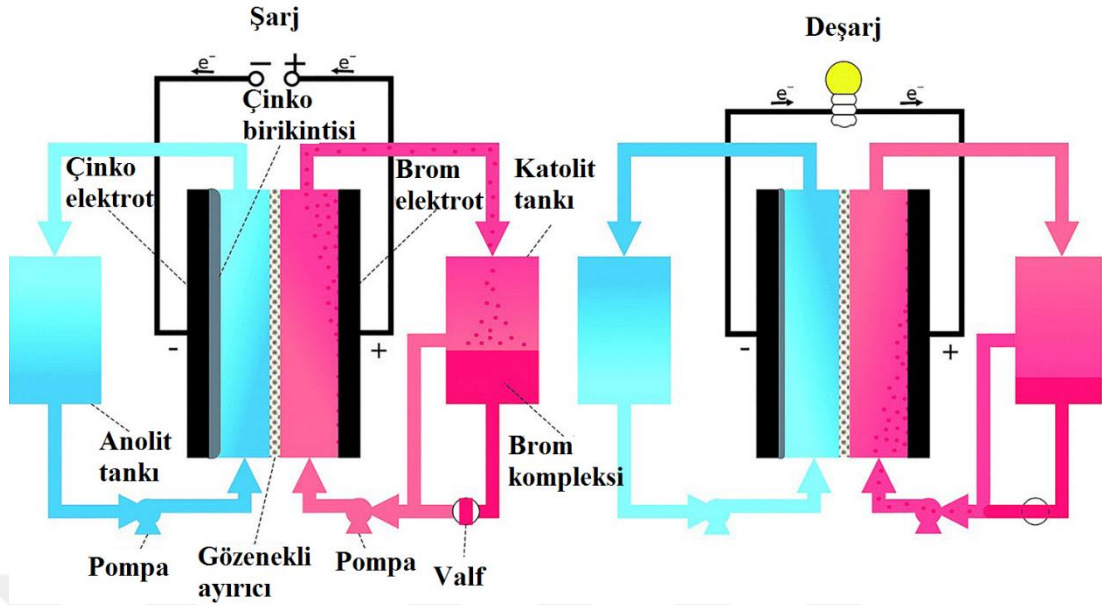
AB çalışma prensibi, pompa sistemlerini, harici depolamayı ve akış kontrolünü kapsaması sebebiyle çalışması pillere kıyasla sermaye ve işletme maliyetleri noktasında dezavantajlıdır. Malzeme bazlı sorunlar, özellikle redoks aktif metaller ve değerli metal elektro katalizörler kullanan AB'lerin yüksek maliyetlerinin en önemli sebeplerindendir. Huskinson ve ark. (Huskinson ve ark., 2014) tarafından kinon olarak bilinen bir molekül ailesinin uygun kimyasal ve elektrokimyasal özelliklerinden yararlanan bir enerji depolama malzemesi ortaya konmuştur. Bu sistem, sülfürik asitte camsı bir karbon elektrot üzerinde son derece hızlı ve geri dönüşümlü iki elektronlu, iki protonlu indirgemeye maruz kalan ve redoks kimyasına dayanan metalsiz akışlı bir pil sistemidir. Bu kinon-bromür akış pilinin bir çevrimi, çevrim başına %99'dan fazla depolama kapasitesi sürekliliği sağlamaktadır. Bu AB teknolojisinin, büyük ölçüde maliyetinin azaltılması sayesinde büyük elektrik enerjisi depolaması sistemine uygun hale getirilebileceği düşünülmektedir.

Bir diğer AB türü olan hibrit pil (HAB), geleneksel pillerin ve RAB'ların özelliklerini birleştirmektedir. Elektrokimyasal olarak aktif elementlerden biri elektrokimyasal hücrede depolanırken, diğeri ise bir tankta depolanmış sıvı elektrolitte çözünmektedir. Yani HAB'nin iki aktif kütlesi vardır; biri hücrede depolanmakta, diğeri ise bir tankta sıvı elektrolit içinde bulunmaktadır. Kısacası HAB hücresi, bir İB ve RAB'nin

birleşimi şeklinde ifade edilebilir. RAB'de olduğu gibi bu sistemde de kapasite elektrokimyasal hücrenin boyutu ile belirlenmektedir. HAB'lar Zn-Ce ve Zn-Br sistemlerini takip etmektedir. Şarj esnasında Zn elektrotta biriktirilmekte ve deşarj sırasında Zn iyonu çözeltiye geri aktarılmaktadır (Storage, 2011). Zn-Br piller, depolama kapasitesinin çok yüksek olması (1 MW) ve uzun bir süre enerji sağlayabilmeleri (8 saate kadar) sayesinde uygulamalar için ticari olarak idealdir (Lex ve Jonshagen, 1999). Tıpkı VRAB gibi, Zn-Br piller de ihmal edilebilir düzeyde öz boşalım oranlarına sahiptir. Bu pilin net verimliliği yaklaşık olarak %75 seviyelerindedir. Bu pillerde reaksiyonlar her bir elektrot için;

- Pozitif elektrot: $2\text{Br} \leftrightarrow \text{Br}_2 (\text{çözelti}) + 2\text{e}^-$
- Negatif elektrot: $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Zn}$

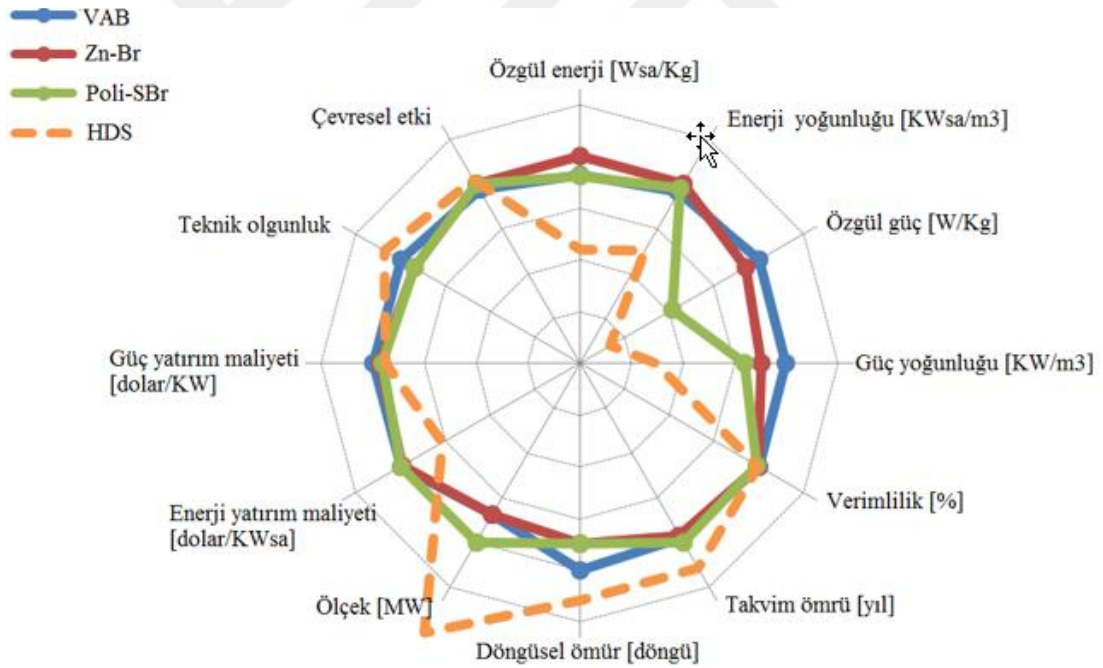
şeklinde gerçekleşmektedir. Zn-Br akış pillerinin genel şemasının gösterildiği Şekil 2.16.'dan da anlaşılacağı üzere Deşarj sırasında Zn ve Br, çinko bromüre dönüşerek her hücrede 1,8 V civarında bir enerji üretilmektedir. Bu, her iki elektrolit tankında da Zn^{2+} ve Br^- iyon yoğunluğunu artırmaktadır (Chen ve ark., 2009). Şarj sırasında ise metalik çinko, karbon-plastik kompozit elektrotun bir tarafında ince bir film olarak birikmektedir. 25 MW güç ve 100 MWh enerji kapasitesi ile en büyük Zn-Br akış pili Kazakistan'da bulunmakta ve enerji zaman kaydırma için kullanılmaktadır (Rahman ve ark., 2020).



Şekil 2.16. Zn-Br redoks akış pilleri depolama sistemi genel şeması (yeniden düzenlenmiştir (Schneider ve ark., 2016).)

AB'ler 15-20 yıl ömre, 4-10 saat deşarj aralığına, %60-70 aralığında verimliliğe, 35 ile 60 Wh/Kg enerji yoğunluğuna ve 75 ile 150 W/Kg arasında güç yoğunluğuna sahiptirler (Krishan ve Suhag, 2019, Hannan ve ark., 2017). AB'ler, 10 saate kadar yüksek bir deşarj hızında sürekli olarak enerjiyi serbest bırakabilmektedirler. Elektrolitleri bakım gerektirmese de ayırıcı membran her beş yılda bir değiştirilmelidir. Bu değişim çok maliyetli olsa da hali hazırda bu teknoloji üzerine yapılan çalışmalarla bu zorluğun üstesinden gelinmesi beklenmektedir (Krishan ve Suhag, 2019). AB'ler ile ilgili aşılması gereken bir diğer problem ise, enerji ve güç yoğunluğunu artırılması noktasındadır. Artırılmış özgül ve hacimsel yüzey alanları ile monolitik elektrotlar geliştirmek, elektrolitler tarafından elektrot temasını artırmak ve artan kütle transferine izin vermek için açık gözenekli bir yapı oluşturmak bu zorlukların bazılarının üstesinden gelmeyi hedefleyen AB tasarımı için yapılmış bazı araştırma konularındandır. Çeşitli RAB teknolojileri üzerine yapılan araştırmalar, elektrolitlerin, elektrotların ve membranların hücre düzeyindeki bileşenleri ve hem sulu hem de susuz sistemlerin kimyası dâhil olmak üzere hücre tasarımıyla ilgili konuları ele almaya odaklanmaktadır (Weber ve ark., 2011, Choi ve ark., 2017). Wang ve ark. (Wang ve ark., 2013) elektrot yüzeyindeki karmaşık yük transferi ve redoks reaksiyon kinetiğinin, membranlarda taşınmanın ve elektrot boyunca akışkanlar mekaniğinin anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır.

Günümüzde, Tablo 2.4. ve Şekil 2.17.'de teknik özellikleri detaylı ve karşılaştırılmalı olarak verilen RAB'ler ve HAB'ler, büyük ölçekli güç depolaması, güç kalitesi, UPS olarak, tepe noktası tıraşlama, arz güvenliğini artırma ve yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyon gibi uygulamalar için tasarlanmaktadır (Wei ve ark., 2015, Chen ve ark., 2009). Redoks döngü ünitesi (Xu ve ark., 2011) ile entegre bir katı oksit elektrokimyasal hücre, 2 V'a kadar kararlı potansiyel enerji penceresine sahip bir çinko hibrit akışlı pil (Winsberg ve ark., 2016), VRAB için hibrit membranlar (Winsberg ve ark., 2016) ve yamuk şeklinde bir akış pili (Yue ve ark., 2018) dâhil olmak üzere yeni redoks akışlı pil konseptleri üzerine çalışılmıştır (Niu ve ark., 2017). Bu tür kavramlar, enerji kapasitesi, güç yoğunluğu, maliyet, verimlilik, kendi kendine deşarj süresi, elektrolit kullanımı, güçlü asidik ve oksitleyici koşullara karşı membran yapı kararlılığı, toksin olmayan malzemelerin kullanımı ve daha ucuz ağır metallerin kullanımı gibi çeşitli yönlerde pozitif gelişmeler sunmaktadır.



Şekil 2.17. Tablo 2.4.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak akış pilleri enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm akış pilleri enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Tablo 2.4. On üç farklı metriğe dayalı akış pilleri enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		VAB aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Zn-BR aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Poli-SBr aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[Wh/Kg]	10,00–50,00 11,15/24,43/24,00/14	11,10–90,00 23,3/55,9/60,0/19	10,00–50,00 12,46/22,67/20,00/9
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	10,00–33,00 8,17/21,70/20,00/10	5,17–70,00 19,9/32,6/30,0/16	10,80–60,00 15,78/25,60/20,00/8
Özgül güç	[W/Kg]	31,30–166,00 54,89/110,46/125,00/5	5,50–110,00 37,2/56,9/60,0/9	Bilinmiyor.
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	2,50–33,42 21,86/17,96/17,96/2	2,58–8,50 2,60/5,87/6,00/5	1,35–4,16 1,99/2,76/2,76/2
Verimlilik	[%]	60,00–88,00 7,28/76,96/78,30/19	60,00–85,00 7,21/73,3/73,0/17	57,00–83,00 8,65/71,45/75,00/11
Takvim Ömrü	[yıl]	2,00–20,00 5,93/10,50/10,00/8	5,00–20,00 4,78/9,38/9,00/8	10,00–15,00 2,86/13,33/15,00/3
Döngüsel ömrü	[döngü]	800–16,000 5,250/7,759/7,500/16	800–5,000 1,225/2,368/2,000/11	800–4,000 1,203/2,360/2,000/5
Ölçek	[MW]	0,00–20,00 5,59/3,58/0,73/18	0,001–20,00 5,91/3,55/1,00/19	0,001–100,00 25,54/14,87/12,00/15
Enerji yatırım maliyeti	[\$/kWh]	100,00–2,000,00 542,4/488,1/200,0/15	110,00–2,000,0 525,6/447/225/13	110,00–2,000,00 559,05/494,08/187,50/16
Güç yatırım maliyeti	[\$/kW]	175,00–9,444,00 2,355/2,461/1,545/15	175,00–4,500,0 1,365/1,788/1,300/12	330,00–4,500,00 1,208/1,643/1,098/12
Uygulama alanı		Orta/büyük ölçekli enerji yönetimi	Büyük ölçekli enerji yönetimi	Büyük ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Kanıtlanmış/Ticaril eştirilmiş.	Kanıtlanmış/Geliştiriliyor.	Kanıtlanmış/Geliştiriliyor.
Çevresel etki		Orta/düşük	Orta	Orta

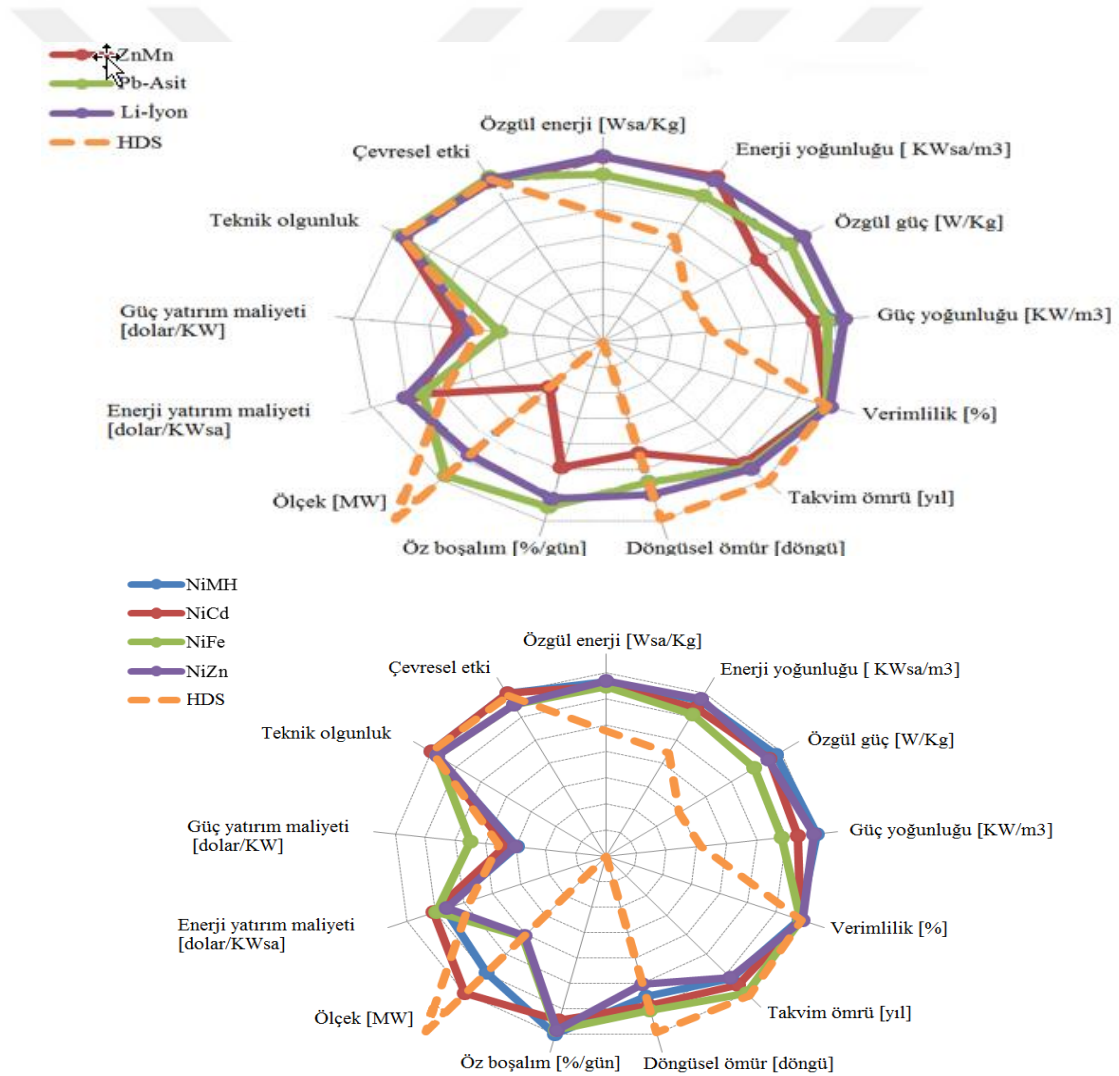
Sandia Ulusal Laboratuvarlarına göre dünyada 71,87 MW kurulu güç kapasitesine sahip 73 adet şebeke bağlantılı RAB bulunmaktadır (Ho ve Atcity, 2018). Bunlardan sadece 11 tanesi 1 MW veya daha üzerinde kapasiteye sahip olup diğer tüm tesislerin kapasitesi yalnızca birkaç kW civarındadır. Astana, Kazakistan'da Primus Power tarafından kurulan en büyük tesis 25 MW/1000 MWh'dir (Xiaoli ve Yu, 2017). Ayrıca, Hokkaido Elektrik Güç şirketi. ve Sumitomo Elektrik Endüstrisi Ltd. tarafından Hokkaido, Japonya'da 15 MW/60 MWh RAB bankası kurulmuştur (Mohiti ve ark., 2021).

2.1.1.2.2. İkincil (şarj edilebilir) piller

İB'ler, EA ve taşınabilir enerji depolama sistemi gibi diğer elektrik/elektronik uygulamalar noktasında depolama sistemleri pazarına son derece hâkim bir teknolojidir. Bu piller, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolamakta ve elektrokimyasal reaksiyon prensibiyle elektrik üretmektedir (Storage, 2011). Tipik bir İB; bir anot ve bir katot olmak üzere iki elektrot, elektrolitler, ayırıcılar ve bir muhafaza kısmından oluşmaktadır (Dhameja, 2001, Li ve ark., 2014, Chen ve ark., 2009). İB; yüksek özgül enerji, yüksek güç yoğunluğu, düzgün deşarj konfigürasyonu, düşük direnç, ihmal edilebilir bellek etkisi ve geniş bir sıcaklık performans aralığı gibi etkileyici özelliklere sahiptir (Li ve ark., 2014). İB'ler yüksek enerji verimliliğine (%60-95) sahiptirler. Tüm geleneksel şarj edilebilir İB'ler, elektrokimyasal depolama sistemleri altında yer almaktadır (Hiroshima ve ark., 2016).

İB bir pilin yapımı; kısa teslim süreleri, potansiyel olarak uygun oturma ve teknolojinin modülerliği (Kluiters ve ark., 1999) gibi özellikleri sayesinde son derece pratiktir. Bununla birlikte, düşük enerji yoğunlukları, küçük güç kapasitesi, yüksek bakım maliyetleri, kısa döngü ömrü ve sınırlı deşarj kapasitesi nedeniyle büyük ölçekli İB depolama sistemleri yakın zamana kadar oldukça nadir görülen uygulamalardır. Benzer şekilde, İB kimyaları, birincil pillerle karşılaştırıldığında performansta bir düşüş eğilimi görülmektedir. Bu durum genellikle bu tasarımların sınırlı malzeme problemlerinin bir sonucudur. Şarj tutma, genellikle birincil piller için yıl aralığında ölçülürken, İB sistemlerinde aylara kadar düşmektedir. Bu sınıftaki çoğu pil için şarj durumunu ölçmenin zorluğu da, karşılaşılan problemlerin arasına eklenebilir (Sabihuddin ve ark., 2014). Tüm bu sorunlara rağmen, kimyasal piller, günümüze kadar küçük ölçekli uygulamalar için en iyi ve en popüler enerji depolama biçimi olmaya devam etmektedir. Ayrıca, çoğu pil toksin maddeler içermektedir. Bu nedenle pillerin kontrolsüz bir şekilde atılmasından kaynaklanan ekolojik etki her zaman göz önünde bulundurulmalı ve pillerin bertaraf işleminin ekolojik etkisi dikkate alınmalıdır (Olivier ve ark., 2014, Al-Foraih ve ark., 2018).

İB pil teknolojisindeki gelişmeler ve kabul edilebilir maliyetleri sayesinde EA uygulamalarının çoğuna, ESS uygulamalarına veya enerji sistemlerinin yüksek güç yoğunluğu talebine cevap verebilmektedir (Rashid, 2011, Yin ve ark., 2013, Ren ve ark., 2015, Zhou ve ark., 2014). Farklı EA tasarımlarının ESS'si için Şekil 2.18.'de grafiksel karşılaştırmaları yapılan; kurşun asit (KA), nikel bazlı (Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-Cd, Ni-MH, Ni-H₂) halojen çinko bazlı (Zn-Cl₂, Zn-Br₂), metal hava bazlı piller (Fe-Hava, Al-Hava, Zn-Hava), sodyum beta bazlı (Na-S, Na-Ni-Cl₂), yüksek sıcaklıklı lityum bazlı piller (Li-Al-Fe-S₂, Li-Al, Fe-S₂) ve oda sıcaklığındaki lityum bazlı pillerde (lityum polimer (Li-poli), lityum (Li-iyon)) kullanılmaktadır (Linden, 2002, Chau ve ark., 1999, Storage, 2011).



Şekil 2.18. Tablo 2.5. ve Tablo 2.6.'daki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak İB pillerdeki kimyasal enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi şeklinde gösterilen HDS, diğer tüm İB enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır. (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Çeşitli İB türleri arasında lityum piller, yüksek özgül enerjileri (birim ağırlık başına enerji) ve enerji yoğunlukları (birim hacim başına enerji) sayesinde elektrik enerjisinin depolanmasında giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Li-iyon pil, elektrot malzemesi olarak interkalasyonlu lityum bileşiği kullanan bir lityum pil türüdür. Bruce ve ark. (Bruce ve ark., 2012) Li-hava (sulu veya susuz elektrolitlere dayalı) ve lityum-kükürt (Li-S) pilleri Li-iyon pillerle karşılaştırarak hücre çalışması ve geliştirme zorlukları açısından depolanabilecek enerjiyi incelemişlerdir. Her iki pilin de Li-iyon pillere kıyasla daha iyi enerji yoğunluğu sunduğu hatta Li-iyon pillerden daha uygun maliyetli olabileceği de öngörülmektedir. Bununla birlikte, Li-O₂ ve Li-S hücrelerinde yer alan temel kimyasal yapı hakkında, ticarileştirilmeden önce daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu düşünülmektedir.

Thackeray ve ark. (Thackeray ve ark., 2012) li-iyon pillerin tarihi gelişiminin özetini, mevcut pillerin durumunu ve lityum-hava pillerindeki ilerlemelerin bir derlemesini sunmaktadırlar. Li-iyon pillerin performansı, ilk şarj/deşarj döngüsü sırasında gerçekleşen elektrolit ayrışması nedeniyle pilin negatif elektrotunda oluşan koruyucu bir tabaka olan katı elektrolit interfazından etkilenmektedir. Elektroliti interfazını etkileyen bu faktörler ve pil performansını nasıl etkiledikleri Verma ve ark. tarafından incelenmiştir (Verma ve ark., 2010). Janek ve Zeier (Janek ve Zeier, 2016), geleneksel Li-iyon pillerin enerji yoğunluğunun yakın zamanda bir fizikokimyasal sınıra ulaşacağını ve sıvı olan sistemler yerine katı elektrolitler kullanan katı hal pillerin, daha yüksek enerji ve güç yoğunluklarına olan talebi karşılayabileceğini, ancak düşük kinetik hızlar gibi teknik problemlerin ise katı hal pillerin ticarileşmesinin önündeki en büyük engellerden olduğunu öne sürmüşlerdir.

Li-iyon pillerdeki bu son gelişmelere kadar, nikel metal hidrit (Ni-MH) piller hibrit EA'lar için tercih edilen teknolojiler olarak devam etmektedir. Hidrojen iyonu emen gözenekli metal alaşımlar reaksiyonlara karşı daha dayanıklı olmaları açısından mevcut olan kimyasal pillerden farklıdır. Ni-MH sistemleri; sızdırmazdır, bakım gerektirmez, düşük iç dirence sahiptirler ve Tablo 2.5. ve 2.6.'da görüldüğü üzere nikel kadmiyum kimyaları sayesinde daha yüksek enerji yoğunluklarına, uzun raf ömrüne (şarj durumundan bağımsız olarak), uzun döngü ömrüne ve hızlı yeniden şarj olma

yeteneklerine sahiptirler. Bunlara karşın, lityum iyon pillerden daha yüksek maliyetlere ve daha düşük özgül güce, orta düzeyde bellek etkisine, sınırlı çalışma sıcaklığı aralığına ve yalnızca orta düzeyde şarj tutma özelliğine sahiptirler. Bu durum, Li-iyon hücrelerinin kademeli olarak yer değiştirmesine neden olmuştur.

Na-iyon pillerindeki durum ise sodyum elementinin yaygın olarak bulunması ve maliyetinin düşük olmasının yanında Li ve Na katkılama kimyalarının benzerliği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren sistemler için geleceğin enerji depolama sistemi olarak öngörülmektedir. Elbette ki Li-iyon seviyelerine ulaşabilmek için Na-iyon pillerle ilgili henüz alınması gereken daha çok mesafe bulunmaktadır. Katot ve anot malzemelerinin optimize edilmesi ve yeni elektrolitler geliştirilmesi Na-iyon teknolojisinin başarısında anahtar rol oynayacaktır.

Palomares ve ark. (Palomares ve ark., 2012), günümüzde araştırılan sistemlere geniş bir bakış ve gelecekteki araştırmalar ışık tutmak amacıyla Na-iyon pil malzemelerini üzerine araştırmışlar yapmışlardır. Çalışmada, yapısal özellikler ve Na ilavesinin eliminasyonundan sonra, fosfatları ve florofosfatları, Na ilaveli katodik malzemeler arasında umut verici seçenekler olarak önermektedirler. Ayrıca, sodyum β -alümina katı elektrolitler ile jel polimer elektrolitler dâhil olmak üzere umut verici ve geniş bir Na-iyon pil elektrolit yelpazesi sunmaktadırlar. Watanabe ve ark. (Watanabe ve ark., 2017), iyonik sıvıların çeşitli uygulamalarına, yani tamamen iyonlardan oluşan sıvılara genel bir bakış sunmaktadırlar. Li/Na iyon piller, lityum piller ve lityum piller için elektrolitik malzemelerin kullanımlarına odaklanılmıştır. Uçucu olmama, yüksek termal kararlılık ve yüksek iyonik iletkenlik gibi iyonik sıvıların benzersiz özelliklerine odaklanılarak pillerin daha çok geliştirilmesinin önündeki bazı engellere çözümler sağlayabilmişlerdir. Ru ve ark. tedarik kolaylığı, maliyet verimliliği ve çevre dostu olmalarının yanı sıra hızlı şarj hızları ve uzun kullanım ömrü potansiyelleri nedeniyle lityum iyon pillerin yerini alacak en uygun aday olarak alüminyum iyon pilleri önermektedirler (Ru ve ark., 2019). Bu avantajları sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin desteklenmesi noktasında uygun olabilmektedirler. Bununla birlikte, enerji yoğunluğu, hücre kapasitesi ve döngü kararlılığı gibi özellikleri ticarileştirilmeden önce geliştirilmesi gereken diğer noktalar

olarak göze çarpmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda uygun pozitif elektrot ve elektrolit malzeme seçimi olarak asidik $AlCl_3$, geçiş metali oksitler, metal sülfürlerin yanında özellikle pozitif elektrot için karbonlu malzemeler önerilmektedir.

Kurşun asit (Pb-Asit) piller, dünyadaki en büyük İB pazar payına sahiptirler. Mevcut birçok kimyasal pilden daha düşük performansa sahip olmalarına rağmen, kabul edilebilir döngü ömrü, geniş çalışma sıcaklıkları, nispeten yüksek güç çıkışları, nispeten düşük bakım giderleri ve basit şarj rejimleri ile düşük maliyetleri onları çekici kılmaktadır. Otomotiv endüstrisinin yanı sıra telekomünikasyon ve kesintisiz güç kaynağı (UPS) endüstrilerinde kullanılmaktadırlar. Dünyanın en büyük geleneksel kimyasal pil bankalarından bazıları bu pilleri kullanmaktadır. Valf ayarlı kurşun asit (VAKA) piller, neredeyse hiç bakım gerektirmeyen çalışma şartları ile kritik öneme sahiptir. Bu az bakım gerektiren işlemlerde yuvarlak hücre teknolojileri üretmek amacıyla konik kurşun levha yığınları kullanılmıştır (Ordenez ve Plummer, 1997). Mühürlü kurşun asit (MKA) piller ise, sağlamlığı artırmak için jelleşmiş elektrolitler ve kalın cam elyaf emici paspaslar kullanmaktadır. Bu avantajlarına karşın, Pb-asit pillerin performansı düşük olmaktadır ve piller, ömürlerini sınırlayan sülfatlaşma etkileri nedeniyle boşalmış durumda depolanamamaktadır (Linden, 2002).

Son zamanlarda, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla hibrit olarak kullanılan Pb-Asit pilleri içeren yük dengeleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Ancak, istenilen seviyelere henüz ulaşamamıştır. Hibrit SC teknolojisi, gücü, şarj sürelerini ve döngü ömrünü artırarak performansı iyileştirmeyi amaçlamıştır. Düşük maliyetli üretime uygun olan ince film çeşitleri de son zamanlarda tüketici pazarına girmiştir. Net enerjiyi iyileştirmek ve bipolar piller üretmek için titanyum oksit alt yapıları tanıtılmaktadır (Buchmann, 2014). Son olarak, aktif maddelerin kullanımını arttırmak amacıyla asit sirkülasyonu kullanılabilir. Bu son pozitif gelişmelere rağmen, bileşen malzemelerin doğası gereği, bu pillerinde nikel kadmiyum pillerinkine benzer şekilde yüksek seviyede olumsuz çevresel etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Yine de, daha yüksek depolama ve geri dönüşüm oranları bu etkilerin bir kısmını hafifletmektedir (Droste-Franke, 2012).

Sistemlerin maliyetini, döngü ömrünü, sistem güvenliği ile enerji yoğunluğunu ve güç yoğunluğu geliştirmek için birkaç yeni elektrot malzemesi ve elektrolit önerilmektedir. Hall ve Bain (Hall ve Bain, 2008) AB'ler, lit-iyon piller, sodyum-kükürt, zebra piller, nikel-kadmiyum ve ilgili nikel-metal hidrit piller, Pb-asit piller, SMEDS ve SC'ler dâhil enerji depolama teknolojilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu elektrokimyasal enerji depolama teknolojilerinden bazıları Baker (Baker, 2008) tarafından incelenirken, Hou ve diğerleri tarafından SC'ler ve Li-iyon pillerin performans detayları olarak araştırılmıştır (Hou ve ark., 2011). Nitta ve ark. (Hou ve ark., 2011) lityum piller için anot ve katot malzeme araştırmalarının temel özelliklerini, avantaj, dezavantajlarını ve son gelişmeleri gözden geçirmişlerdir. Li-iyon pillerin performansını iyileştirme stratejileri olarak Nitta ve ark.;

- Aktif malzemelerin boyutlarının küçültülmesi,
- Kompozitlerin oluşumu,
- Katkılama ve işlevsellik,
- Partikül morfolojisinin düzenlenmesi,
- Aktif materyallerin etrafında kaplama veya kabuk oluşumu,
- Elektrolit modifikasyonun önerilmesi.

gibi denemeler gerçekleştirmişlerdir.

Tablo 2.5. On dört farklı metriğe dayalı İB pil enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		Nikel metal hidrit aralık σ / μ / $\tilde{x}$ / n	Nikel kadmiyum aralık σ / μ / $\tilde{x}$ / n	Nikel iron aralık σ / μ / $\tilde{x}$ / n
Özgül enerji	[Wh/Kg]	30.-,00–90,00 20,2/66,5/73/14	10,00–80,00 20,5/45,3/45,0/16	27,00–60,00 14,3/43,1/45,0/7
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	38,90–300,00 96,8/185/180/10	15,00–150,00 53,7/95,5/100/10	25,00–80,00 22,6/50,0/55,0/5
Özgül güç	[W/Kg]	6,02–1,100,00 378/408/235/12	50,00–1,000,00 244/222/150/13	20,57–110,00 45,8/54,9/25,0/5
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	7,80–588,00 259,4/383/467/4	37,66–141,05 43,0/89,5/89,6/4	12,68–35,18 11,5/25,4/28,4/3
Verimlilik	[%]	50,00–80,00 9,72/65,8/65,5/6	59,00–90,00 11,2/69,8/67,5/14	65,00–80,00 10,6/72,5/72,5/2
Takvim Ömrü	[yıl]	2,00–15,00 4,72/6,33/5,00/6	2,00–20,0 6,6/13,6/14,0/12	8,00–100 26,4/37,0/30,0/9
Döngüsel ömrü	[döngü]	300–3,000 916/1,129/1,000/7	300–10,000 2,251/2,56/2,000/18	1,000–8,500 3,326/3,87 /3,000/ 4
Öz boşalım	[%/gün]	0,30–4,00 1,27/1,16/0,83/7	0,07–0,71 0,23/0,34/0,25/12	0,36–1,43 0,39/0,80/0,71/6

Tablo 2.5. (Devamı)

Ölçek	[MW]	0,01–3,00 2,11/1,51/1,51/2	0,00–50,00 20,2/17,1/5,0/14	0–0,05 0,02/0,02/ 0,019/6
Enerji yatırım maliyeti	[\$/kWh]	200,00–729,00 186,6/451/407/8	330,00–3,500,0 900/1,132/800/17	444,27–1,316 392/962 /1,044/4
Güç yatırım maliyeti	[\$/kW]	270,00–530,00 145,7/362/286/3	270,00–1,500,0 494/867/600/9	8,167–16,312 4,10/12,5K/13,1K/1
Uygulama alanı		Küçük ölçekli enerji yönetimi	Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi	Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Kanıtlanmış/Ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/Ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/Geliştiriliyor
Çevresel etki		Yüksek	Yüksek	Düşük

Tablo 2.6. On dört farklı metriğe dayalı İB pil enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

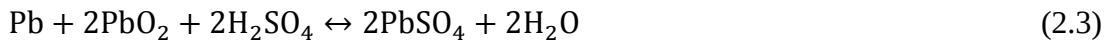
Standartlar		Kurşun asit aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Lityum iyon aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Nikel çinko aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[Wh/Kg]	10,00–50,00 11,7/29,8/30,0/13	30,00–300,00 65,2/143,9/150/29	15,00–110,00 29,7 /69,6/72,5/12
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	25,00–90,00 19,7/59,6/55,0/11	94,00–500,00 137/290/250/17	80,00–400,00 109,3/236/245/8
Özgül güç	[W/Kg]	25,00–415,00 119,7/195/190/10	8,00–2,000,00 612,4/606/365/22	50,00–900,00 287/201/95/8
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	10,00–400,00 185,8/123/41,9/4	56,80–800,00 321,4/366,4/304/4	121,38–608,00 195,6/309/218/5
Verimlilik	[%]	63,00–90,00 8,56/76,9/76,0/15	70,00–100,00 8,5/89,8/90,0/17	80,00–89,00 6,36/84,5/84,5/2
Takvim Ömrü	[yıl]	3,00–20,00 5,58/8,33/5,50/12	2,00–20,00 6,88/10,13/10,0/8	1,00–10,00 6,36/5,50/5,50/2
Döngüsel ömrü	[döngü]	100–2,000 736/1,053/1,100/18	250–10,000 3,03/1,018/1,500/19	100–500 191,5/350/400/4
Öz boşalım	[%/gün]	0,033–1,10 0,36/0,33/0,22/8	0,03–0,33 0,11/0,158/0,166/9	0,60–1,07 0,25/0,79/0,71/3
Ölçek	[MW]	0,00–50,00 14,18/10,34/8/12	0,00–3,00 1,20/0,93/0,15/8	0,001–0,05 0,026/0,02/0,006/2
Enerji yatırım maliyeti	[\$/kWh]	175,00–900,00 209,1/383/300/15	200,00–4,000,00 1,076/1,110/600/15	250,00–660,00 153,3/398/340/6
Güç yatırım maliyeti	[\$/kW]	175,00–900,00 209,1/383/300/15	175,00–4,000,00 1,446/2,325/1,950/9	270,00–530,00 183,9/400/400/2
Uygulama alanı		Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi	Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi	Çok küçük ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Kanıtlanmış/ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/geliştiriliyor
Çevresel etki		Yüksek	Yüksek/orta	Düşük

Genelde İB hücrelerinin terminallerinde depolanan voltaj 2 V' tan az olduğundan, gerekli voltaj ve akım seviyesine ulaşabilmek için birçok hücre seri/paralel konfigürasyonlarda birleştirilmektedir (Ferreira ve ark., 2013, Divya, 2009). Daha önceden de bahsedildiği üzere elektrotların ve elektrolitin tasarımında kullanılan

malzemeye bağılı olarak farklı birçok pil türü bulunmaktadır Tablo 2.5. ve Tablo 2.6'da belli metriklerle dayalı karşılaştırılması verilen bu pillerin ayrıntıları alt bölümlerde detaylı olarak verilecektir.

- Kurşun asit (Pb-asit) piller

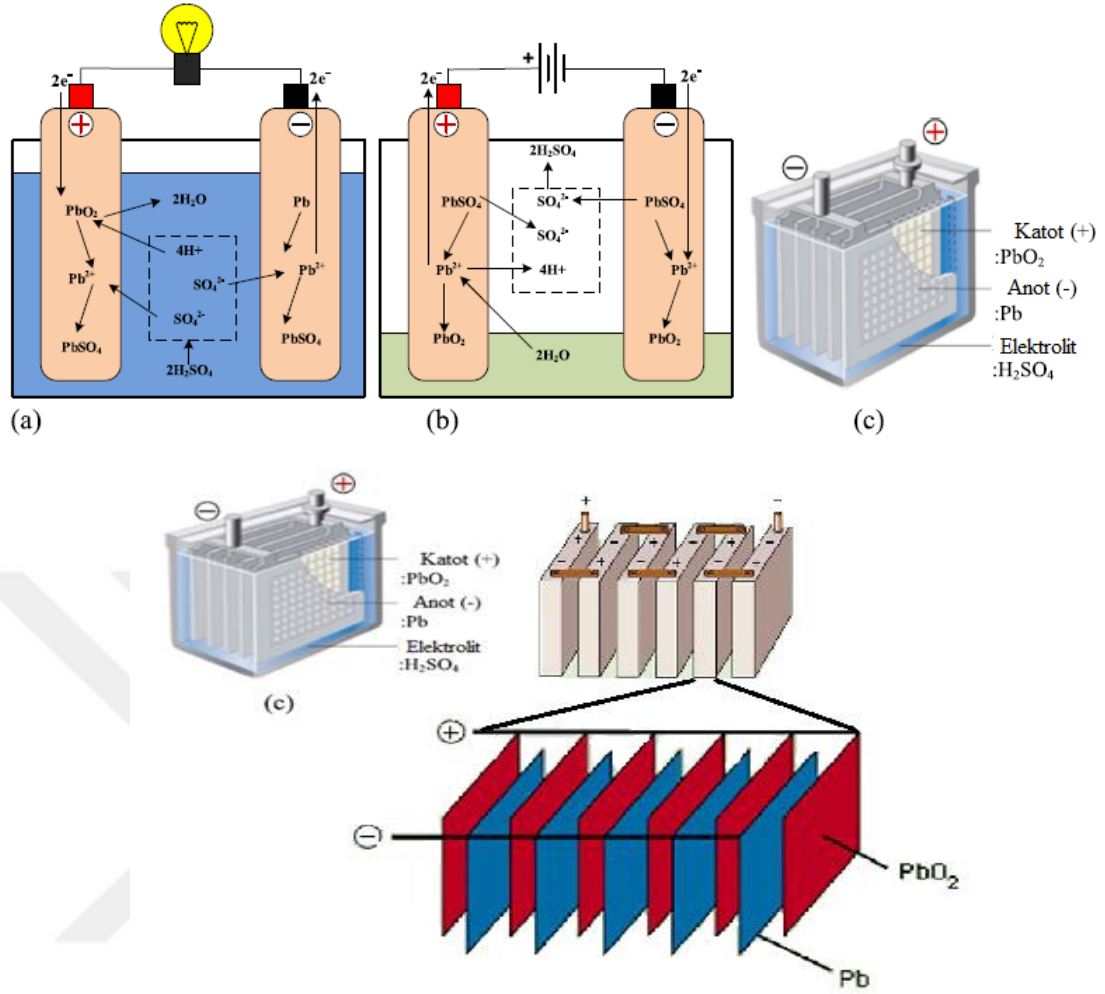
Kurşun asit (KA) piller, 1859'da Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından keşfedilmesinden bu yana ticarileştirilmiş bir biçimde İB pazarındaki en büyük ikinci enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Linden, 2002). Bir PB-asit pil (şarjlı durumda) kurşun metal elektrotlardan ve sülfürik asit elektrolit içindeki yaklaşık %37 (5,99 Molar) kurşun oksitten oluşur. Boşaltılmış durumda her iki elektrot da kurşun sülfata dönüşmekte ve elektrolit çözünmüş sülfürik asidi kaybederek su haline gelmektedir (Chen ve ark., 2009). KA piller, tüm içten yanmalı araç motorları için araçta marş motoru olarak kullanılmaktadır. Sağlamlıkları, güvenli çalışmaları, sıcaklık toleransları ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak acil durum güç kaynağı, yenilenebilir enerji depolama sistemi veya şebeke enerji depolaması için uygun bir seçenek olarak görülmektedir (Lukic ve ark., 2008, Storage, 2011). Bu enerji depolama sistemi, negatif elektrot olarak Pb, pozitif elektrot olarak PbO₂ ve elektrolit olarak ise H₂SO₄ çözeltisinden oluşmaktadır (Chau ve ark., 1999, Rashid, 2011). Bu İB alt sisteminin elektrokimyasal reaksiyonu, Denklem 2.3'de gösterildiği gibi KA pilinin içyapısında gerçekleşmektedir.



Şekil 2.19., deşarj ve şarj olurken KA kimyasal yapısının özelliklerini göstermektedir. Deşarj olurken ürün olarak ortaya PbSO₄, şarj olurken ise su açığa çıkmaktadır. Bu pil teknolojisi, düşük maliyet (300-600 \$/kWh), maksimum 2000 döngü ömrü ile %80 deşarj derinliğinde 615 yıl kadar çalışabilmekte ve %70-%80 verimlilik sunmaktadır (Chau ve ark., 1999, Storage, 2011). Enerji yönetimi uygulamalarında, düşük döngü ömürleri ve düşük enerji yoğunlukları nedeniyle birkaç ticari uygulama (8,5 MWh/1h Almanya, 4 MWh/1h İspanya, 14 MWh/1h ve 10 MWh/1h Amerika) dışında çok yaygın değildir (Moore ve Douglas, 2006). Ateşleme pilleri ve kesintisiz güç (UPS)

kaynakları, düşük nominal güce ve 6, 8 ve 12 V gerilim aralığına sahip KA aküleridir (Rashid, 2011, Dincer ve Rosen, 2021). Ancak tüm bu özellikler doğrudan sistemin çalışma sıcaklığı ile ilgilidir. Sıcaklığın 45 °C'ye (Tester ve ark., 2012) yükseltilmesi, kapasitesiyle bağlantılı pilin verimliliğinde kayda değer bir artışa imkân vermektedir. Ancak bu durum, pilin ömrü üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olma eğilimindedir (Olabi ve ark., 2020). Pb-asit piller, günlük %0,1'den daha az düşük öz boşalım özelliği sergiledikleri için daha uzun süre enerji depolayabilecek şekilde tasarlanmışlardır (Greenblatt ve ark., 2007).

KA (VAKA) valf ayarlı kurşun asit enerji depolama sistemi yüksek bir net performansa, düşük bir başlangıç maliyetine ve hızlı şarj olma özelliğine sahip olup ve bakım gerektirmemektedirler (Chau ve ark., 1999). Bu özellikleri onları EA'lara güç sağlamak için popüler bir pil haline getirmiştir. Yapılan mevcut araştırmalar incelendiğinde, gelişmiş VAKA pil malzemelerinin boyutunu ve ağırlığını en aza düşürülmesi ve yüksek enerji yoğunluğunun korunabilmesi amaçlanmaktadır (Spanos ve ark., 2015, Zeng ve ark., 2015). Yaygın olarak üretilen VAKA piller incelendiğinde, absorbe edilmiş cam malzeme (ACM) ve JEL pilleri içerdikleri görülmektedir.



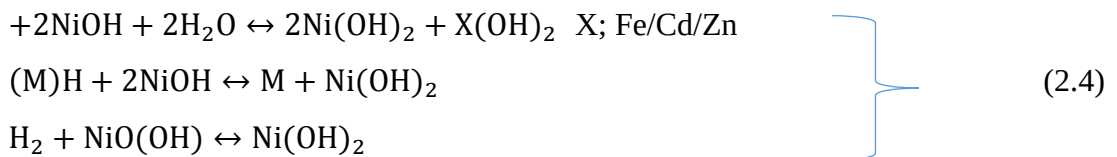
Şekil 2.19. Basit bir Kurşun asit (Pb-asit) enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı: a) Şarj esnasında b) Deşarj esnasında ve c) KA prototipi (yeniden düzenlenmiştir (Chau ve ark., 1999, Storage, 2011, Hannan ve ark., 2017).)

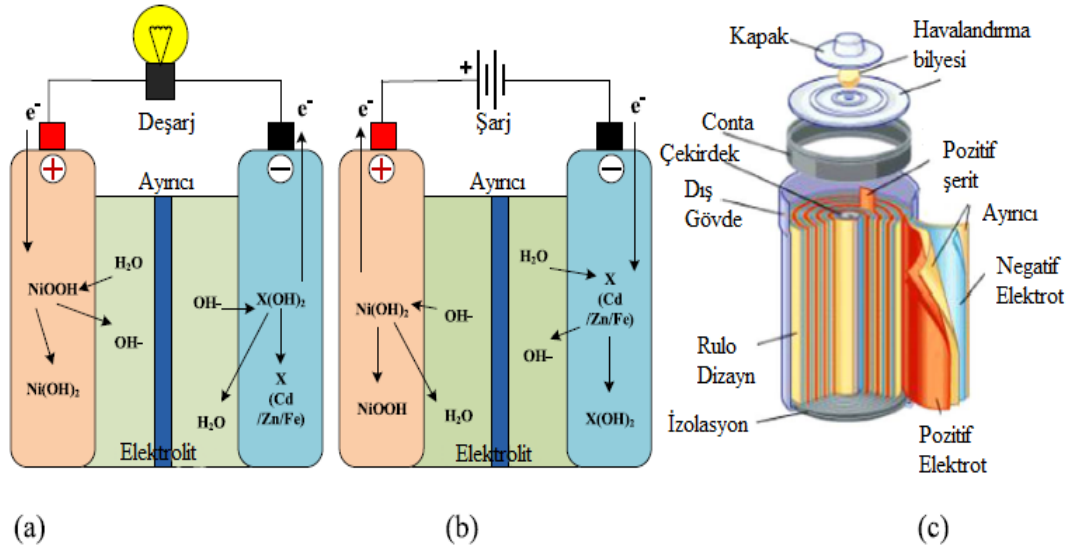
ACM piller, sızıntı yapmadan asidi emebilen ve içerisine hapseden katı bir malzeme olan fiberglas bir elektrolitten oluşmaktadır. Bu tip pil kompakt bir hacme ve minimum titreşim direncine sahip olması sayesinde standart pillere göre titreşime daha dayanıklıdır. JEL piller, asit içeriğini elde etmek ve sızdırmazlığı sağlamak için, tamamen katı olmayan jel bir kütleye sahip jel elektrolitlerden üretilmektedir. JEL piller, diğer pillere göre daha yavaş ve kontrollü şarj gerektirmektedir. Bununla birlikte, jel elektrolitinde pile kalıcı olarak zarar verebilecek gaz kabarcıkları da oluşabilmektedir (Spanos ve ark., 2015, Zeng ve ark., 2015, Rashid, 2011, Dincer ve Rosen, 2021).

Parker'a (Parker, 2001) göre, PB-asit piller ve sulu piller benzer çalışma özelliklerine sahip iki tip pil teknolojileridir. Valf yardımı ile düzenlenen piller ise olası ticarileşme potansiyellerini hızlandırmak için daha fazla araştırma gerektirmektedir. Ayrıca, tersine çevrilebilir redoks reaksiyonları, pil elektrotlarının performansında bir düşüşe neden olmaktadır. Pb-asit pillerin verimliliği, düşük ve zorlu sıcaklık koşullarına maruz kalındığında da düşmektedir. Bu tür olumsuz koşullar altında pilin ömrü önemli ölçüde düşecektir (Díaz-González ve ark., 2012). Pb-asit enerji depolama sistemlerinde taşma meydana geldiğinde az da olsa su bakımı gerektirdiği ve ayrıca 30 Wh/Kg düşük özgül enerji ve 180 W/Kg güç yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (İbrahim ve ark., 2008).

- Nikel tabanlı piller

Nikel bazlı piller, pozitif elektrot olarak nikel hidroksit ve farklı negatif elektrot malzemeleri kullanılmaktadırlar. Nikel bazlı piller, negatif elektrot malzemelerine bağlı olarak Ni-Fe, Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-MH ve Ni-H₂ olarak sınıflandırılmaktadırlar. (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Linden, 2002, Storage, 2011, Li ve ark., 2016a). Genel olarak nikel bazlı pillerde aktif maddeler, pozitif elektrot olarak nikel hidroksit, elektrolit olarak potasyum hidroksit çözeltisi ve negatif elektrot olarak herhangi bir metal Fe/Cd/Zn, MH veya H₂ gibi malzemelerden oluşmaktadır (Chau ve ark., 1999). Nikel bazlı pillerde meydana gelen genel elektrokimyasal reaksiyon Denklem 2.4'de verilmiştir.





Şekil 2.20. Basit bir Nikel bazlı enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı: a) Şarj esnasında b) Deşarj esnasında ve c) Nikel nazlı pil prototipi (yeniden düzenlenmiştir (Chau ve ark., 1999, Storage, 2011, Hannan ve ark., 2017).)

Şekil 2.20., deşarj ve şarj sırasında nikel bazlı enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısını göstermektedir. Şarj/deşarj esnasında sırasında Ni(OH)_2 ve Fe/Cd/Zn(OH)_2 , M oluşmaktadır. Nikel-demir ve Nikel-çinko piller, düşük özgül güçleri, yüksek maliyetleri, düşük yaşam döngüleri ve yüksek bakım gereksinimleri nedeniyle onları EA uygulamaları için daha az çekici kılmaktadır (Chau ve ark., 1999). Ni-Fe ve Ni-Zn piller %75 enerji verimliliğe sahiptirler.

1899'da İsveçli bilim adamı Waldmar Jungner tarafından icat edilen ve 1950'li yıllardan beri ticarileştirilmiş versiyonu ile var olan nikel kadmiyum piller (Ni-Cd), olgunlukları (100 yıl) ve popülerlikleri açısından KA sistemlere yakındır (Whittingham, 2012). Ni-Cd piller bir nikel hidroksit pozitif elektrot plakası, bir kadmiyum hidroksit negatif elektrot plakası, bir ayırıcı ve bir alkalın elektrolit içermekte ve hücresinin nominal voltajı 1,2 V civarında olmaktadır. Ni-Cd piller yüksek enerji ve güç yoğunluğu (50–75 Wh/Kg 60-150 Wh/L), önemli derecede güvenilirlik ve çok düşük bakım gereksinimleri gibi özelliklere sahiptirler. Ancak bunlara karşın nispeten düşük çevrim ömrüne (2000–2500) sahiptirler. KA pillere göre bu avantajları, onların elektrikli aletler, taşınabilir cihazlar, acil durum aydınlatması, UPS, telekomünikasyon ve jeneratör destekleme sistemlerinde tercih edilmesini sağlamaktadır. Nikel kadmiyum ve metal hidrit, yüksek yaşam döngüsüne (2000 veya

daha fazla) ve enerji yoğunluğuna sahip oldukları için şu anda EA uygulamalarının güç noktasında fazlaca tercih edilmektedirler. Buna rağmen, yaşam döngüsü DOD'a (Deşarj derinliği) büyük ölçüde bağlıdır (Olabi ve ark., 2020), çünkü DOD'nin %10'un da 50 000 döngüden daha yüksek çevrim sayısına ulaşabilmektedir. Ni-Cd enerji depolama sistemleri endüstriyel UPS uygulamaları ve yenilenebilir enerji için büyük enerji depolaması sistemler olarak kullanılabilir. Ni-Cd pil depolamasındaki enerji verimliliği, üretimleri sırasında mevcut olan teknolojiye bağlıdır. Havalandırılmalı tip olarak, cep plakası %60 (Hadjipaschalis ve ark., 2009), sinter/PBE plakası %73, fiber plaka %83 ve sinter plakası %3 enerji verimliliğine sahiptir. Bununla birlikte, insanlarda sağlıkla ilgili riskleri artıran yüksek oranda toksin madde içermesi ve hafıza kaybı etkisi, bu uygulama için iki önemli dezavantajdır (Bolat ve ark., 2021). Ancak Ni-Cd, maliyet noktasında bir KA pilin fiyatının 10 katından daha fazla fiyata sahiptir (Divya, 2009, Khaligh ve Li, 2010, Hadjipaschalis ve ark., 2009, Zhou ve ark., 2013, Li ve ark., 2016a, García-Plaza ve ark., 2015, Chau ve ark., 1999). Bu tip tüm nikel bazlı piller arasında en gelişmiş teknoloji kullanılmasına rağmen, geri dönüşüm sorunları ve toksin etkileri de (García-Plaza ve ark., 2015, Khaligh ve Li, 2010, Hadjipaschalis ve ark., 2009, Divya, 2009) dikkate alınması gerekecek seviyelerdedir. Ni-Cd pillerin en büyük dezavantajı, pahalı üretim süreci nedeniyle daha önce de belirtilen nispeten yüksek maliyetidir (800-1500 \$/kWh). Bahsedilen toksin etki Kadmiyum ağır metalinden kaynaklanmakta ve bu nedenle Ni-Cd pillerin bertarafı ile ilgili sorunlar yaratmaktadır. Ni-Cd piller ayrıca pillerin tam deşarjdan sonra tam olarak şarj olacağı bellek etkisinden de muzdariptir. Ancak, yapılan geliştirmelerle ve uygun pil yönetimi prosedürleri kullanılarak bu etkinin azaltılması sağlanabilmektedir. Ni-Cd sistemi, Alaska, ABD'de bulunan ve her biri 3440 hücreden oluşan dört pil dizisi (her pil dizisi 5200 V) Golden Valley, Fairbanks'ta dünyanın en büyük (en güçlü) Ni-Cd pil enerji depolama sistemi uygulaması olması açısından önemli bir popülarite kazanmıştır (Mcdowall, 2004, Mcdowall, 2006). PB-asit pillere göre DOD'da (Díaz-González ve ark., 2012) %10 derinlik ile 50 000'lere varan döngü ömrü, 60-90 Wh/Kg enerji yoğunluğu, kWh başına yüksek maliyet olsa da düşük bakım maliyeti gibi var olan avantajlarına bağlı ilginin 1990'lı yılların başında Ni-MH pillerin pazara girmesiyle bu pil sistemlerine kaymasına engel olamamıştır (Baker, 2008, Nikolaidis

ve Poullikkas, 2017). Ayrıca Ni-Cd piller çok düşük iç direncine bağlı olarak hızlı şarj/deşarj olma özelliğine de sahiptirler (Morioka ve ark., 2001).

Bir diğer Ni temelli pil olan Ni-MH, düşük bellek etkisine, ihmal edilebilir çevresel etkiye ve geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir. Çalışma sırasında ısı üretmesine ve karmaşık bir algoritmaya ve maliyetli bir şarj cihazına ihtiyaç duymasına rağmen, çevre dostu olması ve bakım gerektirmemesi gibi avantajları ile Ni-MH'nin EA'lara güç sağlamak için Ni-Cd'den (Chau ve ark., 1999) daha uygulanabilir olmasına olanak sağlamaktadır (Zhu ve ark., 2016, Tie ve Tan, 2013) Ni-H₂, yüksek kapasite seviyesine, uzun bir yaşam döngüsüne ve aşırı şarja/deşarja karşılık dayanıklılık göstermektedir. Bu avantajlarının yanında bu teknoloji türü yüksek maliyetlidir. H₂ basıncıyla orantılı olarak öz boşalım olabilmekte ve düşük hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olması gibi dezavantajları da bünyesinde bulundurmaktadır ve sadece uzay uygulamaları için özel olarak kullanılmaktadır (Lee ve ark., 2013, Li ve ark., 2016a).

Nikel kadmiyum (Ni-Cd) pillerin kimyasal yapısı, Ni-MH pillerin kimyasal yapılarına çok benzemektedir. Ni-Cd teknolojisi çok dayanıklı ve önemli derecede mekanik ve elektriksel olarak zorlu kullanım şartlarına dayanabilmektedirler. Ayrıca uygun düşük sıcaklık özelliklerine, geniş sıcaklık aralığına, yüksek çevrim ömrüne, düz voltaj profillerine sahip olup genellikle bakım gerektirmezler [38]. Nikel kadmiyumun maliyeti, şarj edilebilir alkalın pillerin maliyetlerine hemen hemen eşittir. Fakat Pb-asit pillerle karşılaştırıldığında daha yüksek kalmaktadır. Ayrıca, kadmiyum bazlı piller toksin olarak kabul edilir ve bu durum yasal kısıtlamalar sebebiyle bu pillerin yerini Ni-MH ve Li-iyon teknolojisinin almasına sebep olmuştur. Günümüzde Ni-Cd piller öncelikle sadece havacılık gibi özel uygulamalarla sınırlı kalmıştır. En son yapılan araştırmalara göre, maliyetli olan nikel ve kadmiyum kullanılabilmesi için üretimi basitleştirerek maliyetlerin düşürülmesi hedeflenmiştir. Güç ve enerji yoğunluklarını artırma noktasında ise, nikel köpüğü, nikel lifi, plastik bağlı ve sinterlenmiş elektrotlara doğru bir kayma olmuştur (Linden, 2002).

Nikel demir (Ni-Fe) piller, geleneksel kimyasal piller arasında en sağlam yapıya, en uzun çevrim ömrüne ve hatta en yüksek dayanıklılığa sahip teknolojilerdir. Bunların yanında en derin deşarj kapasitesi, en esnek şarj rejimlerine sahiptirler ve aynı zamanda onları zorlu ve engebeli ortamlar için en iyi kimyasal yapıya sahip sistemlerdir. Bu avantajlarına rağmen, yüksek üretim ve bakım maliyetleri, zayıf şarj tutma, yüksek iç direnç, düşük enerji ve düşük güç yoğunlukları gibi dezavantajlarının bir sonucu olarak Pb-asit pillerinin ortaya çıkmasıyla büyük ölçüde cazibelerini kaybetmişlerdir. Yapılan son ar-ge çalışmalarıyla maliyetler azalmış ve enerji/güç performansı geliştirilmiştir. Ancak bu modern sistem konfigürasyonlarının maliyetleri Pb-asitler pillerden daha yüksek, ancak nikel kadmiyum pillerden daha düşüktür. Tüm bu gelişmeler neticesinde yenilenebilir enerji yönetimindeki ticari uygulamaları yeniden gündeme gelmeye başlamaktadır. Ayrıca, tek bir şarjla 150 Km gidebildiği bilinen EA'lardaki uygulamaları bir kez daha gözden geçirilmeye başlanmıştır (Linden, 2002). Yaşanan bu son gelişmeler odağında, sülfürlerin, lityum ve potasyum katkı maddelerinin eklenmesinin yanı sıra gözenekli polimer ayırıcılar ve nikelin gözenekli ve metal fiber elektrotlara verimli bir şekilde biriktirilmesi için elektro-çökeltme tekniklerine odaklanılmıştır. Zayıf şarj tutma, şarj/deşarj sırasında ısınma sorunları ve bazı küçük hidrojen havalandırma sorunları halen Ni-Fe enerji depolama sistemleri ilgili birincil zorluk olmaya devam etmektedir (Tsais ve Chan, 2013).

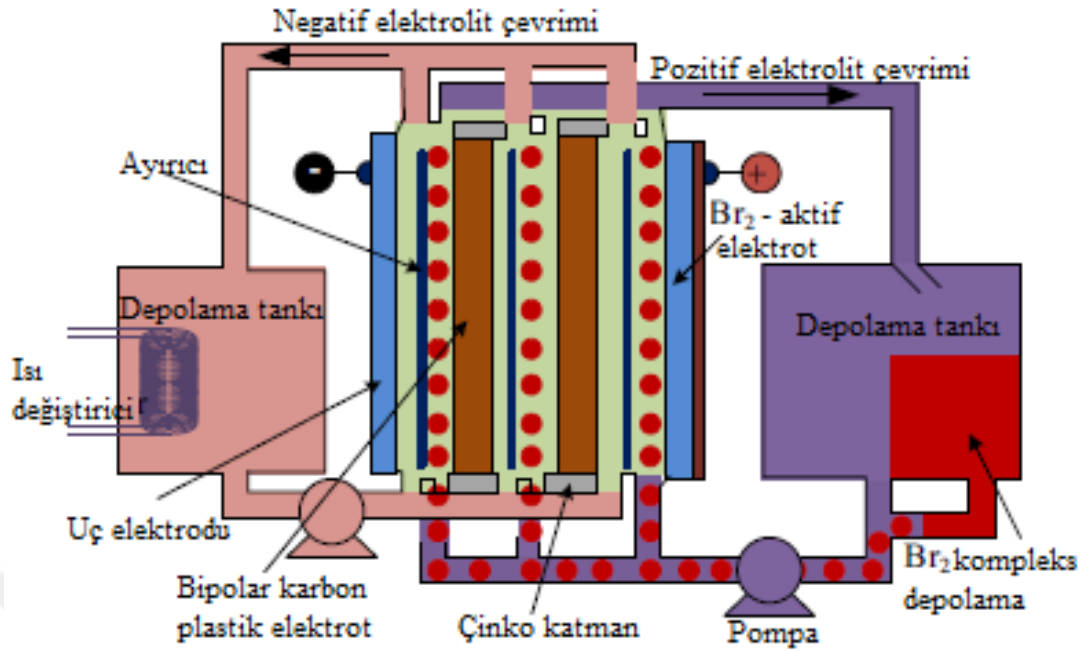
Nikel çinko (Ni-Zn) piller, diğer nikel kimyasal pillere göre daha yüksek özgül enerjiye sahiptir. Yüksek hızlarda tepki verebilen bu pil teknolojisi ilk olarak küçük elektrikli scooter ve bisikletlerde uygulanmışlardır. Ayrıca tamamen deşarj edilebilir, hızlı şarj edilebilirler, sızdırmaz, bakım gerektirmezler, düşük çevresel etkiye sahiptirler ve doğada kolay olarak bulunabilen malzemelerden üretilmektedirler (Linden, 2002). Bu pozitif yönlerinin yanında, Pb-asit pillere göre daha yüksek maliyetli ve düşük enerji yoğunluklarına sahiptirler. Bu teknolojinin kabul görmesinin önündeki en büyük engel ise kısa döngü ömürleri olmuştur. Son zamanlardaki Ar-Ge çalışmaları neticesinde, bu döngü ömrü; elektrot katkı maddeleri, elektrolit katkı maddeleri, geliştirilmiş ayırıcılar, şarj rejimlerindeki değişiklikler veya aktif malzeme sentezindeki değişiklikler gibi beş farklı metotla geliştirilmeye çalışılmıştır. Hidroksitlerin yanı sıra cıva ve diğer ağır metallerin eklenmesi, çinko elektrot

kararlılığını iyileştirip, aktif malzeme kaybını azaltmıştır. Polimer bağlanması yoluyla, çinko kaybını (ve kapasite kaybını) daha da azaltmak amacıyla şekil değiştirme etkileri azaltılmıştır. Sistemin ömrünü daha da uzatmak için darbeli DC şarj rejimleri kullanılmış olup elektrotlar için köpüklerin ve nano malzemelerin kullanılması kapasitelerini geliştirmiştir. Tüm bu gelişmelere rağmen Ni-Zn halen tatmin edici bir döngü ömrüne kavuşamamıştır (Tsais ve Chan, 2013).

- Çinko halojen piller

Çinko-halojen piller, EA enerji depolama sistemi olarak uygun olan Zn-Cl_2 ve Zn-Br_2 gibi pil teknolojilerini içermektedir. Zn-Cl_2 , 1970 yılında EA ve statik enerji depolamaları için geliştirilmiştir (Chau ve ark., 1999). Zn-Cl_2 , pil teknolojisi 90 Wh/L'lık yüksek bir enerji yoğunluğuna ve 60 W/Kg'lık düşük bir özgül güce sahiptir. Daha sonra, Zn-Cl_2 , alt sistem teknolojisinde meydana gelen yeni gelişmelerle elektrik şebekesi için uygulanabilir hale gelmiştir (Chau ve ark., 1999). Zn-Br_2 piller, yüksek özgül enerjileri (70 Wh/Kg), hızlı şarj kapasiteleri ve düşük malzeme maliyetleri nedeniyle EA enerji depolaması için oldukça uygundur (Chau ve ark., 1999, Linden, 2002, Lai ve ark., 2013, Manla ve ark., 2009). Ancak bu pil tipi, düşük özgül güçleri (90 W/Kg), yüksek brom reaktivitesi, yüksek elektrolit dolaşımı ve sıcaklık kontrolü açısından büyük boyutları nedeniyle son zamanlarda EA uygulamalarında daha az ilgi görmektedir (Lai ve ark., 2013, Chau ve ark., 1999, Linden, 2002). Bu alandaki Ar-Ge çalışmaları, EA uygulamaları için Zn-Br_2 pillerin geliştirilmesi noktasında devam etmektedir (Manla ve ark., 2009). Zn-Br_2 pilindeki genel elektrokimyasal reaksiyon Denklem 2.5'de ifade edilmektedir.





Şekil 2.21. Basit bir ZnBr₂ enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı (yeniden düzenlenmiştir (Chau ve ark., 1999, Linden, 2002).)

Zn-Br₂ pilde enerji, çinko ve brom elektrotları, çinko brom sulu çözeltisinin elektroliti, elektrolit depolama rezervleri ve mikro gözenekli plastik film ayırıcılardan oluşan bir sistemde elektrokimyasal reaksiyonlarla sonucunda depolanmakta ve deşarj olmaktadır. Şekil 2.21., basit bir Zn-Br₂ enerji depolama sistemi hücresini (Alanne ve Saari, 2006, Linden, 2002) göstermektedir. Sistemde çinko brom çözeltisinin elektroliti, her iki elektrottan geçen pompalar tarafından dolaşımda tutulmaktadır. Reaksiyonlar, şarj sırasında negatif elektrotta çinko ve pozitif elektrotta brom biriktirirken, deşarj sırasında ilgili elektrotlarında çinko ve bromür iyonları oluşmaktadır.

- Metal-hava piller

Metal-hava elektrokimyasal pil hücreleri, anot olarak bir metal elektrottan ve katot olarak tükenmez bir hava kaynağından gelen oksijenden oluşmaktadır (Storage, 2011, Linden, 2002, Zhang ve ark., 2016b, Atwater ve Doble, 2011, Lee ve ark., 2011, Cheng ve Chen, 2012, Wang ve ark., 2014b). Li, Ca, Mg, Fe, Al ve Zn, hava metal pillerinde anot materyalleri olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2016b, Atwater ve

Dobley, 2011, Lee ve ark., 2011, Cheng ve Chen, 2012, Wang ve ark., 2014b). Yani yakıt olarak metali, oksitleyici olarak havayı kullanan özel bir yakıt pili de denilebilmektedir. Bu anlamda geleneksel kimyasal pillerden yakıt pillerine geçiş olan bir enerji depolama sistemi teknolojisi olarak görülebilir. Maliyeti 100 ila 250 \$/kW olup, diğer elektrokimyasal pillere (yaklaşık 500 \$/kW üstü) kıyasla çok daha ekonomik olan metal-hava piller en kompakt pillerdendir. Ayrıca diğer elektrokimyasal pillere kıyasla daha çevre dostu bir teknolojidir. Bu avantajlarına karşın, bu enerji depolama sisteminin elektriksel olarak şarj edilmesinin çok zor ve verimliliğinin çok düşük olması en büyük dezavantajıdır. Normalde bu piller mekanik şarj gerektiren birincil pillerdir. Ancak yapılan son çalışmalar, elektrikle şarj edilebilirliğine izin verebilen iki işlevli oksijen elektrotlarına odaklanmıştır (Linden, 2002). Birçok üretici mekanik olarak değiştirilmiş ve uygulanan metalden ayrı olarak, yakıt üniteleri sunsa da az sayıda üretici elektriksel olarak şarj edilebilir bir pil teknolojisi olanağı sunmaktadır. Geliştirme aşamasında olan şarj edilebilir metal-hava pillerin ömrü şimdilik sadece birkaç yüz döngüdür ve verimlilik oranları %50'nin altında kalmaktadır (Chen ve ark., 2009).

Bu metal-hava enerji depolama sistemleri arasında, lityum-hava pili (Li-hava), diğer pillerden teorik olarak 100 kat daha yüksek olan 11,1 kWh/Kg yüksek özgül enerjiye sahip olması sayesinde EA uygulamaları için idealdir (Storage, 2011, Lee ve ark., 2011, Yang ve ark., 2016, Ma ve ark., 2015, Lim ve ark., 2016, Gallagher ve ark., 2014). Bu avantajlarına karşın, bu tip enerji depolama teknolojileri, hava ve nem kombinasyonu nedeniyle artan bir yangın riskini de bünyelerinde barındırmaktadırlar (Storage, 2011). Ayrıca İB enerji depolama sistemleri olarak, yüksek enerji yoğunluklu polimer piller dışındaki lityum-su pilleri ve lityum-O₂ piller kullanılmaktadır (Yang ve ark., 2016, Ma ve ark., 2015, Lim ve ark., 2016, Gallagher ve ark., 2014, Lee ve ark., 2011).

Şarj edilmiş enerji yoğunluğu açısından benzine rakip olabilecek bir enerji kaynağı Li-hava pil EA'lar için uygulanabilir. Deşarj sırasında temel pil kimyası, anotta lityum metalinin elektrokimyasal oksidasyonu ve katotta havadan oksijenin indirgenmesi olarak gerçekleşmektedir. Li-hava pillerden yüksek performans elde edilebilmesi ve

ticari olarak uygulanabilmesi için, katot yapılarının tasarlanması, elektrolit bileşimlerinin optimize edilmesi ve şarj/deşarj sırasındaki karmaşık kimyasal reaksiyonların aydınlatılması gibi çok sayıda teknik zorluğun üstesinden gelinmesi gerekmektedir (Girishkumar ve ark., 2010, Zhang ve ark., 2013, Nitta ve ark., 2015). Li-hava piller için güncel gelişmeler ve temel sınırlayıcı etmenlerin yanı sıra, kimyalarının mevcut yapısı literatürde özetlenmiştir (Girishkumar ve ark., 2010, Nitta ve ark., 2015).

Kalsiyum-hava pilleri yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, zamanla kapasitelerinin azalması ve nispeten yüksek maliyet gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Wang ve ark., 2014b). Çoğu durumda, magnezyum yüksek performans sağlamak amacıyla bu enerji depolama sisteminin elektrotlarında alaşım malzeme olarak kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2014b). Genel olarak, 700 Wh/Kg, magnezyum-hava pilleri Mg anot alaşım ile tasarlanmış ve bu teknoloji özellikle denizaltı uygulamalarında ön plana çıkmıştır. Demir-hava enerji depolama sistemi, diğer metal pillere kıyasla 6075 W/Kg gibi belirli bir düşük enerji ve diğer metal-hava pillere kıyasla daha düşük bir maliyete sahiptir (Atwater ve Doble, 2011, Wang ve ark., 2014b, Linden, 2002). Bu pil teknolojisi, daha düşük yaşam döngüsü maliyeti sayesinde, EA için potansiyel bir güç kaynağıdır ve uzun süreli enerji çevrimi malzemelerde veya aktif modüllerde deformasyona sebep olmaktadır (Linden, 2002, Atwater ve Doble, 2011).

Alüminyum-hava (Al-hava) enerji depolama sistemleri, yüksek oranda spesifik enerjiye, bağlantı voltajına ve uygun bir kapasiteye sahiptir. Bununla birlikte,deşarj esnasında su tüketimi nedeniyle bu avantajları nispeten gölgede kalmaktadır (Linden, 2002, Wang ve ark., 2014b). Al-hava pil, yalnızca mekanik olarak yeniden şarj edilebilir ve bu gibi elektriksel olarak yeniden şarj edilebilmesinin mümkün olmadığı durumlarda, herdeşarjdan sonra alüminyum anodun sulu elektrolitler kullanılarak değiştirilmesi gerekmektedir (Linden, 2002). Gelişmiş Al-hava piller, korozyonu önlemek ve %98 verimlilikte çalışabilecek veya geniş bir akım yoğunluğu aralığında daha fazla yükte birlikte verim sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır (İbrahim ve ark., 2008). Bu tür pil teknolojileri genellikle deniz veya su altı araçlarına enerji sağlamak

amacıyla kullanılmaktadır. Diğer bir kombinasyon olan Al-O₂ daha verimlidir. Çünkü Al-O₂ oksijen kombinasyonu, hidrojen yakıt pilleri gibi neredeyse kilogram oksijen başına neredeyse iki kat enerji üretebilmektedir (Zhang ve ark., 2016b, Atwater ve Doble, 2011, Lee ve ark., 2011, Cheng ve Chen, 2012, Wang ve ark., 2014b, Linden, 2002).

Çinko-hava pilleri pratik olarak uygulanabilirliği ispatlanmış olarak geleneksel yakıt pili enerji depolama sistemi hücrelerinden farklı özelliklere sahiptir. Öyle ki hem elektriksel hem de mekanik olarak şarj edilebilmektedirler. Düşük akım ihtiyaçlarında düz bir voltaj sağlamak ve etkin olmadıkları bekleme durumlarında uzun depolama ömrüne sahiptirler (Linden, 2002). Bunun dışında diğer metal-hava pillerde olduğu gibi; nem, sıcaklık ve diğer faktörlerdeki değişimlere karşı oldukça hassastırlar. Çinko-hava bobinlerinin reaksiyon hızı, hava akışını ayarlayarak kontrol edilmektedir (Storage, 2011, Linden, 2002, Wang ve ark., 2014b, Lee ve ark., 2011, Atwater ve Doble, 2011, Sapkota ve Kim, 2009, Li ve ark., 2013). Zn-hava şarj edilebilir elektrolit piller, ömürlerini uzatmak için çift fonksiyonlu elektrotlar kullanmaktadır ve Zn şarj edilebilir hava pilleri, şekil deformasyonunu önlemek için boşalmış anodun yerini alacak şekilde mekanik olarak tasarlanmıştır (Sapkota ve Kim, 2009, Li ve ark., 2013, Linden, 2002). Yüksek performanslı uygulamalarda, Zn-hava piller ve KA hibrit enerji depolama sistemleri için yüksek özgül enerjili Zn-hava ve KA özgül gücüne sahip olan hibrit bir sistem olarak tasarlanması hedeflenmektedir (Sapkota ve Kim, 2009, Li ve ark., 2013, Linden, 2002).

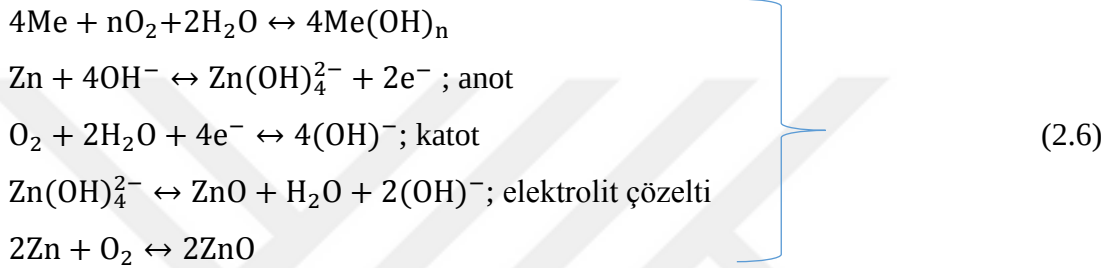
Yüksek enerji yoğunlukları ve değiştirilebilir anot plakaları aracılığıyla mekanik şarjın yapıldığı potansiyel elektrikli araç uygulamalarına uygun hale getirilmiştir (Harats, 1994, Cooper, 1995). Ayrıca, yüksek oranda performansı artırmak için Zn-hava piller bazen nikel kadmiyum veya mangan dioksit kimyaları ile hibritlenmiştir (Linden, 2002). Hibridizasyon olmadan bile, son güç kapasitesi gelişmeleri Zn-hava pillerini işitme cihazlarına ve diğer küçük elektronik cihazlara uygulanabilir hale getirmiştir. Yaşanılan bu son gelişmelerin sonucunda kısaltılmış kullanım ömrü göze alınarak geliştirilmiş hava akışı ön plana çıkarılmıştır. Hücrelerin aktif olmayan koşullarda saklanması ve fiziksel yollarla etkinleştirilmesi veya daha büyük cihazlar da

kullanılması durumunda su aktivasyonu yoluyla raf ömrü uzatılmıştır. Kısaltılmış ömür, çinko korozyonunun yanı sıra gaz transfer problemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Hava girişi engellenerek ve raf ömrü uzatılarak gaz giriş sorunları azaltılabilir. Çinko elektrotların stabilizesindeki olumlu gelişmeler, nikel alaşımlama ve bizmut ilavesi noktasında odaklanırken, jelleştirme ve bağlama teknikleri kullanım ömrünü daha da artırmaktadır. PEG gibi elektrolit katkı maddeleri, korozyon etkilerini azaltmak için hidrojen oluşumunu engellemiştir. Ayırıcı mikro gözeneklerine giren inorganik malzemeler fazladan aktif madde kayıplarını azaltmış ve kullanım ömrünü uzatmıştır (Lee ve ark., 2011). Elektrot gelişimi büyük ölçüde interkalasyon kimyaları ile sınırlı kalmaktadır. Bu kimyalar, geliştirilmiş gözeneklere ve dolayısıyla geliştirilmiş kapasitelere izin vermektedir. Son gelişmelerle birlikte yüksek kapasiteli ince fiber katkılı lamine hava elektrotlarının üretimine geçilmiştir (Linden, 2002). Gaz gözenekli yapısı ve teflon bağlı katalizör yapıları ile birlikte hidrofobiklik, yüksek performanslı hava/gaz elektrotları için önemli bir potansiyel barındırmaktadır (Linden, 2002). Bu gelişmelere rağmen, Zn-hava piller halen yüksek hız kapasitesi ve döngü ömrü sorunlarından muzdariptir ve bu kısıt sonucunda özel küçük ölçekli uygulamalarla sınırlı kalmaktadırlar.

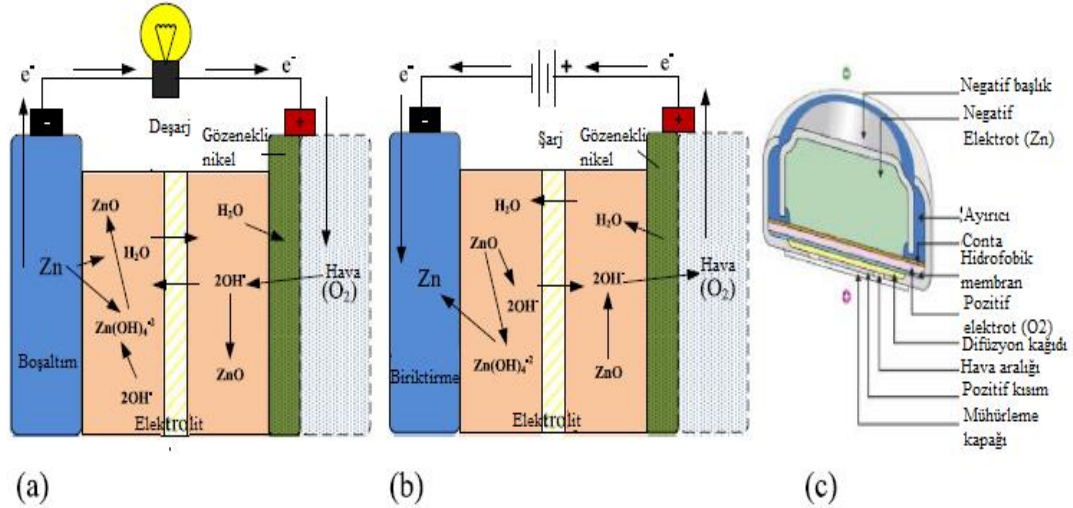
Demir-hava pillerinde yaşanan son gelişmeler, büyük enerji depolama kapasitesinin önünü açmış olabilir. Bu pil teknolojisi çinkoyu demir ile ikame etmektedir. Çinkonun aksine, şiddetli aktif madde dağılımından ve bunun sonucunda meydana gelen şekil değişikliklerinden etkilenmemektedir. Bu durumun sonucunda da kullanım ömürleri uzamaktadır. Ayrıca demir hidroksitleri alkali elektrolitte düşük çözünürlüğe sahip olması nedeniyle korozyon etkileri de düşük kalmaktadır. Yine de Zn-hava gibi, yüksek deşarj yetenekleri ve şarj verimliliği düşük kalmaktadır. Bizmut sülfür ilaveleri ve ilave kaplama malzemeleri ile birlikte ultra saf manyetit ve karbonil demirin kullanımını içeren son çalışmalar, önemli gelişmelerle sonuçlanmıştır (Manohar ve ark., 2012). Bu çalışmalar sonucunda 5 000 çevrime kadar çevrim ömrü ve %80'e varan verimlilik gelişimi artık mümkün görünmektedir. Düşük demir maliyeti (kWh enerji başına) ile birleştiğinde, Fe-hava piller aracılığıyla çok rekabetçi büyük ölçekli enerji depolamanın yakın gelecekte hayatımıza girebileceği anlamına gelmektedir.

Buradan da anlaşıyor ki, Fe-hava piller hala çok yeni ve geliştirilmeye muhtaç bakır bir teknoloji olarak beklemektedir.

Genel olarak, metal-hava pilleri, düşük malzeme maliyetleri ve yüksek özgül enerjileri gibi avantajları sayesinde şarj edilebilir depolama uygulamaları için tatmin edici seviyede görülmektedir (Spanos ve ark., 2015, Atwater ve Doble, 2011). Metal-hava enerji depolama sistemindeki genel elektrokimyasal reaksiyon Denklem 2.6'da verilmiştir.



Şeklinde gerçekleşen reaksiyonlardır. Burada Me, Li, Ca, Mg, Fe, Al ve Zn gibi metaller olup n ise, metalin oksidasyonu için değerlik değişimine bağlı olan katsayıları ifade etmektedir. Diğer denklemler ise bir çinko-hava pil teknolojisinin kimyasal reaksiyonlarını ifade etmektedir. Elektrolit olarak genellikle KOH gibi iyi bir OH⁻ iyon iletkeni kullanılmaktadır. Elektrolit sıvı formda veya KOH ile doyurulmuş katı bir polimer membran formunda olabilmektedir.



Şekil 2.22. Basit bir Çinko-hava enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı a) Deşarj esnasında b) Şarj esnasında c) Çinko-hava enerji depolama sistemi prototipi (yeniden düzenlenmiştir (Akhil ve ark., 2015, Hannan ve ark., 2017).)

Şekil 2.22., deşarj/şarj sırasında çinko-hava pilin kimyasal yapısını göstermektedir. Deşarj sırasında elektrot elektronları serbest bırakmak için oksitlenmekte ve hava elektrotu hidroksit iyonları üretmektedir. Pil şarj esnasında ise çinkoyu çinko elektroda yapıştırarak biriktirmekte ve oksijen hava elektrotundan serbest bırakılmaktadır (Akhil ve ark., 2013).

- Sodyum-beta piller

1983 yılında Tokyo Elektrik Enerjisi Şirketi tarafından keşfedilen Sodyum (Na) pil, kullanılan anot malzemesine de bağlı olarak gayet ilgi çekici bir teknolojidir. Sodyum-beta piller, katı elektrolit kullanımına sahip olan tek pil teknolojisidir. Bu enerji depolama sistemi elektrolit olarak yüksek sıcaklıklarda iyi Na⁺ iletkenliği ve elektrik izolasyonu sergileyen beta-alümina (β"-Al₂O₃) kullanmaktadır (Akhil ve ark., 2013). Katot malzemelerine bağlı olarak, sodyum-beta enerji depolama sistemi, sodyum-kükürt (Na-S) ve sodyum-metal halojenür olarak sınıflandırılmaktadır (Akhil ve ark., 2013, Linden, 2002, Chau ve ark., 1999, Storage, 2011). 300–350 °C gibi yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip Na-S teknolojisi, 1960'larda EA uygulamaları için Ford tarafından geliştirilmiştir (Chau ve ark., 1999, Zhang ve ark., 2014, Dincer ve Rosen, 2021, Akhil ve ark., 2013). Daha sonra, bu pil türü, kamu hizmeti ve elektrik şebekelerini desteklemek amacıyla büyük ölçekli depolama sistemlerinde yaygın bir

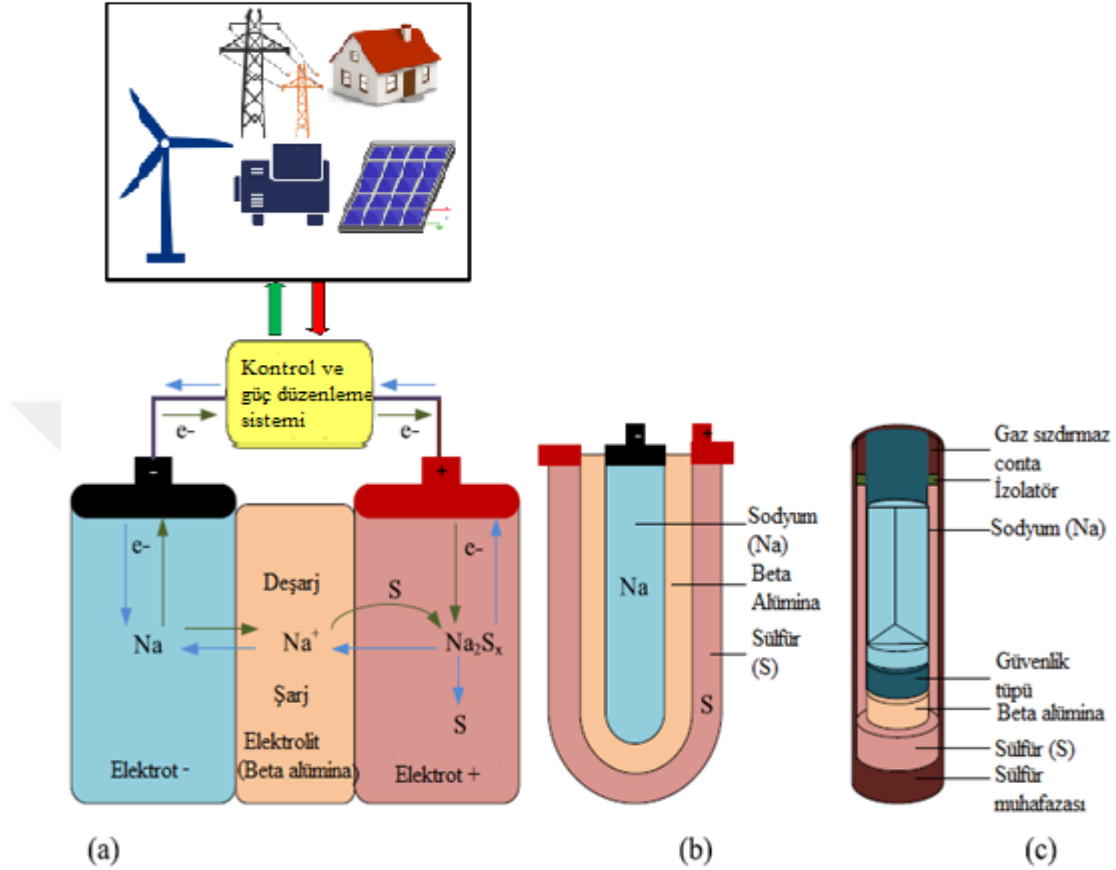
şekilde günümüze kadar kullanılmıştır (Zhang ve ark., 2014, Rastler, 2010, Zhou ve ark., 2013). Ayrıca, sırayla 150–240 Wh/Kg ve 150–230 W/Kg (Linden, 2002, Chen ve ark., 2009) gibi etkili bir enerji ve güç yoğunluğuna, 4500 gibi uzun bir döngüsel ömre (Chen ve ark., 2009, Storage, 2011, Vazquez ve ark., 2010, Rastler, 2010) ve yüksek %80-90 (Linden, 2002, Chen ve ark., 2009, Zhou ve ark., 2013, Cotterman, 2013) enerji verimliliğine sahip, ucuz, bakım gerektirmeyen, hızlı reaksiyon verebilen (milisaniyeler içinde) ve güvenli bir enerji depolama sistemidir. Bakım maliyeti olmaması, ucuz, doğada kolay bulunabilir olması ve hızlı tepki verebilmeleri geniş ölçekli mikro şebeke tasarımları için bu sistemleri avantajlı konuma getirmektedir. Bu avantajlarına karşın, bu pil teknolojisi yüksek iç dirençten (Linden, 2002) ve Na korozyonundan muzdarip olup elektrotların erimiş durumunun (Zhou ve ark., 2013, Dincer ve Rosen, 2021) devamlılığının sağlanabilmesi için yaklaşık olarak 300 °C civarında ısıtılması gerekmektedir. Na-S pil, anot olarak erimiş durumda katı sodyum ve katot olarak erimiş kükürtten meydana gelmekte ve katı beta alümina seramik elektrolit ile ayrılmaktadır (Vazquez ve ark., 2010, Zhang ve ark., 2014). Sodyum-beta enerji depolama sistemi Şekil 2.23.'de gösterilmektedir. Wen ve ark., yaptıkları araştırmaya göre; elektrolitteki dirençlerin daha az olması durumunda, pilin veriminin artacağı öne sürmüşlerdir. Çünkü pildeki kayıplar da bu azalmaya bağlı olarak önemli ölçüde azalacaktır (Wen ve ark., 2008). Na-S pilindeki genel elektrokimyasal tepkime Denklem 2.7'de verilmiştir.



Şeklinde verilen bu denklemde x katsayısı 3 ila 5 arasında değişebilmektedir.

Şekil 2.23., deşarj/şarj esnasında Na-S teknolojisinin kimyasal yapısını göstermekte ve hücrenin çıkış gerilimi 2 V kadar olmaktadır. (Storage, 2011, Vazquez ve ark., 2010, Chen ve ark., 2009, Akhil ve ark., 2013). Deşarj esnasında Na, Na-beta ara yüzünde oksitlenir ve beta-alümina elektrolitinden geçmek amacıyla pozitif Na^+ iyonları üreterek sülfür ile birleşip sodyum poli-sülfidleri (Na_2S_x) oluşturmaktadır. Elektronlar, amaçlanan çıkış voltajını sağlayabilmek amacıyla harici dış devreyi tamamlamaktadır. Hücre tekrar şarj edildiğinde, elektrokimyasal tepkimeler tersine

gerçekleşmektedir (Vazquez ve ark., 2010, Linden, 2002, Chen ve ark., 2009, Akhil ve ark., 2013, Zhang ve ark., 2014).



Şekil 2.23. Basit bir Sodyum sülfür enerji depolama sistemi hücresinin kimyasal yapısı a) Şarj/deşarj esnasında b) Na-S teknoloji depolama sisteminin boru tipi tasarımı c) Na-S enerji depolama sistemi prototipi (yeniden düzenlenmiştir (Storage, 2011, Vazquez ve ark., 2010, Chen ve ark., 2009, Hannan ve ark., 2017, Akhil ve ark., 2013)

Sodyum-metal halide enerji depolama sistemleri, Na-S pillerden daha yüksek hücre voltaj çıkışı sağlayabilmeleri sebebiyle 1990'lardan beri EA teknolojisinde başarı ile kullanılmaktadır (Storage, 2011). Bu pil teknolojisi, Sıfır Emisyonlu Pil Araştırma Etkinliği (ZEBRA) olarak literatüre geçmiştir (Tie ve Tan, 2013, Li ve ark., 2015a). Bir sodyum-metal klorür (Na-MeCl_2) pil, 250–350 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında performans gösterebilmekte ve bir hücrenin çıkış voltajı yaklaşık olarak 2,67 V kadar olmaktadır (Chau ve ark., 1999, Storage, 2011). ZEBRA enerji depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunluğu, nispeten az korozyon, içsel güvenlik ve yarı katı katot teknolojisi kullanımı (Linden, 2002, Zhang ve ark., 2014), uzun döngü ömrü ve diğer

elektrokimyasal teknolojilerden daha düşük maliyetlidir (Chau ve ark., 1999, Tie ve Tan, 2013).

Tüm bu avantajlarına karşın, ZEBRA pil teknolojisi 150 W/Kg gibi düşük bir özgül güç ihtiva edebilmektedir. Termal olarak bir ısı (Chau ve ark., 1999) ve öz boşalım yönetimine (Tie ve Tan, 2013, Hosseinifar ve Petric, 2016, Capasso ve Veneri, 2015) gereksinim duymaktadırlar. Na-S pil kimyalarının ekzotermik olması pil ısını yükseltmektedir. Bu ısınma hücre deşarjı esnasında ortaya çıkabilmektedir. Bu amaçla sık sık deşarj rejimleri ile maksimum verim elde edilebilmektedir (Sabihuddin ve ark., 2014). Eşit ısı dağılımı amacıyla ek mekanizmalara gereksinim duymaktadırlar. Bu ısınma ihtiyacı mühim bir kayıp kaynağıdır ve aktivasyondan sonra sık sık şebeke bağlantısı gerektirmektedir. Termal özellikler bu nedenle araştırmaların odaklandığı nokta oluşmuştur (Min ve Lee, 2012). Bu bağlamda, yalıtım bu kaybı azaltmaya yardımcı olabilir. Büyük ölçekli uygulamalarda yalıtım, geleneksel fiber levha ya da mikro gözenekli malzemeler şeklinde olabilmektedir. Çünkü bu malzemeler daha ucuzdur ve sahip olunan şebeke altyapısı, kayıp ısıyı tekrardan enjekte ederek ek enerji sağlamak amacıyla kullanılabilir. Düşük yoğunluklu aktif malzemeler yapısal gereksinimleri azaltmaktadır. Taşınabilir uygulamalar için daha kaliteli ve daha pahalı fakat daha az hacimli, tahliye edilmiş yalıtım gerekmektedir. Değişken iletkenlik yalıtımının ek kullanımı, daha iyi termal yönetim amacıyla elektronik olarak kontrol edilerek metal hidrit hidrojen emilimine izin verilebilmektedir (Burch ve ark., 1995, Benson ve ark., 1994). Isı yayılımı ve soğutma, direkt olarak verimlilikle bağlantılıdır ve iletkenlik yaklaşımlarına ek olarak, ısı boruları, termal şantlar, saklı ısı depolama, buharlaşmalı soğutma ve hava/sıvı ısı değişimi yolu ile yapılabilir (Linden, 2002).

Başlangıç yatırım maliyetlerinin 2000 \$/kW ve 350 \$/kWh olması bir başka kısıtlayıcı etmendir. Na-NiCl₂, Na-FeCl₂ ve Na-Ni-FeCl₂ ZEBRA teknolojisi enerji depolama sistemleri olarak kullanılmaktadır (Hosseinifar ve Petric, 2016, Capasso ve Veneri, 2015, Li ve ark., 2015a). Bu iki sodyum-beta pil arasındaki asli fark, ZEBRA pilinde ikincil elektrolit olarak sodyum alüminyum tetra klorürün (NaAlCl₄) ek kullanımıdır (Linden, 2002). ZEBRA pilinin aktif malzemeleri, anot olarak erimiş sodyum, birincil elektrolit olarak katı beta-alümina seramik, ikincil elektrolit olarak erimiş sodyum

alüminyum tetra klorür (NaAlCl_4) ve katot olarak gözenekli metal klorürdür (MeCl_2) (Chau ve ark., 1999). Metal klorür olarak, nikel klorür (NiCl_2), demir klorür (FeCl_2) ya da nikel-demir klorürün (Ni-FeCl_2) bir kombinasyonu kullanılabilir. NiCl_2 bilinen en iyi ZEBRA pil teknolojilerindendir. Na-S pilindeki genel elektrokimyasal tepki Denklem 2.8'de verilmiştir.



ZEBRA teknolojisinin başlıca uygulamalar alanları EA'lar, denizcilik ve telekomünikasyondur. ZEBRA enerji depolama sistemlerinin başlıca avantajları ise hibrit ve elektrikli araçlar için mevcut olan mikroişlemci tabanlı kontrol sistemi ve yeterli termal yönetim sistemi sayesinde kendi kendisine yeten bir teknolojidir. Komple sistem bakım gerektirmez ve her hücreye erişim ayrı ayrı mümkün olmamaktadır. ZEBRA teknolojisi, Avrupa Otomobil Üreticilerince gerçekleştirilen güvenlik testlerinden başarıyla geçmiştir (Bohm ve ark., 1998). EA'lar da kullanılmak amacıyla iki temel ZEBRA enerji depolama sistemi, Z12 ve Z11 olarak tasarlanmıştır. Z11 aküsü ilk olarak sıvı soğutma sistemiyle BMW-3 serisi otomobillerde kullanılmış ve (Sudworth, 2001) Z12 pillerine göre daha belirgin enerji yoğunluğu sağlanmıştır. Fakat EA her iki teknolojiye de aynı performansı göstermiştir. Z12 pili, otomobilin ısıtma ve sıvı soğutma sistemine bağlı bir ısı eşanjörüne sahiptir ve ilk olarak Mercedes araçlarda kullanılmıştır (Gaub ve Van Zyl, 1997). Farklı türdeki ZEBRA enerji depolama teknolojilerinin özellikleri Tablo 2.7.'de verilmiştir.

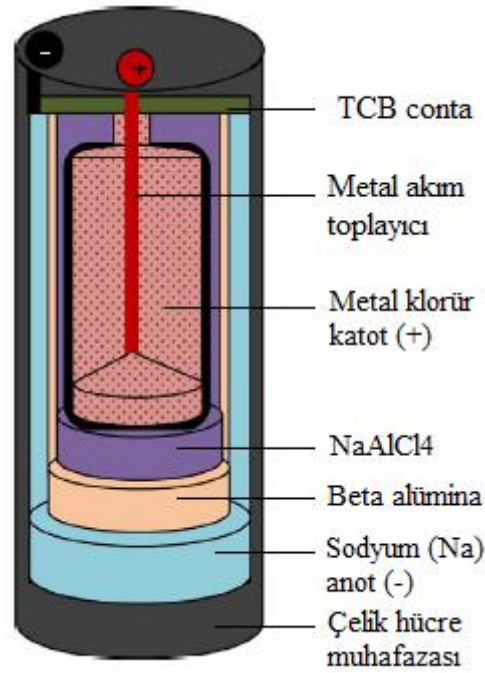
Tablo 2.7. ZEBRA enerji depolama sistemlerinin özellikleri (Sudworth, 2001, Khan ve ark., 2019)

Pil türü	Kapasite (A.h)	Enerji (kW)	Max . Volt (V)	Hücre miktarı	Ağırlık (Kg)	Enerji (Wh/kg)	Isıtma Süresi (Saat)	Ortam Sıcak. (°C)	Isı Kaybı (W)
Z5-278 ML-64	64	17,8	186	216ML3	195	91,2	24	(-40),70	120
Z5-557 ML-32	32	17,8	372	216ML3	195	91,2	24	(-40),70	120
Z11	96	28,7	199	348ML3	335	85,6	24	(-40),70	160
Z12	104	30	193	448ML4	375	80	24	(-40),70	160
B5	310	8	17,2	8ML3	78	103	24	(-40),70	55

Na-S (2 V) enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında, ZEBRA teknolojisi aşırı şarj ve deşarj daha dayanıklı, potansiyel olarak daha güvenli ve daha yüksek hücre çıkış voltajına (2,67 V) sahiptir. Na-S teknolojisi ile ilgili dezavantajlar, düşük enerji yoğunlukları (120Wh/Kg) ve güç yoğunluklarıdır (150 W/Kg). Ancak hala Pb-asit pil teknolojisine göre daha avantajlı durumdadırlar. Diğer bir dezavantaj ise dünyada sadece bir firma olan Beta Ar-Ge'nin (İngiltere) bu tür pilleri üretmesi ve teknolojinin 1999 yılında MES (İsviçre) tarafından satın alınmış olmasıdır. Şu anda hibrit elektrikli araçlar için ZEBRA pilinin yüksek güçlü ve yüksek enerji versiyonunu; yenilenebilir enerjiyi depolamak ve endüstriyel uygulamalar için yük dengeleme pilleri olarak geliştirilmektedirler (Galloway ve Dustmann, 2003, Chen ve ark., 2009). ZEBRA pillerinin yeni NATO Denizaltı Kurtarma Sisteminde (NSRS) uygulanması da geçtiğimiz günlerde duyurulmuştur.

Şekil 2.24., bütün bileşenleriyle birlikte (Linden, 2002, Akhil ve ark., 2013, Li ve ark., 2015a) etiketlenmiş bir ZEBRA prototip tasarımını göstermektedir. Şarj/deşarj sırasında gerçekleşen elektrokimyasal tepkime, Na-S pil tepkime reaksiyonlarına benzemektedir. Deşarj esnasında, erimiş durumdaki Na ve NiCl_2 , Ni'ye ve tuza (NaCl) dönüşmektedir ve denklem 2.8'de gösterildiği üzere şarj (Akhil ve ark., 2013) esnasında tepkimeler tersine gerçekleşmektedir. Hücre aşırı yüklenirse, birincil elektrolit bozulabilir ve erimiş ikincil elektrolit olan NaAlCl_4 , NaAlCl_4 'ü Na, Cl_2 ve AlCl_3 şeklinde parçalamak yerine Ni ile birleşerek Denklem 2.9'da verilen NiCl , Na ve AlCl_3 tepkimesi gerçekleşmektedir (Li ve ark., 2015a, Linden, 2002, Chau ve ark., 1999).





Şekil 2.24. ZEBRA enerji depolama sisteminin basit prototip tasarımının şeması (Akhil ve ark., 2013, Linden, 2002, Capasso ve Veneri, 2015, Hannan ve ark., 2017).

NaNiCl_2 enerji depolama sistemleri, özellikle EA'ların ihtiyacı olan büyük veya orta ölçekli enerji depolama sistemlerinin elde edilebilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Uzun kullanım ömrü sağlamak için yapılan çalışmalar sonucunda ZEBRA teknolojisinin geliştirilmesinde önemli mesafe kat edilmiştir (Hosseinfar ve Petric, 2016).

Tablo 2.8. Bazı gelişmiş ülkelerde uygulanan Na-S tesisleri (Tewari ve Mohan, 2012, Kawakami ve ark., 2010, Faisal ve ark., 2018).

Ülkeler	Net güç üretim Değeri (MW)	Tesislerin kurulum amaç ve detayları
Kawasaki, Japonya	0,05	İlk geniş ölçekli Na-S uygulaması
Long Island, Amerika	1/7 sa	Araç yakıt ikmali
Rokkasho, Japonya	34/244,8 sa	Güç dalgalanmalarını düzenleme
Saint Andre, France	1	Rüzgâr enerji santrali
Graciosa, Almanya	3/18 sa	Rüzgâr ve güneş enerji santrali
Abu Dabi, Arap emirlikleri	4	Yük dengeleme

Tablo 2.8.'de gösterilen bazı ülkelerde kurulu Na-S enerji depolama teknolojisinin haricinde, Tokyo Elektrik Enerji Şirketi 6 MW/8sa birim ve Hitachi Fabrikasında 8 MW/7,25sa gibi tesislerle, Japonya'da bulunan 30'dan fazla tesiste, toplamda 20 MW'tan fazla ve günlük 8 saatlik tepe değerini karşılama için uygun depolanmış

enerjiye sahiplerdir. ABD enerji piyasasında bu tür Na-S uygulamaları henüz değerlendirme aşamasındadır. Amerikan Elektrik Enerji İşletmesi, Ohio'da 1,2 MW'a kadar kapasiteye sahip olan Na-S sisteminin ilk denemelerine başlamıştır (Chen ve ark., 2009).

- Lityum-iyon piller

Lityum İB'ler, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek özgül enerji ve yüksek gücünün yanında hafifliği nedeniyle EA enerji depolama sistemlerine uygulamak amacıyla umut vadeden enerji depolama sistemlerindendir (Tie ve Tan, 2013, Akhil ve ark., 2013). Ayrıca, lityum pillerin cıva ya da kurşundan farklı olarak hafıza etkisi gibi başka bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır (Tie ve Tan, 2013). Fakat bu pil teknolojisi diğer pil teknolojilerine göre daha maliyetlidir. Örneğin; 1300/kWh amacıyla 150\$ maliyeti olmaktadır. Tüm pil türlerinden beklendiği gibi hücre dengeleme sistemi için aynı voltaj, aynı şarj seviyelerinde tutarlı pil performansı sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca güvenilir çalışma ortamı sağlanabilmesi amacıyla korumaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Lityum enerji depolama sistemleri, çalışma sıcaklığı aralığı olarak yüksek sıcaklıkta ve ortam sıcaklığındaki uygulamaları amacıyla iki farklı tasarıma sahiptir. Sodyum-beta teknolojisi dışında lityum-alüminyum-demir-monosülfür (Li-Al-FeS) ve lityum-alüminyum-demir-disülfür (Li-Al-FeS₂) yüksek sıcaklıklı lityum pil teknolojileridir (Linden, 2002, Chau ve ark., 1999, Dincer ve Rosen, 2021). Bu lityum-kükürt piller, diğer tüm lityum enerji depolama sistemler arasında en yüksek enerji kapasitesine ve en düşük ağırlığa sahip teknolojidir. Bu avantajlarına karşın bu pil teknolojisi düşük bir döngüsel ömre sahip (Tie ve Tan, 2013), termal yönetime gereksinim duymakta ve çalışma ısısının güvenliğini sağlamak amacıyla enerji gereksinimi duymaktadırlar (Chau ve ark., 1999). Ancak, diğer elektrokimyasal pillerin çoğundan (2,1 V civarı) daha fazla (3,6 V) gerilim çıkışına sahiptir. Lityum-kükürt piller 375–500 °C sıcaklık aralığında performans göstermektedir (Chau ve ark., 1999, Linden, 2002). Yüksek sıcaklıklı lityum-kükürt piller, anot olarak Li-Al alaşımından, katot olarak demir sülfürden, elektrolit olarak erimiş lityum klorür, potasyum klorürden ve bir ayırıcıdan

meydana gelmektedir (Chau ve ark., 1999, Dincer ve Rosen, 2021). Bu pillerde lityum aktivitesini kontrol edebilmek amacıyla Li-Al alaşıımı, demirin korozyonunu önlemek amacıyla da demir sülfür kullanılmaktadır (Chau ve ark., 1999, Dincer ve Rosen, 2021). Her iki lityum-kükürt pil teknolojisine ait genel elektrokimyasal tepkimeler Denklem 2.10 ve 2.11'de verilmiştir.



Normal olarak oda sıcaklığında çalışan diğer lityum pil teknolojisi, çoğunlukla olarak EA uygulamalarında kullanılmak amacıyla tasarlanmış Li-poli ve Li-iyon enerji depolama sistemleridir (Chau ve ark., 1999, Cotterman, 2013). Li-poli ve Li-iyon teknolojisi arasındaki temel fark, birinci teknolojiye reaktör olarak lityum metal kullanılırken, ikinci teknolojinin hücrelerinde metalik lityum kullanılmaktadır (Chau ve ark., 1999). Genelde lityum iyon pil teknolojisinin güvenli bir şekilde çalışabilmesi için koruma kaplamasına ihtiyaç duymaktadır. Bu koruma tepe voltajlarını önleyerek deşarj sırasında oluşabilecek gerilim düşüşlerini ortadan kaldırmaktadır (Olabi ve ark., 2020). Ayrıca, Li-iyon pillerin ömrü 10-25 yıl arasında değişip %100 (Krawczyk ve ark., 2017) deşarj derinliğinde 1000 şarj/deşarj döngüsel ömre sahiptir (Rydh ve Sandén, 2005). Bakım gerektirmemesi gerçeğine karşın her beş yılda bir bataryanın değiştirilmesi verimliliğini %78'lere kadar çıkarmaktadır (Huang ve ark., 2008). Li-poli enerji depolama sistemleri, detaylı ve farklı paketleme şekillerine bağlı olarak kullanışlı, dayanıklı ve güvenilirlik sağlamaktadır. Bu avantajlarına karşın, her ne kadar yüksek özgül enerjiye sahip (155 Wh/Kg) ve güce (315 W/Kg) ihtiyaç duysalar da zayıf iletkenliğe ve zayıf güç yoğunluğuna sahiptirler (Rashid, 2011, Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Zhang ve ark., 2014).

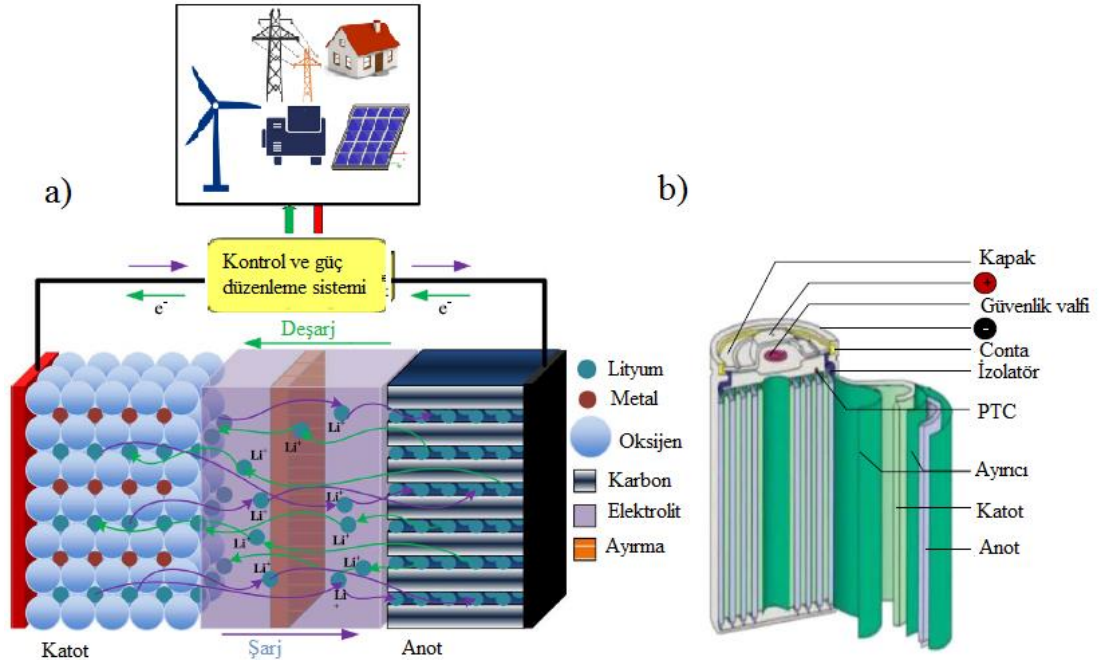
Li-iyon enerji depolama sistemleri, enerji depolama ve taşınabilir elektrikli/elektronik (cep telefonu, dizüstü bilgisayar piller vb.) cihazlarda sağladıkları ufak boyut, hafiflik ve yüksek potansiyel gibi avantajlar sayesinde çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Vazquez ve ark., 2010, Zhou ve ark., 2013, Akhil ve ark., 2013, Lee ve ark., 2016).

İlk ticari versiyon olarak, 1991'de Sony ticari olarak Li-iyon piller üretmiştir. Ancak bu pil teknolojisi ticari olmasa da 1960'larda ilk olarak Bell Labs tarafından tasarlanmıştır (Zheng ve ark., 2015, Epri, 2010, Li ve ark., 2016a). Li-iyon enerji depolama sistemi, yüksek enerji yoğunluğuna, 500 ila 2000 W/kg arasında değişen yüksek güç yoğunluğuna (Hadjipaschalis ve ark., 2009, Zheng ve ark., 2015), düşük öz boşalma ve uzun kullanım ömrüne (Lee ve ark., 2016) sahiptir. Bu avantajlarına karşın Li-iyon teknolojisinin döngü ömrü sıcaklıktan etkilenmekte ve derin deşarj gibi durumlarda ani düşüşler göstermektedir (Zhou ve ark., 2013). Bu teknoloji kısa süreli enerji gereksinimleri için daha uygundur çünkü kendi kendine deşarj oranları %1-%5 civarında olmaktadır (Zaghib ve ark., 2011). Pozitif elektrot türlerine göre Li-iyon piller, lityum-kobalt-oksit (LiCoO_2), lityum-manganez oksit (LiMn_2O_4), lityum-demir-fosfat (LiFePO_4), lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit (LiNiMnCoO_2), lityum-nikel-kobalt-alüminyum-oksit (LiNiCoAlO_2) ve lityum-titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) pil teknolojileri olarak sınıflandırılmaktadır (Lee ve ark., 2016, Chau ve ark., 1999).

LiCoO_2 enerji depolama sistemi, tasarlanan ilk pil teknolojisi idi. Kobalt-oksidin diğer sistemlerden daha maliyetli bir tasarım olması göz önünde bulundurulduğunda, daha uygun maliyetli olan nikel ve manganez-oksit pil teknolojileri piyasada ticari olarak öne çıkmıştır (Kim ve ark., 2015). LiFePO_4 pil teknolojisi, yüksek deşarj akımı ve en yüksek güç yoğunluğuna sahip pil teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, diğer tüm Li-iyon enerji depolama sistemleri arasında en düşük maliyete sahiptir (Tie ve Tan, 2013, Lee ve ark., 2016). LiFePO_4 pil teknolojisi, termal ve kimyasal tepkimelerde (Tie ve Tan, 2013) kararlıdır ve EA'lar da yaygın olarak uygulanmaktadır. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ pil teknolojisi ise, diğer lityum enerji depolama sistemlerine kıyasla daha hızlı şarj olma kabiliyetleri sebebiyle günümüzde EA uygulamalarında kullanılmaktadır (Tie ve Tan, 2013). Li-iyon enerji depolama sistemi, katot olarak lityum metal oksit (LiMeO_2 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiNiMnCoO_2 , LiNiCoAlO_2 ve $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), elektrolit olarak organik karbonatlarda çözünmüş lityum tuzları, anot olarak lityum alaşımlı grafit karbon ve bir ayırıcıdan meydana gelmektedir (Linden, 2002, Khaligh ve Li, 2010, Zhang ve ark., 2014, Cotterman, 2013, Yu ve ark., 2015, Kim ve ark., 2015). Li-iyon enerji depolama sistemlerindeki genel elektrokimyasal tepkimeler, Denklem 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.25., şarj/deşarj esnasındaki Li-iyon pil teknolojisi kimyasal tepkimelerini ve yapısını göstermektedir (Linden, 2002, Yu ve ark., 2015, Zhang ve ark., 2014, Duvall ve Alexander, 2005). Pil hücresi tekrar şarj edildiğinde, Li^+ katottan anot elektrolitine hareket etmekte ve elektronlar (e^-) ile birleşerek lityum atomunu oluşturmaktadır. Bu lityum atomları ise karbon katmanları arasında biriktirilmektedir. Deşarj esnasında ise benzer işlemler tersinir olarak devam etmektedir (Vazquez ve ark., 2010, Chen ve ark., 2009, Khaligh ve Li, 2010, Zhang ve ark., 2014, Kim ve ark., 2015). Günümüzde, gelecek nesil EA uygulamalarında kullanmak amacıyla Li-iyon pil teknolojileri üzerine çalışmalar devam etmektedir (Khaligh ve Li, 2010, Akhil ve ark., 2013, Lee ve ark., 2016, Nazri ve Pistoia, 2008). Bu bağlamda, EA'ların güç ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla EA enerji depolama sistemleri uygulamalarına elverişli, yüksek enerjili Li-iyon pil teknolojileri tasarlanmaktadır (Duvall ve Alexander, 2005).



Şekil 2.25. Lityum iyon enerji depolama sisteminin kimyasal tepkimelerini ve yapısını a) Şarj/deşarj esnası b) Silindirik bir Li-iyon prototip tasarımının görünümü (Hannan ve ark., 2017, Linden, 2002, Zhang ve ark., 2014, Duvall ve Alexander, 2005, Yu ve ark., 2015).

EA'lara ait ESS'lerde kullanılmak amacıyla tasarlanan bütün elektrokimyasal İB teknolojileri; spesifik enerji, enerji yoğunluğu, spesifik güç, enerji verimliliği, takvim ömrü, döngü ömrü, çalışma sıcaklığı, enerji başına birim maliyeti gibi temel esaslar ve eksiklikler yönünden (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Linden, 2002, Yin ve ark., 2013, Ren ve ark., 2015, Rashid, 2011, Zakeri ve Syri, 2015, Li ve ark., 2016a) değerlendirilmiştir. Lityum enerji depolama sistemleri üstün özellikleri sayesinde güzümüzde ve gelecekteki EA'lara enerji sağlamak amacıyla çekici olan Li-iyon pil teknolojisi olarak tercih edilmektedir (Ren ve ark., 2015, Hadjipaschalis ve ark., 2009, Li ve ark., 2015c). Düşük maliyetli lityum pil malzemelerinin ve pil yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından yüksek önem arz etmektedir (Zeng ve ark., 2015, Sun ve ark., 2016b, Hoque ve ark., 2016). Elbette Li-iyon pillerin yanında gelişmiş KA, Ni-Cd, Ni-MH, Ni-H₂, Zn-hava, Na-S ve Na-NiCl₂ pillerde, bazı etkin ve çekici özellikleri sayesinde EA enerji depolama sistemi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde Li-iyon piller malzeme bilimindeki büyük gelişmeler sonucunda yüksek enerji yoğunluklarına (75-200 Wh/Kg), uzun döngü ömrüne (10 000) ve diğer pillerle verimlilik açısından karşılaştırıldığında neredeyse %100'e yakın verimliliğe sahiptir. Bu avantajlarına karşın bu teknoloji, her ne kadar küçük ölçekli pil piyasasının %50'sine sahip olsa da büyük ölçekli bir tasarım paketleme ve aşırı şarj koruma devrelerinin maliyetli olması (>600\$/kWh) sebebiyle dezavantajlıdır. Ayrıca kullanım ömürleri deşarj derinliği ile bağlantılı olması sebebiyle yedekleme sistemlerinde kullanılması çok mümkün değildir (Beck ve Rüetschi, 2000). Elektrot ve elektrolit malzemeleri üzerine birçok araştırma yapılmış ve nano seviyedeki silikon bazlı lityum pillerin mevcut pilin on katı kadar elektrik enerjisi üretebildiği tespit edilmiştir (Chen ve ark., 2009). Birçok firma bu teknolojinin maliyetlerini düşürmek adına çalışmalarını sürdürmektedir. 2030'lu yıllarda, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek verimlilik ve gelişen teknolojiyle birlikte maliyetlerdeki düşüş potansiyeline sahip bu pil teknolojisinin piyasanın mutlak hâkimi olabileceğini göstermektedir. Örneğin; Amerika Birleşik Devletleri'nde, Enerji Bakanlığı tarafından şebekeye bağlı mikro türbinlerin güç kalitesi sağlamak amacıyla kullanılmak üzere iki adet 100 W/1-dk lityum iyon pil enerji depolama sistemi tasarlanması ve inşası için

SAFT ve SatCon Güç Sistemleri şirketleri tarafından bir projeye teşvikte bulunulmuştur (Chen ve ark., 2009).

2.1.1.2.3. Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin analizi

Çoğu elektrokimyasal enerji depolama sistemi elektrotlar, elektrolit ve ayırıcılar veya membranlar gibi bir dizi ortak bileşen içermektedir. Bu teknolojiye geliştirme çalışmaları genellikle malzeme temelli olmuştur. Elektrotlar üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde daha aktif olmayan elektrotlara doğru bir geçiş gözlemlenmiştir. Bu çalışmalara bağlı olarak, artan enerji ve güç yoğunlukları elde edilmiştir. Mevcut elektrotların ince film, köpük, fiber ve polimer modifikasyonları performanstan elde edilirken dayanıklılığı da artırmayı hedeflemiştir. Hemen hemen her elektrokimyasal pil türü, daha fazla iyileştirme için nano malzemelerin kullanımını veya sinterlemeyi öngörmüştür. Farklı pil kimyalarının hibridizasyonlarıyla dezavantajlar azaltılırken, çoklu kimyasal yapının olumlu yönlerini birleştirmeye amaçlamışlardır. Elektrolitteki gelişmeler kararlılığı sağlamak ve iletkenliği artırmak amacıyla tasarlanmış, katkı maddeleri veya ikamelerinden meydana gelmiştir. Elektrolit jel uygulaması, sirkülasyon ve gaz tahliye teknikleri, sızıntıya dayanıklı, daha yüksek performanslı ve daha güvenli pil teknolojileri için bir yol haritası olarak görülmüştür. Ayırıcı ve membran tasarımındaki gelişmeler, aktif hücre materyali kaybı olmadan iyon değişiminin gerçekleşmesine olanak sağlamayı amaçlamıştır. Ayırıcıların ve membranların dayanıklılığı bazı pil kimyalarında önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle malzemelerde elektrotlarda uygulanan işlemlere benzer eklemeler ve polimerizasyonlar denenmiştir. Mikro-elektronik entegrasyon çalışmaları denenmiş ve şarj rejimlerinin modifikasyonlarının birçok elektrokimyasal depolama çözümünün ömrünü büyük ölçüde uzattığı gösterilmiştir.

Enerji depolama sistemleri arasında elektrokimyasal depolama teknikleri, üzerine en çok araştırma yapılan ve en gelişmiş alan olmaya devam etmektedir. Çoğu geleneksel elektrokimyasal pil enerji depolama sistemi, her açıdan mükemmel performansa sahip ve belirli küçük ölçekli uygulamalar için büyük avantajlar sağlamaktadır. Ancak büyük ölçekli depolama sistemleri için halen ciddi eksiklikler mevcuttur. Genel olarak

bakacak olursak; Zn-Ag piller mükemmel enerji ve güç yoğunluklarına sahiptir ancak kısa ömürleri ve çok yüksek maliyetleri vardır. Bu nedenle yalnızca çok küçük ölçekli uygulamalar için uygundur. Zn-Mn sistemleri de nispeten kısa ömre sahiptir ancak maliyet açısından daha uygundur. Ayrıca, yüksek güç sağlamaya çalışırken bu maliyetler yükselecek ve bu nedenle uygulama ölçeği konusunda sınırlıdır. Orta ölçekli uygulamalar için Pb-Asit piller daha uygundur. Bu Pb-Asit piller ucuz ve yüksek güç dağıtımına uygun kapasiteye sahiptir. Ancak bu sisteminde önemli çevresel etkileri vardır ve enerji performansı Zn-Ag ve Zn-Mn kimyalarının çok altında kalmaktadır. Pb-Asit ile benzer bir ölçekte, Li-iyon kimyaları sadece mükemmel enerji ve güç performansı değil, aynı zamanda mükemmel döngü ömrü de sağlamaktadır. Bu avantajlarına karşın Li-iyon piller ne yazık ki maliyetli olup, güvenlik ve şarj sorunları bulunmaktadır. Lityum kaynaklarının sınırlılığı da büyük ölçekli bir sistem için uygulanabilirliğini sınırlayan kısıtlardandır. Tüm bu dezavantajlarına rağmen Li-iyon piller yine de Ni-MH ve Ni-Cd sistemlerinin yerini almıştır. Ni-Fe sistemlerinde kaynak bolluğu, düşük maliyet ve çok uzun ömürler onları potansiyel olarak daha büyük ölçekli bir depolama çözümü olarak öne çıkarmıştır. Ne yazık ki bu sistemler de düşük performans ve yüksek öz boşalım oranlarından muzdariptir. Ni-Zn enerji depolama sistemleri ise, düşük maliyetle yüksek performans sağlar ancak bu sistemlerin önündeki engelse çevrim ömürlerinin çok kısa olmasıdır. Çoğu geleneksel pil enerji depolama sistemi, çok yüksek deşarj oranları, uygun olmayan depolama ortamları, aşırı şarj veya tam deşarj nedeniyle kalıcı olarak azalan ömür ve kapasiteler gibi sorunlardan muzdariptir.

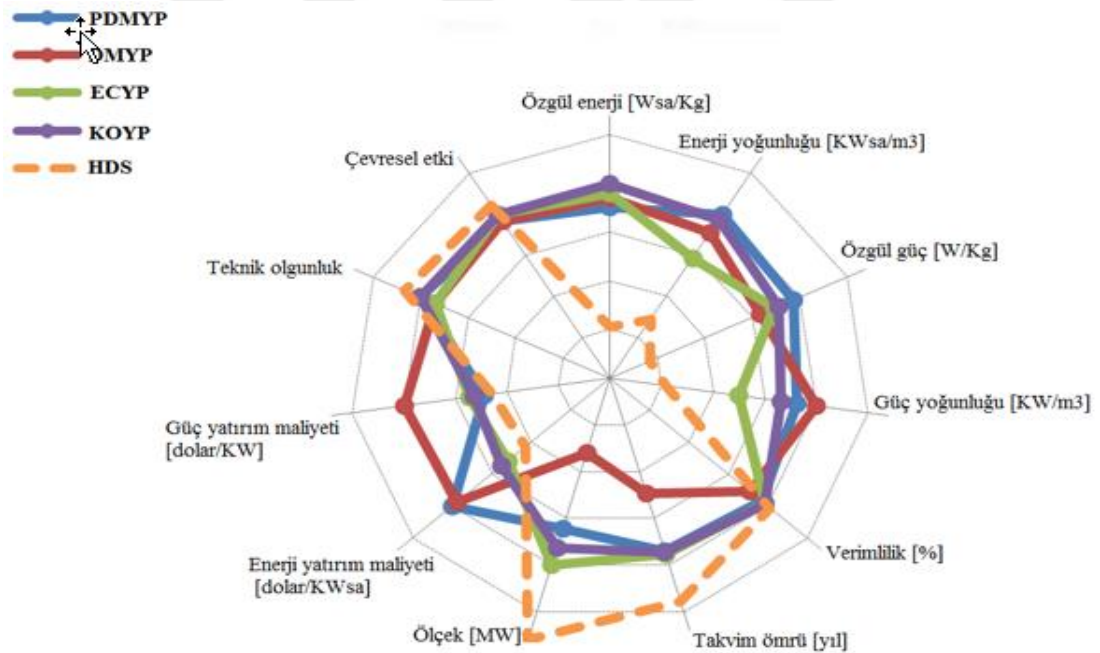
Bu açıkça görülen eksiklikler, erimiş tuz, metal-hava, YP ve AB'lerin üzerine yoğunlaşılmasına ve geliştirilmesine yol açmıştır. Hem Na-S hem de Na-Ni-Cl erimiş tuz sistemleri, çok iyi enerji ve güç performansı ve şebeke düzeyinde büyük ölçekli uygulamalar için yüksek uygunluk göstermektedir. Bu sistemler, geleneksel elektrokimyasal pil sistemleriyle maliyet rekabetine yaklaşmakta ve hem HDS hem de SHDS'den daha maliyetli olsa da önemli ölçüdeki yüksek performansları göz önüne bulundurulduğunda da değerli yatırımlar olabilecekleri düşünülmektedir. Zn-hava ve Fe-hava gibi metal-hava sistemleri, küçük ölçekli uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Ancak, son derece yüksek performansları ve düşük maliyetlerinin yanından eğer

yüksek döngü ömrü ve daha yüksek deşarj oranları elde edilebilirse, onları erimiş tuz enerji depolama sistemlerinden daha iyi bir alternatif konumuna getirebilir. Bazı metal-hava pilleri, neredeyse yanmış hidrokarbon yakıtlarinkine yaklaşan performanslar göstermiştir. Gelecek bölümde bahsedeceğimiz yakıt pilleri ise fosil yakıtlara bir alternatif olacaktır, yüksek enerji ve güç performansına sahip olup büyük ölçekli şebeke seviyesinde depolama/üretim için bazı ticari uygulamalar görülmektedir. Ne yazık ki bu sistemlerde döngü, zayıf ömürleri, yüksek maliyetleri ve potansiyel yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle metal-hava kimyaları gibi kırılgan bir zeminde kalmaktadırlar. Buna hidrojen depolama, yakıt reformu ve orta düzeyde emisyon potansiyeli gibi kısıtlarda eklenmektedir. HDS, SHDS, YP'ler ve erimiş tuz pilleri ile, AB'ler şebeke düzeyinde depolama için rakipler olabilirler. Bu pil teknolojileri yalnızca uzun bakım periyotlarına sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda nispeten yüksek güç ve enerji yoğunluklarına da sahiptir. Bununla birlikte, diğer çözümlerle rekabet edebilmeleri için maliyetlerinin daha da düşürülmeye ihtiyacı vardır. Bunu söylemek için çok erken olsa da kısa vadede gelecekte SHDS depolamaya, erimiş tuz ve AB depolamasına doğru bir geçiş muhtemel görülmektedir. Biraz daha uzun vadede ise, YP'ler de daha yaygın hale gelebilecektir. Geleneksel elektrokimyasal pillerin bu noktada büyük ölçekli depolama için güçlü rakipler olması pek olası görülmesi de ek araştırmalarla metal-hava kimyaları gelecek vaat etmektedir.

2.1.1.3. Kimyasal enerji depolama sistemleri

Kimyasal enerji depolama sistemleri tükettikleri enerjiye göre isimlendirilmektedir. Örneğin; elektrokimyasal enerji depolama elektrik enerjisi tüketirken, termokimyasal enerji depolama termal enerji tüketmektedir. Kimyasal enerji depolama sistemleri, kimyasal bileşiklere ait kimyasal tepkimeler sonucunda başka bileşiklere dönüşürken ortaya çıkan enerjiyi depolayıp veya gerektiğinde yeniden kullanım amacıyla kullanıma sunabilen tersinir bir teknolojidir (Dincer ve Rosen, 2021). Yakıt pili (YP), yakıtın kimyasal enerjisini, elektrik enerjisine dönüştüren yaygın bir kimyasal enerji depolama sistemidir (Chau ve ark., 1999, Linden, 2002, Rashid, 2011). Her ne kadar düşük güç yoğunluğu olarak benzerlik gösterecekler de YP ve pil arasındaki belirgin olan

fark, enerji kaynağı sağlama biçimleridir. Bir YP'de yakıt ve oksitleyici, elektrik üretmek amacıyla dışarıdan sağlanır (metal-hava piller hariç) ve bu parçalar depolama sistemine dâhil edilmiştir (Linden, 2002). YP'nin avantajı ise, sisteme gerekli aktif madde akışı sağlandığı sürece prosesin sürekli bir elektrik enerjisi arz edebilme kabiliyetidir. YP'ler %40–85 yakıt verimliliği sağlamakta ve hücre çıkış gerilimi 0,7 V civarındadır. (Chau ve ark., 1999, Rashid, 2011). Bunun yanında yüksek enerji yoğunluğu ile (0,6-1,2 kWh/Kg) kW'tan MW'a kadar ölçeklerde uygulanabilme, günlük %1-3 arası öz boşalım (bu oran ayda %100'lere ulaşmakta (Hadjipaschalis ve ark., 2009)) oranı, 5-15 yıl kullanım ömrü, %90 deşarj derinliğinde 20 000 döngü ömrü, sistemden bağımsız şarj/deşarj seviyeleri, depolama kapasiteleri ve çevre dostu olmaları diğer avantajlarındanır. Halen üzerinde araştırmaları devam ettiği maliyet problemi (6-2 \$/kWh) ve düşük döngü (%20-%450) verimi gibi halen aşılması gereken engeller bulunmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajların bir kısmı Şekil 2.26.'da grafiksel ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.26. Tablo 2.10.'daki normleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak YP pillerdeki kimyasal enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm yakıt pilleri enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır. (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2014).)

YP teknolojilerinin fosil yakıt tüketimini ve bu tüketime bağlı olarak CO₂ emisyonunu azaltabilecek bir enerji üretim desteği sağladığı pratik ve teorik çalışmalarla ortaya

konmuştur (Rashid, 2011, Capasso ve Veneri, 2015, Hosseinifar ve Petric, 2016). YP'ler, anot olarak sıvı ya da gaz halindeki yakıttan ve katot olarak ise oksidan yani oksijen, hava ve klordan meydana gelmektedir. Genellikle piyasada mevcut olarak bulunan hidrojen bazlı YP'ler (HYP'ler) yaygın ve tercih edilen enerji destek sistemleridir. Hidrojen doğrudan ya da depolanarak bu sistemlerde kullanılmaktadır. Burada hidrojen bir kimyasal reaksiyon sonucu elde edilmektedir. Yani, direkt olarak enerjinin bir kaynağı değil de denilebilir. Bu enerji destek sistemleri, üretim, depolama, kullanım veya dağıtım gibi yollarla toplumların yüzyıllardır süregelen elektrik enerjisi ihtiyaçlarının bir tamamlayıcısı olabilirler. Bununla ilgili hidrojen ekonomileri altında çalışmalar mevcuttur (Winter, 2009, Rosen ve Koohi-Fayegh, 2016). HYP'ler elektrik enerjisi üretmek amacıyla hidrojen ve oksijenin bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Bu kombinasyon rejeneratif olabilmektedir. Ayrıca elektrik ve su ile tersinir bir reaksiyon gerçekleştirilebilmektedir (Chau ve ark., 1999). Yakıt tedarik sistemlerine bağlı olarak, HYP'ler direkt ve dolaylı sistem YP'ler olarak ikiye ayrılabilir (Linden, 2002). Doğrudan sistem YP'ler de yakıt (örneğin hidrojen ve metanol) direkt olarak tepkimeye girerken, dolaylı sistem YP'ler de yakıt (örneğin fosil yakıtlar ve doğalgaz) asıl yakıtı yani hidrojen gazını dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, termal enerji dönüşümü, biyokütle ve biyotatıkların anaerobik sindirimi gibi diğer yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi temelli çalışmalar da bulunmaktadır (Abbasi ve Abbasi, 2011). Daha sonra dönüştürülen bu hidrojenin tepkime amacıyla hücreye akışı sağlanmaktadır (Fayaz ve ark., 2012). Otomotiv sektöründe yapılan hidrojen temelli yakıt çalışmalarında da karşılaşılan temel problemlerden birisi hidrojenin depolanmasıdır. Çünkü hidrojen diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında hacimsel olarak düşük yoğunluğa ve tüm elementlerin en hafifi olup sıvılaştırılması metan ve propan gibi gazlardan daha zordur. Tüm bu zorlukların üstesinden gelebilmek için sıkıştırılarak, kriyojenik sıvılaştırılmış hidrojen olarak veya metal hidritlerde, kompleks hidrürlerde, metaller arası bileşiklerde kimyasal depolama sistemleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır (Dalebrook ve ark., 2013, Sakintuna ve ark., 2007, Hosseini ve ark., 2012, Eberle ve ark., 2009). Tabi bu yöntemlerde ek maliyetler ve özel altyapı gereksinimleri gibi ek zorlukları da beraberinde getirmektedir. Çünkü metal hidritler gibi yüksek basınçta depolamaya olanak sağlayan

sistemlerde H₂ emilimi, salınımı ekzotermik ve endotermik olduğundan kullanılan malzeme bağlamında gerekli olan ısı yönetim sistemleri depo maliyetleri artmaktadır. Bir başka deyişle YP'lerin temel problemi, 10 000 \$/kW'lık yüksek başlangıç sermaye maliyetlerine sahip olmalarıdır (Chen ve ark., 2009). Ayrıca, bu sistemlerin güç yoğunluklarını geliştirebilmek adına ilerleyen bölümlerde ele alınacak SC'ler enerji bu enerji depolama sistemleri ile birleştirilebilirler. Yakıt pillerinde gelişmiş elektro katalitik aktivite, artırılmış dayanıklılık ve yüksek performanslı elektrot mimarileri ile desteklenen katalizörler üretmek için grafenin benzersiz özelliklerinden yararlanmaya yönelik araştırmalar, Hou ve ark. tarafından incelenmiştir (Hou ve ark., 2011).

Tablo 2.9. ve 2.10.'da verilen YP'ler yakıt ve oksitleyici kombinasyonlarına, elektrolit tipine, çalışma sıcaklığına ve uygulamalara göre farklı türlere ayrılmıştır. YP'lerin depolama sistemleri değil de daha çok üretim destek sistemleri olarak sınıflandırılmasının daha uygun olduğuna dikkat edilmelidir. Bu tipler arasında alkalın YP (AYP), fosforik asit YP (FAYP), katı polimer yakıt hücresi-proton değişim membran YP (KPYP-PDMYP), rejeneratif YP (RYP), katı oksit YP (KOYP), direkt olarak metanol YP (DMYP) ve erimiş karbonat YP (ECYP) gibi sistemler bulunmaktadır (Linden, 2002, Chau ve ark., 1999, Tie ve Tan, 2013, Ibrahim ve ark., 2008). AYP, FAYP, PDMYP ve RYP gibi kimyasal enerji depolama sistemlerin anot kısmında direkt olarak hidrojeni yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakıt pillerindeki genel kimyasal tepkimeler Denklem 2.13'de verilmiştir.



Tablo 2.9. Özelliklerine göre YP sınıflandırılması (yeniden düzenlenmiştir (Olabi ve ark., 2020).)

Yakıt pili türleri	PDMYP	AYP	FAYP	DMYP	ECYP	KOYP
Katalizör tabakası	Platinyum	Platinyum veya nikel alaşım	Platinyum	Platinyum ve rutenyum	Nikel veya nikel alaşım	Nikel veya nikel alaşım
Membran ya da elektrolit	Nafton	Alkali (KOH)	Fosforik asit	Nafyon	Erimiş karbonat	Titre edilmiş zirkonya
	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen/ Metanol	Hidrojen/ CO ₂	Hidrojen/ CO ₂
Yakıt	80°C	23-70 °C	180 °C	<60 °C	550-700 °C	700-1000 °C
Optimum Çalışma Sıcaklığı	1-Yavaş oksijen kinetiği	1- CO ₂ intoleransı.	1-Uzun başlatma süresi. 2-Malzeme	1-Çaprazlama problemi.	1-Donanım korozyonu.	1-Uzun başlatma süresi. 2-Malzeme

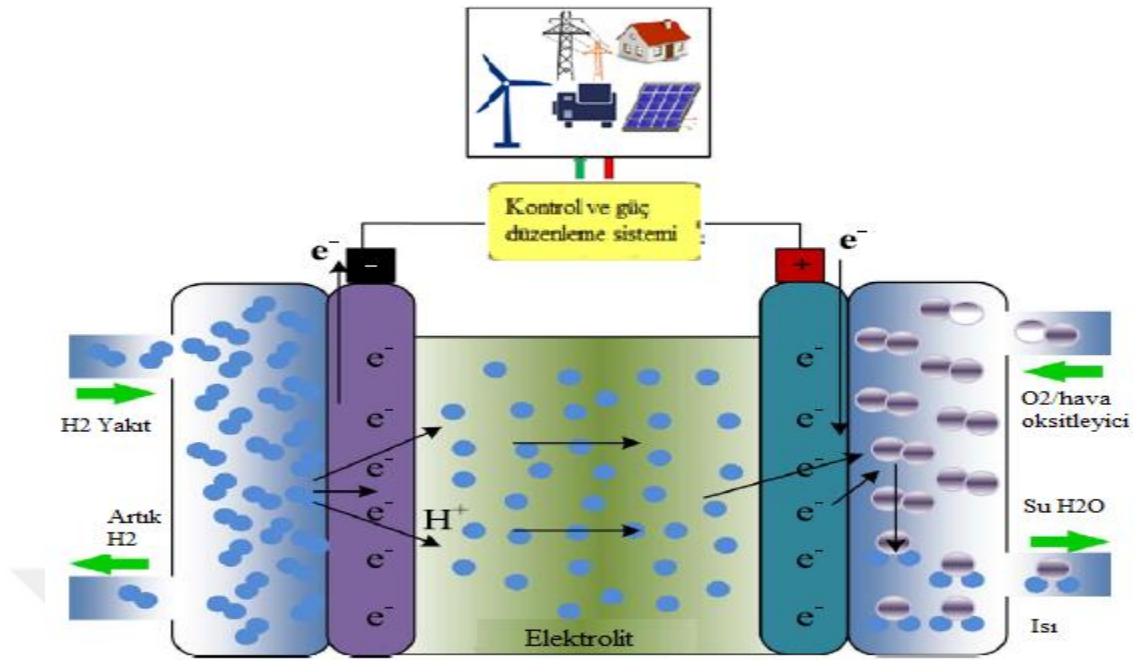
Tablo 2.9. (Devamı)

Dezavantajlar	2-Isı yönetimi 3-Su yönetimi. 4-CO zehirleme. 5-Yüksek saflıkta hidrojen gerektirir.	2-Katot tarafı çinde saf oksijen gerektirir.	seçiminde sınırlama 3-Düşük membran iyonik iletkenlik 4-Düşük güç yoğunluğu 5-Karbon monoksit toleranssız. (CO).	2-Düşük yakıt. (%6,4) konsantrasyonu kullanma 3-Pahalı 4-Katot zehirlenmesi 5-Metanol son derece yanıcı. 6-Yüksek konsantrasyonları metanol zehirlidir.	2-Düşük güç yoğunluğu. 3-Katot çözünmesi 4-Uzun başlatma süresi. 5-Malzemede Sınırlı seçim 6-İşlenmesi zor Sıvı Elektrolit.	seçiminde sınırlama. 3-İşlenmesi zor. 4-Yüksek elektrolit direnci. 5-Kullanım zorlu. Uygulamalara uygun. 6-Termal çevrimle seramik elektrolitin kırılabilirliği.
Avantajlar	1-Geniş güç aralığı. 2-Kolay ölçekleme. 3-Kısa başlama süresi. 4-Yüksek güç yoğunluğu.	1- Platin değiştirme imkânı. 2-Daha ucuz. 3-Yüksek aktivite. 4-Hızlı başlangıç süresi. 5-Daha kolay Isı yönetimi. 6-Çok küçük tahammül edebilir CO miktarı. 7-Hızlı kinetik.	1-Karbonu monoksit (CO) (%1-2) tolere edebilir 2-Az platin kullanım nedeniyle düşük. 3-Hibrit ısı ve güç yönetimine uygun. 4-Yüksek kararlılık. 5-Düşük buhar basıncı. 6-CO ₂ toleransı yüksek.	1- CO ₂ emisyonları yok. 2-Düşük başlatma süresi. 3-Yüksek enerji yoğunluğu. 4-Metanol elde etmek kolaydır. 5-CO dayanıklı 6-Metanol ucuzdur.	1-Yüksek verimlilik. 2-Yakıt çeşitliliği. 3-Gaz türbinleri ile kullanılabilir. 4-Ucuz. 5-Yüksek aktivite. 6-İç reformu destekler.	1-İç reformu destekler. 2-Yüksek verimlilik. 3-Ucuz. 4-Yüksek aktivite. 5-Çeşitli yakıt Seçeneği.
Elektriksel hücre Verimlilik sistemi	%50-70	%60-70	%55	%20-30	%55	%60-65
Güç aralığı	%30-50	%62	%40	%10-25	%45-55	%55-60
Uygulama alanları	1-500 kW	10-200 kW	50-1000 kW	100 mW-1 kW	1 kW-1 MW	5 kW-3 MW
	1-Yedek güç 2-Portatif güç 3-Küçük dağıtılmış şebeke 4-Ulaşım	1-Denizaltı 2-Askeri 3-Uzay araçları 4-yedek güç	Dağıtık şebeke	Elektronik cihaz	1-Elektrik şebekesi 2-Geniş dağıtık şebeke	1-Yedek güç 2-Elektrik programı 3-Geniş dağıtık şebek
Maliyet (\$ /kW)	50-100 Ticari/Geliştiriliyor.	- Ticari/Geliştiriliyor.	4-45 Ticari/Geliştiriliyor.	125 Ticari/Geliştiriliyor.	- Ticari/Geliştiriliyor.	- Ticari/Geliştiriliyor.

Tablo 2.10. On iki farklı metriğe dayalı YP enerji destek sistemlerinin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		PDMYP Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	DMYP Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	ECYP Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	KOYP Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[Wh/Kg]	100,00–450,00 135/246,6/200/13	140,30–960,00 308,4/400/300/9	369,00–607,00 168,3/488/488/2	410,00–1,520,0 513/773/582/4
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	112,20–770,00 211,7/380,2/360/8	29,90–274,00 90,08/135/118/6	25,00–40,00 10,6/32,5/32,5/2	172,00–462,09 160,5/277/198/3
Özgül güç	[W/Kg]	4,00–150,00 63,7/56,1/18,2/5	2,10–20,00 5,53/11,1/10,0/9	12,00–36,70 11,1/22,4/20,4/4	10,00–63,34 24,9/27,3/12,8/6
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	4,20–35,00 15,48/18,7/16,9/3	1,00–300,00 103,6/44,1/6,9/8	1,05–1,67 0,44/1,36/1,36/2	4,20–19,25 8,61/9,31/4,47/3
Verimlilik	[%]	22,00–85,00 15,21/46,36/40/25	10,00–40,00 10,3/23,3/20,0/6	45,00–80,00 10,4/55,4/52,5/10	50,00–65,00 4,76/58,6/60,0/7
Takvim ömrü	[yıl]	0,22–10,00 4,04/4,07/2,79/10	0,01–0,56 0,22/0,24/0,22/5	1,40–10,00 3,14/4,90/4,50/5	0,28–10,00 5,09/4,26/2,50/3
Ölçek	[MW]	0,00–50,00 17,58/6,49/0,18/8	0,00–1,00 0,37/0,16/0,001/7	0,01–100,00 48,6/39,2/2,0/7	0,00–100,00 40,7/17,0/0,10/6
Enerji yatırım maliyeti	[\$/kWh]	70,00–13,000,00 6,096/4,08/1,625/4	3,067,0–3,190,0 3,190/3,129/3,129/2	146,00–175,00 20,5/160,5/160,5/2	180,00–333,00 88,1/231,3/181/3
Güç yatırım maliyeti	[\$/kW]	0,00–10,200,00 3,051/1,950/64/27	15,000–125,000 45K/71K/73K/4	3,500,0–4,200,0 495/3,850/3,850/2	481,00–8,000,0 3,263/3,130/1,170/5
Uygulama alanı		Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi	Çok küçük ölçekli enerji yönetimi	Orta ölçekli enerji yönetimi	Orta ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Kanıtlanmış/Geliştiriliyor	Kanıtlanmış/Geliştiriliyor	Kanıtlanmış/Geliştiriliyor	Kanıtlanmış/Ticarileştirilmiş
Çevresel etki		Düşük	Düşük	Orta/düşük	Orta/düşük

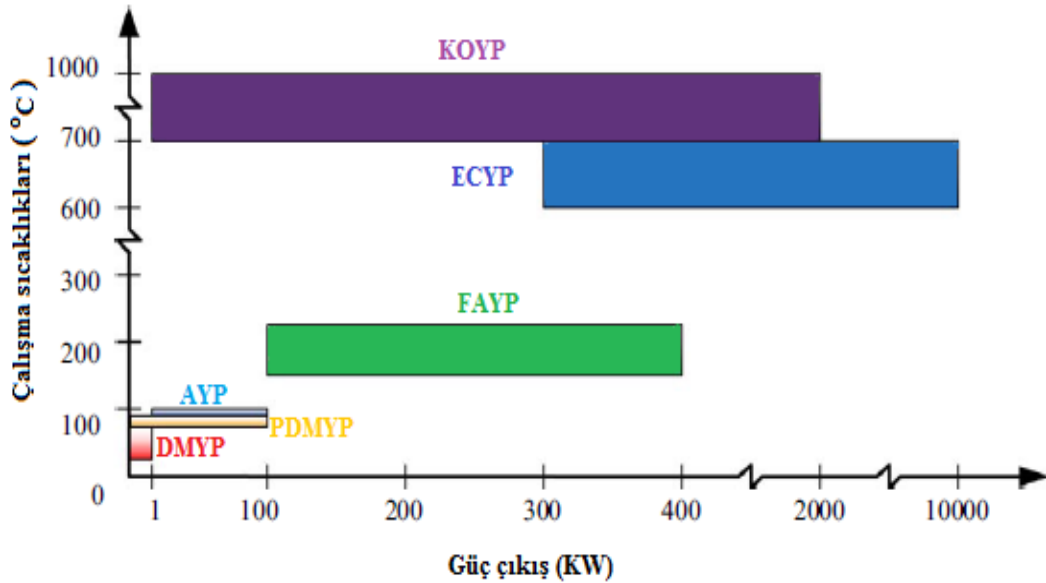
Şekil 2.27., temel bir HYP hücresinin kimyasal yapısını ve tepkimelerini göstermektedir (Chau ve ark., 1999, Ibrahim ve ark., 2008, Rashid, 2011). Yakıt olarak sisteme akışı sağlanan hidrojen, yakıt elektrotunun katalitik yüzeyinde hidrojen ve elektronlara ayrışmaktadır. Hidrojen iyonları elektrolitten oksijen elektrotunun diğer katalitik yüzeyine geçer. Aynı anda elektronlar, yüke güç sağlamak amacıyla harici döngü boyunca hareketine devam etmektedir. Diğer tarafta elektrotların üzerinde hidrojen iyonları, oksijen ve elektronların birleştirilmesiyle su ortaya çıkmaktadır (Linden, 2002). Rejeneratif kapalı döngü bir YP sisteminde, bir güç elektrolizörü suyu hücreye yeniden verebilmek amacıyla hidrojen ve oksijene ayırmaktadır. Elektrik enerjisi ihtiyacı olduğu sürece tersinir bu proses sürekli olarak tekrar etmektedir (Linden, 2002).



Şekil 2.27. Yakıt pili enerji depolama sisteminin kimyasal tepkimeleri ve yapısı (yeniden düzenlenmiştir (Chau ve ark., 1999, Ibrahim ve ark., 2008, Rashid, 2011, Hannan ve ark., 2017).)

Şekil 2.28., farklı YP'lerin farklı çıkış güç seviyelerinde teknolojilerini göstermektedir (Tie ve Tan, 2013, Bromaghim ve ark., 2010). AYP, PDMYP ve DMYP normal sıcaklıkta çalışmakta ve düşük/orta düzeyde güç depolama uygulamalarında tercih edilmektedir. FAYP, orta sıcaklıkta YP olarak kullanılmaktadır. Bu YP'ler, yüksek işletme verimliliği, kolay tasarımı, sağlamlığı ve düşük emisyonu nedeniyle ulaşım sistemleri uygulamalarında tercih edilmektedir (Tie ve Tan, 2013, Bromaghim ve ark., 2010). ECYP ve KOYP, 600–1000 °C (Tie ve Tan, 2013, Linden, 2002, Bromaghim ve ark., 2010) aralığında yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır. Bu iki YP, büyük ölçekli güç depolama enerji yönetiminde destek sistemleri olarak kullanılmaktadır. ECYP teknolojisi daha maliyetli olup yüksek sıcaklığa gereksinim duymaktadır. Bu sıcaklık ısı santralleri ile hibrit olarak kullanılabilir. Ancak bu sıcaklık gereksinimi hücrelerin çalışma sıcaklığına ulaşması noktasında zaman alması sebebiyle onları ulaşım sistemleri için uygun kılmamaktadır. Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı etkisi evde elektrik üretiminde güvenli olmadığı anlamına gelse de yüksek güç üretim verimlilikleri onları elektrik üretim türbinleri ve geniş ölçekli endüstriyel uygulamalar için çekici kılmaktadır. DMYP teknolojisi ise, verimliliğinin düşük olması, metanolün toksin ve yanıcı olması, su ihtiyacının enerji yoğunluğunu kısıtlaması ve CO_2 yaymasına rağmen yüksek enerji yoğunluklu bir YP enerji destek sistemidir (Chen ve ark., 2009). Daha

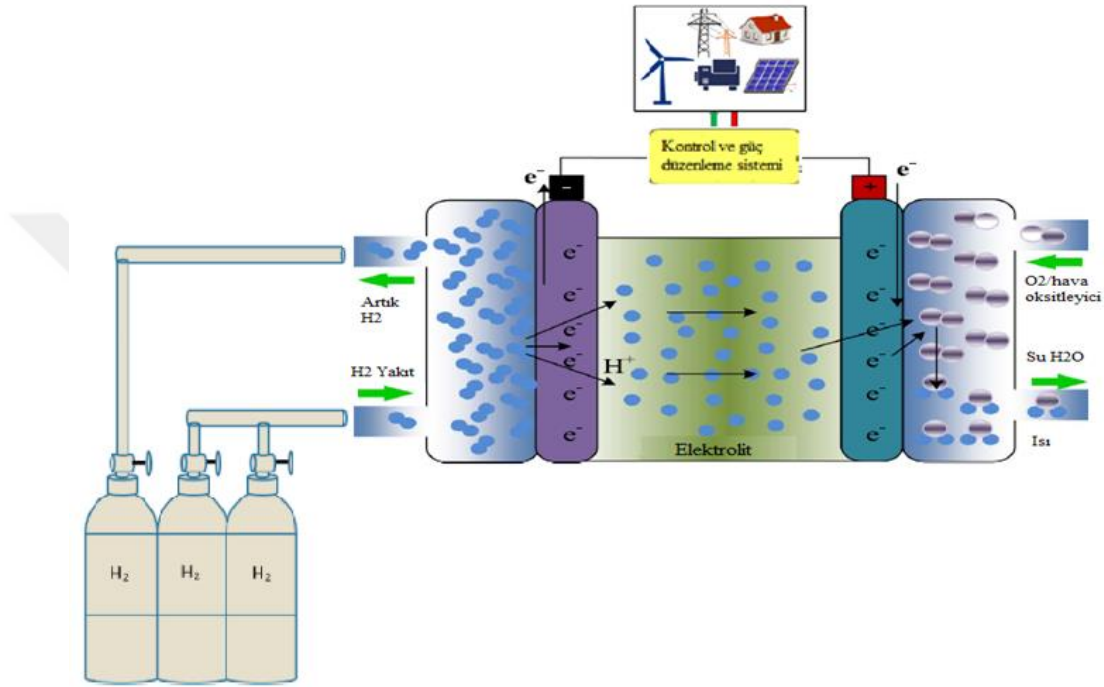
önce Samsung firması tarafından dizüstü bilgisayar bataryalarında bu teknolojinin kullanıldığı ticari bir ürünün piyasaya sürüleceği duyurulmuştur (Chen ve ark., 2009). KOYP teknolojisi ise, DMYP'den daha yüksek yakıt verimliliğine ve daha yüksek bir kararlılığa sahiptir. Ayrıca KOYP'ler şimdiye kadarki tüm YP teknolojileri arasında kükürt kirliliğine karşı en yüksek toleransı gösterebilen sistemlerdir. Bu enerji destek sistemleri, katı elektrolit nedeniyle ECYP'lerden daha kararlıdır. Fakat yüksek sıcaklık ihtiyacını karşılamak için gereken yapı malzemeleri daha maliyetlidir. Ayrıca, KOYP'ler yaklaşık %60 verimliliğe ve olgun bir sistem olması nedeniyle düşük maliyete (500 \$/kW) sahip olabilmekte ve endüstride elektrik ve ısı üretmenin yanında yüksek verimlilikleri sayesinde EA'lar da potansiyel yardımcı güç kaynağı olarak da kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2009, Milewski ve Budzianowski, 2014, M Budzianowski ve Milewski, 2011, Akikur ve ark., 2014).



Şekil 2.28. Farklı YP teknolojilerine ait çalışma sıcaklığı-güç çıkışı grafiği (yeniden düzenlenmiştir (Hannan ve ark., 2017, Tie ve Tan, 2013, Bromaghim ve ark., 2010).)

Şekil 2.29.'da görülen PDMYP teknolojisi, katı polimer membran elektrolit ve platin katalizörlü gözenekli elektrotların kullanıldığı YP'ler arasında sahip olduğu en yüksek güç yoğunluğu potansiyeli sayesinde EA uygulamaları için ilgi çekici bir seviyededir (Chau ve ark., 1999). Yine de katı polimer membran elektrolit ve platin katalizörlü elektrotların maliyetleri yüksektir. Bu sebeple bu alandaki çalışmalar, elektrotlarının

ve elektrolitinin malzeme bazlı maliyetini düşürmek üzerine odaklanmıştır. Hidrokarbon membranlar düşük maliyeti nedeniyle alternatif bir seçenek olarak görülmektedir (Chau ve ark., 1999, Lukic ve ark., 2008, Dihrab ve ark., 2009). PDMYP, ufak elektronik sistemleri şarj edebilmek amacıyla düşük voltajlı uygulamalarda da kullanılmaktadır (Linden, 2002).



Şekil 2.29. PDMYP enerji destekleme sistemi şeması (yeniden düzenlenmiştir (Nikolaidis ve Poullikkas, 2017, Olabi ve ark., 2020).)

Diğer YP tasarımları arasında metal-hava YP (MHYP) ve mikrobiyal FYP(MYP) yer almaktadır (Chen ve ark., 2009, Atwater ve Doble, 2011). MHYP teknolojisi yüksek enerji yoğunluklu YP'ler olup en düşük maliyetli sistemlerdir (Chen ve ark., 2009). MHYP'lerin tekrardan şarj olma problemlerine, %50'nin altında verimliliklerine ve sadece birkaç yüz döngü ömrüne sahip olmalarına rağmen, bu YP teknolojisi, EA ve deniz araçları için enerji depolama sistemi olarak iyi bir seçenek olduğu için geliştirilmesi amacıyla çalışmalara devam edilmektedir. MYP'ler ise, mikroorganizmaların katalitik tepkimeleri yolu ile kimyasal enerjiden elektrik enerjisi elde edilen biyolojik YP sistemleridir (Sun ve ark., 2016a). MYP'ler ya aracılı ya da aracısız olarak iki farklı kategoriye ayrılmaktadır. Aracılı MYP'de, metil mavisi ve hümik asit gibi araçlar, elektronları elektrota transfer etmek amacıyla hücre

reaksiyonunu hızlandırmaktadır (Heidrich ve ark., 2013, Sun ve ark., 2016a). Ancak, araçlar toksik ve maliyeti artırmaktadırlar. Aracısız MYP'ler de, *Shewanella putrefaciens* ve *Aeromonas hydrophila* gibi elektrokimyasal olarak aktif bakteriler elektronların transferine yardımcı olmaktadır (Heidrich ve ark., 2013, Sun ve ark., 2016a). MYP'lerde toprak bazlı ya da fototrofik biyofilm anot ve nano gözenekli membran kullanılmaktadır (Xu ve ark., 2015a, Heidrich ve ark., 2013, Sun ve ark., 2016a). Bu tür MYP'ler atık su arıtımı ve pirinç ve domates gibi bitki üretim alanlarında direkt olarak elektrik üretimi amacıyla uygulanabilmektedir (Xu ve ark., 2015a). MYP'lerin temel olarak kullanım alanları; kablosuz sensör ağları, atık su arıtma, hidrojen üretimi, biyosensörler, tıbbi uygulamalar ve eğitim kitleri gibi düşük güç gerektiren uygulamalardır (Xu ve ark., 2015a, Heidrich ve ark., 2013, Sun ve ark., 2016a).

Günümüze kadar tamamlanmış, şebeke uygulaması olarak Audi E-GAS'e ait 6 MW ve Mainz, Almanya'daki Enerji park firmasına ait 6 MW hidrojen yakıt pili enerji destek sistemleridir (Olivier ve ark., 2014). Bağımsız bir rüzgâr enerjisi sisteminin dünyadaki ilk denemesi hidrojen depolama ve yakıt pilleri ile entegre olarak Norveç'te denenmiştir. Rüzgâr enerjisi elektrolizörü çalıştırarak hidrojen gazı üretilmiştir. Hidrojen ise yakıt pilinde kullanılmak üzere depolanmıştır (Nakken ve ark., 2006). Başka bir biyogaz yakıt pili 2012 yılında Kaliforniya'da kurulan tesis olup 2,8 MW kapasiteye sahiptir. Başka bir depoda monte rejeneratif YP, Amerika Naval Hava Gücü tarafından test edilmiştir. Merkezi Silahlar Bölümü, 2013 yılında güneş enerjisi kullanarak hidrojen üretmek için bir hibrit yakıt pili sistemi tasarlamışlardır. ADLE163 (İsviçre), BOR4STORE tarafından yürütülmektedir. (Almanya), IdealHy (Hollanda), Sapphire (Norveç) ve SmartCat (Fransa) vb. uygulamalar mevcut ve devam eden hidrojen enerji destek sistemlerinden bazılarıdır (Luo ve ark., 2015).

2.1.1.3.1. Kimyasal enerji depolama sistemlerinin analizi

Çoğu kimyasal enerji depolama tasarımının bir dizi ortak bileşeni bulunmaktadır. Örneğin: elektrotlar, elektrolit ve ayırıcılar ya da membranlar başlıca bileşenlerdir. Araştırma ve geliştirmeler büyük ölçüde bileşenlerinin tasarlandığı malzemelere

odaklanmıştır. Yapılan çalışmalardan da anlaşılabacağı üzere daha reaktif olan elektrotlara doğru bir eğilim gözlemlenmektedir. Bu daha reaktif varyantlar, artan enerji ve güç yoğunlukları açısından umut verici çalışmalardır. Lityum (Li-iyon piller) ve oksijen/hava bazlı kimyaların (metal-hava pilleri) tüketimi bu eğilimi yansıtmaktadır. Mevcut elektrotların ince film, köpük, fiber ve polimer modifikasyonları performansta optimizasyonu sağlarken, aynı zamanda dayanıklılığı artırmayı amaçlamıştır. Neredeyse tüm kimyasal enerji depolama sistemleri, daha çok pozitif gelişim sağlanması amacıyla nano malzemelerin kullanımını ya da sinterleme üzerine odaklanmıştır. Farklı pil kimyalarının hibridizasyonları dezavantajları azaltırken çoklu kimyaların olumlu yönlerini birleştirmeye hedeflemiştir. Elektrolitteki yaşanan son gelişmeler, kararlılığı ve iletkenliği daha verimli hale getirebilmek amacıyla geliştirilmiş katkı maddeleri ya da ikamelerinden oluşmaktadır. Elektrolit jelleme ile sirkülasyon ve gaz tahliye teknikleri, sızıntıya dayanıklı, daha yüksek performanslı ve daha güvenli piller elde etmek amacıyla yeni bir yaklaşım sağlamaktadır. Ayırıcı ve membran tasarımındaki son gelişmeler ise, aktif hücre materyali korozyonu olmadan iletimin gerçekleşmesine olanak sağlamayı amaçlamıştır. Ayırıcıların ve membranların dayanıklılığı birtakım pil teknolojisinin kimyalarında önemli bir performans kriteri olmuş ve bu malzemelerde elektrotlardaki gelişmelere benzer eklemeler ve polimerizasyonlar gözlemlenmiştir. Mikro elektronik entegrasyonu ve şarj rejimlerinin modifikasyonlarının çoğu kimyasal depolama çözümünün ömrünü büyük ölçüde uzattığı ispatlanmıştır.

ESS'ler arasında kimyasal enerji depolama sistemleri üzerine en çok araştırma yapılan ve en gelişmiş alan olmaya devam etmektedir. Çoğu geleneksel kimyasal pil sistemi, şöyle veya böyle mükemmele yakın performansa sahiptir ve belirli ufak ölçekli uygulamalarda verimlilik göstermektedir. Bunlara karşın, üzerinde halen çalışılması gereken büyük ölçekli depolama tasarımlarında ciddi eksiklikler mevcuttur.

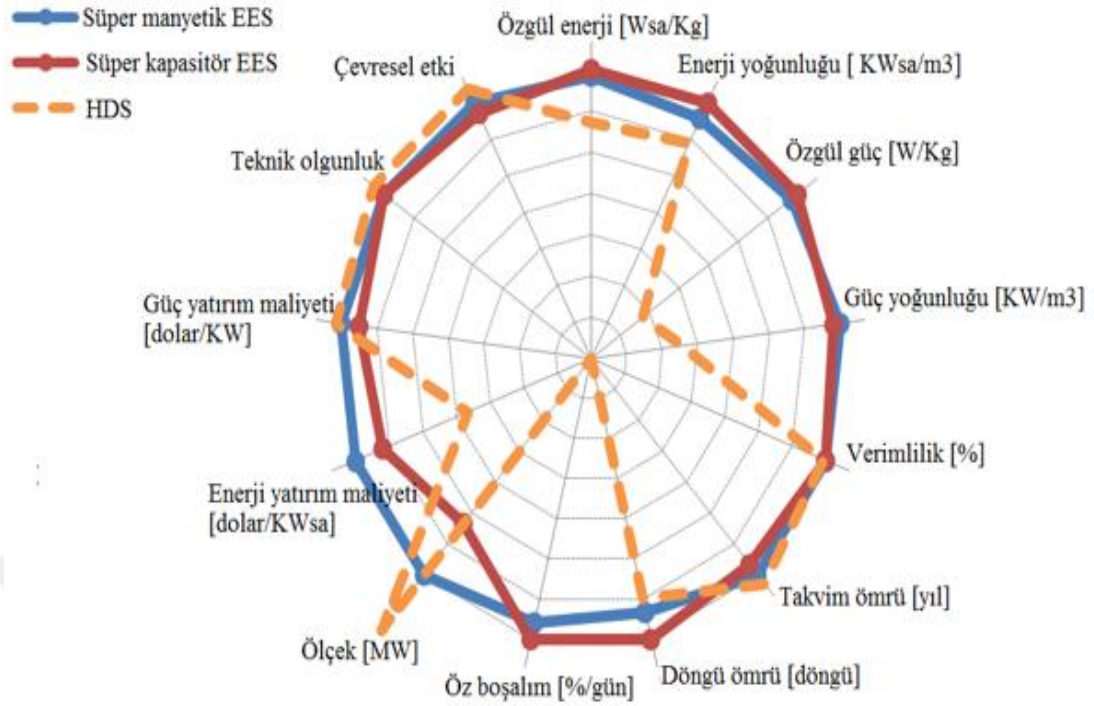
2.1.1.4. Elektrik enerji depolama sistemleri

Elektrik enerji depolama sistemleri, depolama teknolojileri nedeniyle diğer ESS'lerden farklı bir yapıya sahiptir. Genellikle bir elektrik enerji depolama sistemi, elektrik

enerjisini, yükleri veya manyetik alanı akı ile ayırarak bu enerjiyi elektrik alan formunda doğrudan elektrik enerjisi olarak depolamaktadır. Tablo 2.11. ve Şekil 2.30.'da performans özellikleri verilen SC ve SMEDS (elektromıknatıslı) teknolojileri elektrik enerji depolama sistemlerine örnek verebileceğimiz uygulamalardır. Elektrik enerji depolama sistemleri, kapasitörler ve SC'ler (Chen ve ark., 2009) olmak üzere manyetik/akım enerji depolama sistemlerini içeren elektrostatik olarak karakterize edilmiş teknolojilerdir. Kapasitörler, enerjiyi elektrik olarak depolayıp iletebilen elektrostatik kapasitörler, elektrolitik kapasitörler ve elektrokimyasal kapasitörler olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.11. On dört farklı metriğe dayalı elektrik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Süper kapasitör enerji depolama sistemi Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[Wh/Kg]	0,27–75,00 21,43/11,79/5,00/11	0,07–85,60 20,62/16,36/10,00/25
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	0,20–13,80 4,45/4,99/3,85/12	1,00–35,00 11,81/13,77/10,00/9
Özgül güç	[W/Kg]	500,00–15,000,00 6,570,77/5,600,00/2,000,00/5	5,44–100,000,00 20,154,00/8,930,44/3,500,00/24
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	300,00–4,000,00 1,719,85/1,457,50/765,00/4	15,00–4,500,00 2,000,74/921,00/30,00/5
Verimlilik	[%]	80,00–99,00 5,72/92,45/95,00/11	65,00–99,00 9,63/91,33/95,00/12
Takvim ömrü	[yıl]	20,00–30,00 5,77/25,00/25,00/4	5,00–20,00 5,35/11,43/10,00/7
Döngüsel ömür	[döngü]	10,000–100,000 40,865,63/68,000,00/90,000,00/5	10,000–1,000,000 364,649/302,308/100,000/13
Öz boşalım	[%/gün]	1,00–15,00 6,25/7,50/7,00/3	0,46–40,00 16,43/18,64/20,00/7
Ölçek	[MW]	0,01–200,00 48,55/23,56/8,00/22	0,00–5,00 1,29/0,52/0,02/23
Enerji yatırım maliyeti	[\$/kWh]	500,00–1,080,000,00 336,835/125,488/2,755/10	100,00–94,000,00 28,160/19,866/9,750/16
Güç yatırım maliyeti	[\$/kW]	196,00–10,000,00 2,412,70/981,56/325,00/16	100,00–800,00 226,46/321,00/300,00/10
Uygulama alanı		Orta/geniş ölçekli enerji yönetimi	Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Kanıtlanmış/ Ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/ Ticarileştirilmiş
Çevresel etki		Düşük	Düşük



Şekil 2.30. Tablo 2.11.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak elektrik enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm elektrik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır. (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2014).)

SC'ler veya ultra kapasitörler olarak da adlandırılan elektriksel kapasitörler, gözenekli bir elektrot yapısına sahip olmaları nedeniyle birim hacim başına en büyük kapasitansa sahiptir. Bu teknolojiye kapasitörler yüksek akımlar gerektiren sistemler için kullanılabilir. Ancak nispeten düşük kapasitans üretimleri nedeniyle yalnızca kısa süreler için kullanılabilirler (Guney ve Tepe, 2017). Çok yüksek kapasitanslı küçük paketler halinde sunuldukları takdirde istenilen kapasitelerde kullanılabilirler. Bu nedenle kapasitörlerin yerini almak için yeni teknoloji olan SC'ler, üzerine halen çalışılmalar devam etmektedir. SMEDS ise esas olarak enerji santrallerinde enerji çıktısını kararlı hale getirebilmek için veya endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır (Wagner, 2007). Bunun yanında, enerji tüketimindeki tepe taleplerine uyum sağlamak da kullanılabilirler (örneğin çelik fabrikaları veya hızlı transit demiryolları).

Elektriksel kapasitörler yüksek depolama verimliliğine (>%95) sahiptir ve enerji depolama kapasitesi kaybı olmadan yüz binlerce kez döngü kapasitesine sahiptirler.

Elektriksel kapasitörlerin uzun kullanım ömrünü doğrudan ölçmek zordur. Bu nedenle kapasitans tutma oranı, belirli sayıda döngüden sonraki kapasitansı ilk döngününkiyle ölçerek ve karşılaştırılarak dolaylı yoldan döngü ömrünü tahmin etmek için kullanılmaktadır (Zhang ve Pan, 2015). Verimlilikleri ve yaşam döngüleri çok yüksek olmasına rağmen, bu sistemler kendi kendine deşarj olmaya yatkın olup çalışma voltajları elektrolitin kimyasal reaksiyonlara girdiği potansiyeli aşmamaktadır. Dolayısıyla yüksek voltaj gerektiren uygulamalar için pillerle birlikte kullanımları daha verimli olacaktır. Birçok araştırma ve geliştirme, bu enerji depolama seçeneklerine ve bunların ticarileştirilmesine odaklanmıştır. Elektriksel kapasitör elektrotları içinde iyon ve elektron taşıma kinetiğinin arttırılması, elektrot ile elektrolitin ara yüzeyindeki yük aktarım hızının arttırılması, elektriksel kapasitörlerin depolama kapasitesinin artmasına imkân sağlayan etmenlerdir. Elektriksel kapasitör enerji depolama sistemlerindeki güncel çalışmalar, enerji ve güç yoğunluklarını iyileştirmek için nano ölçekli araştırmaların yapılması noktasındadır. Kötz ve Carlen (Kötz ve Carlen, 2000) elektriksel kapasitörlerin temel ilkelerini, performans ölçütlerini, özelliklerini, günümüzdeki ve gelecekteki uygulamalarını araştırmışlardır. Ayrıca Lu ve ark. (Lu ve ark., 2013), enerji depolama mekanizmaları ve SC prototiplerindeki son gelişmeleri, kapasitif performans açısından elektrot malzemeleri için nano ölçekli araştırmaların etkinliklerini ve tasarımlardaki önemli gelişmeleri ele almışlardır.

Ayrıca elektriksel yeni nesil kapasitörler, depolama mekanizması ve kullanılan elektrot malzemelerine göre elektriksel çift katmanlı kapasitörler, pseudo (kapasitörüksü) kapasitörler ve iki tipin bir kombinasyonu olmak üzere üç farklı grupta sınıflandırılabilir. Elektriksel çift katmanlı kapasitörlerde elektrot malzemesi, elektrolit tarafına seri olarak bağlanan, devre açıldıktan sonra yüklü kalan iki kapasitör gibi davranan ve elektrolit içindeki solvatlı iyonları hızla çeken bir sistemdir. Çift katmanlı yük depolama bir yüzey işlemi olduğundan, elektrotun elektriksel olarak aktif yüzey alanı hücre kapasitansını büyük ölçüde etkilemektedir. Elektrot için karbon, metal oksitler, iletken polimerler, hibrit ve iletken polimerler gibi materyaller kullanılmaktadır. Sharma ve Bhatti (Sharma ve Bhatti, 2010) tarafından çeşitli yönleri, tarihsel arka planı, sınıflandırılması, yapısı, modellemesi, deneysel

çalışmaları ve voltaj dengelemesini içeren elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör teknolojisi incelenmiştir. Çift katmanlı kapasitörlerin hücre serilerindeki üretim toleranslarının, sistemdeki sıcaklık gradyanının ve hücre yaşlanmasının, sıklıkla gözlenen bir durum olduğu ve eşit olmayan kapasitanstan etkilendiği öne sürülmektedir. Hücreler arasındaki voltajı dengelemek için voltaj regüle devreleri kullanılmalıdır. Mikro-süper kapasitörlerin mimarisini tasarlamak için çeşitli stratejiler Qi ve ark. tarafından araştırılmıştır (Qi ve ark., 2017). Pseudo (kapasitörüksü) kapasitörler, metal oksitlerin geçiş yaptığı elektrot yüzeyinde veya yakınında Faradik yük transfer işlemine dayalı olarak çalışmaktadırlar. Genellikle elektriksel iletken polimerler elektrokimyasal olarak aktif malzemeler yerine kullanılır.

Piller ve SC'ler çeşitli enerji depolama uygulamaları için karşılaştırılmaktadır. Piller, SC'lere göre birim kütle başına 30 kata kadar daha fazla enerji depolayabilmektedir. Bununla birlikte SC'ler, yalnızca bir elektrot malzemesi üzerinde yüklü türlerin yüzey adsorpsiyon reaksiyonları ile enerji depoladıklarından, aynı kütleye sahip bir pilin gücünün binlerce katına kadar güç sağlayabilmektedir. Elektrokimyasal kapasitörler pillerden daha fazla döngüsel ömre sahip olabilmektedirler. Pillerdeki redoks reaksiyonları genellikle pillerdeki enerji depolama döngülerini sınırlayan hacim değişikliklerine sebebiyet vermektedir. Piller ve SC'ler, Miller ve Simon (Miller ve Simon, 2008) tarafından daha detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Lukatskaya ve ark. (Lukatskaya ve ark., 2016) hem elektrolit hem de elektrot malzemelerinin çok elektronlu kimyalarının kullanılmasının depolanan enerji miktarını artırabileceğini öne sürmektedirler. Elektrik enerjisi depolaması amacıyla metal iyon pillerin ve elektrokimyasal kapasitörlerin avantajlı yönlerini birleştiren hibrit teknolojilerden, gelecekteki talepleri karşılayabilecek bir performans beklenmektedir.

2.1.1.4.1. Süper kapasitör enerji depolama sistemleri

Bir SC teknolojisi, piller ve geleneksel kapasitörler arasında bir yapıya sahip ve enerjiyi elektrostatik alanda depolayan bir teknolojidir. Temelde yapı ve fonksiyon açısından tam olarak normal bir kapasitöre benzemektedir. Elektrikli cihazlarda

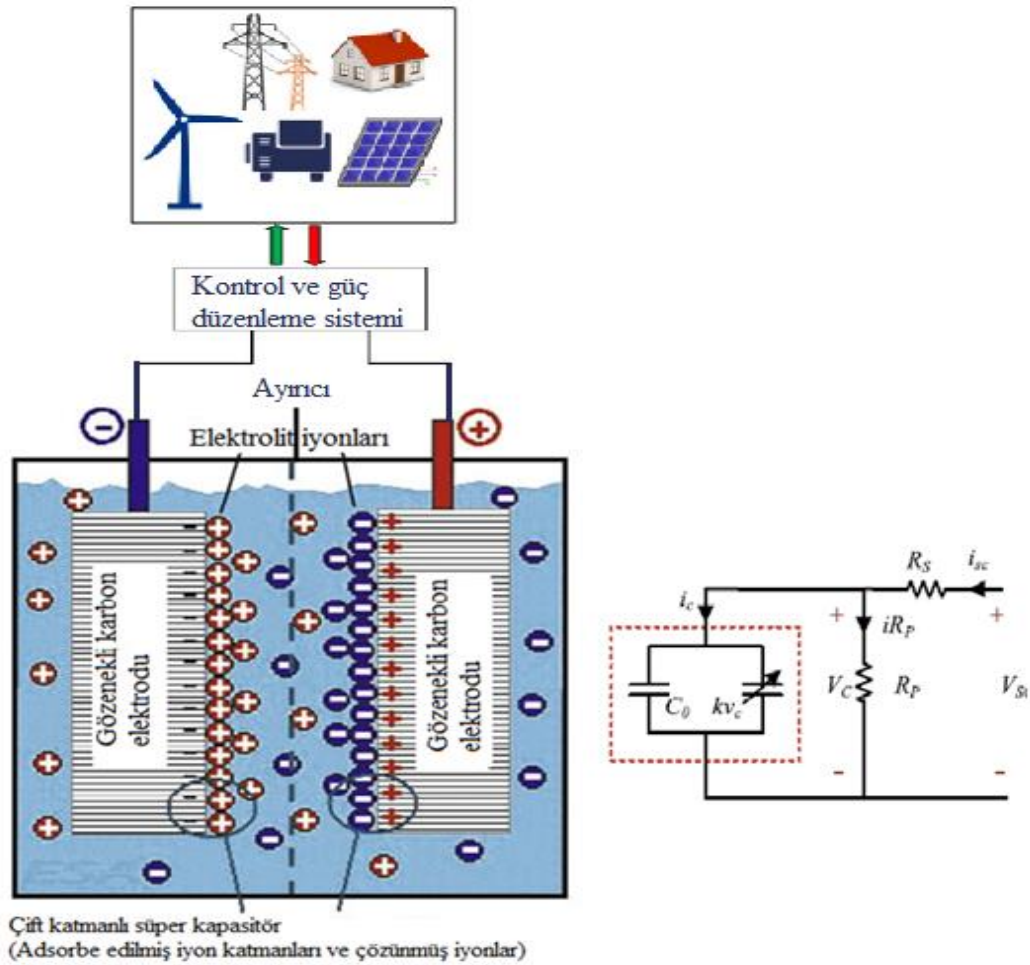
sıklıkla kullanılan kapasitörlerin kapasitans değeri 10^{-6} (mikro) veya 10^{-9} (nano) farad (F) şeklindedir. Ancak, bazen (10^3) kilo (F) seviyelerinde kapasitör ihtiyacı olduğunda SC'ler yüksek kapasitans değerleri ile ön plana çıkmaktadır. Fakat bir SC'i, diğer kapasitörlerden ayıran asıl büyük avantaj kilo faradlar (kapasitörlerden 10-100 kat daha fazla) (Tie ve Tan, 2013, Vazquez ve ark., 2010) seviyelerinde yüksek bir enerji kapasitesine farklı elektronik tasarımlar uygulamalar sayesinde sahip olabilmeleridir. Aktif karbonların yüzey alanı çok fazla olduğundan, yani gram başına 2000 m²'ye kadar ulaşabilmesi ve plakalar arasındaki mesafelerin çok küçük (1 nm'den az) olması sayesinde, SC'ler kullanılarak çok büyük kapasitanslar ve depolanmış enerjiler elde etmek mümkündür. Ayrıca sahip oldukları kapasitans değeri geleneksel kapasitörlerinkinden 100-1000 kat daha fazla olabilmektedir (Nikolaidis ve Poullikkas, 2017, Maisonnave ve ark., 2018). Elektrokimyasal pil sistemlerine ile SC enerji depolama arasındaki fark, depolamanın statik şarj aracılığıyla herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadan sağlanması ve çok daha hızlı (pillerden 10 kat daha hızlı) reaksiyon verebilmeleridir (Wagner, 2007). Elektrotlar arasındaki katı dielektrik sayesinde, SC'ler iki katlı iletken arasında bir elektrolit çözeltisi aracılığıyla enerji depolamaktadır (Díaz-González ve ark., 2012). Yüksek tepe güç çıkışı sağladıkları için hasar görmeden milyonlarca kez şarj edilip deşarj olabilmektedirler. Yaklaşık olarak %95 civarında enerji verimliliğe sahip bir SC'nin özgül gücü ise, yaklaşık olarak 1000–2000 W/Kg kadardır (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Ibrahim ve ark., 2008, Semadeni, 2003, Lim ve ark., 2015, Hao ve ark., 2015, Forse ve ark., 2016).

ESS'ler arasında SC'ler, 40 sene gibi en uzun kullanım ömrüne sahip teknolojilerdir. SC sahip olduğu özelliklerin sağladığı yüksek güç depolaması sayesinde EA uygulamalarında da ön plana çıkmaktadır. Çünkü bu teknolojinin bakım gerektirmemesi, sıcaklığa karşı hassasiyetinin olmaması ve uzun kullanım süreleri en büyük avantajlarından (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Semadeni, 2003). SC'lerin hızlı şarj ve deşarj profili sayesinde, SC'ler EA'larda elektrikli frenleme esnasında ortaya çıkan enerjiyi depolayarak hızlı süratlenme gerektiğinde bu enerjiyi tekrar kullanıma sunabilmektedirler. (Semadeni, 2003, Lim ve ark., 2015, Hao ve ark., 2015, Forse ve ark., 2016, Zhou ve ark., 2013). Ayrıca, mikro şebekelerde hızlı tepki verebilen SC'lerin uygulanmak istenmesinin temel nedeni darbe yükleri olabilir.

Çünkü bu tür bir yük, mikro şebeke uygulamalarında ciddi güç ve termal bozulmalara neden olabilmektedir. Güç dengeleme sistemlerinde hızlı tepki veren SC'lerle bu sorunların üstesinden gelmek için uygun kontrol sistemi ile kullanılması üzerine çalışmaların temeli bu ihtiyaca dayanmaktadır (Amirante ve ark., 2017, Crider ve Sudhoff, 2010, Farhadi ve Mohammed, 2015). Bunlara karşın volan enerji depolama sistemlerinde olduğu gibi en büyük problem, kısa süreli arz, yüksek maliyet ve öz boşalım kaybından (günde yaklaşık %40' kadar) kaynaklanan yüksek enerji kayıplarıdır. Bu nedenle, şimdilik bu sistemin volanlara benzer olarak, geçiş ve köprüleme gibi güç kalitesi uygulamalarında ve toplu taşıma sistemlerinde enerji geri kazanımı için kullanımında değerlendirilmesinin daha uygun olacağı öngörülmüştür (Badgotra, 2017). Bu sistemlerin çıkış gerilimleri 1-3 V arasında değişmektedir. Organik elektrolit, sulu asit veya baz çözeltisinden oluşmakta ve 1 V'luk düşük nominal voltajı çıkışı elde edilmektedir. Asetonitril, organik elektrolit olarak kullanıldığında ve 3 V'a kadar nominal voltaj çıkışı elde edilebilmektedir. İstenilen yüksek gerilim ve akım seviyelerine SC hücreleri seri/paralel bağlanarak ulaşılabilir. Ancak bu uygulamada istiflemelerde bazen hücreler arasında eşit olmayan voltaj dağılımlarına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla kullanım ömrünün kısılması ve performansın azalması kaçınılmaz olmaktadır. Eşit olmayan voltaj dağılımı sorunlarının üstesinden gelmek için, pasif veya aktif voltaj eşitleme devreleri kullanılabilir. Daha küçük ölçekli uygulamalar için pasif yaklaşımlar, dirençli baypas veya zener diyot voltaj regülasyonu üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, daha düşük kayıplar nedeniyle zener yaklaşımlarına doğru bir yönelim görülmektedir. Bu pasif yaklaşımlar, yüksek görev döngülü düşük parazit kayıplı uygulamalar için aktif eşitleyici akım sistemlerinin yerini almaktadır. Bu aktif yaklaşımlar, buck-boost tarzı kontroller şeklinde olabilmektedir (Sharma ve Bhatti, 2010).

SC'ler; elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC), pseudo (kapasitörömsü) kapasitörler ve hibrit kapasitörler olmak üzere üç kategoride incelenmektedir (Tie ve Tan, 2013, Hadjipaschalis ve ark., 2009, Chau ve ark., 1999). EDLC, diğer kapasitörlerden farklı olarak daha yüksek güç yoğunluğuna 2000-5000 W/Kg sahip olsa da buna karşın 5-7 Wh/Kg gibi düşük bir özgül enerjiye, sahiptir. Ayrıca, yüksek öz boşalım ve yüksek maliyetler (300-2000 \$/kWh) diğer dezavantajlarındandır (Zhou

ve ark., 2013, Hadjipaschalis ve ark., 2009, Tie ve Tan, 2013, Khan ve ark., 2019). Bu nedenlerle SC'ler, EA uygulamalarında piller, YP'ler ya da başka ESS'lerle beraber hibrit tasarımlarla kullanılarak gerekli olan yüksek güç, yüksek enerji yoğunlukları ve genel ömrün uzatılması hibrit bir ESS ile sağlanmış olmaktadır. Şekil 2.31., tek bir SC hücrelerinin yapısını ve eşdeğer devresini göstermektedir (Chen ve ark., 2010). Genel olarak SC'ler yüksek geçirgenliğe sahip dielektrik malzemeler, gözenekli aktif karbon yüzey kenarlı elektrotlar, organik ya da sulu elektrolit ve ince bir gözenekli ayırıcıdan oluşmaktadır (Chau ve ark., 1999, Zhou ve ark., 2013, Vazquez ve ark., 2010). Organik SC'ler, sulu SC'lerden daha yüksek enerji yoğunluğuna ve çıkış voltajına sahiptir (Zhou ve ark., 2013). Organik SC'ler tipik olarak EA'lara güç sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Chau ve ark., 1999). Şekil 2.31.'de gösterildiği gibi, iyonlar SC'ler de elektrolit boyunca ve elektrotlar arasında hareket etmektedir.



Şekil 2.31. Basit bir çift katmanlı SC enerji depolama sistemi şeması ve eş devresi (yeniden düzenlenmiştir (Chen ve ark., 2009, Faisal ve ark., 2018).)

Kapasitörde depolanan enerji, kapasitans ile doğru orantılı ve elektrotlar arasındaki voltajın karesi ile orantılıdır. Elektrotun yüzey kısmı ve dielektrik malzemelerin geçirgenliği arttıkça veya elektrotlar arasındaki mesafenin azalmasıyla kapasitede artmaktadır. Elektrotlardaki bu bağlam Denklem 2.14’de verilmiştir.

$$W_c = \frac{1}{2} CxV^2 = \frac{1}{2} QxV ; \quad Q = CxV \quad \text{ve} \quad C = (\epsilon x A) / d \quad (2.14)$$

Burada W_c elektrostatik enerji, C SC’nin kapasitans değeri, V elektrotlar arasındaki voltaj, Q yük, ϵ dielektrik malzemelerin geçirgenliği, A elektrotun yüzey alanı ve son olarak d ise elektrotlar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

Kapasitansı daha detaylı olarak ele alacak olursak SC’nin kapasitansı sabit değildir. Öyle ki SC gelen mevcut talebe ve arza bağlı olarak voltajın değişimine neticesinde de değişmektedir. Bu nedenle yük konsantrasyonu da değişmektedir. Elektrolit (C_e) seviyesiyle ilgili olan yük ayırma mesafesindeki değişiklik Denklem 2.15’deki gibi elde edilebilir.

$$d_c = \frac{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 RT}}{2F^2 C_e} \quad (2.15)$$

Şekil 2.31., iki paralel kapasitörden oluşan eşdeğer SC modelini temsi etmektedir. Burada sabit kapasitans C_0 ve voltaja bağlı kapasitans $k.v_c$ dir. Yani SC’nin toplam kapasitansı Denklem 2.16’da verildiği üzere C_r olarak gösterilmektedir.

$$C_r = C_0 + k.v_c \quad (2.16)$$

SC’ler, aynı malzemelerden elektrotlara sahip olup olmama durumlarına göre simetrik ya da asimetrik konfigürasyonlu olarak tasarlanabilmektedirler. Kurşun karbon kapasitörler, asimetrik SC’nin en iyi örneklerindendir (Sun ve ark., 2015b). Karbon nanotüp SC teknolojisi, 100 kW/Kg yüksek güç yoğunluğuna ve 60 Wh/Kg enerji yoğunluğuna sahip yüksek güç kapasitesine sahiptir (Hadjipaschalis ve ark., 2009). Nano yapıli malzemeler kullanılarak SC’lerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar halen

devam etmektedir. (Zakeri ve Syri, 2015, Liu ve ark., 2014). Pseudo (kapasitörümü) kapasitörler ve hibrit kapasitörler, daha yüksek güç ve enerji yoğunlukları nedeniyle enerji depolama uygulamalarında yüksek performanslar sergilemektedirler (Hadjipaschalis ve ark., 2009). Son zamanlarda, diğer SC'lerden daha yüksek çıkış voltajına ve enerji yoğunluğuna sahip olan Li-iyon kapasitörler geliştirilmiştir (Ren ve ark., 2015, Smith ve ark., 2013, Zhang ve ark., 2015). Li-iyon teknolojisi, SC'ler gibi yaklaşık olarak aynı yüksek güç yoğunluklarına sahiptirler. 80 Wh/Kg'lık Li-iyon piller EA uygulamalarında kullanılmak amacıyla piyasada ticari olarak hâlihazır da bulunmaktadır (Smith ve ark., 2013, Ren ve ark., 2015).

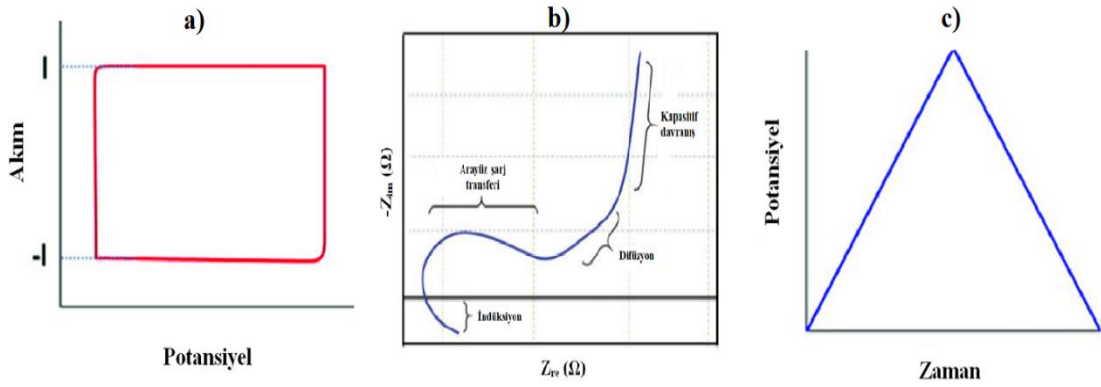
Süperkapasitörlerin elektrokimyasal performanslarını değerlendirecek olursak; CV, EIS ve GCD olmak üzere 3 farklı şekilde gruplandırılabilir.

Döngüsel voltametri, belirli bir tarama hızında elektrota uygulanan gerilime karşın akımın ölçüldüğü kapasitans ölçme yöntemidir. CV eğrisinden spesifik kapasitans Denklem 2.17 kullanılarak elde edilebilir:

$$C_{sp} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{i(V)dV}{(V_2-V_1)v_m} \quad (2.17)$$

Burada C_{sp} , Spesifik kapasitansı (F/g), i akımı (A), V , voltajı (V), V_2-V_1 , potansiyel farkı (V), v , tarama hızını ve m , elektrotun aktif malzeme kütlesini (g) ifade etmektedir (Azman ve ark., 2018).

Şekil 2.32a.'da ideal bir süper kapasitörün sabit akım altında ideale yakın olarak dikdörtgen şeklinde CV eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.32. Süper kapasitöre air elektrokimyasal performans eğrileri a) İdeal bir süperkapasitör CV eğrisi b) Şematik EIS eğrisi çizimi ((Bolat Maden, 2020)'ten uyarlanmıştır.) ((Azman ve ark., 2018)'ten uyarlanmıştır.) c) İdeal bir süperkapasitör GCD eğrisi ((Azman ve ark., 2018)'ten uyarlanmıştır.)

Süper kapasitör tasarımında kullanılan elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemi düşük genlikli sinyale karşı süper kapasitörün frekans tepkisini ölçerek uygulanan bir yöntemdir. Nyquist eğrisinin düşük frekans bölgesindeki yarı dairesel kısım elektrot ve elektrolit arasındaki yük taşınım direncini göstermektedir. Yüksek frekans bölgesindeki dik eğri ise kapasitif davranışı olarak değerlendirilebilir (Şekil 2.32b.) (Bolat Maden, 2020).

Galvanostatik şarj/deşarj metodu ise süper kapasitörün enerji alışveriş özelliklerini değerlendirmekte kullanılan bir yöntemdir. GCD eğrileri kullanılarak elektrotların gravimetrik kapasitansı, Denklem 2.18 ile hesaplanabilir:

$$C = \frac{2i\Delta t}{m\Delta V} \quad (2.18)$$

Burada C spesifik kapasitansı (F/g), i akım yoğunluğunu (mA/cm²), Δtdeşarj süresini (s), ΔVdeşarj işlemi sırasındaki potansiyel farkı (V) ve m elektrotun aktif malzeme kütlesini (mg) ifade etmektedir.

Şekil 2.32c.'de ideal bir süper kapasitöre ait simetrik ikizkenar üçgen şeklinde olan GCD grafiği görülmektedir. İkizkenar olması süper kapasitörün şarj/deşarj sürelerinin eşit olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca GCD eğrisinin ne kadar geniş bir üçgen

şeklinde ise bu o elektrotun kapasitif özelliğinin o kadar iyi olduğu ve elektrolitin yüzeye iyi ulaştığını göstermektedir (Gürten İnal ve Aktaş, 2016, Bolat Maden, 2020).

Yapılan bir çalışmada normal ve beklenmeyen koşullar altında şebekeye bağlı ve ada tipi çalışma modlarında mikro şebekenin verimli bir şekilde çalışabilmesi için SC enerji depolama sistemi uygulaması incelenmiştir (Habib ve ark., 2017). Diğer bir çalışmada ise %55,5 sistem verimliliğinin sağlandığı demiryolu işletmesinde başka bir SC enerji depolama sistemi uygulaması ele alınmıştır (Zhang ve ark., 2016a). Daha öncede değinilen tasarımındaki zorlukların üstesinden gelmek için devam eden çalışmalar malzeme maliyetini düşürmek üzerine karbon, grafen veya kâğıt gibi malzemelerden oluşan uygun maliyetli çok katmanlı SC'lere odaklanmaktadır (Dubal ve ark., 2015, Luo ve ark., 2015). Florida Üniversitesinde yapılan bir çalışmada grafen temelli geliştirilen SC hücresinde yaklaşık olarak 50 Wh/Kg değere, yani en yakın lityum pilden 20 kat daha fazla enerji yoğunluğuna ulaşılmıştır (Krishan ve Suhag, 2019). Çok sayıda SC geliştiricisi arasında SAFT (Fransa), NESS (Kore), ESMA (Rusya), PowerCache (Maxwell, ABD), ELIT (Rusya), PowerSystem Co. (Japonya) ve Chubu Electric Power (Japonya) gibi küresel piyasada bu konuda öncü şirketler bulunmaktadır (Chen ve ark., 2009) .

2.1.1.4.2. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri

Süper iletkenler daha önce düşük sürtünmeli rulmanlar için volan depolama sistemlerinde, gelişmiş üretim performansı için senkron jeneratörlerde ve plazma muhafazasına yardımcı olmak için füzyon güç sistemlerinde olmak üzere bir dizi depolama/üretim uygulamasında kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014). SMDS, elektrik enerjisini manyetik alan içerisinde direkt elektrik akımı olarak depolayan tek teknolojidir (Cheung ve ark., 2003). İlk olarak 1911 yılında helyumu likit olarak kullanan ilk bilim adamı olan Kamerlingh Onnes tarafından keşfedilmiştir (Kamerlingh Onnes, 1913). Aradan geçen 75 yıldan sonra, 1986'da Bednorz ve Muller, kritik sıcaklığı $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan lantandan oluşan bir süper iletken malzeme geliştirmişlerdir (Bardeen ve ark., 1957). Daha sonraki yıllarda ise, itriyumun süper iletkenlik için kritik sıcaklık değerinin lantana göre $-181,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ kritik sıcaklık değeri

58 °C daha düşürdüğü tespit edilmiştir (Wu ve ark., 1987). Süper iletkenler, kritik geçiş sıcaklığının daha altında bir sıcaklığa kadar soğutulduklarında neredeyse elektrik akışına karşı direnci sıfır olan malzemeler haline gelmektedir (Bardeen ve ark., 1957). Bu gelişmeler, araştırmacıları bu alana kaymaya yönlendirmiş ve sonraki yıllarda birçok süper iletken malzeme geliştirilmiştir. Çünkü süper iletkenlerdeki kayıpları azaltırsak, enerji depolamada daha verimli hale gelmektedirler. Son araştırmalarda H₂S, -70,15 C'de 150 GPa'ya ulaşan çok yüksek basınçta süper iletkenlik göstermiştir (Drozdov ve ark., 2015). Başlangıçta, NbTi alaşımı -268 °C sıcaklıkta çalıştırıldığında 5T alana sahip olup 2000 A/mm² akım taşıma kapasitesine ulaşmaktadır. Süper iletken olmayan metallerin öz direnci Denklem 19 ve 20'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\rho = \rho_0 + \alpha T \quad \text{için} \quad T > 0K ; \quad (2.19)$$

$$\text{At} T = 0K \quad \rightarrow \quad \rho = \rho_0 \quad (2.20)$$

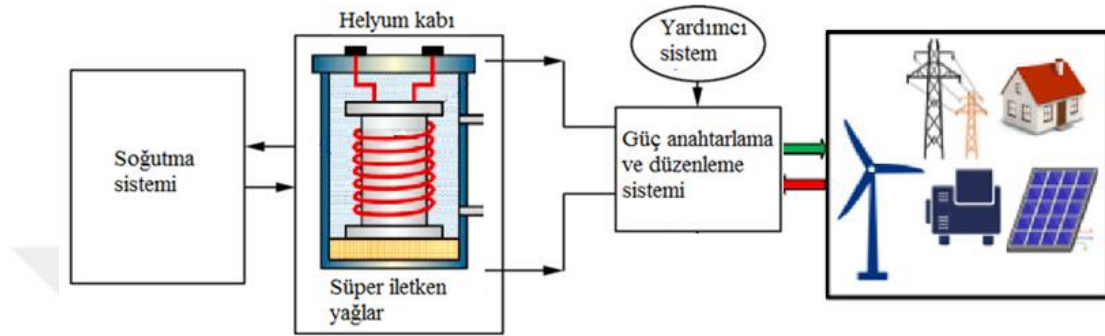
Normal metaller için, T = 0 K'daki öz dirençleri ρ_0 olmakta ve $\rho(T)$, T = 0 K'dan lineer olarak sapmaktadır. Süper iletken malzemeler için öz direnç kritik sıcaklıktan sonra başlamaktadır. Bu sıcaklığın altında malzeme sıfır öz direnç göstermektedir. Süper iletken malzemenin öz direnci Denklem 21 ve 22'de verilmiştir;

$$\rho = \rho_0 + \alpha T \quad \text{için} \quad T > T_c K ; \quad (2.21)$$

$$\text{At} T = T_c \quad \rightarrow \quad \rho = 0 \quad (2.22)$$

Elektrik enerjisini, süper iletken bir malzemedan yapılmış indüktörden (bobin) doğrudan geçen bir elektrik akımı olarak depolamakta ve böylece akım neredeyse sıfır kayıpla süresiz olarak dolaşabilmektedir. Bu sistemler, yaklaşık %97'lik yüksek bir enerji depolama verimliliğine, tam enerji deşarj kabiliyetine, 100 000 döngülük uzun bir döngü ömrüne ve milisaniyeler mertebesinde hızlı bir reaksiyon süresine sahiptir . Bu avantajlarına karşın, maliyeti EDLC'den daha düşüğe olsa, yaygın bir süper iletken manyetik enerji depolama sisteminin 205-340 \$/kW olan başlangıç maliyeti ve çevresel olumsuz etkileri en büyük dezavantajlarıdır (Chen ve ark., 2009, Zakeri ve Syri, 2015). Bu sistemin güç çıkışı aralığı, 1-10 MW saniyeler mertebesinde ve 10-

100 MW dakikalar mertebesinde reaksiyon süreleri olarak değişmekte ve yapılan Ar-Ge çalışmaları, bu teknolojinin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Basit bir SMEDS Şekil 2.33.'de gösterildiği gibi süper iletken birim, kriyostat sistemi (kriyojenik bir soğutma kabini ve vakum yalıtımlı bir kap) ve bir güç dönüştürme sistemi olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır (Chen ve ark., 2009, Yu ve ark., 2015).



Şekil 2.33. Basit bir süper iletken manyetik enerji depolama sistemi şeması (yeniden düzenlenmiştir (Chen ve ark., 2009).)

Enerji, sıvı helyum (veya süper sıvı helyum) sıcaklığında yani 2–4 K (Chen ve ark., 2009, Semadeni, 2003, Pan ve ark., 2016, Li ve ark., 2016c) niyobyum-titanyum alaşımlarından imal edilmiş süper iletken bir elektromanyetik bobinde depolanmaktadır. Ancak, bu sistemler düşük sıcaklık seviyesini korumak amacıyla bir soğutma sistemine ve DC/AC beslemesi için de bir güç dönüştürücüye gereksinim duymaktadır (İbrahim ve ark., 2008, Hannan ve ark., 2017, Cotterman, 2013).

SMEDS'ler Tip 1 ve Tip 2 olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tip 1 ayı zamanda yumuşak süper iletkenler olarak da adlandırılan süper iletkenler saf metallerdir. 0 K'da Rodyum (Rh) ile 7.193 K'da Kurşun (Pb) arasında değişen kritik sıcaklıklara sahip bu formunda 27 saf metal bulunmaktadır. Tip 2 teknolojisi ise 70 K'da çalışan yüksek sıcaklıklı ve yaklaşık 7 K'da çalışan düşük sıcaklıklı olmak üzere iki tip SMEDS bulunmaktadır. Düşük sıcaklık teknolojisi, Niobium titanyum (NbTi) gibi metalik tip bir seridir. Sistemi soğutmak için sıvı helyum kullanılmaktadır. NbTi, 10 K'da (-263 °C) süper iletkenlik göstermektedir. Ancak bu düşük sıcaklığın elde edilmesi zordur. Bu teknoloji bazı alaşımların üretimi kolay olsa da sıvı helyumun maliyeti çok yüksektir (Lee ve Luiz, 2011). Bu tür süper iletkenler daha çok manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sisteminde kullanılmaktadır (Schenck, 1996). Yüksek sıcaklık

teknolojisi ise, temel olarak bizmut (Bi), kalsiyum (Ca), stronsiyum (Sr), bakır (Cu), oksijen (O) ve benzeri oksitler gibi ametal tipi malzemelerdir. Sıvı halde azot kullanılarak soğutulmaktadır. Bu malzemeler, 90K (-183°C) civarında düşük sıcaklık teknolojisinden çok daha yüksek bir sıcaklıkta süper iletkenlik göstermektedir. 2000 yılında Alaska'da 1800 MJ depolanmış enerji kapasitesine sahip bir SMEDS kurulmuştur (Kral ve ark., 1998). Bu teknolojiye ait mıknatıs, maksimum çalışma akımı ve bobin alanı sırasıyla 10 800 A ve 6,1 T'dir. Kriyojenik sistem ise, $-268,7^{\circ}\text{C}$ 'de çalışan sıvı helyum bazlı bir sistemden oluşmaktadır. Bu teknolojinin, pratik ve teorik olarak pillere kıyasla çok düşük spesifik enerjiye sahip olduğu bilinmektedir. Buna karşın özgül güçleri ise pillere göre çok daha yüksektir.

Düşük sıcaklıkta çalışan sistem diğer sisteme göre daha olgun bir teknolojidir. Yüksek sıcaklıklı sistemde depolanan enerji oransal olarak 100 kat artarken soğutmadan kaynaklı maliyet 20 kat artmaktadır. Dolayısıyla bu iki farklı sistem karşılaştırıldığında %60-70 arasında maliyet kazancı sağlanmaktadır. Bu yöntem, birkaç milisaniye ile sınırlı olan şarj/deşarj olaylarına hızlı bir şekilde yanıt verebilmektedir. Ayrıca bu sistem yüksek enerji yoğunluğuna (4 kW/L) ve yüksek verimliliğe (%95-98) sahiptir. Yaklaşık 30 yıllık uzun bir kullanım ömrüne de sahiptir. Süper iletkenler malzemeler yüksek sıcaklıkta ise sıvı nitrojen gibi daha ucuz bir soğutucu ile kullanılmaktadır. Böylece, iletken malzemelerin daha yüksek depolama kapasitesine ulaşabilmesi amacıyla düşük ve yüksek sıcaklıklar arasında hibrit bir depolama sistemide tasarlanabilir (Pan ve ark., 2016, Li ve ark., 2016c). Genel olarak bu teknoloji, UPS'lerde, güç kalitesi uygulamalarında ve şebeke sistemlerinde kullanılmaktadır (Hannan ve ark., 2017). Fakat bu sistemin kurulum maliyetinin halen yüksek (10000 \$/kWh) (Luo ve ark., 2015, Chen ve ark., 2009) olmasına rağmen aktif ve reaktif güç alışverişinde sunduğu esnek özelliklerinin sağladığı kabul edilebilir avantajları sayesinde mikro şebeke uygulamaları için popüler bir uygulama haline gelmiştir (Pan ve ark., 2016). Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi pil sistemleri ile hibrit olarak EA uygulamalarında denenmiştir. Bu teknoloji ile depolanan enerji, Denklem 2.23'de belirtildiği gibi direkt olarak bobinin öz indüktansına ve akan akımın karesine bağlıdır (Chen ve ark., 2009).

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2 ; \quad (2.23)$$

burada W_L endüktif bobinde depolanan enerji, L öz indüktans ve I bobinden geçen akımdır.

Bu teknolojinin ilk tasarımı 1969'da Fransa'da Ferrier tarafından ortaya konulmuştur. 1971 yılında Amerika Wisconsin Üniversitesi tarafından ise denemeler başlatılmış ve burada ilk SMEDS'nin yapımına öncülük edilmiştir. Daha sonra bu sistemlerin gelişimi hızla ilerlemiştir. Şu anda dünya genelinde (Hitachi, 1986, ISTEK, 1998, Wisconsin Public Service Corporation, 2000, ACCEL Instruments GmbH, 2005, vb.) 100 MW'ın üstünde bir kurulu güç bulunmaktadır.

2.1.1.4.3. Elektrik enerji depolama sistemlerinin analizi

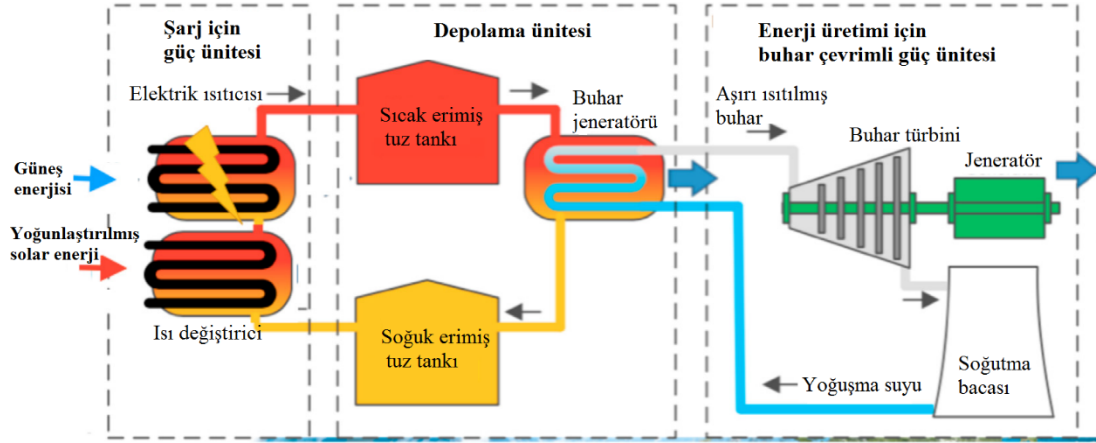
Hem SMEDS hem de SC enerji depolama teknolojisi çözümleri, güç kalitesi uygulamalarında yakın gelecek için çok umut verici sonuçlar vermektedir. Aşılması gereken en büyük problem olarak bu teknoloji çözümlerinin ikisi de malesef düşük enerji performansına sahiptirler. Nano tüplerin ve nano parçacıkların geliştirilmesi, çift katmanlı SC enerji depolama sistemlerinin enerji performansında önemli artış sağlamaktadır. Hem SMEDS hem de SC enerji depolama sistemi, volan enerji depolama sistemleriyle çalışma prensibi bakımından aynı kapsama girmektedir. Öyle ki volan enerji depolama sistemleri halen elektrik enerji depolama sistemlerinden daha iyi bir enerji performansı sunmaya devam etmektedir.

2.1.1.5. Termal enerji depolama sistemleri

TEDS, bir depolama ortamında “sıcak” veya “soğuk” olarak depolama anlamına gelmektedir. TED'ler tipik olarak bir depolama ortamı, ortama ısı enjeksiyonu ve ortama/ortamdan ekstraksiyon için ekipmanlardan oluşmaktadır. Depolama ortamı, doğal olarak oluşan bir yapı (ör., mağara) olabileceği gibi çevreden ısı kaybını veya kazanımını engelleyen bir yapay depo (su depoları) kullanılarak da gerçekleştirilebilir. İzole edilmiş bir depoda ısı formundaki TEDS'ler, sonradan elektrik üretim

tesislerinde veya farklı ısıtma amaçları için kullanılmak üzere güneş veya elektrikli ısıtma sistemlerinden enerji depolamaktadır (Vazquez ve ark., 2010, Storage, 2011). Şekil 2.34.'de gösterilen TEDS'de enerji girdisi, elektrikli ısıtma veya soğutma/kriyojenik prosedürlerle sağlanabilmektedir. Bu nedenle ısı çevrimi verimliliği yüksek olsa da (%70–90) bu teknolojinin genel gidiş-dönüş verimliliği düşüktür (%30–60). Yine de çevre dostu bir teknoloji olması sayesinde yenilenebilir/ticari binalar için belirli avantajlar sağlayabilir.

Şekil 2.34.'de gösterildiği gibi, her biri bir türbin ve bir kompresöre sahip iki turbo makineden oluşan bu sistemde üstte ve altta borularla birbirine bağlı bir yüksek sıcaklık ve bir düşük sıcaklık kabı bulunmaktadır. Turbo makinelere, şarj sırasında motor,deşarj sırasında jeneratör görevi gören bir elektrikli makine de bağlanmıştır. Tüm sistem, havadan daha hızlı soğuma ve ısınma yeteneğine sahip olan monatomik gazla (argon) doldurulmaktadır (Vickers, 2017). Gaz, şarj döngüsü sırasında saat yönünde ve boşaltma döngüsü sırasında saat yönünün tersine akmaktadır. Literatürü incelediğimizde, TEDS'lerin kurulu gücü yaklaşık olarak 3,3 GW'dir. Bu kapasitenin yaklaşık olarak 2,5 GW'lık kısmı erimiş tuz termal enerji depolama sistemidir. Bu kapasite 2017 için belirtilen toplam dünya enerji depolamasının yaklaşık %1,9'una denk gelmektedir (Energy, 2017). TEDS'ler üzerine yapılan araştırmalar, bu teknolojinin kullanımının 2017 ile 2022 arasında %11 oranında artmasının beklendiğini göstermiştir (Market, 2019). Termal depolama ve ısı geri kazanımının kullanılması, doğal gaz santralleri için santral verimliliklerinin %60'a varan oranlarda artmasına olanak sağlamaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin ortaya çıkışı, bu alanda gelişmeyi daha da teşvik etmiştir. Çoğu güneş enerjisi santrali ABD ve İspanya'da bulunmakta ve tipik olarak parabolik oluklar, çanak, fresnel veya heliostat sistemler gibi tasarımları içermektedirler (Muthukumar, 2011). Kalkınmayı hızlandıracak uygun politikalarla, 2030 yılına kadar Avrupa'nın ısıtma ihtiyacının %50'sinin termal sistemlerden karşılanabileceği yönünde öneriler bulunmaktadır (Kerskes ve ark., 2012). Yüksek sıcaklık TEDS'ler, gizli ısı depolama, duyulur ısı depolama ve termokimyasal sorpsiyon depolama sistemleri gibi çeşitli yollarla gerçekleştirilmektedir (Storage, 2011, Anisur ve ark., 2015, Bhagat ve Saha, 2016).



Şekil 2.34. Genel bir TEDS şeması (yeniden düzenlenmiştir (Olabi ve ark., 2020).)

Gizli ısı depolama sistemleri, depolama ortamının faz değişimi sırasında ısı değişimine olanak sağlamak amacıyla depolama ortamı olarak organik (örneğin parafin), inorganik (örneğin tuz hidratlar) ve faz değiştiren malzemeleri (PCM) kullanmaktadır (Storage, 2011). Bazı PCM ısı depolama sistemlerinin ısı transfer özellikleri detaylı olarak Tablo 2.12.' de verilmiştir.

Tablo 2.12. Gizli termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan PCM'lerin ısı transfer özelliklerinin karşılaştırılması (yenden düzenlenmiştir (Khan ve ark., 2019).)

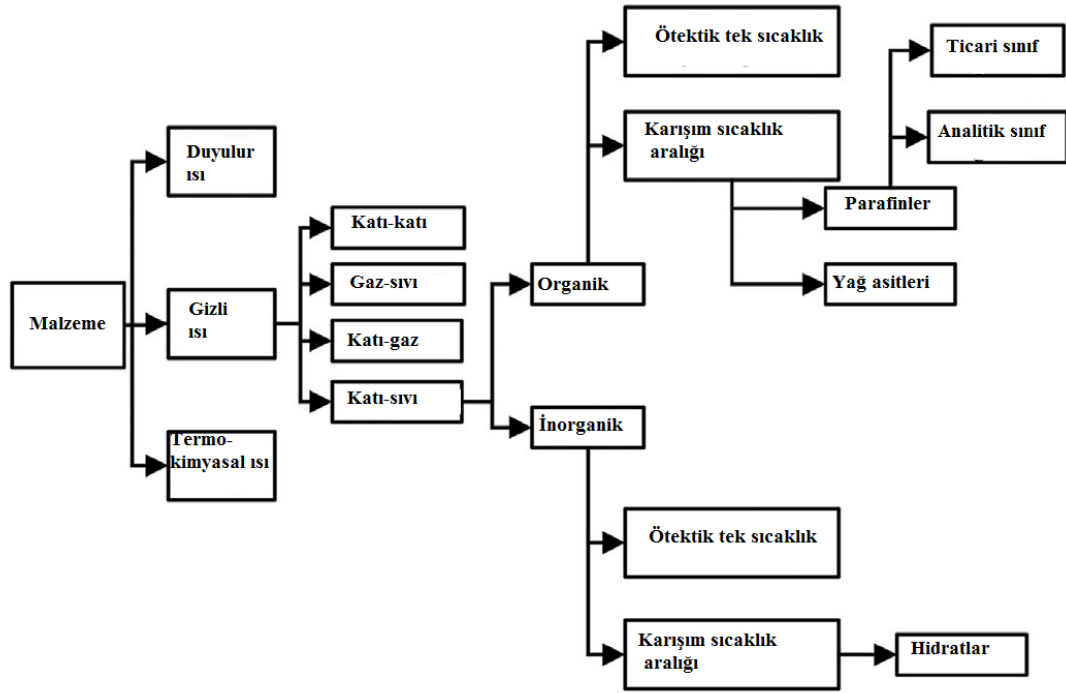
Materyal isimleri	Kimyasal bileşim	Tür	Erime Sıcak.(°C)	Füzyon Isısı (KJ/Kg)	Yoğunluk (Kg/m ³)
Sodyum sülfat	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Hidrat tuzu	23,4	251	1534
Sodyum klorür-sodyum sülfat	NaCl.Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Hidrat tuzu			
Laurik asit	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	Yağ asidi	44,2	211,6	1007
Sodyum tiyosülfat	Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	Hidrat tuzu	48	209	1666
Kalsiyum klorür	CaCl ₂ .6H ₂ O	Hidrat tuzu	29-39	177	1634
Sodyum karbonat	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	Karbonat tuzu	34	247	1442
Sodyum silikat	Na ₂ SiO ₃ .5H ₂ O	İnorganik	72,20	267	1450
Disodyum fosfat	Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	Hidrat tuzu	36	265	1552
Parafin 14-karbonlar	C ₁₂ H ₂₆	Organik	5,5	228	
Parafin 34-karbonlar	C ₃₄ H ₇₀	Organik	75,9	269	

Erime tuz, konsantre güneş enerjisi santralleri için kullanılan katı-sıvı faz değişiminin en son PCM'sidir (Storage, 2011, Tokoro ve ark., 2015). Tablo 2.13.'te verilen depolama ortamı olarak kullanılan tipik PCM'ler arasında parafin mumları, esterler, yağ asitleri, tuz hidratları, ötektik tuzlar ve su bulunmaktadır.

Tablo 2.13. Katı-sıvı faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması karşılaştırılması (yeniden düzenlenmiştir (Sharma ve ark., 2009, Nazir ve ark., 2019, Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020, Elias ve Stathopoulos, 2019, Faraj ve ark., 2020, Demirbas, 2006)).

Faz değişim malzeme türleri	Çalışma sıcaklık (°C)	Bileşen grupları	Örnek uygulamalar	Avantaj ve dezavantajları
Organik	4-150	Parafin bileşikler Parafin olmayan bileşikler	Parafin mumları Yağ asidi esterleri Alkoller Glikoller	Daha geniş sıcaklık aralığında kullanılabilir olması. Gerekli füzyon ısısı yüksektir. Aşırı soğutmanın olmaması. Kimyasal olarak kararlı. Kolayca geri dönüştürülebilir. Termal olarak daha düşük iletkenlik. Büyük hacim değişikliği ve yanıcı.
İnorganik	8-900	Tuz Tuz hidratları Metaller		Gerekli füzyon ısısı yüksek. Daha yüksek termal iletkenlik. Düşük hacim değişikliği. Ucuz. Süper soğutma. Korozyona duyarlı.
Ötektik	12-600	Organik-organik İnorganik-inorganik İnorganik-organik		Net bir erime karakteristiği. Yüksek termal depolama yoğunluğu. Termo-fiziksel özelliklerin fiziksel verilerinin mevcut olmaması.

Gizli ısı depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunluğuna (duyulur ısı depolama sistemlerinin yaklaşık olarak iki katı) ve sabit sıcaklıkta verimli ısı transfer kabiliyetine sahiptir (Storage, 2011, Anisur ve ark., 2015). Gizli bir ısı depolama sisteminde, metal matris yapılarının yanı sıra metalik dolgular yoluyla malzemelerin faz değişiklikleri sırasında bir enerji değişimi gerçekleşmektedir. Bu kombinasyonlara bağlı olarak, faz değiştiren malzemeler Şekil 2.35.'de gösterildiği gibi katı-katı, katı-sıvı ve sıvı-gaz faz değiştiren malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.35. Çeşitli faz değişim malzemelerinin şematik gösterimi (yeniden düzenlemiştir (Demirbas, 2006, Olabi ve ark., 2020).)

Duyulur ısı depolama sistemleri katı (örneğin, zemin, dökme demir veya beton) veya sıvı (örneğin, su veya termo-yağ) depolama ortamlarına sahip olan yaygın ve küresel olarak tercih edilen bir termal enerji depolama teknolojisidir (Storage, 2011). Bazı duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan ortamların karşılaştırmalı özellikleri detaylı olarak Tablo 2.14.'de verilmiştir.

Tablo 2.14. Duyulur termal enerji depolama sistemlerine ait farklı ortamların karşılaştırılması (yenden düzenlenmiştir (Reilly ve Kolb, 2001, Gil ve ark., 2010, Khan ve ark., 2019).)

Materyal isimleri	Sıvı Na	Karbonat tuzu	Nitrat tuzu	Nitrit tuzu	Silikon yağı	Sentetik yağ	Mineral yağ
Soğuk ortam sıcaklığı (°C)	270	450	265	250	300	250	200
Sıcak ortam sıcaklığı (°C)	530	850	565	450	400	350	300
Ortalama yoğunluk (Kg/m ³)	850	2100	1870	1825	900	900	770
Ortalama termal iletkenlik(W/mK)	71	2,0	0,52	0,57	0,10	0,11	0,12
Ortalama ısı kapasitesi (KJ/KgK)	1,3	1,8	1,6	1,5	2,1	2,6	2,6
Hacim başına ısı kapasitesi (kWh/m ³)	80	430	250	152	52	57	55
Kg başına materyal maliyeti (\$/Kg)	2,00	2,40	0,50	1,00	5,00	3,00	0,30
kWh başına materyal maliyeti (\$/kWh)	21,0	11,0	3,7	12,0	80,0	43,00	4,2

Geleneksel olarak duyulur ısı depolama, bir ortamın sıcaklığını yükselterek gerçekleşmektedir. Bu tür enerji depolama sistemleri arasında; sıcak su depolaması (hidro-birikim), yeraltı termal enerji depolaması (akifer, sondaj kuyusu, mağara, topraktaki kanallar, çukur) (Fleuchaus ve ark., 2018) ve kaya dolgulu depolama (kaya, çakıl, çakıl) örnek olarak verilebilir. Termal depolama, depolama ortamındaki sıcaklık değişimine bağlı iken kapasite ise, Denklem 2.24’de gösterildiği gibi (Storage, 2011) ortamın özgül ısısına ve kütlesine bağlıdır (Semadeni, 2003).

$$E_t = K(T_2 - T_1)V \quad (2.24)$$

Burada E_t , V hacminde depolanan termal enerji, K özgül ısı ve T_1 ve T_2 ise sırasıyla yeniden şarj etmeden önceki ve sonraki sıcaklıklardır.

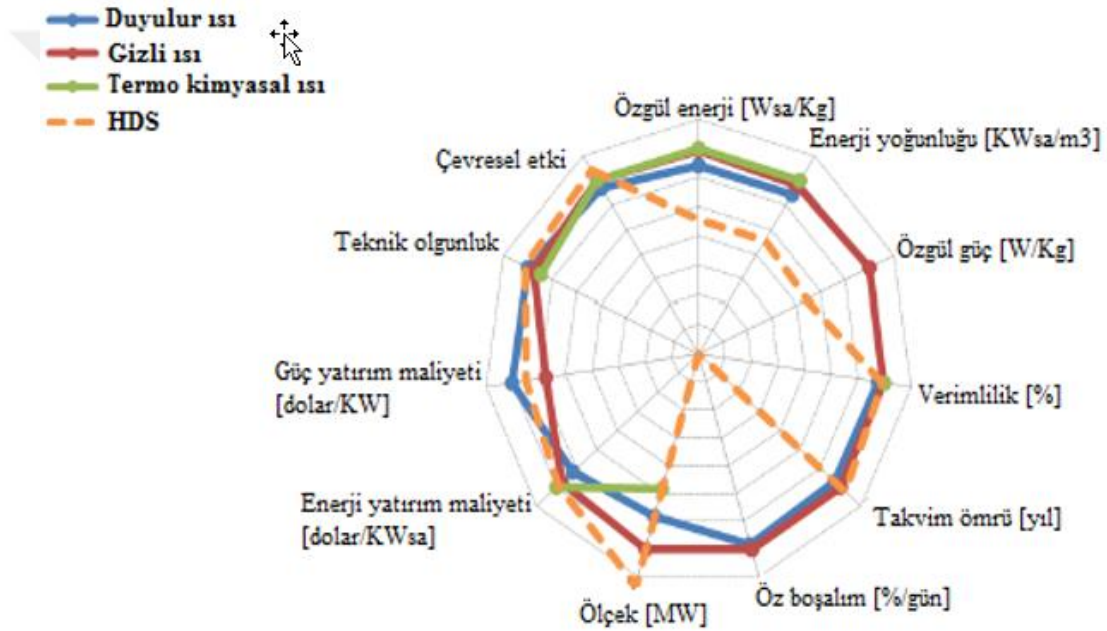
Şekil 2.36. ve Tablo 2.15.’te detaylı özellikleri karşılaştırılan termokimyasal enerji depolama, enerjiyi ısı olarak depolamanın dolaylı yoludur. Enerji fizikokimyasal süreçte depolanmaktadır. Bu yöntemin ana avantajı yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır (yaklaşık 1000 MJ/m^3) [145]. Tablo 2.15. ve 2.34.’de farklı tipleri detaylı olarak karşılaştırılan TEDS’ler, düşük sermaye maliyeti (3-60 \$/kWh), düşük öz boşalım oranı (%0,05-1), güvenli enerji arzı, çevre dostu olması ve kabul edilebilir enerji yoğunluğu gibi avantajlara sahiptir. Bunlara karşın, kullanım ömrü beklentisi halen çok düşüktür (%30-60).

Tablo 2.15. On dört farklı metriğe dayalı TED’lerin karşılaştırılması. (Birden fazla kaynaktan elde edilen veya hesaplanan veriler kullanılmıştır (Sabihuddin ve ark., 2014).)

Standartlar		Duyulur termal enerji depolama sistemi Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Gizli termal enerji depolama sistemi Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$	Termo-kimyasal termal enerji depolama sistemi Aralık $\sigma / \mu / \tilde{x} / n$
Özgül enerji	[WshKg]	10,00–120,00 46,55/65,00/65,00/4	150,00–250,00 52,5/209,3/227,8/3	250,00 x/250,00/250,00/1
Enerji yoğunluğu	[kWh/m ³]	25,00–120,00 34,57/77,00/80,00/5	100,00–370,00 122,9/197,5/160,0/4	300,00 x/300,00/300,00/1
Özgül güç	[W/Kg]	Bilinmiyor	10,00–30,00 14,14/20,00/20,00/2	Bilinmiyor
Güç yoğunluğu	[kW/m ³]	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Verimlilik	[%]	7,00–90,00 34,34/51,75/55,00/4	75,00–90,00 10,61/82,50/82,50/2	75,00–100,00 17,68/87,50/87,50/2
Takvim ömrü	[yıl]	10,00–20,00 7,07/15,00/15,00/2	20,00–40,00 14,14/30,00/30,00/2	Bilinmiyor

Tablo 2.15. (Devamı)

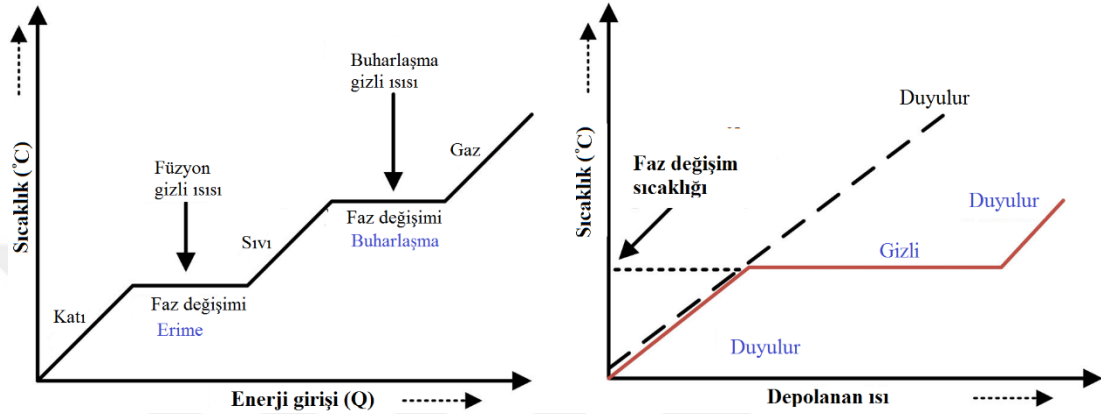
Döngüsel ömür	<i>[döngü]</i>	<i>Bilinmiyor</i>	<i>Bilinmiyor</i>	<i>Bilinmiyor</i>
Öz boşalım	<i>[%/gün]</i>	0,50	0,50–1,00	Bilinmiyor
		x/0,50/0,50/1	0,35/0,75/0,75/2	
Ölçek	<i>[MW]</i>	0,001–10,00	0,001–300,00	0,01–1,00
		7,07/5,00/5,00/2	149,82/75,28/0,55/4	0,70/0,51/0,51/2
Enerji yatırım maliyeti	<i>[\$/kWh]</i>	0,04–50,00	3,00–88,73	10,90–137,00
		17,42/11,06/2,26/8	836,52/40,73/30,00/5	88,84/73,74/73,74/2
Güç yatırım maliyeti	<i>[\$/kW]</i>	2,500,00–7,900,00	200,00–300,00	Bilinmiyor
		2,844/4,683/3,650/3	70,7/250,0/250,0/2	
Uygulama Alanı		Orta/geniş ölçekli Köprüleme enerjisi	Orta/büyük ölçekli enerji yönetimi	Küçük/orta ölçekli enerji yönetimi
Teknik olgunluk		Olgun/ Ticarileştirilmiş	Kanıtlanmış/ Ticarileştiriliyor	Kanıtlanmış/ Geliştiriliyor
Çevresel etki		Çok düşük	Düşük/Kesin olmayan	Düşük/Kesin olmayan



Şekil 2.36. Tablo 2.15.'deki normalleştirilmiş ve logaritmik olarak çizilmiş ortalama verileri kullanarak TEDS'lerin karşılaştırılması. Kesikli çizgi olarak gösterilen HDS, diğer tüm elektrik enerji depolama teknolojileri için karşılaştırma temeli olarak kullanılmıştır (yeniden düzenlenmiştir (Sabihuddin ve ark., 2015)).

Bu teknolojinin en yaygın uygulaması, geceleri buz depolayabilmesi ve gündüzleri soğutma sistemini soğutmak için su kullanarak enerji açığa çıkarabilmesi sayesinde mikro şebeke ile entegrasyonudur. Bu nedenle daha uzun yaşam döngüsüne ilişkin araştırmalar, sistemi bu tür uygulamalar için oldukça çekici hale getirebilir. Ayrıca malzemelerdeki ısının adsorpsiyon ve absorpsiyon süreçleri göz önüne alındığında, termo-kimyasal sorpsiyonlu depolama sistemlerinin tasarımı karmaşık ve pahalıdır. Bununla birlikte, bu tür sistemlerin enerji yoğunluğu, sulu duyulur ısı depolama sisteminden üç kat daha fazladır (Storage, 2011). Şelil.2.35'te gizli ısı PCM'lerin

enerji değişimi ve gizli ve duyulur ısı depolama miktarının sıcaklıkla değişimi grafiksel olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, EA uygulamalarında, atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren otomatik termoelektrik üretim sistemi, genel verimliliği ve yakıt maliyetini optimize etmek için potansiyel bir alternatif olarak kullanılabilir (Tie ve Tan, 2013).



Şekil 2.37. PCM'ler için sıcaklıkla- enerji girişi (solda) ve gizli ve duyulur ısı depolama miktarının sıcaklıkla değişimi (sağda) (yeniden düzenlenmiştir (Mehling ve Cabeza, 2008, Gil ve ark., 2010).)

Termal enerji üretim kapasitesindeki kısıtlamalara bağlı olarak TEDS tasarımları mevsimsel veya daha kısa zaman aralıklarında olabilmektedir. Mevsimsel enerji depolamada, birkaç ay sonra kullanımı için ısıyı muhafaza edebilen daha büyük bir enerji depolama sistemi gerekmektedir. Örneğin; bir binaya akuple edilen bir yerden ısı depolama sistemi yaz aylarında binadan alınan ısıyı depolamak ve binada ısıtmaya ihtiyaç duyulduğunda daha serin mevsimlerde kullanılmaktadır. Benzer olarak kışın kullanılmak üzere yaz boyunca güneş enerjisinin depolanmasıyla da uygulanabilir. Kısa süreli enerji depolama sistemleri genellikle daha küçük kapasitelere sahiptir ve ısıyı birkaç saatten birkaç güne kadar tutabilmektedir. Bu tür sistemler, ısıtmanın gerekli olduğu daha serin saatlerde kullanılmak üzere gün boyunca güneş enerjisinin depolanması şeklinde de olabilirler. Gün içinde elektrikli ısıtma/soğutma kullanılan binalarda, düşük tarifeli dönemlerde elektrik kullanılarak üretilen termal enerji TEDS'ler aracılığıyla enerji tasarrufu amaçlı enerji yönetiminde kullanılabilir. Ayrıca, bu teknoloji, enerji depolama malzemesinin çalışma sıcaklığının oda sıcaklığından yüksek olup olmamasına bağlı olarak düşük sıcaklıklı ve yüksek sıcaklıklı TEDS olarak sınıflandırılabilir.

Düşük sıcaklık termal enerji depolama sistemleri: Bu sistemler akifer düşük sıcaklık ve kriyojenik enerji düşük sıcaklık termal enerji depolama sistemleridir. Akifer sistemde depolanan soğutma enerjisi miktarı, tankta depolanan soğutulmuş/buzlu su ile ısı eşanjöründen gelen sıcak dönüş suyu arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Akiferli enerji depolaması, özellikle büyük ticari binalar için gündüzleri pik seviyelerini azaltmada, ticari ve endüstriyel soğutma sistemleri için idealdir. Kriyojen (örneğin sıvı nitrojen veya sıvılaştırılmış hava), yoğun olmayan güç talebi döneminde veya yenilenebilir enerji kaymalarından üretilen hatta bir hidro veya rüzgâr türbinlerinden doğrudan mekanik çalışma yoluyla üretilen elektrik enerjisi depolanmaktadır. Pik süre boyunca, çevredeki ortamdan gelen ısı sıvıyı kaynatır, ısıtılan kriyojen, bir kriyojenik ısı motoru kullanılarak elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda varsa santralin baca gazından çıkan atık ısı da bu sistem tarafından değerlendirilebilmektedir. Bu teknoloji, nispeten yüksek bir enerji yoğunluğuna (100–200 Wh/Kg), birim enerji başına düşük sermaye maliyetine, çevreye zarar vermeyen ve nispeten uzun bir depolama sürecine imkân sağlamaktadır. Bununla birlikte, hava sıvılaştırma için mevcut enerji tüketimine göre nispeten düşük bir verime (%40-50) sahiptir. Kuzey Teksas Üniversitesi (ABD) ve Washington Üniversitesi (ABD) (Knowlen ve ark., 1998, Ordonez, 2000, Williams ve Williams, 1997, Knowlen ve ark., 1997, Knowlen ve ark., 1994), Mitsubishi (Japonya) (Kishimoto ve ark., 1998), Leeds Üniversitesi (İngiltere) ve Çin Bilimler Akademisi (Çin) tarafından halen bu teknolojinin geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Chen ve ark., 2016a, Wen ve ark., 2006, Chen ve Ding, 2006).

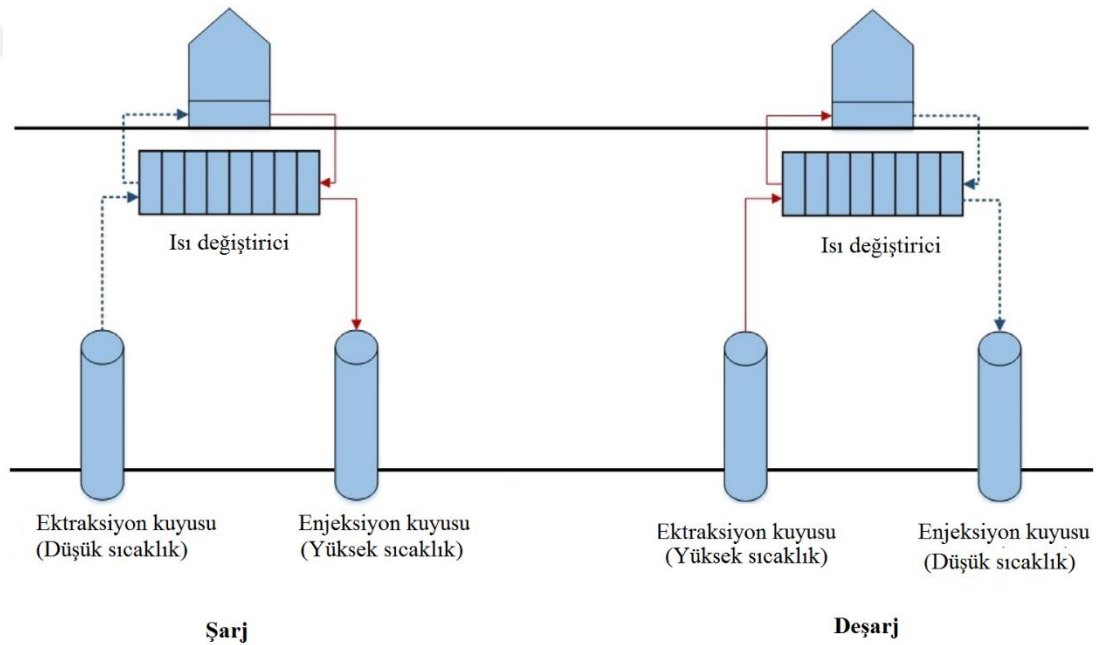
Yüksek sıcaklık termal enerji depolama sistemleri: Bu sistemler, beton depolama, faz değiştiren malzemeler ile depolama, erimiş tuz ve oda sıcaklığında iyonik sıvılar ile depolama sistemleri olarak üç kategoriye ayrılabilir. Erimiş tuz ve oda sıcaklığında iyonik sıvılar ile depolama sistemleri, ilgili sıcaklık aralığında ihmal edilebilir buhar basıncına ve 25 °C'nin altında bir erime sıcaklığına sahip organik tuzlardır. Bu tür sıvılar, bozulmadan 100 °C sıcaklıklarda depolanma potansiyeline sahiptirler. Enerji depolama için bu son teknolojinin kullanımına örnek olarak, Kaliforniya'daki ısı transfer sıvısı olarak erimiş tuzun kullanılmasıyla gerçekleştirilen “Güneş İki” Merkezi Alıcılı Güneş Enerjisi Santrali gösteri projesinde test edilen 2 tanklı erimiş

tuz depolaması sistemi bulunmaktadır. Beton depolama, Avrupa projelerinde ısı transfer akışkanı olarak sentetik yağlı parabolik oluk enerji santralleri için yüksek sıcaklıklarda enerji depolamak amacıyla beton veya dökülebilir seramiklerin kullanılması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Beton depolama sisteminin uygulanmasının beş yıldan daha kısa bir sürede gerçekleştirilebileceği öne sürülmektedir. PCM'ler, termal giriş kaynağına uygun bir sıcaklıkta bir faz değişikliğine (genellikle katıdan sıvıya) sahip olacak şekilde seçilen malzemelerdir. Bir faz değişimindeki yüksek “gizli ısı”, faz değişimi olmayan yüksek sıcaklık malzemelerinin depolanmasından daha yüksek enerji depolama yoğunlukları sağlayabilmektedir. Katı/sıvı faz değişimi söz konusu olduğundan, ısıyı kaynaktan PCM'ye taşımak için bir ısı transfer aracına ihtiyaç vardır. Yapılan son çalışmalarda küçük miktarlardaki PCM'nin kapsüllenmesi veya PCM'nin yüksek ısı iletimi olan başka bir katı malzemeden yapılmış bir matrise gömülmesi gibi iki temel yaklaşım üzerinde durulmaktadır. PCM tabanlı depolama, henüz tam olgunluk kazanmış bir teknoloji değildir.

Gizli ısı depolama alanında yapılan araştırmalar, genellikle yeni depolama ortamlarının geliştirilmesi, tanıtılması ve mevcut durumdakilerin termodinamik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine odaklanılmaktadır (Lin ve ark., 2018). Yakın zamanda yapılan bir araştırmaya göre bir PCM, bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen yağ asitlerini içermektedir (Rozanna ve ark., 2005). Nazir ve ark. (Nazir ve ark., 2019) erime noktası, termal enerji depolama yoğunluğu ve termal iletkenlik gibi termofiziksel özelliklerine dayalı olarak detaylı faz değişim malzemelerinin uygulanması noktasında incelemeler yapmıştır. Kesintili yenilenebilir enerji kaynakları ile beraber akıllı termal şebeke sistemlerinde PCM'lerin uygulanmasının umut vadeden sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yer altı TEDS'ler, duyulur termal enerji depolamanın giderek yaygınlaşan bir türüdür. Yazın bir binadan ısıyı çıkarmak ve bu depolanan ısıyı tekrar kışın kullanım amacıyla yeraltında depolamak için dolaşımdaki bir sistemin (genelde su ya da hava) kullanılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Toprak ısı eşanjörleri dolaşan malzemenin daha derinlere iletilmesini sağlamaktadır. Toprak ısı eşanjörlerinin

modelleri ve programları Florides ve Kalogirou (Florides ve Kalogirou, 2007) tarafından incelenmiştir. Duyulur ısı depolaması için yeraltı alanlarının kullanımındaki gelişmeler arasında akifer, sondaj, mağara, çukur ve su deposu termal enerji depolamaları yer almaktadır. Su depoları, suyun yüksek özgül sıcaklığı, yüksek enerji yükleme ve boşaltma kapasite oranları sayesinde termodinamik yönden en ideal seçenek olarak sunulmaktadır (Novo ve ark., 2010, Lee, 2010). Şekil 2.38.'de gösterilen Akifer termal enerji depolama (ATES) sistemleri, depolama ortamı olarak doymuş ve geçirgen bir yeraltı katmanındaki doğal suyu kullanmaktadır (Lee, 2010, Fleuchaus ve ark., 2018).

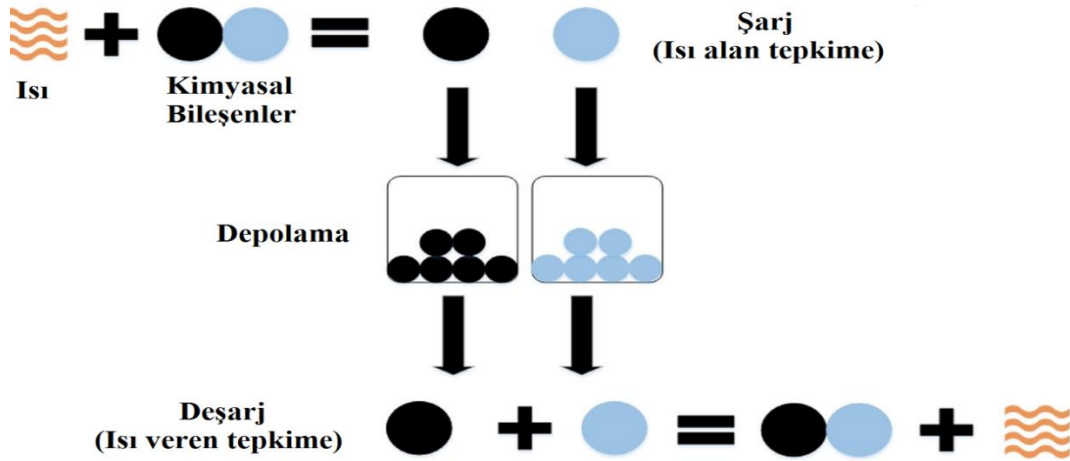


Bir diğer alternatif hibrit tasarım olan termokimyasal enerji depolama sistemleri, termal enerji gerektiren veya termal enerji çıkışı sağlayan kimyasal reaksiyonlar prensibiyle çalışmaktadır. Şekil 2.40.'dan de anlaşılacağı üzere endotermik ayrışma, reaksiyon ürünlerinin depolanması ve ayrılmış ürünlerin ekzotermik reaksiyonu şeklinde üç aşamada gerçekleşmektedir. Son adım, işlemin tekrarlanmasına izin vererek ilk malzemeleri yeniden oluşturmaktadır. Termokimyasal enerji depolama sistemleri, Şekil 2.39.'da gösterildiği gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Termokimyasal enerji depolama sistemleri, duyulur ve gizli termal enerji depolama

sistemlerinden daha yüksek depolama yoğunlukları sunarak onları daha kompakt sistemler haline getirmektedir. Bu uygulama depolama alanının sınırlı veya pahalı olduğu uygulamalarda faydalı bir teknolojidir. Depolama sırasındaki enerji kayıpları, termokimyasal enerji depolamada duyulur veya gizli termal enerji depolama sistemlerine kıyasla daha az olduğundan, termokimyasal enerji depolaması, uzun vadeli depolama uygulamaları için iyi bir potansiyel olarak görülmektedir (Pinel ve ark., 2011). Bununla birlikte, termokimyasal enerji depolama sistemleri düşük ısı kaybıyla enerjiyi depolayan ve gerektiğinde kolayca deşarj edebilen uygun malzemelere veya malzeme kombinasyonlarına olan ihtiyaçlar, daha verimli sistem tasarımlarına ulaşılmadan önce üstesinden gelinmesi gereken zorluklardan biridir.



Şekil 2.39. Kimyasal ve sorpsiyon depolama sistemlerinin sınıflandırılması (yeniden düzenlenmiştir (N'tsoukpoe ve ark., 2009, Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020).)



Şekil 2.40. Termokimyasal enerji depolama döngüsünde yer alan süreçler (yeniden düzenlenmiştir (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020).)

Lefebvre ve Tezel (Lefebvre ve Tezel, 2017), termokimyasal depolama sistemlerine uygun olarak tuz emprenyeli kompozit malzemeler önermektedir. Sürekli, tutarlı ve uzun vadeli uygulamalar için adsorban malzemeye ilave edilen tuzun kararlılığının sağlanmasının daha çok geliştirilmeye gereksinim duyulan alanlardan biri olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır. Haji Abedin ve Rosen (H Abedin ve A Rosen, 2011) termokimyasal enerji depolama ilkelerini ve son gelişmeleri gözden geçirerek ve termokimyasal depolama sistemlerini diğer TEDS'ler ile karşılaştırmaktadırlar. Bazı araştırmacılar, termal enerjinin uzun süreli depolanması amacıyla ideal olan malzemelerin fizikokimyasal ve termodinamik özelliklerini tanımlamaktadır (Tatsidjodoung ve ark., 2013, N'tsoukpoe ve ark., 2009). Sırasıyla CO ve H₂ çıkışı sağlayan, stokiometrik olmayan ceria (CeO₂) kullanarak H₂O ve CO₂'yi ayrıştırmak amacıyla güneş enerjisi temelli bir termokimyasal döngünün uygulanabilirliği, malzemelerin reaksiyon hızları, döngüsellik, reaktör teknolojisi ve enerji dönüşüm verimliliği yönünden Chueh ve ark. tarafından ele alınmıştır (Chueh ve ark., 2010). Bermúdez ve ark. (Bermúdez ve ark., 2014) tüketilen enerji miktarını incelemek için çeşitli karbon malzemeleri test etmişlerdir. İki mikrodalga ısıtma mekanizması, tek modlu fırın ve çok modlu cihaz, enerji tüketimi ve geri kazanımı açısından verimliliklerini test etmek için yeniden değerlendirilmiştir. Teknoloji, laboratuvar şartlarında %45'lik enerji verimliliği sağlamış olup diğer enerji depolama teknolojileriyle rekabet edebilmesi için umut vadeci olarak görülmüştür.

Ülke bazında istatistiksel analize dayalı olarak, Feluchus ve ark. (Fleuchaus ve ark., 2018) giderek artan bir piyasa değişimi, bir büyüme ve bir olgunluk adımı perspektifinden ticarileştirme düzeyine gelebilmek için piyasa kısıtlarını tanımlamaktadırlar. Thaker ve ark. duyulur ısı, gizli ısı ve termokimyasal depolama sistemleri için yatırım maliyetini ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini hesaplamışlardır [(Thaker ve ark., 2017). İki tank kullanan dolaylı duyulur ısı depolaması için seviyelendirilmiş enerji maliyeti, iki tank kullanan doğrudan duyulur ısı depolamasından daha yüksektir çünkü birincisi, ekstra borular, pompalar ve valfler içeren ekstra bir ısı eşanjörü kullanılması nedeniyle daha yüksek bir yatırım maliyetine sahiptir. Kapasitedeki artışla seviyelendirilmiş enerji maliyeti azalır ve deşarj süresi ile bu maliyet arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır (Boudaoud ve ark., 2015, Seitz ve ark., 2017, Xu ve ark., 2015b). Flueckiger ve ark. en iyi kombinasyonu bulmak için güneş çarpanı ve depolama saatini değiştirerek denemeler yapmışlardır. Yazarlar, 2-4 güneş çarpanı değerleri için depolama saati ile seviyelendirilmiş enerji maliyetinde bir düşüş gözlemişlerdir. Bununla birlikte, bu maliyetin güneş çarpanı 1 ile arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni yeterli güneş radyasyonu olmadan, depolama sisteminin sermaye maliyeti eklemesine rağmen yeterli gücü sağlayamamasıdır. Boşalma süresi 1 saatten 8 saate yükseldiğinde seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,80 \$/kWh'den 0,69 \$/kWh'e düşmektedir (Boudaoud ve ark., 2015). Benzer şekilde Seitz ve ark. gizli ısı TEDS kapasitesinin artmasıyla seviyelendirilmiş enerji maliyetinin azaldığını ortaya koymuşlardır (Seitz ve ark., 2017). Boudaoud ve ark. 1,6 güneş çarpanı ile optimum deşarj süresini olarak 8 saat olarak belirlemişlerdir (Boudaoud ve ark., 2015). Wu ve ark. sıvılaştırılmış hava ile entegre bir termokimyasal ESS'yi incelemişlerdir (Wu ve ark., 2020). Gidiş-dönüş verimliliği, tek termokimyasal ESS'nin verimliliğinden yaklaşık %13 daha yüksektir. Enerji yoğunluğu da 3-4 kat daha fazladır (Wu ve ark., 2020).

Gelişmekte olan piyasada teknik fizibilite, farkındalık eksikliği ve teknolojiye olan güvensizlik bu teknolojinin önündeki engellerden bazıları olarak öne çıkmaktadır. Teknoloji büyüme aşamasına doğru ilerledikçe, yüksek yatırım maliyetleri, devlet teşviki ve mevzuat ile ulusal danışmanlar arasındaki bilgi eksikliği aşılması gereken en büyük engeller haline gelmektedir. Tüm bu engellere rağmen özellikle gizli

TEDS'ler için PCM'leri üreten Rubitherm GmbH (Almanya), EPS Ltd. (İngiltere), TEAP (Hindistan),ve Cristopia Energy Systems (Fransa) gibi birçok şirket bulunmaktadır (Khan ve ark., 2019).

2.1.1.5.1. Termal enerji depolama sistemlerimim analizi

Duyulur ısı depolama, açık ara en ucuz termal depolama şekli ve kısa süreli uygulamalar için ideal bir teknolojidir. Daha uzun süreli veya daha fazla enerji yoğun depolama için gizli ısı depolaması bu konuda daha büyük bir potansiyel sunmaktadır. Termokimyasal reaksiyon ısısı, en umut verici ve en az gelişmiş termal depolama şeklidir. Gerçek sistemlerde üç depolama biçiminin bir kombinasyonunun kullanılması muhtemeldir. Termal depolama, mevcut enerji santralleri ve güneş enerjisi sistemleri için güçlü bir potansiyele sahiptir. Mevcut sistemlerin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabilir ve kayıpları azaltabilir. Özellikle erimiş tuz pillerinde, YP'lerde hatta SHDS'lerde hibrit enerji depolama bağlamında değerlendirilebilirler.

2.1.1.6. Hibrit enerji depolama sistemleri

ESS'lerin, en olumlu katkıları ve etkileri göz önünde bulundurularak EA ve diğer depolama sistemlerinin gereksinim duyduğu uygulamalar da kullanılmaktadır. Aynı ayrı incelendiğinde, tüm ESS'ler tek başına enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, deşarj hızı, döngü ömrü ve maliyet gibi bütün özellikler açısından aynı anda avantaj sağlayamamaktadır (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Ren ve ark., 2015, Rashid, 2011, Dubal ve ark., 2015, Keil ve ark., 2015, Sun ve ark., 2015a, Yoo ve ark., 2008, Lu ve ark., 2007, Henson, 2008, Liu ve ark., 2016, Machado ve ark., 2015, Anno ve Koizumi, 2014, Nahavandi ve ark., 2014, Yang ve ark., 2014, Ostadi ve Kazerani, 2014). Bu nedenle birbirini tamamlayıcı özelliklere sahip iki ya da daha fazla ESS'yi bir araya getirerek ESS'lerin optimum performansının sağlanması, dengeli enerji depolama ve dağıtımı için hibrit ESS'lere gereksinim duyulmaktadır. Hibrit ESS'ler (HSS), çalışma prensibi olarak iki ya da daha çok ESS'nin çıkış gücünü tamamlayıcı özellikleriyle elektronik olarak birleştirmek üzerine kuruludur (Tie ve Tan, 2013,

Chau ve ark., 1999, Lukic ve ark., 2008, Vazquez ve ark., 2010, Lemofouet ve Rufer, 2006, Rashid, 2011, Keil ve ark., 2015, Sun ve ark., 2015a, Yoo ve ark., 2008, Lu ve ark., 2007, Henson, 2008, Liu ve ark., 2016, Machado ve ark., 2015, Anno ve Koizumi, 2014, Nahavandi ve ark., 2014, Yang ve ark., 2014, Ostadi ve Kazerani, 2014). HSS sistemlerinde; yüksek güç yoğunluklu ESS ve yüksek enerji yoğunluklu ESS, çabuk reaksiyon verebilen ESS ve yavaş reaksiyon veren ESS ya da yüksek maliyetli ve düşük maliyetli ESS kombinasyonu yük tarafına optimum enerji arzı sunabilmek amacıyla güç elektroniği yapılandırmaları ile birlikte değerlendirilmektedir (Chau ve ark., 1999, Lukic ve ark., 2008, Vazquez ve ark., 2010, Lemofouet ve Rufer, 2006, Rashid, 2011, Keil ve ark., 2015, Sun ve ark., 2015a, Yoo ve ark., 2008, Lu ve ark., 2007, Henson, 2008, Liu ve ark., 2016, Machado ve ark., 2015, Anno ve Koizumi, 2014, Nahavandi ve ark., 2014, Yang ve ark., 2014, Ostadi ve Kazerani, 2014). HSS'ler, pil ve pil hibritleri, pil ve SC hibritleri, YP ve pil hibritleri, pil ve SMEDS hibritleri ve pil ve volan hibritleri, SHDS ve pil hibritleri, YP ve SC hibritleri, YP ve ultra yüksek hızlı volan hibritleri ve SHDS ve pil hibritleri gibi kombinasyonlar uygulama temelli HSS sistemleri olarak kısa ve uzun vadeli sistemler olarak sınıflandırılabilir (Tie ve Tan, 2013, Chau ve ark., 1999, Lukic ve ark., 2008, Vazquez ve ark., 2010, Lemofouet ve Rufer, 2006, Rashid, 2011, Keil ve ark., 2015, Sun ve ark., 2015a, Yoo ve ark., 2008, Lu ve ark., 2007, Henson, 2008, Liu ve ark., 2016, Machado ve ark., 2015, Anno ve Koizumi, 2014, Nahavandi ve ark., 2014, Yang ve ark., 2014, Ostadi ve Kazerani, 2014). Zn-hava ve valf ayarlı KA, Zn-hava ve Ni-MH, Zn-hava ve Li-iyon, YP ve valf ayarlı KA, YP ve Ni-MH ve YP ve Li-iyon hibritleri, yüksek özgül enerji ve yüksek özgül güç kombinasyonunun örneklerinden bazılarıdır. Valf ayarlı KA ve SC, Ni-MH ve SC, Li-iyon ve SC hibritleri, düşük ve yüksek güç gerektiren kombinasyonlardır. YP ve SC; YP ve ultra hızlı volan, SHDS ve SC hibritleri uzun vadeli uygulamalara uygun olup diğer Li-iyon ve ultra hızlı volan/SMEDS, SHDS ve valf ayarlı KA kombinasyonları da bulunmaktadır (Keil ve ark., 2015, Sun ve ark., 2015a, Yoo ve ark., 2008, Lu ve ark., 2007, Henson, 2008, Liu ve ark., 2016, Machado ve ark., 2015, Anno ve Koizumi, 2014, Nahavandi ve ark., 2014, Yang ve ark., 2014, Ostadi ve Kazerani, 2014, Chau ve ark., 1999, Ren ve ark., 2015).

ESS'nin entegrasyonu, mikro şebeke gibi modern teknoloji için zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir. (Hemmati ve Saboori, 2016)'e göre, yüksek güçlü ESS cihazları kısa süre için yüksek oranlarda hızlı reaksiyon verebilme noktasında faydalıdır. Oysa yüksek enerjili cihazlar daha uzun süre ile yavaş reaksiyon göstermektedir. Mikro şebeke, güç kalitesi problemlerinin azaltılması ile sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini geliştirmek için yüksek güç ve yüksek enerji depolama sisteminin özelliklerini birleştiren bir ESS'ye ihtiyaç duymaktadır (Etxeberria ve ark., 2012). HSS'in kontrol stratejisi, tek bir ESS'ninkinden daha karmaşıktır ve şarj/deşarj özellikleri, tepki süresi, güç dağıtımı, yaşam döngüsü ve verimlilik gibi birçok özelliği bir arada barındırmaktadırlar. Enerji depolamaya yönelik bu yeni hibrit teknoloji gelişmesi, birçok araştırmacı tarafından farklı teknikler kullanılarak araştırılmaktadır. Uygulanabilir HSS konfigürasyonları Tablo 2.16'da verilmiştir.

Tablo 2.16. Olası HSS konfigürasyonlarının tablosu (yeniden düzenlenmiştir(Hemmati ve Saboori, 2016, Faisal ve ark., 2018).)

Yüksek enerji sağlayan depolama cihazları	Yüksek güç sağlayan depolama cihazları
Piller	SC SMEDS Volan
Sıkıştırılmış hava enerjisi depolama sistemi (SHDS)	SC SMEDS Volan Piller
Yakıt pilleri (YP)	SC SMEDS Volan Piller
Hidroelektrik enerji depolama sistemi (HDS)	SC SMEDS Volan Piller

ESS'lere, DER ve kesintili yenilenebilir enerji üretim sistemleri tarafından acilen ihtiyaç duyulmaktadır. ESS kullanarak, enerji endüstrisinin karşılaştığı zorluklar büyük ölçüde azaltılabilir. ESS'ler, büyük ölçekli üretim ve iletimle ilgili sistemlerden dağıtım ağlarına ve hatta müşteri/son hizmet noktasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan çok sayıda uygulamaya sahiptir. ESS teknolojileri, enerji yönetiminin üç temel işlevi olan güç, güç kalitesi ve güvenilirliği arasında köprü oluşturmaktadır. Ticari olarak temin edilebilen çeşitli birçok ESS sistemi olmasına rağmen, tek bir ESS

için teknik olgunluk, uzun kullanım ömrü, düşük maliyet, yüksek yoğunluk, yüksek verimlilik ve çevre dostu olma gibi tüm gereksinimleri aynı anda karşılayamamaktadır. Her ESS sisteminin uygun bir uygulama aralığı vardır. HDS, SHDS, büyük ölçekli piller, AB'ler, YP'ler, güneş enerjisi, TEDS'ler ve kriyojenik enerji depolama gibi sistemler enerji yönetimi uygulaması için uygundur; volanlar, piller, kapasitörler ve SC'ler güç kalitesi ve kısa süreli UPS gibi uygulamalar için daha uygunken, köprüleme gücü için ise piller, AB'ler, YP'ler ve Metal-Hava pilleri umut vericidir (Chen ve ark., 2009).

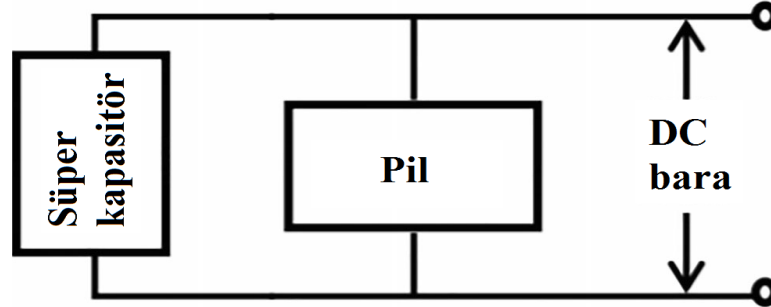
Hibrit bir ESS, SC'lerin yüksek frekanslı ve pillerin düşük frekanslı dalgalanmalarını üstesinden gelebilir ve ilave yüksek güç ve enerjiyi arzıyla optimizasyon sağlayabilir (Chau ve ark., 1999). YP ve pil hibritleri, YP'den daha yüksek özgül güç ve verimlilik olanağı sunmaktadır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yeni çift fonksiyonlu hibrit enerji depolama sisteminin kapsam alanına giren YP ve SC hibritleri, düşük ve geçici güç kaynağı sağlamaları ve yüksek maliyet gibi nedenlerle elektrik şebekelerinde henüz aktif olarak kullanılmasa da EA uygulamaları için gayet dikkat çekicidir (Chau ve ark., 1999, Ren ve ark., 2015). Yakın gelecekte şebekelerde EA'larda olan uygulama alanı sıkıntısı olmadığı için SC'lerin ve YP'lerin birbirine seri/paralel bağlanarak yüksek güç ve yüksek enerji sağlayabilecek yığın şeklindeki HSS'leri görebileceğimizi söylemek mümkündür.

Birçok çalışma, pilin enerji ve güç çıkışının nasıl optimize edileceğine odaklanmaktadır. Çünkü pilin en büyük sorunlarından biri, yüksek güç ihtiyacının karşılanamamasından kaynaklanmaktadır. Tüketici elektroniği için bile, pil kazalarının çoğu ani yüksek güç çıkışından kaynaklanmaktadır. EA'lar için kullanıcıların sürüş alışkanlığı, hızlanma, yol durumu vb. gibi çeşitli faktörler güç çıkışının hızla değişmesine neden olduğundan, bu sorun EA uygulamalarında daha ciddi boyutlardadır. Pilin deşarj işlemi elektrokimyasal bir reaksiyon olduğu için temelde sabit bir hızda deşarj olması pilin kullanım ömrü için daha olumludur. Ancak bu yavaş deşarj özelliği, EA'nın hızlanmasından kaynaklanan ani güç tüketimi ihtiyacını karşılayamamaktadır. Aynı problemler, frenleme tarafından üretilen yüksek akımın tekrar ESS'nin şarj edilmesi gerektiğinde de ortaya çıkmaktadır. Çünkü mevcut

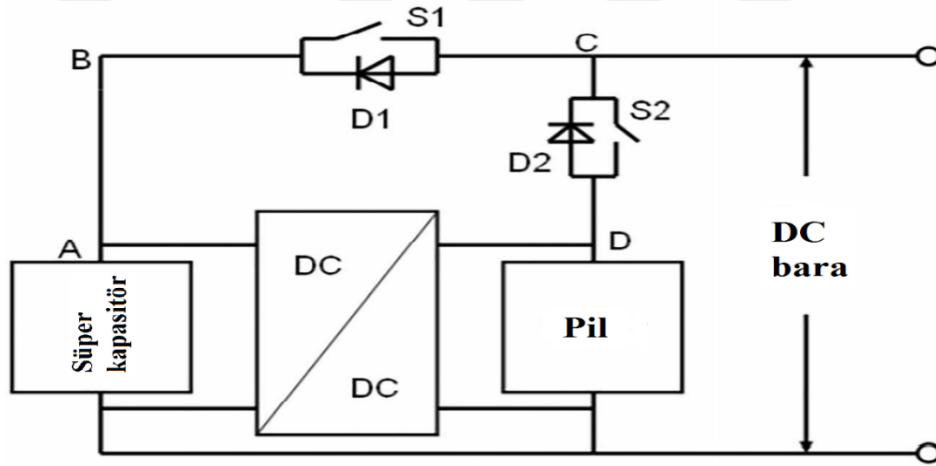
piyasadaki ticari pil sistemlerinin çoğu yüksek hızlarda şarj/deşarjı destekleyememektedir. Ancak bu hızlanma/frenleme özellikle şehir içi sürüşte EA'lar da genellikle meydana gelmekte ve bu da pillerin ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle, pilin bu eksikliğini gidermek için, pili güç çıkışı noktasında iyi olan bir ESS teknolojisiyle bütünleştiren bir HSS tasarlamaya yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. EA'lara entegre etmek için kapasitörleri ve volanı, pille birleştirmek en pratik seçeneklerdendir. Elektrik enerjisi, bir yalıtkan tarafından bölünmüş iki paralel plakadan oluşan kapasitörler tarafından elektrik alanı şeklinde depolanabilmektedir. SC'ler, elektrolitik kapasitörler ile şarj edilebilir piller arasındaki boşluğu doldurabilen, düşük voltajda diğer kapasitörlere göre çok daha fazla enerji depolayabilen özel bir kapasitördür.

Bu nedenle pil ve SC'nin hem enerjiyi hem de gücü optimal bir şekilde sağlaması için çeşitli tasarımlar uygulanabilir. Pil ve kapasitörlü HSS için en basit ve ana kombinasyon mimarileri (Pay ve Baghzouz, 2003), SC ve pilin DC bara ile paralel olarak bağlandığı Şekil 2.41.'de gösterilmiştir. Sonuçlar pil bankasından geçen büyük akım yükünün hafifletildiğini göstermektedir. Bununla birlikte bu modelin dezavantajı, pil ve SC arasındaki güç dağıtımını kontrol edememektir. Wang ve ark. HSS için yeni bir model önermişlerdir (Xiang ve ark., 2014). Bu model Şekil 2.42.'de gösterildiği gibi, çift yönlü DC-DC dönüştürücünün gerekli güç kapasitesini azaltabilen ve DC veri yolunun güç ihtiyacını tam olarak karşılayabilen bir HSS sistemini temsil etmektedir. Pil/SC sisteminin boyutunu ve kapasite kaybını azaltmak için Li ve ark., Heath Hofmann çok amaçlı yöntemi kullanarak EA için yarı aktif pil/SC HSS'ni optimize etmişlerdir (Song ve ark., 2014). Önerilen tasarımlarının stratejisi, SC voltajının bataryadan daha yüksek olduğundan emin olmaktır. Burada pil sadece voltaj talebinin SC kapasitesinden daha yüksek olduğu durumlarda gücü doğrudan sağlayacak ve sonuç olarak, pilin yük profili düzleştirilmiş olacaktır. Ek olarak, frenlemeden kaynaklanan rejenerasyon enerjisinin yalnızca SC'i şarj etmesine izin verilmektedir. Bu da pilin ömrünü uzatmak için sık ve yüksek akım şarjı probleminin aşılmasını sağlamıştır. SC ve pilin kombinasyon modeli pasif, yarı aktif ve tamamen aktif olmak üzere üç tipte sınıflandırılabilir. Bu noktada, yalnızca bir DC/DC dönüştürücü içeren yarı aktif model, en yaygın olarak kullanılan tasarımdır

(Song ve ark., 2014, Burke ve Miller, 2011, Ashtiani ve ark., 2006, Capasso ve Veneri, 2015).



Şekil 2.41. Pil ve SC'den oluşan bir HSS mimarisi (yeniden düzenlenmiştir (Cho ve Gabbar, 2019))

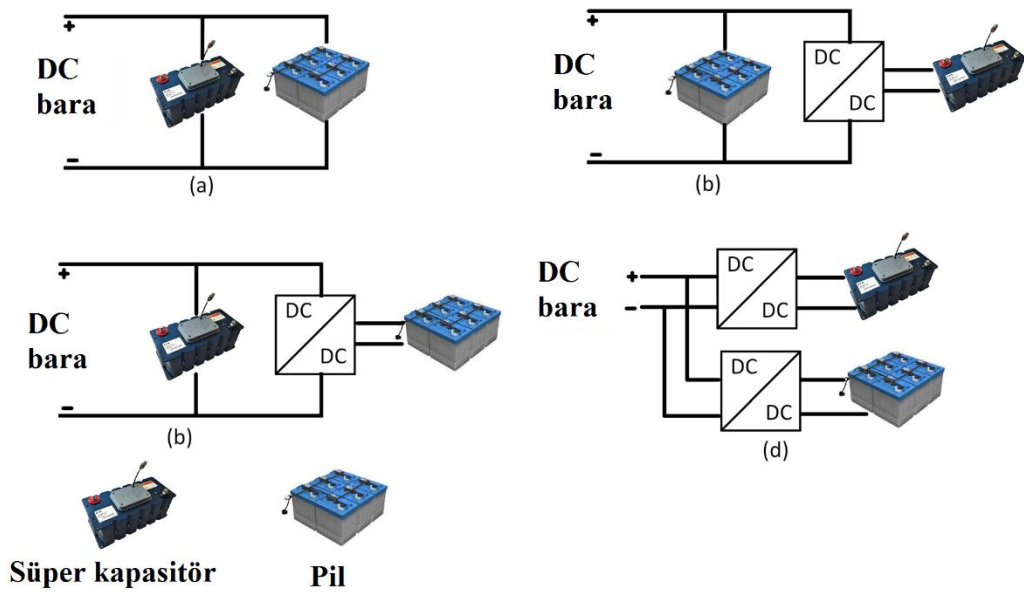


Şekil 2.42. Wang ve ark. tarafından önerilen HSS mimarisi (yeniden düzenlenmiştir (Xiang ve ark., 2014).)

Yapılan bir araştırmada (Song ve ark., 2014, Lee ve ark., 2008) HSS'ne TEDS'lerin katkısı ve HSS için sıfırın altındaki ortamlarda ısıtma stratejisinin üzerinde durulmuştur. Ancak HSS için güç ve enerji çıktısının optimizasyonu, farklı SC ve pil teknolojilerini çeşitli sıcaklık aralığına sahip tek bir HSS'te birleştirme ve daha geniş bir sıcaklık aralığını kapsayabilmesi gibi konularda halen yeteri kadar net sonuçlara ulaşılamamıştır.

En yaygın olarak kullanılan HSS, düşük güç yoğunluğu ve döngü ömrü gibi pil eksikliklerinin üstesinden gelen ve sistemin genel verimliliğini artıran SC'lerle karıştırılmış yüksek enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve modülerliğe sahip sistemlerdir. Hibrit enerji sistemleri, doğrudan ve dolaylı bağlantı yapıları olmak üzere iki ana

kategoriye ayrılan yedi tür yapıyla açıklanabilmektedir. Pilleri, SC'leri ve motorları DC barasına bağlamak için DC-DC dönüştürücüler ve DC-AC eviriciler kullanılmaktadır. Doğrudan bağlantı yapılarında, piller ve SC'ler herhangi bir dönüştürücü (DC-DC ve DC-AC) olmadan doğrudan DC barasına bağlanırken, piller ve SC'ler dönüştürücülere ve daha sonra dolaylı bağlantıda DC barasına bağlanmaktadır. Şekil 2.43., doğrudan ve dolaylı bağlantı yapılarını göstermektedir.



EA'larda SC hibrit depolamalı pillerin ve YP hibrit depolamalı pillerin uygulandığı bir dizi HSS çalışması bulunmaktadır (Camara ve ark., 2008). EA'lar, yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluklarının taleplerini karşılamak için HSS kullanmaktadır. Ayrıca küçük boyutu ve ağırlığı nedeniyle hibrit depolama, diğer depolama teknolojilerinde ve genel şebekelerde en yüksek düzeyde tepe seviyelerini düşürmeyi ve sistemin stresini azaltmayı sağlayabilir. HSS ayrıca pil/hidrojen kombinasyonlu yenilenebilir enerji sistemlerinde ve güneş enerjisi parklarında kullanılabilmektedir (Alloui ve ark., 2013, Song ve ark., 2015, Shen ve ark., 2015).

SC dışında yüksek güce özgü bir diğer fiziksel enerji depolama sistemi volandır. Daha öncede bahsedildiği üzere bir volanda depolanan enerji miktarı, ağırlığının ve çarkın

hızının karesinin bir fonksiyonudur. Çarka akuple edilen elektrikli makinesi sırasıyla şarj/deşarj olurken motor veya jeneratör görevi görmektedir. Vakum odası ve geliştirilmiş manyetik yatak sayesinde son geliştirilen volan sistemin verimi %90'ın üzerine çıkmıştır. Volan için farklı alanlarda çok sayıda başarılı uygulama gerçekleştirilmiştir. Jiancheng ve ark., volanın şebekeden hızlı bir şekilde enerji depolayabilmesine veya enerji enjekte etmesini mümkün kılan hızlı reaksiyon süresi sayesinde güç kalitesinin iyileştirilmesine olan katkısına değinmişlerdir (Jiancheng ve ark., 2002). Bu teknoloji hızlı reaksiyon süresi ve sık şarj/deşarj olabilme özelliği nedeniyle volan, her bir birim güç için iki kattan fazla frekans regülasyonu sağlarken, aynı zamanda sera gazını da %50 oranında azaltmaktadır (Boicea, 2014, Hawkins, 2011). Düşük özgül enerjisi ve enerji yoğunluğu nedeniyle volanların, EA için ihtiyaç duyulan tüm enerjiyi sağlayabilmeleri mümkün değildir. Ancak, bir HSS EA'de büyük bir hızlanmaya ihtiyaç duyduğunda veya yokuş yukarı tırmanıldığında EA'lara yardımcı olabilir. Aynı zamanda, gerektiğinde güç aktarma sistemine yardımcı olmak için frenleme vedeşarjdan elde edilen enerjiyi geçici olarak depolayabilmektedir. Bu da EA motorunun toplam enerji verimliliğini artırmaktadır (Liu ve Jiang, 2007). Yukarıda değinildiği üzere tüm ESS'ler için neredeyse en zorlu ortam olan uzay araştırmalarında, volan ile pil kombinasyonunun verimliliği artırdığı ve uzay aracı kütlesini ve maliyetini azalttığı kanıtlanmıştır (Liu ve Jiang, 2007). Bu arada volan, güneş enerjisi depolamasını sağlamanın yanı sıra uydular için konum kontrolü ile de çalışabilmektedir (Babuska ve ark., 2004). Volanın şimdiye kadar en başarılı ticari uygulaması, şebeke enerjisinin devre dışı kalması ile yedek güç kaynağının başlaması arasındaki 10-15 s boşluğu dolduran kesintisiz güç kaynağından (UPS) elde edilmiştir. Bu uygulamanın daha uzun sürelerde enerji sunabilmesi için volan genellikle kısa süreli güç kesintisi için uygulanabilir olduğundan daha uzun süre kullanılabilen piller birleştirilerek bir HSS sunulabilir. Bu kombinasyon, pilin ömrünü azaltacak sıklıkta şarj/deşarj olmasını önleyebilmektedir. SC ve pillerin kombinasyonunun sağladığı gelişme ile ilgili sınırlı sayıda olan araştırmalarla karşılaştırıldığında, pil ve volan kombinasyonunun avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyabilmek için yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Otobüsler ve gemiler de dahil olmak üzere elektrikli araçlar için hızlı şarj istasyonu uygulamasında hem volan hem de pilleri kullanan yeni bir volan tabanlı hızlı şarj istasyonu geliştirilmiştir (Gabbar ve Othman, 2017). Hızlı şarj

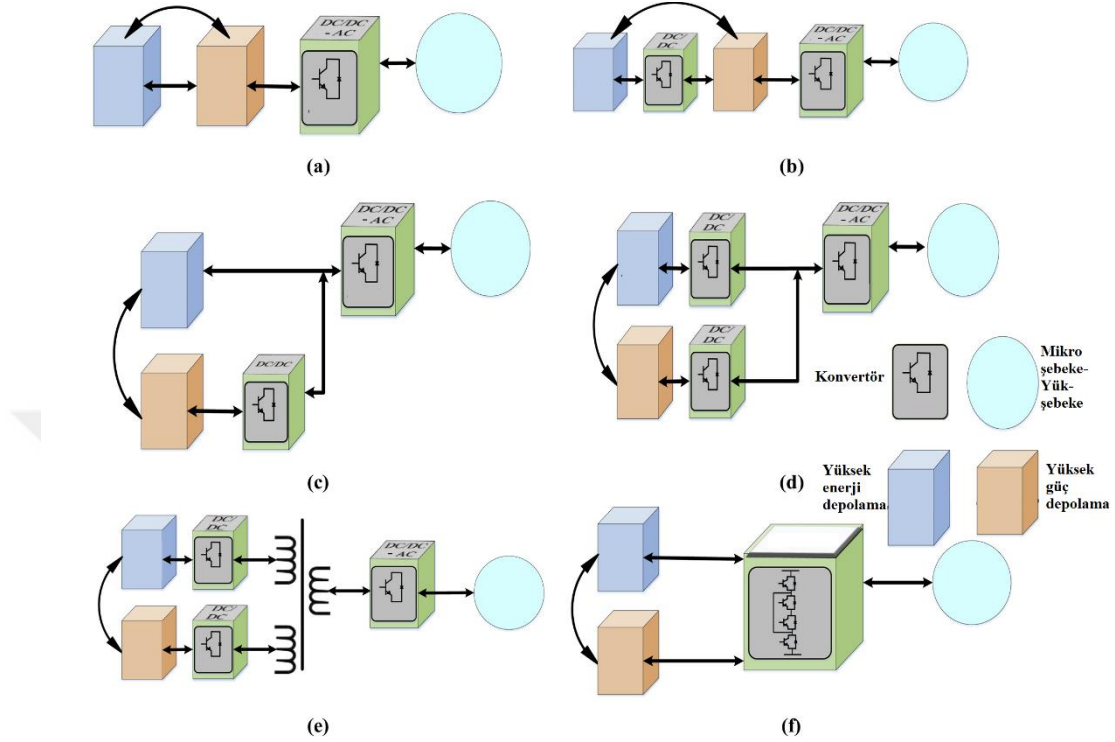
cihazları, volan, güneş panelleri ve ağ arasındaki güç akışlarını koordine etmek için akıllı bir kontrolör tasarlamışlardır. Bu hibrit sistem hem volan hem de pil sisteminin avantajlarını kullanarak optimize edilmiş güç ve enerji çözümü sunmaktadır. Bu da enerji şebekesini fazla yüklenmeden uzak alanlarda bile hızlı şarj sağlamayı mümkün kılmaktadır. Fakat LiB pil ve volan kombinasyonunda volanın bir başka avantajı olarak bilinen geniş çalışma sıcaklığına vurgu yapılmamıştır. Termal özelliklerinden yararlanmak için halen üzerinde çalışma yapılması gerekmektedir. Örneğin, rotor kaybı ve stator kaybindan) üretilen ısı, volan için mutlak atık ısıdır (Cho ve Gabbar, 2019). Ancak bu su ısısının pil bankasını ısıtmak için olası kullanımı, sabit uygulama için volanlı ve piller ile hibrit ESS'nin termal performansını iyileştirmek için gelecekteki araştırmalar ışık tutabilir. Elbette volanın kısa depolama süresi ve düşük özgül enerjisi nedeniyle bu kombinasyonu taşımacılık alanında uygulanması hala pek mümkün görünmemektedir.

Bununla birlikte, kombinasyon modeli veya kullanılan teknolojiler ne olursa olsun, çoğu HSS çalışması güç ve enerjiyi optimize etmeye odaklanmaktadır. Farklı ESS teknolojilerinin birleştirilmesiyle üretilen HSS'in avantajını araştıran çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Literatürde yine üç farklı HSS konfigürasyonunu karşılaştırılmıştır (Keil ve ark., 2015): a) yüksek enerjili LiB ve iki katmanlı elektrik kondansatörü, b) LiB ve bir lityum iyon kapasitör ve c) yüksek enerjili LiB ve yüksek güçlü LiB. a) ve c) modeli, güç çıkış kapasitesini artırabilmiş ve sürüş aralığını buna göre genişletebilmiştir. Bu çalışma gurubu 2016 yılında (Keil ve ark., 2015), HSS'ler üzerine deneysel araştırmalarını genişletmişlerdir. Model a) ve c)'nin her iki konfigürasyonu, bu araştırmada hibridizasyon olmadan imkânsız olarak kabul edilen -20 °C'de sürüşü mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, aşırı soğuk bölgelerde, kışın sıcaklık, çoğu ticari LiB'nin sıcaklık limitinin ötesinde olan -20 °C'nin altına düşmektedir. Bu nedenle, çeşitli sıcaklık aralıklarında farklılık gösteren farklı ESS teknolojileriyle birleştirilen olası hibrit tasarım, soğuk bölgelerde ekonomik enerji depolama çözümü sağlamak amacıyla daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

HSS teknolojisine ilişkin literatür taraması, bir diğer uygulama olan mikro şebeke uygulamaları için pil/SC (Jing ve ark., 2017b), pil/SMEDS (Li ve ark., 2017, Li ve

ark., 2016b), pil/YP (Althubaiti ve ark., 2017), YP/SC (San Martín ve ark., 2013) ve SC/RAP (Etcheberria ve ark., 2012) kombinasyonları şeklinde ele alınmıştır. Mikro şebeke de HSS'in modellenmesi ESS teknolojisinin türü, güç dönüştürücü topolojisi, kontrol stratejisi ve enerji yönetimi gibi birbiriyle bağlantılı dört faktöre bağlıdır. Literatür gözden geçirildiğinde birkaç makalenin dışında HSS teknolojisinin büyük bir kısmı EA uygulamaları (Hannan ve ark., 2017, Hemmati ve Saboori, 2016, Kouchachvili ve ark., 2018, Zimmermann ve ark., 2016, Chemali ve ark., 2016) ile ilgili iken, sınırlı sayıda çalışmanın ise mikro şebekelerde HSS uygulamaları (Etcheberria ve ark., 2012, Jing ve ark., 2017a) ve yenilenebilir enerji (Ahmad Hamidi ve ark., 2015, Bocklisch, 2015, Chong ve ark., 2016) ile alakalı olduğu görülmektedir. Ancak hibrit ESS'nin kapasite boyutlandırma teknikleri ve uygulamalarına odaklanan herhangi bir çalışma bulmak zordur. Bu da tez çalışmasının odaklandığı çift fonksiyonlu yeni bir enerji depolama sisteminin ne kadar yenilikçi ve beklenen bir çalışma olabileceğini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji penetrasyonunda ve mikro şebekelerde, düşük güç kalitesi, frekans ve DC bara voltajı kararsızlığı, dengesiz yük ve kısa depolama ömrü gibi çeşitli teknik problemlerle karşılaşilmektedir (Boicea, 2014). Bu problemlerin üstesinden HSS kullanılarak gelinebilir. Son zamanlarda, çeşitli çalışmalar HSS'in yenilenebilir enerji penetrasyonu ve mikro şebekeler üzerindeki olumlu etkileri araştırılmıştır (Wang ve ark., 2014a, Alnejaili ve ark., 2015, Sharma ve Mishra, 2017). HSS'ler, akıllı şebekeler için sistem verimliliğinin iyileştirilmesi, ESS kullanım ömrünün artması ve maliyetin düşürülmesi gibi sayısız avantajlara sahiptir (Pimm ve Garvey, 2014). Farklı özelliklere sahip çeşitli ESS teknolojileri olduğundan, birçok ESS kombinasyonunu oluşturabilmek mümkündür. Yenilenebilir enerji penetrasyonları için YP/pil, pil/volan, pil/SC ve pil/SMEDS HSS gibi hibrit enerji depolama teknolojilerinin sıklıkla uygulandığı görülmektedir (Mahlia ve ark., 2014, Faraji ve ark., 2017, Venkataramani ve ark., 2016, Jing ve ark., 2017a). Uygun HSS kombinasyonlarının seçimi, depolama hibritleştirme hedefleri, depolama maliyetleri, coğrafi konum ve depolama alanı kullanılabilirliği dâhil olmak üzere çeşitli kriterlere bağlıdır. EA'larda olduğu gibi HSS, farklı topolojiler aracılığıyla mikro şebekeye bağlanabilir. Yüksek enerji ve güç yoğunluğunu sağlamak amacıyla farklı topolojiler kullanılabilir (Ju ve ark., 2014, Gu ve ark., 2012, Daneshpour ve Mehrpooya, 2018). HSS topolojilerinin kapsamlı bir incelemesi (Zimmermann ve ark.,

2016)'da sunulmuştur. Güç dönüştürücü topolojileri, Şekil 2.44.'de gösterildiği gibi aktif, yarı aktif ve pasif olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.44. HSS topoloji sınıflandırması (a) pasif topoloji ve (b) yarı-aktif topoloji (c) seri aktif topoloji (d) paralel aktif topoloji (e) izole aktif topoloji (f) çoklu topoloji (yeniden düzenlenmiştir (Hajiaghahi ve ark., 2019).)

Pil/SC teknolojisi artık oldukça popüler ve yaygın olarak uygulanabilmektedir. Pil/SMEDS HSS topolojisi, yüklerin dalgalanmasının önlenmesini, pilin yaşam döngüsünün uzatılmasını (Li ve ark., 2016c) ve frekans kontrolünü sağlamak amacıyla rüzgâr enerjisi sistemlerinde (Li ve ark., 2015b), mikro şebekelerde (Li ve ark., 2016b) ve demiryolu uygulamalarında (Ise ve ark., 2005) verimliliği artırmak amacıyla incelenmiştir. Mikro şebekelerde HSS uygulaması sadece pillerin kullanıldığı sistemlere kıyasla frekans kontrolünde daha yüksek bir performans elde edilmiştir. Bu uygulamada yüksek frekanslı şarj/deşarj döngülerinden ve tepe akımlarından koruma sağlandığı için pil ömrü geliştirilmiştir. Referans (Li ve ark., 2017), önerilen HSS topolojisi, pil ömrünün 5,7 yıldan 9,2 yıla uzatılabileceğini ortaya koymaktadır. Referans (Althubaiti ve ark., 2017), pilin kısa ila orta vade için birincil depolama aygıtı olarak kullanıldığı ve hidrojen YP'nin uzun vadeli bir depolama aygıtı olarak

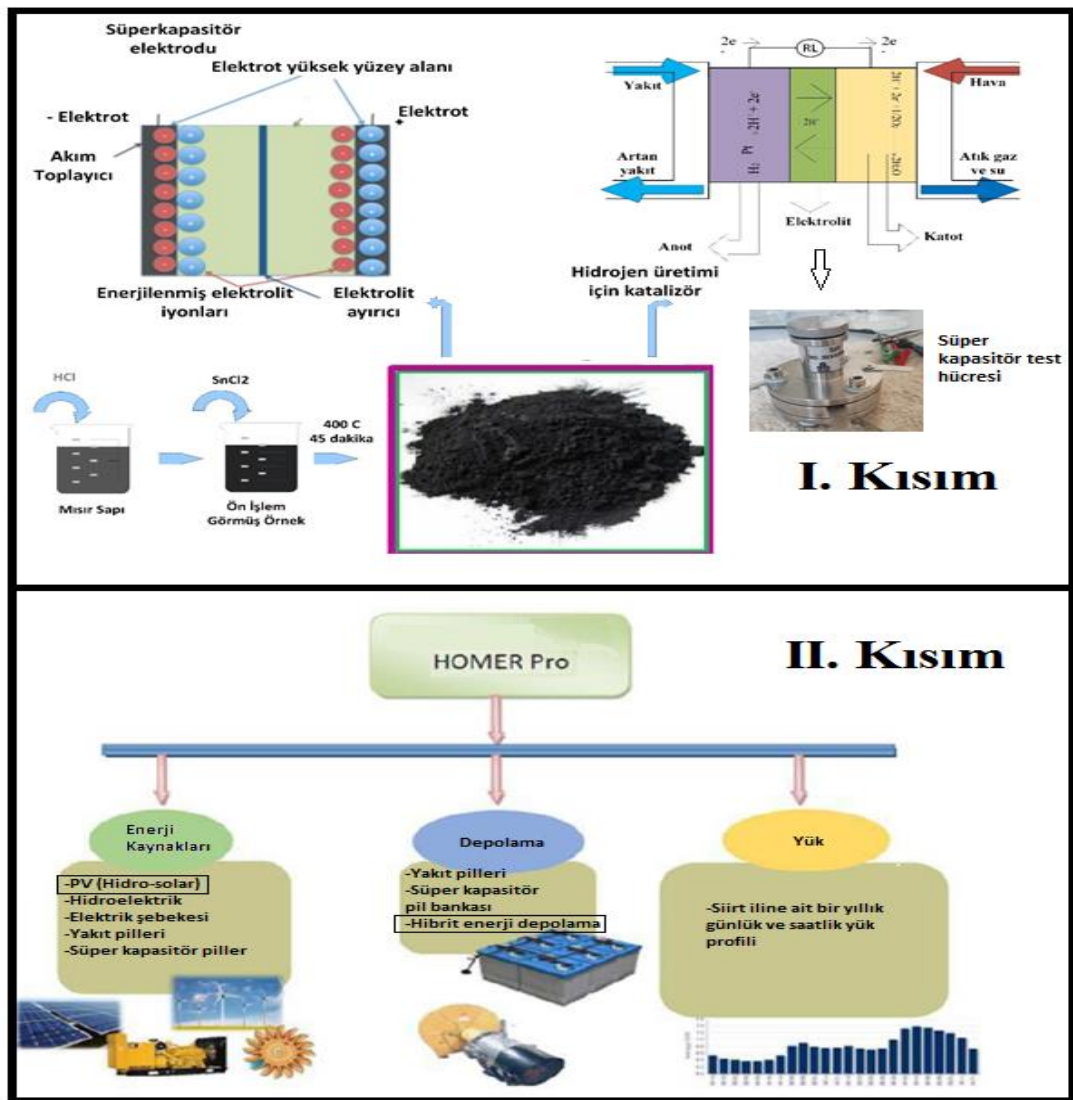
uygulandığı bir pil/YP'nin HSS topolojisini incelemiştir. Pildeki yavaş reaksiyon probleminin üstesinden, hidrojen YP'nin hızlı reaksiyon avantajı ile gelinmiştir. Ayrıca, bu HSS topolojisi, tek başına hidrojen YP'den daha yüksek özgül güç göstermiştir. Mikro şebeke uygulamaları için YP/SC HSS yalnızca YP depolama sisteminden daha iyi performans (%8,5 daha fazla verimlilik) göstermiştir (San Martín ve ark., 2013).

2.1.1.6.1. Hibrit enerji depolama sistemlerinin analizi

Mikro şebekeler alanındaki hibrit depolamaların farklı operasyonel ve teknik yönlerinin araştırılıp geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. HSS boyutlandırma, HSS uygulamaları, HSS konfigürasyonları ve bağlantısı ve HSS kontrol yöntemleri dâhil olmak üzere, mikro şebekeler ve EA'lar gibi HSS uygulamalarının farklı bakış açılarından kapsamlı araştırılması yapılmıştır. Kontrol yöntemleri, kapasite boyutlandırma yöntemleri ve güç dönüştürücü topolojilerinin HSS seçiminde en az bileşenler kadar önemli olduğu vurgulanmıştır. Mikro şebeke ve EA gibi sistemlere uygulanmak üzere HSS'in farklı bölümlerinin kavramsal bir akışına değinilmiştir. Literatür taraması ve mevcut eksikliklerle ilgili olarak, HSS'in gelecekteki eğilimleri ve araştırma ihtiyacı duyulan alanlara değinilmiştir. Sistemlerin enerji depolama sistemi ihtiyacını birden fazla ESS sistemi birleştirilerek hem anlık güç (kısa dönem) hem de enerji yoğunluğunu (uzun dönem) karşılayabilecek hibrit tasarımların ortaya çıkarılabileceği, böylelikle gereksiz şarj/deşarj önlenerek kullanım ömrünün artırılması, maliyetlerin düşürülmesi, şebeke stresinin azaltılması, uygun alan probleminin aşılması, akıllı şebekelerde sistem verimliliğinin artırılması, anlık tepe taleplerinin tıraşlanabilmesi, gereksiz kapasite kullanımının önlenmesi gibi birçok avantaj sağlanabileceği anlaşılmıştır. Gelecekteki malzeme bilimindeki gelişmelerin sonucunda maliyetlerin daha da düşeceği göz önünde bulundurulursa yüksek güç ve enerji yoğunluğunun aynı sistemde sunulabilmesi için YP (yüksek güç yoğunluğu) ve SC (yüksek enerji yoğunluğu) ESS'lerin birleştirilerek elde edilecek yeni sistemin en ideal HSS'ler den biri olacağı kolayca anlaşılabilmektedir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması, yeni çift işlevli bir ESS sistemi tasarımının eldesi için yöntem Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi, deneysel ve benzetim çalışmaları olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, mısır sapı atıkları ve Kalay (Sn) karışımına, asit ve kimyasal maddeler eklenerek bu karışımdan katalizör üretilmiştir. Bu katalizörün NaBH_4 'ten metanoliz yoluyla hidrojen üretiminde kullanılması ve aynı zamanda üretilen katalizörün süper kapasitör hücresi tasarımında elektrot malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Böylece çift işleve sahip yeni bir enerji depolama malzemesiyle prototip bir tasarımın ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. İkinci kısımda ise elde edilen bu ESS'ye ait prototip hücrenin karakteristik verileri, Amerikan Ulusal Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen, HOMER Pro yazılımında seri/paralel yığın şeklinde bağlanarak yeni çift işlevli HSS'nde dahil olacağı bir mikro şebekenin benzetiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

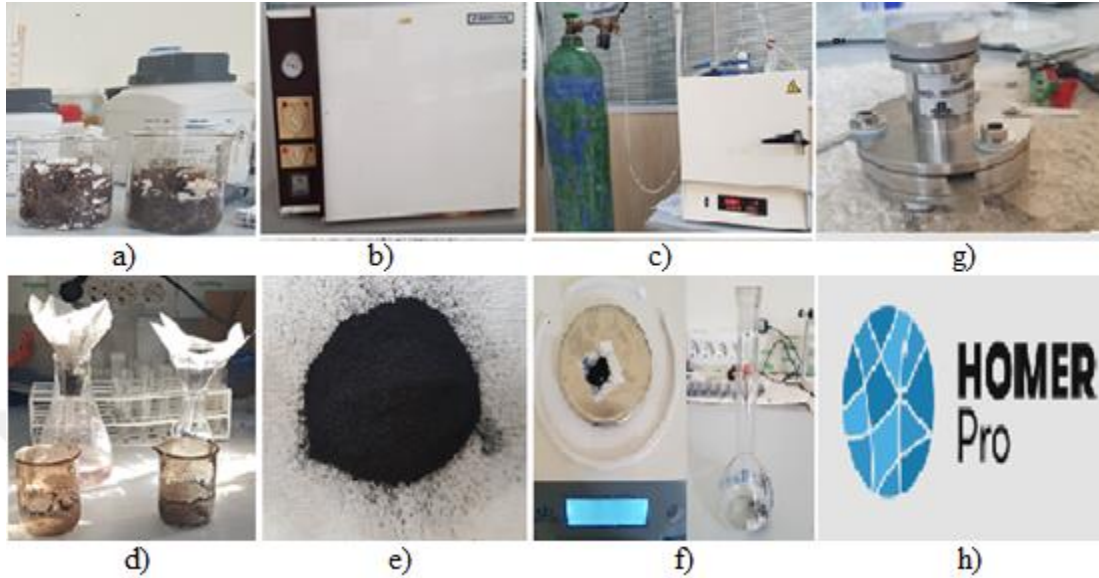


Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan materyal ve yöntemin akış şeması.

3.1. Materyal

Araştırmada, Siirt İl Tarım ve Orman Müdürlüğü'nden temin edilen mısır koçanı atıklarından; hidroklorik protanlama, etüvde kurutma ve yakma, elektromanyetik karıştırma gibi bazı kimyasal uygulamalar sonucunda sentezlenen Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn), SC hücresi elektrot malzemesi ve YP hücresinde metanoliz reaksiyonu için kullanılan katalizör olarak çift işlevli bir şekilde kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 3.2g.'de görülen test kiti ile galvanostatik şarj/deşarj (GCD), döngüsel voltametri (CV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) gibi tekniklerle deneysel olarak elde edilen elektrokimyasal karakteristik verileri HOMER Pro (Şekil 3.2h.)

yazılımında dağıtık üretim içeren örnek bir şebeke uygulamasında ESS hücresinin tanımlanmasında kullanılmıştır.



Şekil 3.2. HSS tasarımında gerçekleştirilecek işlemler a) Mısır sapının kimyasal malzemelerle karıştırılması, b) Kurutma işlemi, c) Yakma işlemi, d) Yıkama işlemi, e) Numunenin toz haline getirilmesi f) Katalizör ve elektrotun deney için hazırlanması, g) Elektrotun süper kapasitör test kiti, h) Elde edilen karakteristik verilerin işleneceği benzetim yazılımı.

Şekil 3.2a.'de görüldüğü üzere HCl (hidroklorik asit) ve Sn ile işlenmiş katalizörlerin hazırlanmasında kullanılan mısır sapı atıkları, ilk aşamada HCl ve Sn işlenecektir. Daha sonra malzemelerin kurutulması amacıyla etüv ve yakılma işlemleri için kül fırınına ihtiyaç olacaktır (Şekil 3.2b. ve Şekil3.2c.). Bu işlemlerden sonra elde edilen numunenin saf su ile yıkanması gerekmektedir (Şekil3.2d.ve Şekil 3.2f.). Daha sonra katalizörün ve elektrot malzemesinin hazırlanması amacıyla numune ezilerek toz haline getirilmesi gerekmektedir (Şekil3.2e.).

3.2. Yöntem

3.2.1. Kullanılan araç-gereçler

Çalışmada kullanılan ekipmanlar, kullanılan kimyasal malzemelerin ölçümü amacıyla OHAUS Scale PA214 hassas terazi, karışımların homojen olarak düzenlenmesi amacıyla ONILAB MS- H280- Pro manyetik karıştırıcı, numunelerin temizlenmesi

amacıyla DAIHAN MaXturdy™ Digital Precise Shaking Water Bath ultrasonik karıştırıcı ve banyo, numunelerin nemlerinin alınması ve kurutulması amacıyla Elektro-Mag etüv, oluşturulan karışımın üzerine püskürtme yoluyla serilmesi için nikel köpük, karışımın yakılarak karbonize hale gelebilmesi amacıyla Magma Therm kül fırını, katalizörlerin tekrar uygulanabilirlik deneylerinde ayrıştırılarak katı duruma gelebilmesi amacıyla Hettich Universal 320R santrifüj cihazı, çift işlevli malzemenin elektro kimyasal karakteristik verilerinin test ve analizi amacıyla Nanografi-Alüminyum Three-Electrode Split Test Cell- NG08BE0501 kapasitör test hücresi ve elde edilen deneysel verilerle bir hibrit enerji depolaması hücresinin tasarlanarak mikro şebekede benzetimin gerçekleştirilebilmesi amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır.

3.2.2. Kullanılan kimyasal çözeltiler

Sigma ve Aldrich firmasından temin edilen yüksek saflık oranlarına sahip kimyasal maddeler çalışmada kullanılmıştır. Çözeltilerin hazırlanma şekli ve kullanılan katkı kimyasalları aşağıda belirtildiği gibi gerçekleşmiştir;

Sodyum bor hidrür (NaBH_4): Mısır sapı atıklarından katalizör ve süper kapasitör hücresi elektrot üretimi için yapılan deneylerde hidrojen kaynağı olarak kullanılmıştır.

HCl ve SnCl_2 solüsyonu: 5 gr mısır üzerine sabit 20 mL (1M-7M aralığında) HCl ve %30 SnCl_2 (w/w) metal tuzu ile ayrı ayrı eklenmiş ve karıştırılmıştır.

Kalay (Sn): Metal yüklü mısır sapı katalizör ve süper kapasitör hücresinin elektrot malzemesinin hazırlanmasında metal kimyasal katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Azot tüpü (N_2): Bünyesinde katalizör ve süper kapasitör hücresi elektrot malzemesi olabilme özelliklerini ihtiva eden malzemenin karbonizasyon işleminde yüksek yüzey alanı elde edebilmek için inert ortamın sağlanması amacıyla kullanılmıştır.

Metanol (CH_3OH): Sigma-Aldrich firmasından temin edilen NaBH_4 'ten hidrojen üretimini hızlandırmak amacıyla çözücü olarak kullanılmıştır.

Polyvinylidene flüoride (PVDF): Mısır sapından elektrot malzemesi ve katalizör hazırlanmasında bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır.

N-Metil-2-pirolidon (NMP): PVDF'nin çözücüsü olarak kullanılmıştır.

Potasyum hidroksit (KOH): Mısır sapı katalizörlerinden elektrot malzemesi hazırlanmasında çözücü olarak karışıma eklenmiştir.

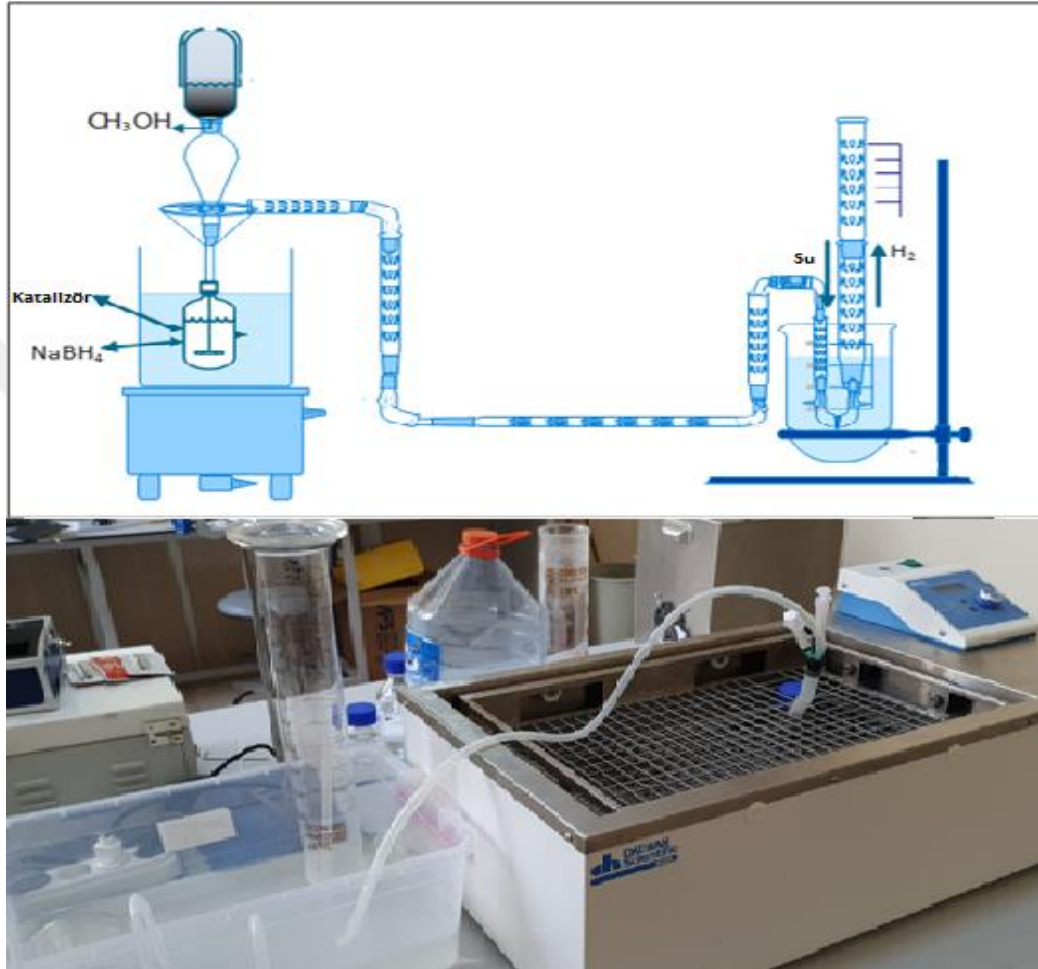
Aktif karbon: Mısır sapından hazırlanan katalizörlerin aynı zamanda elektrot malzemesi olarak hazırlanmasında iletkenliği artırmak için karışıma eklenmiştir.

3.2.3. Mısır sapı atığından hidrojen üretimi için Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün hazırlanması

İlk olarak Siirt İl Tarım ve Orman Müdürlüğü'nden temin edilen mısır sapı biyokütle ile yüklenmiş ve HCl ile muamele edilerek 80 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numune yanma işlemine tabi bırakılmak için azot ortamındaki kül fırınında tutulmuştur. Tüm bu ısıl işlemlerin ardından numune saf su ile yıkanıp tekrar etüvde kurutulmuştur. Katalizörün ve elektrot malzemesinin hazırlanması amacıyla numune ezilerek toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen numune, katalitik aktivitesi en yüksek çıktılara sahip malzemenin elde edilebilmesi amacıyla farklı metal, asit konsantrasyonlarına ve farklı yanma süreleri ile farklı yanma sıcaklıklarına tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, destek materyali olarak kullanılan mısır sapını protonlamak için hidroklorik asit kullanılmıştır. Her deney için 5g mısır sapı üzerine 20 mL HCl (1M-7M aralığında) ve %30 SnCl_2 (w/w) metal tuzu ayrı ayrı ilave edilmiş ve 15 dakika 200 rpm'de karıştırılmıştır. Daha sonra fırında 80 °C'de 24 saat kurutma işlemi için bekletildikten sonra 400 °C'de 45 dakika kül fırınında yakılmıştır. Yakılan numuneler distile su ile yıkanmış ve tekrar etüvde kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra diğer

deneyler için 5 g mısır sapı üzerine 20 mL 3M HCl ve farklı oranlarda SnCl_2 metal tuzu (%10, %20, %30, %40 ve %50) ilave edilmiştir. Karıştırılarak elde edilen (200 rpm, 15 dakika) yeni karışım (400 °C'de 45 dakika) fırında yakılmıştır.



Şekil 3.3. Hidrojen üretimi için katalizör deney düzeneğinin şematik gösterimi ve fotoğrafı

Sentezlenen katalizör ve elektrot malzemesi Mısır sapı-HCl-Sn olarak adlandırılmıştır. Metanoliz reaksiyonunda sodyum bor hidrür (NaBH_4) kullanılarak mısır sapı-HCl-Sn katalizör ve elektrot malzemesinin performansları araştırılmış ve en iyi metal oranı %20 olarak bulunmuştur. Metanoliz reaksiyonları ile Mısır sapı-HCl-Sn malzemesinin aktivitesini test etmek için yanma sıcaklığı deneyleri 200, 300, 400 ve 500 °C sıcaklıklarda tekrarlanmıştır. Optimum yanma süresinin belirlenmesi için ise 30, 45, 60 ve 75 dk. yanma süreleri kullanılmıştır. Metanoliz reaksiyonunun zamana bağlı hidrojen üretim hızı, 0,25 g NaBH_4 , 10 ml metanol çözeltisi içinde 0,1 g katalizör ve

30°C deney ortamı sıcaklığında ölçülmüştür. Ayrıca sentezlenen malzemenin karakterizasyonu için FTIR, XRD ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 3.3.'de görülen reaksiyon kabı, termostat ve gaz toplama ünitesinden oluşan bir deney düzeneği bulunmaktadır. Reaksiyon kabı ve gaz toplama ünitesi arasındaki bağlantı silikon bir hortumla sağlanmıştır. Reaksiyon kabında bulunan, metanol çözeltisi, katalizör ve NaBH_4 'ün kimyasal aktivitesi sonucunda hidrojen çıkışı gözlemlenmektedir.

3.2.4. Mısır sapı atığından süper kapasitör elektrotlarının hazırlanması

Süper kapasitör elektrotları için deneylerin performansına göre en iyi Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü aktif malzeme olarak kullanılmıştır. Elektrot karışım oranları sırasıyla, %80, %10 ve %10 olan, aktif malzeme olarak Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü, iletken katkı maddesi olarak nanotüp ve bağlayıcı olarak poliviniliden florür (PVDF) olarak belirlenmiştir (Kang ve ark., 2020). PVDF'nin çözücüsü olarak N-Metil-2-pirolidon (NMP) kullanılmıştır. Daha sonra Şekil 3.4.'te görüldüğü üzere bu karışımın iki saat boyunca ultrasonik ve manyetik olarak karıştırılmasıyla homojen bir bulamaç elde edilmiştir.



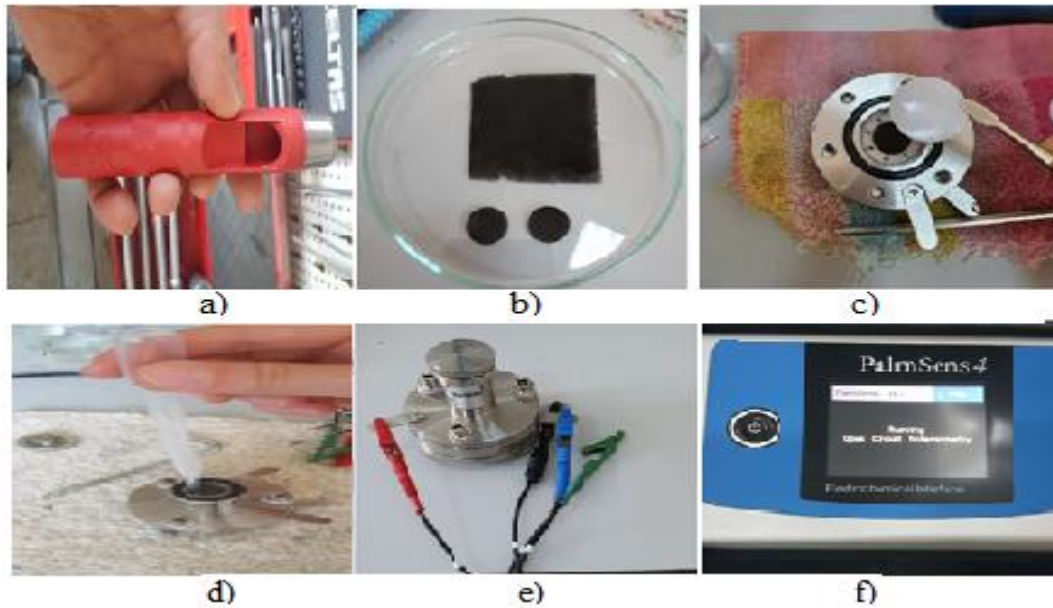
Şekil 3.4. Elektrot malzemesinin eldesi için uygulanan ultrasonik ve manyetik karıştırma işlemi.

Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi elde edilen bu karışım nikel köpük akım toplayıcı üzerine kaplanmıştır. NMP, elektrotların vakum altında 80 °C'de 24 saat kurutulmasıyla çıkarılmıştır.



Şekil 3.5. Elektrot malzemesi için elde edilen karışımın nikel foam üzerine püskürtülme yöntemiyle uygulanması.

Şekil 3.6a. ve Şekil 3.6b.'de gerçekleştirilen işlemlerle 15 mm ve 24 mm iki özdeş elektrot ve ince bir kâğıt ayırıcı daire şeklinde kesilerek tasarlanmıştır. Hem elektrotlar hem de ayırıcı, hücrenin montajından önce 6M KOH elektrolit çözeltisi ile ıslatılmıştır (Şekil 3.6d.). Kâğıt ayırıcı, onları ayrı tutmak için iki elektrot arasına yerleştirilip süper kapasitör hücre, sızdırmaz bir alüminyum test aparatına yerleştirilmiştir (Şekil 3.6c.).



Şekil 3.6. a,b) Elektrotların oluşturulması, c) Elektrotların test hücreğine yerleştirilmesi, d) Elektrotlara elektrolit sıvısı uygulanması, d) Alüminyum kapasitör test hücresi bağlantıları, e) Test hücresi yazılım ara yüzü.

Daha önce bahsedilen galvanostatik yüklü deşarj (GCD), döngüsel voltametri (CV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri hücrenin elektrokimyasal karakterizasyonunu elde etmek için kullanılmıştır. Testler, oda sıcaklığında iki elektrotlu hücre konfigürasyonu ile ortam koşulları altında gerçekleştirilmiştir. CV testleri sırasıyla 10, 25, 50, 100, 250 mV/s içeren farklı tarama hızlarında analiz edilmiştir. EIS analizi, 5 mV genlik ve 0 V DC sapma ile gerçekleştirilmiştir. GCD testleri belirtilen frekans aralığında (1 ila 30 000 Hz) ve sabit akım yoğunluklarında (0,5, 1,0, 2,0 A/g) gerçekleştirilmiştir.

3.2.5. Analizler

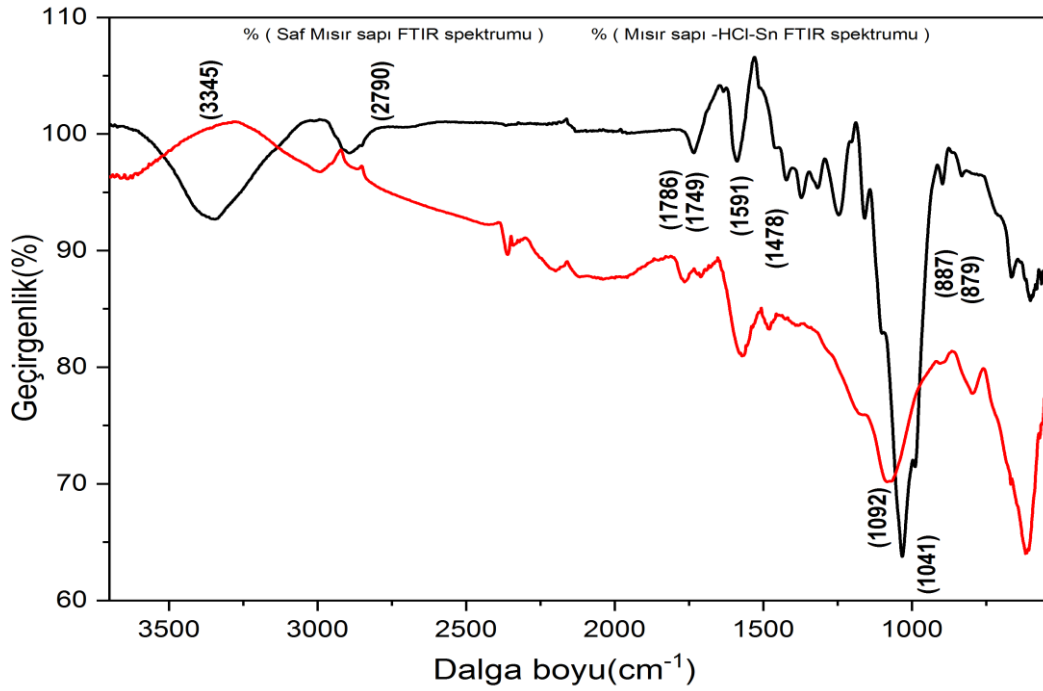
Katalizör üretimi için FTIR, XRD, SEM-EDX, metal ve asit oranı ile yanma süresi ve sıcaklığı gibi kimyasal analizlerin yanında elektrot üretimi içinde GCD, EIS ve CV gibi birtakım elektriksel analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2.5.1. Mısır sapı-kalay (sn) destek malzemesinin HCl ile muamele edilerek sentezlenen katalizörün hidrojen üretiminde kullanımı

3.2.5.1.1. Mısır sapı-HCl-kalay (Sn) katalizörünün karakterizasyonu

- FTIR analizi

Mısır sapı-Kalay (Sn) ve hidroklorik asit ile muamele edilmiş Mısır sapı-Kalay (Sn) katalizörünün kimyasal yapısı ve fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için 2790 cm^{-1} ile 3345 cm^{-1} aralığındaki Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) spektrumu kaydedilmiştir (Şekil 3.6.). Elde edilen FTIR spektrumları detaylı olarak incelenmiş ve numunelerin kimyasal yapıları karşılaştırılmıştır. Daha sonra literatürde mevcut olan veriler ışığında spektrum sonuçları yorumlanmıştır.



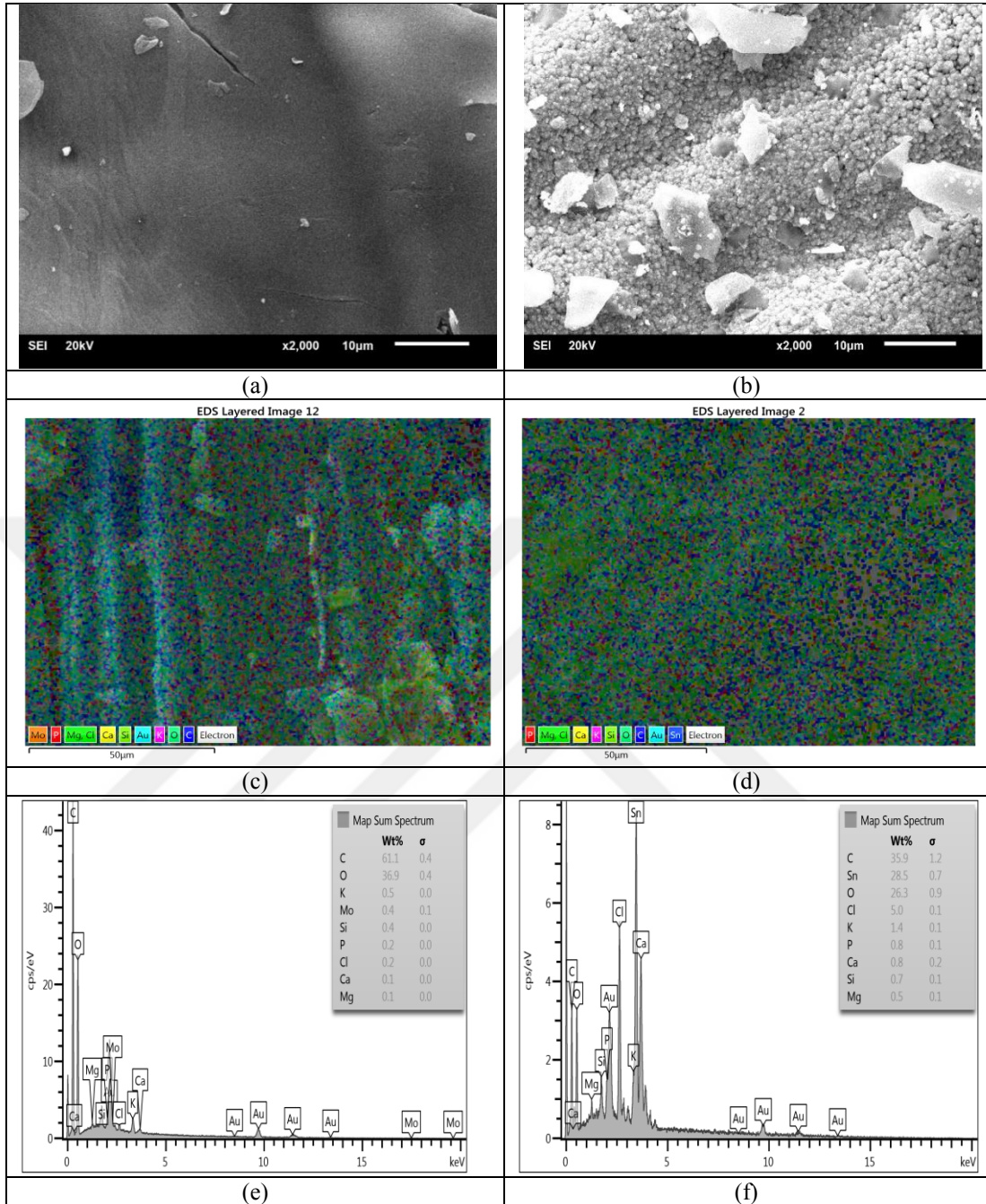
Şekil 3.7. Saf mısır sapı (siyah çizgi) ve Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün (kırmızı çizgi) FTIR spektrumları.

Saf mısır sapı (siyah çizgi) ve Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün (kırmızı çizgi) FT-IR spektrumu Şekil 3.7.'de gösterilmektedir. Mısır sapı için dalga boyu tepe noktası FT-IR spektrumları sırasıyla OH stresinin 3345 cm⁻¹'de ve CH stresinin 2790 cm⁻¹'de görülmektedir. Ancak Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün asitle muamelesi ve yanmanın etkisiyle bu piklerin ve fenolik yapıların ortadan kalktığı gözlemlenmektedir. Ayrıca her iki spektrumda da görülen, C=O ester bağının 1749, 1786 cm⁻¹'de ve C=C aromatik halkalarının 1591, 1478 cm⁻¹'de görülen tepe noktaları germe pikleridir. Aynı zamanda kırmızı ve siyah spektrum çizgisinde, glukan ve ksilana ait, C-O-C stresinin 1044 ve 1092 cm⁻¹'de tipik sinyali olabilecek güçlü absorpsiyonlar içeriyor gibi görünmektedir (Tran ve ark., 2018). Selüloz ve hemiselülozdaki şeker birimleri arasındaki glikozidik bağlantılar nedeniyle 879 ve 887 cm⁻¹'de absorpsiyon etki gösterdiği anlaşılmaktadır (Shi ve ark., 2013).

- SEM-EDX analizi

Saf mısır sapı SEM görüntüleri (a), Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM görüntüleri (b), saf mısır sapının SEM-EDX görüntüleri (c, e) ve Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün

SEM-EDX görüntüleri (d, f) Şekil 3.8.'de sunulmuştur. Saf mısır sapının (Şekil 3.8a.) SEM görüntüleri gözeneksiz düz bir yüzeye sahipken, kalay metali ile işleminden geçirilen Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü (Şekil 3.8b.) yanma işleminin etkisiyle birlikte daha fazla gözenekli bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Hazırlanan karışıma iletken parçacıkların eklenmesinin karışımı daha iletken hale getirdiğini yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur (Müller ve ark., 2011). Çalışmaya ait EDX spektrumları bu bağlamda incelendiğinde Sn elementinin varlığı bu etkileşimin gerçekleştiğini açıkça göstermektedir. İki SEM görüntüsü arasındaki farkın nedeni, Sn metalinin mısır sapının yapısına termal etki ile yapışmasıdır. Bu durum saf mısır sapı ve Mısır sapı-HCl-Sn'nin SEM görüntülerinde beyaz noktalar şeklinde belirlemektedir. Yanmanın düzensiz kompakt bir yapıya sahip olduğu ve parçacıkların pürüzsüz bir yüzeye sahip taneler gibi görüldüğü görüntülerden anlaşılmaktadır. Beyaz noktalar, numune üzerinde yapılan aktivasyon işlemlerine bağlı olarak yüzeyde inorganik bileşikler oluştuğunu göstermektedir. Beyaz noktalarla ilgili benzer sonuçlar Jamie ve ark. tarafından da elde edilmiştir (Jamil ve ark., 2020). SEM-EDX görüntüleri (Şekil 3.8e.) incelendiğinde saf mısır sapının C (%61,1), O (%36,9), K (%0,5), Mo (%0,5), Si (%0,4), P (%0,2), Cl (%0,2), Ca (%0,1) ve Mg (%0,2) içerdiği gözlenmektedir. Bunun yanında Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM-EDX görüntüleri (Şekil 3.8f.) incelendiğinde C (%35,9) ve kalay (%28,5) gibi önemli bileşenlerle kaplandığı görülmektedir. Mükemmel elektriksel ve mekanik özellikleri göz önüne alındığında, karbon nanotüpler (CNT'ler) artık süper kapasitör malzemeleri hazırlamak için en yaygın teknolojilerin başında geldiği bilinmektedir. Kalay metalleri, Şekil 3.8c. ve Şekil 3.8d.'den anlaşılaacağı üzere Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün yüzeyinde homojen olarak dağılmıştır (Zhai ve ark., 2018).

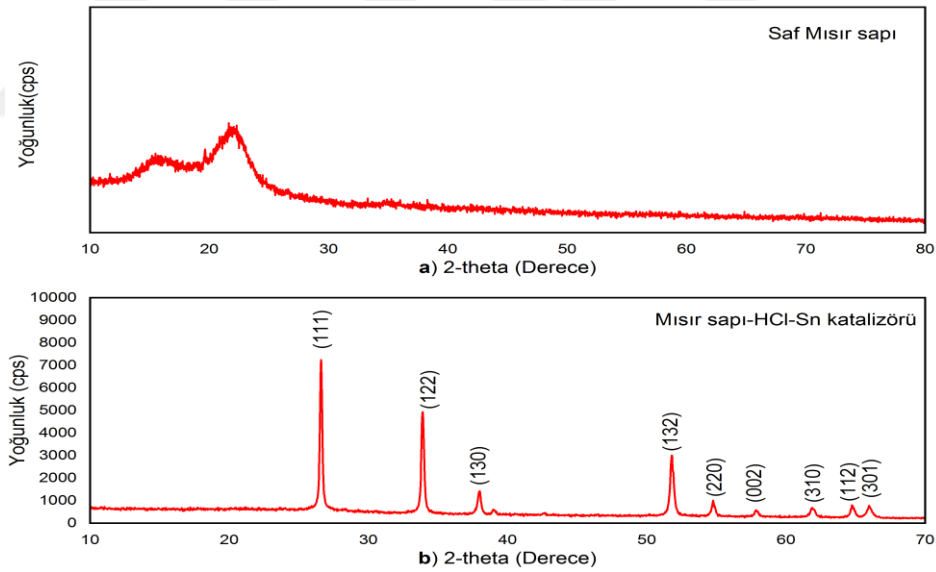


Şekil 3.8. (a) Saf mısır sapının SEM görüntüleri, (b) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM görüntüleri, (c,e) Saf mısır sapının SEM-EDX görüntüleri (d, f) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün SEM-EDX görüntüleri.

- XRD analizi

Saf mısır sapı atığının ve kalay karışımı ile yüklenip HCl ile muamele edilmiş katalizörünün yüzeylerine ait fazlarını ve yapılarının analizi amacıyla X-ışını güç difraktometresi (XRD analizi) kullanılmıştır. $2\theta = 4^\circ\text{-}80^\circ$ tarama aralığında işlenen saf mısır sapı ve Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü için XRD desenleri Şekil 3.9.'de verilmiştir.

Saf mısır sapı için, sırasıyla yaklaşık olarak $2\theta=15,5^\circ-21,8^\circ$ 'de tipik selülozun iki kırınım zirvesi gözlemlenmektedir (Ali ve ark., 2019, Tran ve ark., 2018). Şekil 3.9a.'da görüldüğü gibi, zayıf kırınım tepeleri, numune yapısının amorf olduğunu göstermektedir. Bu oluşumun nedeni selüloz zincirinin dehidrasyonundan kaynaklanmakta veya lignin polimerize olmuş olabilir. Malzemenin kristal yapısı bozulmuş ve amorf hidrokarbon yapısı belirlenmiştir (Mengstie ve Habtu, 2020). Ancak Şekil 3.9b.'de görüldüğü gibi saf mısır sapının hidroklorik asit ile muamelesi ve yakma işlemi sonrasında selüloz yapısına ait bu karakteristik pikler Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün yüzeyinde kaybolmaktadır. Ayrıca Şekil 3.9b.'de keskin piklerin kalay metali olduğu tespit edilmiştir (Tazikeh ve ark., 2014). XRD desenleri (111), (122), (130), (132), (220), (002), (310), (212) ve (301)'e karşılık gelmektedir (Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi (JCPDS) no:4-673). Sonuç olarak saf mısır sapının kristal yapısının asit ilavesi ve yakma işleminden sonra amorf yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir (Fangaj ve Ceyhan, 2020, Kaya, 2020).

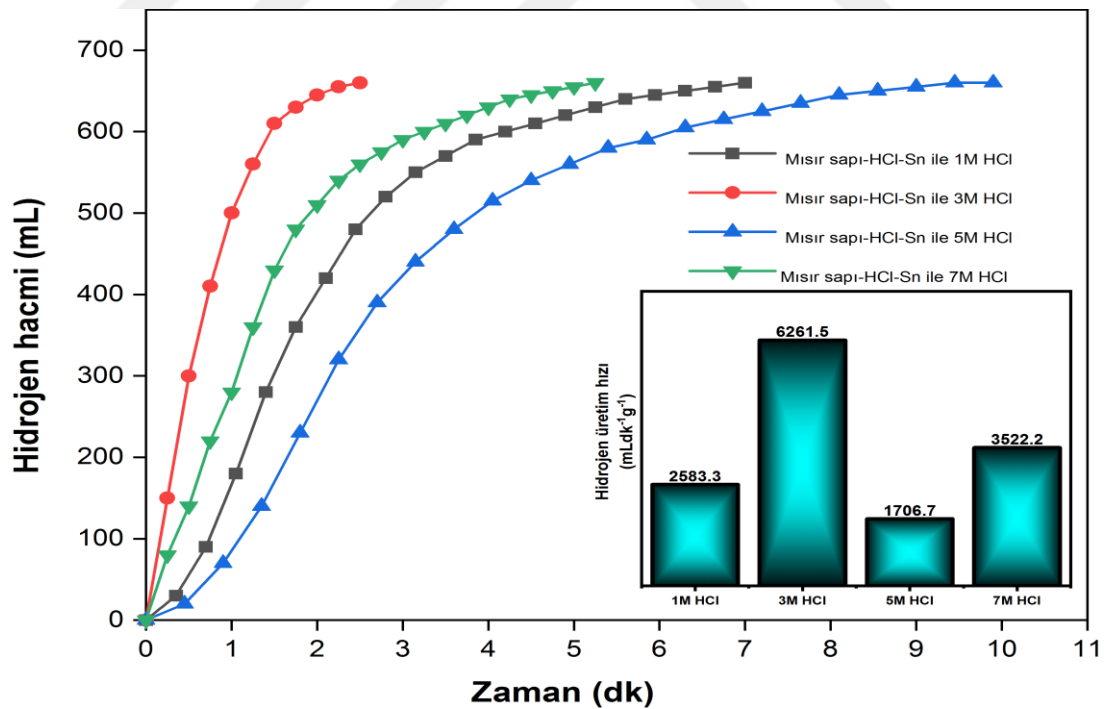


Şekil 3.9. XRD analizinin sonuçları (a) Saf mısır sapı (b) Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü.

3.2.5.1.2. Asit konsantrasyonunun metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi

En fazla verim elde edilen asit oranının tespit edilebilmesi amacıyla artan HCl konsantrasyonlarında muamele edilerek hazırlanan Mısır sapı-HCl-Sn katalizörlerinin metanoliz reaksiyonunda hidrojen üretim hızına etkisi araştırılmış ve Şekil 3.10.'da

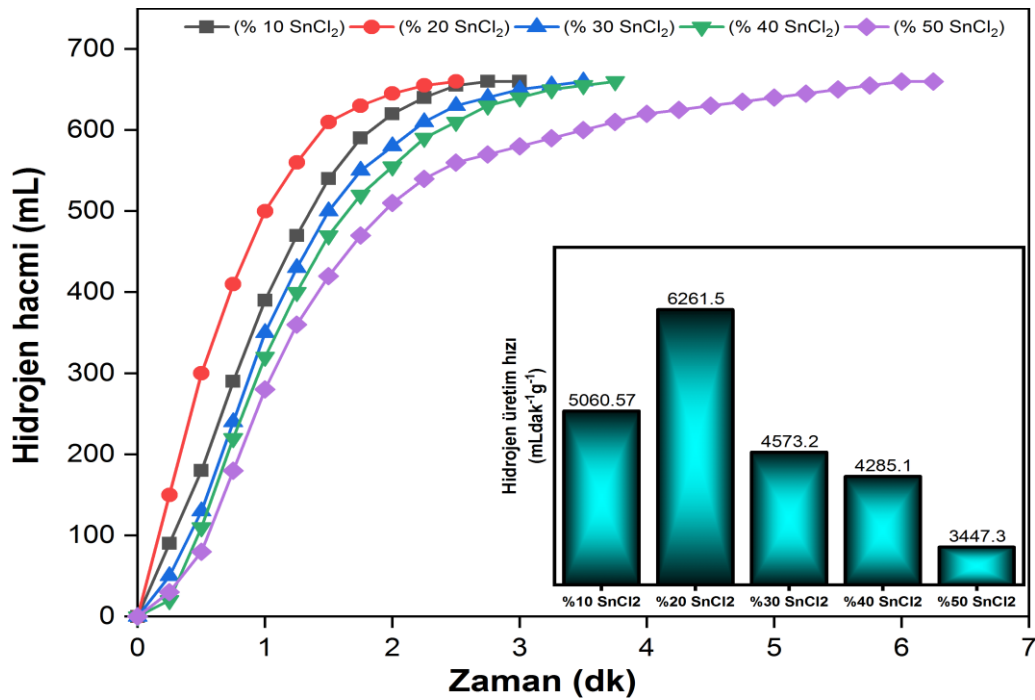
gösterilmiştir. 3M HCl ile muamele edilmiş Mısır-HCl-Sn katalizörünün reaksiyon tamamlama süresi 2,5 dakika olup 1M, 5M ve 7M HCl ile muamele edilmiş katalizörler için reaksiyon tamamlanma süreleri ise sırasıyla 7, 9,9 ve 5,3 dakika olarak elde edilmiştir. Ayrıca hidrojen üretim oranları açısından 2583,3 (1M HCl), 6261,5 (3M HCl), 1706,7 (5M HCl) ve 3522,2 (7M HCl) mL.dak.⁻¹g.kat⁻¹ belirlenmiştir. 3M HCl ile muamele edilen katalizörün Hidrojen Üretim Hızı (HPR) açısından en etkili asit oranı olduğu katalizörün yüzeyine bağlı H⁺ grubunun ve selülozik esaslı atık malzemelerden tespit edilmiştir. Hazırlanan katalizörleri protonlamak için kullanılan HCl asidinin yapısında bulunan hidrojenin NaBH₄ metanolizinin hızlanmasında aktif rol oynadığı bilinmektedir (Fangaj ve Ceyhan, 2020). Bu arada bu kilit rol sayesinde geliştirilecek yeni çift fonksiyonlu hibrit enerji depolama sisteminin planlı tasarımı ile dağıtılmış üretim sistemi için daha fazla verimlilik, istikrar ve güvenilirlik sağlayabileceği öngörülmektedir (Huang ve ark., 2006). HCl iletimi, reaksiyonun tamamlanma süresinin belirlenmesinde hayati bir rol oynadığı bilinmektedir (Fangaj ve Ceyhan, 2020, Kaya, 2020).



Şekil 3.10. Farklı HCl konsantrasyonları içeren ortama ait HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH₄, katalizör = 0,1 g, T = 30 °C, V_{metanol} = 10 mL).

3.2.5.1.3. Metal konsantrasyonunun metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi

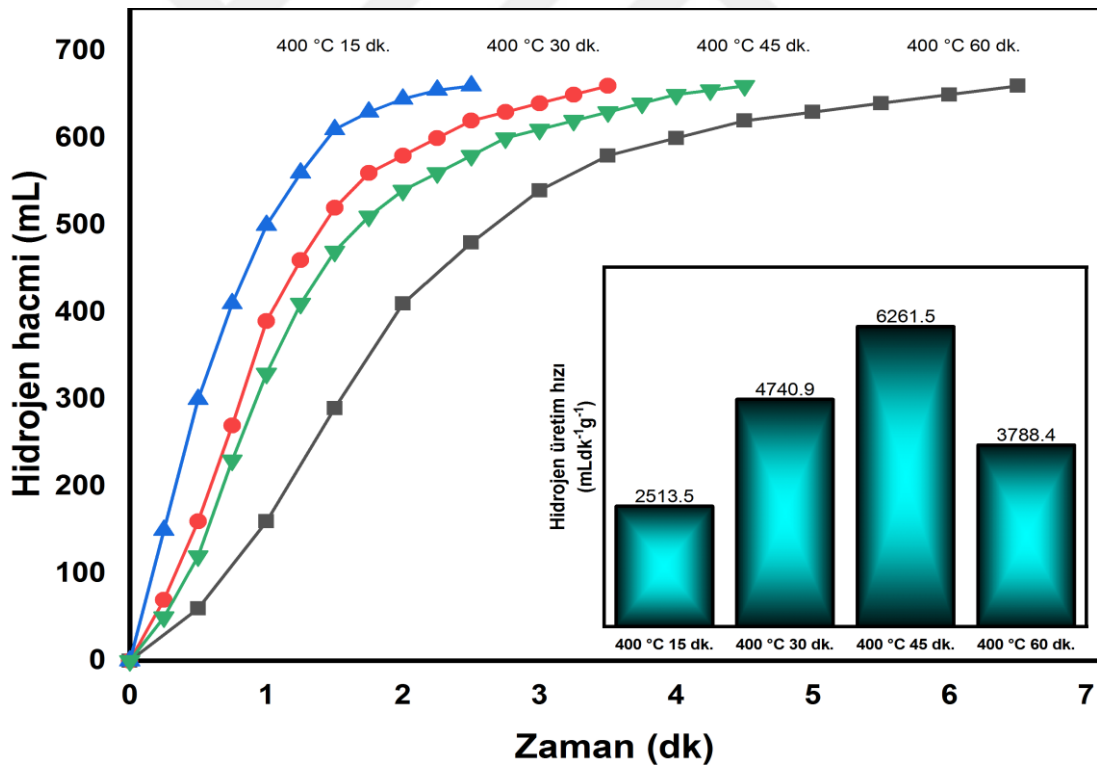
Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün performans deneyleri, 0,25 g NaBH₄'ün 10 mL metanol çözeltisi ile 30 °C'de karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu reaksiyon sonucunda elde edilen hidrojen gazının hacmi zamana karşı ölçülmüştür. Sodyum bor hidrürün metanoliz reaksiyonunda farklı metal oranları ile hazırlanan Mısır sapı-HCl-Sn katalizörlerine ait hidrojen gazı çıkış hacimleri ve HPR'si Şekil 3.11.'de gösterilmektedir. Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü için HPR açısından en iyi sonucun %20 Sn içeren katalizör olduğu belirlenmiştir. Bu katalizör için reaksiyonun tamamlanma süresi yaklaşık 2,5 dakika iken, artan metal oranı olarak %10, %30, %40 ve %50 Sn²⁺ içeren katalizörler için reaksiyon tamamlanma süreleri ise sırasıyla, 3, 3,5, 3,75 ve 6,25 dakika olarak belirlenmiştir. Bu hidrojen üretim hızı ve hacmi, ani ihtiyaç duyulan kesintili dağıtık üretim içeren şebekesi için bir destek üretim sistemi gibi kullanılarak önemli problemlerin üstesinden gelinebileceği düşünülmektedir (Huang ve ark., 2006). Daha sonraki deneylere en iyi metal oranı olarak belirlenen %20 Sn²⁺ ile devam edilmiştir.



Şekil 3.11. Farklı Sn²⁺ konsantrasyonları içeren ortama ait HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH₄, katalizör = 0,1 g, T = 30 °C, V_{metanol} = 10 mL).

3.2.5.1.4. Farklı yanma sürelerinin metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi

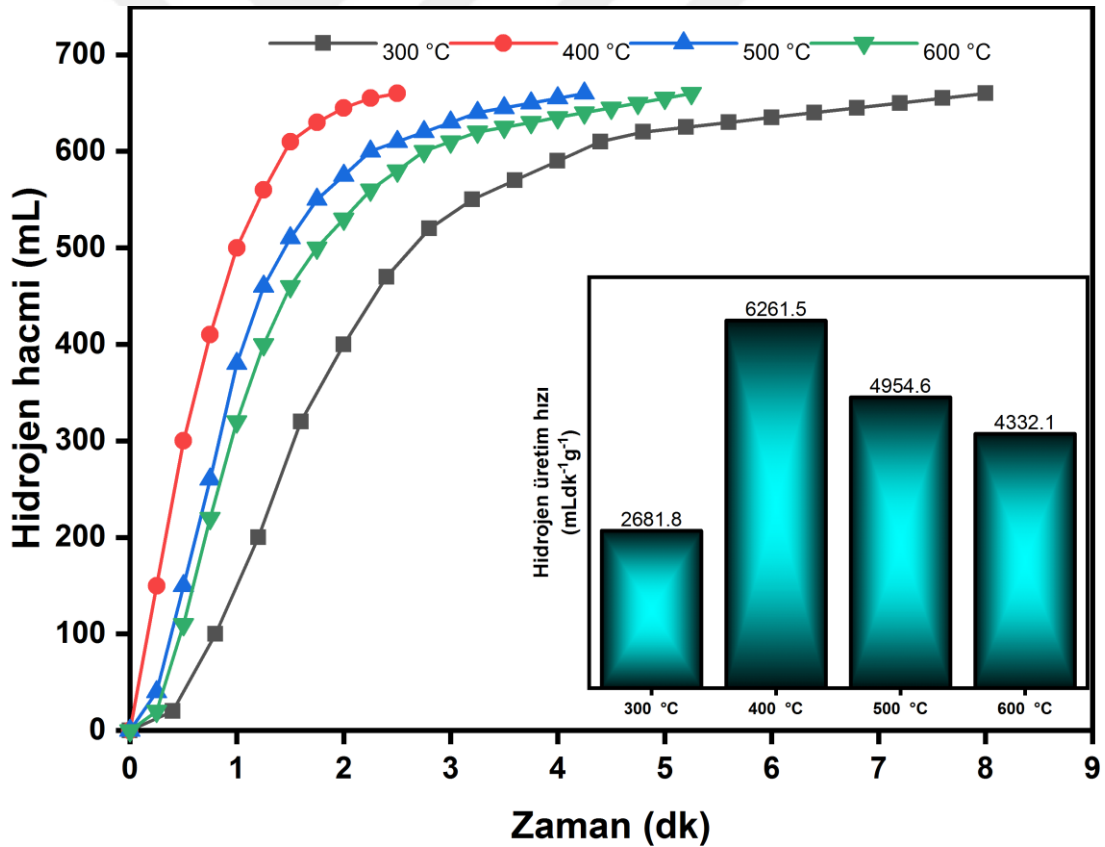
3M HCl ile muamele edilmiş Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün farklı yanma sürelerinin metanoliz reaksiyonunun performansına etkisi Şekil 3.12.'de verilmiştir. Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün yanma sıcaklığı 400 °C'de 15, 30, 45 ve 60 dakika olmak üzere dört farklı yanma süresinde gerçekleştirilmiştir. %2,5 NaBH₄ metanoliz reaksiyonu, Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü 400 °C'de 45 dakika yakılarak 2,5 dakikada tamamlanırken, diğer yanma süreleri 15, 30 ve 60 dakika için reaksiyon sırasıyla 6,5, 3,5 ve 4,5 dakikada tamamlanmıştır. Yanma sıcaklığı süresi (15, 30, 45 ve 60 dk.) arttıkça HPR'nin belirli bir noktaya kadar arttığı, sıcaklık süresi 60 °C olduğunda ise HPR'nin düştüğü belirlenmiştir. 400 °C'de 45 dakika yakılan Mısır sapı-HCl-Sn katalizörü üstün performans göstermiş ve maksimum HPR miktarı olan 6261,5 mLdk⁻¹g⁻¹ olmuştur.



Şekil 3.12. Farklı yanma süreleri için HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH₄, katalizör = 0,1 g, T = 30 °C, V_{metanol} = 10 mL).

3.2.5.1.5. Farklı yanma sıcaklıklarının metanoliz reaksiyonu üzerindeki etkisi

Mısır sapı-HCl-Sn'nin yanma sıcaklığının katalizör performansına etkisi Şekil 3.13.'de verilmiştir. Mısır-HCl-Sn katalizörü farklı sıcaklıklarda (300, 400, 500 ve 600 °C) 45 dakika boyunca yakılmış ve en iyi yanma sıcaklığı 400 °C olarak belirlenmiş olup, NaBH_4 metanoliz reaksiyonunun tamamlanma süresi 2,5 dakika sürmüştür. Diğer sıcaklıklarda (300, 400 ve 600 °C), sırasıyla 8, 4,3 ve 5,3 dakika olmuştur. Yanma sıcaklığı (300, 400 ve 500 °C) arttıkça HPR'nin belirli bir noktaya kadar arttığı, sıcaklık 500 °C olduğunda ise HPR'nin düştüğü tespit edilmiştir. 400 °C'de en yüksek sonuç için HPR $6261,5\text{mLdk}^{-1}\text{g}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Daha sonraki deneylere yanma sıcaklığı 400 °C olarak devam edilmiştir.

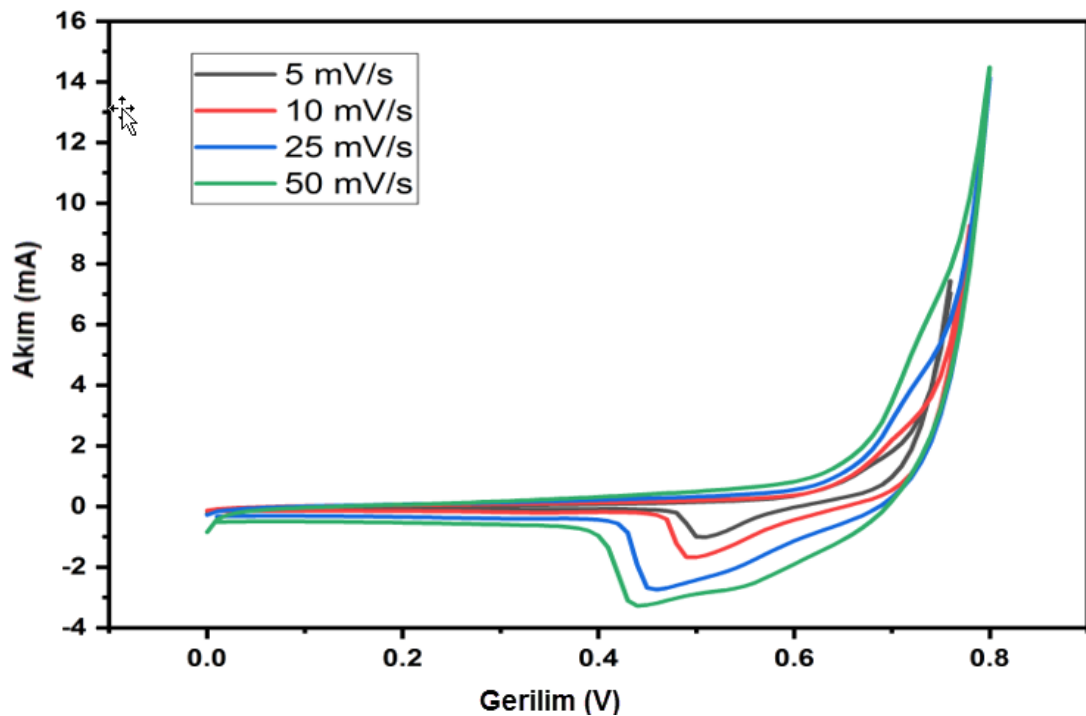


Şekil 3.13. Farklı yanma sıcaklıkları için HPR'nin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi (Reaksiyon Koşulları: %2,5 NaBH_4 , katalizör = 0,1 g, T = 30 °C, V_{metanol} = 10 mL).

3.2.5.2. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) destek malzemesinin süper kapasitörler için elektrot malzemesi olarak kullanımı

3.2.5.2.1. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) süper kapasitör elektrotunun elektrokimyasal karakterizasyonu

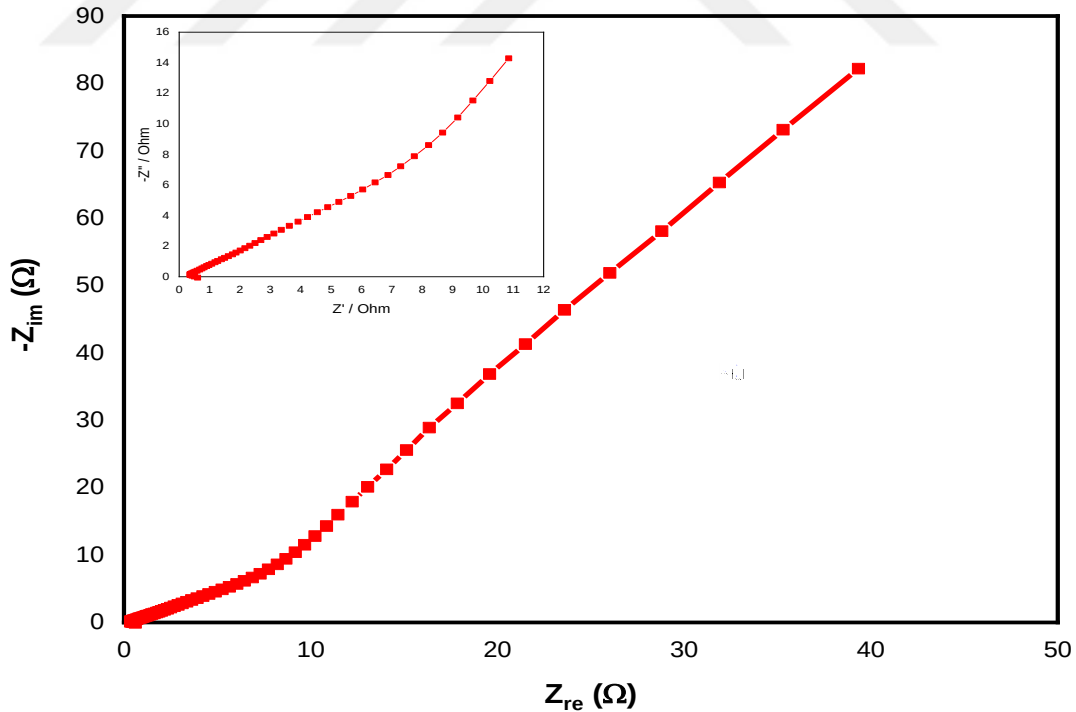
Mısır sapı-HCl-Sn katalizör elektrotlarının 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, ve 50 mV/s tarama hızlarında CV eğrileri Şekil 3.14.'de verilmiştir. CV eğrileri yarı dikdörtgen şeklinde olmasına rağmen redoks zirveleri gözlemlenmektedir. Bu durum düşük tarama oranlarında iyi kapasitans oranlarını göstermektedir. Etken madde karışımındaki Sn'nin bu redoks piklerine neden olduğu düşünülmektedir. CV eğrileri özellikle düşük tarama hızlarında ideal süper kapasitör eğrilerine yakinken, yüksek tarama hızlarında ise eğriler dikdörtgen yapıdan uzaklaşmaktadır. Kapasitör hücresinin yüksek iç direnci, CV eğrilerinin yüksek tarama hızlarında dikdörtgen yapıdan uzaklaşmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.14. Tasarlanan süper kapasitör hücresi için çeşitli tarama hızlarındaki CV eğrileri.

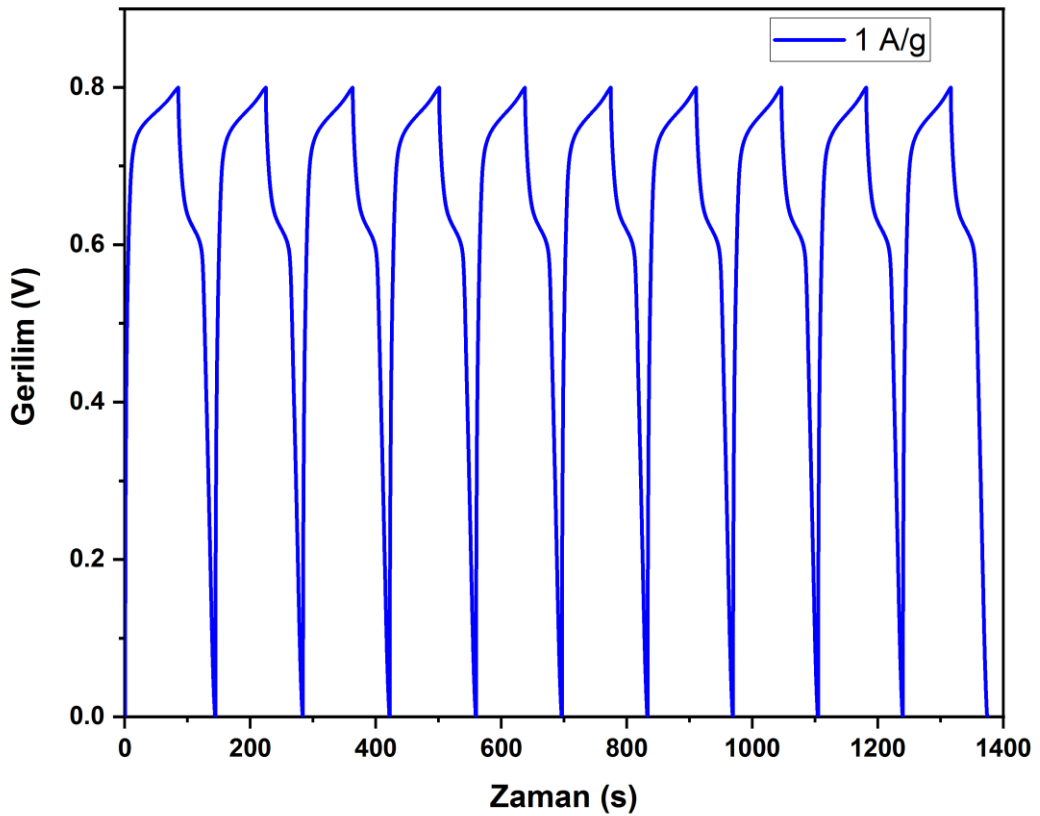
Şekil 3.15., elektrotun Nyquist grafiği olarak elektrokimyasal empedans eğrisini göstermektedir. Yüksek frekansta, yük transfer direncine karşılık gelen yarı daire gözlemlenmemiştir. Eğrinin eğimi, düşük frekanslarda yaklaşık 66° olup, bu açı elektrot malzemesi ile elektrolit arasındaki difüzyon direncinin güçlü olduğunu göstermektedir.

SC'lerin önündeki en büyük problemler yaygın kullanılan sulu (H_2SO_4 , KOH) ve organik (asetonitril, propilen karbonat elektrolitler) elektrolitlere bağlı olarak ortaya çıkan sınırlı performans, kararlılık sorunları ve dar elektrokimyasal aralıklara sahip olmalarıdır (Efficiency ve ark., 2003). Sulu elektrolitlerin içsel bir özelliği olarak 1,2 V'luk dar elektrokimyasal pencereler, genellikle küçük bir hücre voltajına ve dolayısıyla SC için düşük enerji/güç yoğunluklarına neden olmaktadır (Lu ve ark., 2008, Conway, 2013). Organik elektrolitlerin ise sulu elektrolitlere kıyasla 2V–3V gibi daha büyük elektrokimyasal aralıklarda çalışabilmektedir. Ancak, yüksek performanslı SC geliştirmek için bu elektrokimyasal performansları halen kısıtlıdır.



Şekil 3.15. Tasarlanan süper kapasitör hücresinin empedans eğrisi ve Randal eşdeğer devre şeması.

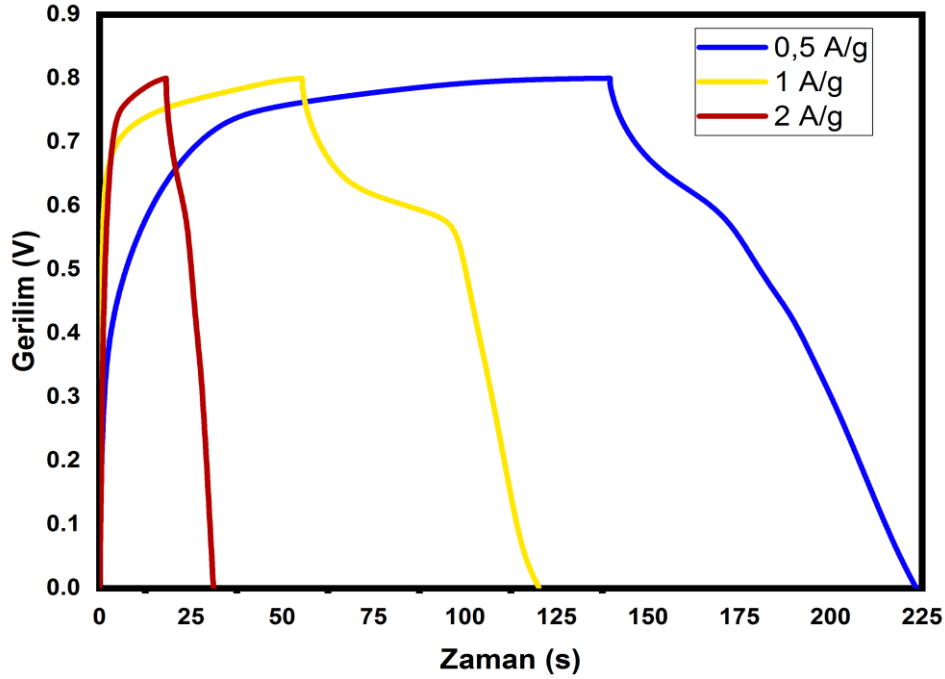
Devre şeması, Şekil 3.15.'de gösterildiği gibi R_s (temas direnci), C_{dl} (çift katmanlı kapasitans), R_{ct} (yük transfer direnci) içeren basitleştirilmiş Randal eşdeğer devre modeli kullanılarak verilmiştir. Elektrolit-elektrot-akımın toplayıcı direnci R_s ile temsil edilmektedir. R_{ct} ile paralel olan çift katmanlı kapasitans (C_{dl}), elektrolitlerin iyonik yükü ile elektrotların elektronik yükleri (genellikle F ölçeğinde) arasındaki çift katmanlı kapasitansı temsil etmektedir. Şekil 3.15.'de görüldüğü gibi R_s ve R_{ct} değerleri sırasıyla $0,54 \Omega$ ve $5,50 \Omega$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.16. 1 A/g akım yoğunluğunda tasarlanan süper kapasitör hücresi için 10 çevrimlik GCD eğrileri.

Şekil 3.16., 1 A/g akım yoğunluklarında on döngü için Mısır sapı-HCl-Sn katalizör elektrotlarının GCD eğrilerini göstermektedir. Malzemenin yapısındaki elektrolit iyonlarına erişimdeki zorlukların nedeni, şarj/deşarj eğrilerinin mükemmel simetrik olmamalarından kaynaklanmaktadır. Bu zorluklar malzemenin direncini işaret edebilir veya Sn molekülleri iyonların elektrot yüzeyine kolayca erişmesini engelliyor şeklinde yorumlanabilir. Elektrotların gravimetrik kapasitansı, Denklem 21.8'e dayalı olarak

GCD eğrileri kullanılarak bulunmuş ve 1 A/g akım yoğunluğunda için elektrot kapasitansı 146,253 F/g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.17. Farklı akım yoğunluklarında tasarlanan süper kapasitör hücresinin GCD eğrileri.

Şekil 3.17.'da akım yoğunlukları sırasıyla 0,5, 1 ve 2 A/g olan Mısır sapı-HCl-Sn katalizör elektrotlarının olan GCD eğrileri verilmektedir. Malzemenin yapısı içindeki elektrolit iyonlarının erişilebilirliğindeki zorluklara bağlı olarak şarj/deşarj eğrileri tam olarak bir simetrik eğilim gösterememektedir. Malzeme direnci ve/veya bağlayıcı gibi katkı maddeleri iyonların elektrot yüzeyine düzgün ulaşmasının önündeki engellerden olabilir. Nian ve Teng, karbon yüzeyinde artan oksijen grubunun elektrokimyasal performansını, karbon elektrot ile akım toplayıcı arasındaki temas direncinin yüzey oksijen içeriğinin artmasıyla karbon yüzeyinin iletkenliğinin azalması ve oksijenli fonksiyonel grupların karbon materyallerinin etkili gözenek hacmini azaltması iyonların mikro gözeneklere geçişini önlemesi şeklinde iki farklı sebebe bağlı olarak negatif olarak etkilediğini öne sürmektedirler (Nian ve Teng, 2003).

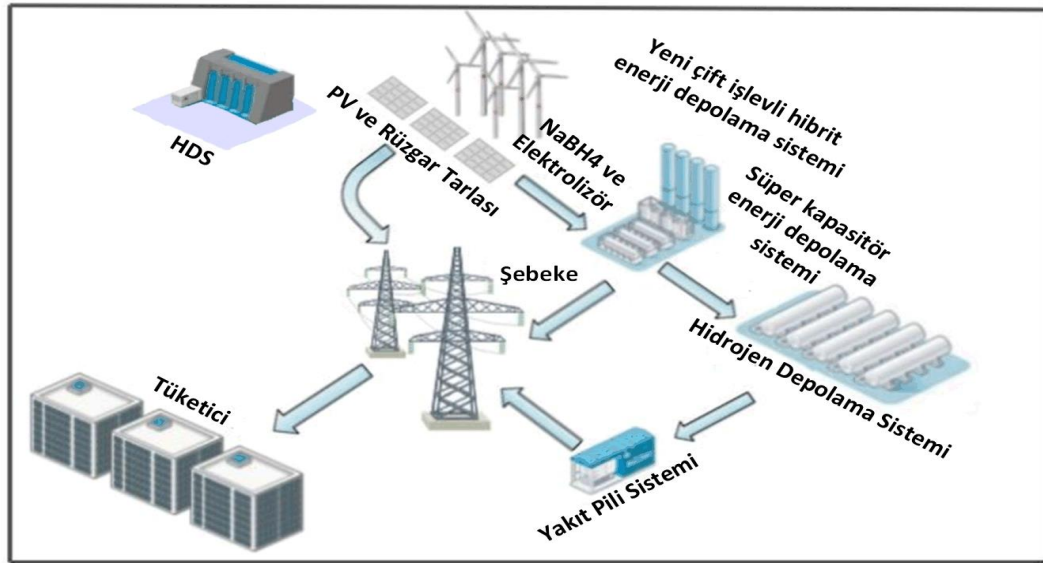
Elektrotların kapasitansı, 0,5, 1ve 2 A/g akım yoğunlukları için sırasıyla 135,975 F/g, 146,253 F/g ve 75,609 F/g olacak şekilde hesaplanmıştır. Biyokütle atıkları kullanılarak hazırlanan elektrotların kapasitans değerleri malzeme türüne, hazırlama

yöntemine ve diğer şartlara bağlı olarak 30-340 F/g arasında değiştiği göz önünde bulundurulduğunda hazırlana Mısır sapı-HCl-Sn katalizörünün, gelecekteki süper kapasitör çalışmaları için yol gösterici bir çalışma olduğu ve etkileyici bir elektrokimyasal performansa sahip olduğunu söylenebilir (Wang ve ark., 2015, Dhelipan ve ark., 2017, Sivachidambaram ve ark., 2017, Köse ve ark., 2018).

3.2.6. Mısır sapı-HCl-Kalay (Sn) çift işlevli malzemenin HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilen bir mikro şebeke tasarımında hibrit enerji depolama sistemi olarak kullanılması

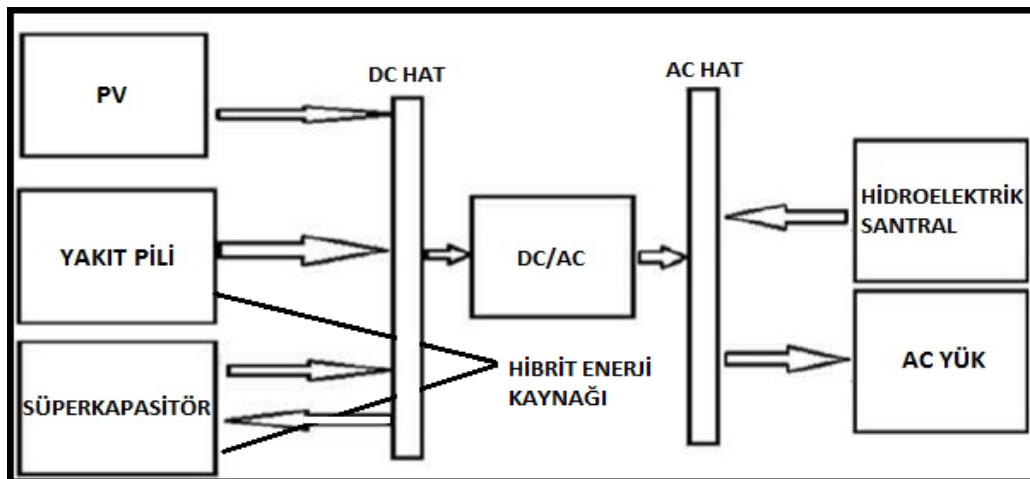
3.2.6.1. Türkiye’de Siirt ili için planlanan hibrit enerji sisteminin HOMER Pro ile modellenmesi

Türkiye’de tasarım lokasyonu olarak seçilen Siirt ilinde Şekil 3.18.’de görülen Hidro-solar GES, mevcut bulunan Alkumru Barajı HDS ve yeni prototip tasarımını gerçekleştirdiğimiz sistemin elde edilen karakteristik verileri, teorik olarak istenilen akım ve gerilim değerlerini elde edebilmek amacıyla seri/paralel bağlantılarla yığın şeklinde bağlanarak yeni çift işlevli HSS enerji sistemi ile bir tasarım hedeflenmektedir. Daha sonra seçilen ekipmanların ve diğer bütün maliyetlerin dâhil edileceği bir maliyet hesaplaması yapılacaktır. Ekipman seçimi ve maliyet hesaplamaları yapıldıktan sonra yazılımda modelleme için gerekli veriler girilerek modelleme ve benzetim gerçekleştirilecektir.



Şekil 3.18. Siirt ili için tasarımı planlanan hibrit enerji sistemi şeması.

Şekil 3.19.'da görüldüğü gibi blok diyagramı verilen hibrit enerji sisteminde diğer sistemlerden farklı olarak planlanan bu tasarımda iki önemli noktaya odaklanılmıştır. Bunlar YP ve SC enerji depolama sistemi noktasında olacaktır. Ayrıca hidro-solar enerji sistemi ile panellerin yüksek sıcaklıkta düşen verimliliğine soğutma anlamında katkı sağlanırken, literatürde barajlardaki suyun buharlaşmasının önlenmesi amaçlı uygulamalardan farklı olarak yüzeyin PV panellerle kaplanması sayesinde buharlaşmanın önüne geçilmesi ve potansiyel enerjinin artırılması hedeflenmektedir.



Şekil 3.19. Siirt ili için tasarımı planlanan hibrit enerji sistemi blok diyagramı.

3.2.6.1.1. Homer Pro yazılımı

ABD Enerji Bakanlığı Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), tarafından geliştirilen HOMER Pro mikro şebeke benzetim programı, bağımsız yerleşim ve ada şeklinde şebekeye bağlı kampüslere ve askeri üslere kadar tüm sektörlerde mikro şebeke tasarımını optimize etmek için küresel standart olarak görülmektedir. Homer Pro veya HOMER (Birden Çok Yenilenebilir Enerjinin Hibrit Optimizasyonu), birçok farklı enerji üretim, tüketim ve depolama kaynağını aynı sistemde altında bir araya getirerek bu kaynakların bir arada maksimum verimle hibrit olarak çalışabileceği sistemi tasarlayabilmektedir. Tasarlanacak bu sistemde yer alan ekipmanlar için en uygun olanları, hangi boyutta olacağını ve sayısını belirlemek için kullanılmaktadır. Alternatif enerji teknoloji seçeneğinin fazla olması, maliyetlerdeki değişkenlik ve enerji kaynaklarının arz güvenliği gibi değişkenler yatırım sürecinde karar mekanizmasını zorlayan etmenlerdir. Bu açıdan hem şebekeden bağımsız hem de şebekeye bağlı enerji sistemleri tasarımlarının değerlendirme aşamasında benzetim, optimizasyon ve duyarlılık analizi gibi aşağıda detaylı olarak açıklanan seçenekleri sayesinde tasarlanan sistemleri daha anlaşılabilir hale getirmektedir.

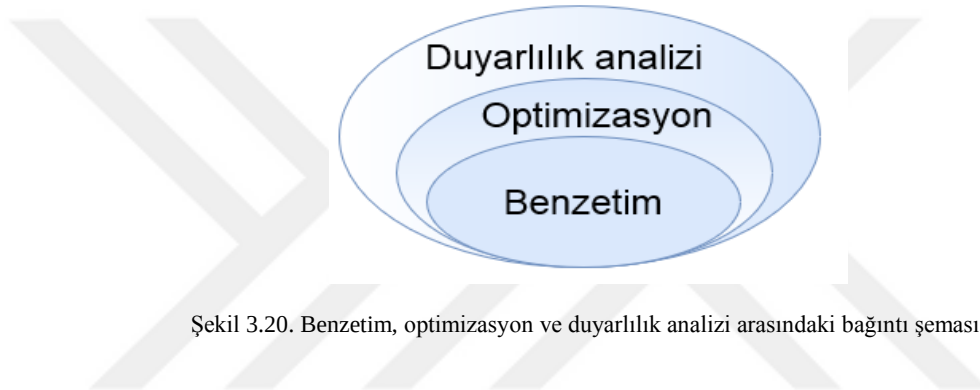
Benzetim: Yazılım, yılın her saati için tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmek amacıyla bir hibrit enerji sisteminin benzetimini gerçekleştirebilmektedir. Bunun yanında, bir dakikadan bir saate kadar zaman tarama aralıklarında, bir yıllık süre zarfında bir benzetimin gerçekleştirme olanağı sunmaktadır.

Optimizasyon: Yazılım, çeşitli enerji sistem tasarımlarının en düşük maliyetle benzetimini gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca sistemin bileşen boyutu gibi kullanıcının üzerinde kontrol sahibi olduğu değişkenlerin ideal değerlerini de hesaplayabilmektedir.

Duyarlılık analizi: Yazılım, belirsizlik içeren ve kontrol edilemeyen bir parametrenin etkilerini ölçmek için bir dizi girdi altında çok sayıda optimizasyon gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle, duyarlılık analizi, tasarımcının sisteme ait rüzgâr hızı, güneş enerjisi yalıtımı, yakıt fiyatları gibi üzerinde kontrol yetkisi olmayan

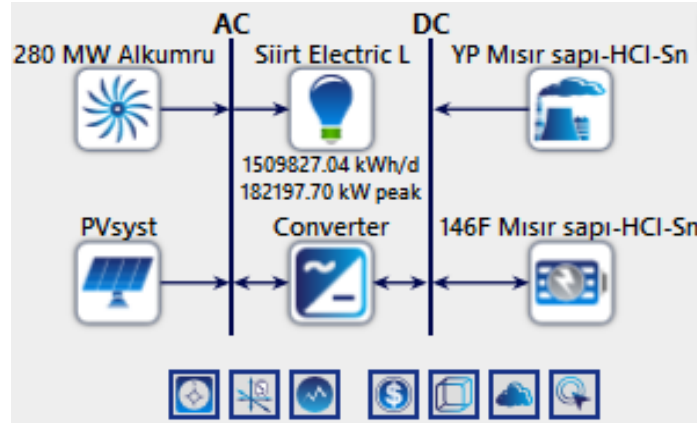
belirsizliklerin etkisini belirlemeye olanak sağlamaktadır. Son olarak, optimizasyon sonucun da ekonomik olan hibrit konfigürasyon belirlenebilmektedir.

Bir enerji sistemi tasarlanırken, sistemin konfigürasyonu hakkında sistem için hangi bileşenler en uygun, en verimli, hangi boyutta, hangi teknolojik bileşenlerde, sayısı, maliyetlerdeki çeşitlilik ve mevcut enerji kaynaklarının varlığı gibi belirsizlikler tercih noktasında karşılaşılan zorluklardandır. Bu noktada yazılım, benzetim sonuçlarını konfigürasyonları karşılaştırmanıza ve tekno-ekonomik analiz yaparak değerlendirmenize yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.20. Benzetim, optimizasyon ve duyarlılık analizi arasındaki bağıntı şeması.

Şekil 3.20. benzetim, optimizasyon ve duyarlılık analizinin kapsadıkları alanları ve aralarındaki bağıntıyı ifade etmektedir. Optimizasyon bir veya daha fazla benzetim içerebilirken, duyarlılık analizi ise birden çok optimizasyon içerebilmektedir. Burada önemli olansa herhangi bir sistem için yalnızca bir duyarlılık analizi muhtemeldir. Bu bilgiler ışığında bu çalışmada, en uygun hibrit sistem tasarımının ortaya çıkması için yenilenebilir enerji olarak hidro-solar ve HDS, ESS olarak yeni çift işlevli HSS (SC+YP) ve şebeke konfigürasyonları ele alınarak optimizasyon ve benzetim yapılmıştır.



Şekil 3.21. Tasarımı planlanan mikro şebekenin HOMER Pro şeması

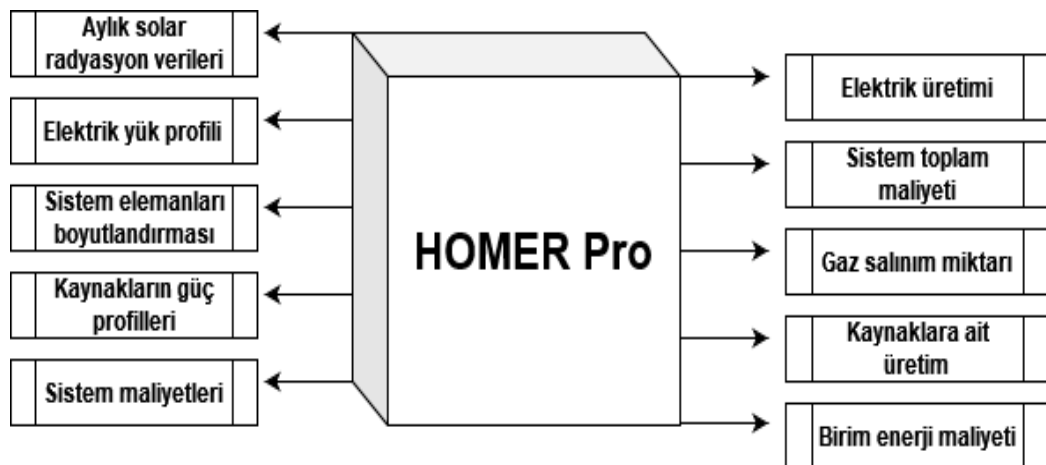
Bu tarz yazılımlar, bir enerji sisteminin tasarımı ve çalışması üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktörleri belirlemek, bu sonuçları planlamak ve politika kararlarını yönlendirebilmek amacıyla teknolojik seçenekler sunmaktadır. Bu seçenekler hakkındaki genel soruları cevaplayacak yazılımın duyarlılık analizi sonuçları bu alanda öngörülebilirlik sağlayan yön verici bir özelliktir. Optimizasyon noktasında ise yazılımın iki ayrı algoritması bulunmaktadır. Yeni HOMER Optimizer, en düşük maliyetli sistemi belirleyebilmek amacıyla tescilli bir algoritma kullanmaktadır. Duyarlılık analizi duyarlılık değişkenlerini girdi olarak tanımlandığında yazılım belirtilen her bir duyarlılık değişkeni için optimizasyon işlemini tekrarlamaktadır. Görüldüğü gibi birçok farklı hibrit enerji kaynağı içeren mikro şebeke tasarımı olarak sağlayan bu program optimizasyon, benzetim ve duyarlılık analizi ile detaylı olarak karşılaştırmalı, alternatifli analiz sonuçları sayesinde öngörülebilir ve uygulanabilir sistemlerin tasarımına ışık tutmaktadır.

Sistem elemanlarının karakteristiklerinin modellemede kullanılmasına olanak sağlaması, hibrit enerji sistemlerin güç üreten elemanlarının devreye girme/çıkma zaman çizelgesinin belirlenebilmesi, yıllık bazda modelleme gerçekleştirilirken modelleme zaman aralığının 1 dakika kadar düşük tarama aralıklarına imkan vermesi, dinamik yük modellemesi sabit yük analizine bağlı hataların dinamik yük modellemesi seçeneği ile üstesinden gelebilmesi, farklı kontrol stratejilerine sahip olması, optimizasyon ve duyarlılık analizi gibi seçenekleri sayesinde karşılaştırma yapılabilmesi, tekno-ekonomik analiz imkanı, çevresel olumsuz etkilerin değerlendirilebilmesi, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız tasarımların

karşılaştırabilmesi ve kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olması gibi bir çok avantajı olduğu için çalışmada HOMER kullanılmıştır.

Tüm bu avantajlara karşın yazılımının iki ayrı evirici veya konvertör yerine sadece iki girişli evirici seçeneğinin bulunması, enerji kaynağını takip eden ve sabit PV panelleri gibi ayrı üretim seçeneklerinin belirlenememesi, (tasarımızda da kullandığımız Pvsyst programı ile gömülü çalışma özelliği ile bu kısıtlaması giderilebilmektedir) ve elektrolizörün verim karakteristiğinin eklenememesi sadece nominal güç ve verim gibi daha geniş bir girdiye olanak sağlaması gibi bazı dezavantajlar da programın göze çarpan eksiklerindendir.

Yazılımda hibrit enerji sistemleri için dağıtılmış üretim sistemleri bağlamında tasarımı hedeflenen mikro şebekeye ait tasarım aşamaları Şekil 3.22’de verilmiştir. Alınan deneysel veriler neticesinde tasarımda yer alacak yeni çift işlevli depolama materyalinin incelenmesi araştırmaya değer görülmektedir. Sonuç olarak, daha önce de değindiğimiz gibi bu hibrit enerji depolama sistemi yaklaşımı YP ve SC’lere dayalı pil depolaması, bir başka deyişle her ikisinin de mutualist kullanıldığı yeni çift işlevli bir hibrit enerji depolama şeklinde ifade edebiliriz. Bu çalışmada ise, dağıtık üretim sistemlerinin güncel gereksinimleri de göz önünde bulundurularak, yeni bir tasarımla sistemlerin optimizasyonu amaçlanmaktadır.



Şekil 3.22. Homer Pro metodoloji işlem basamakları.

3.2.6.1.2. PVsyst yazılımı

GES'ler tasarlanırken, sistemin kurulacağı yerin coğrafi konumu, bu güneş radyasyon değerleri (GSR), kullanılacak PV ve evirici özellikleri gibi pek çok detay bulunmaktadır. Geliştirilmiş benzetim programları sayesinde bu incelemeleri gerçekleştirmek ve pratikteki uygulamalara yakın bir sistem tasarlayabilmek daha kolay olmaktadır. Tam bu noktada kullanacağımız PVsyst programı, İsviçre Cenevre Üniversite'si tarafından geliştirilmiş güneş enerjisi üretim sistemleriyle detaylı olarak boyutlandırma, saatlik benzetim gibi çalışmalara olanak sağlayan bir yazılımdır. Bu yazılım ön tasarım ve detaylı bir araştırma amacıyla proje tasarımı gibi ön fizibilite çalışmalarda büyük kolaylık sağlamaktadır. Birçok bölgeye ait GSR değerleri ve ticari olarak piyasada bulunan PV panel ve bileşenlerini kütüphanesinde bulundurmaktadır. Ayrıca veri tabanında bulunmayan bilgiler istenilirse kullanıcı tarafından veri tabanına eklenebilmektedir. GSR değerleri çevrimiçi olarak Meteonorm'dan sağlanmaktadır. Bunun yanında NASA ve PVGIS gibi veri tabanlarından da ışıınım verilerinin çekilebilmesine, üç boyutlu modelleme ve CSV formatında verilerin programa aktarılabilmesine olanak sağlamaktadır (Bolat ve ark., 2020). PVsyst içerdiği detaylı parametrelere bağlı olarak diğer muadil programlara göre gerçek değerlere çok daha yakın benzetimler yapabilmektedir. Ayrıca programda ekonomik fizibilite değerlendirmesine olanak sağlayan bir seçenekte bulunmaktadır.

Tüm bu özelliklerinin sayesinde kapsamlı meteorolojik veriler ve gerçek PV bileşenleri ile şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız, sulama sistemleri ve DC-şebeke sistemlerinin detaylı çalışma ve analizlerinin doğru bir şekilde tasarlanabilmesine imkân vermektedir. Enerji hesaplamalarında PVsyst, seçilen konumların güneş ışıınım değerleri ve sıcaklık verilerinin yanında gölgeleme, kirlenme ve elektrik direnci gibi diğer parametrelerinde detaylı olarak girilmesine olanak sağlamaktadır. Tüm bu olumlu yönler, bu yazılımın mühendisler, yöneticiler ve yatırımcılar tarafından tercih edilmesini sağlamaktadır.

3.2.6.1.3. Siirt lokasyonu

Siirt ili 11 003 km² yüz ölçümüyle 41° 21'-42° 53' doğu boylamı ve 37° 34'-38° 16' kuzey enlemi arasında yer almaktadır. Kuzey de Bitlis (95 km), doğuda Van (295 km), güneyde Şırnak (99 km), güneybatıda Mardin (226 km) ve batıda da Batman (87 km) illeriyle komşudur. Siirt ili; Aydınlar, Baykan, Eruh, Kurtalan, Pervari ve Şirvan olmak üzere beş ilçeden oluşmaktadır. İl topraklarının tamamı dicle havzasında bulunan Siirt, Dicle Nehri'ne ait su toplama bölgeleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu Havza, Fırat, Kızılırmak ve Sakarya Havza'larından sonra en büyük dördüncü su toplama havzasıdır. Siirt ili, denizden uzak olup yüksekliği (rakım) 902 m'dir. Bu nedenle de Siirt ili iklimi genel manada sert geçmektedir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise, çoğu zaman yağışlı ve soğuk olan sert iklimine karşın bölgede yer yer Doğu, Güneydoğu ve İç Anadolu iklim özelliklerini de görmek mümkündür. Doğu ve kuzey bölgelerinde kışlar daha sert ve yağışlı, güney ve güneybatı bölgelerinde ılık geçmektedir. En az yağış Kurtalan'da, en fazla yağış Baykan'da görülmektedir. Haziran ve Ekim aylarında yağış görülmemektedir. Özellikle GAP devreye alındıktan sonra iklim belirgin olarak değişmiş olup, ilkbaharda yağışlar artmış ve nem oranı mevcut %40 değerinin üzerinde seyretmeye başlamıştır. Genelde gece ile gündüz arasındaki ısı farkı fazladır. Bilinen en yüksek ve düşük sıcaklık sırasıyla, 43,3 °C ve -19,5 °C şeklindedir. Ortalama en yüksek sıcaklıklar temmuz ve ağustos aylarında yaşanırken en düşük sıcaklıklar ise aralık, ocak ve şubat aylarında görülmektedir. Coğrafi konumu açısından, ülkemizdeki diğer illere kıyasla yüksek güneş enerjisi potansiyele sahiptir. Rüzgârlar geceleri doğu ve kuzeydoğudan, gündüzleri güney ve güneybatıdan, kışın ise genellikle kuzey ve kuzeybatıdan esmektedir.

3.2.6.1.4. Siirt ili için hibrit enerji sistemi tasarımıda yer alan yük profili, enerji üretim ve depolama sistemleri

- Siirt ili yük profili ve yenilenebilir dağıtık enerji arzı

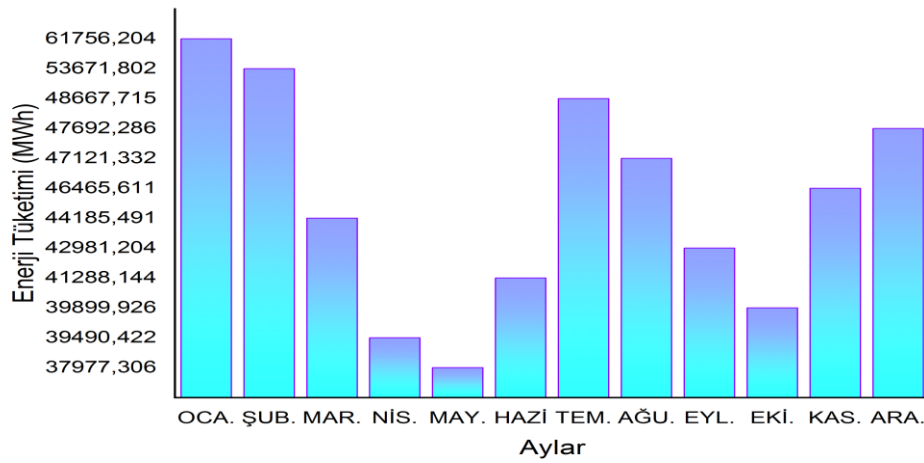
Siirt ili, cumhuriyet döneminde il olmasından bu yana hidroelektrik, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji üretim potansiyellerinin yüksek olmasına rağmen zaman zaman

enerji arzının yetersiz kaldığı durumlarda mevcut fuel oil jeneratörlerle şebeke desteklenerek ulusal elektrik şebekesine bağlı olarak enerji arzı sağlanmaktadır.

Tablo 3.1. Siirt iline ait bir yıllık enerji tüketim değerlerini içeren tablo.

BARALAR	SIİRT	380-A	KURTALAN	TOPLAM (MWH)
OCAK	18649,951	12431,949	30674,304	61756,204
ŞUBAT	17700,012	11278,551	24693,239	53671,802
MART	16049,133	11196,789	16939,569	44185,491
NİSAN	13766,726	10162,892	15560,804	39490,422
MAYIS	12683,695	9521,951	15771,66	37977,306
HAZİRAN	13890,605	9540,205	17857,334	41288,144
TEMMUZ	17889,844	10226,423	20551,448	48667,715
AĞUSTOS	17317,864	9739,104	20064,364	47121,332
EYLÜL	15970,252	9938,283	17072,669	42981,204
EKİM	13576,576	10034,925	16288,425	39899,926
KASIM	14734,282	11433,555	20297,774	46465,611
ARALIK	14960,955	12343,935	20387,396	47692,286
TOPLAM	187189,895	127848,562	236158,986	551197,443

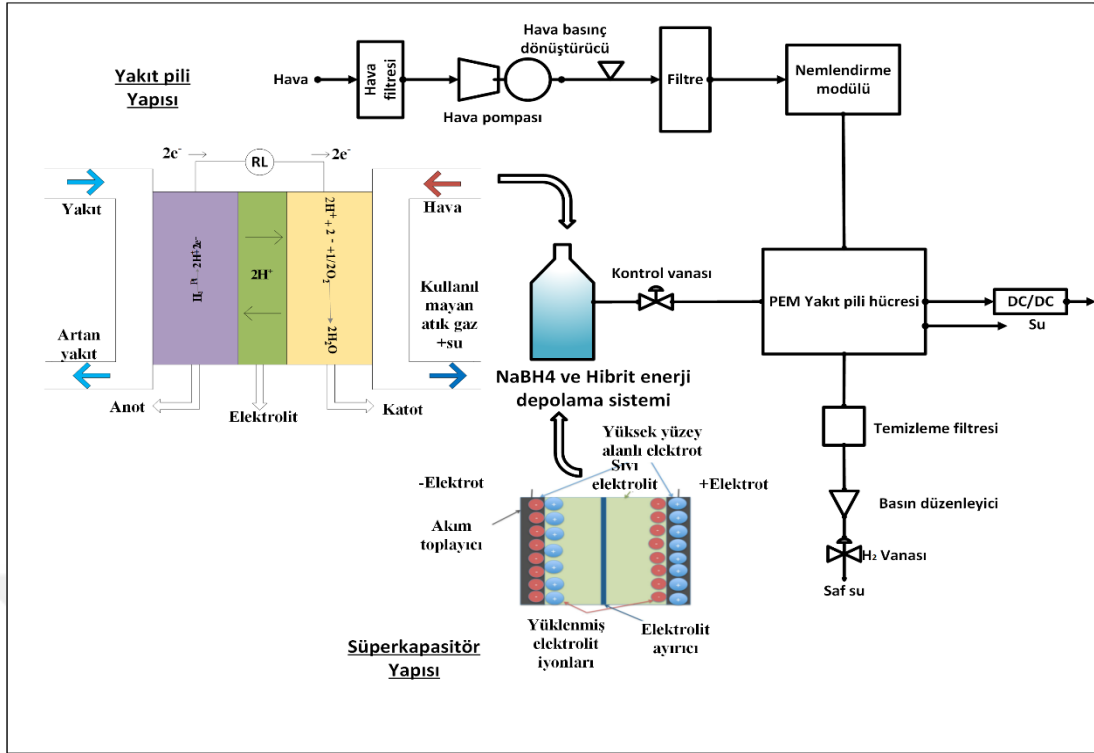
Tablo 3.1. ve Şekil 3.23.'de yıllık ve aylık enerji tüketimi detaylı olarak verilen Siirt ilinin yük profilleri ilgili dağıtım şirketinden edinilmiş olup 2020 yılı için saatlik bazda programa işlenmiştir. Yıllık toplam enerji ihtiyacı 551197443 kWh olarak dağıtım şirketi DEDAŞ'tan temin edilmiştir. (DEDAŞ, 2020). Toplam elektrik ihtiyacından daha önemli olan nokta ise yük profilidir. Yük profili, tüketilen elektriğin ne kadarının hangi aylarda ve günün hangi saatlerinde tüketildiğini göstermektedir. Yükü besleyecek enerji kaynaklarının kesintili olan güneş ve HDS enerjisi olması sebebiyle yük profili büyük önem arz etmekte ve ESS ile YP gibi şebeke destek sistemleri kapasitesinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir. Bu şebeke destek sistemlerinin kapasitesi, enerjinin üretilbildiği ve tüketildiği saatler arasındaki fark ile doğru orantılıdır.



Şekil 3.23. Siirt iline ait bir yıllık yük profilinin aylık dağılımı.

- Tasarlanan hibrit enerji destek sistemi

Şekil 3.24.'te akış diyagramı verilen ve Homer Pro ile gerçekleştirilecek önerilen tasarımda kullanılacak hibrit enerji destek sistemi noktasında tasarıma eklenecek süper kapasitör ve yakıt pili modüllerini analiz edecek olursak;



Şekil 3.24. Yeni çift işlevli hibrit enerji depolama sistemi akış şeması

Süper kapasitör idealleştirilmiş depolama modeline dayanmaktadır. İdealleştirilmiş depolama modeli, besleme voltajı deşarj döngüsü boyunca genelde değişmediği için düz bir deşarj eğrisi varsayılan basit bir depolama modelini temsil etmektedir. Bu model için amper-saat biriminde yalnızca nominal kapasiteyi ihtiyaç duyulmaktadır. Yazılım, bu değeri depolama sisteminin gerçek kapasitesi olarak değerlendirmektedir. Örneğin bazı yüksek performanslı Li-İyon piller, idealleştirilmiş depolama modeli ile iyi modellenabilmektedir.

İdealleştirilmiş pili biraz daha detaylı ele alacak olursak; nominal gerilimi, nominal kapasitesi ve maksimum şarj ve deşarj akımı gibi verilerin program tarafından girdi olarak istenildiği görülecektir. Bir süper kapasitörde depolanan Enerji (joule) Denklem 3.1'deki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$E = \frac{1}{2(CV^2)} \text{ joule} \quad (3.1)$$

Burada, E joule biriminde depolanan enerjiyi, C kapasitansı ve V voltajı ifade etmektedir. Ah biriminde etkin bir kapasite elde etmek için nominal kapasiteyi, enerji kapasitesi (Wh biriminde) nominal gerilime bölünmesi şeklinde belirleyebilirsiniz. Bu, doğru toplam enerji kapasitesini üreten bir kapasitörün şarj kapasitesinin hesaplanmasıyla aynı anlama gelmemektedir. Yukarıdaki Denklem 31, bir kapasitörün deşarjı üzerinden voltajdaki orantılı düşüşü de hesaba katmaktadır. Yazılım için nominal kapasite girişi (Ah biriminde) hesaplaması Denklem 3.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$N_{Ah} = \frac{E}{V} / 3600 = \frac{1CV}{2} / 3600 \quad (3.2)$$

Bu denklemde N_{Ah} , Ah biriminde nominal kapasite olarak ifade edilmektedir. Joule'den Wh (veya eşdeğer olarak coulomb veya Amper-saniyeden Amper-saate) dönüştürmek için 3600'e bölünmelidir. Tasarlanan hibrit enerji destek sistemi için gerekli parametreler deneysel veriler ışığında hesaplanacaktır.

Kullanım ömrü girdileri: Maliyet tablosunun hemen altında görünen kullanım ömrü kısmı ile süper kapasitör sisteminin kullanım ömrü belirtebilmektedir. Kullanım ömrünü takvim yıllarına göre veya kWh biriminde üretime göre belirtilebilmektedir. Hem süre (yıl) hem de üretim (kWh) belirtilirse, bileşen değişimi ilk tamamlanacak sürece göre değerlendirilmektedir.

Kullanım sahasına özgü girdileri: Bu sekme, projeden projeye değişkenlik gösterebilecek parametreleri girilmesine imkân vermektedir. İlk şarj durumu bölümü (yüzde olarak) benzetimin başlangıcında pilin şarj durumunu belirlemektedir. Minimum şarj durumu ise (yüzde olarak) şarj durumunun alt sınırını belirlemektedir.

İdealleştirilmiş depolama modeli: İdealleştirilmiş depolama modeli, besleme gerilimi deşarj döngüsü esnasında çoğunlukla değişmediği için düz bir deşarj eğrisi kabul edilen basit bir depolama modelini temsil etmektedir. Bu modelde, amper-saat olarak sadece nominal kapasiteyi girmeniz gerekmektedir. Yazılım, bunu depolama sisteminin gerçek kapasitesi olarak almaktadır. İdealleştirilmiş depolama modeli, bazı

yüksek performanslı Li-İyon piller için verimli sonuçlar elde edilmektedir. Bu modeli kullanan yeni bir depolama bileşeni oluşturmak için bunu kullanan Genel 1 kWh Li-İyon pil gibi bir bileşeni kopyalayarak başlanabilir. Yeni bileşen için değişkenleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.

Nominal gerilim: Bu gerilimi anma gerilimi olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü gerçek gerilim değeri, depolama ünitesinin çalışma şartlarına ve şarj durumuna göre değişmektedir. Bu giriş, A veya Ah birimindeki parametreleri kW veya kWh değerlerine dönüştürmek için kullanılmaktadır.

Nominal kapasite: Depolama sisteminin toplam kapasitesini ifade eden bu değişkenin biri amper-saat ile gösterilmektedir.

Şarj/deşarj verimliliği: Depolama ünitesine ait şarj/deşarj yani DC'den DC'ye depolamanın verimliliği olarakta ifade edilebilir. Yazılım, şarj vedeşarjdaki kayıp yüzdelerinin aynı olduğunu kabul etmektedir.

Minimum şarj durumu: Depolama ünitesinin asla altına inemeyeceği değişken şarj durumu ifade etmektedir.

Maksimum şarj oranı: Depolama sisteminin izin verilen maksimum şarj oranını ifade eden bu değişken amper-saat doldurulmamış kapasite başına amper biriminde ölçülmektedir.

Maksimum şarj akımı: Amper biriminde mutlak maksimum şarj akımını ifade etmektedir.

Maksimumdeşarj Akımı: Amper biriminde mutlak maksimumdeşarj akımı ifade etmektedir.

Kullanım ömrü: Kullanım ömrünü yıl olarak sınırlamayı seçerseniz, kullanım ömrü olarak belirli bir yıl değeri girilmektedir. Kullanım ömrünü döngü sayısı olarak (şardeşarj çevrim sayısı olarak) enerji çıkışı ile sınırlamayı seçerseniz, bu miktar kullanım

ömrü boyu iş hacmi olarak girilmektedir. Bu kullanım ömrü boyunca üretim değerini hesaplamaya yardımcı olması için kullanım ömrü eğrisi kutucuğu seçilerek de veri girişi yapılabilir.

Pil ömrü, zamanı, iş hacmini veya iki kıstası birden belirlemek için zaman ve işlem hacmi seçeneklerine göre belirlenebilmektedir.

- Zaman seçeneği, depolama biriminin belirli bir süre sonra değiştirilmesi gerekmektedir (şamandıra ömrü, yıl olarak ifade edilmektedir).
- İşlem hacmi seçeneği, depolama biriminin içinden sabit miktarda enerji döngüsünü tamamladıktan sonra değiştirilmesi gerekmektedir (verim, kWh ifade edilmektedir).
- Zaman ve İşlem Hacmi seçeneği, depolama biriminin bu iki değerden herhangi birine ulaşıldığında değiştirilmesi gerekmektedir.

Bir kullanım ömrü testinde, test cihazı depolama birimini tekrarlanan düzenli şarj/deşarj rejimine maruz bırakılmaktadır. Her döngüde, depo belirli bir derinliğe kadar boşaltılıp, ardından tekrar tam olarak şarj edilmektedir. Kullanım ömrü testi, depolama biriminin değiştirilmesi gerekmeden önce bu tür kaç döngü verimli bir şekilde çalışabileceğini belirlemektedir. Üreticiler, depolama biriminin kullanım ömrü eğrisini elde etmek ve uzun ömürlülüğünü ispatlayabilmek amacıyla ürünlerini farklı boşaltma derinliklerinde bir dizi testlerden geçirmektedir.

HOMER'deki depolama ömrü eğrisini, boşaltma derinliğine karşı bozulana kadar geçen döngülerin bir tablosu olarak girilebilmektedir. Yazılım bu noktaları sarı elmas şeklinde çizmektedir. Artan boşaltım derinliğine bağlı olarak bozulana kadarki döngü sayısında keskin bir düşüş görülmektedir. Ayrıca yazılım, aşağıda verilen Denklem 3.3'ü kullanarak kullanım ömrü eğrisindeki her nokta için hesapladığı ömür boyu iş hacmini de çizmektedir:

$$Q_{\text{kullanım ömrü},i} = f_i d_i \left(\frac{q_{\text{max}} V_{\text{nom}}}{1000 \text{W/kW}} \right) \quad (3.3)$$

Burada $Q_{\text{kullanım}}$ ömrü, i ömür boyu üretilen işi, [kWh], f_i arızalanacak döngü sayısını, d_i deşarj derinliğini [%], q_{max} maksimum depolama kapasitesini [Ah] ve V_{nom} deponun nominal gerilimi [V] ifade etmektedir.

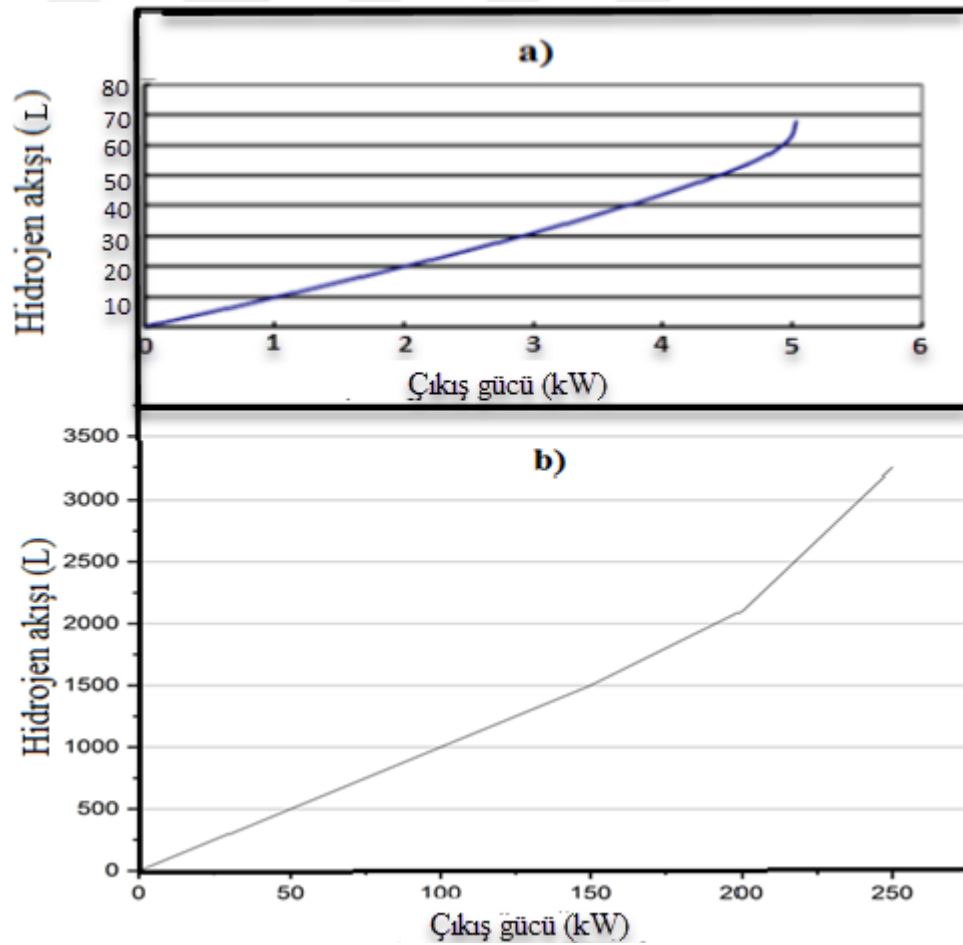
Yazılım bu değerleri kullanım ömrü eğrisinde siyah elmaslar olarak çizmektedir (sağ taraftaki y eksenini kullanarak). Değerleri tipik olarak deşarj derinliğine sadece zayıf bir bağımlılık göstermektedir. Yazılımın benzetim yaklaşımı, kullanım ömrü veriminin deşarj derinliğine bağlı olmadığı varsayımını basitleştirmektedir. Kullanım ömrü eğrisindeki yatay siyah çizgi, kullanım ömrü veriminin hesaplanan değerini ifade etmektedir. Aslında bu çizgi, girdiğiniz tüm noktalar için hesaplanan çıktı değerlerinin ortalamasıdır. Sadece izin verilen deşarj derinliği aralığında değerlendirilmektedir.

Hesaplanan kullanım ömrü performansı yalnızca referans için kullanılmakta olup yazılım, benzetimde sayfanın üst kısmına yakın kullanım ömrü iş hacmi (kWh) girdisini kullanmaktadır. Hesaplanan verim değerini kullanılmak isteniliyorsa, bunu kullanım ömrü iş hacmi (kWh) girişine kopyalandığından emin olunması gerekmektedir.

İdealleştirilmiş enerji kapasitesi depolama modeli, kullanıcıların enerjiyi ve gücü bağımsız olarak boyutlandırmasına olanak tanıyan belirli türdeki depolama sistemleriyle benzetim yapmayı amaçlamaktadır. Bu seçenek, burada listelenen ve açıklanan ek parametreler gerektirmektedir. Nominal gerilim, maksimum şarj oranı, maksimum şarj akımı, maksimum deşarj akımı, minimum şarj durumu ve geleneksel ömür boyu girişler devre dışı bırakılmaktadır. Örneğin; vanadyum redoks akış pilleri, idealleştirilmiş enerji kapasitesi modelini kullanan depolama sistemlerinden birisidir.

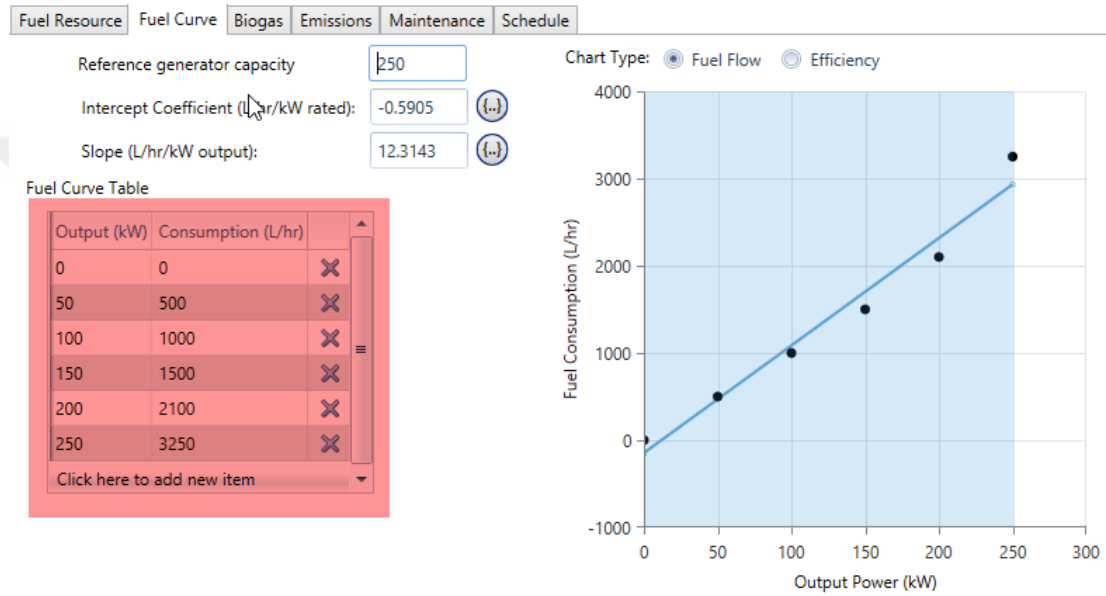
Şimdi tüm bu bilgiler ışığında literatüre yapılan en yeni katkılardan birisi olan çift işlevli ve atık malzemelerden sentezlenen bu yeni malzemelerin süper kapasitör ve katalizör özellikleri üzerine yapılan çalışmayı inceleyecek olursak; ayrı ayrı olarak iki özelliği de sahip olduğu yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu tasarımda, daha önce birlikte hiç kullanılmamış bu iki özellik özel bir tasarım ile derişik çözelti içinde konuşlandırılacak ve süper kapasitör enerji depolama sistemleri

çözeltide katalizör etkisi yaratıp, çıktı olarak yakıt pillerinin H_2 ihtiyacını karşılamak noktasında daha hızlı reaksiyon verebileceği mutualist bir yaklaşım hedeflenmektedir. Bu noktada şebekenin ani enerji ihtiyaçlarına süper kapasitörlerin diğer batarya sistemleri ile hibrit bir tasarımı sağlanarak geriliminin doğrusal azalması ve kapasitesi sıkıntısı giderilip hızlı şarj/deşarj özelliği ile ani şebeke dalgalanmalarına hızlı reaksiyon verilebilecektir. Ayrıca sentezlenen malzemelerin nar kabuğu, fıstık kabuğu vb. atık malzemeler olması kapasitör maliyetleri noktasında tasarımın bir diğer yenilikçi yaklaşımı olarak değerlendirilebilecektir. Mısır-Sn atıklarından sentezlenen çift işlevli depolama hücresine ait elektriksel olarak süper kapasitör özelliği ve kimyasal tepkimelerdeki katalizör özelliğini değerlendirmek amacıyla deneysel olarak yapılan çalışmaların sonuçlarında elde edilen karakteristik verileri yukarıda bahsedilen gerekli parametre sekmelerine girilmektedir.



Şekil 3.25. H_2 yakıt tüketim eğrileri a) H2planet firmasına ait 5 kW YP yakıt eğrisi, b) Tasarımda 50 adet yığın şeklinde bağlanan bu ürünün H_2 çıkış eğrisi.

Bu aşamada YP enerji depolama sistemine H2planet firmasına ait bir birim 5 000 W olan ticari ürününün kataloğundan elde edilen Şekil 3.25a.'deki H₂ yakıt tüketim eğrisi ve hibrit enerji sisteminde tanımlanan 250 kW'lık enerji depolama birimini karşılaması amacıyla (Şekil3.28.) 50 adet bu ürünün yığın şeklinde bağlanarak Şekil 3.25b.'deki yeni yakıt tüketim eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra Şekil 3.26.'daki Homer Pro ilgili jeneratör kaynakları kısmında belirtilen ilgili YP Yakıt tüketim eğrisi parametre girişlerine girilmiştir.



Şekil 3.26. HOMER Pro YP yakıt tüketim eğrisi giriş ekranı.

Şekil 3.27.'deki yazılım ekranında Hidrojen yakıt birim fiyatı girilirken ise daha önce kimyasal analizlerde elde edilen sonuçlara göre sentezlenen yeni malzemenin katalizör olarak kullanıldığında HPR'si $6261,5 \text{ mLdk}^{-1} \text{g}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Sigma Aldrich firmasında %99 saflıkta 5 gram NaBH₄ için fiyat yaklaşık olarak 50 dolardır. Yani birim gram fiyatı 10 \$ civarındadır. Buradan üretilen malzemelerin atık olması sebebiyle maliyete dâhil edilmeden yapılan hesaplamalarla sistemimizin H₂ üretim maliyeti 0,01 \$/L olarak hesaplanmış ve belirtilen ilgili sekmeye girilmiştir. Gerekli diğer YP parametreleri firmanın kataloğundan derlenerek belirtilen ilgili sekmelerden yazılıma işlenmiştir.

Şekil 3.27. HOMER Pro YP yakıt maliyeti giriş ekranı.

Şekil 3.28. HOMER Pro YP karakteristik veri giriş ekranı.

Şekil 3.29.'da görülen yazılımın depolama modüllerinden Li-iyon idealleştirilmiş depolama modeline uygulayarak elde ettiğimiz süper kapasitör parametreleri ile deneysel veriler sonucunda elde ettiğimiz nominal gerilim (0,8 V), Nominal akım ve maksimum şarj akımı (1A) ve Nominal kapasite (146,253 F/g) gibi değerler değiştirilerek belirtilen ilgili sekmelere işlenmiştir. Diğer ekonomik maliyetler atık malzemelerden üretilmesi ve prototip üretimde bakım onarım maliyetlerinin tam olarak hesaplanamaması sebebiyle en düşük değer 0,01 \$ olarak belirlenmiştir.

Supercapacitor 146 Farads - this item is in your library.

General | Lifetime | Defaults

Name: Supercapacitor 146 Farads Last Modified: 10/5/2021 1:09:28 PM Update

Abbreviation: 146F Mısırsapı-HCl-Sn 0b0c1e57-c192-47b2-9b0e-8a26872560bc New ID

Manufacturer: Generic

Website: www.homerenergy.com Url: http://www.homerenergy.com www.homerenergy.com

Notes:

The rated capacitance of the supercapacitor is 146.253 Farads. The Energy stored = $\frac{1}{2} CV^2 = 1 / 2 * 146.253 * (0.8)^2 = 45.6$ Watt seconds = 0.013 Watt Hour

☐ Requires one minute timestep

Images

Energy Model: Idealized Model; Storage type: SuperCapacitor Chemistry:

Nominal Voltage (V): 0.80 ☐ Max. Charge Rate (A/Ah): 0.00

Round Trip Efficiency (%): 85.00 ☒ Max. Charge Current (A): 1.00

Minimum State of Charge (%): 0.00 ☒ Max. Discharge Current (A): 1.00

Nominal Capacity (Ah): 146.25

Şekil 3.29. HOMER Pro SC karakteristik veri giriş ekranı.

- Hidroelektrik enerji depolama sistemi

Günümüzde ise Siirt ili sınırlarında, yapımı tamamlanan ilk hidroelektrik yatırım projesi Alkumru HDS ve daha sonra ise Çetin ve Kirazlı HDS'leri devreye alınmıştır. Siirt ilinde yapımı devam eden HDS'lere ilişkin bilgilere aşağıda bulunan Tablo 3.2.'de yer verilmiştir. Siirt ili sınırları içerisinde yer almamasına rağmen, üretime başlayan bir diğer baraj Ilısu oluşturduğu yapay gölle Siirt'i de etkilemektedir.

Tablo 3.2. Siirt ilinde bulunan diğer HDS ve kurulu güçlerini içeren tablo.

HDS ADI	KURULU GÜÇ (MW)
ŞİRVAN	17,50
TARİHLER	48,18
DELİKTAŞ	40,00
İNCİR	121,78
BAYKAN-1	55,00
BAYKAN-2	35,00
KESKİN	164,00
NARLI	36,00
ORAN	40,00
PERVARI	192,00
TOPLAM	749,46

Siirt ili, Aydınlar ilçesi sınırları içerisinde, Dicle Nehri'ne bağlı Botan Çayı üzerinde iki rezervuar arası yüksekliği 11m olarak kurulan Alkumru Barajı ve Hidroelektrik

Santrali, 2011 yılında işletmeye alınmıştır. Toplam 280 MW kapasiteye sahip olan santralin yıllık ortalama üretim kapasitesi 1 milyar kWh olup, 2017 yılındaki üretim miktarı ise 720 milyon kWh civarında olmuştur. Tablo 3.3. ve yetkili şirketten temin edilen aylık ve yıllık su debisi verileri incelendiğinde yılın belirli dönemlerinde yağış olmaması ve aşırı sıcaklara ve buharlaşmaya bağlı olarak su debisi ve dolayısıyla üretim önemli ölçüde azalabilmektedir. Bu nedenle, su debisinin azalması üretim anlamında Siirt ili için bir mikro şebeke tasarlanacak olursa yılın bu dönemlerinde ve anlık enerji talebinin pik dönemlerinde sistemin verimliliği açısından dağıtık şebekelerin gerekliliği açıkça görülmektedir.

Tablo 3.3. Siirt ilinde bulunan Alkumru Limak A.Ş. HDS yıllık üretim ve il/ülke yük talebini karşılama oranları.

YIL	ÜRETİM	İL TÜKETİMİNİ KARŞILAMA ORANI	TÜRKİYE TÜLETİMİNDE KARŞILIK GELDİĞİ ORAN
2012	672 438 769	%130	%0,28
2014	508 728 901	%92	%0,20
2015	725 642 332	%127	%0,27
2016	933 667 156	%157	%0,34

Alkumru HDS'ye ait aylık su debisi verileri Limak A.Ş yetkililerinden elde edilerek yazılıma aşağıdaki gerekli verilerle birlikte Şekil 3.30.'daki belirtilen ilgili yerlere işlenmiştir. Yıllık bakım maliyeti ve ilk yatırım maliyeti literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Alternatif santrallere ait kapasite-maliyet karakteristikleri Hidroelektrik santralleri için 2936 \$/kW (Kaya ve Koç, 2015) birim ilk yatırım maliyeti ve 14,13 \$/kW-yıl birim yıllık sabit işletme gideri 290 MW olan tesis için ilk yatırım maliyeti ve yıllık sabit işletme giderleri sırasıyla 851440000 \$ ve 4 097 700 \$ olarak hesaplanmış ve Şekil 3.30.'daki belirtilen ilgili yerlere işlenmiştir.

HYDRO 280MW Generic Name: 280MW Generic Abbreviation: 280 MV Remove Copy To Library

Economics

Capital Cost (US\$):	851,440,000
Replacement Cost (US\$):	22,500,000
O&M Cost (US\$/yr):	4,097,700.0
Lifetime (years):	49.00

Electrical Bus AC DC

Intake Pipe Pipe head loss (%): 0.00

Turbine

Available head (m):	111.00
Design flow rate (L/s):	293,000.00
Minimum flow ratio (%):	14.00
Maximum flow ratio (%):	105.00
Efficiency (%):	100.00

Nominal Capacity: 319,050.630 kW

Systems to consider

Simulate systems with and without the hydro turbine. Include the hydro turbine in all simulated systems.

Choose Data Source: Enter monthly averages Import from a time series data file or the library

Monthly Average Stream Flow Data

Month	Stream Flow (L/s)
Jan	59,114.000
Feb	65,310.000
Mar	119,927.000
Apr	309,170.000
May	442,433.000
Jun	212,522.000
Jul	86,363.000
Aug	55,663.000
Sep	55,477.000
Oct	56,603.000
Nov	55,093.000

Annual Average (L/s): 132,476.83

Properties

Residual flow (L/s): 1,000.00

Scaled Annual Average (L/s): 132,476.83 Plot... Export...

Şekil 3.30. HOMER Pro HDS karakteristik veri giriş ekranı.

- Hidro-solar enerji üretim sistemi

Tarihte ilk olarak 1970'lerin başlarında üretilmeye başlanan fotovoltaiik hücreler, teknolojik yetersizliklere bağlı olarak ortaya çıkan ilk üretim maliyeti bu sistemlerin yaygınlaşması önündeki en büyük engellerden olmuştur. Gelişen teknoloji ile fotovoltaiik hücre, üretim maliyetlerinin yatırım yapılabilir seviyelere düşmesi sayesinde fotovoltaiik hücrelerle enerji üretimini, tüketicinin son seviyesine kadar yaygınlatırmıştır.

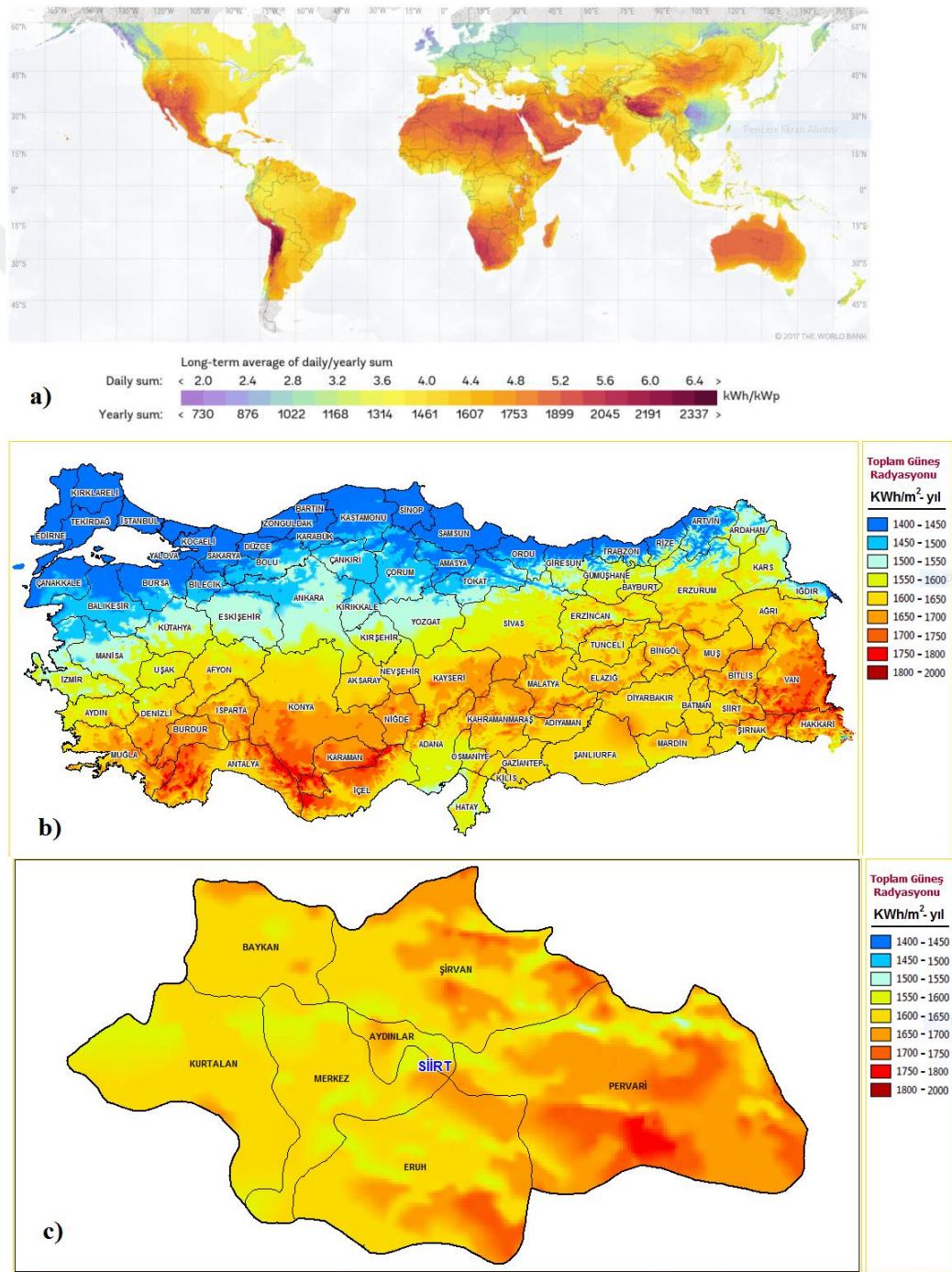
Dünyada; Almanya, Çin ve Japonya GES sistemlerinde öncülük eden gelişmiş ülkelerdir. Bu ülkeleri incelediğimizde güneş ışınları potansiyeli bakımından avantajlı olan ülkeler olduğu gibi sahip oldukları teknoloji birikiminden dolayı öne çıkanlarda bulunmaktadır. Şekil 3.31a.'da dünya güneş enerjisi potansiyeli haritasında, koyu kırmızı renkli bölgelerde güneş enerjisi potansiyeli fazlayken, mavi renkli bölgelerde ise güneş enerji potansiyeli azalmaktadır.

Dünyada güneş kaynaklı enerji üretim verileri değerlendirildiğinde, 2015 yılına göre 2016 yılında %50 daha fazla enerji üretildiği ortaya çıkmıştır. Brüksel’de düzenlenen enerji zirvesinde, dünyada enerji kapasitesinin 2016 yılı itibariyle 305 GW üretim kapasitesine ulaşıldığı duyurulmuştur. Bu üretim raporları detaylı olarak incelendiğinde bu ülkeler arasında Almanya’nın 70 GW’lık üretim kapasitesiyle bu alanda liderlik ettiği görülmüştür.

Coğrafi konumu itibariyle kuzey yarım kürede yer alan Türkiye ise, diğer ülkelere göre oldukça yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu kadar yüksek bir potansiyele sahip ülkemizde günümüze kadar yeterli yatırımlar yapılmamış olsada, devlet tarafından çıkarılan yönetmelikler ve teşvikler sayesinde bu alana ilgi günden güne artmaktadır.

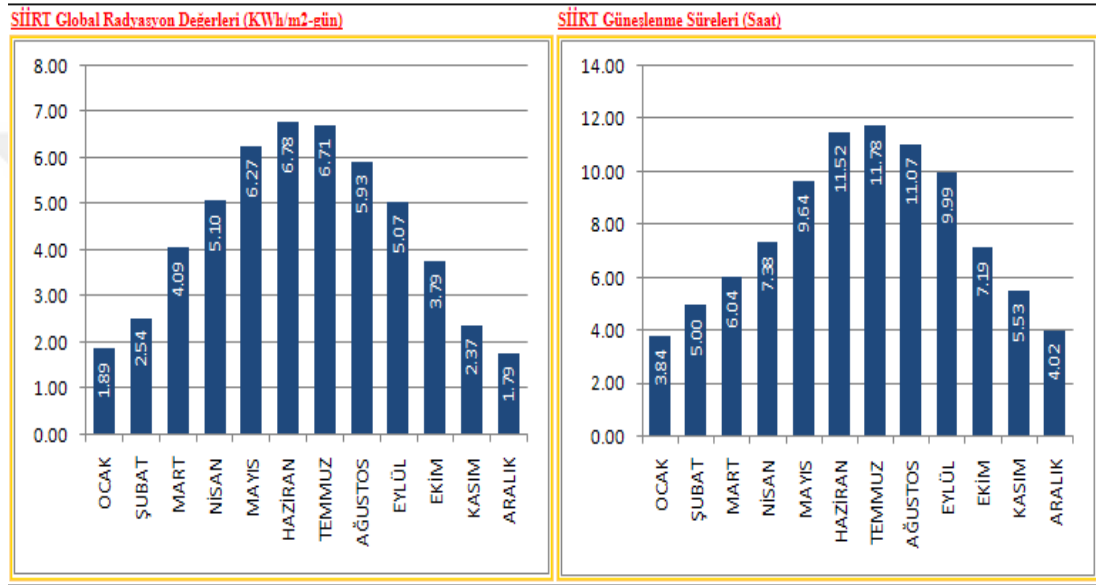
Bu teşvik ve yatırımlar neticesinde Türkiye’deki kurulu güç oranları 2015, 2016 ve 2020 sırasıyla 249 MW, 830 MW ve 6105 MW seviyelerine çıkmıştır. Ancak Türkiye güneş enerjisiyle üretim potansiyelinde her ne kadar pastada büyük pay sahip olsada, ülkemizin toplam kurulu güç kapasitesinin içinde, sadece yaklaşık %6,8’lik dilimini geçememiştir. 2010 yılına kadar Türkiye’de güneş enerjisi temelli sistemler genelde sadece termal amaçlı kullanılsa da bu tarihten itibaren güneş enerjisinden elektrik üretiminde de kayda değer artışlar görülmeye başlamıştır. Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Eylem Planı kapsamında 2023 yılı için ısıtma ve soğutma ihtiyacının en az yüzde 15’inin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması hedefi belirlenmiştir. Güneş enerjisinin verimli, teknolojik ve yenilikçi bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. 2023 yılı itibariyle enerji talebinin 500 bin MW olacağı tahminleri düşünüldüğünde Türkiye tüm güneş potansiyelini kullanmak koşuluyla 2023 yılına gelindiğinde enerji talebinin tamamını sadece güneş enerjisinden karşılayabileceği umut edilmektedir. Fakat mevcut imkân, teknolojik birikim ve yüksek maliyetlerin bu beklentilerin uzağında kalınacağını gösterdiği açıkça görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan daha kabul edilebilir tahminlere göre 2019 yılı için 3 bin MW ve 2023 itibariyle 5-10 bin MW’a kadar enerji üretimi yapılması öngörülmüştür.

Şekilde 3.31b.'de verilen Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli haritasına incelendiğinde, güneş enerjisi potansiyeli bakımından Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgeleri GSR açısından yüksek potansiyel barındırırken, Marmara ve Doğu Karadeniz bölgelerinin ise ülkenin en düşük GSR potansiyeline sahip olan bölgeleri olduğu görülmektedir.



Şekil 3.31. Güneş potansiyeli haritaları a) Dünya, b) Türkiye, c) Siirt ili.

Şekil 3.31c. ve Şekil 3.32. gösteriyor ki güneş potansiyeli bakımından yıllık ortalama 2 828 saat-yıl güneşlenme süresi ve 1 591 kWh/m²yıl GSR değeri ile yüksek yatırım yapılabilir potansiyeli olan Siirt ilinde yakın zamanda birçok yeni GES santralini kurulması olasıdır. Günümüzde bölgede Tillo ilçesinde, Lebit Enerji GES 300 kW, Eruh ilçesinde Gül GES 6,3 MW, Baykan ilçesinde, Armağan Güney 450 kW ve Behçet Güney GES 450 kW güneş enerji santralleri yer almaktadır. Ayrıca bu yıl devreye alınan 1,5 MW Sinovia Biyokütle Enerji Santrali de bulunmaktadır.



Şekil 3.32. Siirt ili aylık bazda GSR ve güneşlenme süreleri grafikleri.

DEDAŞ (Dicle Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi) tarafından yayınlanan 2019 yılı sonu itibariyle Siirt'te geçici kabulü yapılan, davet mektubu alan ve 2019 yılı sonunda 6,64 MW kurulu bulunan santraller ile toplam GES Kapasitesi yaklaşık 24 MW olduğu değerlendirilmektedir.

Yapılan bir çalışmaya göre nisan-ekim aylarında İstanbul barajlarına gelen suyun %22 buharlaşmaktadır. Bu miktarın %60-70 arasında kısmının yüzer hidro-solar GES ile buharlaşmasının engellendiği ve panellerin veriminin %15 artırdığı öngörülmüştür (Mehmet Bulut, 2018). Literatürde yapılan çalışmalarda göz önünde bulundurulduğunda 18 milyon m³ kapasitesi olan Alkumru HES havzası için toplam alanının yarısını panel sistemi ile kapladığını varsayarsak ve ortalama %60'lık doluluk

oranında belirlenen aylarda %20'lik değişim olduğunu varsayarsak ve bununda %60'ını geri kazandırdığını varsayarsak yaklaşık 129 000 m³ suyun geri kazanımı söz konusu olacaktır. Dolaylı olarak HDS enerji üretim miktarına da katkı sağlanacaktır. Pasif soğutma sayesinde bile panel üretim verimliliğinin %15 arttığı literatürde görülmektedir (Mehmet Bulut, 2018). Ayrıca sabit kara sistemlerine göre kurulum süresi 3 kat daha kısa sürmektedir. Sert bir zeminine göre maliyetler yaklaşık %10-%20 arası artacak olsada, arazi maliyeti ve gereksinimi ortadan kalkmış olmaktadır. Ayrıca havza yüzeylerindeki yosun birikimi de engellenecektir.

Tasarlamayı planladığımız yüzer hidro-solar panel sistemi literatür incelendiğinde ülkemizde daha önce Büyükçekmece gölü, Küçükçekmece gölü ve Mersin'in Mut ilçesinde bulunan AZMAK 2 HES havzasında kurulduğu görülmektedir.

The screenshot displays the HOMER Pro software interface for configuring a PV system. The main window is divided into several sections:

- Sub-array:**
 - Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Orient: Unlimited sheds, Tilt: 23°, Azimuth: 0°.
 - Select the PV module:** Filter: All PV modules, Manufacturer: Elsun, Model: 400 Wp 35V Si-mono ELNSM6612M-400-HC, Since 2019, Manufacturer 2019.
 - Select the inverter:** Output voltage: 800 V Tri 50Hz, Nb. of inverters: 230, Operating voltage: 500-1500 V, Global Inverter's power: 40250 kWac, Input maximum voltage: 1500 V, inverter with 9 MPPT.
 - Design the array:** Number of modules and strings: Mod. in series: 25, Nb. strings: 4810, Overload loss: 0.3%, Pnom ratio: 1.24, Show sizing.
 - Operating conditions:** Vmpp (60°C): 934 V, Vmpp (20°C): 1088 V, Voc (-10°C): 1407 V, Plane irradiance: 1000 W/m², Impp (STC): 46984 A, Isc (STC): 49254 A, Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 45641 kW, Array nom. Power (STC): 50024 kWp.
- List of subarrays:**

Name	#Mod #Inv.	#String #MPPT
Elsun - ELNSM6612M-400-HC	26	4810
Huawei Technologies - SUN200...	230	1
- Global system summary:**

Nb. of modules	125060
Module area	252876 m²
Nb. of inverters	230
Nominal PV Power	50024 kWp
Maximum PV Power	48803 kWDC
Nominal AC Power	40250 kWAC
Pnom ratio	1.243
- PV SET UP:**
 - Generic flat plate PV
 - Complete Catalog
 - Properties: Name: Generic flat plate PV, Abbreviation: PV, Panel Type: Flat plate, Rated Capacity (kW):, Manufacturer: Generic, www.homerenergy.com, Notes: This is a generic PV system.
 - Add PV
 - Options for Importing PV Production Data: HelioScope Wizard, PVsyst Wizard

Şekil 3.33. Tasarlanan Hidro-solar GES karakteristik parametreleri giriş ve HOMER Pro bağlantı ekranı.

Tüm bu bilgiler ışığında, Siirt İli Aydınlar ilçesinde bulunan Alkumru HES havzasında PVsyst 7.1 programı ile 50 MW bir hidro-solar GES Şekil 3.34.'de görüldüğü gibi baraj yüzeyindeki 252 876 m²'lik bir alanda tasarlanarak örnek benzetim gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise PVsyst 7.1 ile örnek olarak bu 50 MW sistem tasarlanıp benzetimi gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.33.'deki HOMER Pro Kaynaklar/PV modülü ile entegre çalışan PVsyst programı tasarım ekranına gerekli veriler işlenmiştir. Sistemin yaklaşık maliyeti ATALAY GRUP ENERJİ A.Ş.'den edinilen bileşen maliyetlerinin programa işlenmesiyle ekonomik girdiler derlenmiştir.



Şekil 3.34. Siirt ili Alkumru HDS üzerinde hibrit enerji sisteminin bir parçası olan hidro-solar enerji sistemi planlamasını gösteren çizim.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Maliyet özeti ve nakit akışı

HOMER Pro, bir sistemin performansını belirlemek amacıyla yılın herhangi bir zaman dilimi için güç dengesi tahminleriyle benzetim yapmaktadır. Yazılım, bu zaman aralıkları esnasında ortaya çıkan enerji talebini ve tasarlanan sistemin bu zaman aralığında sağlayabileceği enerji arzını eşleştirmektedir. Daha sonra düzenlemenin her bir kaynak ve tüketici noktasında arz/talep enerji akışlarını ve her zaman aralığının için sistemdeki pillerin şarj edilip edilmeyeceğini belirlemektedir.

HOMER Pro, bu enerji yönetimi tahminlerini, analiz edilmesi gereken her sistem tasarımı için ayrı ayrı gerçekleştirmektedir. Ardından tasarımın mümkün olup olmadığını veya mümkünse kullanım ömrü süresince sistemin kurulum ve işletme maliyetlerini değerlendirmektedir. Sistem maliyet hesaplamaları, sermaye, değiştirme, işletme ve bakım, yakıt ve faiz gibi maliyetleri içermektedir. Mevcut tüm sistem düzenlemelerinin benzetimini gerçekleştirildikten sonra yazılım, kullanım ömrü boyunca toplam maliyet olarakta adlandırılan ve sistem kombinasyon seçimlerini karşılaştırmak için kullanılabilecek net mevcut maliyet (NBD) tablosunu sunmaktadır.

Bir sistemin NBD'sini açıklayacak olursak, tasarlanan sistemin kullanım ömrü boyunca elde ettiği tüm gelirlerin bugünkü değerlerinden, tüm giderlerin bugünkü değerlerinin çıkarılmasıyla elde edilen değerdir. HOMER Optimizer, en ucuz sistemi bulma sürecini analiz ederek, bir dizi duyarlılık değerlemeleri üzerinden optimum sistem aramasına hızlı bir şekilde yön vermektedir. Tüm bunları gerçekleştirirken farklı sistem tasarımlarının tanımlanmasını ve karşılaştırılmasını da basitçe listeler halinde sunmaktadır.

Oluşturulan liste iki şekilde oluşturulur. Birincisi değerlendirme aşamasında karışıklığın önüne geçen kategorize edilmiş seçenek olup özellikle minimum maliyetli sistem düzenlemesinin, bir sistemin her tasarımı için ve en yüksek sıradaki sistem düzenlemelerinin net bugünkü maliyetlerine (NBD) göre değerlendirilip elimine edilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer tüm konfigürasyonları içeren seçeneğe kıyasla kullanıcı dostu bu seçenek sayesinde en uygulanabilir seçenekler tasarımcıya sunulmaktadır.

Tablo 4.1. Önerilen tasarımın Homer Pro ile kategorize edilmiş sonuçları.

PV (MW)	Alkumru HDS(MW)	YP (kW)	SC (10 ⁹)	Konvertör (kW)	NBD (\$)	EBM (\$)	İlk yatırım maliyeti	Yenilenebi lir enerji
50	280	250	1,8	102351	983M	0,138	923M	%99,9
50	280			104453	984M	0,139	924M	%100

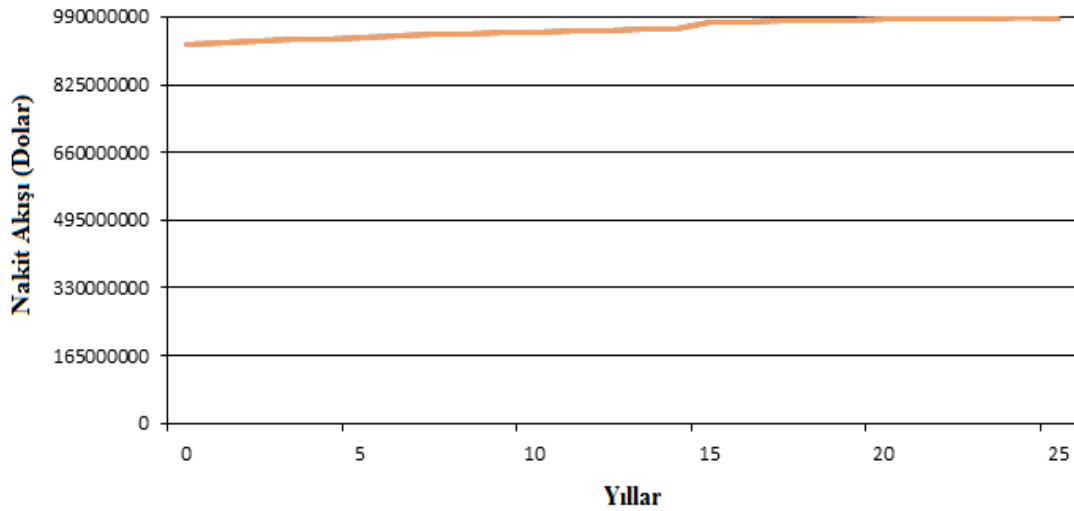
Yukarıdaki Tablo 4.1'deki ilk satır, 50 MW'lık bir hidro-solar enerjili, 280 MW HDS, 250 kW YP, $1,8 \times 10^9$ adet hücre içeren bir SC ESS ve 102351 kW'lık konvertör içeren uygun maliyetli sistem tasarımını göstermektedir. Bu kombinasyonun EBM değeri 0,138 \$/kWh ve NBD değeri 983M dolardır. YP içermeyen tasarım, 984M \$ NBD ve 0,138 \$/kWh EBM ile ikinci en uygun maliyetli tasarım olup 50 MW hidro-solar, 280 MW HDS ve $1,8 \times 10^9$ adet hücreli SC içermektedir.

Tablo 4.2. Homer Pro kategorize edilmiş tasarımın detaylandırılmış maliyetleri.

Bileşen	Yatırım maliyeti	Değişim maliyeti	İ&B maliyeti	Yakıt maliyeti	Geri kazanım	Toplam
280MW HDS	\$851440000	\$0	\$52973084	\$0	-\$264025	\$901773059
YP	\$3000	\$4723	\$1132	\$91459	-\$371	\$9 868
Hidro Solar	\$22500000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$22500000
SC	\$18364,986	\$0	\$0	\$0	-\$733246	\$17631740
Konv.	\$30705317	\$13027462	\$0	\$0	-\$2451899	\$41280879
Sistem	US\$923013303	\$13032185	\$52974116	\$91459	-\$5825542	\$983285623

Tablo 4.2'de detaylı bir şekilde maliyet bileşenleri verilen 250 kW YP kapasitesi, 1 836498 kWh SC kapasitesi, 50 MW hidro-solar enerji kapasitesi ve ek kullanım kapasitesi dahil 319051 kW hidroelektrik üretim kapasitesi ile sistemin elektrik

ihtiyacı karşılanmaktadır. Şekil 4.1.'de kümülatif nakit akış artışı görülen hibrit sistem tasarımının enerji işletme maliyetleri yaklaşık olarak 4,66 milyon dolardır.



Şekil 4.1. Hibrit enerji sisteminin proje ömrü boyunca kümülatif nakit akış grafiği.

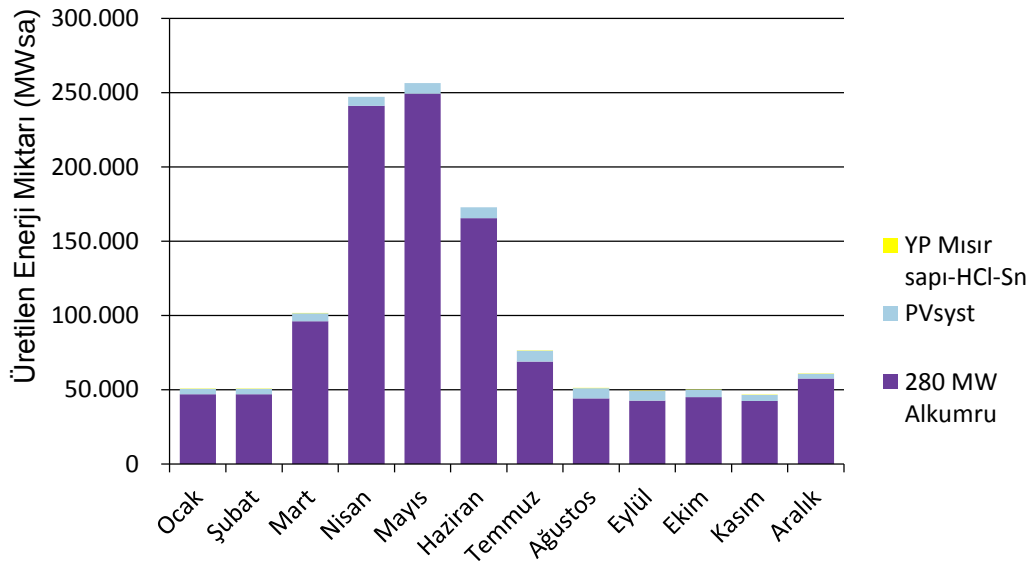
4.2. Tekno-ekonomik analiz

Her ne kadar mevcut olağan enerji şebekesine alternatif şebekeden bağımsız %100 yenilenebilir enerji temelli bir mikro şebeke ilk hedef olsada önerilen sistemler arasında karşılaştırma yapacak olursak; ilk hibrit sistemin, tek başına diğer YP içermeyen sisteme göre daha düşük İşletme ve Bakım (İ&B), EBM ve NBD maliyetleri sunduğu görülmektedir. Tablo 4.3., sistem bileşenlerinin ayrı ayrı enerji üretim miktarlarını ve talep karşılama yüzdelerini göstermektedir.

Tablo 4.3. Homer Pro ile kategorize edilmiş tasarımın elektrik enerji üretim sonuçları.

Kaynak	Hidro-solar, HDS, YP, SC		Hidro-solar, HDS, SC	
	kWh/yıl	%	kWh/yıl	%
Hidro-solar	66805026	5,50	66805026	94,5
HDS	1146487273	94,4	1146487273	5,51
YP	602971	0,0497	-	-
Toplam	1213895269	100	1213292299	100
NBD		983M \$		984M\$
EBM		0,138\$		0,139\$

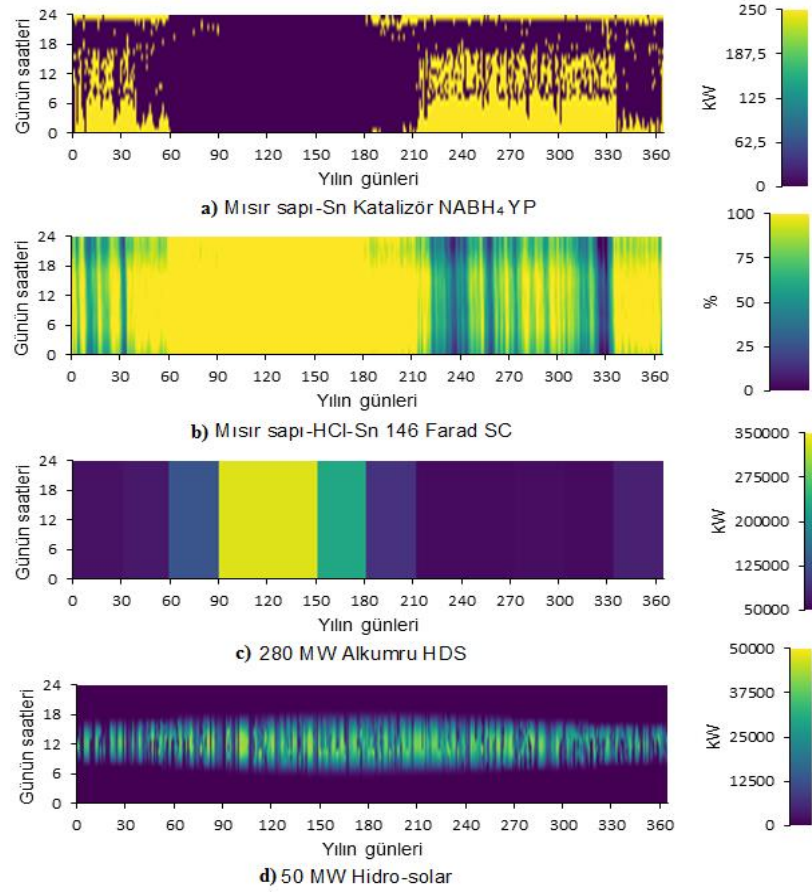
İlk sistem konfigürasyonunda yıllık toplam enerji üretimi 1213895269 kWh olup, sistem bileşenlerine dağılımı sırasıyla, hidro-solar enerji için 66 805 026 (%5,5) kWh, HDS için 1146487273 (%94,4) kWh ve YP için 602,971 (%0,0497) kWh şeklinde olmuştur. Diğer sistem konfigürasyonu içinse toplam yıllık enerji üretim sistemi 1213 292299 kWh olup, hidro-solar enerji için 66805026 (%5,51) ve HDS için 1146487 273 (%94,5) şeklinde gerçekleşmektedir. İki sistem arasında talep edilen enerji değişimi olmazken YP'nin sistemde olmaması daha çok SC miktarının şarj/deşarj ile kullanıma girmesiyle ve az da olsa artan enerji kesintileri ile dengelenmiştir. Buna rağmen maliyetler gösteriyor ki YP'nin sistemde olmaması maliyetleri düşürmemesinin yanında SC İşletme ve bakım maliyetlerini daha artırdığı için genel maliyetlerde kayda değer artışlara sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.2. Hibrit sistem tasarımının farklı enerji kaynakları ve ESS'lerin birleşiminin toplam enerji üretim miktarları.

Şekil 4.2.'deki sonuçlara göre ilk hibrit sistem tasarımının farklı enerji kaynakları ve ESS'lerin birleşimi sayesinde HDS ve güneş üzerinden en yüksek miktarda elektrik ürettiğini göstermektedir. Farklı kaynak potansiyelinin bulunmaması veya sistem bileşenlerinin düşük penetrasyon gibi teknik olarak kısıtlarının olduğu durumlarda da kaynakların birbirlerini tamamlamasına olanak sağlamaktadır. İlk hibrit enerji sisteminin bir yılda ürettiği elektrik enerjisinin toplam değeri olan yıllık elektrik

üretimi 1213 GWh olup bu üretimim %94,4 Alkumru HDS'den, %5,5'i hidro-solar GES'ten ve %0,05'i ise YP sisteminden karşılanmaktadır. Diğer küçük farklar ise SC EES sistemi ile dengelenmektedir.



Şekil 4.3. Hibrit sistem tasarımının farklı enerji kaynakları ve ESS'lere ait üretim yoğunluğu grafikleri.

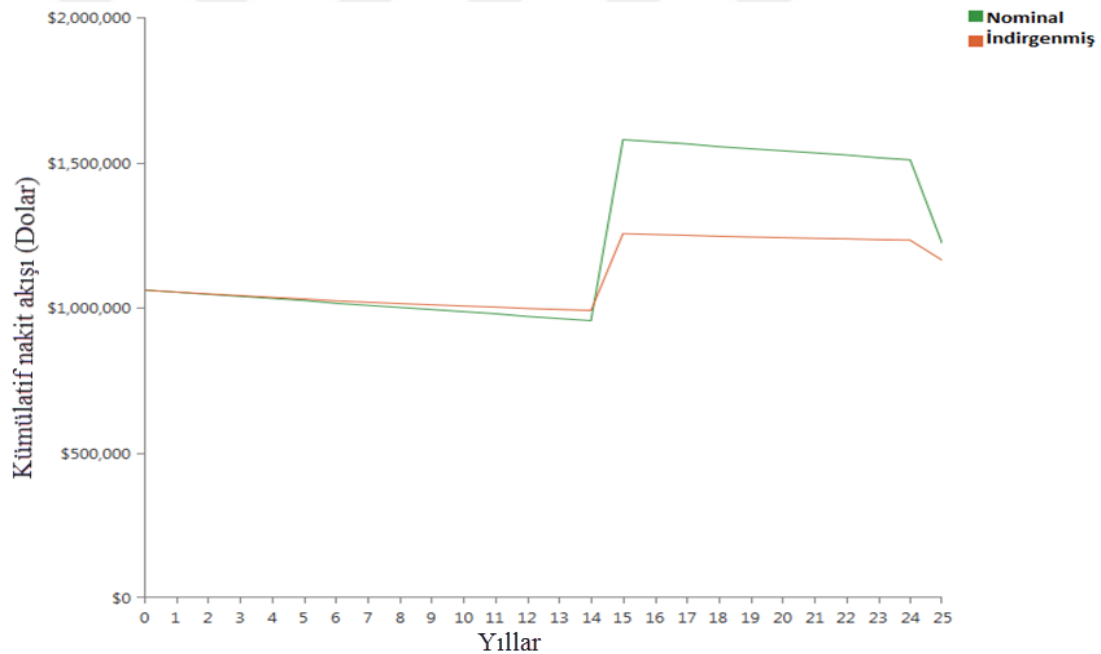
Bu mikro şebeke tasarımı günlük ortalama 1508989 kWh/gün enerji talebini karşılaması gerektirmekte ve 182198 kW'lık bir tepe noktasına sahiptir. Şekil 4.3.'deki önerilen hibrit sisteme ait dağıtık enerji kaynakları ve ESS'ler tarafından enerji arzı sağlanmaktadır.

İlk sistem konfigürasyonu diğer sisteme göre daha az depolamaya ve daha fazla miktarda enerji üretimi fazlasına sahiptir, bu da sistemin bağımsızlığını önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 4.4.'de fazla enerji, karşılanamayan enerji talebini ve kapasite kısıtı olan durumları göstermektedir.

Miktar	KWh /yıl	%
Excess Electricity	645,981,082	53.2
Unmet Electric Load	213,101	0.0387
Capacity Shortage	544,086	0.0987

Şekil 4.4. Önerilen hibrit sistem tasarımının enerji karşılama oranları

Her iki sistemde yüksek miktarda artık elektrik enerji üretimine bağlı olarak elektriksel kayıplarda artsada, ilk sistemde karşılanamayan enerji talebi, kapasite kısıtı ve maliyetler nispeten daha düşüktür. Ayrıca, ilk sistemde YP içermesine bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri nispeten daha yüksek olması beklenirken ikinci konfigürasyonda daha çok SC kullanılması nispeten Şekil 4.5.'te görülen ekonomik farkın daha çok artmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.5. Önerilen ve diğer sistem arasındaki indirgenmiş ve nominal nakit akış farkı.

Ayrıca literatürde, Somali ülkesinde GES-RES hibrit enerji tasarımının ön fizibilite araştırması için HOMER programı ile gerçekleştirilen analizin sonuçları ile hibrit sistem benzetimizin sonuçları karşılaştırıldığında yaklaşık %3 ve %5 gibi karşılanamayan enerji talebi ve kapasite kısıtları görülmüştür (Ali, 2018). Buradan literatüre kıyasla sistem önerilen tasarımın ne kadar esnek, bağımsız ve arz talep dengesine uygun olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü ESS penetrasyonun mikro şebekeye

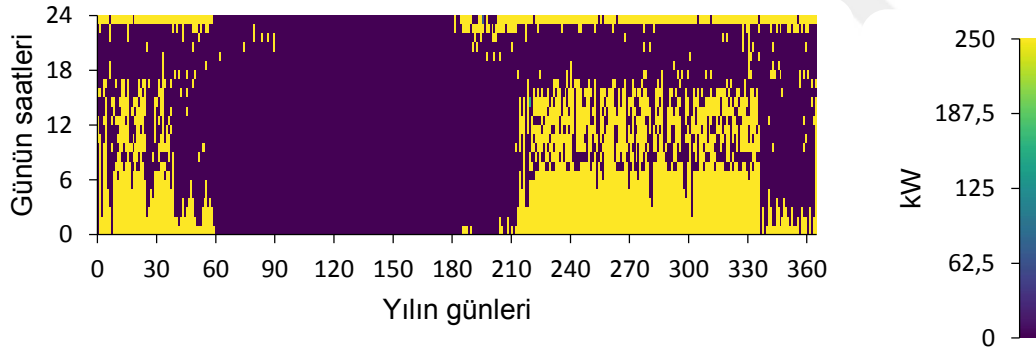
ne kadar esneklik, güvenilirlik ve kararlılık kazandırdığı anlaşılmaktadır. Sadece GES ve RES içeren bu çalışmaya kıyasla yenilenebilir enerji kaynaklarının yanında HSS (SC+YP) sistemi eklenmesiyle kısıtlama ve kesintiler minimize edilmiştir. Böylece sistemin kararlılık ve güvenilirliğinin yanında daha yüksek enerji talebi karşılama oranlarına ulaşılmıştır.

4.3. Yakıt pili enerji depolama sistemi benzetim sonuçları

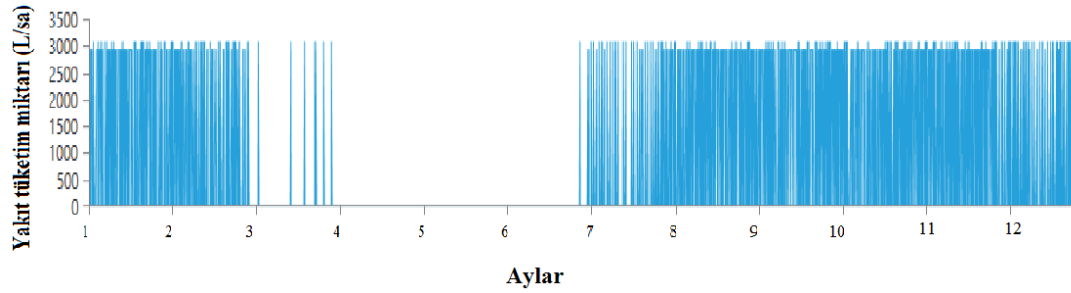
Tablo 4.4'te detaylı olarak benzetim sonuçları verilen ve yakıt olarak hidrojen kullanılan 250 kW kurulu güce sahip YP sisteminden güç çıkışı 603471 kWh/yıl olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Tasarım bileşenlerinden YP ESS'ye ait detaylı benzetim sonuçları.

Kapasite	250 kW	Yakıt	NaBH ₄ Hidrojen
Operasyonel ömrü	5,71 yıl	Yakıt fiyatı	0,00100 \$/L
Kurulum maliyeti	\$3000	Bakım maliyeti	87,6 \$/yıl
Yakıt tüketimi	7074810 L	Elektrik üretimi	603471 kWh/yıl
Üretimde olduğu süre	8,760 h/yıl	Marjinal üretim maliyeti	0,0123 \$/kWh
Sabit üretim maliyeti	-0,0876 \$/h		



Şekil 4.6.'daki yakıt tüketim eğrisinden de anlaşıldığı üzere yazın yağışlara bağlı olarak HDS üretiminin artması sebebiyle YP ihtiyacının belli aylarda ortaya çıkmasada, günün belli tepe talep saatlerinde ve yağış miktarının azaldığı buharlaşmanın arttığı aylarda özellikle YP'nin devreye girdiği görülmektedir.



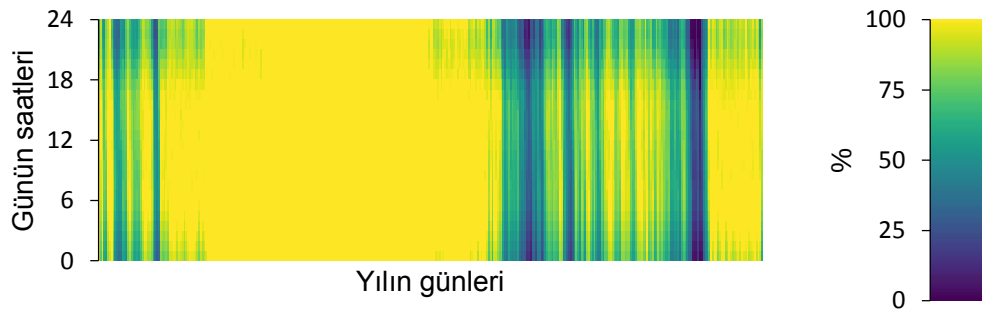
Şekil 4.6. Tasarım bileşenlerinden YP tarafından kullanılan hidrojen yakıt tüketim miktarının yıllık eğrisi.

4.4. Süper kapasitör enerji depolama sistemi benzetim sonuçları

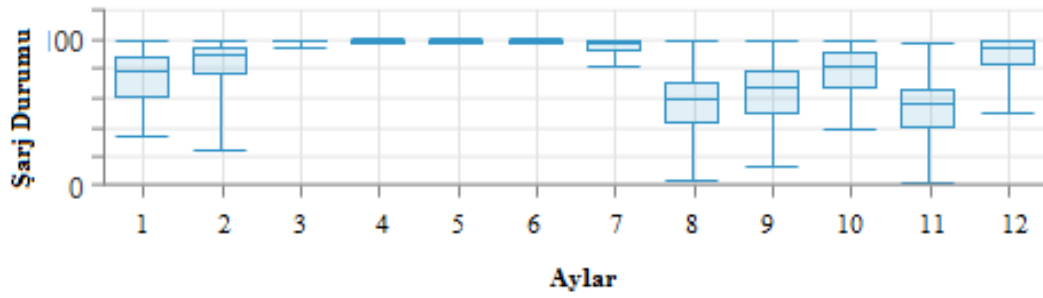
Tablo 4.5. ve Şekil 4.7.'de detaylı olarak benzetim sonuçları verilen SC ESS'nin nominal kapasitesi 1469199 kWh olup sistem için yıllık enerji girdisi 64974836 kWh/yıl olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.5. Tasarım bileşenlerinden SC EES'ye ait detaylı benzetim sonuçları.

Kurulu güç	1217764 kWh	Kullanım ömrü	30 yıl
Yıllık enerji çıktı	64974936 kWh/yıl	Yatırım maliyeti	\$18,4M
Bakım maliyeti	10556204 \$/yıl	Kayıp enerji maliyeti	10556204 kWh/yıl
Otonomi	23,4 saat		



Bir diğer ESS sistemi olan SC bankaları şarj/deşarj eğrileri incelendiğinde yine yazın yağışlara bağlı olarak HDS üretiminin artması tamamlayıcı kaynak ihtiyacını belli aylarda hissettirmese de günün belli tepe yük talebinin olduğu saatlerde ve yağış miktarının azalıp buharlaşmanın arttığı aylarda özellikle SC'lerin şarj doluluk oranının uzun bir süre %100'e ulaşamadığı görülmektedir.



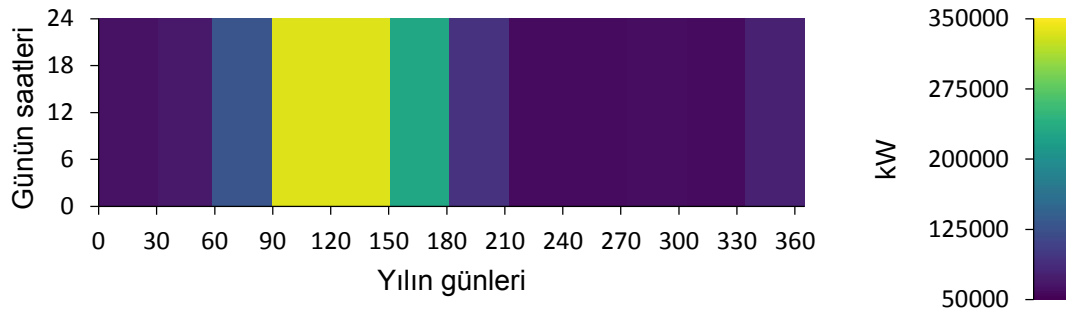
Şekil 4.7. Tasarımdaki bileşenlerden SC'ye ait yıllık şarj durumunu grafiği.

4.5. Hidroelektrik enerji depolama sistemi benzetim sonuçları

Tablo 4.4.'te detaylı olarak benzetim sonuçları verilen 280 MW Alkumru HDS, 319051 kW nominal kapasiteye sahip olup, yıllık üretim miktarı ise 1146487296 kWh/yıl olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.6. Tasarım bileşenlerinden HDS EES'ye ait detaylı benzetim sonuçları.

Kurulu Güç	319051 kW	Toplam üretim	1146487296 kWh/yıl
Yatırım maliyeti	\$851M	Bakım maliyeti	4 097700 \$/yıl
Üretimde olduğu süre	8,760 h/yıl	Maksimum çıkış	335003 kW
Seviyelendirilmiş EBM	0,0608 \$/kWh	HDS penetrasyonu	%208
Kapasite faktörü	%41		

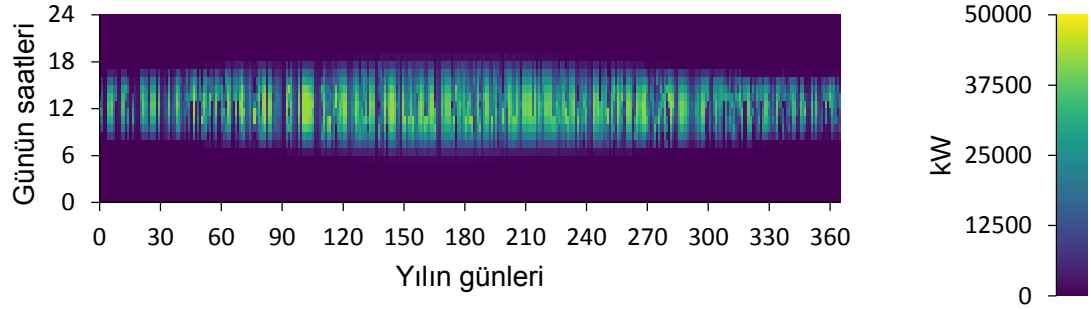


4.6. Hidro-solar enerji üretim sistemi benzetim sonuçları

Tablo 4.4.'te detaylı olarak benzetim sonuçları verilen hidro-solar sistemin yıllık enerji üretim miktarı 66 kWh/yıl olarak elde edilmiştir. Ayrıca sisteme ait aylık olarak bazı parametreler ile tasarım için önemli olan şebekeye basılan enerji miktarını da içeren PVsyst benzetim sonuçları Tablo 4.8.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Tasarım bileşenlerinden hidro-solar GES'e ait detaylı benzetim sonuçları

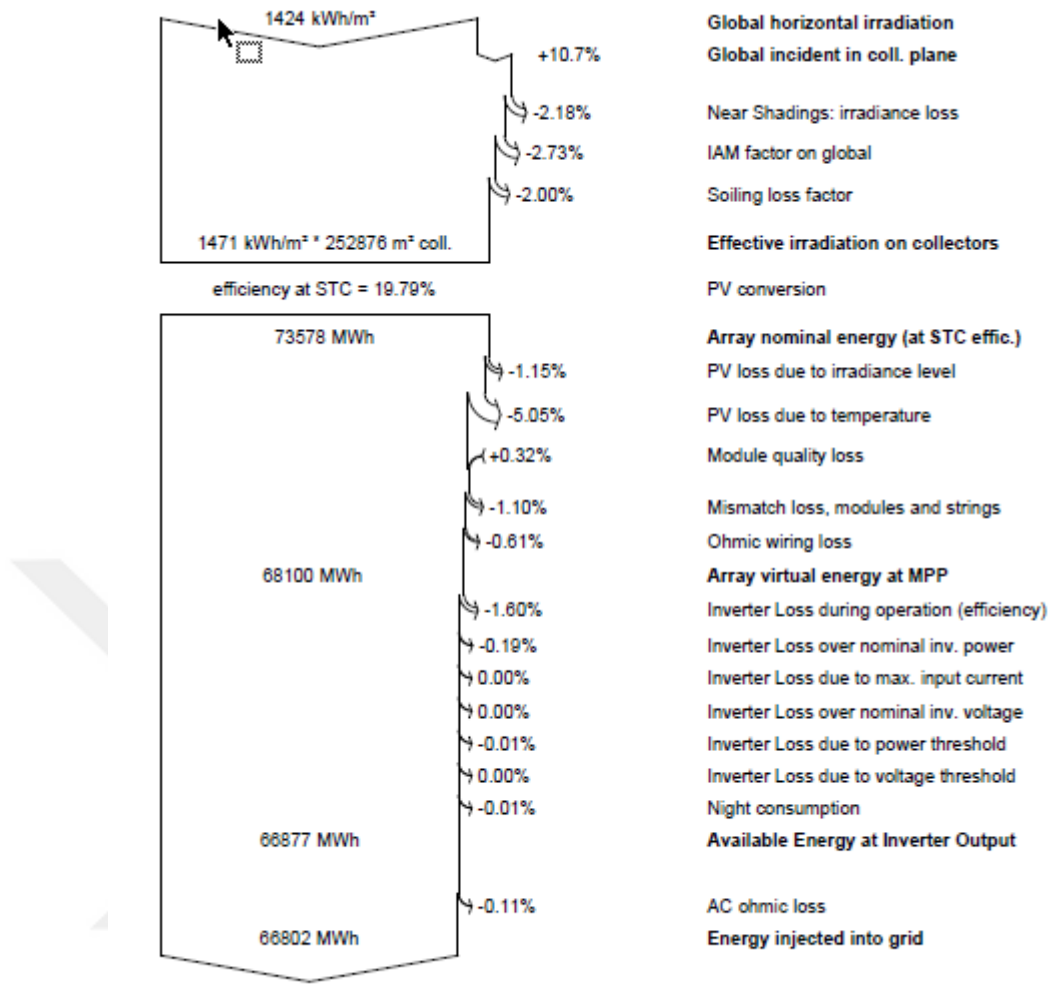
Kurulu güç	50 MW	Minimum çıkış	0 kW
Ortalama çıkış	7626 kW	Maksimum çıkış	42466 kW
Ortalama çıkış	183027 kWh/d	Üretimde olduğu süre	4176 h/yıl
Kapasite faktörü	%18	Seviyelendirilmiş maliyet	0,0261 \$/kWh
Toplam üretim	66805024 kWh/yıl		



Tablo 4.8. Tasarım bileşenlerinden hidro-solar GES sisteminin PVsyst programı benzetimi ile elde edilen aylık enerji üretim miktarları.

Aylar	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_dizi MWh	E_şebeke MWh	PR ratio
Ocak	55,9	22,55	3,64	82,1	75,3	3716	3656	0,890
Şubat	67,0	39,31	5,80	82,4	76,9	3779	3719	0,902
Mart	106,6	58,80	10,87	122,1	114,1	5468	5378	0,881
Nisan	131,1	62,65	15,08	139,6	130,8	6101	5996	0,859
Mayıs	170,2	82,10	21,17	169,4	158,5	7301	7173	0,847
Haziran	183,8	86,66	28,04	177,3	165,6	7442	7309	0,824
Temmuz	185,3	85,74	32,48	182,2	170,2	7476	7340	0,806
Ağustos	165,1	81,98	31,67	170,4	159,7	7045	6918	0,811
Eylül	137,5	57,75	25,96	156,5	147,1	6622	6503	0,831
Ekim	99,3	47,08	20,08	123,7	115,9	5386	5294	0,856
Kasım	69,1	34,87	11,11	95,5	87,9	4248	4181	0,875
Aralık	53,2	28,24	5,85	76,0	68,6	3387	3334	0,877
Toplam	1424,2	687,72	17,72	1577,1	1470,6	67972	66802	0,847

Şekil 4.8.'de hidro-solar GES'e ait benzetim sonucunda elde edilen enerji akış ve kayıp diyagramı bulunmaktadır. Bu diyagramdaki kayıplar sırasıyla; yansımadan oluşan kayıp %2,73, tozlanma veya kirlenmeye bağlı kayıp %2 iken gölgeleme nedeniyle kayıp %2,18 olarak ölçülmüştür. Panel zayıf ışık kaybı %0,6, panel sıcaklık kaybı %5,5, panel uyumsuzluk kaybı %1,1 ve doğru akım kablolama kaybı %0,61 olmak üzere toplamda yaklaşık olarak %14,7'lik dize kaybının yanında %1,6 çevirici kaybı ve %0,11 civarında alternatif akım kablolama kaybı hesaplanmıştır. En büyük oran ısınmaya bağlı olarak %5,5 civarında gerçekleştiği düşünülürse GES'in yüzzer olarak kurulması bu problemin üstesinden gelinmesinde kolaylık sağlayacak ve sistemin enerji üretim verimliliğini artıracaktır.



Şekil 4.8. Hidro-solar GES'e ait benzetim sonucunda elde edilen enerji akış ve kayıp diyagramı.

Aynı yük profilinin sadece şebeke tarafından beslenerek gerçekleştirildiği bir diğer HOMER Pro benzetimine kısaca değinecek olursa ise yıllık 41 M \$ işletme maliyeti ve sistemin toplam NBD'si 534 M \$ civarında olmaktadır. İlk yatırım maliyeti ve çevrim santralleri gibi sistemi büyük yakıt maliyetlerine maruz bırakan bileşenlerinde dahil edilmediği göz önünde bulundurulursa önerilen tasarımda gerçekleştirilen mikro şebekenin son derece ekonomik ve çevre dostu olduğu söylenebilir.

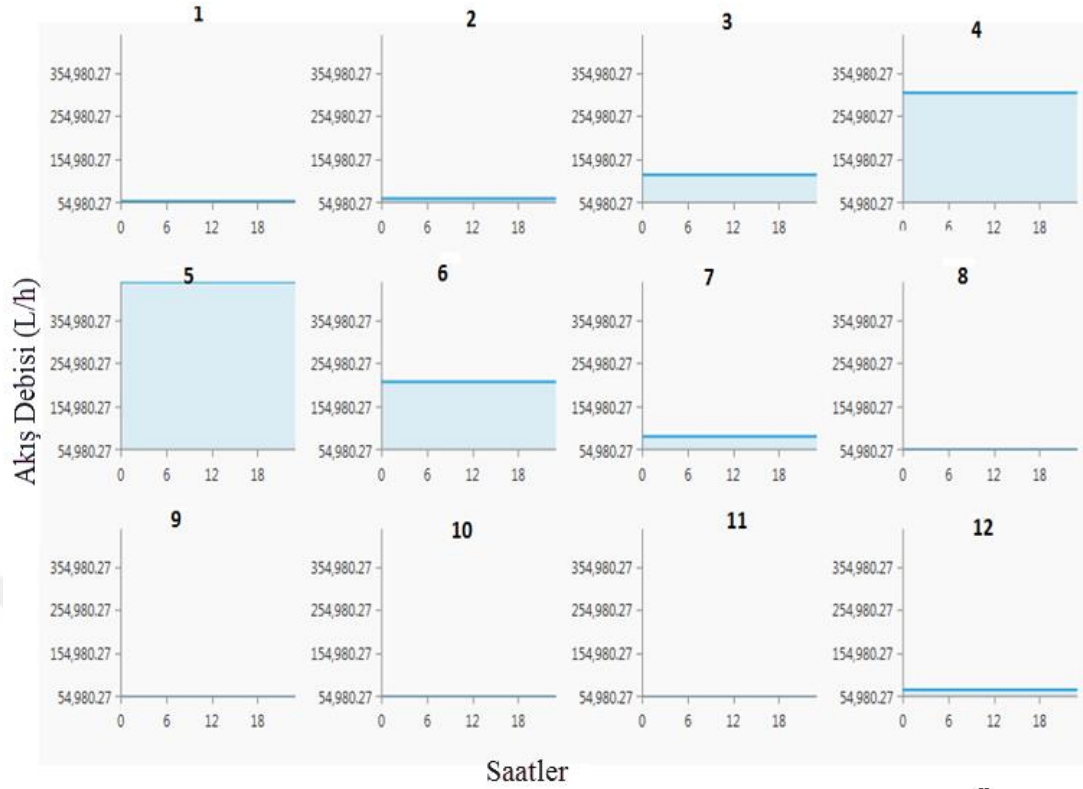
Siirt ilinin enerji talebini karşılamak için kurulan Alkumru HDS, HDS yüzeyinde hidro-solar GES ve HSS olarak ise YP/SC çift işlevli bir depolama sistemini içeren mikro şebekenin yıllık enerji üretim değerlerinin bulunabilmesi, enerji talebinin karşılanma oranlarının hesaplanmasında gerekmektedir. Çalışmanın daha önceki

bölümlerinde bahsedildiği üzere Siirt ili çift fonksiyonlu HSS, hidro-solar ve mevcut Alkumru HDS hibrit Enerji Sistemi, yükü karşılarlarken “Hidro-solar GES”, “Mısır sapı HCl-Sn destekli YP ve SC HSS” ve “HDS” olmak üzere dört farklı enerji talebi karşılama kaynağı bulunmaktadır.

Bu farkı yollarla enerji talebi karşılanmaya çalışılırken sistem konfigürasyonları bu dört farklı enerji biriminin farklı oranlarda katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Hibrit enerji sisteminin enerjetik analizinin yapılabilmesi bu oranların bilinmesiyle mümkündür. Sistemin enerji verimi Denklem 3.4 ile hesaplanabilmektedir.

$$\eta_{\text{sistem}} = \frac{(t_{\text{GES}})\eta_{\text{GES}} + (t_{\text{HDS}})\eta_{\text{HDS}} + (t_{\text{SC}})\eta_{\text{SC}} + (t_{\text{YP}})\eta_{\text{YP}}}{t_{\text{GES}} + t_{\text{HDS}} + t_{\text{SC}} + t_{\text{YP}}} \quad (3.4)$$

Burada η bileşenlere ait verimi ve t verimliliklerin hesaplandığı kullanım sürelerini ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak ikinci bölümden ve literatürden sistem bileşenlerinin genel verimlilikleri HDS, hidro-solar GES, YP ve SC sistemleri için sırasıyla %98, %20, %60 ve %85 olarak hesaba katılmış ve Homer Pro analiz sonuçlarından elde edilen yıllık kullanım süreleri ise yine sırasıyla 8760, 4176, 8760 ve 23,4 saat olarak elde edilmiştir. Bu değerler Denklem 3.4’te yerine koyulup gerekli hesaplamalar yapıldığında sistemin genel verimliliği %68,24 olarak tüm enerji üretim ve depolamam sistemleri değerlendirildiğinde gayet kabul edilebilir bir aralıkta olduğu anlaşılmaktadır. Burada ticari olarak yaygın kullanılan PVsyst benzetimi sonucunda GES STC verimliliği %19,79 olarak hesaplanmıştır. Daha önce materyal metot bölümünde de değindiğimiz bahsettiğimiz gibi (Mehmet Bulut, 2018) pasif soğutma kullanıldığında bile %15 verimlilik artışı yakalayan PV sistemler gibi barajda yüzer olarak kurulması özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklık değerlerine sahip bölgedeki panel verimliliğinin %15 daha artırdığını hesaba katarak %23 olarak alınmıştır.



Şekil 4.9. Tasarım bileşenlerinden HDS'ye ait aylık akış hızları.

Şekil 4.9.'dan de kolaylıkla anlaşılacağı üzere buharlaşmanın çok yüksek ve yağışların düşük olduğu aylarda HDS'nin akış debilerinde gözle görülür düşüşler yaşanmaktadır. Ayrıca barajlara gelen suyun yaklaşık olarak %22'si buharlaşmaktadır. Literatürden elde edilen bilgiler ışığında bu miktarın %60-70'lik kısmının buharlaşmasının yüzer hidro-solar GES ile engellenebilmektedir. Öyleyse buharlaşmanın yoğun, yağışın düşük ve üretimin az olduğu yaz aylarında su potansiyelini artırarak sistemin verimliliğinin kayda değer oranda artıracaktır. Bu nedenle HDS hibrit sistem bileşeni için ideale yakın bir verimlilik oranı seçilmiştir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması, enerji durumu ve yenilenebilir enerjinin kaynakları penetrasyonunun, tasarlanan yeni çift işlevli bir ESS ile uygulanabilirliği noktasında bir fikir vermektedir. Güneş enerjisinin, elektrik üretimi için ekonomik olarak uygun bir potansiyele sahip olduğu görülmüş ve GES'lerin aşırı sıcaklara bağlı verim kaybını azaltmak amacıyla barajların yoğun bu bölgede yüzer olarak uygulanmasının aynı zamanda barajdaki su buharlaşmasının önüne geçerek HDS üretim potansiyelini artırabileceği görülmüştür.

Hibrit enerji sistemindeki ESS'ler noktasında verimli, sürdürülebilir ve güvenilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve artan talep nedeniyle alternatif yöntemlerden birisi olan enerji depolama sistemleri alanında yapılan araştırma sayısının da gün geçtikçe arttığı bilinmektedir. SC'ler yüksek enerji ve YP'ler de yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadır. Bu bağlamda önerilen tasarımda yer alan HSS için atık malzemelerden sentezlenen çift işlevli yeni bir depolama sistemi, deneysel prototip olarak ortaya çıkarılmış ve bu prototipin elektrokimyasal analizlerle elde edilen karakteristik verileri benzetim ortamında kullanılarak uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Atık malzemelerden katalitik ve kapasitif özelliği ön plana çıkarılarak tasarlanan yeni malzeme YP için katalizör ve SC için elektrot olarak kullanılmıştır. Atık malzemelerden tasarlanması, yüksek maliyetlerle anılan SC'ler için bir alternatif sunmaktadır. Aynı zamanda NaBH_4 'ten hidrojen üretimi ile bilinen YP'lerle daha hızlı hidrojen üretimi sağlamak amacıyla uygulanabilir bir katalizör elde edilmiştir. Böylece üretim hızı artırılarak anlık enerji taleplerine SC'ler enerji yoğunluğu noktasında milisaniyeler içinde cevap verebilecekken YP'lerle birlikte de güç yoğunluğu noktasında bu ihtiyaç karşılanmış olacaktır.

Görülmektedir ki HDS, Hidro-Solar sistem ve YP, SC arasında iki farklı mutualist bir yaklaşımla, sıfır karbon salınımı içeren kabul edilebilir maliyetlerde, çevre dostu hibrit bir mikro şebeke tasarımı ortaya konmuştur.

Kısacası, bu analizde aynı zamanda GES, HDS ve HSS hibrit enerji sistemi kullanarak Siirt iline özel, ulusal şebekeye paralel ve alternatif mikro şebeke tasarımı ile enerji talebini sağlama olanakları araştırılmıştır. Araştırılan bölgedeki güç kaynaklarının erişilebilirliği üzerine yapılan değerlendirme sonucunda, önerilen tasarımın uygulanması için güven verici veriler elde edilmiştir. Siirt ili için PVsyst benzetim sonuçları yıllık toplam 1424,2 kWh/m² GSR ve 33 950 saat güneşlenme süresine karşın, normalize edilmiş enerji akış değerleri PV dizi kayıpları 0,64 kWh/kWp/gün, sistem kayıpları 0,07 kWh/kWp/gün, üretilen enerji miktarı 3,6 kWh/kWp/gün şeklinde olmuştur. Bu analizde kullanılan günlük solar radyasyon değerleri “Meteo database” üzerinden elde edilmiştir. Daha sonra PVsyst ve Helliscope gibi yazılımlar ile entegre çalışan HOMER Pro’nun PV sekmesinden PVsyst seçeneğinden gerekli veriler çekilerek hibrit sistem tasarımına dahil edilmiştir. Günlük profil verileri, topluluğun tahmini elektrik yükü talebine dayanmaktadır. Genellikle topluluk yük profilleri akşam saatlerinde zirve yapmaktadır. Sistemin boyutunu etkileyeceğinden, maksimum yükün sisteme tanıtılması önemlidir. HOMER yazılımını kullanarak, enerji kaynaklarını, hidro-solar GES, HDS ve HSS sistemlerini birleştirerek ilin yetkili kurumundan elde edilen enerji talebi verileri ışığında, bu enerji talebini karşılamak için en uygun sistem fizibilite analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda, önerilen hibrit kombinasyonun, diğer seçeneğe (0,139 \$/kWh, 983M \$) kıyasla nispeten düşük EBM (0,138 \$/kWh) ve NBD (983M \$) nedeniyle tekno-ekonomik olarak daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Şebekeden bağımsız mikro şebeke hibrit enerji sistemlerinin değişen çalışma koşulları altında güç üretimi, maliyet analizi ve hibrit sistemlerin davranışı hakkında daha fazla çalışma yapılabilir ve sistemin performansı iyileştirilerek gelecekteki çalışmalar için genişletilebilir. Sistemin içerisinde yer alan HSS’nin bileşenleri YP ve SC depolama birimleri için tam olarak giydirmeye ve sızdırmazlık noktasında elektrot yüzeyinin katalizör içindeki korozyonu veya çözeltiden dolayı elektrot yüzeyinde birikintilerin

oluşması, tekrarlanabilirlik anlamında tam verimlilik elde edilmesini engelliyor olarak değerlendirilmiştir. Bu konuda daha detaylı bir araştırma ile tek depolama sistemi şeklinde prototip ortaya konulabilir. Güneş panelleri aşırı sıcaklardan verimliliği etkilenmeyecek şekilde yüzer olarak tasarlanmış ve pasif soğutma sağlanmıştır. Ayrıca baraj yüzeyindeki yosunlaşmanın engellemesinin, arazi maliyeti olmamasının, su buharlaşmasının azaltılmasının ekonomik geri dönüşleri ayrıca bir deneysel kurulumla daha detaylı araştırılabilir.

Bu tezde, sistemin kesintiye uğramaması amacıyla farklı depolama sistemi tasarımıyla anlık güç yoğun veya enerji yoğun talebe bağlı olarak hızlı reaksiyon veya uzun süreli enerji sağlayabilecek maliyet etkin bir tasarım önerilmiştir. Sonuç olarak, depolama sistemi bulgulara görüldüğü üzere 0,00018 \$/kWh ortalama enerji maliyeti, üniteye 70282119 kWh/yıl giren enerjiye karşın 59 903 839 kWh/yıl çıkan enerji ile hibrit enerji sistemini desteklediği görülmüştür. Prototipi geliştirilen ve ulusal elektrik şebekesine hem paralel hem de alternatif olarak çalışabilecek nitelikteki SC tabanlı bir enerji depolama sisteminin, özellikle PV enerji santrallerinin 24 saat boyunca ulusal şebekeden gelecek tüm enerji taleplerini karşılama noktasında yetkin bir niteliğe ulaşmasını sağlayabileceğini söylemek doğru olacaktır. İleride güncellenmesi muhtemel YEK santrallerinin enerji depolama tesis niteliklerine ilişkin yönetmelik isteklerine cevap verebilecek, maliyet etkin ve enerji verimli depolama çözümü olarak bu tez çalışmasında önerilen SC tabanlı çözüm tercih edilebilir bir seçenek olacaktır.

KAYNAKLAR

- European Commision. European comission climate action. [Accessed July 2017] [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en/ [Accessed].
- Abbasi, T.,Abbasi, S. 2011. ‘Renewable’hydrogen: prospects and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 3034-3040.
- Abbey, C.,Joos, G. 2007. Supercapacitor energy storage for wind energy applications. IEEE transactions on Industry applications, 43, 769-776.
- Abdo, R. F., Pedro, H. T., Koury, R. N., Machado, L., Coimbra, C. F.,Porto, M. P. 2015. Performance evaluation of various cryogenic energy storage systems. Energy, 90, 1024-1032.
- Ahearne, J. 2004. Storage of electric energy, Report on research and development of energy technologies. International Union of Pure and Applied Physics, 76-86.
- Ahmad Hamidi, S., Ionel, D. M.,Nasiri, A. 2015. Modeling and management of batteries and ultracapacitors for renewable energy support in electric power systems—an overview. Electric Power Components and Systems, 43, 1434-1452.
- Ahmed, S., Ahmed, A.,Rafat, M. 2018. Nitrogen doped activated carbon from pea skin for high performance supercapacitor. Materials Research Express, 5, 045508.
- Akbari, H.,Sezgen, O. 1995. Performance evaluation of thermal energy storage systems. Energy and buildings, 22, 15-24.
- Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., Cotter, A. L., Bradshaw, D. T.,Gauntlett, W. D. 2013. DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA, Sandia National Laboratories Albuquerque, NM.
- Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., Cotter, A. L., Bradshaw, D. T.,Gauntlett, W. D. 2015. DOE/EPRI electricity storage handbook in collaboration with NRECA. Sandia national laboratories.
- Akikur, R., Saidur, R., Ping, H.,Ullah, K. 2014. Performance analysis of a co-generation system using solar energy and SOFC technology. Energy Conversion and Management, 79, 415-430.

- Akinyele, D., Rayudu, R. 2014. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, 74-91.
- Al-Foraih, R., Sreekanth, K., Al-Mulla, A. 2018. A techno-economic analysis of the integration of energy storage technologies in electric power systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10, 054102.
- Alami, A. H. 2015. Experimental assessment of compressed air energy storage (CAES) system and buoyancy work energy storage (BWES) as cellular wind energy storage options. *Journal of Energy Storage*, 1, 38-43.
- Alami, A. H. 2020. *Flywheel Storage Systems. Mechanical Energy Storage for Renewable and Sustainable Energy Resources*. Springer.
- Alanne, K., Saari, A. 2006. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10, 539-558.
- Ali, A., Chen, Y., Liu, H., Yu, L., Baloch, Z., Khalid, S., Zhu, J., Chen, L. 2019. Starch-based antimicrobial films functionalized by pomegranate peel. *International journal of biological macromolecules*, 129, 1120-1126.
- Ali, Z. I. 2018. *INVESTIGATION OF OPTIMUM SOLAR-WIND HYBRID OR SEPARATE WATER PUMPING AND ELECTRICITY GENERATION SYSTEMS FOR SOMALIA* Master MS.c, Konya Technical University.
- Alloui, H., Becherif, M., Marouani, K. Modelling and frequency separation energy management of fuel cell-battery hybrid sources system for hybrid electric vehicle. 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, 2013. IEEE, 646-651.
- Alnejaili, T., Drid, S., Mehdi, D., Chrifi-Alaoui, L., Belarbi, R., Hamdouni, A. 2015. Dynamic control and advanced load management of a stand-alone hybrid renewable power system for remote housing. *Energy Conversion and Management*, 105, 377-392.
- Althubaiti, M., Bernard, M., Musilek, P. Fuzzy logic controller for hybrid renewable energy system with multiple types of storage. 2017 IEEE 30th Canadian conference on electrical and computer Engineering (CCECE), 2017. IEEE, 1-6.
- Ameri, M., Hejazi, S. H., Montaser, K. 2005. Performance and economic of the thermal energy storage systems to enhance the peaking capacity of the gas turbines. *Applied thermal engineering*, 25, 241-251.
- Amirante, R., Cassone, E., Distaso, E., Tamburrano, P. 2017. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Conversion and Management*, 132, 372-387.
- Amiryar, M. E., Pullen, K. R. 2017. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7, 286.

- Aneke, M., Wang, M. 2016. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.
- Anisur, M., Kibria, M. A., Mahfuz, M., Saidur, R., Metselaar, I. 2015. Latent heat thermal storage (LHTS) for energy sustainability. *Energy Sustainability Through Green Energy*. Springer.
- Anno, T., Koizumi, H. 2014. Double-input bidirectional DC/DC converter using cell-voltage equalizer with flyback transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 2923-2934.
- Antonelli, M., Barsali, S., Desideri, U., Giglioli, R., Paganucci, F., Pasini, G. 2017. Liquid air energy storage: Potential and challenges of hybrid power plants. *Applied energy*, 194, 522-529.
- Appavou, F., Brown, A., Epp, B., Leidreiter, A., Lins, C., Murdock, H., Musolino, E., Petrichenko, K., Farrell, T., Krader, T. 2017. Renewables 2017 global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris: REN21.
- Ashourian, M., Cherati, S., Zin, A. M., Niknam, N., Mokhtar, A., Anwari, M. 2013. Optimal green energy management for island resorts in Malaysia. *Renewable energy*, 51, 36-45.
- Ashtiani, C., Wright, R., Hunt, G. 2006. Ultracapacitors for automotive applications. *Journal of power sources*, 154, 561-566.
- Atwater, T., Doble, A. 2011. Metal/air batteries. *Linden's Handbook of Batteries*.
- Author, N. 2004. Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK. *EA Technology*, 1, 34.
- Azman, N. H. N., Mamat, Mat Nazir, M. S., Ngee, L. H., Sulaiman, Y. 2018. Graphene-based ternary composites for supercapacitors. *International Journal of Energy Research*, 42, 2104-2116.
- Babuska, V., Beatty, S. M., Deblonk, B. J., Fausz, J. L. A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720), 2004. IEEE, 2784-2800.
- Badgotra, N. 2017. Energy Storage in Power Applications. *International Journal of Analysis of Electrical Machines*, 3, 8-16.
- Bajaj, M., Singh, A. K. 2020. Grid integrated renewable DG systems: A review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques. *International Journal of Energy Research*, 44, 26-69.
- Baker, J. 2008. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36, 4368-4373.

- Baker, J., Collinson, A. 1999. Electrical energy storage at the turn of the millennium. *Power Engineering Journal*, 13, 107-112.
- Barbour, E., Wilson, I. G., Radcliffe, J., Ding, Y., Li, Y. 2016. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and sustainable energy reviews*, 61, 421-432.
- Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R. 1957. Microscopic theory of superconductivity. *Physical Review*, 106, 162.
- Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., Riu, D. 2013. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241, 680-689.
- Barton, J. P., Infield, D. G. 2004. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE transactions on energy conversion*, 19, 441-448.
- Basit, M. A., Dilshad, S., Badar, R., Sami Ur Rehman, S. M. 2020. Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 44, 4132-4162.
- Batke, B., Schmidt, T. S., Grosspietsch, D., Hoffmann, V. H. 2013. A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 240-250.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., Rosehart, W. 2010. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for sustainable development*, 14, 302-314.
- Beck, F., Rüetschi, P. 2000. Rechargeable batteries with aqueous electrolytes. *Electrochimica Acta*, 45, 2467-2482.
- Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., Frackowiak, E. 2014. Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors. *Advanced materials*, 26, 2219-2251.
- Benson, D. K., Potter, T. F., Tracy, C. E. 1994. Design of a variable-conductance vacuum insulation. *SAE transactions*, 176-181.
- Bermúdez, J., Ruisánchez, E., Arenillas, A., Moreno, A., Menéndez, J. 2014. New concept for energy storage: microwave-induced carbon gasification with CO₂. *Energy conversion and management*, 78, 559-564.
- Bhagat, K., Saha, S. K. 2016. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage using encapsulated phase change material for solar thermal power plant. *Renewable Energy*, 95, 323-336.
- Bocklisch, T. 2015. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*, 73, 103-111.

- Bohm, H., Bull, R., Prassek, A. 1998. ZEBRA's response to the new EUCAR/USABC abuse test procedures. EVS-15, Brussels, Sept, 29.
- Boicea, V. A. 2014. Energy storage technologies: The past and the present. *Proceedings of the IEEE*, 102, 1777-1794.
- Bolat, M., Arlıfoğlu, U., Demiryürek, H. K. 2020. Lebit enerji güneş santralinin PVsyst programı ile analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9, 1351-1363.
- Bolat, M., Yavuz, C., Kaya, M. 2021. Investigation of dual-functionalized novel carbon supported Sn material from corn stalk for energy storage and fuel cell systems on distributed generations. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1-15.
- Bolat Maden, T. 2020. Çay Atığı Biyokütlesinden Türetilen Yüksek Performans Karbonun Süperkapasitör Uygulamalarına Uygunluğunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi.
- Bolund, B., Bernhoff, H., Leijon, M. 2007. Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 235-258.
- Boudaoud, S., Khellaf, A., Mohammedi, K., Behar, O. 2015. Thermal performance prediction and sensitivity analysis for future deployment of molten salt cavity receiver solar power plants in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 89, 655-664.
- Brauer, F., Rominger, J., McKenna, R., Fichtner, W. 2019. Battery storage systems: An economic model-based analysis of parallel revenue streams and general implications for industry. *Applied Energy*, 239, 1424-1440.
- Breeze, P. 2018. Pumped storage hydropower. *Power System Energy Storage Technologies*, 13-22.
- Bromaghim, G., Gibeault, K., Serfass, J., Serfass, P., Wagner, E. Hydrogen and fuel cells: the US market report. National Hydrogen Association, 2010.
- Brown, T., Atluri, V., Schmiedeler, J. 2014. A low-cost hybrid drivetrain concept based on compressed air energy storage. *Applied energy*, 134, 477-489.
- Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., Tarascon, J.-M. 2012. Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. *Nature materials*, 11, 19-29.
- Bucciarelli, M., Giannitrapani, A., Paoletti, S., Vicino, A., Zarrilli, D. 2017. Sizing of energy storage systems considering uncertainty on demand and generation. *IFAC-PapersOnLine*, 50, 8861-8866.
- Buchmann, I. 2014. Comparison Table of Secondary Batteries. Battery University [cited 24.8. 2014]. Available from the World Wide Web: < URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries.

- Budt, M., Wolf, D., Span, R., Yan, J. 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied energy*, 170, 250-268.
- Bueno, C., Carta, J. A. 2006. Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10, 312-340.
- Bullich-Massagué, E., Aragüés-Peñalba, M., Sumper, A., Boix-Aragones, O. 2017. Active power control in a hybrid PV-storage power plant for frequency support. *Solar Energy*, 144, 49-62.
- Bullough, C., Gatzen, C., Jakiel, C., Koller, M., Nowi, A., Zunft, S. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy. *Proceedings of the European wind energy conference, EWEC, 2004. Citeseer*, 25.
- Burch, S. D., Parish, R. C., Keyser, M. A. 1995. Thermal management of batteries using a Variable-Conductance Insulation (VCI) enclosure. *National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States)*.
- Burke, A., Miller, M. 2011. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 196, 514-522.
- Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A. 2008. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57, 2721-2735.
- Capasso, C., Veneri, O. 2015. Laboratory bench to test ZEBRA battery plus supercapacitor based propulsion systems for urban electric transportation. *Energy Procedia*, 75, 1956-1961.
- Chade, D., Miklis, T., Dvorak, D. 2015. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations—Grimsey island case study. *Renewable Energy*, 76, 204-211.
- Chalk, S. G., Miller, J. F. 2006. Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems. *Journal of Power Sources*, 159, 73-80.
- Chau, K., Wong, Y., Chan, C. 1999. An overview of energy sources for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 40, 1021-1039.
- Chee, W. K., Lim, H. N., Zainal, Z., Huang, N. M., Harrison, I., Andou, Y. 2016. Flexible graphene-based supercapacitors: a review. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120, 4153-4172.

- Chemali, E., Preindl, M., Malysz, P., Emadi, A. 2016. Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4, 1117-1134.
- 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*, 19, 291-312.
- Chen, H., Ding, Y. 2006. A cryogenic energy system using liquid/slush air as the energy carrier and waste heat and waste cold to maximise efficiency, specifically it does not use combustion in the expansion process. UK Patent G042226PT.
- Chen, H., Ding, Y., Peters, T., Berger, F. 2016a. Method of Storing Energy and a Cryogenic Energy Storage System. Google Patents.
- Chen, H., Yang, C., Deng, K., Zhou, N., Wu, H. 2017. Multi-objective optimization of the hybrid wind/solar/fuel cell distributed generation system using Hammersley Sequence Sampling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 7836-7846.
- Chen, L., Zheng, T., Mei, S., Xue, X., Liu, B., Lu, Q. 2016b. Review and prospect of compressed air energy storage system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4, 529-541.
- Chen, W., Ådnanes, A. K., Hansen, J. F., Lindtjørn, J. O., Tang, T. Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010, 2010. IEEE, 1-6.
- Cheng, F., Chen, J. 2012. Metal-air batteries: from oxygen reduction electrochemistry to cathode catalysts. *Chemical Society Reviews*, 41, 2172-2192.
- Cheung, K. Y., Cheung, S. T., De Silva, R. N., Juvonen, M. P., Singh, R., Woo, J. J. 2003. Large-scale energy storage systems. Imperial College London, ISE2, 2002-2003.
- Cho, Y., Gabbar, H. A. 2019. Review of energy storage technologies in harsh environment. *Safety in Extreme Environments*, 1, 11-25.
- Choi, C., Kim, S., Kim, R., Choi, Y., Kim, S., Jung, H.-Y., Yang, J. H., Kim, H.-T. 2017. A review of vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 263-274.
- Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., Rajkumar, R. K., Isa, D. 2016. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 66, 174-189.
- Chueh, W. C., Falter, C., Abbott, M., Scipio, D., Furler, P., Haile, S. M., Steinfeld, A. 2010. High-flux solar-driven thermochemical dissociation of CO₂ and H₂O using nonstoichiometric ceria. *Science*, 330, 1797-1801.
- Cleveland, C. J., Morris, C. G. 2005. Dictionary of energy, Elsevier.

- Colmenar-Santos, A., Linares-Mena, A.-R., Molina-Ibáñez, E.-L., Rosales-Asensio, E., Borge-Diez, D. 2020. Technical challenges for the optimum penetration of grid-connected photovoltaic systems: Spain as a case study. *Renewable energy*, 145, 2296-2305.
- Conway, B. E. 2013. *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, Springer Science & Business Media.
- Cook, G., Spindler, W., Greife, G. 1991. Overview of battery power regulation and storage. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6, 204-211.
- Cooper, J. 1995. Powering future vehicles with the refuelable zinc/air battery. *Science & Technology Review*, 10.
- Cotterman, T. 2013. *WISE-Energy Storage Technologies: Transforming America's Intelligent Electrical Infrastructure*.
- Crider, J. M., Sudhoff, S. D. 2010. Reducing impact of pulsed power loads on microgrid power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1, 270-277.
- Dalebrook, A. F., Gan, W., Grasemann, M., Moret, S., Laurenczy, G. 2013. Hydrogen storage: beyond conventional methods. *Chemical Communications*, 49, 8735-8751.
- Daneshpour, R., Mehrpooya, M. 2018. Design and optimization of a combined solar thermophotovoltaic power generation and solid oxide electrolyser for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 176, 274-286.
- Daoud, M. I., Massoud, A. M., Abdel-Khalik, A. S., Elserougi, A., Ahmed, S. 2015. A flywheel energy storage system for fault ride through support of grid-connected VSC HVDC-based offshore wind farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31, 1671-1680.
- Demirbas, M. F. 2006. Thermal energy storage and phase change materials: an overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1, 85-95.
- Denholm, P., Holloway, T. 2005. *Improved accounting of emissions from utility energy storage system operation*. ACS Publications.
- Dhameja, S. 2001. *Electric vehicle battery systems*, Elsevier.
- Dhelipan, M., Arunchander, A., Sahu, A., Kalpana, D. 2017. Activated carbon from orange peels as supercapacitor electrode and catalyst support for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Saudi Chemical Society*, 21, 487-494.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Villafañila-Robles, R. 2012. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16, 2154-2171.

- Dihrab, S. S., Sopian, K., Alghoul, M., Sulaiman, M. 2009. Review of the membrane and bipolar plates materials for conventional and unitized regenerative fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1663-1668.
- Dincer, I., Rosen, M. A. 2021. *Thermal energy storage systems and applications*, John Wiley & Sons.
- Divya, K. 2009. Jacob stergaard, ". Battery energy storage technology for power systems—An overview, 511-520.
- Dobie, W. C. 1998. Electrical energy storage. *Power Engineering Journal*, 12, 176-180.
- Doe, U. 2018. DOE global energy storage database. URL: <https://www.energystorageexchange.org/projects>. Accessed June 7, 2018.
- Droste-Franke, B. 2012. Assessing environmental impacts of storage technologies and competing options for balancing demand and supply in 2050.
- Drozдов, A., Eremets, M., Troyan, I., Ksenofontov, V., Shylin, S. I. 2015. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. *Nature*, 525, 73-76.
- Dubal, D. P., Ayyad, O., Ruiz, V., Gomez-Romero, P. 2015. Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chemical Society Reviews*, 44, 1777-1790.
- Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J.-M. 2011. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 334, 928-935.
- Dursun, B. 2012. Determination of the optimum hybrid renewable power generating systems for Kavakli campus of Kırklareli University, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6183-6190.
- Duvall, M., Alexander, M. 2005. *Batteries for Electric Drive Vehicles—Status 2005*. Electric Power Research Institute, Tech. Rep.
- Eberle, U., Felderhoff, M., Schueth, F. 2009. Chemical and physical solutions for hydrogen storage. *Angewandte Chemie International Edition*, 48, 6608-6630.
- Efficiency, E., Energy, R., Kost, R. 2003. *Annual Progress Report for the Light Vehicle Propulsion & Ancillary Subsystems Program*.
- Elias, C. N., Stathopoulos, V. N. 2019. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia*, 161, 385-394.
- Energy, U. 2017. *Employment Report*. US Department of Energy, January.

- Epri, D. 2010. Electricity energy storage technology options-a white paper primer on applications, costs and benefits. Report.
- Er, S., Suh, C., Marshak, M. P., Aspuru-Guzik, A. 2015. Computational design of molecules for an all-quinone redox flow battery. *Chemical science*, 6, 885-893.
- Etxeberria, A., Vechiu, I., Camblong, H., Vinassa, J.-M. 2012. Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids. *Energy Conversion and Management*, 54, 113-121.
- Europe, W. 2018. Wind in power 2017, Annual combined onshore and offshore wind energy statistics. Published February.
- Faisal, M., Hannan, M. A., Ker, P. J., Hussain, A., Mansor, M. B., Blaabjerg, F. 2018. Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *Ieee Access*, 6, 35143-35164.
- Fangaj, E., Ceyhan, A. A. 2020. Apricot Kernel shell waste treated with phosphoric acid used as a green, metal-free catalyst for hydrogen generation from hydrolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 17104-17117.
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. 2020. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579.
- Faraji, F., Majazi, A., Al-Haddad, K. 2017. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 477-490.
- Farhadi, M., Mohammed, O. 2015. Energy storage technologies for high-power applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52, 1953-1961.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F., Saleman, A., Islam, M. 2012. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5511-5528.
- Fazelpour, F., Soltani, N., Rosen, M. A. 2016. Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran. *International journal of hydrogen energy*, 41, 7732-7743.
- Ferreira, H. L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W., Lopes, J. P. 2013. Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, 53, 288-298.
- Figgenger, J., Stenzel, P., Kairies, K.-P., Linßen, J., Haberschusz, D., Wessels, O., Angenendt, G., Robinius, M., Stolten, D., Sauer, D. U. 2020. The development of stationary battery storage systems in Germany—A market review. *Journal of energy storage*, 29, 101153.

- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P. 2018. Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 861-876.
- Florides, G., Kalogirou, S. 2007. Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32, 2461-2478.
- Forse, A. C., Merlet, C., Griffin, J. M., Grey, C. P. 2016. New perspectives on the charging mechanisms of supercapacitors. *Journal of the American Chemical Society*, 138, 5731-5744.
- Fossati, J. P., Galarza, A., Martín-Villate, A., Fontan, L. 2015. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids. *Renewable Energy*, 77, 539-549.
- Fuchs, G., Lunz, B., Leuthold, M., Sauer, D. U. 2015. Overview of nonelectrochemical storage technologies. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Elsevier.
- Gabbar, H. A., Othman, A. M. Flywheel-Based Fast Charging Station—FFCS for Electric Vehicles and Public Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017. IOP Publishing, 012009.
- Gallagher, K. G., Goebel, S., Greszler, T., Mathias, M., Oelerich, W., Eroglu, D., Srinivasan, V. 2014. Quantifying the promise of lithium–air batteries for electric vehicles. *Energy & Environmental Science*, 7, 1555-1563.
- Galloway, R., Dustmann, C. ZEBRA battery-material cost availability and recycling. *Proceeding of international electric vehicle symposium (EVS-20)*, Long Beach, Canada, 2003. 1-9.
- García-Plaza, M., Serrano-Jiménez, D., Carrasco, J. E.-G., Alonso-Martínez, J. 2015. A Ni–Cd battery model considering state of charge and hysteresis effects. *Journal of Power Sources*, 275, 595-604.
- Gaub, J., Van Zyl, A. 1997. Mercedes-Benz Electric Vehicles with ZEBRA Batteries. *EVS-14*, Orlando, FL.
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F. 2010. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14, 31-55.
- Girishkumar, G., McCloskey, B., Luntz, A. C., Swanson, S., Wilcke, W. 2010. Lithium–air battery: promise and challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1, 2193-2203.
- Gong, K., Fang, Q., Gu, S., Li, S. F. Y., Yan, Y. 2015. Nonaqueous redox-flow batteries: organic solvents, supporting electrolytes, and redox pairs. *Energy & Environmental Science*, 8, 3515-3530.

- Greenblatt, J. B., Succar, S., Denkenberger, D. C., Williams, R. H., Socolow, R. H. 2007. Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation. *Energy policy*, 35, 1474-1492.
- Gu, L., Kou, X., Jia, J. Distance measurement for tower crane obstacle based on multi-ultrasonic sensors. 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2012. IEEE, 1028-1032.
- Guney, M. S., Tepe, Y. 2017. Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1187-1197.
- Gurumurthy, S. R., Agarwal, V., Sharma, A. 2016. High-efficiency bidirectional converter for flywheel energy storage application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 5477-5487.
- Gürten İnal, İ. I. Y., Aktaş, Z. T. D. 2016. Biyokütle temelli aktif karbonların elektrokimyasal çift tabaka kapasitörlerde elektrot malzemesi olarak kullanımı. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- H Abedin, A., A Rosen, M. 2011. A critical review of thermochemical energy storage systems. *The open renewable energy journal*, 4.
- Habib, H. F., Mohamed, A., El Hariri, M., Mohammed, O. A. 2017. Utilizing supercapacitors for resiliency enhancements and adaptive microgrid protection against communication failures. *Electric Power Systems Research*, 145, 223-233.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V. 2009. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13, 1513-1522.
- Hajiaghasi, S., Salemnia, A., Hamzeh, M. 2019. Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 21, 543-570.
- Hall, P. J., Bain, E. J. 2008. Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy policy*, 36, 4352-4355.
- Hannan, M., Hoque, M. M., Mohamed, A., Ayob, A. 2017. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 771-789.
- Hao, L., Ning, J., Luo, B., Wang, B., Zhang, Y., Tang, Z., Yang, J., Thomas, A., Zhi, L. 2015. Structural evolution of 2D microporous covalent triazine-based framework toward the study of high-performance supercapacitors. *Journal of the American Chemical Society*, 137, 219-225.
- Harats, Y. Operational aspects of the electric fuel zinc-air battery system for evs. *Proc. 12th Int. Seminar on Primary and Secondary Battery Technology and Applications*, 1994. 22-23.

- Hartmann, N., Vöhringer, O., Kruck, C., Eltrop, L. 2012. Simulation and analysis of different adiabatic compressed air energy storage plant configurations. *Applied Energy*, 93, 541-548.
- Hasan, N. S., Hassan, M. Y., Majid, M. S., Rahman, H. A. 2013. Review of storage schemes for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 237-247.
- Hawkins, D. 2011. Flywheels Keep the Grid in Tune. *IEEE Spectrum*, 27.
- Headley, A. J., Copp, D. A. 2020. Energy storage sizing for grid compatibility of intermittent renewable resources: A California case study. *Energy*, 198, 117310.
- Heidrich, E., Dolfing, J., Scott, K., Edwards, S., Jones, C., Curtis, T. 2013. Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 6979-6989.
- Hemmati, R., Saboori, H. 2016. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 11-23.
- Henson, W. 2008. Optimal battery/ultracapacitor storage combination. *Journal of Power Sources*, 179, 417-423.
- Hiroshima, N., Hatta, H., Koyama, M., Yoshimura, J., Nagura, Y., Goto, K., Kogo, Y. 2016. Spin test of three-dimensional composite rotor for flywheel energy storage system. *Composite Structures*, 136, 626-634.
- Ho, C. K., Atcitty, S. 2018. Energy Storage & Power Electronics/Concentrating Solar Power and Thermal Energy Storage (presentation). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Hoque, M., Hannan, M., Mohamed, A. 2016. Voltage equalization control algorithm for monitoring and balancing of series connected lithium-ion battery. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8, 025703.
- Hosseini, M., Dincer, I., Naterer, G., Rosen, M. 2012. Thermodynamic analysis of filling compressed gaseous hydrogen storage tanks. *International journal of hydrogen energy*, 37, 5063-5071.
- Hosseinifar, M., Petric, A. 2016. Effect of high charge rate on cycle life of ZEBRA (Na/NiCl₂) cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 163, A1226.
- Hou, J., Shao, Y., Ellis, M. W., Moore, R. B., Yi, B. 2011. Graphene-based electrochemical energy conversion and storage: fuel cells, supercapacitors and lithium ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13, 15384-15402.
- Huang, K.-L., Li, X.-G., Liu, S.-Q., Tan, N., Chen, L.-Q. 2008. Research progress of vanadium redox flow battery for energy storage in China. *Renewable energy*, 33, 186-192.

- Huang, X., Zhang, Z., Jiang, J. Fuel cell technology for distributed generation: an overview. 2006 IEEE international symposium on industrial electronics, 2006. IEEE, 1613-1618.
- Huskinson, B., Marshak, M. P., Suh, C., Er, S., Gerhardt, M. R., Galvin, C. J., Chen, X., Aspuru-Guzik, A., Gordon, R. G., Aziz, M. J. 2014. A metal-free organic–inorganic aqueous flow battery. *Nature*, 505, 195-198.
- Ibrahim, H. 2008. A. Ilinca, and J. Perron. Energy storage systems-Characteristics and comparisons, 1221-1250.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J. 2008. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12, 1221-1250.
- Inal, I. I. G., Aktas, Z. 2020. Enhancing the performance of activated carbon based scalable supercapacitors by heat treatment. *Applied Surface Science*, 514, 145895.
- Inal, I. I. G., Holmes, S. M., Banford, A., Aktas, Z. 2015. The performance of supercapacitor electrodes developed from chemically activated carbon produced from waste tea. *Applied Surface Science*, 357, 696-703.
- Inal, I. I. G., Holmes, S. M., Yagmur, E., Ermumcu, N., Banford, A., Aktas, Z. 2018. The supercapacitor performance of hierarchical porous activated carbon electrodes synthesised from demineralised (waste) cumin plant by microwave pretreatment. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 61, 124-132.
- Ise, T., Kita, M., Taguchi, A. 2005. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, 1915-1918.
- Jain, A., Balasubramanian, R., Srinivasan, M. 2016. Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283, 789-805.
- Jamil, F., Ala'a, H., Naushad, M., Baawain, M., Al-Mamun, A., Saxena, S. K., Viswanadham, N. 2020. Evaluation of synthesized green carbon catalyst from waste date pits for tertiary butylation of phenol. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 298-307.
- Janek, J., Zeier, W. G. 2016. A solid future for battery development. *Nature Energy*, 1, 1-4.
- Jannelli, E., Minutillo, M., Lavadera, A. L., Falcucci, G. 2014. A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology. *Energy*, 78, 313-322.
- Jiancheng, Z., Lipei, H., Zhiye, C., Su, W. Research on flywheel energy storage system for power quality. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, 2002. IEEE, 496-499.

- Jing, W., Lai, C. H., Wong, S. H. W., Wong, M. L. D. 2017a. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. *IET Renewable Power Generation*, 11, 461-469.
- Jing, W., Lai, C. H., Wong, W. S., Wong, M. D. 2017b. Dynamic power allocation of battery-supercapacitor hybrid energy storage for standalone PV microgrid applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 55-64.
- Ju, F., Zhang, Q., Deng, W., Li, J. Review of structures and control of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2014. IEEE, 143-148.
- Kaldellis, J., Zafirakis, D. 2007. Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency. *Energy*, 32, 2295-2305.
- Kalinci, Y. 2015. Alternative energy scenarios for Bozcaada island, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 468-480.
- Kamerlingh Onnes, H. 1913. *Commun. Physical Lab. Leiden*, Suppl., 34b, 55-70.
- Kang, J., Kwak, S., Jang, S., Kwon, O., Choi, S., Eom, H., Nam, I. Recycled energy storage materials for the supercapacitors from waste coffee sludge. *ECS Meeting Abstracts*, 2020. IOP Publishing, 3810.
- Karpinski, A., Makovetski, B., Russell, S., Serenyi, J., Williams, D. 1999. Silver-zinc: status of technology and applications. *Journal of Power Sources*, 80, 53-60.
- Kashem, M., Ledwich, G. 2007. Energy requirement for distributed energy resources with battery energy storage for voltage support in three-phase distribution lines. *Electric power systems research*, 77, 10-23.
- Kassem, M., Bernard, J., Revel, R., Pelissier, S., Duclaud, F., Delacourt, C. 2012. Calendar aging of a graphite/LiFePO₄ cell. *Journal of Power Sources*, 208, 296-305.
- Kawakami, N., Iijima, Y., Fukuhara, M., Bando, M., Sakanaka, Y., Ogawa, K., Matsuda, T. Development and field experiences of stabilization system using 34MW NAS batteries for a 51MW wind farm. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010. IEEE, 2371-2376.
- Kaya, K., Koç, E. 2015. Enerji üretim santralleri maliyet analizi. *Mühendis ve Makina*, 56, 61-68.
- Kaya, M. 2020. Evaluating organic waste sources (spent coffee ground) as metal-free catalyst for hydrogen generation by the methanolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 12743-12754.

- Kaya, M., Bekirogullari, M. 2019. Investigation of hydrogen production from sodium borohydride methanolysis in the presence of Al_2O_3 /spirulina platensis supported Co catalyst. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 69-76.
- Keil, P., Englberger, M., Jossen, A. 2015. Hybrid energy storage systems for electric vehicles: An experimental analysis of performance improvements at subzero temperatures. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 998-1006.
- Kerskes, H., Mette, B., Bertsch, F., Asenbeck, S., Drück, H. 2012. Chemical energy storage using reversible solid/gas-reactions (CWS)—results of the research project. *Energy Procedia*, 30, 294-304.
- Kessling, W., Laevemann, E., Peltzer, M. 1998. Energy storage in open cycle liquid desiccant cooling systems. *International journal of refrigeration*, 21, 150-156.
- Khaligh, A., Li, Z. 2010. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 59, 2806-2814.
- Khan, N., Dilshad, S., Khalid, R., Kalair, A. R., Abas, N. 2019. Review of energy storage and transportation of energy. *Energy Storage*, 1, e49.
- Killer, M., Farrokhseresht, M., Paterakis, N. G. 2020. Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region. *Applied energy*, 260, 114166.
- Kim, S.-H., Choi, K.-H., Cho, S.-J., Choi, S., Park, S., Lee, S.-Y. 2015. Printable solid-state lithium-ion batteries: a new route toward shape-conformable power sources with aesthetic versatility for flexible electronics. *Nano letters*, 15, 5168-5177.
- Kiran, B. D. H., Kumari, M. S. 2016. Demand response and pumped hydro storage scheduling for balancing wind power uncertainties: A probabilistic unit commitment approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 114-122.
- Kishimoto, K., Hasegawa, K., Asano, T. 1998. Development of generator of liquid air storage energy system. *Mitsubishi Juko Giho*, 35, 60-63.
- Kluiters, E. C., Schmal, D., Ter Veen, W. R., Posthumus, K. J. 1999. Testing of a sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery for electric propulsion of ships and vehicles. *Journal of power sources*, 80, 261-264.
- Knowlen, C., Hertzberg, A., Mattick, A. Automotive propulsion using liquid nitrogen. 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1994. 3349.
- Knowlen, C., Mattick, A., Bruckner, A. P., Hertzberg, A. 1998. High efficiency energy conversion systems for liquid nitrogen automobiles. *SAE transactions*, 1837-1842.

- Knowlen, C., Williams, J., Mattick, A., Deparis, H., Hertzberg, A. 1997. Quasi-isothermal expansion engines for liquid nitrogen automotive propulsion. SAE Technical Paper.
- Kojima, Y., Suzuki, K.-I., Fukumoto, K., Sasaki, M., Yamamoto, T., Kawai, Y., Hayashi, H. 2002. Hydrogen generation using sodium borohydride solution and metal catalyst coated on metal oxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 1029-1034.
- Kolkert, W. J., Jamet, F. 1999. Electric energy gun technology: status of the French-German-Netherlands programme. *IEEE transactions on magnetics*, 35, 25-30.
- Kondoh, J., Ishii, I., Yamaguchi, H., Murata, A., Otani, K., Sakuta, K., Higuchi, N., Sekine, S., Kamimoto, M. 2000. Electrical energy storage systems for energy networks. *Energy conversion and management*, 41, 1863-1874.
- Koohi-Fayegh, S., Rosen, M. A. 2020. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
- Koot, M., Kessels, J. T., De Jager, B., Heemels, W., Van Den Bosch, P., Steinbuch, M. 2005. Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE transactions on vehicular technology*, 54, 771-782.
- Koshizuka, N. 2006. R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 445, 1103-1108.
- Kouchachvili, L., Yaïci, W., Entchev, E. 2018. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237-248.
- Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., Zeraoui, Y. 2014. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 59-80.
- Köse, K. Ö., Pişkin, B., Aydınol, M. K. 2018. Chemical and structural optimization of ZnCl₂ activated carbons via high temperature CO₂ treatment for EDLC applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 18607-18616.
- Kötz, R., Carlen, M. 2000. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica acta*, 45, 2483-2498.
- Kral, S., Karasik, V., Lvovsky, Y., Grut, K., Kelley, J., Dixon, K., Ribeiro, P., Kunz, R. 1998. Alaska SMES: Form and function for the world's largest magnet. *Advances in cryogenic engineering*. Springer.
- Krawczyk, P., Badyda, K., Karellas, S., Kakaras, E., Bujalski, W. 2017. Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air Energy storage system. *Energy*, 138, 12-18.

- Krawczyk, P., Szablowski, Ł., Karellas, S., Kakaras, E., Badyda, K. 2018. Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems. *Energy*, 142, 46-54.
- Krishan, O., Suhag, S. 2019. An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, 43, 6171-6210.
- Lai, Q., Zhang, H., Li, X., Zhang, L., Cheng, Y. 2013. A novel single flow zinc–bromine battery with improved energy density. *Journal of Power Sources*, 235, 1-4.
- Lazarewicz, M., Arseneaux, J. Flywheel-based frequency regulation demonstration projects status. *Proceedings of EESAT conference, San Francisco, USA, 2005*. 1-22.
- Lazzeroni, P., Olivero, S., Repetto, M., Stirano, F., Vallet, M. 2019. Optimal battery management for vehicle-to-home and vehicle-to-grid operations in a residential case study. *Energy*, 175, 704-721.
- Lee, D. H., Kim, U. S., Shin, C. B., Lee, B. H., Kim, B. W., Kim, Y.-H. 2008. Modelling of the thermal behaviour of an ultracapacitor for a 42-V automotive electrical system. *Journal of Power Sources*, 175, 664-668.
- Lee, G.-J., Luiz, A. M. 2011. Superconductivity application in power system. *Applications of High-Tc Superconductivity*. Intech.
- Lee, J. H., Yoon, C. S., Hwang, J.-Y., Kim, S.-J., Maglia, F., Lamp, P., Myung, S.-T., Sun, Y.-K. 2016. High-energy-density lithium-ion battery using a carbon-nanotube–Si composite anode and a compositionally graded Li [Ni 0.85 Co 0.05 Mn 0.10] O₂ cathode. *Energy & Environmental Science*, 9, 2152-2158.
- Lee, J. S., Tai Kim, S., Cao, R., Choi, N. S., Liu, M., Lee, K. T., Cho, J. 2011. Metal–air batteries with high energy density: Li–air versus Zn–air. *Advanced Energy Materials*, 1, 34-50.
- Lee, K. S. 2010. A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems. *Energies*, 3, 1320-1334.
- Lee, S.-Y., Choi, K.-H., Choi, W.-S., Kwon, Y. H., Jung, H.-R., Shin, H.-C., Kim, J. Y. 2013. Progress in flexible energy storage and conversion systems, with a focus on cable-type lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 6, 2414-2423.
- Lefebvre, D., Tezel, F. H. 2017. A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 116-125.

- Lehtola, T., Zahedi, A. 2019. Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 25-31.
- Lemofouet, S., Rufer, A. 2006. Hybrid energy storage system based on compressed air and super-capacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT). *IEEE Transactions on Industry Applications*, 126, 911-920.
- Leszczynski, J., Grybos, D. 2019. Compensation for the complexity and over-scaling in industrial pneumatic systems by the accumulation and reuse of exhaust air. *Applied Energy*, 239, 1130-1141.
- Lex, P., Jonshagen, B. 1999. The zinc/bromine battery system for utility and remote area applications. *Power Engineering Journal*, 13, 142-148.
- Li, G., Lu, X., Kim, J. Y., Meinhardt, K. D., Chang, H. J., Canfield, N. L., Sprenkle, V. L. 2016a. Advanced intermediate temperature sodium–nickel chloride batteries with ultra-high energy density. *Nature communications*, 7, 1-6.
- Li, G., Lu, X., Kim, J. Y., Viswanathan, V. V., Meinhardt, K. D., Engelhard, M. H., Sprenkle, V. L. 2015a. An advanced Na–FeCl₂ ZEBRA battery for stationary energy storage application. *Advanced Energy Materials*, 5, 1500357.
- Li, J., Gee, A. M., Zhang, M., Yuan, W. 2015b. Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model. *Energy*, 86, 175-185.
- Li, J., Xiong, R., Yang, Q., Liang, F., Zhang, M., Yuan, W. 2017. Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system. *Applied Energy*, 201, 257-269.
- Li, J., Yang, Q., Yao, P., Sun, Q., Zhang, Z., Zhang, M., Yuan, W. 2016b. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid. *Energy Procedia*, 103, 82-87.
- Li, J., Zhang, M., Yang, Q., Zhang, Z., Yuan, W. 2016c. SMES/battery hybrid energy storage system for electric buses. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, 1-5.
- Li, J., Zhang, Q., Xiao, X., Cheng, Y.-T., Liang, C., Dudney, N. J. 2015c. Unravelling the impact of reaction paths on mechanical degradation of intercalation cathodes for lithium-ion batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 137, 13732-13735.
- Li, L., Wu, Z., Yuan, S., Zhang, X.-B. 2014. Advances and challenges for flexible energy storage and conversion devices and systems. *Energy & Environmental Science*, 7, 2101-2122.

- Li, Y., Gao, W., Ruan, Y. 2018. Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan. *Renewable energy*, 127, 514-523.
- Li, Y., Gong, M., Liang, Y., Feng, J., Kim, J.-E., Wang, H., Hong, G., Zhang, B., Dai, H. 2013. Advanced zinc-air batteries based on high-performance hybrid electrocatalysts. *Nature communications*, 4, 1-7.
- Lim, E., Jo, C., Kim, H., Kim, M.-H., Mun, Y., Chun, J., Ye, Y., Hwang, J., Ha, K.-S., Roh, K. C. 2015. Facile synthesis of Nb₂O₅@ carbon core-shell nanocrystals with controlled crystalline structure for high-power anodes in hybrid supercapacitors. *ACS nano*, 9, 7497-7505.
- Lim, H.-D., Lee, B., Zheng, Y., Hong, J., Kim, J., Gwon, H., Ko, Y., Lee, M., Cho, K., Kang, K. 2016. Rational design of redox mediators for advanced Li-O₂ batteries. *Nature Energy*, 1, 1-9.
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., Fang, G. 2018. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 2730-2742.
- Linden, D. 2002. Reddy.: *TB Handbook of Batteries*. McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Liu, C.-H., Chen, B.-H., Hsueh, C.-L., Ku, J.-R., Jeng, M.-S., Tsau, F. 2009. Hydrogen generation from hydrolysis of sodium borohydride using Ni-Ru nanocomposite as catalysts. *International journal of hydrogen energy*, 34, 2153-2163.
- Liu, H., Jiang, J. 2007. Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability. *Energy and buildings*, 39, 599-604.
- Liu, S., Sun, S., You, X.-Z. 2014. Inorganic nanostructured materials for high performance electrochemical supercapacitors. *Nanoscale*, 6, 2037-2045.
- Liu, T., Zhang, F., Song, Y., Li, Y. 2017. Revitalizing carbon supercapacitor electrodes with hierarchical porous structures. *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 17705-17733.
- Liu, W., Kang, D., Zhang, C., Peng, G., Yang, X., Wang, S. 2016. Design of a High-T_c Superconductive Maglev Flywheel System at 100-kW Level. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, 1-5.
- Lu, M.-S., Chang, C.-L., Lee, W.-J., Wang, L. 2009. Combining the wind power generation system with energy storage equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, 2109-2115.
- Lu, P., Xue, D., Yang, H., Liu, Y. 2013. Supercapacitor and nanoscale research towards electrochemical energy storage. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4, 2-26.

- Lu, S., Corzine, K. A., Ferdowsi, M. 2007. A new battery/ultracapacitor energy storage system design and its motor drive integration for hybrid electric vehicles. *IEEE transactions on vehicular technology*, 56, 1516-1523.
- Lu, W., Henry, K., Turchi, C., Pellegrino, J. 2008. Incorporating ionic liquid electrolytes into polymer gels for solid-state ultracapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 155, A361.
- Lukatskaya, M. R., Dunn, B., Gogotsi, Y. 2016. Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage. *Nature communications*, 7, 1-13.
- Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F., Emadi, A. 2008. Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55, 2258-2267.
- Lund, H., Salgi, G. 2009. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy conversion and management*, 50, 1172-1179.
- Lund, P. D., Lindgren, J., Mikkola, J., Salpakari, J. 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 785-807.
- 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*, 137, 511-536.
- M Budzianowski, W., Milewski, J. 2011. Solid-oxide fuel cells in power generation applications: a review. *Recent patents on engineering*, 5, 165-189.
- Ma, S., Wu, Y., Wang, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Yan, X., Wei, Y., Liu, P., Wang, J., Jiang, K. 2015. Reversibility of noble metal-catalyzed aprotic Li-O₂ batteries. *Nano letters*, 15, 8084-8090.
- Ma, T.-Y., Liu, L., Yuan, Z.-Y. 2013. Direct synthesis of ordered mesoporous carbons. *Chemical Society Reviews*, 42, 3977-4003.
- Machado, F., Trovão, J. P. F., Antunes, C. H. 2015. Effectiveness of supercapacitors in pure electric vehicles using a hybrid metaheuristic approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 29-36.
- Mahlia, T., Saktisahdan, T., Jannifar, A., Hasan, M., Matseelar, H. 2014. A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 532-545.
- Maisonnave, O., Moreau, L., Aubrée, R., Benkhoris, M.-F., Neu, T., Guyomarc'h, D. 2018. Optimal energy management of an underwater compressed air energy storage station using pumping systems. *Energy conversion and management*, 165, 771-782.
- Makansi, J., Abboud, J. 2002. Energy storage. *Energy Storage Council White Paper*.

- Manla, E., Nasiri, A., Rentel, C. H., Hughes, M. 2009. Modeling of zinc bromide energy storage for vehicular applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 624-632.
- Manohar, A. K., Malkhandi, S., Yang, B., Yang, C., Prakash, G. S., Narayanan, S. 2012. A high-performance rechargeable iron electrode for large-scale battery-based energy storage. *Journal of The Electrochemical Society*, 159, A1209.
- Market, A. C. 2019. Global Forecast to 2021. Market Research Report, 2017. Available at: [https://www.marketsandmarkets](https://www.marketsandmarkets....)
- Matters, S. LOW-TECH MAGAZINE.
- May, G. J., Davidson, A., Monahov, B. 2018. Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of energy storage*, 15, 145-157.
- Mcdowall, J. High power batteries for utilities-the world's most powerful battery and other developments. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004., 2004. IEEE, 2034-2037.
- Mcdowall, J. 2006. Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. *Journal of Power sources*, 162, 959-964.
- Mcdowall, J. A. Opportunities for electricity storage in distributed generation and renewables. 2001 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives* (Cat. No. 01CH37294), 2001. IEEE, 1165-1168.
- Mcgrail, B. P., Cabe, J., Davidson, C., Knudsen, F. S., Bacon, D., Bearden, M., Chamness, M., Horner, J., Riedel, S., Schaef, T. 2013. Compressed air energy storage: Grid-scale technology for renewables integration in the pacific northwest. *Pacific Northwest National Laboratory*.
- Mclarnon, F. R., Cairns, E. J. 1989. Energy storage. *Annual review of energy*, 14, 241-271.
- Mehling, H., Cabeza, L. F. 2008. *Heat and cold storage with PCM*, Springer.
- Mehmet Bulut, İ. K., Veysi Geylanı 2018. Dünyada Hidro YüzerGes Projelerinin Gelişimi ve Türkiye'deki Potansiyeli GÜÇ SİSTEMLERİ KONFERANSI. Ankara.
- Mehrjerdi, H. 2020. Dynamic and multi-stage capacity expansion planning in microgrid integrated with electric vehicle charging station. *Journal of Energy Storage*, 29, 101351.
- Meishner, F., Sauer, D. U. 2019. Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids. *eTransportation*, 1, 100001.

- Mengstie, M. A., Habtu, N. G. 2020. Synthesis and Characterization of 5-Hydroxymethylfurfural from Corn cob Using Solid Sulfonated Carbon Catalyst. *International Journal of Chemical Engineering*, 2020.
- Milewski, J., Budzianowski, W. 2014. Recent key technical barriers in solid oxide fuel cell technology. *Archives of Thermodynamics*, 35.
- Miller, J. R., Simon, P. 2008. Electrochemical capacitors for energy management. *Science Magazine*, 321, 651-652.
- Min, J. K., Lee, C.-H. 2012. Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module. *Journal of Power Sources*, 210, 101-109.
- Mohiti, M., Mazidi, M., Rezaei, N., Khooban, M.-H. 2021. Role of vanadium redox flow batteries in the energy management system of isolated microgrids. *Journal of Energy Storage*, 40, 102673.
- Moore, T., Douglas, J. 2006. Energy storage, big opportunities on a smaller scale. *EPRI J*, 16-23.
- Morioka, Y., Narukawa, S., Itou, T. 2001. State-of-the-art of alkaline rechargeable batteries. *Journal of power sources*, 100, 107-116.
- Muthukumar, P. 2011. Thermal energy storage: Methods and materials. Indian Institute of Technology Guwahati: Sevilla, Spain.
- Müller, M. T., Krause, B., Kretzschmar, B., Pötschke, P. 2011. Influence of feeding conditions in twin-screw extrusion of PP/MWCNT composites on electrical and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 71, 1535-1542.
- N'tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., Luo, L. 2009. A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2385-2396.
- Nahavandi, A., Hagh, M. T., Sharifian, M. B. B., Danyali, S. 2014. A nonisolated multiinput multioutput DC–DC boost converter for electric vehicle applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 1818-1835.
- Najjar, Y. S., Zaamout, M. S. 1998. Performance analysis of compressed air energy storage (CAES) plant for dry regions. *Energy conversion and management*, 39, 1503-1511.
- Najjar, Y. S. H., Jubeh, N. 2006. Comparison of performance of compressed-air energy-storage plant with compressed-air storage with humidification. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220, 581-588.
- Nakken, T., Strand, L., Frantzen, E., Rohden, R., Eide, P. The Utsira wind-hydrogen system—operational experience. *European wind energy conference*, 2006. 1-9.

- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Kannan, A. M. 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.
- Nazri, G.-A., Pistoia, G. 2008. *Lithium batteries: science and technology*, Springer Science & Business Media.
- Nian, Y.-R., Teng, H. 2003. Influence of surface oxides on the impedance behavior of carbon-based electrochemical capacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 540, 119-127.
- Nikolaidis, P., Poullikkas, A. 2017. A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability. *Journal of power technologies*.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. 2015. Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18, 252-264.
- Niu, R., Kong, L., Zheng, L., Wang, H., Shi, H. 2017. Novel graphitic carbon nitride nanosheets/sulfonated poly (ether ether ketone) acid-base hybrid membrane for vanadium redox flow battery. *Journal of Membrane Science*, 525, 220-228.
- Noack, J., Roznyatovskaya, N., Herr, T., Fischer, P. 2015. The chemistry of redox-flow batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 54, 9776-9809.
- Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., Rodriguez-Hernandez, J. 2010. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Applied Energy*, 87, 390-397.
- Novoselov, K. S., Fal, V., Colombo, L., Gellert, P., Schwab, M., Kim, K. 2012. A roadmap for graphene. *nature*, 490, 192-200.
- Office, A. G. 2005. *Advanced Electricity Storage Technologies Programme*. Australian Greenhouse Office.
- Olabi, A., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., Al-Alami, A. H. 2020. Critical review of energy storage systems. *Energy*, 118987.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. 2014. Trends in global CO₂ emissions: 2014 45 report. JRC93171/PBL1490 report.
- Ordóñez, C. 2000. Liquid nitrogen fueled, closed Brayton cycle cryogenic heat engine. *Energy conversion and management*, 41, 331-341.
- Ordóñez, C., Plummer, M. 1997. Cold thermal storage and cryogenic heat engines for energy storage applications. *Energy Sources*, 19, 389-396.

- Ostadi, A., Kazerani, M. 2014. A comparative analysis of optimal sizing of battery-only, ultracapacitor-only, and battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems for a city bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64, 4449-4460.
- Ourahou, M., Ayrir, W., Hassouni, B. E., Haddi, A. 2020. Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects. *Mathematics and computers in simulation*, 167, 19-31.
- Palizban, O., Kauhaniemi, K. 2016. Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications. *Journal of Energy Storage*, 6, 248-259.
- Palomares, V., Serras, P., Villaluenga, I., Hueso, K. B., Carretero-González, J., Rojo, T. 2012. Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. *Energy & Environmental Science*, 5, 5884-5901.
- Pan, A. V., Macdonald, L., Baiej, H., Cooper, P. 2016. Theoretical consideration of superconducting coils for compact superconducting magnetic energy storage systems. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 26, 1-5.
- Parker, C. D. 2001. Lead-acid battery energy-storage systems for electricity supply networks. *Journal of Power Sources*, 100, 18-28.
- Patel, M. R., Beik, O. 2021. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*, CRC press.
- Patel, N., Okabe, K., Oya, A. 2002. Designing carbon materials with unique shapes using polymer blending and coating techniques. *Carbon*, 40, 315-320.
- Pay, S., Baghzouz, Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003. IEEE, 6 pp. Vol. 3.
- Peng, H., Shan, X., Yang, Y., Ling, X. 2018a. A study on performance of a liquid air energy storage system with packed bed units. *Applied Energy*, 211, 126-135.
- Peng, X., She, X., Cong, L., Zhang, T., Li, C., Li, Y., Wang, L., Tong, L., Ding, Y. 2018b. Thermodynamic study on the effect of cold and heat recovery on performance of liquid air energy storage. *Applied Energy*, 221, 86-99.
- Pimm, A. J., Garvey, S. D. 2014. The economics of hybrid energy storage plant. *International journal of environmental studies*, 71, 787-795.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A. 2011. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3341-3359.
- Poullikkas, A. 2013. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 27, 778-788.

- Prantil, V. C., Decker, T. 2015. The captains of energy: Systems dynamics from an energy perspective. *Synthesis Lectures on Engineering*, 9, 1-218.
- Qi, D., Liu, Y., Liu, Z., Zhang, L., Chen, X. 2017. Design of architectures and materials in in-plane micro-supercapacitors: current status and future challenges. *Advanced Materials*, 29, 1602802.
- Rahman, M. M., Oni, A. O., Gemechu, E., Kumar, A. 2020. Assessment of energy storage technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.
- Raju, M., Khaitan, S. K. 2012. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant. *Applied energy*, 89, 474-481.
- Rashid, M. H. 2011. *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*/edited by Muhammad H. Rashid.
- Rastler, D. 2010. Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits, Electric Power Research Institute.
- Ratering-Schnitzler, B., Harke, R., Schroeder, M., Stephanblome, T., Kriegler, U. 1997. Voltage quality and reliability from electrical energy-storage systems. *Journal of power sources*, 67, 173-177.
- Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., Alam, M. M. 2015. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598.
- Reilly, H. E., Kolb, G. J. 2001. An evaluation of molten-salt power towers including results of the solar two project. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs
- Ren, G., Ma, G., Cong, N. 2015. Review of electrical energy storage system for vehicular applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 225-236.
- Rosen, M. 1999. Second-law analysis of aquifer thermal energy storage systems. *Energy*, 24, 167-182.
- Rosen, M. A., Koohi-Fayegh, S. 2016. The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1, 10-29.
- Rozanna, D., Chuah, T., Salmiah, A., Choong, T. S., Sa'ari, M. 2005. Fatty acids as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage: a review. *International journal of green energy*, 1, 495-513.
- Ru, Y., Zheng, S., Xue, H., Pang, H. 2019. Different positive electrode materials in organic and aqueous systems for aluminium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 14391-14418.

- Ruiz-Calvo, F., De Rosa, M., Acuña, J., Corberán, J., Montagud, C. 2015. Experimental validation of a short-term Borehole-to-Ground (B2G) dynamic model. *Applied Energy*, 140, 210-223.
- Rydh, C. J., Sandén, B. A. 2005. Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies. *Energy conversion and management*, 46, 1980-2000.
- Saadat, M., Li, P. Y. Modeling and control of a novel compressed air energy storage system for offshore wind turbine. 2012 American Control Conference (ACC), 2012. IEEE, 3032-3037.
- Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E., Mueller, M. 2014. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*, 8, 1-45.
- Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E., Mueller, M. 2015. A numerical and graphical review of energy storage technologies. *Energies*, 8, 172-216.
- Saka, C., Kaya, M., Bekiroğullari, M. 2020. Spirulina microalgal strain as efficient a metal-free catalyst to generate hydrogen via methanolysis of sodium borohydride. *International Journal of Energy Research*, 44, 402-410.
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M. 2007. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. *International journal of hydrogen energy*, 32, 1121-1140.
- San Martín, I., Ursua, A., Sanchis, P. 2013. Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis, modelling and experimental validation. *International journal of hydrogen energy*, 38, 11655-11671.
- Sapkota, P., Kim, H. 2009. Zinc–air fuel cell, a potential candidate for alternative energy. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 445-450.
- Schenck, J. F. 1996. The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds. *Medical physics*, 23, 815-850.
- Schneider, M., Rajarathnam, G. P., Easton, M. E., Masters, A. F., Maschmeyer, T., Vassallo, A. M. 2016. The influence of novel bromine sequestration agents on zinc/bromine flow battery performance. *Rsc Advances*, 6, 110548-110556.
- Sears, J. R. TEX: The next generation of energy storage technology. INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference, 2004. IEEE, 218-222.
- Seitz, M., Johnson, M., Hübner, S. 2017. Economic impact of latent heat thermal energy storage systems within direct steam generating solar thermal power plants with parabolic troughs. *Energy Conversion and Management*, 143, 286-294.

- Semadeni, M. 2003. Energy storage as an essential part of sustainable energy systems: a review on applied energy storage technologies. CEPE Working Paper, 24.
- Seman, R. N. a. R., Azam, M. A., Mohamad, A. A. 2017. Systematic gap analysis of carbon nanotube-based lithium-ion batteries and electrochemical capacitors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 644-659.
- Shafiee, S., Topal, E. 2009. When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy policy*, 37, 181-189.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C., Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13, 318-345.
- Sharma, P., Bhatti, T. 2010. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy conversion and management*, 51, 2901-2912.
- Sharma, R. K., Mishra, S. 2017. Dynamic power management and control of a PV PEM fuel-cell-based standalone ac/dc microgrid using hybrid energy storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 526-538.
- She, X., Peng, X., Zhang, T., Cong, L., Ding, Y. 2019. Preliminary study of Liquid Air Energy Storage integrated with LNG cold recovery. *Energy Procedia*, 158, 4903-4908.
- Shen, W., Jiang, J., Su, X., Karimi, H. R. 2015. Control strategy analysis of the hydraulic hybrid excavator. *Journal of the Franklin Institute*, 352, 541-561.
- Shi, W., Gao, Y., Yang, G., Zhao, Y. 2013. Conversion of cornstalk to bio-oil in hot-compressed water: effects of ultrasonic pretreatment on the yield and chemical composition of bio-oil, carbon balance, and energy recovery. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61, 7574-7582.
- Shi, Y., Xu, B., Wang, D., Zhang, B. 2017. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: Joint optimization for superlinear gains. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 2882-2894.
- Silva, S., Severino, M., De Oliveira, M. 2013. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. *Renewable energy*, 57, 384-389.
- Simon, P., Gogotsi, Y. 2010. Materials for electrochemical capacitors. *Nanoscience and technology: a collection of reviews from Nature journals*. World Scientific.
- Simsek, H. A., Simsek, N. 2013. Recent incentives for renewable energy in Turkey. *Energy Policy*, 63, 521-530.
- Singh, A., Baredar, P., Gupta, B. 2017. Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building. *Energy Conversion and Management*, 145, 398-414.

- Sinsel, S. R., Riemke, R. L., Hoffmann, V. H. 2020. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *renewable energy*, 145, 2271-2285.
- Sivachidambaram, M., Vijaya, J. J., Kennedy, L. J., Jothiramalingam, R., Al-Lohedan, H. A., Munusamy, M. A., Elanthamilan, E., Merlin, J. P. 2017. Preparation and characterization of activated carbon derived from the *Borassus flabellifer* flower as an electrode material for supercapacitor applications. *New Journal of Chemistry*, 41, 3939-3949.
- Smith, P. H., Tran, T. N., Jiang, T. L., Chung, J. 2013. Lithium-ion capacitors: Electrochemical performance and thermal behavior. *Journal of power sources*, 243, 982-992.
- Soloveichik, G. L. 2011. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 2, 503-527.
- Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Han, X., Zhang, X., Ouyang, M. 2015. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 274, 400-411.
- Song, Z., Li, J., Han, X., Xu, L., Lu, L., Ouyang, M., Hofmann, H. 2014. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles. *Applied Energy*, 135, 212-224.
- Spanos, C., Turney, D. E., Fthenakis, V. 2015. Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 478-494.
- Steffen, B. 2012. Prospects for pumped-hydro storage in Germany. *Energy Policy*, 45, 420-429.
- Storage, E. E. 2011. International Electrotechnical Commission (IEC). Geneva, Switzerland.
- Suberu, M. Y., Mustafa, M. W., Bashir, N. 2014. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 499-514.
- Sudworth, J. 2001. The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. *Journal of power sources*, 100, 149-163.
- Sufyan, M., Rahim, N. A., Aman, M. M., Tan, C. K., Raihan, S. R. S. 2019. Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11, 014105.

- Sun, B., Dragičević, T., Freijedo, F. D., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. 2015a. A control algorithm for electric vehicle fast charging stations equipped with flywheel energy storage systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31, 6674-6685.
- Sun, G., Zhang, X., Lin, R., Yang, J., Zhang, H., Chen, P. 2015b. Hybrid fibers made of molybdenum disulfide, reduced graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes for solid-state, flexible, asymmetric supercapacitors. *Angewandte Chemie*, 127, 4734-4739.
- Sun, H., He, W., Zong, C., Lu, L. 2013. Template-free synthesis of renewable macroporous carbon via yeast cells for high-performance supercapacitor electrode materials. *ACS applied materials & interfaces*, 5, 2261-2268.
- Sun, M., Zhai, L.-F., Li, W.-W., Yu, H.-Q. 2016a. Harvest and utilization of chemical energy in wastes by microbial fuel cells. *Chemical society reviews*, 45, 2847-2870.
- Sun, Y., Liu, N., Cui, Y. 2016b. Promises and challenges of nanomaterials for lithium-based rechargeable batteries. *Nature Energy*, 1, 1-12.
- Suzuki, Y., Koyanagi, A., Kobayashi, M., Shimada, R. 2005. Novel applications of the flywheel energy storage system. *Energy*, 30, 2128-2143.
- Swaminathan, R. K. S. Cost Analysis of Energy Storage Systems for Electric Utility Applications.
- Tang, W., Zhang, Y., Zhong, Y., Shen, T., Wang, X., Xia, X., Tu, J. 2017. Natural biomass-derived carbons for electrochemical energy storage. *Materials research bulletin*, 88, 234-241.
- Tatsidjoudoug, P., Le Pierrès, N., Luo, L. 2013. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327-349.
- Tazikeh, S., Akbari, A., Talebi, A., Talebi, E. 2014. Synthesis and characterization of tin oxide nanoparticles via the co-precipitation method. *Materials Science-Poland*, 32, 98-101.
- Tester, J. W., Drake, E. M., Driscoll, M. J., Golay, M. W., Peters, W. A. 2012. Sustainable energy: choosing among options, MIT press.
- Tewari, S., Mohan, N. 2012. Value of NAS energy storage toward integrating wind: Results from the wind to battery project. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, 532-541.
- Thackeray, M. M., Wolverton, C., Isaacs, E. D. 2012. Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5, 7854-7863.

- Thaker, S., Oni, A. O., Kumar, A. 2017. Techno-economic evaluation of solar-based thermal energy storage systems. *Energy Conversion and Management*, 153, 423-434.
- Tie, S. F., Tan, C. W. 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.
- Tokoro, H., Yoshikiyo, M., Imoto, K., Namai, A., Nasu, T., Nakagawa, K., Ozaki, N., Hakoe, F., Tanaka, K., Chiba, K. 2015. External stimulation-controllable heat-storage ceramics. *Nature communications*, 6, 1-8.
- Toodeji, H. 2019. A developed flywheel energy storage with built-in rotating supercapacitors. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27, 213-229.
- Tran, H. N., Chao, H.-P., You, S.-J. 2018. Activated carbons from golden shower upon different chemical activation methods: synthesis and characterizations. *Adsorption Science & Technology*, 36, 95-113.
- Tsais, P.-J., Chan, L. 2013. Nickel-based batteries: Materials and chemistry. *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, 309-397.
- Türkay, B. E., Telli, A. Y. 2011. Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. *Renewable energy*, 36, 1931-1943.
- Uddin, M., Romlie, M. F., Abdullah, M. F., Abd Halim, S., Kwang, T. C. 2018. A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3323-3332.
- Van Der Linden, S. The commercial world of energy storage: a review of operating facilities. 2003 1 st Annual Conference of the Energy Storage Council, Houston TX, 2003.
- Van Der Linden, S. 2006. Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects. *Energy*, 31, 3446-3457.
- Vazquez, S., Lukic, S. M., Galvan, E., Franquelo, L. G., Carrasco, J. M. 2010. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57, 3881-3895.
- Venkataramani, G., Parankusam, P., Ramalingam, V., Wang, J. 2016. A review on compressed air energy storage—A pathway for smart grid and polygeneration. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62, 895-907.
- Verma, P., Maire, P., Novák, P. 2010. A review of the features and analyses of the solid electrolyte interphase in Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 55, 6332-6341.
- Vickers, N. J. 2017. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? *Current biology*, 27, R713-R715.

- Wagner, L. 2007. Overview of energy storage methods. MORA associated. str, 5.
- Walawalkar, R., Apt, J., Mancini, R. 2007. Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York. *Energy Policy*, 35, 2558-2568.
- Wang, G., Ciobotaru, M., Agelidis, V. G. 2014a. Power smoothing of large solar PV plant using hybrid energy storage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5, 834-842.
- Wang, J., Ma, L., Lu, K., Miao, S., Wang, D., Wang, J. 2017. Current research and development trend of compressed air energy storage. *Systems Science & Control Engineering*, 5, 434-448.
- Wang, K., Chen, S., Liu, L., Zhu, T., Gan, Z. 2018. Enhancement of renewable energy penetration through energy storage technologies in a CHP-based energy system for Chongming, China. *Energy*, 162, 988-1002.
- Wang, K., Zhao, N., Lei, S., Yan, R., Tian, X., Wang, J., Song, Y., Xu, D., Guo, Q., Liu, L. 2015. Promising biomass-based activated carbons derived from willow catkins for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 166, 1-11.
- Wang, S., Chen, G., Fang, M., Wang, Q. 2006. A new compressed air energy storage refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 47, 3408-3416.
- Wang, W., Luo, Q., Li, B., Wei, X., Li, L., Yang, Z. 2013. Recent progress in redox flow battery research and development. *Advanced Functional Materials*, 23, 970-986.
- Wang, Z.-L., Xu, D., Xu, J.-J., Zhang, X.-B. 2014b. Oxygen electrocatalysts in metal-air batteries: from aqueous to nonaqueous electrolytes. *Chemical Society Reviews*, 43, 7746-7786.
- Wänn, A., Leahy, P., Reidy, M., Doyle, S., Dalton, H., Barry, P. 2012. Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy: Environmental performance of existing energy storage installations. Deliverable D, 3.
- Watanabe, M., Thomas, M. L., Zhang, S., Ueno, K., Yasuda, T., Dokko, K. 2017. Application of ionic liquids to energy storage and conversion materials and devices. *Chemical reviews*, 117, 7190-7239.
- Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., Liu, Q. 2011. Redox flow batteries: a review. *Journal of applied electrochemistry*, 41, 1137-1164.
- Wei, X., Xu, W., Huang, J., Zhang, L., Walter, E., Lawrence, C., Vijayakumar, M., Henderson, W. A., Liu, T., Cosimbescu, L. 2015. Radical compatibility with nonaqueous electrolytes and its impact on an all-organic redox flow battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 54, 8684-8687.

- Weinmann, O. 1999. Hydrogen-the flexible storage for electrical energy. *Power Engineering Journal*, 13, 164-170.
- Weinstock, I. B. 2002. Recent advances in the US Department of Energy's energy storage technology research and development programs for hybrid electric and electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 110, 471-474.
- Wen, D., Chen, H., Ding, Y., Dearman, P. 2006. Liquid nitrogen injection into water: Pressure build-up and heat transfer. *Cryogenics*, 46, 740-748.
- Wen, Z., Cao, J., Gu, Z., Xu, X., Zhang, F., Lin, Z. 2008. Research on sodium sulfur battery for energy storage. *Solid State Ionics*, 179, 1697-1701.
- Whittingham, M. S. 2012. History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, 100, 1518-1534.
- Williams, J., Williams, J. Cryogenic automobile propulsion-Heat exchanger design and performance issues. 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1997. 17.
- Winsberg, J., Janoschka, T., Morgenstern, S., Hagemann, T., Muench, S., Hauffman, G., Gohy, J. F., Hager, M. D., Schubert, U. S. 2016. Poly (TEMPO)/zinc hybrid-flow battery: A novel, "green," high voltage, and safe energy storage system. *Advanced Materials*, 28, 2238-2243.
- Winter, C.-J. 2009. Hydrogen energy—Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. *International journal of hydrogen energy*, 34, S1-S52.
- Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. 2014. A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6, 1156-1166.
- Wu, M.-K., Ashburn, J. R., Torng, C., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y., Chu, A. 1987. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical review letters*, 58, 908.
- Wu, S., Zhou, C., Doroodchi, E., Moghtaderi, B. 2020. Techno-economic analysis of an integrated liquid air and thermochemical energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 205, 112341.
- Xia, C., Zhou, Y., Zhou, S., Zhang, P., Wang, F. 2015. A simplified and unified analytical solution for temperature and pressure variations in compressed air energy storage caverns. *Renewable Energy*, 74, 718-726.
- Xiang, C., Wang, Y., Hu, S., Wang, W. 2014. A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system. *Energies*, 7, 2874-2896.
- Xiaoli, W., Yu, Z. 2017. Applications of flow battery energy storage. *Redox Flow Batteries*. CRC Press.

- Xie, C., Hong, Y., Ding, Y., Li, Y., Radcliffe, J. 2018. An economic feasibility assessment of decoupled energy storage in the UK: With liquid air energy storage as a case study. *Applied Energy*, 225, 244-257.
- Xu, B., Ge, Z., He, Z. 2015a. Sediment microbial fuel cells for wastewater treatment: challenges and opportunities. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 279-284.
- Xu, B., Li, P., Chan, C. 2015b. Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments. *Applied Energy*, 160, 286-307.
- Xu, N., Li, X., Zhao, X., Goodenough, J. B., Huang, K. 2011. A novel solid oxide redox flow battery for grid energy storage. *Energy & Environmental Science*, 4, 4942-4946.
- Xue, X., Cheng, K. W. E., Sutanto, D. 2006. A study of the status and future of superconducting magnetic energy storage in power systems. *Superconductor Science and Technology*, 19, R31.
- Yan, T., Wang, R., Li, T., Wang, L., Fred, I. T. 2015. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 13-31.
- Yang, C.-J., Jackson, R. B. 2011. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 839-844.
- Yang, G., Dubus, P., Sadarnac, D. 2014. Double-phase high-efficiency, wide load range high-voltage/low-voltage LLC DC/DC converter for electric/hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 1876-1886.
- Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., Kay, M. 2018. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 109-125.
- Yang, Y., Yin, W., Wu, S., Yang, X., Xia, W., Shen, Y., Huang, Y., Cao, A., Yuan, Q. 2016. Perovskite-type LaSrMnO electrocatalyst with uniform porous structure for an efficient Li-O₂ battery cathode. *ACS nano*, 10, 1240-1248.
- Yao, E., Wang, H., Wang, L., Xi, G., Maréchal, F. 2016. Thermo-economic optimization of a combined cooling, heating and power system based on small-scale compressed air energy storage. *Energy Conversion and Management*, 118, 377-386.
- Yin, H., Mao, X., Tang, D., Xiao, W., Xing, L., Zhu, H., Wang, D., Sadoway, D. R. 2013. Capture and electrochemical conversion of CO₂ to value-added carbon and oxygen by molten salt electrolysis. *Energy & Environmental Science*, 6, 1538-1545.

- Yoo, H., Sul, S.-K., Park, Y., Jeong, J. 2008. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44, 108-114.
- Yu, S.-H., Lee, D. J., Park, M., Kwon, S. G., Lee, H. S., Jin, A., Lee, K.-S., Lee, J. E., Oh, M. H., Kang, K. 2015. Hybrid cellular nanosheets for high-performance lithium-ion battery anodes. *Journal of the American Chemical Society*, 137, 11954-11961.
- Yue, M., Zheng, Q., Xing, F., Zhang, H., Li, X., Ma, X. 2018. Flow field design and optimization of high power density vanadium flow batteries: A novel trapezoid flow battery. *AIChE Journal*, 64, 782-795.
- Zaghib, K., Dontigny, M., Guerfi, A., Charest, P., Rodrigues, I., Mauger, A., Julien, C. M. 2011. Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications. *Journal of power sources*, 196, 3949-3954.
- Zakeri, B., Syri, S. 2015. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 569-596.
- Zeng, Y., Hu, J., Ye, W., Zhao, W., Zhou, G., Guo, Y. 2015. Investigation of lead dendrite growth in the formation of valve-regulated lead-acid batteries for electric bicycle applications. *Journal of Power Sources*, 286, 182-192.
- Zhai, X., Zhu, C., Li, Y., Zhang, Y., Duan, Z., Yang, X. 2018. Optimization for pectinase-assisted extraction of polysaccharides from pomegranate peel with chemical composition and antioxidant activity. *International journal of biological macromolecules*, 109, 244-253.
- Zhang, G., Wen, Z., Wu, X., Zhang, J., Ma, G., Jin, J. 2014. Sol-gel synthesis of Mg²⁺ stabilized Na-β"/β-Al₂O₃ solid electrolyte for sodium anode battery. *Journal of alloys and compounds*, 613, 80-86.
- Zhang, J., Zhou, S., Li, S., Song, W., Feng, Z. 2019. Performance analysis of diabatic compressed air energy storage (D-CAES) system. *Energy Procedia*, 158, 4369-4374.
- Zhang, L.-L., Wang, Z.-L., Xu, D., Zhang, X.-B., Wang, L.-M. 2013. The development and challenges of rechargeable non-aqueous lithium-air batteries. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4, 27-46.
- Zhang, S., Pan, N. 2015. Supercapacitors performance evaluation. *Advanced Energy Materials*, 5, 1401401.
- Zhang, S., Xu, K., Jow, T. 2004. Electrochemical impedance study on the low temperature of Li-ion batteries. *Electrochimica acta*, 49, 1057-1061.

- Zhang, X., Zhang, Z., Pan, H., Salman, W., Yuan, Y., Liu, Y. 2016a. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy conversion and management*, 118, 287-294.
- Zhang, Y., Wang, L., Guo, Z., Xu, Y., Wang, Y., Peng, H. 2016b. High-performance lithium–air battery with a coaxial-fiber architecture. *Angewandte Chemie International Edition*, 55, 4487-4491.
- Zhang, Z., Zhang, Q., Chen, Y., Bao, J., Zhou, X., Xie, Z., Wei, J., Zhou, Z. 2015. The first introduction of graphene to rechargeable Li–CO₂ batteries. *Angewandte Chemie*, 127, 6650-6653.
- Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., Rasmussen, C. N. 2015a. Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied energy*, 137, 545-553.
- Zhao, Y., Ding, Y., Li, Y., Peng, L., Byon, H. R., Goodenough, J. B., Yu, G. 2015b. A chemistry and material perspective on lithium redox flow batteries towards high-density electrical energy storage. *Chemical Society Reviews*, 44, 7968-7996.
- Zheng, J., Hou, Y., Duan, Y., Song, X., Wei, Y., Liu, T., Hu, J., Guo, H., Zhuo, Z., Liu, L. 2015. Janus solid–liquid interface enabling ultrahigh charging and discharging rate for advanced lithium-ion batteries. *Nano letters*, 15, 6102-6109.
- Zhou, G., Li, F., Cheng, H.-M. 2014. Progress in flexible lithium batteries and future prospects. *Energy & Environmental Science*, 7, 1307-1338.
- Zhou, Z., Benbouzid, M., Charpentier, J. F., Sculler, F., Tang, T. 2013. A review of energy storage technologies for marine current energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 390-400.
- Zhu, Y., Zhu, W. H., Davis, Z., Tatarchuk, B. J. 2016. Simulation of Ni-MH batteries via an equivalent circuit model for energy storage applications. *Advances in Physical Chemistry*, 2016.
- Zidar, M., Georgilakis, P. S., Hatzigargyriou, N. D., Capuder, T., Škrlec, D. 2016. Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10, 645-652.
- Zimmermann, T., Keil, P., Hofmann, M., Horsche, M. F., Pichlmaier, S., Jossen, A. 2016. Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 8, 78-90.
- Zobaa, A. F. 2013. *Energy Storage: Technologies and Applications*, BoD–Books on Demand.
- Wikipedia[Erişim 20-03-2007]. [wikipedia/Hydroelectric energy storage](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectric_energy_storage)[Erişim 20-03-2007] [Online]. Available: http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectric_energy_storage [Accessed].

IEA Reports (Erişim 1 ağustos 2020) IEA Reports (Erişim 1 ağustos 2020) [Online].
Available:
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmap> [Accessed].



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mehmet BOLAT

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Doktora	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Siirt Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2016
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2011
Lise	Süleyman Demirel Anadolu Lisesi	2007

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Siirt Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-2016	Türk Silahlı Kuvvetleri	Etüt Proje Uzmanı
2012-2013	Özpor A.Ş.	Elektrik Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER

Makaleler

1. Bolat Mehmet, Yavuz Cenk, Kaya Mustafa "Investigation of Dual-Functionalized Novel Carbon Supported Sn Material from Corn Stalk for Energy Storage and Fuel

Cell Systems on Distributed Generations", Journal of Materials Science: Materials in Electronics.

2. Saadettin Aksoy, Mehmet Bolat "A Simple State Variable Estimation Algorithm Using Block Pulse Functions", International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET), Vol. 4 Issue. 12, pp. 4944-4955.
3. Mehmet Bolat, Uğur ARİFOĞLU, Hamit Kürşat DEMİRYÜREK " Lebit Enerji Güneş Santralinin PVsyst Programı İle Analizi", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Vol. 9, No. 2.
4. Mehmet Bolat, Saadettin AKSOY: "State Estimation in Induction Motors Using the Closed Loop Observers", Journal of Engineering and Technology (JTHES), Vol.3 No.2, pp. 9-19, 2019.
5. Saadettin Aksoy, Mehmet Bolat: "Estimation of Dynamic State Variables Using Laguerre Series Approximation", International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET), Vol. 4 Issue. 12, pp. 4917-4926.
6. Bolat Mehmet, Şahin Mehmet (2016). Estimation of Global Radiation by Using Machine Learning Methods. International Journal of Thales Engineering Sciences (JTHES), 2(1), 7-16. (Yayın No: 3100067)

Bildiriler

1. Bolat Mehmet, Yavuz Cenk, Kaya Mustafa (2021). Dağıtık Üretim Penetrasyonu Olan Şebekeler İçin Çift Fonksiyonlu Bir Enerji Depolama Sistemi, İSARC Marmara, İstanbul, pp. 70-80.
2. Arifoğlu U., Demiryürek H. A., Bolat M. (2018). 200 kWp Kurulu Güçteki Lebit Enerji Güneş Santralinin PVsyst Programı ile Simülasyonu, UMTEB-III Gaziantep, pp. 4181-4189.
3. Aksoy S., Bolat M. (2018). DC Motorlarda Kaskat Konum Kontrolü, IETS'18 Batman, pp. 1126-1130.
4. Bolat M., Aksoy S. (2018). Siirt-Şırnak Otoyolu İçin Mevcut HPS Aydınlatma Sistemi Yerine LED Aydınlatma Sistemi Tasarımı ve Karşılaştırılması, IETS'18 Batman, pp. 1131-1136.
5. Bolat M., Aksoy S. (2018). A State Estimation in Induction Motors Using the Closed Loop Observers, IETS'18 Batman, pp 709-715.

6. Aksoy S., Bolat M. (2017). Sabit Katsayılı Doğrusal Sistemlerin Durum Değişkenlerinin Walsh Serisel Yaklaşıklığı ile Kestirimi, IMESET'17 Bitlis, pp. 661-666.
7. Aksoy S., Bolat M., Alp Emre. (2017). Noaa/Avhrr Uydu ve Meteorolojik Veriler Kullanılarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Yer Yüzey Sıcaklığının En Küçük Kare Hatası Metodu ile Hesaplanması, IMESET'17 Bitlis, pp. 252-259.
8. Aksoy S., Bolat M., Alp Emre. (2017). Noaa/Avhrr Uydu ve Meteorolojik Veriler Kullanılarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Yer Yüzey Sıcaklığının En Küçük Kare Hatası Metodu ile Hesaplanması, IMESET'17 Bitlis, pp. 252-259.
9. Aksoy Saadettin, Bolat Mehmet (2016). PLC Tabanlı Doğrusal Konum Kontrolü. IMSEC2016 (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:3099625).
10. Bolat Mehmet, Şahin Mehmet (2016). The Calculation of the Surface Temperature with NOAA/AVHRR Satellite Data. ICNASE'16 (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:3099211).
11. Bolat Mehmet, Şahin Mehmet (2016). Estimation of Global Solar Radiation by Using Machine Learning Methods. IPCAP2016, 1-369. (Özet Bildiri/) (Yayın No:3099752).
12. Bolat Mehmet, Şahin Mehmet (2015). Estimation Of Solar Radiation With Artificial Neural Network Using Satellite Data In Mediterranean Region. BPU9 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3364224).

Projeler

1. PC Tabanlı Modüler Servo Kontrol Eğitim Setleri Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, BAP Projesi, Araştırmacı, 2016.
2. DC Motorlu Kaskat Kontrol sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, BAP Projesi, Araştırmacı, 2016.
3. Tek Eksen Güneş Takip Sistemli Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi, Araştırmacı, 2017.