

TÜBA

Türkiye Bilimler Akademisi
Turkish Academy of Sciences

TÜBA-ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ RAPORU

Editörler:
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER, Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN

Ankara - 2020



TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ
TURKISH ACADEMY OF SCIENCES

TÜBA
ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ RAPORU

"Bu rapor, TÜBA Enerji Çalışma Grubunca
Iğdır Üniversitesi ev sahipliğinde
4-5 Temmuz 2019 tarihlerinde gerçekleştirilen
TÜBA Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı
ve Paneli'nde sunulan bildirilerden
derlenerek oluşturulmuştur."

Mayıs 2020



Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 35
ISBN: 978-605-2249-45-1

Editörler: Prof. Dr. İbrahim DİNÇER, Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN

Program Sorumlusu: Dr. Zeynep BİRER

Grafik Tasarım: Ece YAVUZ

Baskı: Tek Ses Ofset Matbaacılık, ANKARA
Mayıs 2020, 3000 Adet

İÇİNDEKİLER

SUNUŞ · Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER / *TÜBA Başkanı* 4

ÖNSÖZ · Prof. Dr. İbrahim DİNÇER / *TÜBA-Enerji Çalışma Grubu Yürütücüsü* 5

TEŞEKKÜR 7

ABSTRACT 8

ÖZET 9

1. GİRİŞ 11

2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNİKLERİ 17

2.1. Yer Altında Enerji Depolama 19

2.1.1. Tükenmiş Petrol veya Gaz Rezervuarları 21

2.1.2. Akiferler 22

2.1.3. Tuz Mağaraları 22

2.2. Isıl Enerji Depolama 24

2.2.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama Uygulamaları 26

2.2.2. Faz Değişim Malzemeleri 32

2.2.3. FDM'li Enerji Depolama Sistemlerinin Matematiksel Modellenmesi 34

2.3. Elektrik ve Isıl Enerji Depolama 38

2.4. Buzda Enerji Depolama (BED) 41

2.4.1. Ülkemizin İlk Ticari Büyük Ölçekli BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi .. 44

2.5. Isı Pompası Entegreli Enerji Depolama Uygulaması 45

2.5.1. Isı Pompaları ve Sağladığı Faydalar 47

2.5.2. Güneş Destekli Isı Pompalarıyla Binaların Isıtılması 49

2.6. Pompaj Enerji Depolama 51

2.6.1. Yahyalı (Kayseri) Hibrit Projesi 57

2.7. Hidrojen Depolama Teknolojisi 58

2.8. Batarya Teknolojisi 63

3. DEĞERLENDİRME 69

3.1. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırımları 69

3.2. Türkiye'de Büyük Ölçekli Doğal gaz Depolama Projeleri 70

3.3. Enerji Depolamada Yeni Trendler 73

3.4. Enerji Depolama Destek Programları ve Araştırma Konuları 75

3.5. Türkiye'nin Potansiyel Yol Haritaları 79

4. KAYNAKLAR 80

5. TÜBA-ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ ÇALIŞTAYI ve PANELİ PROGRAMI 82

SUNUŞ



Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA); önemli, öncelikli ve güncel konulara dair bilim temelli incelemeler ve danışmanlık yapma görevi ve toplumda bilimsel yaklaşım ve düşüncenin yayılmasını sağlamak amacı çerçevesinde; bilimsel toplantılar, kongre, sempozyum, konferans ve çalıştaylar gerçekleştirmekte ve yayınlar hazırlamaktadır. Ülkemizde petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanılabilir rezervlerinin yetersiz olması, çevresel ve sosyal kısıtlar nedeniyle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliği nedeniyle rüzgâr ve güneş gibi çevreye duyarlı enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasında enerji depolama teknolojileri çok önemli bir rol üstlenmektedir. Enerji depolama, aynı zamanda enerji arz güvenliğini sağlama noktasında da ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir. Güç üretiminin sürekliliğini sağlamanın yanı sıra ısıtma/soğutma gibi ticari ve evsel tüketim açısından da enerjinin verimli ve ekonomik kullanımını sağlayan enerji depolama teknolojileri konusunda ülkemizde ve dünyada çok yönlü araştırmalar ve uygulamalar hız kazanmaktadır. Enerji konularında faaliyetler yürütmek üzere kurulan TÜBA-Enerji Çalışma Grubu tarafından kamu, üniversite ve sanayi kesiminden paydaşların katılımıyla 4-5 Temmuz 2019 tarihlerinde Iğdır Üniversitesinde "TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli" düzenlenmiş ve etkinlikte ele alınan konuları içeren bu rapor hazırlanmıştır. Çalıştay ve panelin gerçekleştirilmesi ile raporun hazırlanması ve yayımında emeği geçen Enerji Çalışma Grubu Yürütücüsü Prof. Dr. İbrahim DİNÇER ve çalışma grubu üyelerine, raporun hazırlanmasına katkı sunan bilim insanlarımıza, çalıştay ve panele ev sahipliği yapan Iğdır Üniversitesine, Akademi üyelerimize, ilgili kurum, kuruluş yönetici ve uzmanlarına, katılımcılara ve emeği geçen tüm paydaşlarımıza teşekkürlerimi, en iyi dileklerimi ve saygılarımı sunuyor, raporun konuyla ilgili karar alıcı ve uygulayıcılar için yararlı bir kaynak olmasını diliyorum.

Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER
TÜBA Başkanı

ÖNSÖZ



Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) bünyesinde oluşturulan "Enerji Çalışma Grubu" tarafından düzenlenen, çeşitli kamu kurum ve kuruluşları, sanayi ve sivil toplum örgütlerinden 150'den fazla kişinin katıldığı "TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri ve Çalıştayı Paneli", 4-5 Temmuz 2019 tarihlerinde, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonunda gerçekleştirilmiştir. Açılış konuşmaları bölümünde, TÜBA Başkanı Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER, TÜBA Konsey Üyesi ve Cumhurbaşkanlığı Eğitim Öğretim Politikaları Kurulu Üyesi Prof. Dr. Ahmet Cevat ACAR, TÜBA-Enerji Çalışma Grubu Yürütücüsü Prof. Dr. İbrahim DİNÇER ile TÜBA Asli Üyesi ve Iğdır Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA, gerçekleştirilen çalıştayın önemi ve ülkemizin enerji arz güvenliği açısından enerji depolamanın rolü üzerine önemli mesajlar vermişlerdir. TÜBA'nın bilim temelli "rehberlik" ve "danışmanlık" görevi kapsamında gerçekleştirilen etkinliğin amacı, enerji depolama teknolojileri konusunda paydaşları bir araya getirerek bilgi paylaşım platformu oluşturmak; öncelikli teknolojileri, yenilikleri, kaynakları, mevzuat sorunlarını ve problemlerini tartışmak; enerji depolama teknolojilerine ilişkin durum tespiti yapmak; öneri ve çözümleri ortaya koymaktır. Etkinlik kapsamında, dört oturum ve bir panel yapılmıştır. Oturumlarda, 16 konuşmacı ve 7 panelist görüş ve önerilerini dile getirmişlerdir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Genel Müdür Yrd. Ramazan USTA'nın "Yenilenebilir Enerji Görünümü, Yeni Trendler ve Depolama Sistemleri" konusunda bilgi ve birikimlerini paylaştığı birinci oturumda, ülkemizde enerji depolama konusunda yapılan çalışmalar, yatırımlar, AR-GE perspektifleriyle ülkemizde pompaj hidroelektrik santral ekipmanlarının gelişimi ve yerlileştirme çalışmaları ele alınmıştır. İkinci oturumda batarya teknolojisi ile ulaşımda enerji depolama teknolojilerinin uygulanması konularında gerçekleştirilen güncel çalışmalar ile yeni trendler paylaşılmıştır. Üçüncü oturumda kimyasal depolama teknolojilerinin yanı sıra ülkemizde evsel, ticari ve endüstriyel enerji depolama uygulamalarına ilişkin güncel çalışmalara ait bulgular paylaşılmıştır. Dördüncü oturumda ise elektrikten ısıl enerji depolama, faz değişimli ısıl enerji depolama, ısı pompası entegreli ısıl enerji depolama, yer altında gaz depolama ve hidrojen depolama teknikleri gibi farklı tip enerji depolama teknolojileri üzerine ülkemizde ve dünyada öne çıkan yöntemler ve yeni trendler konunun uzmanı araştırmacılar ve firma temsilcileri tarafından ele alınmıştır. "Türkiye'nin Enerji Depolama Teknolojileri Kabiliyetleri" başlıklı panel oturumunda ise konunun uzmanı akademisyenler, kamu ve özel kurumların temsilcileri ve STK temsilcileri ile çok yönlü tartışılmış ve yol haritaları önerilmiştir. Bu rapor, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) bünyesinde oluşturulan "Enerji Çalışma Grubu" tarafından düzenlenen "TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri ve Çalıştayı Paneli"nde sunulan bildiriler esas olmak üzere, güncel literatürden taranan bilimsel çalışmaların derlenmesiyle hazırlanmıştır.

Etkinlik Komitesi Adına
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER
TÜBA-Enerji Çalışma Grubu Yürütücüsü

TEŞEKKÜR

Raporun hazırlanmasında katkısı bulunan aşağıda isimleri yazılı olan devlet ve vakıf üniversitelerinden bilim insanları ile bakanlıklardan, çeşitli sanayi şirketlerinden ve sivil toplum derneklerinden yöneticiler ile konunun uzmanlarına Türkiye Bilimler Akademisi olarak teşekkür ederiz.

Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA
Iğdır Üniversitesi Rektörü

Murat ALTINORDU
TEMSAN - Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.

Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP
Erciyes Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Berkan BAYRAM
Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği Başkanı

Mehmet Göksel GÜNGÖR
Siemens-Gamesa Renewables Uzmanı

Doç. Dr. Halil (Sadi) HAMUT
Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG)

Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI
TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi

Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ
TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi

Doç. Dr. Muhsin MAZMAN
Mutlu Akü, Yeni Teknolojiler ve Laboratuvarlar Müdürü

Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ
TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi

Prof. Dr. Halime PAKSOY
Çukurova Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Dekanı

Prof. Dr. Ali SARI
TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi

Ramazan USTA
Genel Md. Yrd., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Prof. Dr. Recep YUMRUTAŞ
Gaziantep Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Ayrıca, buzda ısıl enerji depolama kısmının hazırlanmasına katkı koyan Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR'e, güneş havuzu uygulamaları konusunda kaynak paylaşımı yapan Prof. Dr. Mehmet KARAKILÇIK'a ve yer altında gaz depolama bölümüne katkı yapan Arş. Gör. Tufan SALAN'a teşekkür ederiz.

ABSTRACT

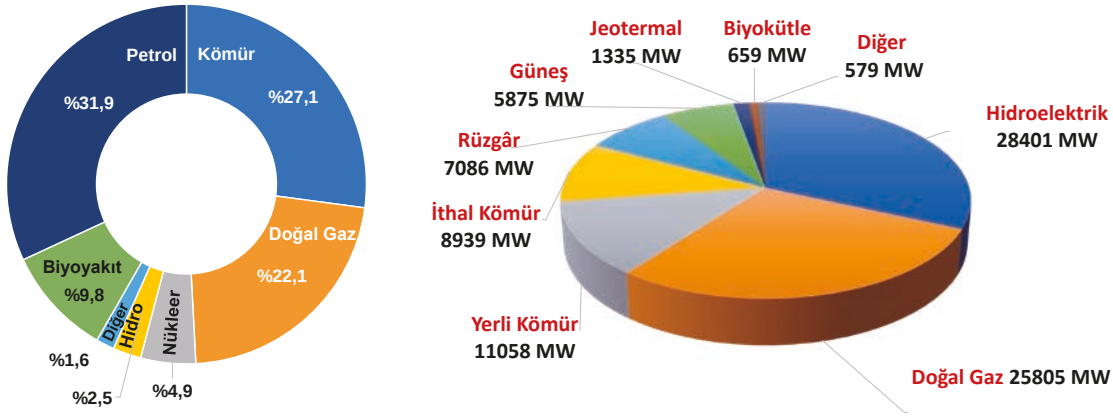
Increasing population, technological developments and rising living standards have increased the need for energy. The increasing rate of negative environmental effects caused by a heavy use of fossil fuels and their unsustainable nature has brought up the renewable energy sources as an important alternative. However, one of the most significant obstacles in implementing renewable energy technologies is their fluctuating nature and hence their discontinuity. For this reason, there is a strong need for development of viable energy storage technologies and innovative approaches to offset the mismatch between demand and supply and eliminate possible irregularities, while producing power and covering the needs for heating and cooling, which are closely linked to the energetic, environmental, economic and political dimensions. In this regard, the "Energy Working Group" established within the Turkish Academy of Sciences (TUBA) organized both a workshop and a panel discussion session on "Energy Storage Technologies" to bring all parties together, particularly experts and representatives from universities, private sector and government offices and discuss the respective technologies by considering the key challenges, opportunities and future directions. This particular report is a direct outcome of the delivered talks, expert discussions and literature assessments within the scope of the workshop. In the first part of the report, energy consumption statistics are presented comparatively for both Turkey and the World, and the projections are made for future where the need for energy storage technologies is highlighted. In the second part of the report, energy storage methods are classified based on their types and uses and discussed from the viewpoints of capacities and applications. Various energy storage technologies, namely thermal energy storage, cold energy storage, sensible and latent heat storage, compressed air storage, pumped hydro storage, power to gas type storage, electrical storage, battery storage, chemical storage and hydrogen storage, are discussed, evaluated and assessed for practical applications. Also, research, innovation and technology development efforts exerted in the area by various sectors, such as academia, industry and government, are presented as case studies. The last part of the report focuses specifically on renewable energy investments in Turkey, small- and large-scale energy storage systems and applications, current challenges, opportunities and future trends in the area, and recommendations for a more sustainable future. Furthermore, various policies and strategies are proposed about how to increase the energy storage investments and implementations and successfully perform research, product development, innovation and technology development.

ÖZET

Artan nüfus, teknolojik gelişmeler ve beraberinde yükselen yaşam standartları enerji ihtiyacında artışa neden olmaktadır. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sürdürülebilir olmaması göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji teknolojilerinin önündeki en önemli engellerden biri de enerji kaynağının süreksizliğidir. Dolayısıyla, yük ile talep arasındaki düzensizlikleri ortadan kaldırarak hem güç üretiminde hem de ısıtma ve soğutma gibi uygulamalarda enerji depolama teknolojilerinin uygulanması ve bu konuda yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi, başta enerji arzının sürekliliği olmak üzere çevresel, ekonomik ve politik alanlarda kritik öneme sahiptir. Bu nedenlerle, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) bünyesinde oluşturulan "Enerji Çalışma Grubu" tarafından "Enerji Depolama Teknolojileri" başlığı altında, kamu ve özel sektör ile üniversite temsilcilerinden oluşan geniş kapsamlı bir çalıştay ve panel düzenlenmiştir. Bu raporun hazırlanmasında çalıştay kapsamında sunulan bildiriler ve literatürde öne çıkan güncel bilimsel çalışmalar temel alınmıştır. Raporun ilk bölümünde küresel ölçekte ve ülkemiz özelinde enerji tüketim istatistikleri karşılaştırmalı olarak sunulduktan sonra gelecek projeksiyonları özetlenerek enerji depolama uygulamalarının öne çıkan avantajlarına değinilmiştir. İkinci bölümde enerji depolama teknikleri sınıflandırılarak kapasite ve kullanım alanlarına göre öne çıkan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Yer altında gaz depolama, ısıl enerji depolama, buzda enerji depolama, faz değişimli ısıl enerji depolama, elektrikten ısıl enerji depolama, pompaj enerji depolama, hidrojen enerji depolama ve batarya teknolojisine ait temel bilgiler ile güncel gelişmeler ve araştırma sonuçları özetlenmiştir. Bu kısımda ülkemizdeki farklı üniversitelerde, kamu kurumlarında veya konuyla ilgili firmalarda enerji depolama teknolojileri üzerine gerçekleştirilen bilimsel çalışmalara ait örnekler paylaşılmıştır. Raporun son bölümünde ise ülkemizdeki yenilenebilir enerji yatırımları ve büyük ölçekli doğal gaz depolama yatırımları ile enerjide öne çıkan yeni trendlere ve etkinliğin panel kısmında gündeme gelen konuların yanı sıra tavsiyelere yer verilmiştir. Enerji depolama yatırımlarının arttırılması, ürün geliştirme, araştırma, inovasyon ve teknoloji geliştirme çalışmaları konularında politikalar ve stratejiler hakkında görüş ve öneriler sunulmuştur.

1. GİRİŞ

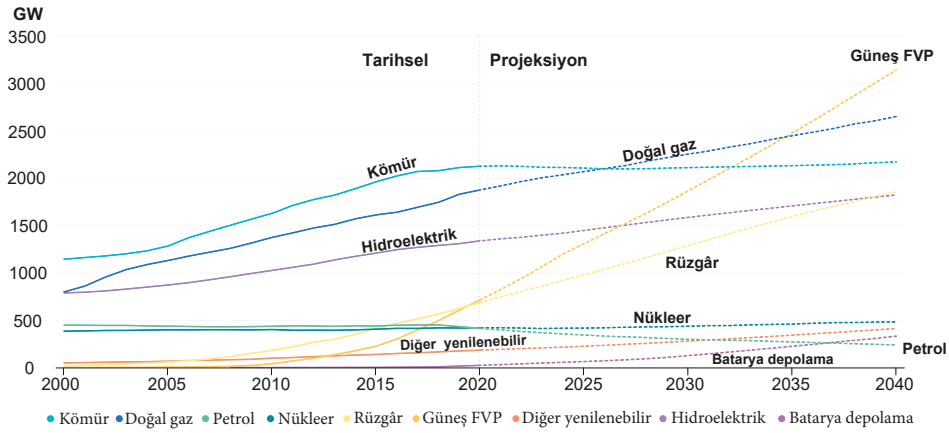
Günümüzde insanoğlu gıda, temiz su, ulaşım, ısıtma/soğutma gibi temel gereksinimleri temin etmek amacıyla enerjiye farklı formlarda ihtiyaç duymaktadır. Enerji sarfiyatının artmasına neden olan temel etkenlerin başında nüfus ve gelir seviyesindeki artış gelmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından yapılan projeksiyonlar 2040 yılında dünya nüfusunun 9,2 milyara yükseleceğini göstermektedir [1]. Bu durum, 1,9 milyar daha fazla insana enerji arzı sağlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre dünya birincil enerji talebi 2016 yılında 13,7 milyar ton eşdeğer petrol (TEP) iken, 2040 yılında %43 artışla 19,6 milyar TEP'e ulaşması öngörülmektedir [2]. Şekil 1'de küresel birincil enerji arzının mevcut dağılımı ve ülkemizdeki kurulu gücün dağılımı sunulmaktadır. Buna göre küresel enerji arzının %80'den fazlası fosil-bazlı yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil-bazlı yakıtların tüketimi sonucu açığa çıkan karbondioksit emisyonu miktarı 2018 yılı itibariyle 33,1 Gton-CO_2 seviyesine ulaşmıştır [3]. Artan karbon emisyonu, çevre kirliliğinin yanı sıra küresel ısınma ve iklim değişimi gibi insanoğlunun yaşamını tehdit eden ve tamiri mümkün olmayan hasarlara sebebiyet vermektedir. Yaşanan çevre problemlerinin önüne nasıl geçileceği ve ileriye yönelik çözüm arayışları insanlığın ortak sorunlarıdır. Fosil yakıt kaynaklı emisyonların artış eğiliminin sürmesi durumunda sıra dışı iklim değişimleri ile tarım alanlarının ve temiz su kaynaklarının azalması neticesinde kitlesel insan göçleri öngörülmektedir [4].



(a) *(b)*

Şekil 1. *(a) Küresel birincil enerji arzı [2], (b) Kaynaklara göre Türkiye elektrik sistemi kurulu gücü [5]*

Nüfus artışı, kentsel büyüme ve sanayileşmeye paralel olarak yıllar içerisinde artan birincil enerji tüketiminin karşılanması noktasında çevreye duyarlı, ekonomik ve sürdürülebilir çözümler öne çıkmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2040 yılı projeksiyonuna göre, kurulu güç kapasitesinde kömürün yüzyılı aşkın süredir elinde tuttuğu liderlik pozisyonu 2030 yılı itibariyle doğal gaza geçecektir (Şekil 2). 2035 yılından itibaren ise güneş fotovoltaik panel (FVP) sistemlerinin kurulu güç kapasitesinin kömür ve doğal gazı geçmesi beklenmektedir. Hidroelektrik, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçteki paylarının artmasıyla birlikte karbondioksit emisyonunun azalması öngörülmektedir. Bunun yanında, enerji sektöründe sürekli olarak küresel fiyat dalgalanmaları oluşmaktadır. Ülkeler arasında enerjiye dayalı stratejik ve soğuk savaşlar yaşanmakta ve küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişiklikleri dünya genelinde enerji güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Bu kaygılardan ötürü ülkeler kendi sınırları içerisinde bulunan yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekte ve bu konuda atılan kararlı adımları hızlanmaktadır.



Şekil 2. *Türüne göre dünya genelinde kurulu güç kapasiteleri ([6]'dan uyarlanmıştır)*

Fosil yakıtlar, kısmen taşınabilir olması ve depolama formlarının pratikliği nedeniyle üreticilere önemli bir esneklik, planlama ve kontrol imkânı sağlamaktadır. Buna karşılık, güneş ve rüzgâr gibi kaynaklardan sağlanan enerji üretimi hava koşullarına bağlı olduğundan süreksizdir. Gün içerisinde ve mevsimsel olarak elde edilen enerji üretimlerinde önemli farklılıklar oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesindeki payının artmasıyla birlikte üretilen bu *temiz enerji*nin depolanmasına yönelik sistemlere de ilgi artmaktadır. Örnek olarak enerji depolaması, klimaların çok fazla kullanıldığı ve elektrik talebinin yüksek olduğu yaz günlerinde yük yoğunluğunun kullanım dışı saatlere kaydırılmasını sağlayarak belli saatlerde gözlemlenen yüksek talep yoğunluğunun (*pik-yük*) ortadan kalkmasına katkıda bulunabilir. Enerji santralleri yüksek enerji talebine uyum sağlamak için üretimlerini belli dönemlerde arttırmak zorunda kalmaktadır. Bu nedenle pik dönemde elektrik arz bedeli yükselmektedir. Distribütörler enerji talebinin yoğun olmadığı ucuz zaman dilimlerinde elektrik enerjisini depolayarak talep edildiğinde şebekeye satarak şebeke esnekliği sağlayabilirler.

Enerji depolama fikri yeni bir olgu değildir. Bataryaların 1800'lerin başlarından beri kullanıldığı bilinmektedir [7]. Diğer taraftan pompalı hidroelektrik enerji depolamayla ilgili Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleştirilen uygulamaların geçmişi 1930'lara kadar uzanmaktadır [8]. Dinamik, esnek ve temiz bir şebekeye olan talep nedeniyle yeni nesil enerji depolama projeleri hız kazanmıştır. Farklı formlardaki enerjinin daha etkin kullanımı açısından güvenilir, ekonomik, verimli ve yüksek kapasiteye sahip enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar dünya genelinde yürütülmektedir. Enerji depolaması, güneş ve rüzgâr enerjisinin kesik çalışmasını gidermeye yardımcı olmasının yanı sıra talepte meydana gelen büyük dalgalanmalara hızlı bir şekilde yanıt vererek, şebekeyi daha duyarlı hale getirebilir ve yedek enerji santralleri inşa etme ihtiyacını azaltabilir. Bir enerji depolama sisteminin etkinliği, tepki süresi, enerji kayıp oranı ve enerji depolama yoğunluğu gibi kısıtlar göz önüne alınarak değerlendirilir.

Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklı güç üretim sistemlerinin yaygınlaşmasındaki en önemli iki engel yüksek yatırım maliyeti ve yenilenebilir enerji kaynağının gün içerisindeki dalgalanması ve kesikli olmasıdır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından Nisan 2020'de yayınlanan raporda fotovoltaik panel (FVP), yoğunlaştırılmış güneş kolektörü (CSP) ve kara üstü (*onshore*) / deniz üstü (*offshore*) rüzgâr türbinlerinin 2030 projeksiyonları detaylı şekilde incelenmiştir [9]. 2012 ve 2018 yıllarına ait seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri (LCOE) kıyaslandığında, FVP'de 77%, CSP'de 46%, deniz üstü rüzgârda 35% ve kara üstü rüzgârda ise 20% oranında azalma gözlenmiştir. Tablo 1'de 2018 ve 2030 yıllarına ait seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri verilmektedir. Buna göre, maliyetlerdeki öngörülen azalma miktarları %25 ila %58 arasında değişmektedir. IRENA öngörülerine göre teknolojik ilerlemeyle birlikte azalan yatırım maliyetine paralel olarak yenilenebilir enerji kaynaklı güç üretim sistemlerinin paylarında artışlar beklenmektedir. Güneş veya rüzgârdan daha verimli

enerji dönüşümü sağlayan yeni nesil malzeme veya sistem geliştirmenin yanı sıra enerji üretiminin sürekliliğini sağlayan ve kaynak tarafındaki salınımların etkisini sönümleyerek talepteki dinamik yapıya cevap verebilecek esnek depolama sistemlerinin geliştirilmesi de öngörülen hedeflere erişilebilmesi ve yenilenebilir kaynaklı güç üretim sistemlerinin yaygınlaşması açısından önemlidir.

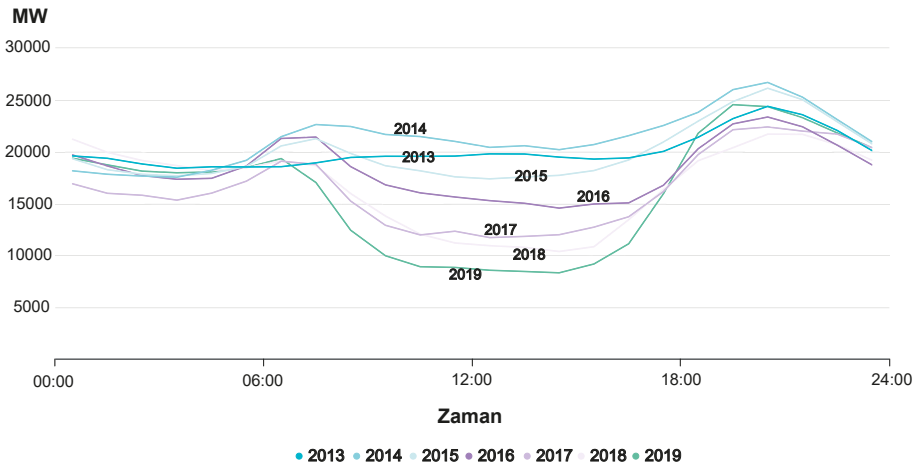
Tablo 1. *Farklı tip yenilenebilir güç üretim sistemlerine ait seviyelendirilmiş elektrik maliyetlerinin 2018 - 2030 karşılaştırması [9]*

Teknoloji	Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (USD/kWh)		Maliyette Öngörülen Azalma
	2018	2030	
Yoğunlaştırılmış güneş kolektörü (CSP)	0,132	0,086	%35
Fotovoltaik panel (FVP)	0,096	0,040	%58
Kara üstü rüzgâr türbini	0,057	0,043	%25
Deniz üstü rüzgâr türbini	0,122	0,055	%55

**G20 ülkeleri ortalamasına göre*

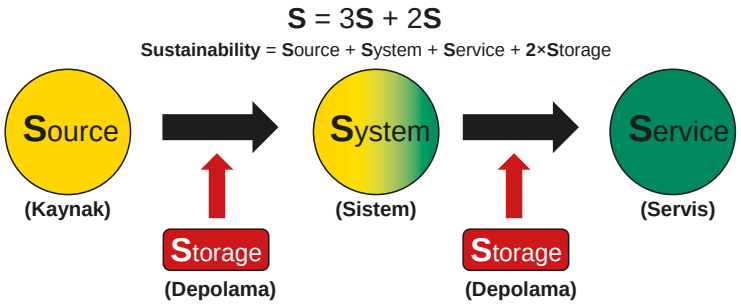
Rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ait birim enerji maliyetlerinin fosil-yakıt santralleriyle rekabet edebilir noktaya gelmesiyle birlikte yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı önemli ölçüde artmıştır. Ancak güneş santrallerinin gün içerisinde şebekeye sağladığı katkının değişken olması nedeniyle geleneksel güç üretim santrallerinin de yüke bağlı esnek çalışmaya uyumlu hale getirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. CAISO (California Independent System Operator) tarafından Kaliforniya bölgesi için oluşturulan ördek eğrisi (*duck curve*) gün içerisinde şebekede meydana gelen talep dalgalanmalarını net bir şekilde göstermektedir (Şekil 3). Dağınık fotovoltaik paneller tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarı gün doğumundan itibaren öğlen saatlerine kadar hızla artarken, şebekeden talep edilen elektrik önemli ölçüde düşmektedir. Öğleden sonra güneş ışınımının etkisini yitirmesiyle, şebekeden talep edilen enerji miktarı hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Dağınık (*district*) güneş panellerinin yıllar içerisinde yaygınlaşmasıyla birlikte şebekedeki talep dalgalanması artarak gün içerisindeki değişim eğrisi tıpkı bir *ördek* şeklini almıştır. Şebekeden elektrik talebinin yüksek olduğu sabah ve akşam saatleri sırasıyla ördeğin *arka* ve *baş* kısımlarını oluştururken, güneşten elektrik enerjisinin yüksek oranda sağlandığı öğlen saatleri ördeğin *göbek* bölgesini oluşturmaktadır. Ördeğin *göbek* ve *baş* kısmı arasındaki farkın yıllar içinde büyümesi, yenilebilir enerji kaynaklı üretim ile geleneksel güç üretim santrallerinin bir arada esnek ve güvenilir olarak kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Esnek ve güvenilir bir şekilde kaynak yönetiminin temin edilmesi için şebeke tarafından aşağıdaki temel fonksiyonların sağlanması gerekmektedir [10]:

- İşletme kapasitesindeki değişimleri doğru bir şekilde öngörebilmek,
- Hızlı reaksiyon göstererek talep edilen yükleri karşılamak,
- Talep değişimi yönünü hızlı bir şekilde değiştirebilmek,
- Gerektiğinde enerji depolama veya geri kullanım opsiyonlarını sağlamak,
- Gün içerisinde birkaç kez dur/kalk işlemi gerçekleştirebilmek,



Şekil 3. Kaliforniya Ördek Eğrisi (Duck Curve) ([11]'den uyarlanmıştır)

Kaliforniya ördek eğrisi örneğinden de görüldüğü üzere, kaynakta veya talepte meydana gelen değişimlere bağlı olarak sistemin hızlı bir şekilde tepki vermesi ve uygun kullanım alternatiflerine yönelmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklı şebekelerin sürdürebilir ve esnek kullanımında Dinçer tarafından "S = 3S + 2S" konsepti önerilmektedir [12]. Enerji sistemleri temelde kaynak (*source*), sistem (*system*) ve servis (*service*) olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır (Şekil 4). Kaynak ve servis (veya *kullanım*) taraflarında meydana gelen değişimlerin sönümlenerek esnek, güvenilir ve sürdürebilir sistem kullanımının elde edilmesi için kaynakla sistem ve sistemle servis arasında depolama çözümlerinin entegre edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4. Dinçer tarafından önerilen 3S + 2S konsepti ([12]'den uyarlanmıştır)

Enerji depolama sistemleri, güneş ve rüzgâr gibi kesikli ve değişken yenilebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamanın yanı sıra, mevcut enerji dönüşüm sistemlerinin de verimli ve etkin bir şekilde kullanımı açısından avantaj sağlamaktadır. Enerji depolama sistemleri güç üretim sistemlerinin yanı sıra endüstriyel uygulamalarda, mobil cihazlarda, otomotiv sektöründe, evsel uygulamalarda düşük, orta veya yüksek kapasiteli enerji depolama ve geri kullanım amacıyla uygulanmaktadır. Endüstriyel uygulama örneği olarak parabolik oluklu güneş kolektörü entegre edilmiş jeotermal sistem ele alınabilir. Güneş enerjisinin etkin olduğu zaman diliminde güneş kolektöründen alınan ısıl enerji jeotermal güç üretim çevrimine aktarılarak sistemin veriminin arttırılmasına katkı sağlayabilir. Güneş enerjisinin etkin olmadığı zaman diliminde hibrit sistem uygulamasının çalıştırılabilmesi için enerji depolama sis-

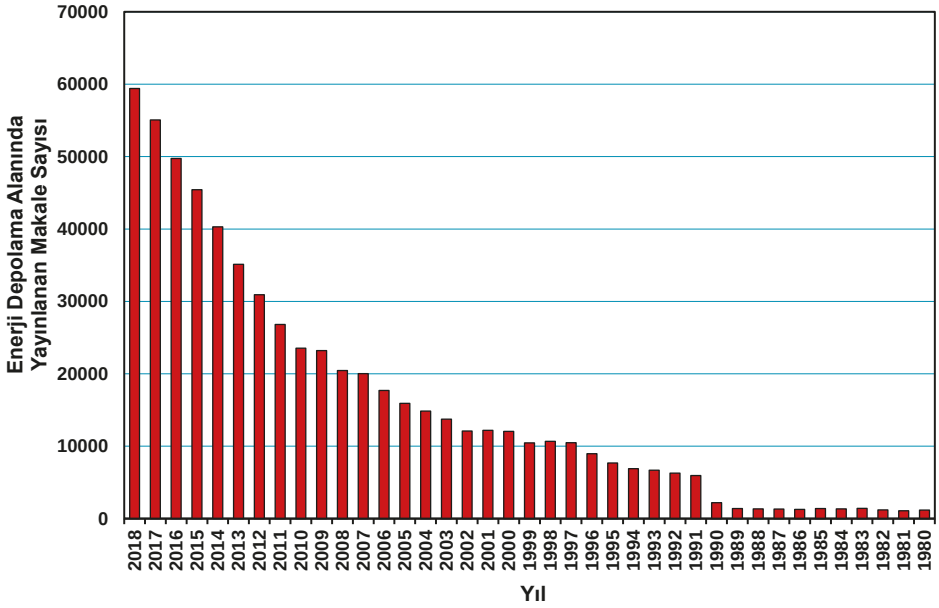
teminin çevrime uygun şekilde entegre edilmesi gerekmektedir. Böylece gün içerisinde güneş kolektörü yardımıyla elde edilen talep fazlası ısıl enerji depolanabilir ve güneş enerjisinin etkisini yitirdiği zaman diliminde geri kullanarak sistemin güneş destekli daha uzun süre boyunca çalışması sağlanabilir. Bir başka örnek ise büyük ölçekli ticari iklimlendirme sistemleri açısından verilebilir. Günümüzde ticari iklimlendirme ünitelerinde ısıtma ve soğutma işlevlerinin yanı sıra elektrik üretimini de sağlayan üçlü-üretim (tri-generation) üniteleri uygulanmaktadır. Elektrik ve ısıl enerji depolama ünitesi entegre edilen absorbsiyon soğutmalı tri-generation ünitesi geleneksel sisteme nazaran talepteki değişimlere daha hızlı cevap verebilecek ve sistemin yakıt tüketimini azaltarak hem ekonomik hem de çevresel açılardan avantajlar sağlayacaktır.

Enerji depolama sistemlerinin uygulamada öne çıkan belli başlı avantajlar Dincer ve Rosen [13] tarafından aşağıdaki şekilde listelenmiştir:

- ekipman kapasitelerinin düşürülmesi,
- ekipmanların daha verimli ve etkin kullanımı,
- arz ile talep arası düzensizliklerin ortadan kaldırılması,
- azalan ilk yatırım maliyetleri,
- azalan işletme ve bakım maliyetleri,
- enerji maliyetinin düşürülmesi,
- azalan emisyonlar (CO_2 ve CFC),
- sistemin esnek kullanımı,
- sistemin sürdürülebilir kullanımı,
- sistemin güvenilir kullanımı,
- sistemin ekonomik kullanımı,
- sistemin sürekliliğinin sağlanması,
- artan ısıtma/soğutma performansına paralel olarak iyileşen iç ortam hava kalitesi

Enerji depolama sistemlerinin sağladığı avantajlar ve başarımlar, seçilen depolama sisteminin tekil olarak performansıyla ilgili olmasına rağmen, esas itibariyle depolama sisteminin entegre edildiği bütünleşik sistemin (düşük veya yüksek kapasite; yerleşik veya mobil; tekil, şebeke entegreli ve/veya yenilenebilir destekli vb.) bir bütün olarak uygun şekilde tasarımı, entegrasyonu, kontrolü ve işletimi, sistemin beklenen iyileştirmeleri sunabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Enerji depolama sistemlerinin farklı sektörlere adaptasyonun hızlandırılması amacıyla malzeme geliştirme, sistem entegrasyonu, sistem kontrolü, sistem modellenmesi gibi çeşitli açılardan bilimsel çalışmalar yürütülmektedir. Şekil 5'te enerji depolama anahtar kelimesi içeren ve Web of Science (WOS) [14] bilimsel indeksine tabii dergilerde yayınlanmış makale sayılarının 1980 – 2018 yılları arasındaki değişimi verilmektedir. Buna göre, enerji depolama alanında gerçekleştirilen bilimsel çalışma sayısı 2006 – 2018 yılları arasında 3 kat artmıştır. Özellikle 2000 yılından sonra gözlemlenen yüksek artış eğilimi, dünya genelinde bilim insanları tarafından enerji depolama sistemleri konusuna verilen önemi göstermektedir. Bu grafik aynı zamanda ortak bir akıl ile dünya genelinde geleneksel enerji dönüşüm sistemlerinden uzaklaşarak çevre dostu ve mevcut kaynakların daha verimli kullanımına imkân veren çözümlere yönelimi göstermesi bakımından da önemlidir. Başta Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği Ülkeleri olmak üzere dünya genelinde enerji depolamanın tüm alt alanlarında yüksek bütçeli araştırma projeleri sağlanarak enerji depolama konusundaki bilgi birikiminin arttırılması hedeflenmektedir. Projeler temel düzeyde araştırma/geliştirime altyapısının arttırılmasından yüksek kapasiteli ürünlerin geliştirilmesi ve kullanıma sunulmasını kapsayan geniş bir yelpazede gerçekleştirilmektedir.

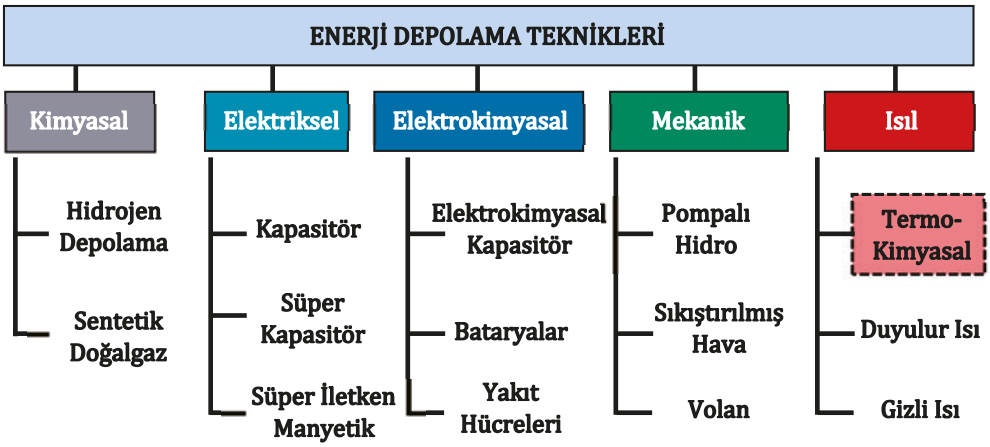


Şekil 5. *Yıllara göre enerji depolama anahtar kelimesi içeren bilimsel çalışmalardaki değişim [14]*

Raporun ikinci bölümünde enerji depolama yöntemleri sınıflandırılarak yaygın olarak tercih edilen kimyasal, elektrokimyasal, elektrik, mekanik ve ısıl enerji depolama yöntemlerine ait temel bilgiler sunulmakta ve ülkemizdeki güncel bilimsel çalışmalara ve uygulama örneklerine yer verilmektedir. Raporun son kısmında ise dünyada enerji tedariki, depolaması ve kullanımındaki yeni trendler, ülkemizdeki büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları ve Türkiye'nin enerji depolama konusundaki potansiyel yol haritaları sunulmaktadır.

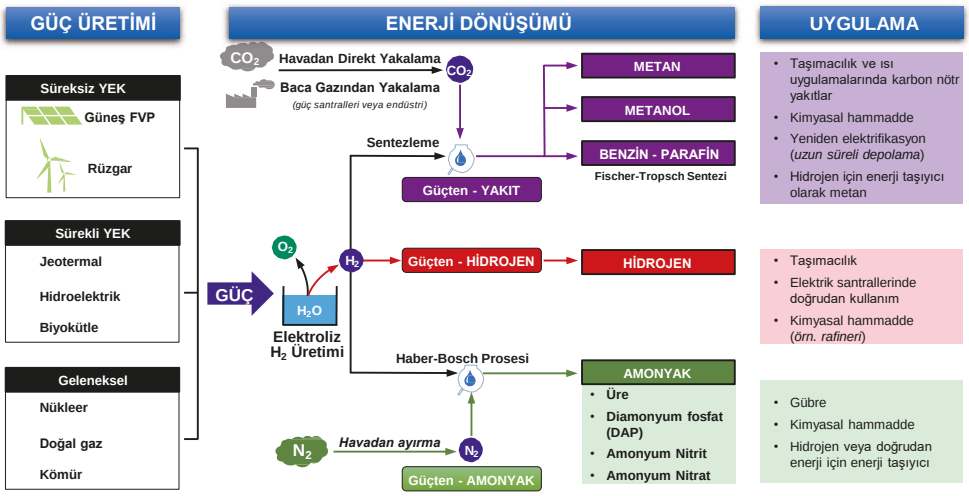
2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNİKLERİ

Neredeyse tüm enerji formları için enerji depolama imkânı bulunmaktadır. Şekil 6'da yaygın olarak uygulanan enerji depolama teknikleri enerji formuna göre sınıflandırılmıştır. Burada sunulan sınıflandırmadan farklı olarak enerji girdisi (*elektrik*, *mekanik* veya *ısıl*), enerji çıktısı (*ısıl enerji*, *sıvı yakıt* veya *gaz yakıt*) veya enerji dönüşüm işlemine (*güç-güç*, *güç-gaz*, *güç-sıvı* veya *güç-ısı*) göre farklı tip sınıflandırmalar da yapılabilmektedir. Uygulama tipine, talep edilen ihtiyaçlara ve ekonomik koşullara göre farklı tip depolama alternatifleri bulunmaktadır.



Şekil 6. *Yaygın olarak kullanılan enerji depolama teknikleri*

Günümüzde yenilenebilir enerji yöntemlerinin geniş ölçekte kullanımı için depolanması çok önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerden elde edilen elektrik enerjisi genellikle üretim noktalarında direkt olarak kullanılmaktadır. Gündüz/gece veya yaz/kış periyotlarında kaynak ve talepte meydana gelen değişimlerden ötürü farklı tip depolama alternatifleri bu sistemlere entegre edilerek kullanılmaktadır. Yerinde üretim, depolama ve kullanım işlemlerinin yanı sıra, üretilen talep dışı enerjinin farklı coğrafyalara taşınması veya farklı formlarda saklanarak uzun süreler boyunca saklanması da gerekebilmektedir. Bu konuda en etkin çözüm, enerjinin taşınabilir formda sentetik yakıt halinde depolanmasıdır. Güçten-Yakıt (*Power-to-Fuel*) olarak isimlendirilen bu konseptte yenilebilir veya geleneksel güç üretim sistemlerinden elde edilen talep fazlası enerji, sentetik yakıt üretiminde kullanılmaktadır. Burada temel amaç, talep dışı zamanda üretilen düşük maliyetli enerjinin (*yenilebilir* veya *geleneksel*) farklı amaçlarla kullanımına imkan tanımaktır. Şekil 7'de yenilenebilir kaynaklı (YEK) veya geleneksel güç üretim sistemlerine bütünleşik bir şekilde *güçten – yakıt, güçten – hidrojen ve güçten – amonyak* üretimi safhaları şematik olarak gösterilmektedir. Suni kimyasal yakıt elde edilmesinde en etkin çözüm karbondioksit (CO_2) gazını su (H_2O) ile sentezlemektir. Kimyasal benzerliğinden dolayı bu dönüşüm teknolojisi *"suni fotosentez"* olarak da adlandırılmaktadır. Karbondioksit gazı havadan direkt olarak yakalanabileceği gibi, biyokütle/biyogaz'dan veya endüstriyel tesislerin baca gazından da ayrıklaştırılabilir. Sentez prosesi için gerekli hidrojen ise talep fazlası güç kullanılarak elektroliz gibi yöntemler ile elde edilebilir. Sentez işlemi sonrası Metan (CH_4), metanol (CH_3OH), benzin ve parafin gibi farklı amaçlarla kullanılabilecek son ürünler elde edilebilmektedir. Elektroliz ile elde edilen hidrojen direkt olarak depolanabileceği gibi amonyak üretiminde kullanılarak farklı sektörlerde talebe uygun olarak değerlendirebilmektedir. Güçten yakıt elde ederek enerjinin depolanması, enerjinin talebe uygun olarak taşımacılık, tarım, kimyasal üretim veya yeniden enerji üretimi gibi farklı sektörlerde esnek olarak kullanımına imkan sağlamaktadır.



Şekil 7. *Güçten yakıt elde edilerek enerji depolama yöntemleri ([15]'ten uyarlanmıştır)*

Depolama teknikleri, uygulamalarına göre dört kategoriye ayrılabilir:

(1) İzole alanlarda, esas olarak besleyicileri ve acil durum terminallerini beslemek için düşük güçlü uygulamalar,
(2) İzole alanlarda orta güç uygulaması (*bireysel elektrik sistemleri* veya *şehir beslemesi*),
(3) Tepe seviyelemeli ağ bağlantısı uygulaması,
(4) Güç kalitesi kontrol uygulamaları.

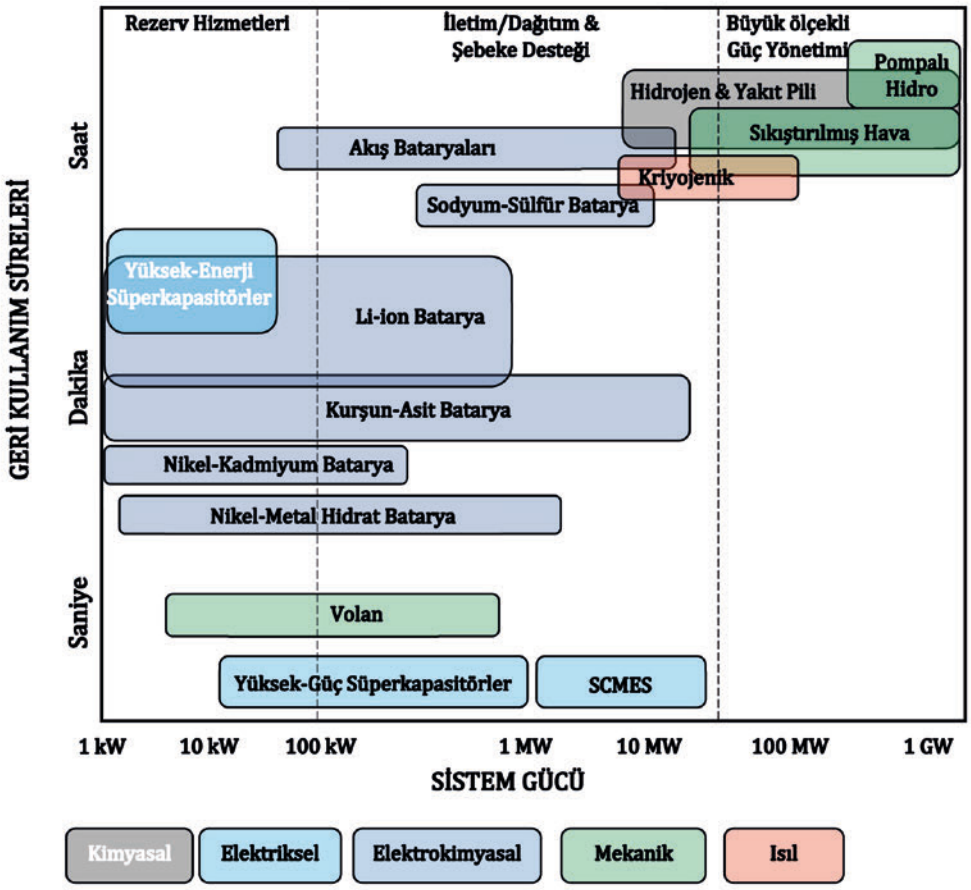
İlk iki kategori, enerjinin kinetik enerji (*volan*), kimyasal enerji, basınçlı hava, hidrojen (*yakıt hücreleri*), süper kapasitörler veya süper iletkenlerde depolanabileceği küçük ölçekli sistemleri kapsamaktadır. Üçüncü ve dördüncü kategoriler ise enerjinin yerçekimi enerjisi (*pompaj depolama gibi hidrolik sistemler*), ısıl enerji (*duyulur* veya *gizli*), kimyasal enerji (*akümülatörler* veya *akış pilleri*) veya basınçlı hava (*veya sıvı ve doğal gaz deposu ile birleşik*) olarak depolanabileceği büyük ölçekli sistemleri içermektedir.

Tablo 2'de farklı tip enerji depolama teknikleri, *(i)* güç kapasitesi, *(ii)* çevrim sayısı veya süresi, *(iii)* enerji yoğunluğu, *(iv)* verimlilik *ve (v)* tepki süresi gibi parametreler göz önüne alınarak karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2. *Seçilmiş enerji depolama tekniklerinin temel özellikleri [16]*

Enerji Depolama Tekniği	Güç Kapasitesi (MW)	Çevrim Sayısı *veya* Süresi	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Verimlilik (%)	Tepki Süresi
Süper kapasitör	0,01 – 1	10000 – 100000	10 – 20	80 – 98	10 – 20 ms
Pompalı hidro	100 – 1000	30 – 60 yıl	0,2 – 2	70 – 85	saniye – dakika
Sıkıştırılmış hava	10 – 1000	20 – 40 yıl	2 – 6	40 – 75	saniye – dakika
Volan	0,001 – 1	20000 – 100000	20 – 80	70 – 95	10 – 20 ms
Kurşun asidik batarya	0,001 – 100	6 – 40 yıl	50 – 80	80 – 90	< saniye
NaS batarya	10 – 100	2500 – 4400	150 – 300	70 – 90	10 – 20 ms
Li-ion batarya	0,1 – 100	1000 – 10000	200 – 400	85 – 98	10 – 20 ms
Akış bataryası	1 – 100	12000 – 14000	20 – 70	60 – 85	10 – 20 ms
Hidrojen	0,01 – 1000	5 – 30 yıl	600 (@200 bar)	25 – 45	saniye – dakika
Sentetik doğal gaz	50 – 1000	30 yıl	1800	25 – 50	saniye – dakika
Erimiş tuz (ısıl)	1 – 150	30 yıl	70 – 210	80 – 90	dakika

Şekil 8'de enerji depolama teknikleri sistem güç kapasiteleri ve depolama süreleri açısından mukayese edilmektedir. Volan ve süper-kapasitör gibi sistemlerde saniye mertebesinde kısa süreli enerji depolama amaçlanırken, pompalı-hidro veya sıkıştırılmış hava gibi depolama tekniklerinde saat, hafta veya ay mertebesinde uzun süreli depolama amaçlanmaktır. Benzer şekilde depolama kapasiteleri kW seviyesinden GW seviyesine geniş bir spektrumda değişmektedir.



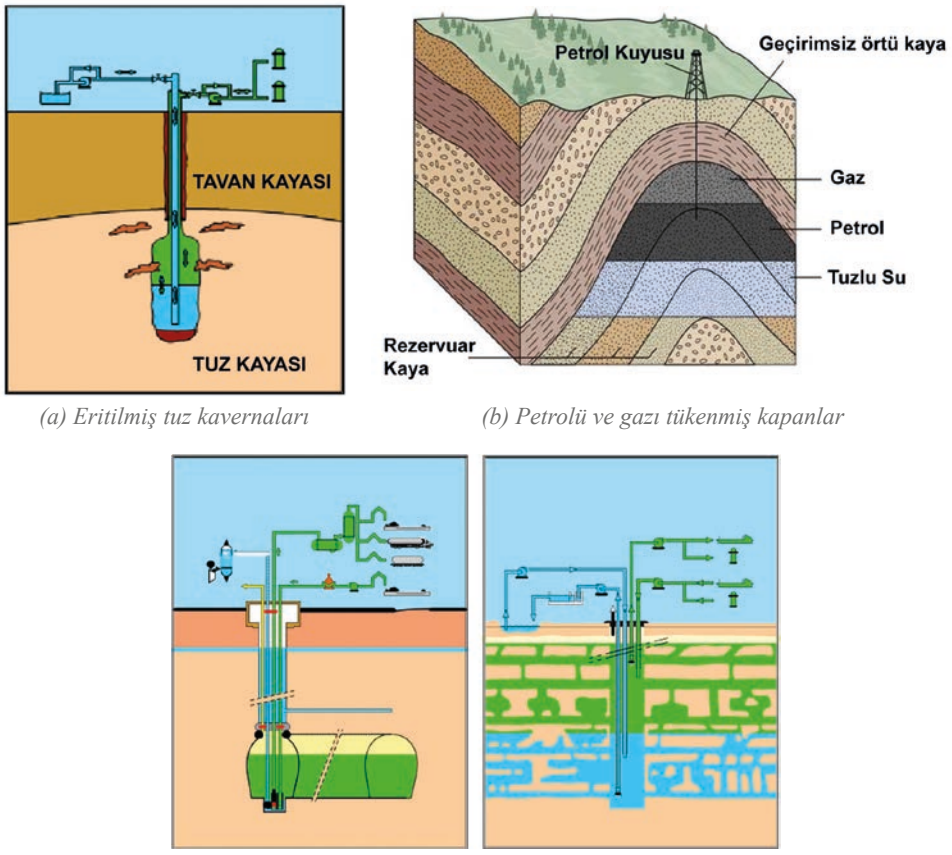
Şekil 8. *Farklı tip enerji depolama teknikleri için depolama süreleri ve kapasiteler ([17]'den uyarlanmıştır)*

2.1. Yer Altında Gaz Depolama

Dünyanın birçok bölgesinde entegre gaz depoları dahil olmak üzere yoğun doğal gaz boru hattı şebekeleri bulunmaktadır. Depolama hacimlerinin sırasına göre, jeolojik yer altı oluşumlarındaki bu gaz depoları *(i)* neredeyse tamamen tükenmiş gaz alanlarında, *(ii)* akifer oluşumlarında veya *(iii)* yapay olarak inşa edilmiş tuz mağaralarında bulunmaktadır. Çok nadir durumlarda ise kullanılmış petrol sahalarında, terkedilmiş madenlerde veya kaya mağaralarında da depolar inşa edilmektedir. Kaya mağaraları, gaz depoları oluşturma amacıyla madencilik teknikleri kullanılarak kasten kazılan yer altı çalışmaları olarak tanımlanmaktadır. Bunlara ek depolama seçeneği olarak boru depoları öne çıkmaktadır. Ancak boru depoları tam anlamıyla jeolojik depolar olarak kabul edilmemektedir. Boru depoları birkaç metrelik sığ derinliklerde gömülüdürler. Bu nedenle yerel jeolojik durumdan büyük ölçüde bağımsızdırlar ve jeolojik yapının diğer seçenekler için uygun olmadığı alanlarda bile uygulanabilirler. Yer altı gaz depolaması, üretim ve aktarımda aksamalar olması durumunda arz güvenliği sağladığından stratejik olarak önemli bir yere sahiptir. Doğal gaz satış fiyatındaki değişimlere veya siyasi/teknik sebeplerden ötürü yaşanan kesintilere bağlı olarak gaz temininde aksaklıklar yaşanabilmektedir. Yer altında gaz depolaması, tüketimdeki mevsimsel değişimleri dengelemek için de kritik bir öneme sahiptir. Bunlara ek

olarak gazın kullanıldığı yerde yerel olarak depolanabilme imkânı sağlayacağından, gazın nakliyesi ile ilgili yaşanabilecek olumsuzluklar ortadan kaldırılmış olacak ve üretimin etkinliğini arttıracaktır. Yer altı gaz depolaması büyük miktarlarda hidrokarbon depolamanın en güvenli yoludur. Üç ana yer altı depolama yöntemi vardır (Şekil 9):

- *Tükenmiş petrol veya gaz rezervuarları*
- *Akiferler*
- *Tuz mağaraları*



(a) Eritilmiş tuz kavernaları *(b) Petrolü ve gazı tükenmiş kapanlar*

(c) Tüketilmiş ve terkedilmiş yer altı madenleri

Şekil 9. *Doğal gaz yer altı depo çeşitleri [18]*

Gaz depolamasının uygulandığı rezervuar veya oluşum tipine göre özel tanımlamalar mevcuttur. Gaz depolaması tükenmiş veya kısmen tükenmiş gaz üretim rezervuarlarında, yarı geleneksel tükenmiş petrol rezervuarlarında veya akiferlerde (*başka bir deyişle su içeren jeolojik yapılar*) ve yer altı tuz oluşumlarında kazılan mağaralarda yapılabilmektedir. Gazın yer altında depolanması, gaz piyasasının gelişmesinde ve dengelenmesinde hayati bir rol üstlenmektedir. Mevsimsel ve günlük bazda gaz talebinde meydana gelen değişimler yüksek oranda gazın ısınma için kullanıldığı konut sektöründen kaynaklanmaktadır.

Teknik ve ekonomik nedenlerden ötürü, üretim ve taşıma sistemleri açısından kullanımı en üst düzeye çıkarmak ve harcamaları azaltmak için nispeten istikrarlı bir çalışma rejimi temin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, gaz tedarikini yukarıda belirtilen pazar gereksinimlerine uygun hale getirebilecek depolama yapıları oluşturulmalıdır. İlkbahar-yaz döneminde tedarik üretim sistemi tarafından sağlanan gaz, tüketimde meydana gelen azalma nedeniyle (*ısıtma talebindeki düşüş nedeniyle*) piyasa tarafından

kullanılmamaktadır. Talep fazlası gaz ilkbahar-yaz döneminde depolanarak sonbahar-kış döneminde tedarik üretim sisteminin talebi karşılayamadığı zamanlarda devreye alınarak pazar taleplerini dengelemektedir. Pazar talebinin karşılanması açısından depolamanın oynadığı temel rol dikkate alınmalıdır. Genel olarak tüm ülkelerin depolama sistemlerinde saklı tutulan stratejik gaz rezervleri bulunmaktadır. Gaz rezervleri arzın (*ulusal veya ithal*) düşmesi durumunda veya hava koşullarının uzun süre alışılmadık derecede şiddetli geçmesi durumlarında bile piyasa taleplerinin karşılanmasını garanti eder. Doğal gaz deposunu tartışırken genellikle aşağıdaki kriterleri göz önünde tutmak gerekmektedir:

- **Çalışma gazı:** Yaz boyunca enjekte edilebilecek ve rezervuarın normal performansından ödün vermeden kış aylarında çekilebilecek gaz hacmi.
- **Taban gazı:** Depo olarak kullanıldığı süre boyunca rezervuar içinde hareketsiz kalan gaz hacmi. Deponun mümkün olan maksimum performansta verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.
- **Tepe hızı:** Rezervuar tamamen dolduğunda geri çekilebilecek günlük tepe debisi.
- **Verimlilik:** Çalışma gazı ve immobilize-gaz[1] arasındaki oran.

Gaz deposunun özellikleri, kullanımlarını tanımlayan rezervuarın jeolojik özelliklerine bağlı olarak değişir. Depolama türüne bağlı olarak, uygun enjeksiyon ve çekme oranları için gerekli rezervuar basınçlandırmasını sağlamak için farklı bir artık (*taban*) gaz payının muhafaza edilmesi gerekir. Tablo 3'te farklı gaz depolama teknikleri etkin parametreler cinsinden karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3. *Farklı gaz depolama tekniklerinin özellikleri [19]*

Parametreler	Tükenmiş Rezervuarlar	Akiferler	Tuz Mağarası
Çalışma Gazı Hacmi	Yüksek	Yüksek	Oldukça düşük
Geri çekme hızı*	Düşük	Düşük	Yüksek
Enjeksiyon hızı*	Düşük	Düşük	Yüksek
Taban gazı	~50	~80	~30

** Çalışma gazı hacmi ile karşılaştırıldığında*

2.1.1. Tükenmiş Petrol veya Gaz Rezervuarları

En yaygın yer altı depolama şekli tükenmiş gaz rezervuarlarıdır. Boş rezervuarlar doğal gazı tutmak için kullanılabilirler. Enjeksiyon ve geri çekme işleminin kolaylaştırılması amacıyla rezervuar alanlarının yakınında tipik olarak geniş bir boru hattı ağı bulunmaktadır. Maliyet, geliştirme, işletme ve bakım hızı gibi parametreler göz önüne alındığında alternatif yer altı depolarına göre tüketilen rezervuarlar en avantajlı konumdadır. Gaz, emici bir sünger gibi gözenekli kaya oluşumuna yeniden enjekte edilir. Geçirimsiz kapak kayası sayesinde gaz yerinde tutulur. Jeolojik özellikler rezervuarın özelliklerini belirler:

- *Gözeneklilik: kayanın gaz tutma kapasitesini belirler.*
- *Geçirgenlik: kayanın gaz iletme kabiliyetini belirler.*

Bir yer altı depolama rezervuarının en önemli iki özelliği: *(i)* doğal gaz tutma kabiliyeti ve *(ii)* doğal gaz envanterinin enjekte edilip geri çekilme oranıdır. Tükenen petrol alanlarının çoğuna, daha fazla petrol geri kazanımı için azot enjekte edildiğini ve sonuç olarak, bu alanlardaki azot içeriğinin geri çekilme

[1] İmmobilize-gaz: çalışma *gazı miktarı, yastık gazı ve rezervuarda bir depolama sistemine dönüştürüldüğünde kalan tüm rezervler.*

sırasında değişeceği unutulmamalıdır. Bazı rezervuarlarda, çekme prosesi sırasında rezervuardaki azot içeriği %3 ila %30 arasında değişebilir. Bu tesislerde, boru hattı özelliklerini karşılamak ve azot içeriğini uzaklaştırmak için bir azot arıtma ünitesi kurulmalıdır.

2.1.2. Akiferler

Amerika Birleşik Devletleri'nde depolama kapasitesinin yaklaşık %16'sı akiferler ile sağlanmaktadır. Akiferler, doğal su rezervuarları olarak işlev gören yer altı gözenekli ve geçirgen kaya oluşumlarıdır. Su taşıyan tortul kaya oluşumu geçirimsiz bir başlık kaya ile kaplanırsa, bir akifer doğal gaz depolaması için uygun hale gelir. Akiferlerin jeolojisi, tüketilen üretim alanlarına benzemekle birlikte, doğal gaz depolaması için geliştirilmesi daha maliyetlidir. Bu nedenle, sadece başka alternatiflerin olmadığı alanlarda bulunan sınırlı sayıda akifer doğal gaz depolaması vardır.

Akiferler, gözeneklilik ve geçirgenlik açısından tükenmiş alanlara benzer jeolojik oluşumlarda bulunur. Tükenmiş alanların aksine, akiferlerde gözenekler suyla doldurulur. Enjeksiyon sırasında su oluşumun aşağısına itilmektedir. Gaz çekilme sırasında ise tersi bir işlem meydana gelmektedir. İşlem bu nedenle çok daha karmaşıktır. Depolanan gaz, su taşıyan tabakalara doğru göç edebilir. Ekstraksiyon üzerine, gaz daha fazla dehidratasyon gerektirir. Akiferlerde gaz depolanması söz konusu olduğunda, öncelikle bir antiklinal olması gereken jeolojik yapı (*tuzak*) bulunmalıdır. Yapı bazen jeolojik araştırmalar kullanılarak tanımlanır, ancak genellikle jeofizik sistemler kullanılarak lokalize edilir.

Akiferlerdeki depolama tesisleri için en önemli gereksinim, uygun şekilde kalın olması gereken ve şistli oluşumlarında olduğu gibi sıfıra yakın düşük geçirgenlik değerlerine sahip olması gereken kapak kayanın mühürlenmesidir. Gaz enjeksiyonunda hidrostatik basınç her zaman aşıldığı için bu ikinci gereksinim ortaya çıkmaktadır. Bir akiferde depolama başlatıldığında, gaz suyu geçirir, geçirgenliğin daha yüksek olduğu yerlerde gaz daha hızlı ilerler ve böylece bir gaz kabarcığı oluşumuna yol açar. Enjeksiyon işleminin birkaç yıl devam etmesi sonucunda rezervuarın üst kısmındaki su tamamen gaz ile yer değiştirir; bu noktada depolama işletilebilir hale gelmektedir.

Akiferler, 1953'ten bu yana Avrupa'da doğal gaz depolaması için uygulanmaktadır. Bu nedenle inşaatları ve işletmeciliği on yıllardan beri dünya çapında standartlaşan bir uygulamadır. Akiferler, gözenek boşluğunda taze su veya daha genel olarak tuzlu su içeren gözenekli ve geçirgen kaya oluşumlarıdır. Tipik olarak, bu tür geçirgen kaya oluşumları kumtaşları veya karbonat kayalarıdır. Gaz depolamaya uygun olması için, akiferin geçirimsiz bir kapak kayası tabakası ile kaplanması gerekir. Böyle bir kapak kaya, sıkı killi şist, tuz veya bir anhidrit tabakası olabilir. Akiferler genellikle büyük miktarda gaz depolayabilirler, ancak kullanımı esnek değildir. Bu jeolojik yapıların hidrojen depolaması olarak uygulanması için biyolojik ve kimyasal reaksiyonlarla ilgili sorunların araştırılması gerekir.

Doğal gaz depolaması, şehir gaz depolaması ve akiferlerde CO_2 enjeksiyonu deneyiminden yola çıkarak, bir akiferde tutulması/kaybolması veya kirlenmesi için önemli miktarda hidrojenin potansiyel risk listesinin uzun olduğu sonucuna varılabilir. Sonuç olarak, olası sorunları daha iyi anlamak ve bunlar için azaltma seçeneklerini bulmak için çok fazla AR-GE çalışmasının yürütülmesi gerekmektedir. Açık soruların çoğu, hidrojenin bulunduğu gözenek alanındaki kaya ve akışkan davranışları etrafındadır. Hidrojen mevcudiyetinde kaya ve akışkan özelliklerinin daha iyi anlaşılması için bir araştırma programı, akifer kayaçlar içindeki su ve tuzlu suyun geçirgenliğini ve şist ve anhidrit gibi hidrojen potansiyel kapak kayalarının kılcal giriş basınçlarını ölçmek için çekirdek akış deneylerini gerektirecektir.

2.1.3. Tuz Mağaraları

Tuz mağaraları, mevcut tuz yatağı birikintilerinden oluşmaktadır. Büyük tuz mağaralarının çoğu, ABD'deki Körfez Kıyısı boyunca bulunan tuz kubbelerinde bulunmaktadır. Formasyonun içine bir oyuk delinerek ve yüzeye tuzlu su olarak geri dönen tuzu eritmek için tamamlanmış oyuktan su pompalayarak mağara yapılır. Mağara duvarları rezervuar bozulmasına karşı çok dayanıklıdır. Tuz mağaraları

esnek ve su geçirmezdir böylece azaltılmış gaz göçü oluşur. Tuz özellikleri, mağara çapı, maksimum yüksekliği ve minimum çalışma basıncı gibi tasarım ve çalışma koşullarını belirlemektedir.

Tuz mağarası açık bir kap şeklinde olduğundan çok yüksek oranda teslim edilebilirlik sunmaktadır. Kolayca akışa alınabilirler, akış hızları yüksek olabilir ve hızlı bir şekilde tam akışa yükseltilebilirler. Uzun süreli mevsimsel depolamadan ziyade pik yükler ve kısa vadeli işlemler için en ideal gaz depolama yöntemidir. Tepe yük, teslim edilebilirliğin daha yüksek olduğu, ciroların daha yüksek olacağı ve tesislerin daha küçük olacağı tuz mağaraları tarafından sağlanabilir. Tuz mağara ciroları günlük veya haftalık olabilir, tamamen ticari işlemle belirlenir. Tuz oluşumlarında gaz depolaması gerçekleştirebilmek için tuz kütlesinin bir veya daha fazla oyuktan pompalanan tatlı su içinde çözülmesiyle elde edilen mağaralar kullanılır. Tuz daha sonra sudan çıkarılır. Bu uygulamanın ekonomik olarak uygun görülmediği durumlarda başka bir jeolojik formasyona yeniden enjekte edilir. Mağara şeklinin ve onu çevreleyen kayaların özelliklerinin anlaşılması, deponun kullanılabileceği minimum ve maksimum basıncı belirlemek için önemli unsurlardır. Bu depolama yönteminde genellikle çalışma gazı kapasitesi yüksek değildir, ancak kayda değer pik oranları sağlanabilmektedir.

Akiferler gibi tükenmiş alanlar, yalnızca azaltılmış esneklik sağlamakta ve genellikle yılda yalnızca bir ciro gerçekleştirebilmektedir. Oranlar, depolama oluşumunun geçirgenliğine, karmaşıklığına ve sahaya bağlı olarak üretim kuyularının sayısına ve performansına bağlıdır. Özel depolamaya bağlı olarak, yüksek su içeriği ve yabancı maddeler çekilen gazdan uzaklaştırılmalıdır. Bu nedenle, gaz arıtma işlemlerinin buna göre uygulanması gerekmektedir. Tükenmiş petrol sahalarının işletimi sırasında artık petrol periyodik olarak üretilebilir. Bu işlem deponun işletme ve bakım çabalarını arttırmaktadır. Büyük miktarda doğal gaz içeriği artık petrolde çözünebilir ve kurtarılamaz hale gelir. Bu yatırım kaybı hidrojen için de olabilmektedir. Tükenmiş gaz alanlarının olması durumunda, doğal gaz ve hidrojenin karıştırılması, enjekte edilen hidrojen miktarının artmasıyla azalacaktır.

Tuz mağaraları sıvı hidrokarbonların depolanması ve özellikle yüksek basınç altındaki gazlar için uygundurlar. Büyük geometrik hacimler ve yüksek depolama basınçları nedeniyle büyük miktarda gaz güvenle depolanabilir. Kaya tuzunun en önemli özelliği, uygun basınç aralıklarında çalıştırıldığında boşlukların uzun süreli stabilitesini ve gaz sızdırmazlığını garanti etmesidir. Tuz mağaralarının oluşturulması ve işletilmesi özel borular ve ekipmanlarla donatılmış olan tek bir kuyu deliğinden ve zeminden yerden yapıldığından diğer yer altı kazılarına kıyasla daha düşük özel inşaat maliyetleri gerektirmektedir. Bu kuyu dışında hiçbir yer altı teknik kurulumuna gerek yoktur.

Mağaralarda doğal gaz depolanması konusunda sahip olunan deneyimler sayesinde, Avrupa güvenlik standartlarına sahip hidrojen depolama mağaralarının yapımı için az miktarda iyi tanımlanmış ekstra araştırma yapılması gerekmektedir. Ana hususlar, çimento bütünlüğü gereklilikleri ve kullanılan ekipmanın teknik özellikleri olmalıdır. Her ne kadar yaygın çelikler mağaradaki hidrojeni kapamak için yeterli olsa da hidrojen gevrekleşmesinden zarar görebilirler. Bu nedenle, uygun yapı çeliklerinin ve ayrıca plastik ve elastomer gibi uygun esnek metalik olmayan malzemelerin kullanılacak yapı elemanları için araştırılması gerekmektedir. Alternatif olarak, uygun olduğu kanıtlanmış olan östenitik çelikler gibi daha pahalı malzemeler uygulanmalıdır.

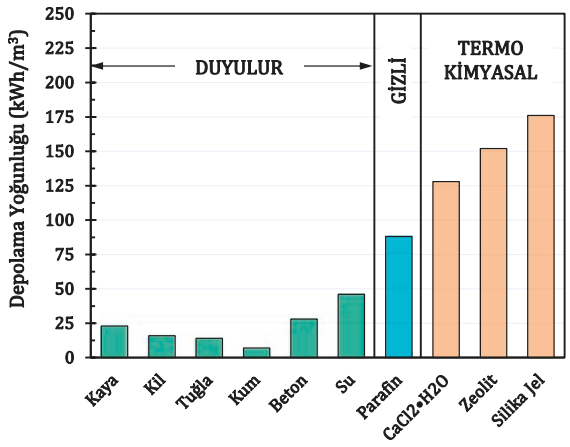
Mağara, gaz sızdırmazlığı sağlayan, kalın kaya tuzu duvarlarıyla kapatılmıştır. Kaya tuzunun gaz sızdırmazlığı özellikle laboratuvar testinde belirlenir ve bu nedenle yerinde test edilmeleri gerekmez. Üretilen mağara kuyularının gaz sızdırmazlığını kanıtlamak için, mekanik bütünlük testleri (MBT) gerçekleştirilir. Hidrojen mağaralarında MBT'lerin modifikasyonu için belirlenen kriterler ve düzenlemelere bağlı olarak bazı geliştirme çalışmaları gerekebilir.

Doğal gaz üretimi ve tüketimi arasındaki zamansal farklılıkları dengelemek için tampon görevi gören jeolojik depolar, özellikle de doğal gaz olmak üzere, on yıllardır boyunca başarıyla kullanılmaktadır.

Bunlar dünyadaki mevcut doğal gaz altyapısının önemli bir unsurudur. Yer üstü depolarına kıyasla, yüzlerce metre kalınlığındaki örtülü kayalarla korunurlar. Yer altı depoları büyük depolama basınçları ve dolayısıyla yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır. Jeolojik depolarda elde edilebilecek büyük hacimlerle birlikte merkezi tesislere de imkân sağlarlar. Yüksek güvenlik standartları, düşük ayak izi ve düşük özgül yatırım maliyetleri öne çıkan en önemli avantajlarıdır. Gelecekteki hidrojen depoları için gerekli olacak özellikler günümüzün doğal gaz depolarına önemli önemli ölçüde benzeyeceğinden, hidrojen depolama seçeneklerinin değerlendirilmesinde bu depolara ait deneyimler önemli katkılar sağlayacaktır.

2.2. Isıl Enerji Depolama

Isıl enerji depolama tekniklerinde malzemenin sıcaklık değişimi (*duyulur*), faz değişimi (*gizli*) veya termo-kimyasal reaksiyonlar yardımıyla ısıl enerjinin depolanması veya geri kullanımı sağlanmaktadır. Duyulur ısıl enerji depolama tekniğinde katı veya sıvı depolama ortamının sıcaklığı değiştirilerek düşük veya yüksek sıcaklıktaki ısıl enerji, bir ortam içerisinde depolanmakta veya geri çekilmektedir. Gizli ısıl enerji depolama tekniğinde ise katı-sıvı (*sıvı-katı*) veya sıvı-gaz (*gaz-sıvı*) faz değişim işlemleri sırasında açığa çıkan faz değişim enerjisinden (*gizli ısı*) yararlanılmaktadır. Termo-kimyasal depolama tekniğinde ise tersinir endotermik veya ekzotermik reaksiyonlar yardımıyla yüksek miktardaki ısıl enerji uzun süreli bekleme gerektiren ısıl enerji depolama uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Şekil 10'da farklı tip ısıl enerji depolama tekniğine ait birim hacimdeki depolama kapasitesi örneklenmiştir.



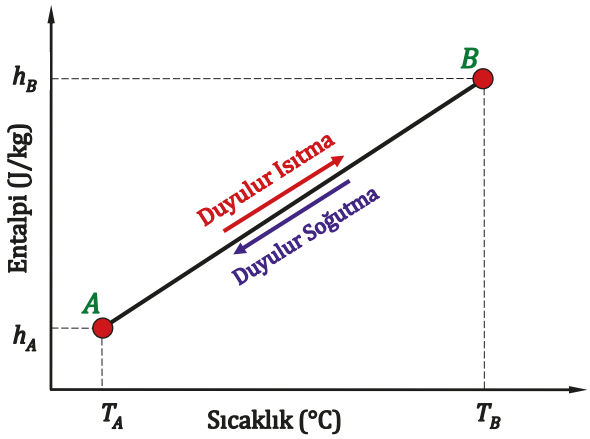
Şekil 10. *Depolama ortamına göre farklı tip ısıl enerji depolama yöntemlerinin depolama yoğunlukları ([17]'den uyarlanmıştır)*

Duyulur ısıl enerji depolama insanlık tarihi kadar eski bir depolama tekniği olup birim enerji başına maliyeti en düşük ısıl enerji depolama yöntemidir. Gizli ısıl enerji depolama sistemleri duyulur depolamaya göre birim hacimde daha yüksek enerji depolama imkânı sunmaktadır. Termo-kimyasal ısıl enerji depolama tekniği ise görece yeni bir uygulama olduğundan enerji depolama yoğunluğu yüksek olmasına rağmen yüksek maliyeti nedeniyle ticari olarak yaygınlaşmamıştır. Tablo 4'te farklı tip ısıl enerji depolama teknikleri birim depolama kapasitesi ve maliyet açısından mukayese edilmektedir.

Tablo 4. *Farklı tip ısıl enerji depolama tekniklerinin karşılaştırılması ([17]'den uyarlanmıştır)*

Isıl Enerji Depolama Yöntemi	Kapasite (kWh/ton)	Isıl Güç (MW)	Maliyet (€/kWh)
Duyulur	10 – 50	50 – 90	0,1 – 10
Gizli	50 – 150	75 – 90	10 – 50
Termo-kimyasal	120 – 250	75 – 100	8 – 100

Isıtma ve soğutma uygulamalarında genellikle *duyulur* ve *gizli* ısıl *enerji depolama* yönteminden biri tercih edilmektedir. Duyulur ısıl enerji depolama yönteminde depolama ortamının sıcaklık değişimiyle ortam içerisinde enerjinin saklanması veya geri kullanılması sağlanmaktadır. Bu yönteme ilişkin sıcaklık-entalpi ilişkisi Şekil 11'de gösterilmektedir. Böylesi bir uygulamada kullanılacak malzemelerin yüksek hacimsel ısı kapasitesine ($C = \rho c$) sahip olması beklenmektedir. Bu yöntemde yüksek miktarda ısıl enerjinin depolanabilmesi için depolama malzemesinin kütlesinin de arttırılması gerektiğinden sınırlı hacimlerde uygulanabilirliği azalmaktadır. Duyulur ısıl enerji depolama sistemlerinde ısı transfer hızına etki eden en önemli parametreler *(i)* depolama malzemesi ve iş akışkanı arasındaki ısı transfer mekanizmasının etkinliği ve *(ii)* depolama malzemesinin ısıl yayınım katsayısıdır. Duyulur ısıl enerji depolama sistemlerinde sıvı (eriyik tuz, su veya yağ) veya katı (taş, kaya veya metal) fazda depolama malzemeleri kullanılmaktadır. Duyulur ısıl enerji depolama uygulamalarında kullanılabilecek farklı tip depolama malzemeleri için ısıl özellikler Tablo 5'te listelenmektedir.

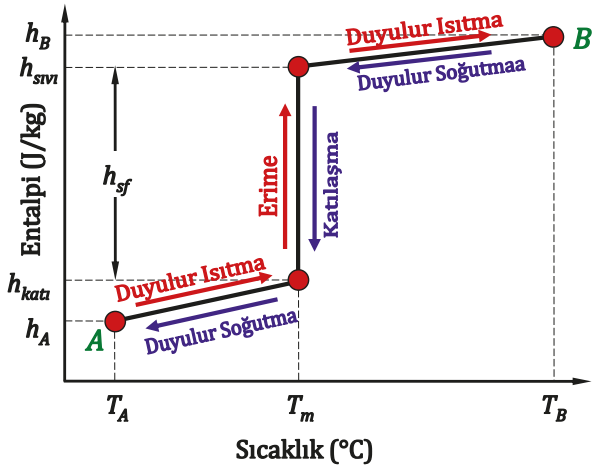


***Şekil 11**. Duyulur ısıl enerji depolama yöntemi için sıcaklık-entalpi değişimi*

***Tablo 5.** Duyulur ısıl enerji depolama malzemelerinin ısıl özellikleri ([17]'den uyarlanmıştır)*

Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül Isı (kg/m^3)	Hacimsel Isı Kapasitesi (10^6 J/m^3K)
Kil	1458	879	1,28
Tuğla	1800	837	1,51
Kumtaşı	2200	712	1,57
Tahta	700	2390	1,67
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	465	3,68
Manyetit	5177	752	3,89
Su	988	4182	4,17

Sınırlı bir hacimde yüksek miktarda ısıl enerjinin depolanması (*veya geri kullanımı*) gizli ısıl enerji depolama yöntemiyle sağlanabilir. Gizli ısıl enerji depolama yönteminde, depolama malzemesinin sıcaklık değişiminden ziyade, malzemenin katı/sıvı faz değişimi entalpisinden faydalanarak malzeme içerisinde yüksek miktarda enerji değişimi sağlanmaktadır. Bu yönteme ilişkin sıcaklık entalpi ilişkisi ise Şekil 12'de gösterilmektedir. Bu yöntemde, depolanacak (*veya geri kullanılacak*) enerji miktarı malzemenin kütlesi ve faz değişim gizli ısısıyla orantılıdır. Faz değişim gizli ısısı (h_{sf}) yüksek malzemelerin bu sistemler içerisinde kullanılmasıyla duyulur enerji depolama yöntemine kıyasla birim hacim başına daha yüksek miktarda ısıl enerjinin depolanması mümkün olmaktadır. Gizli ısıl enerji depolama sistemlerinde kullanılan malzemelerin faz değiştirmesinden dolayı bu malzemeler faz değişim malzemesi (FDM) olarak isimlendirilir. Malzemelerin faz değişimi gizli ısısı genellikle özgül ısı değerlerine göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, duyulur depolama yöntemine kıyasla çok küçük sıcaklık değişimleri için gizli ısıl enerji depolama yöntemlerinde daha yüksek ısıl enerji sistem içerisinde depolanabilir. Örnek vermek gerekirse, 1 kg buzun eritilmesi için gereken ısıl enerji, aynı miktarda suyun 80°C ısıtılmasına eşittir.

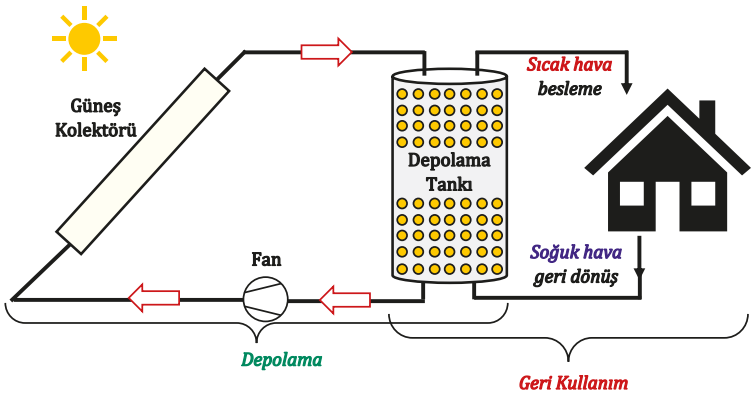


Şekil 12. *Gizli ısıl enerji depolama yöntemleri için sıcaklık-entalpi değişimi*

Gizli ısıl enerji depolama (GIED) sisteminin çalışma performansını belirleyen en önemli parametreler ısı değiştiricinin tasarımı, faz değişim malzemesinin (FDM) ısıl özelikleri ve sistemin çalışma koşullarıdır. Her ne kadar ısı değiştiricisinin tasarım ve çalışma koşulları gizli ısıl enerji depolama sisteminden elde edilecek ısı transfer hızını ve depolama (*veya geri kullanım*) süresini önemli ölçüde etkilese de sistem içerisinde kullanılacak FDM'nin faz değişim sıcaklığı, faz değişim gizli ısısı ve malzemenin ısıl özelikleri sistem tasarımında birincil öneme sahiptir.

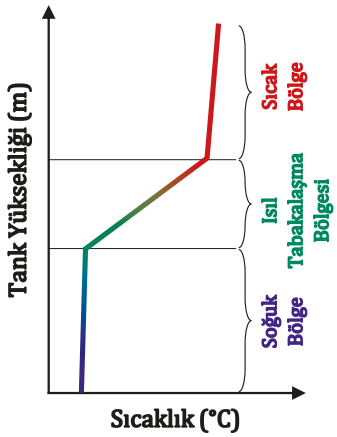
2.2.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama Uygulamaları

Katı depolama malzemesi içeren duyulur ısıl enerji depolama sistemleri güneş enerjisi destekli evsel veya sera ısıtma sistemleri veya güç üretim sistemlerinde uygulanmaktadır. Şekil 13'te güneş destekli ısıtma sisteminde kullanılan ısıl enerji depolama tankı şematik olarak gösterilmektedir. Güneş enerjisinin aktif olduğu zaman diliminde güneş kolektöründe sıcaklığı artan iş akışkanı katı depolama malzemesinin çevresinden geçerek malzemenin sıcaklığını arttırmaktadır. Isıtma talebinin yüksek olduğu akşam saatlerinde ise yük tarafı aktif hale getirilmekte ve tank içerisindeki yüksek sıcaklıktaki malzeme üzerinden soğuk akışkan geçirilerek depolanan ısıl enerji geri kullanılmaktadır.



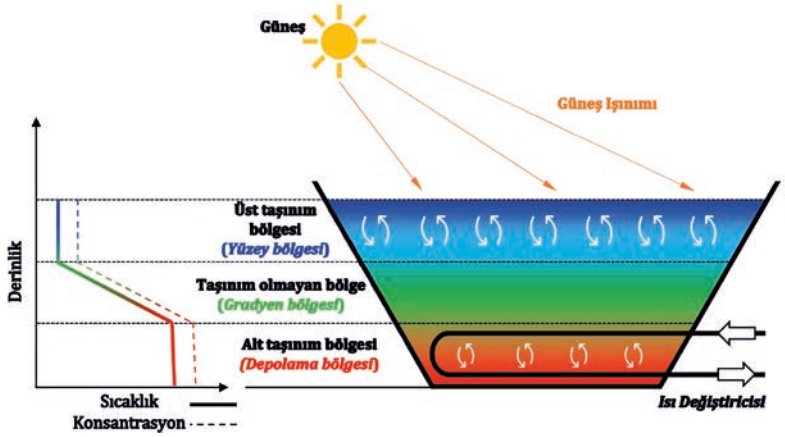
Şekil 13. Güneş destekli ısıtma uygulaması – Akışkan yatak ([17]'den uyarlanmıştır)

Depolama malzemesinin sıvı olması durumunda depolama tankı içerisindeki sıcak ve soğuk bölgelerin birbirinden ayrı tutulması gerekmektedir. Tank içerisinde sıcak ve soğuk bölgelerin karışmaması için akışkanın tanka giriş ve çıkış yapacağı konumlar depolama ve geri kullanım işlemleri için özel olarak belirlenmelidir. Şekil 14'te tank içerisindeki sıcak ve soğuk akışkan bölgeleri ile bu bölgeleri birbirinden ayıran ısıl tabakalaşma bölgesi şematik olarak gösterilmektedir. Tank içerisindeki ısıl tabakalaşma bölgesinin büyüklüğü depolanan enerji miktarını belirlediğinden depolama veriminin iyileştirilmesi için dar bir tabakalaşma kalınlığı tasarlanmalıdır.



Şekil 14. Sıvı tank içerisindeki ısıl tabakalaşma bölgesi

Sıvı fazda duyulur ısıl enerji depolamanın bir diğer uygulaması güneş havuzlarıdır. Güneş havuzlarında sıvı içerisinde depolanan ısıl enerjinin dış ortama kaybedilmemesi için su içerisinde ısıl tabakalar oluşturulmaktadır. Şekil 15'te su içerisindeki tuz konsantrasyonunun, tank derinliği boyunca değiştirilmesiyle elde edilen ısıl tabakalar şematik olarak gösterilmiştir. Güneş havuzunun tabanı yüzeye etki eden güneş ışınımını soğurmak için özel bir malzeme ile kaplanmaktadır. Havuzun alt bölgesindeki yüksek tuz konsantrasyonu nedeniyle bu bölgedeki sıcak akışkanın doğal taşınım ile hareketi sınırlandırılmaktadır. Konsantrasyonun düşük olduğu havuzun üst kısmında ise doğal taşınım hareketi etkindir. Havuzun üst ve alt kısımları arasındaki durgun bölgede ise ısıl tabakalaşma oluşmaktadır. Isıl tabakalaşma bölgesi havuzun sıcak tabanı ile soğuk yüzeyi arasında bir tampon oluşturarak tabanda depolanan ısıl enerjinin muhafaza edilmesini sağlamaktadır. Havuz tabanında depolanan ısıl enerji bir ısı değiştiricisi yardımıyla sistemden çekilerek farklı tip ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır.



Şekil 15. *Güneş havuzu uygulaması ([17]'den uyarlanmıştır)*

Ülkemizde güneş havuzu uygulamalarının deneysel ve teorik olarak incelendiği çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Çukurova Üniversitesi kampüsünde küçük ve orta ölçekli güneş havuzları toprak altı ve toprak üstü olarak inşa edilmiş ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler analiz edilerek güneş havuzlarının performansı araştırılmıştır [20]. Bu çalışmalarda farklı güneş havuzu sistemlerine ait enerji ve ekserji analizlerinin yanı sıra maliyet değerlendirmeleri de yapılmıştır. Geliştirilen sistemlerde kullanılan malzemeler tamamen yerli olup dışa bağımlılık gerektirmezler. Bu nedenle düşük maliyetli ve geri ödeme süreleri oldukça kısa olan uygulamalardır.

Güneş havuzları silindir, dikdörtgen ve kesik koni biçiminde farklı geometrik şekillerde ve çelik, PVC veya beton gibi malzemeler kullanılarak imal edilmektedir. Dış duvarları uygun kalınlıkta ısı yalıtım malzemesiyle kaplanarak dış ortam ile ısı alışverişi asgari seviyeye düşürülmektedir. Güneş havuzlarının inşası, iki temel kısımdan oluşur. Bunlar dış ana gövde ve iç yapıdır. Dış ana gövdenin oluşturulmasında tercih edilen yöntem kurulum maliyetini doğrudan belirlemektedir. Dış ana gövde, toprak üstü ve toprak altı olarak inşa edilebilir (Şekil 16). Her iki durumda da dış ana gövde mutlaka yatılmalıdır. Aksi takdirde güneş havuzunun ısıl enerjiyi uzun süreli depolaması zorlaşmaktadır. Toprak üstü havuzlarda en iyi tercih yalıtımlı metal sac tipi güneş havuzlarıdır. Toprak altı güneş havuzları için ise en iyi tercih dış yalıtımlı beton güneş havuzlarıdır. Toprak altı güneş havuzları sağlam ve dayanıklıdır. PVC malzemeler kullanılarak da imal edilebilmektedir.



(a) *(b)*

Şekil 16. *Güneş havuzu örnekleri (a) Toprak üstü [20] ve (b) Toprak altı [21].*

Güneş havuzlarında kullanılan ısı değiştiricileri çeşitli tip ve özelliklerde imal edilir ve ısı depolama bölgesini tarayacak şekilde yerleştirilir. Isı değiştiricileri genellikle spiral ve serpantin şeklinde bakır, alüminyum ve PVC gibi malzemelerden imal edilirler. Spiral model ısı değiştiricilerinde genellikle bakır ve PVC borular kullanılmaktadır. Bakır boru ile yapılan ısı değiştiricileri ısı transferi açısından yüksek performansa sahip ancak maliyet açısından dezavantajlıdır. Tuz yoğunluk tabakalarının oluşturulması için, her bir tabaka için belirlenen yoğunluklarda tuzlu su hazırlanır. Bunun için su içine yeterli

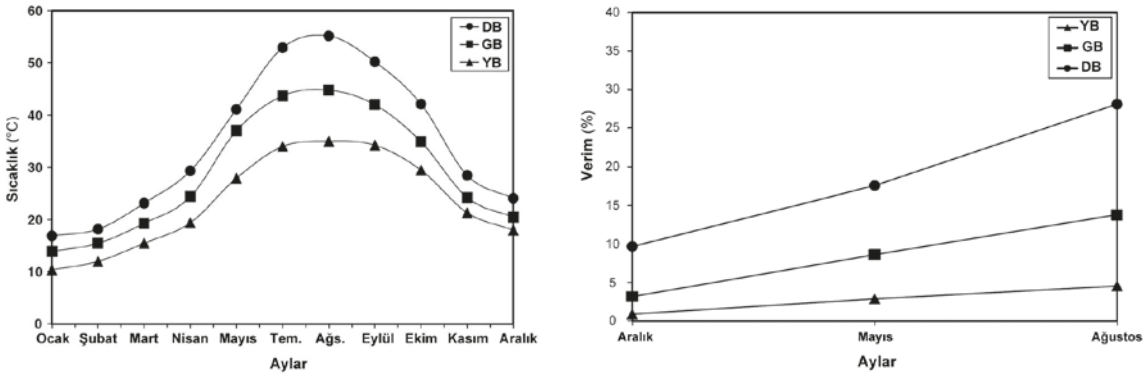
miktarda kaya tuzu katılır ve elektrikli mikser yardımıyla 30-40 dakika karıştırılır. Tuz tamamen çözünüp istenilen yoğunluklara geldikten sonra birkaç saat dinlendirilir. Tuzlu su, içindeki yabancı cisimler çökeldikten sonra tamamen berrak hale gelir ve tabakaları oluşturmak için havuz içerisine aktarılır. Şekil 17'de güneş havuzu oluşturma aşamaları gösterilmektedir.



(a) Spiral ısı değiştiricisi imalatı *(b) Toprak altına yerleştirilmesi* *(c) Tuzlu su tabakalarının oluşturulması*

Şekil 17. *Güneş havuzu oluşturma aşamaları [22]*

Karakilcik vd. [20] Çukurova Üniversitesi kampüsünde kurulan güneş havuzunda yıl boyu ölçümler alarak havuz katmanlarının ortalama sıcaklıklarındaki değişimi ve katmanlarda depolanan enerji miktarını belirlemiştir. Şekil 18'de dış ortama yakın yüzey bölgesi (YB), doğal taşınım hareketinin engellendiği gradyen bölgesi (GB) ve havuzun alt kısmındaki depolama bölgesi (DB) sıcaklık değişimleri ve enerji depolama verimleri sunulmaktadır. Kış aylarında depolama bölgesi sıcaklığı 20°C civarında iken yaz aylarında depolama sıcaklığı 50°C'nin üzerine çıkmaktadır. Depolama bölgesinin ısıl verimi ise kış aylarında %10 iken, yaz döneminde %25'in üzerine çıkmaktadır. Sistem veriminin iyileştirilmesi için ısı yalıtımının iyileştirilmesi, havuz içi gölgeleme etkilerinin azaltılması ve iç katman kalınlıklarının farklılaştırılması önerilmiştir [20].



(a) Katman sıcaklık değişimleri *(b) Katman ısıl verimlilikleri*

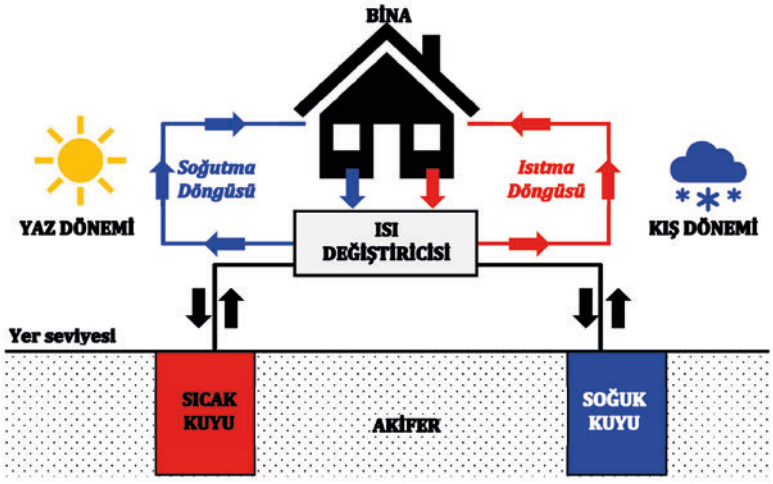
DB: Depolama Bölgesi, GB: Gradyen Bölgesi, YB: Yüzey Bölgesi

Şekil 18. *Güneş havuzu sisteminin yıllık performansı ([20]'den uyarlanmıştır)*

Yer altında ısıl enerji depolama uygulamaları günlük veya mevsimsel olarak yüksek miktarda duyulur enerjinin depolanmasına imkan veren sistemlerdir. Yer altında ısıl enerji depolamaları üç grupta değerlendirilmektedir [23]:

- Akifer ısıl enerji depolama (Aquifer Thermal Energy Storage-ATES)
- Kuyu içi ısıl enerji depolama (Borehole Thermal Energy Storage-BHTES)
- Yer altı mağara ısıl enerji depolama (Cavern TES)

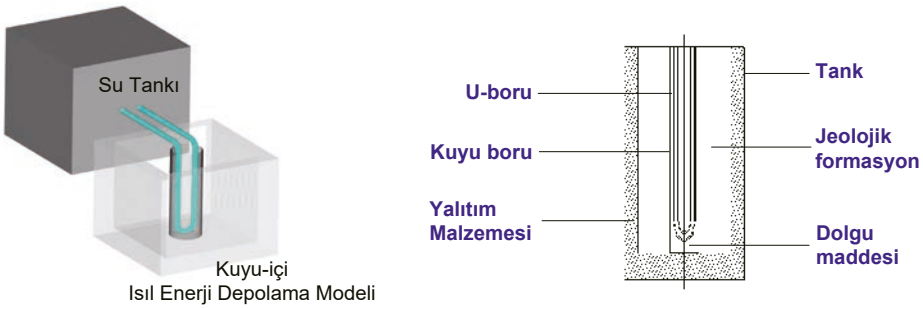
Akiferler çok büyük miktarda su içeren büyük yer altı hacimleridir. Akiferler içerisindeki su kütlesinin fazla olması depolanabilecek ısıl enerji miktarının artmasına imkân vermektedir. Ayrıca yer altı depolama hacimlerinin dış ortamlardan etkilenmemesi nedeniyle mevsimler arası ısıl enerji depolama mümkün olmaktadır. Şekil 19'da ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan iki kuyulu akifer ısıl enerji depolama uygulaması gösterilmektedir. Yaz döneminde güneş kolektörü veya atık ısı kaynağından elde edilen sıcak akışkan sıcak akifer kuyusuna aktarılır. Akifer içerisinde depolanan ısıl enerji kış aylarında geri çekilerek ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Benzer bir uygulama kışın soğuk suyun akifer kuyusunda depolanarak yazın soğutma amaçlı geri kullanılmasıyla elde edilebilmektedir.



Şekil 19. *Akifer ile mevsimsel ısıl enerji depolama uygulaması ([17]'den uyarlanmıştır)*

Ülkemizde akifer ısıl enerji depolama üzerine en kapsamlı çalışmalar Prof. Dr. Halime Paksoy ve ekibi tarafından Çukurova Üniversitesinde yürütülmektedir. Ülkemizde bu alanda ilk fizibilite çalışması Çukurova Üniversitesi Balcalı Hastanesi için yapılmıştır [24]. İlk akifer uygulaması 2001 yılında Mersin'de bir süpermarketin ısıtma/soğutma sistemine entegre edilmiştir [24]. İkinci uygulama ise Çukurova Üniversitesi araştırma çiftliğine entegre edilerek 360 m^2'lik bir seranın ısıtma/soğutma yükü akifer kuyularından sağlanmıştır [24]. Akifer uygulaması ile seranın %68 enerji tasarrufu sağladığı ve geri ödeme süresinin iki yıldan az olduğu belirtilmektedir [24].

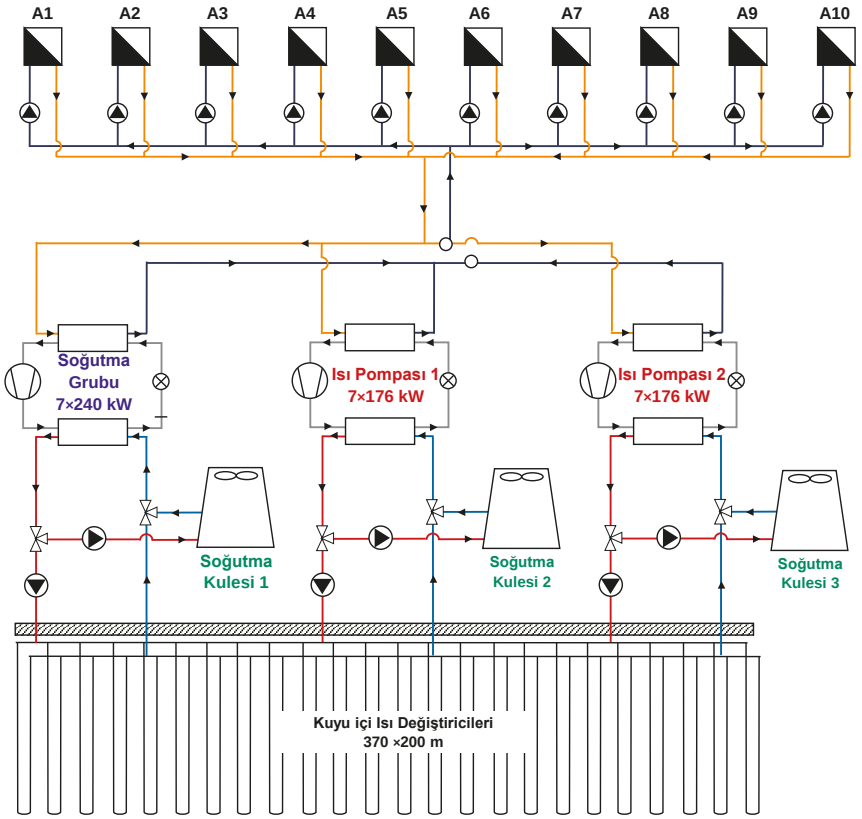
Kuyu içi ısıl enerji depolama uygulaması akiferden farklı olarak çalışma akışkanı ile yer altı jeolojik yapısı arasında ısı geçişini sağlayarak yüksek veya düşük sıcaklıklı ısı depolaması sağlamaktadır [25]. Açık ve kapalı döngü kuyu içi ısıl enerji depolama yöntemleri mevcut olmakla birlikte yaygın olarak U tipi boru kullanılan kapalı döngü kuyu içi ısıl enerji depolama sistemleri tercih edilmektedir. İş akışkanı yer altına belli aralıklarla konumlandırılan U-borulardan akarak yer altındaki jeolojik yapıyla ısı aktarımı sağlamaktadır. Yer altı U-boruları genellikle ısı pompaları veya soğutma gruplarına entegre bir şekilde çalışarak dış ortam sıcaklık değişimlerinden bağımsız bir şekilde sistemin yüksek COP değerinde çalışmasını sağlamaktadır. Ülkemizde kuyu içi ısıl enerji depolamasına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ülkemizde bu alanda en kapsamlı deneysel çalışmalar Prof. Dr. Halime Paksoy ve ekibi tarafından Çukurova Üniversitesinde yürütülmüştür. Yılmaz [25] farklı tip dolgu malzemeleri içeren U-borulu kuyu içi ısıl enerji depolama sisteminin depolama karakteristiğini deneysel olarak incelemiştir. Dolgu malzemesi olarak bazalt ve faz değişim malzemesi kullanılmıştır. Oluşturulan test düzeneğinin üç boyutlu görüntüsü ve bileşenleri Şekil 20'de sunulmaktadır [25]. Stritih vd. [26] ise kuyu içi boruların ısıl tepki deneylerinin veri indirgeme aşamalarını detaylı bir şekilde tanımlayarak Slovenya ve Türkiye'de belirlenen şehirler için mevsimsel yer altı ısıl enerji depolama karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir.



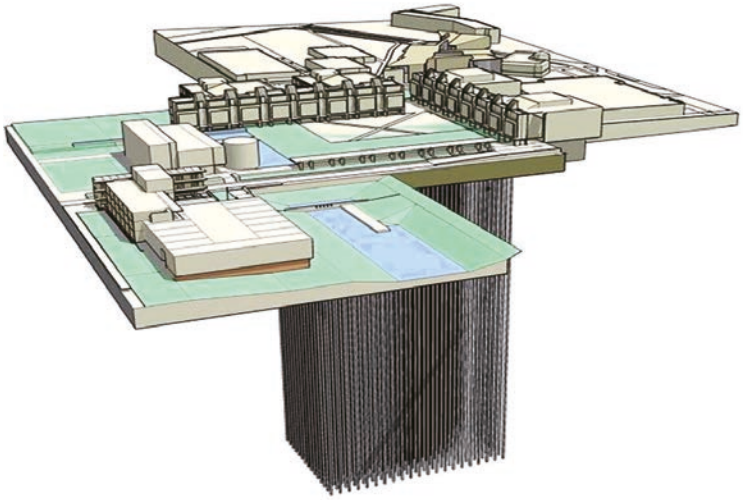
(a) *(b)*

Şekil 20. *Kuyu içi ısıl enerji depolama uygulaması (a) Deney düzeneği, (b) Deney düzeneği bileşenleri ([25]'ten uyarlanmıştır)*

Kanada'nın en büyük ve en derin kuyu içi ısıl enerji depolama uygulaması 2004 yılında University of Ontario Institute of Technology (UOIT)'de (Oshawa-Ontario) kurulmuştur [23]. Sistemde her biri 200 m derinlikte toplamda 370 adet kuyu içi ısı değiştiricisi bulunmaktadır. Kuyu içi ısı değiştiricileri yedi modül olarak kurulan soğutma grubuna ve yine yedişer modül olarak tasarlanan iki set ısı pompası grubuna bağlıdır. Şekil 21'de sistem bileşenlerinin şematik gösterimi verilmektedir. Şekil 22'de ise UOIT kuyu içi ısıl enerji depolama kompleksinin üç boyutlu tasarım görseli sunulmaktadır. Kampüs içerisindeki 10 farklı binanın ısıtma ve soğutma talebini karşılayacak şekilde tasarlanan bu sistemin ortalama geri ödeme süresi HVAC sistemi için 3-6 yıl, kuyu sistemi için ise 7,5 yıl olarak öngörülmüştür [23]. Sistem sayesinde yıllık bazda ısıtmada %40, soğutmada ise %16 tasarruf sağlanmaktadır. Sistemden sağlanan direkt faydanın yanı sıra, düşük kapasitede kurulan soğutma kulesi ve kazan sistemi hem ilk yatırımda avantaj sağlamış hem de yıllık bazda tüketilen su miktarı ve sistemde kullanılan toplam kimyasal miktarı azaldığı için dolaylı fayda sağlanmıştır.



Şekil 21. *UOIT kuyu içi ısıl enerji depolama sistemi şematik gösterimi ([17]'den uyarlanmıştır)*



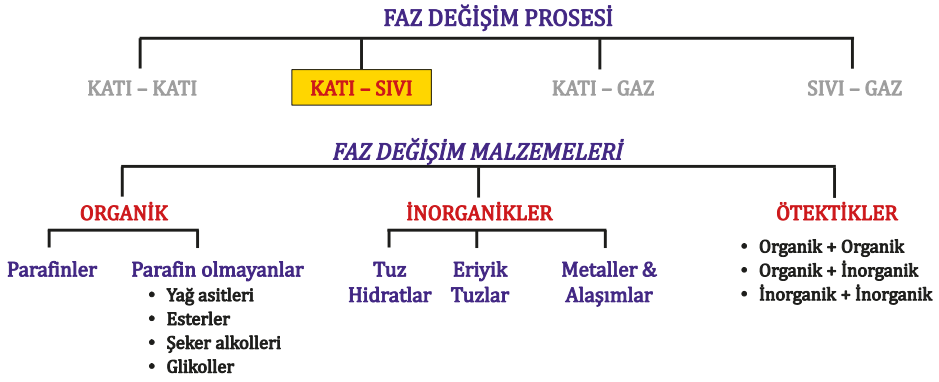
Şekil 22. UOIT kuyu içi ısıl enerji depolama sistemi [13]

2.2.2. Faz Değişim Malzemeleri

Faz değişim malzemeli (FDM) ısıl enerji depolama sistemleri düşük hacimde yüksek ısıl enerji depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle ısıtma/soğutma veya güç üretim sistemlerinde uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra, sahip oldukları yüksek ısı sığası nedeniyle dar bir sıcaklık aralığında uzun süreli çalışma sağlayabildiğinden, düşük sıcaklık dalgalanmalarına izin verilen ısıl kontrol uygulamalarında da yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 23'te faz değişim malzemeleri sınıflandırılmaktadır. Yüksek veya düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılacak faz değişim malzemelerinin sahip olması gereken belli başlı özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

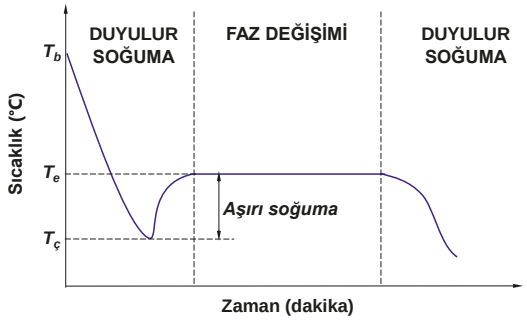
- Yüksek faz değişim entalpisine sahip olması,
- Aşırı soğuma (*subcooling*) derecesinin düşük olması (*erime ve katılaşma sıcaklıklarının birbirine eşit olması*),
- Faz ayrılmasının bulunmaması,
- Kimyasal olarak kararlı olması ve bulunduğu kapsül veya ısı değiştiricisiyle reaksiyona girmemesi,
- Aşındırıcı özelliğinin bulunmaması,
- Zehirli veya yanıcı olmaması,
- Hal değişimi esnasında hacim değişim miktarının az olması.

Yukarıda sıralanan maddeler göz önünde bulundurulduğunda faz değişim malzemelerinde karşılaşılan en temel iki sorun *aşırı soğuma etkisi* ve *faz ayrılmasıdır*. Bu kısımda her iki etkinin fiziksel mekanizması kısaca açıklanmıştır.



Şekil 23. Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması

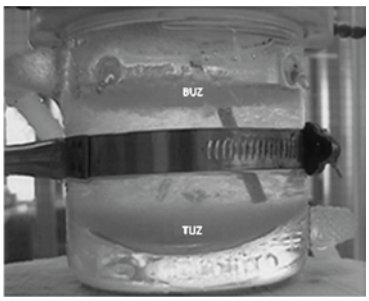
Aşırı Soğuma: Aşırı soğuma, sıvı haldeki malzemenin erime noktasına ulaşmasına rağmen katılaşmaya (*çekirdeklenmeye*) başlamaması sorunudur. Şekil 24'te aşırı soğutma etkisi sıcaklık-zaman diyagramı üzerinde belirtilmiştir. T_b başlangıç sıcaklığındaki malzeme duyulur soğuma işlemi sonunda erime sıcaklığına (T_e) ulaşmasına rağmen malzeme içerisinde çekirdeklenme gözlenmez. Soğutma işlemi sürdürülerek malzeme sıcaklığı $T_ç$ ile gösterilen kritik sıcaklığa kadar ulaştığında malzemede çekirdeklenme oluşur. Çekirdeklenmenin ilk oluştuğu sıcaklık çekirdeklenme sıcaklığı ($T_ç$) olarak tanımlanmaktadır. Çekirdeklenmenin başlamasıyla birlikte malzemenin sıcaklığı aniden yükselerek erime sıcaklığına ulaşır ve faz değişim işlemi bu sıcaklıkta meydana gelir. Erime sıcaklığıyla (T_e) çekirdeklenmenin oluştuğu sıcaklık ($T_ç$) arasındaki fark, aşırı soğuma derecesi ($\Delta T = T_e - T_ç$) olarak tanımlanmaktadır. Bu etki FDM'lerin çalışma sıcaklık aralığını genişlettiği için istenmeyen bir durumdur.



Şekil 24. *Aşırı soğuma etkisi ([17]'ten uyarlanmıştır)*

Sıvı haldeki bir malzemenin faz değişim sıcaklığına kadar soğumasına rağmen malzeme içerisinde katı kristallerinin oluşmaması, aşırı soğumaya neden olan temel etkendir. Malzemenin yapısal özelliklerine bağlı olarak, katılaşma sırasında meydana gelen kristal oluşumu sırasında açığa çıkması gereken ısıl enerji, yüzey enerjisinden düşük olabilmekte ve bu durumda malzemede katılaşma işlemi tam olarak erime sıcaklığında meydana gelmemektedir [27]. Aşırı soğuma etkisinin gözlemlendiği malzemelerde katılaşma sırasında meydana gelen kristallerin boyutları çok küçüktür ve bu nedenle katı kristallerinin oluşması için erime noktasından çok daha düşük sıcaklık değerlerine inilmesi gerekmektedir. Aşırı soğuma probleminin ortadan kaldırılması için tercih edilen en yaygın iki yöntem: *(i) çekirdeklendirme ajanı kullanımı* ve *(ii) Cold-finger* uygulamasıdır [27]. FDM içerisine karıştırılan çekirdeklendirme ajanları, kristallerin oluşmasını ve büyümesini hızlandırarak aşırı soğuma derecesini önemli miktarda azaltılabilmektedir. *"Cold-Finger"* yönteminde ise FDM tankı içerisinde sürekli olarak katı FDM bulunmasını sağlayacak bir tasarım yapılmaktadır. Örnek olarak, yüksek sıcaklıkta faz değiştiren bir FDM uygulamasında, tankın bir bölümünde kötü izolasyon yapılarak malzemenin o bölgede sürekli olarak katı fazda kalması sağlanmaktadır.

Faz Ayrılması: Faz ayrılması, iki veya daha fazla bileşenden oluşan faz değişim malzemelerinde karşılaşılan ve istenmeyen bir durumdur. Basitçe tanımlamak gerekirse, malzemeyi oluşturan bileşenlerin karışımdan ayrılıp ayrı birer faz oluşturmaları durumudur. Örnek olarak Şekil 25'te tuz ve su bileşiminden oluşan faz değişim malzemesine ait faz ayrılması durumu verilmiştir. Burada yoğunluğu yüksek olan tuz, karışımdan ayrılarak kabın dibine çökelmiştir.



Şekil 25. *Faz ayrılması ([27]'den uyarlanmıştır)*

Saf bir malzemenin sıcaklığı erime noktasının altına soğutulup katılaşma işlemi tamamlandığında, faz değişim entalpisi ve erime sıcaklığı gibi fiziksel özellikleri değişmez. Bu tip malzemeler, eşleşik eriyen malzemeler olarak adlandırılır [27]. Malzeme birden fazla bileşen içerdiğinde ise elde edilen karışımın faz değişim davranışı daha farklı olmaktadır. Örneğin %10 tuz ve %90 su içeren bir çözelti -4°C üstündeki sıcaklıklarda homojen bir sıvı iken, -4°C'nin altına soğutulduğunda, karışım içerisindeki su donar ve çökelir. Bu olaya *faz ayrılması* denir. Birden çok bileşen içeren karışımların faz ayrılması olmaksızın hal değiştirebilmeleri için, her bileşenin aynı anda hal değiştirmesi gerekmektedir. Bu da ancak ötektik nokta üzerinde olabilir. Ötektik noktadaki karışımlara ötektik çözelti adı verilmektedir. Ötektik noktada karışımdaki bileşenler tam olarak aynı anda hal değiştirdiklerinden birbirlerinden ayrılmazlar dolayısıyla karışımın ısıl özellikleri de değişmez. Aynı saf malzemelerdeki gibi eşleşik bir şekilde hal değiştirirler. 0°C altında kullanılan FDM'lerin ötektik tuz su çözeltileri arasından seçilmesinin nedeni de budur.

Faz ayrılmasının önüne geçebilmek için "*yapay karıştırma*" yöntemi kullanılabilir [27]. Faz ayrılması ortaya çıkmaya başladıktan sonra karışım basit olarak karıştırılmaktadır. Bu yöntem, ekstra ekipman ihtiyacı doğuracağından pek çok uygulama için uygun değildir. Bir diğer yöntem ise, karışıma ekstra su veya seyreltilmiş bir karışım eklemek şeklindedir. Bu yöntemde, bir önceki yöntemdeki gibi ekipman ihtiyacının yanı sıra, karışıma ekstra su eklenmesinden dolayı karışımın ısı depolama kapasitesinin de azalması söz konusu olabilir. Faz ayrılması sorununu önlemek için kullanılabilecek en etkin yöntem malzemedeki bileşenlerin ayrılabileceği mesafeyi sınırlamak şeklindedir. Malzemeyi genişliği birkaç milimetreyi geçmeyen küçük kaplara yerleştirmek, faz ayrılmasını bir miktar engelleyebilir ancak bu yeterli olmayabilir. Malzemedeki bileşenlerin ayrılabileceği mesafeyi mikroskobik boyutlara indirebilmek için *jelleştirme* yöntemi uygulanır [27]. Jelleştirme ile aynı etki, malzemeyi mikro – gözenekli bir yapı içeresine enjekte etmekle de sağlanabilir. Faz ayrılması için önerilebilecek bir diğer yöntem ise, *kalınlaştırma* olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde, malzeme içerisine bir başka malzeme eklenerek karışımın viskozitesinin arttırılması amaçlanır. Yüksek viskozite, malzemedeki bileşenlerin birbirlerinden faz değişimi tamamlanana kadar fazla uzaklaşamamasını sağlar.

Soğutma sistemlerinin (*evsel veya ticari*) yaygınlaşmasıyla birlikte özellikle yaz aylarında ve öğle saatleri gibi sıcaklığın yüksek olduğu zaman aralıklarında enerji talebi çok ciddi değerlere yükselmektedir. Enerji talebinde meydana gelen bu artışın çözümü için ilk akla gelen öneriler *(i)* enerji üretimi için yatırımların ve kapasitelerin arttırılması veya *(ii)* mevcut enerji üretim ve aktarım sistemlerinin teknolojisinin yenilenerek verimliliğin iyileştirilmesi olabilir. Artan enerji talebini karşılamak için aynı oranda yüksek kapasiteli sistemlerin oluşturulması hem çok yüksek maliyet getirmekte hem de bu sistemlerde kullanılan yakıtların fosil bazlı olmasından dolayı sınırlı bir gelecek için çözüm sağlamaktadır. Bu nedenle ilave kapasite artışına ihtiyaç duymadan mevcut sistemlerin verimliliğinin arttırılması ve kullanım stratejilerinin gözden geçirilmesi yoluyla kapasite artışının dengelenmesi düşünülmektedir. Soğutma yükünün talep edildiği gün içi saatlerinde enerji maliyetlerinin çok yüksek olmasından dolayı, enerji talebinin düşük ve maliyetinin ucuz olduğu zaman dilimlerinde (*gece*) soğu enerjisinin depolanması ve depolanan bu enerjinin gün içinde kullanılmasıyla enerjinin daha verimli kullanılması sağlanabilir. 0°C ve altındaki uygulamalar için kullanılan faz değişim malzemeleri Tablo 6'da verilmektedir. Özellikle -10°C ve altındaki sıcaklıklar için kullanılabilecek en uygun FDM tipinin ötektik su – tuz karışımları olduğu görülmektedir. Isıtma sistemlerinde ise orta ve yüksek sıcaklıkta faz değiştiren malzemeler kullanılmaktadır. Güneş kolektörüyle birlikte kullanılan FDM'li ısıl enerji depolama tankı, gün içerisindeki ısıl enerjinin yüksek sıcaklıkta depolanmasına izin vermektedir. Güneş enerjisinin aktif olmadığı zaman diliminde FDM içerisinde depolanan ısıl enerji geri kullanılarak ısıtma maliyetleri önemli miktarda azaltılabilmektedir. Isıtma uygulamalarında tercih edilen FDM tipleri ve ısıl özellikleri Tablo 7'de verilmektedir.

2.2.3. FDM'li Enerji Depolama Sistemlerinin Matematiksel Modellenmesi

Faz değişimli gizli ısıl enerji depolama sisteminin iyi bir şekilde tasarlanabilmesi için faz değişim malzemesiyle birlikte sistemi uygun sınır koşulları altında ele almak gerekmektedir. Ayrıca, sistemdeki ısı

transfer hızının zamana ve konuma bağlı değişimiyle birlikte sistemdeki FDM'nin erime/donma süreleri iyi bir şekilde öngörülmelidir. Katılaşma veya erime prosesini içeren zamana bağlı bir ısı transferi problemi esasen hareketli sınır problemidir. Bu nedenle faz değişim problemleri doğrusal olmayan özellik taşımaktadır ve bir boyutlu analitik veya yarı analitik çözümler sadece sınırlı sayıda basitleştirilmiş sınır koşulları için elde edilmiştir [28]. Bazı araştırmacılar analitik çözüm yöntemleri kullanarak iki boyutlu faz değişim problemlerine ait çözümler geliştirmişlerdir [29,30]. Fakat bu çalışmalar basitleştirilmiş geometriler için ve indirgenmiş sınır koşulları için gerçekleştirilmiştir. Genel olarak analitik yöntemler iki ve üç boyutlu problemler için uygulanamamaktadır. Bu nedenle iki veya üç boyutlu karmaşık geometrilerdeki faz değişimi veya doğal taşınım etkili faz değişimi problemlerinin çözümünde analitik yöntemler kullanılamadığı için sayısal yöntemler uygulanarak yaklaşık çözüme ulaşmak gereklidir.

Tablo 6. *0°C ve altı sıcaklıklar için kullanılan faz değişim malzemeleri ([17]'den uyarlanmıştır)*

Karışım	Malzeme Tipi	Faz Değişim Sıcaklığı (°C)	Faz Değişim Gizli Isısı (kJ/kg)
%24,8 HCl	Ötektik su – tuz karışımı	-86	73,77 (kJ/mol)
%24 LiCl	Ötektik su – tuz karışımı	-67	36,26 (kJ/mol)
%30,5 $CaCl_2$	Ötektik su – tuz karışımı	-49,5	76,81 (kJ/mol)
%21,01 $MgCl_2$	Ötektik su – tuz karışımı	-33,5	36,30 (kJ/mol)
%30,5 $Al(NO_3)_3$	Ötektik su – tuz karışımı	-30,6	131
%27,9 $LiSO_4$	Ötektik su – tuz karışımı	-23	26,10 (kJ/mol)
%22,4 NaCl	Ötektik su – tuz karışımı	-21,2	222
%23,3 NaCl	Ötektik su – tuz karışımı	-21,2	233
%19,7 KCl	Ötektik su – tuz karışımı	-10,6	18,43 (kJ/mol)
Dietilen glikol	Organik	-10	247
Dodekan	Organik	-9,6	216
%22,1 $BaCl_2$	Ötektik su – tuz karışımı	-7,7	10,2 (kJ/mol)
Trietilen glikol	Organik	-6	247
%18,63 $MgSO_4$	Ötektik su – tuz karışımı	-4,8	84,96 (kJ/mol)
Tetradekan+ Oktadekan	Ötektik organik	-4,02	227,52
%6,49 $KsSO_4$	Ötektik su – tuz karışımı	-1,55	26,88 (kJ/mol)
%4,03 $NaSO_4$	Ötektik su – tuz karışımı	-1,2	1,07 (kJ/mol)
Su	-	0	333,4

Katı-sıvı faz değişimini içeren ısı transferi problemlerinin sayısal çözümünde tercih edilen yöntemler şu şekildedir:

- Entalpi metodu,
- Isı kapasitesi metodu,
- Sıcaklık dönüşüm metodu

Sıralanan bu yöntemlere ait temel denklemler ve uygulamada öne çıkan avantajlar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmaktadır.

Entalpi Metodu: Entalpi metodu [31] hem iletim hem de taşınım içeren faz değişim problemlerinin çözümünde uygulanan en yaygın yöntemdir. Entalpi metodunun en büyük avantajı esnek olması ve faz değişiminin tek bir sıcaklıkta (T_m) ya da belli bir sıcaklık aralığında ($T_m - \Delta T$ ile $T_m + \Delta T$) gerçekleşmesi durumunda kullanılabilmesidir. Bu yöntemde sabit ağ yapısı kullanıldığından hesaplama açısından ko-

laylık sağlamaktadır. Entalpi metodunda gizli ısı ve duyulur ısı terimleri toplam entalpi teriminin içinde birleştirilmiştir. Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu ısı iletimi denklemi entalpi cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

burada $H\,(=h+h_{sf})$ toplam entalpiyi (*gizli ve duyulur toplamı*) ifade etmektedir. Voller ve Prakash [31] malzemenin gizli ısı değerini sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak ifade etmiştir,

$$h_{sf} = f(T) \quad (2)$$

$f(T)$ fonksiyonu katı, sıvı ve ara faz bölgeleri için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$f(T) = \begin{cases} 0 & T < T_m - \delta T_m \\ L(1-F_s) & T_m - \delta T_m \le T \le T_m + \delta T_m \\ L & T > T_m + \delta T_m \end{cases} \quad (3)$$

F_s terimi katı hacim oranı olarak ifade edilmektedir. Voller [32] entalpi hesaplamasında kullanılan old-source [33] ve new-source [34] gibi farklı metotları karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlara göre new-source yönteminin hem çözüm hızı hem de çözüm doğruluğu açısından en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

Tablo 7. *Isıtma uygulamalarında kullanılan faz değişim malzemeleri ([17]'den uyarlanmıştır)*

Malzeme	Tip	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)	Yoğunluk (kg/m³)
$CaCl_2{\cdot}6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	29	190,8	0,540 (s)	1562 (s)
62,5% trimetiletan + 37% su	Organik karışım	29,8	218	0,65	1120
$CaCl_2{\cdot}12H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	29,8	174	–	–
Ga	İnorganik ötektik	30	80,9	–	–
$LiNO_3{\cdot}3H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	30	296	–	–
$LiNO_3{\cdot}2H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	30	296	–	–
67% $Ca(NO_3)_2$ + 33% $Mg(NO_3)_2$	İnorganik karışım	30	136	–	1670
60% $Na(CH_3COO){\cdot}3H_2O$ + 40% $CO(NH_2)_2$	İnorganik ötektik	31,5	226	–	–
$Na_2SO_4{\cdot}3H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	32	251	–	–
$Na_2CO_3{\cdot}10H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	32–36	246,5	–	1442
Parafin C_{19}	Organik	32	222	–	–
$CaBr_2{\cdot}6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	34	115,5	–	1956 (s)
$LiBr_2{\cdot}2H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	34	124	–	–
$Na_2HPO_4{\cdot}12H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	35–44	280	0,514 (k)	1522 (k)
$Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	36	146,9	0,464 (s)	1828 (s)
Parafin C_{20}	Organik	36,7	246	–	–
$FeCl_3{\cdot}6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	37	223	–	–
$Mn(NO_3){\cdot}6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	37,1	115	–	1738 (s)
1-Tetradecanol	Organik	38	205	–	–
Heneicosane	Organik	40–40,2	155,5–213	–	778 (k)
Parafin C_{21}	Organik	40,2	200	–	–
50% $Na(CH_3COO){\cdot}3H_2O$ + 50% $HCONH_2$	Organik ötektik	40,5	255	–	–
$CoSO_4{\cdot}7H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	40,7	170	–	–
Fenol	Organik	41	120	–	–
Heptadecanone	Organik	41	201	–	–
1-Cyclodecyloctadecane	Organik	41	218	–	–
4-Heptadecanone	Organik	41	197	–	–

Tablo 7. (devam)

Malzeme	Tip	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)	Yoğunluk (kg/m³)
$MgI_2 \cdot 8H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	42	133	–	–
$CaI_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	42	162	–	–
$CaI_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	42	162	–	–
Parafin C_{16}–C_{28}	Organik	42–44	189	0,21	0,765 (s)
Parafin C_{22}	Organik	44	249	–	–
Docosane	Organik	44	196,5–252	–	–
$Mg(NO_3) \cdot 2H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	47	142	–	–
$Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	47	155	–	–
Parafin C_{23}	Organik	47,5	232	–	–
$Na_2SiO_3 \cdot 4H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	48	168	–	–
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	48	99	–	–
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	48	201	–	1600 (k)
3-Heptadecanone	Organik	48	218	–	–
2-Heptadecanone	Organik	48	218	–	–
Parafin C_{20}–C_{33}	Organik	48–50	189	0,21	0,769 (s)
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	48,5	202	–	–
9-Heptadecanone	Organik	51	213	–	–
$Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	51	104	–	–
61,5% $Mg(NO_3)_2$ + 38,5% NH_4NO_3	İnorganik karışım	52	125,5	0,494	1515
$FeCl_3 \cdot 2H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	56	90	–	–
Tristearin	Organik	56	191	–	–
Parafin C_{26}	Organik	56,3	256	–	–
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	57	169	–	–
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	58	151	–	–
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	58	178	–	–
$Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	58	226–264	0,63	1280 (s)
50% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 50% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik ötektik	58–59	132	0,510 (s)	1550 (s) 1630 (k)
62,5% $Mg(NO_3)_2$ + 37,5% NH_4NO_3	İnorganik karışım	58	267	0,63 (k)	1,45
58,7% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 41,3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik ötektik	59	132,2	0,510 (65 °C)	1550
Parafin C_{22}–C_{45}	Organik	58–60	189	0,21	0,795 (s)
Parafin C_{27}	Organik	58,8	236	–	–
80% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 20% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	İnorganik (tuz hidrat)	60	150	–	–

Isı Kapasitesi Metodu: Sabit bir sıcaklıkta (T_m) faz değiştiren FDM'nin entalpi değişimi ısı kapasitesi cinsinden tanımlanabilir. Isı kapasitesi metodunda erime ve katılaşma işlemlerinin tek bir sıcaklık noktası yerine $T_m - \delta T_m$ ile $T_m + \delta T_m$ gibi bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği kabul edilir. Isı kapasitesi metoduyla hesaplanan özgül ısı değerleri aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$c(T) = \begin{cases} c_s & T < T_m - \delta T_m \\ \dfrac{c_s + c_l}{2} + \dfrac{h_{sf}}{2\delta T_m} & T_m - \delta T_m \le T \le T_m + \delta T_m \\ c_l & T > T_m + \delta T_m \end{cases} \quad (4)$$

böylece faz değişimi sırasında açığa çıkan veya malzeme tarafından soğurulan enerji özgül ısı cinsinden ifade edilmiş olur. Al-Saadi ve Zhai [35] ısı kapasitesi metodunun başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için sıcaklık aralığının büyük seçilmemesini veya zaman adımının azaltılması gerektiğini belirtmiştir. Yüksek zaman adımı veya dar bir sıcaklık bandı için sayısal çözümde yakınsama problemi oluşabilmektedir. Morgan vd. [36] farklı parametreler için denemeler yaparak ısı kapasitesi yöntemiyle faz değişim problemlerinin çözümü için uygun stratejileri ortaya koymuştur.

Sıcaklık Dönüşüm Metodu: Sıcaklık dönüşüm modeli esasen ısı kapasitesi yönteminin bir benzeri olup, zaman adımı ve grid boyutu sınırlamalarını çözmek amacı ile geliştirilmiştir. Cao vd. [37] ve Cao ve Faghri [38] tarafından önerilen bu yöntemin en önemli avantajı, Denklem 1'de verilen enerji denkleminin tek bağımlı değişken olan sıcaklık cinsinden aşağıdaki gibi yazılmasıdır,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cT)=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\frac{\partial}{\partial t}(\rho s) \tag{5}$$

burada enerji denkleminin ayrıştırılmasında en kritik nokta kaynak teriminin "*s*" uygun bir şekilde hesaplanmasıdır. Cao ve Faghri [38] entalpinin sıcaklığa bağlı değişiminin doğrusal bir fonksiyon olduğunu kabul ederek üç farklı faz için kaynak terimini şu şekilde elde etmiştir,

$$s(T)=\begin{cases} c_s\left(\delta T_m-T_m\right) & T<T_m-\delta T_m \\ \dfrac{c_s+c_l}{2}\left(\delta T_m-T_m\right)+\dfrac{h_{sf}}{2}-\dfrac{h_{sf}T_m}{2\delta T_m} & T_m-\delta T_m\le T\le T_m+\delta T_m \\ c_s\delta T_m-c_lT_m+h_{sf} & T>T_m+\delta T_m \end{cases} \tag{6}$$

Faghri ve Zhang [39] ısı kapasitesi metodu ile sıcaklık dönüşüm metodu arasında bazı önemli farklar belirtmişlerdir. Isı kapasitesi metodunda gizli ısı enerjisi, ısı kapasitesine eklendiği için $\partial s/\partial t = 0$'dır. Özgül ısı *(c)* ise hem boyutsal değişkenlerden (x, y, z) hem de zamandan bağımsızdır. Sıcaklık dönüşüm yöntemi grid boyutu, zaman adımı ve faz değişim sıcaklık aralığı sınırlamalarını büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Entalpi yönteminde olduğu gibi sıcaklık dönüşüm yönteminde de faz değişim sıcaklığının belli bir aralıkta ya da tek bir noktada olması durumunda yöntem başarıyla uygulanabilmektedir. Bu metodun uygulanabilirliği Cao ve Faghri [38] ve Cao vd. [40] tarafından bir boyutlu ve iki boyutlu koordinat sistemlerindeki farklı tipte ısı transferi problemlerinde test etmişlerdir.

2.3. Elektrik ve Isıl Enerji Depolama

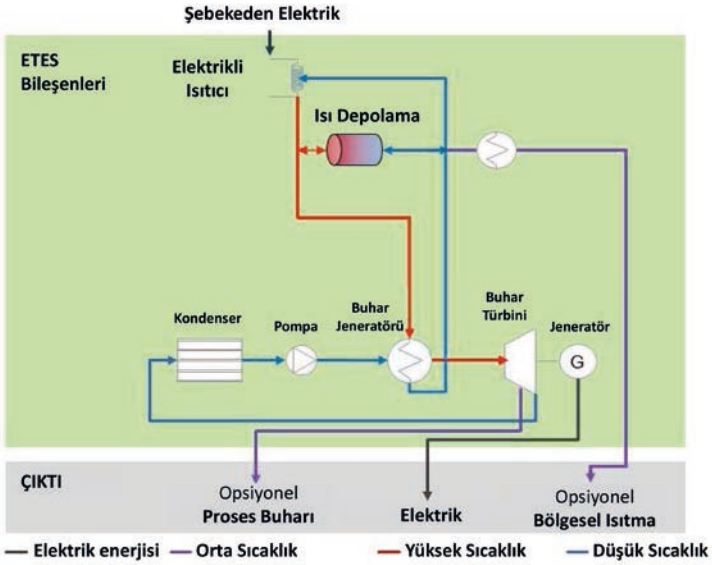
Elektrik ve Isıl Enerji Depolama (ETES), teknolojisinde rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisi (*veya doğrudan ısıl enerji*) ısıl olarak depolanmakta ve daha sonra elektrik üretimi amacıyla depolanan ısıl enerji geri kullanılmaktadır. Bu yöntemde temel olarak duyulur ısıl enerji depolama tekniği uygulanarak ısıl enerji volkanik taşlarda depolanmaktadır. Duyulur ısıl enerji depolama tekniğinin uygulanması rüzgâr destekli ETES'i tasarım konusunda sürdürülebilir ve maliyet açısından da erişilebilir kılmaktadır. Bağımsız ve modüler sistemler olmasından dolayı rüzgâr santrallerinin kurulu olduğu hemen hemen her yere inşa edilebilir ve GWh mertebesinde ısıl enerji depolamaya imkân sağlarlar.

Rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının arz dalgalanmasının yanı sıra, enerji talebindeki değişimlere de uyum sağlamak için esnekliğe ihtiyaç vardır. Talepten daha fazla arz olduğunda, örneğin göreceli olarak elektriğin ucuz olduğu gece saatlerinde rüzgâr santrallerinden üretilen elektrik veya rüzgârdan talep fazlası güç elde edilen dönemlerde üretilen fazla elektrik enerjisi talebin yüksek olduğu zaman geri kullanılmak üzere ısıl formda depolanabilir. Talep tekrar arzı aştığı anda depolama tesisleri depolanan ısıl enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek tekrar şebekeye aktarabilirler. Enerji depolama teknolojisi arz/talep dengesinin sağlanmasında önemli bir rol oynar ve sistemi sürekli, ekonomik ve güvenilir kılar.

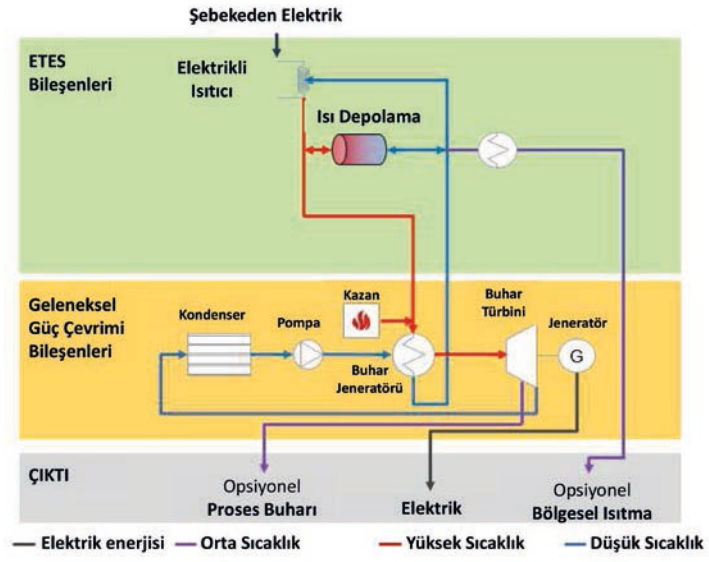
Günümüzde kullanılan enerji depolama sistemlerinden bataryalar yüksek depolama maliyetleri nedeniyle ancak küçük ve orta ölçekli depolama için kullanılmaktadır. Yüksek kapasiteye uygun pompalı-hidro (*pump-hydro*) enerji depolama teknolojisi ise coğrafi sebeplerden dolayı sınırlı kullanıma sahiptir. Bataryalar küçük ölçekli uygulamalarda avantaj sağlasa da büyük ölçekli enerji santralleri için ısıl enerji depolama sistemlerinin kullanımı ekonomik açıdan daha uygun bir seçenektir. Rüzgâr santrallerinden elde edilen elektrik enerjisinin depolanması noktasında yüksek verim ve düşük maliyetli bir enerji depolama çözümü olan ETES öne çıkmaktadır. ETES ile bir rüzgâr türbininin bir kombinasyonu, taban yük (*base-load*) kapasitesine sahip yenilenebilir bir enerji kaynağı için ideal kurulumdur. Çünkü ısının

verileceği ortamın enerjiyi depolama kapasitesi ayarlanabilir. ETES uygulamasında rüzgâr santralinden elde edilen elektrik enerjisi ile hava ısıtılır. Sıcak hava menfezler yardımıyla enerji deposuna aktarılarak ısı depolama tankı içerisindeki volkanik kayaların sıcaklığını 750°C'ye kadar yükseltir. Elektrik talebi arttığında (*peak-load*), ısı deposu içerisinde depolanan ısıl enerji güç üretim çevrimine aktarılarak elektrik enerjisinin elde edilmesi sağlanmaktadır.

ETES için 3 farklı uygulama seçeneği mevcuttur: *(i)* ETES-Base, *(ii)* ETES-Add ve *(iii)* ETES-Switch. ETES-Base ve ETES-Add uygulamalarının şematik diyagramları sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27'de gösterilmiştir. Her iki sistemde de ısı depolama prosesleri aynı olup geri kullanım modlarında farklılıklar bulunmaktadır. ETES-Base geri kullanım modunda ısı deposundan çekilen ısıl enerji geleneksel Brayton çevriminin buhar jeneratörünü beslemekte ve harici başka bir enerji girdisi olmadan buhar türbini üzerinden elektrik enerjisi üretilmektedir. ETES-Add sisteminin geri kullanım modunda ise ısı deposundan çekilen ısıl enerji klasik fosil-bazlı çalışan güç çevriminin kazanını beslemektedir. ETES-Add uygulamasında ısı deposu destek ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Her iki sistemde de türbin üzerinden elde edilen elektrik enerjisinin yanı sıra, opsiyonel olarak buhar temini veya bölgesel ısıtma sistemine ısıl güç aktarma seçenekleri vardır.



Şekil 26. *ETES-Base şematik gösterimi [41]*



Şekil 27. *ETES-Add şematik gösterimi [41]*

Elektrikli ısıl enerji depolama uygulaması 2012 yılından itibaren SIEMENS-GAMESA firması tarafından kapsamlı bir şekilde test edilmektedir [41]. İlk modeller 2012'de geliştirilmiş ve saha testleri 2014 yılında başlamıştır. Test sahası Şekil 28'de gösterilmiştir. Sistemin depolama kapasitesi 5 MWh olup geri kullanım durumunda 700 kW ısıl güç sağlamaktadır. Sistemin ısı depolama verimliliği ise %95 olarak belirlenmiştir.



Şekil 28. *ETES test sahası [41]*

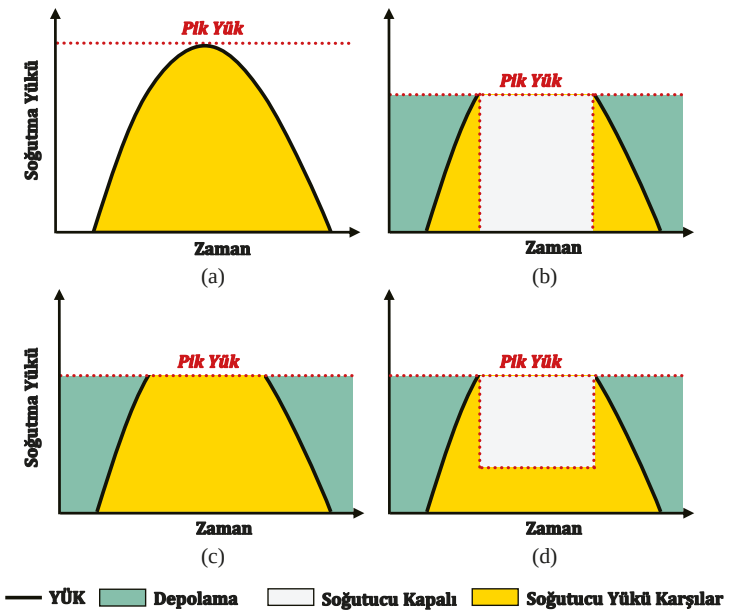
Büyük ölçekli pilot test sahası ise 2019 yılında Alman Ekonomi ve Enerji Bakanlığı finansmanıyla Hamburg, Almanya'da devreye alınmıştır. Şekil 29'da büyük ölçekli pilot saha gösterilmiştir. 130 MWh depolama kapasitesi 24 saatlik çalışma koşulları için tasarlanmıştır. Sistemde duyulur ısıl enerji depolama sağlamak için 1000 tondan fazla volkanik kaya, 600°C sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Toplam çevrim verimi %25 olarak belirlenmiştir. Geri kullanım modunda 65 bar basınçta ve 480°C sıcaklıkta buhar üretilmektedir. Türbin-jeneratör sistemi vasıtasıyla ısıl enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.



Şekil 29. *Büyük ölçekli pilot saha [41]*

2.4. Buzda Enerji Depolama (BED)

Buzda düşük sıcaklıkta ısıl enerji depolama ya da kısa adıyla buzda (*buzlu*) enerji depolama (BED); binaların soğutma yükünün, su/buz faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısıl enerjiden yararlanılarak daha sonra kullanmak üzere depolanmasıdır. BED sistemlerinin temel amacı kapalı hacimlerin serinletmesinde kullanılan klima sistemlerinin enerji tüketim maliyetlerini düşürmektir. BED sistemleri bu işlemi elektriğin üçlü tarifesinden yararlanarak gerçekleştirir. BED sistemlerinin çalışma prensibi diğer enerji depolama sistemleri ile benzer olup; enerji depolama, bekleme ve enerji geri kullanım periyotlarından oluşmaktadır. Enerji depolama periyodu elektrik birim fiyatının gün içerisinde en uygun olduğu gece tarifesinde gerçekleştirilir ve soğutma grupları vasıtasıyla buz üretilir. Gece tarifesinin tamamlanmasıyla, üretilen buzlar yalıtımlı bir depo içerisinde kullanılacağı zamana kadar bekletilir. Elektrik birim maliyetinin yüksek olduğu gündüz ve akşam tarifesinde ise üretilen buzlar kullanılarak binanın soğutulması gerçekleştirilir. Böylece bina iklimlendirme işlemi daha düşük maliyet ile gerçekleştirilir. Uygulamada farklı tip yük dengeleme stratejileri vardır. Şekil 30'da soğuk depolamanın uygulanmadığı durum ile farklı depolama stratejilerinin soğutma sistemine entegre edildiği durumlara ait yük-zaman değişimleri sunulmaktadır. Buzda soğu depolama, ucuz elektrik enerjisinin kullanımına imkân vermenin yanı sıra, pik yükün azaltılmasını da sağlamaktadır.



(a) Depolama yok, (b) Tam depolama, (c) Yük dengelemeli depolama (d) Talep dengelemeli depolama

Şekil 30. *Farklı soğuk depolama uygulamaları için gün içerisindeki yük değişimleri ([17]'den uyarlanmıştır)*

Buzda enerji depolama uygulamasının sağladığı belli başlı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

1. *Klima elektrik tüketim maliyetlerini önemli ölçüde düşürür:* Klima sistemlerinin elektrik birim fiyatının yüksek olduğu saatlerdeki kullanımını elektriğin ucuz olduğu saatlere kaydırarak kapalı hacim serinletme maliyetlerini düşürmektedir. Bir BED sisteminin ekonomik performansı elektrik tarifesinin gün içerisindeki fiyat değişimine ve dağılımına bağlıdır.

2. *Soğutma pik yüklerini pik olmayan saatlere kaydırır:* Soğutma pik yükleri gün içerisinde yalnızca birkaç saat gözlenmektedir. BED sistemleri sayesinde pik soğutma yüklerinin pik olmayan saatlere kaydırılması mümkün olacaktır. Böylece enerjinin daha dengeli bir şekilde tüketilmesini sağlayarak, şebeke pik yüklerini düşürmeye de destek olur.

3. *Soğutma gruplarının kapasitelerinin düşürülmesine yardımcı olur:* Klima sistemleri binaların pik soğutma yüklerine göre tasarlanır. Ancak bu pik yükler günün birkaç saatine denk gelmektedir. BED sistemleri sayesinde pik soğutma yüklerinin pik olmayan saatlere kaydırılması mümkün olacaktır. Pik yükü karşılamak için gerekli olan kapasite düşürülebilecektir.

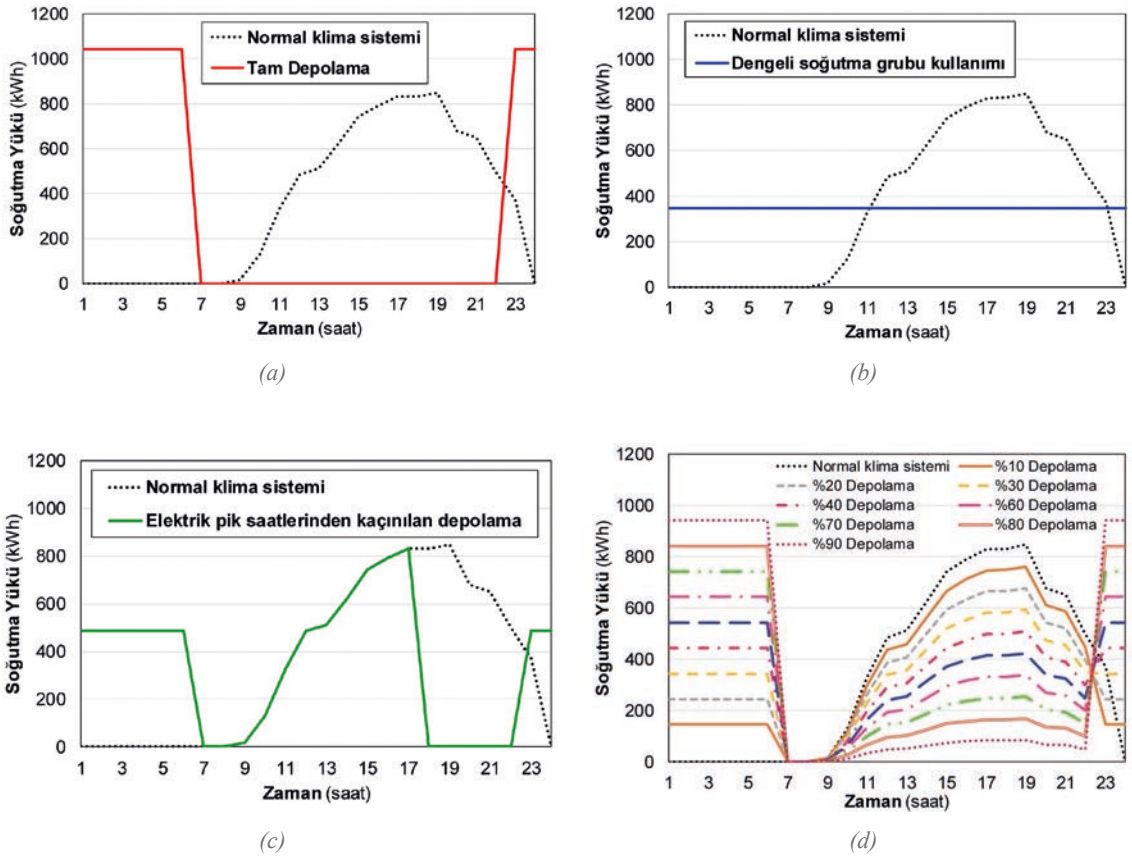
4. *Soğutma gruplarının daha verimli çalışmasını sağlar:* Klima sistemleri yaz aylarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yaz aylarında özellikle öğleden sonraki saatlerde artan dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı nedeniyle soğutma gruplarının maruz kaldığı çalışma ortam sıcaklığı önemli ölçüde artmaktadır. Bu ise soğutma gruplarının COP değerini önemli ölçüde düşürmektedir. BED sistemlerinde soğutma gruplarının çalışması gece saatlerine kaydırıldığından (daha düşük dış ortam sıcaklığı, güneş ışınımı yok ve bağıl nem gündüz saatlerine göre nispeten düşük) soğutma gruplarından daha yüksek COP ile yararlanmak mümkün olacaktır.

5. *Bina elektrik şebekesi için gerekli olan trafo, kablo kesiti, jeneratör vb. ekipmanların kapasitelerini ve boyutlarını düşürür:* Pik soğutma yükünün kaydırılması ve soğutma grubu kapasitesinin düşürülmesiyle trafodan alınması gereken kapasitif güç değeri de düşecektir. Trafolardan daha düşük değerde enerji daha düşük kablo kesitleri ile sağlanabilecektir. Bina güç gereksinimin düşmesiyle binanın ihtiyaç duyacağı jeneratör kapasitesinin de düşürülmesi mümkün olacaktır.

6. *Acil durumlarda yedek soğutma ünitesi olarak kullanılabilir:* Tıbbi laboratuvarlar, bilgi işlem merkezleri ve yüksek işlem kapasiteli bilgisayar tesisleri gibi kritik öneme sahip mekanlarda soğutma işleminin kesintisiz gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu gibi yerlerde soğutma sistemlerinin çalışmaması ya da elektrik kesintisi gibi durumlarda sorunsuz şekilde soğutmaya devam etmesi için jeneratör grupları bulunmaktadır. Bu jeneratör gruplarının birkaç yedeği de bulunabilmektedir. Jeneratör gruplarının sayısını azaltmak ya da daha efektif soğutma yedeği sağlamak için BED sistemlerinden yararlanılabilir.

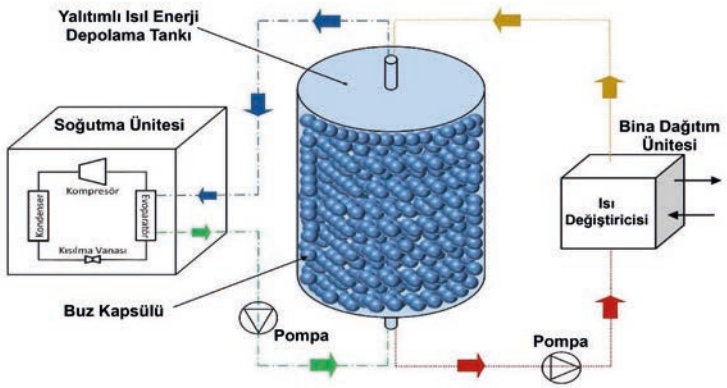
Yukarıda sıralanan faydalara ek olarak soğutma gruplarının daha verimli çalıştırılmasını sağlaması ve enerji pik yükünün düşürülmesine yardımcı olmasından dolayı enerjinin daha verimli tüketilmesine imkan sağlamaktadır. Sağlamış olduğu enerji verimliliğinden dolayı; fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına ve dolaylı olarak karbon emisyonunun düşürülmesine ve böylece küresel ısınma etkilerinin ortadan kalkmasına katkıda bulunur. Ayrıca pik elektrik tüketiminin düşürülmesi, ithal edilen enerji miktarını da düşüreceğinden enerji ithalatına bağlı ülke cari açığının düşürülmesine de katkıda bulunur.

BED sistemleri yukarıda değinilen faydaların birçoğunu ya da tamamını aynı anda sağlayabilmektedir. Bu faydalardan hangilerini, ne kadar miktarda sağlayacağı BED kullanım stratejisine bağlıdır. BED kullanım stratejisi; ne kadar enerjinin depolanacağı ve depolanan enerjinin ne zaman ve nasıl kullanılacağı olarak tanımlanabilir. Şekil 31'de bir hipermarket için farklı BED kullanım stratejileri görülmektedir. Şekil 31'den görüldüğü üzere, BED kullanım stratejisi depolanan enerji miktarı ve depolanan enerjinin nasıl kullanıldığının yanında, soğutma grubu kapasitesiyle de yakından alakalıdır. Depolanan enerji miktarı ve soğutma grubu kapasitesi sistemin ilk yatırım maliyetiyle, depolanan enerjinin nasıl kullanıldığı ise elektrik tüketim maliyetiyle direkt alakalıdır. Tam depolama stratejisinde (Şekil 31.a) binanın soğutma ihtiyacının tamamı BED sisteminde depolanmaktadır. Binanın çalışma saatlerine yayılı olan soğutma yükünün gece tarifesi süresine sıkıştırılması soğutma grubu kapasitesini arttırmaktadır. Yük dengeleme stratejisinde (Şekil 31.b) ise temel hedef gün içerisinde dengeli bir soğutma grubu elektrik tüketimi hedeflenmektedir. Böylece soğutma pik yükleri ve soğutma grubu kapasiteleri önemli ölçüde düşürülür. Elektrik pik yüklerini düşürmek ve elektrik bedelinin yüksek olduğu tarife saatlerinden kaçınmak için elektrik pik tarife saatlerinden kaçınılan strateji (Şekil 31.c) kullanılmaktadır. Yaz dönemi elektrik pik tarife saatleriyle soğutma pik yükleri genellikle çakışmaktadır. Bu sayede serinletme işlemi hem daha düşük maliyetle yapılmakta hem de soğutma pik yükü düşürülebilmektedir. Depolama tankı için fiziki şartların yeterli olmadığı durumlarda soğutma pik yüklerini düşürmek için kısmi depolama stratejileri (Şekil 31.d) kullanılmaktadır. Bu stratejide ana hedef fiziki koşulların el verdiği depolama kapasitesinde depolama yapıp soğutma pik yükünü düşürmektedir.



Şekil 31. *Bir hipermarket için farklı BED kullanım stratejilerinin saatlik soğutma grubu kullanımı üzerindeki etkisi (a) Tam depolama stratejisi, (b) Yük dengeleme stratejisi, (c) Pik tarifeden kaçınılan strateji, (d) Kısmi depolama stratejileri ([42]'den uyarlanmıştır)*

BED sistemlerinde buzun elde edilme şekline göre statik ve dinamik BED sistemleri bulunmaktadır. Statik sistemde buz, depolama tankında üretilip ve depolanırken; dinamik sistemlerde buz, depolama tankının dışında üretilip daha sonra tanka gönderilmektedir. Dinamik BED sistemleri, statik BED sistemlerine göre daha yüksek enerji depolama yoğunluğuna ve ısıl performansa sahip olmasına karşın daha karmaşık sistem yapısına sahiptir. Bu yüzden pratik uygulamalarda statik BED sistemleri yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Tipik bir kapsüllü BED sisteminin şematik gösterimi Şekil 32'de görülmektedir. Statik BED sistemleri arasında yaygın olarak kapsül içerisinde ve serpantin üzerinde buzlanmanın gerçekleştiği sistemler tercih edilmektedir. Şekil 32'den görüldüğü üzere, kapsüllü BED sistemlerinde tank içerisinde çok sayıda kapsül bulunmaktadır. Buz kapsüllerinin arasından bir ısı transferi akışkanı geçerek kapsül içerisindeki suyun katılaşması sağlanır. Serpantinli BED sistemlerinde ise depolama tankı içerisinde su ve serpantin takımı bulunur. Serpantinin içerisinden ısı transferi akışkanı geçer ve katılaşma serpantin boruları üzerinde gerçekleşir. Statik BED sistemlerinde tankın şekli ve boyutları değişse de sistem genel olarak aynı yapıya sahiptir. Statik BED sistemlerinin bütünleştirildiği klima sistemleri, klasik klima sistemine ilave olarak yalıtımlı bir depolama tankı, çok yollu vanalar ve ek tesisat ekipmanları içermektedir. Sistemin enerji yükleme, depolama, boşaltma ve normal soğutma periyotlarında çalışması çok yollu vanalar ile kontrol edilmektedir.

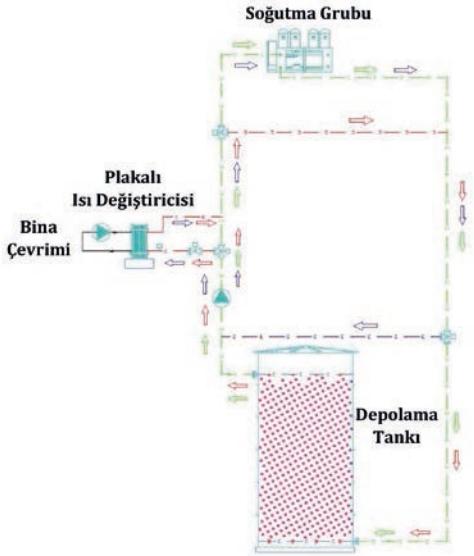


Şekil 32. Tipik bir kapsüllü BED sisteminin şematik gösterimi ([42]'den uyarlanmıştır)

2.4.1. Ülkemizin İlk Ticari Büyük Ölçekli BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

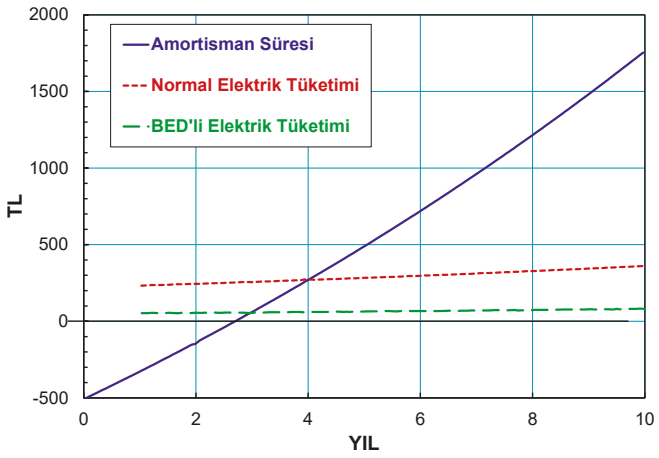
Ülkemizdeki ilk ticari ve büyük ölçekli BED uygulaması Eryaman, Ankara'da yer alan GİMSA Hipermarket'e kurulmuştur. GİMSA'nın toplam günlük pik soğutma yükü 8332 kWh olup sadece 17.00-22.00 saatleri arasındaki pik elektrik tarifesi dönemlerindeki soğutma yükünü karşılayacak BED sistemi entegre edilmiştir. GİMSA'nın fiziki koşullarından dolayı uygulanabilecek en yüksek kapasitede depolama yapılmış ve ekonomik olarak en yüksek faydayı almak adına elektrik pik saatlerindeki soğutma yükleri depolanmıştır. Normal klima sistemi ve BED entegre klima sistemi için saatlik yükler Şekil 31(c)'de görülmektedir. Saatlik yük dağılımlarından görüldüğü üzere, uygulanan BED kullanım stratejisinden dolayı elektriğin pahalı olduğu 17.00-22.00 saat aralığında soğutma grupları çalıştırılmamaktadır. Bu saatler için gerekli olan soğutma yükü pik dışı saatlerde depolanan enerjiden sağlanmaktadır.

GİMSA'da kullanılan BED entegre klima sisteminin şematik gösterimi Şekil 33'te verilmiştir. Burada yeşil renk ile gösterilen çevrim enerji depolama ya da başka bir deyişle buz üretim periyodunu göstermektedir. Bu periyot elektrik tarifesindeki gece tarifesi saatlerinde (22.00-6.00) çalıştırılmaktadır. Mavi ile renklendirilmiş hat ise normal klima sistemiyle serinletme yapıldığı ve üretilen buzların bekletildiği enerji depolama periyodunu göstermektedir. Depolama periyodu 6.00-17.00 arasındaki elektrik gündüz tarifesi saatleri arasında gerçekleştirilmektedir. Kırmızı renk ile gösterilen hat enerji geri kullanım periyodu ya da başka bir deyişle buz eritme periyodunu temsil etmektedir. Enerji geri kullanım döngüsü elektrik pik tarife saatlerinde (17.00-22.00) çalıştırılmaktadır. Sistemin farklı periyotlarda çalıştırılması otomatik kontrollü çok yollu vanalar ile sağlanmaktadır.



Şekil 33. GİMSA'da kullanılan kapsüllü BED sisteminin şematik gösterimi ([42]'den uyarlanmıştır)

Şekil 34'te ise GİMSA'da kullanılan sistem için amortisman eğrisi görülmektedir. GİMSA'daki soğutma sisteminde BED olmaması durumunda (normal soğutma sistemi) ilk yatırım maliyeti 595797 TL'dir. BED sistemi için gereken ekstra yatırım maliyeti ise 509233 TL'dir. BED içeren entegre soğutma sisteminin toplam maliyeti ise yaklaşık olarak 1,1 milyon TL'dir. Burada tüketim verilerinin ilk iki yılı gerçek verilerden elde edilmiştir. Sonraki yıllar için ise elektrik birim fiyatına dönemsel bazda eklenecek artış miktarları dahil edilmiştir. Buna göre BED sistemi 2,7 yıllık bir kullanım süresi sonunda kendisini geri ödemektedir. 10 yıllık bir kullanım süresinin sonunda ise yaklaşık olarak 1,8 milyon TL tasarruf sağlama potansiyeline sahiptir. Yıllık tüketim maliyetleri dikkate alındığı zaman, BED sistemleri klima sistemlerinin işletme maliyetini önemli miktarda düşürerek elektrik tüketiminde kayda değer tasarruf potansiyeline sahiptir. Soğutmanın yapıldığı her amaca hizmet eden binada ve her iklim bölgesinde uygulanabilmektedir. Dünyada BED sistemlerinin çok sayıda uygulaması olmasına karşın, ülkemizde ticari olarak uygulanmış tek uygulama vardır. Alışveriş merkezi, hastane, iş merkezi, havaalanı, toplum kullanıma açık büyük binalar gibi soğutma yükünün çok yüksek olduğu binalarda kullanılması hem binaların enerji tüketim maliyetleri açısından, hem dağıtım şirketlerinin pik yükü karşılamada karşılaştığı sorunların önüne geçmek, hem de ithal elektrik miktarını düşürmek için ciddi bir potansiyele sahiptir. BED sistemlerinin tasarlanmasında oldukça dikkatli olunmalıdır. BED kullanım stratejisi dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Hatalı BED stratejisi sistemin geri ödeme süresini uzatabilir ve sistemden elde edilen ekonomik faydayı düşürebilir. BED sistemleri soğutma maliyetlerini düşürmenin yanında, sistem ekipmanlarının kapasitesini düşürmede, sistemin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamada da önemli potansiyele sahiptir.



Şekil 34. *GİMSA'da kullanılan BED sistemi için amortisman eğrisi ([42]'den uyarlanmıştır)*

Ülkemizde BED sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması ve elde edilen faydanın arttırılması için bazı tedbirlerin alınması gerekmektedir. Öncelikle BED sistemlerinin kullanıldığı birimlerde iki adet elektrik aboneliği olması gerekmektedir. Ancak ülkemizde yasal olarak bu mümkün değildir. Bir bağımsız birim için sadece bir adet elektrik aboneliği verilmektedir. BED sisteminin kullanılacağı binalarda kullanılacak aboneliklerden biri klima sistemleri için kullanılacak olan üçlü tarife, diğer ise binanın genel elektrik tüketimleri için kullanılacak olan tekli tarife olmalıdır. Böyle bir tarife yapısıyla BED sistemlerinin ekonomik faydası arttırılacaktır. Pik yükü düşürmeye ve kaydırmaya yönelik ciddi bir potansiyeli olduğundan, BED sistemleri teşvikler kapsamına alınabilir. Elektrik dağıtım şirketleri BED sistemi kullanılan binalara avantajlı tarife uygulayabilirler.

2.5. Isı Pompası Entegreli Enerji Depolama Uygulaması

Dünyada elektrik enerjisi elde etme yöntemlerinin fosil kaynaklardan hızla yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmaya başladığı günümüzde ısıtma, soğutma ve sıcak suyu sağlayan yenilenebilir enerji kaynakları arasında düşük maliyete sahip ısı pompaları göze çarpmaktadır. Isı pompaları; ısıtma,

soğutma ve sıcak su sağlayan cihazlardır. Isı pompaları, kullandığımız geleneksel ısıtma amaçlı cihazlardan (örneğin kombi ve kazan) farklı olarak tamamen temiz, çevreye zarar vermeyen, yenilenebilir, güvenilir ve ucuzdur. Kazan örneğini ele alırsak kazan içine fosil yakıtlar olan kömür, mazot, doğal gaz enjekte ederek, yakma işlemiyle oluşan ısıyı konutlarımıza aktarır ve böylece bina içi ısıl konforu elde ederiz. Isı pompasında ise temiz ve yenilenebilir yolla elde edilen enerji suya aktarıldıktan sonra bina içerisindeki sisteme gönderilir ve sürekli bir devir daimle çalışmasını sürdürerek bina içi konforu sağlar. Isı pompaları sayesinde konutlarımızın bacalarından atmosfere zehirli gazlar veya duman salmadan yani çevremizi kirletmeden, koruyarak tek bir cihazla ısıtmamızı, soğutmamızı ve sıcak suyumuzu elde edebiliriz.

Soğutma için klima cihazlarını, ısıtma için kombiyi veya kazanı, sıcak su için ise boiler gibi cihazları kullanırken, ısı pompaları tek cihazla daha az yer işgal ederek ihtiyacımızı karşılaması en büyük avantajlarındandır. Diğer taraftan, ısı pompaları enerjiyi doğadan alır yani toprağın, suyun ve havanın ısısını alıp kullanırlar. Topraktaki su ve havadaki ısının kaynağı güneşten gelen enerji olduğu için ısı pompalarının yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu belirtebiliriz. Günümüzde Türkiye'de en fazla kullanılan kaynak türü hava olup havayı enerji kaynağı olarak kullanan ısı pompalarına ise hava kaynaklı ısı pompası denmektedir. Havadan suya ve havadan havaya şeklinde çalışan iki farklı çeşidi bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaik ve rüzgârdan elektrik elde eden sistemler, ortalama %20 verimle çalışır. Isı pompaları ise yenilenebilir enerjinin %80'ini geri kazanabilmektedir. Isıtma, soğutma ve sıcak su için kullanılan yüzey jeoterminin (*hava, su* ve *toprak ısısı*) bazı avantajları aşağıda verilmiştir:

- Yerli, çevre dostu enerji kaynağı ve her zaman mevcuttur,
- Uzun süreli ve dayanıklı enerji kaynağıdır,
- Kazanılan ısı tüm yıl boyunca kışın bina ısıtması, yazın ise bina serinletmesi için kullanılabilir,
- Isıtmada ortalama %75, soğutmada ise %85 enerji tasarrufu sağlar.
- Fosil yakıtların fiyat değişimlerinden bağımsızdır ve CO_2 emisyonunu önemli derecede azaltır.
- Dumansız oluşu doğayı, iklimi ve ekosistemi hem korur hem de zarar vermez. Bu nedenle yeşil enerji olarak ifade edilir. Bu sistemlere sahip binalar doğal çevreye uyumlu atık üretmeyen malzemelerden yapılmışsa, yeşil bina denir.
- Toprak kaynaklı ısıtma sistemleri yerin altında görünmezdir, görsel rahatsızlık vermezler.

Isıtma, soğutma, sıcak su ve havalandırmanın gerekli olduğu her bina; okul, AVM, otel, ofis ve 50 m^2'den büyük tüm konutlar yeni yapılıyor ise 2011 yılından itibaren, eski bina ise 2017 yılına kadar "Enerji Kimlik Belgesi" (EKB) alması yasal zorunluluktur. Bu belgeyi alabilmek için;

- Isıtma, soğutma, sıcak su ve havalandırma için birim alan bazında kullanılan yıllık enerji tüketimini asgariye indirmek,
- Sera gazı salımını başta CO_2 olmak üzere yok etmek veya azaltmak gerekmektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bu iki hususu kontrol altında tutmak için yıllık enerji tüketimini ve sera gazı salınımını A'dan G'ye kadar sınıflandırmıştır. Yasalara göre binalar en az D performansında olmalıdır. Enerji Performansı A sınıfı olan bir bina sera gazı salımının en az olduğu binayı simgelemektedir. G sınıfı ise enerji performansı açısından en kötüyü simgeler. Enerji Performansı kötü olan binalar, yalıtım yaparak ve/veya ısı pompalarını kullanarak enerji performanslarını kat ve kat artırabilirler. Isı pompaları ile enerji giderini dörtte bire düşürerek baca gazı emisyonunu "sıfırlamak" mümkündür. Aynı zamanda ısı pompası uygulanan yenilenebilir enerji kaynağını (*toprak, su* ve *hava*) kullandığından bina yeşil bina statüsüne de girebilecektir. Performansı G sınıfı olan binalar böylece A sınıfına dönüşebilmektedir. Binaların değeri de enerji kimlik belgesindeki performansa göre artacak veya azalacaktır.

Enerji verimli bir binanın ilk yatırım maliyeti biraz daha yüksek olsa da işletme maliyetleri kısa sürede kendisini geri ödeyecektir. Mevcut binalara yapılacak iyileştirmeler de 3-5 yıl içinde elde edilecek tasarruf ile yatırımı geri ödeyecektir. Burada amaç yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, enerjinin daha verimli kullanımının sağlanması, enerjide yurt dışı bağımlılığının azaltılması ve başta CO_2 olmak üzere sera gazı emisyonunun en aza indirilmesidir.

Bir yandan enerjinin kullanıldığı alanlarda oluşan atık enerjiyi depolama (örneğin, sanayi ve endüstrideki atık ısının depolanması gibi), diğer yandan, yalnız belirli zamanlarda enerji verebilen (örneğin, güneş enerjisi gibi) yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak, enerji temin zamanı ile talebi arasında doğabilecek farkı gidermeye amaçlamaktadır. Bu sayede enerji sistemlerinin verimi artırılmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Örneğin; kış aylarında ısıl enerjinin depolanarak yeniden kullanılması; ısıtma sistemlerinde %22, yaz aylarında aynı yöntemle iklimlendirme sistemlerinde ise %40'a varan oranda bir enerji tasarrufu sağlayabilmektedir. Yardımcı enerji kaynağına duyulan ihtiyaç azaltılmaktadır. Böylece, değerli olan fosil yakıt rezervleri (kömür, petrol ve doğal gaz gibi) muhafaza edilmiş olacaktır.

Isıl enerji depolama entegreli ısı pompası uygulamaları, enerji üretimi için kullanılan yakıtların çevreye verdiği zararın önüne geçilmesinde önemli rol oynar. Daha az fosil yakıt tüketilmesine bağlı olarak çevreye yayılan sera gazı miktarının azalması sağlanacak ve böylece daha temiz bir hava solunmuş olacaktır. Ayrıca bu sayede küresel ısınmaya karşı verilen mücadeleye de önemli ölçüde destek sağlanmış olacaktır. Elektrikle ısıtılan evlerde gece boyunca tüketilen enerjinin fazlasının depo edilerek gündüz saatlerinde ısıtma sistemlerinin daha az kullanılması, gündüz kullanılan enerjinin gece kullanılandan daha pahalı olmasından dolayı bireysel ekonomiye de katkı sağlayabilir. Ülkemizin fosil yakıtlar bakımından dışa bağımlılığı da düşünüldüğünde, enerji depolamayla sağlanacak enerji tasarrufunun ülke ekonomisine de ciddi katkılar sağlayacağı aşikârdır.

2.5.1. Isı Pompaları ve Sağladığı Faydalar

Isı pompaları çevreden aldıkları yenilenebilir enerjiyi kullanılırlar. Yıl boyunca toprak altında, yer altı sularında ve havada depolanan güneş enerjisi, elektrik enerjisi yardımı ile ısıtma enerjisine dönüştürülür. Çevreye duyarlılığın artması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilgi artmıştır. Avrupa Isı Pompası Kuruluşu (EHPA) 2018 yılı ısı pompası pazar istatistiklerine göre Avrupa ısı pompası pazarı çift haneli büyümesini sürdürmektedir. 2017 yılında satılan 1,13 milyon adet cihaz ile (+%13,1) Avrupa ısı pompası pazar büyüklüğü 10,59 milyona ulaşmıştır [43]. Üst üste dört yıl boyunca, Avrupa ısı pompası pazarı büyüme kaydetmiş ve üst üste üç yıl boyunca büyüme oranı çift basamaklı olmuştur. Avrupa'daki çeşitli pazarlardan gelen işaretler, bu büyümenin 2018 yılında da devam ettiğini göstermektedir.

Büyümenin sürmesi halinde, Avrupa ısı pompası pazarının 2024 yılına kadar ikiye katlanması gerçekçi bir beklentidir. Özellikle yasal çerçevenin iyileştirilmesi bu beklentinin oluşmasına gerçekçi temeller oluşturmaktadır. "Tüm Avrupalılar için temiz enerji" olarak başlayan Avrupa Komisyonu'nun önerisi, yasa haline gelmiştir. 2019 yılının başlarında, Binalarda Enerji Performansı Direktifi konusunda anlaşmaya varılmıştır. Direktifin ana dayanaklarından biri, üye devletlerin bir yenileme stratejisi oluşturma zorunluluğudur. Yenilenebilir enerji yönetmeliğine ilişkin anlaşma, 2030 yılına kadar ulaşılacak yeni bir bağlayıcı %32 yenilenebilir enerji hedefini ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda, bu sektörde yılda %1,3 büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarının hedefi ile ısıtma ve soğutmada yenilenebilir enerji kullanımının hızlandırılmasına özel bir önem vermektedir. Avrupalı eş-yasa koyucular, 2030 yılına kadar ulaşılacak %32,5'lik bağlayıcı olmayan bir verimlilik hedefi içeren Enerji Verimliliği Direktifinin son hali üzerinde anlaşmış ve Avrupa birincil enerji faktörünü %2,1 olarak güncelleyerek elektrik kullanımını daha çekici hale getirmişlerdir [43].

Yeni yönetmelik, bir karbon bütçesi getirilmesini zorunlu kılarak, ilerlemenin ölçülmesini kolaylaştırmaktadır. Bu hedefler bazıları için iddialı görünmekle birlikte, ısı pompaları bu hedeflerin hepsinin yerine getirilebilmesine katkıda bulunabilir ve görünüşte iddialı bir hırsı, gerçekçi bir hedefe dönüştürebilir. Bununla birlikte, üye devlet nezdinde mevzuatın doğru bir şekilde uygulanması ve teknolojilere ait potansiyellerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Böylece Avrupa birliği ülkelerinde 2017 yılında satılan 1,13 milyon adet ısı pompası, 11 TWh yenilenebilir bir kaynaktan gelen 17,5 TWh faydalı ısı üretmektedir. Yeni kurulan ısı pompaları 2,8 Mt CO_2 emisyonu ve 14,0 TWh nihai enerji tasarrufu ve aynı zamanda, 38,5 GW depolama kapasitesi sağlamaktadır. Stok açısından bakıldığında, kurulu 10,59 milyon adet ısı pompası 181,7 TWh faydalı ısı üretmekte ve bunun 116,2 TWh'ı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Hali hazırda kurulu bulunan ısı pompaları, 29,8 Mt CO_2 emisyonu ve 148,2 TWh son enerji tasarrufu ve aynı zamanda, 371 GW depolama kapasitesi sağlamaktadır [43].

Ülkemizde tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %40'ı binalarda kullanılmaktadır. Binalarda kullanılan enerjinin %85'i ise binaların ısıtılması soğutulması, havalandırılması ve sıcak su gereksinimi için tüketilmektedir. İnsanoğlunun bildiği en yüksek verimli ısı kazanım sistemi olan "ısı pompalarını" kullanarak binalarda tüketilen birincil enerji miktarını önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Isı pompalarının kullanımını yaygınlaştırarak, Türkiye'nin enerji giderlerini önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Türkiye ithal ettiği doğal gazın önemli bir bölümünü binaların ısıtılması amacıyla kazan ve kombilerde direkt yakarak tüketmektedir. Bunun yerine doğal gazla elektrik üretir ve bu elektrikle ısı pompalarını çalıştırırsak, doğal gazı direkt yakarak elde ettiğimiz ısıtma enerjisini 2 katına kadar çıkarabilmek mümkündür. Böylece Türkiye, örneğin 25 milyar dolarlık doğal gaz ithal ederek 50 milyar dolarlık doğal gazın ısıtma gücüne ulaşabilir, aradaki 25 milyar dolara eşdeğer enerjiyi ise kendi havasından ve suyundan bedelsiz olarak elde edebilir. Türkiye ısı pompalarının kullanımını yaygınlaştırarak yurtdışına olan "Enerji Bağımlılığı"nı önemli ölçüde azaltabilir. Isı pompalarıyla ısıtma yaparken neden olunan CO_2 emisyonları, doğal gaz yakarak ısıtma yapan kazan ve kombilerin neden olduğu CO_2 emisyonların dörtte- biri kadardır.

Isı pompalarının kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte Kyoto protokolünün bilançosu Türkiye lehine gelişecektir. Isı pompalı sistemlerde gaz ve yanma olayı yoktur. Dolayısıyla zehirlenme, patlama, yangın ve deprem zararları gibi riskler de oluşmamaktadır. AB ülkelerinde ve ABD'de ısı pompalarının kullanımının artması için devletler, eyaletler ve belediyeler önemli maddi teşvikler vermektedir. Türkiye sahip olduğu ılıman iklim şartları, doğal su kaynakları ve denizlere olan uzun sahilleriyle ısı pompasının kullanımına çok uygun, dolayısıyla şanslı bir konumdadır. Motorin ve doğal gaz gibi fosil yakıtların ömrü sınırlıdır. Bu gerçeğin farkına varmak bizleri ısıtma sistemleri için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yöneltmektedir. Avrupa'da çevre duyarlılığına paralel olarak fosil yakıtlara karşı güçlü politikalar bulunmaktadır. Sınırlı yakıt rezervlerinin yanı sıra, iklim değişikliklerinin önlenmesi de ısı pompası sistemlerinin tercih edilmesinde önemli bir role sahiptir. CO_2 emisyonlarının düşürülmesi, iklim değişikliğinin önlenmesi için mutlaka gerçekleştirilmelidir. Tüm bu hususlar yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını desteklemektedir. Isı pompaları, ısıtma sistemleri ve kullanma suyu ısıtması için enerji tasarrufuna yönelik verimli çözümler sunmaktadır.

Isı pompaları tasarımlarına veya işletim prensiplerine göre toprak, yer altı ve yer üstü suları, çevre havası veya atık ısıyı enerji kaynağı olarak kullanabilmektedir. Hangi enerji kaynağının kullanılacağı ısıtılacak mahalin yerleşimine, kaynağın elverişliliğine ve sürekliliğine bağlıdır. Enerji kaynağı ile ısıtma sistemi arasındaki sıcaklık farkı ne kadar düşük olursa, kompresörü tahrik etmek için gerekli güç o kadar düşük dolayısıyla tesir katsayısı o kadar yüksek olur. Isı pompasının enerji kaynakları:

- **Hava:** Kolaylıkla bulunabilir, ilk yatırım maliyeti düşüktür. İki kaynaklı ve yedekli işletimler için uygundur. Düşük dış hava sıcaklıklarında elektrikli ısıtıcı takviyesi gereklidir.

- **Toprak:** Yeni binalarda en çok tercih edilen enerji kaynağıdır. Tek kaynaklı olarak işletilir ve yüksek verime sahiptir.

- **Su:** Su kalitesi ve özellikleri önemlidir. Genel olarak yüksek verimlidir ve tek kaynaklı olarak işletilebilir.

- **Atık Isı:** Kolaylıkla bulunabilir olmasına rağmen miktar ve sıcaklık seviyelerinin elverişsiz olması sebebi ile tercih edilmemektedir.

2.5.2. Güneş Destekli Isı Pompalarıyla Binaların Isıtılması

Karadeniz Bölgesinde evsel ısıtma uygulamalarına yönelik enerji depolama sistemi entegreli güneş destekli ısı pompası sisteminin performansını araştırmak için seri bağlı, paralel bağlı ve çift-kaynaklı olmak üzere üç farklı deney düzeneği kurularak bu sistemlere ait performans deneyleri yürütülmüştür [44]. Şekil 35'te incelenen sistemler şematik olarak gösterilmektedir. Seri sistemde güneş kolektöründen elde edilen ısıl enerji öncelikle faz değişim malzemeli ısıl enerji depolama sistemine aktarılmakta ve depolanmaktadır. Isı pompasının düşük dış ortam sıcaklığında çalıştığı dönemlerde ısı pompasının evaporatörü FDM'li ısı depolama tankı tarafından beslenmektedir. Paralel sistemde ise güneş kolektörü ve depolama tankından oluşan çevrim ısıtma yükünün belli bir kısmını sağlamakta ve gerektiği durumlarda havadan suya ısı pompası devreye girerek ısıtma sistemini desteklemektedir. Burada güneş destekli depolama tankı ısıtma yükününün büyük kısmını karşılayarak ısı pompasının elektrik tüketimini azaltmaktadır.

Çift-kaynaklı ısı pompası sisteminde ise ısı pompasının iki adet evaporatörü bulunmaktadır. Evaporatörlerden biri ısı depolama tankı hattına bağlı ve su kaynaklıdır, diğeri ise hava kaynaklıdır. Bu sistem, içerdiği kontrolcüler yardımıyla dış ortam sıcaklığını ve tank içerisindeki FDM sıcaklığını takip ederek yüksek COP elde edilebilecek evaporatör kullanımını tercih etmektedir. Sistem üç farklı şekilde ısıtma yükünü karşılayabilmektedir: *(i)* direkt güneş destekli ısıtma, *(ii)* ısı deposu kaynaklı ısı pompası ile ısıtma ve *(iii)* hava kaynaklı ısı pompası ile ısıtma. Kaygusuz [45] tarafından hava ve su kaynaklı çalışan ısı pompası sistemleri için aşağıdaki deneysel bağıntılar önerilmiştir:

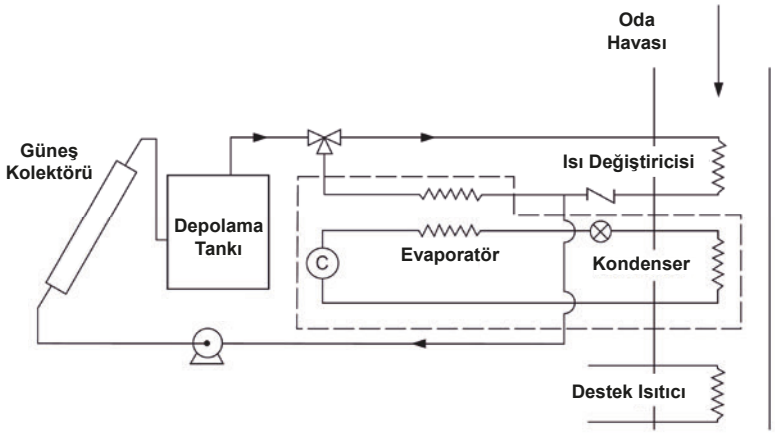
Hava kaynaklı ısı pompası:

$$\mathrm{COP}_{hava} = -27.86+0.121T_{hava}+ 1.601\times10^{-4}T^{2}_{hava}-7.035\times10^{-7}T^{3}_{hava} \quad (7)$$

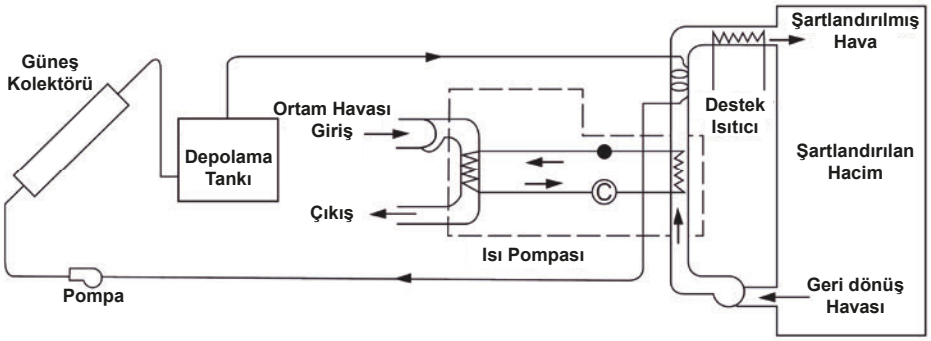
Su kaynaklı ısı pompası:

$$\mathrm{COP}_{su} = 5.46+5.33\times10^{-2}T_{su} - 5.53\times10^{-4}T^{2}_{su}+1.20\times10^{-6}T^{3}_{su} \quad (8)$$

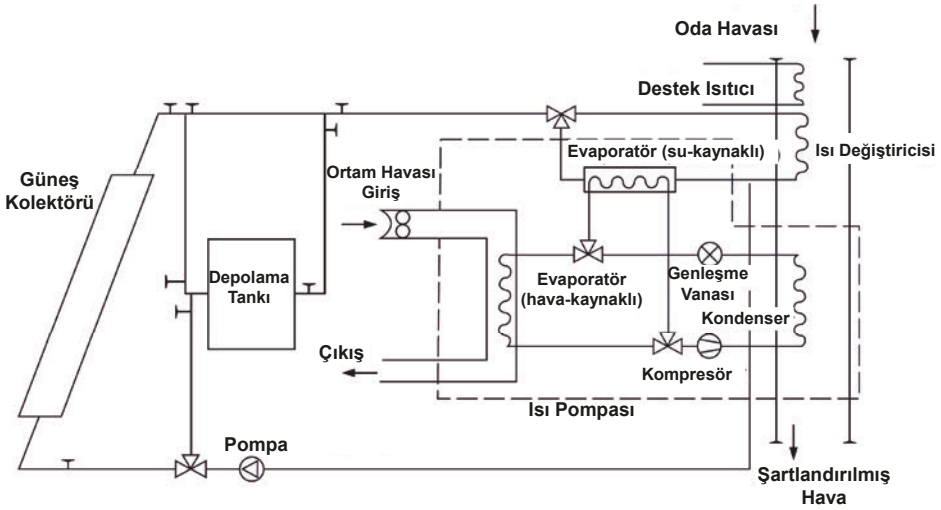
burada T_{hava} ve T_{su} sırasıyla hava-kaynaklı ve su-kaynaklı çalışan ısı pompası için kaynak sıcaklıklarını (K) temsil etmektedir. Tablo 8'de farklı dış ortam sıcaklıkları ve tank besleme suyu sıcaklıkları için hava ve su kaynaklı ısı pompasının COP değerleri sunulmaktadır. Burada ortalama dış ortam sıcaklığının 5°C ila 15°C arasında değiştiği kabul edilirken, ısıl enerji depolama sisteminden çıkan su sıcaklığı 5°C ila 50°C arasında alınmıştır. Tablodan görüldüğü üzere aynı sıcaklıkta su-kaynaklı ısı pompası kullanılması hava-kaynaklıya nazaran %8'e varan COP artışı sağlamaktadır. Diğer taraftan, ısı pompasını güneş destekli ısı deposu üzerinden daha yüksek sıcaklıklarda besleyerek COP değerini çok daha yüksek değerlere çıkarmak mümkündür.



(a) Seri bağlı ısı pompası



(b) Paralel bağlı ısı pompası



(c) Çift-kaynaklı ısı pompası

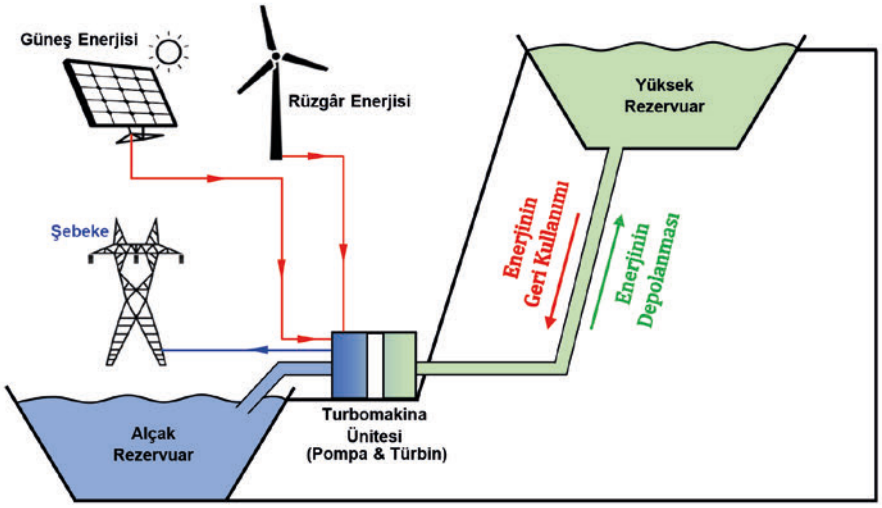
Şekil 35. *Isıl enerji depolama tankı içeren güneş destekli ısı pompası uygulamaları [46]*

Tablo 8. Kaynak sıcaklığının ısı pompası performansına etkisi

Sıcaklık (°C)	COP_{hava}	COP_{su}
5	3,04	3,32
10	3,27	3,46
15	3,47	3,61
35	–	4,49
50	–	5,43

2.6. Pompaj Enerji Depolama

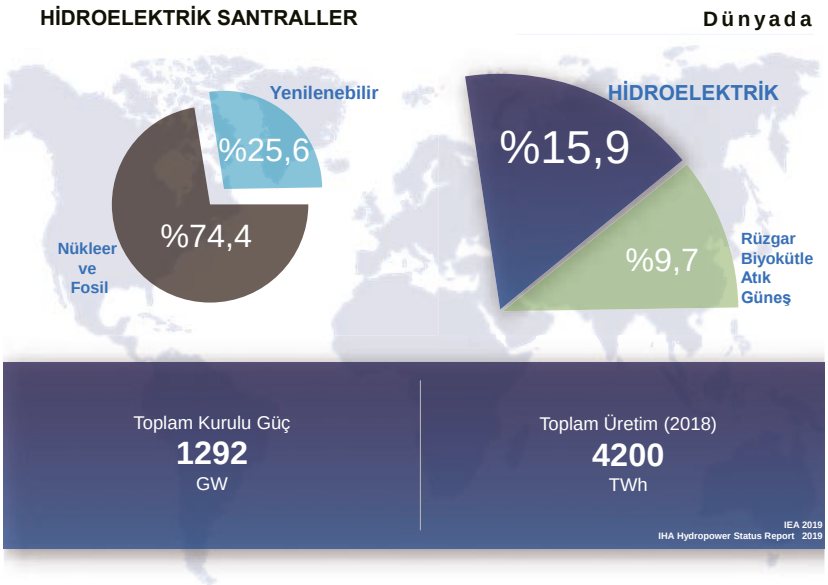
Pompaj depolamalı hidroelektrik enerji sistemleri (PHES) ilk defa 1800'lü yılların sonunda İtalya ve İsviçre'de kullanılmaya başlamış fakat yaygınlaşması 1900'lü yılların ortasını bulmuştur. Pompa gibi çalışan türbin ve motor/jeneratör ekipmanlarının kullanılmaya başlanması sistem verimini arttırmış ve bu tesislerin daha yaygın şekilde kullanılmasını sağlamıştır. PHES'de pik yükü dengelemek için elektrik enerjisinin ucuz olduğu dönemlerde alçak su deposundan yüksek su deposuna su basılarak enerji depolanmaktadır. Pik yük talebinin olduğu dönemde ise yüksek su deposundaki su türbin üzerinden geçirilerek depolanan enerji geri kullanılmaktadır. Sistemin basit bir şematik gösterimi Şekil 36'da verilmektedir.



Şekil 36. Pompalı hidroelektrik enerji depolama ([17]'den uyarlanmıştır)

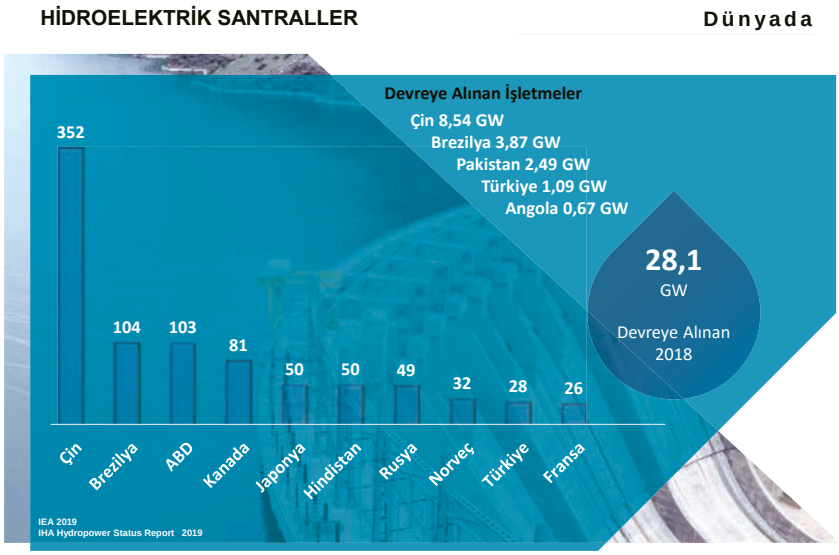
Ülkemizde ilk kez Enerji İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nce PHES etüt çalışması yapılmış, artan enerji ihtiyacı ve pik güç talebi göz önüne alınarak PHES'lerin diğer sistemlerle de entegre edilerek çalıştırılması ve ülke çapında yaygınlaştırılması hedeflenmiştir. PHES'lerin Türkiye'deki yeri ve gelecekteki potansiyeli üzerine araştırmada bulunularak ihtiyaç karşısında çeşitli hibrit sistemler çözüm olarak sunulmuştur. Detaylı çalışmaların sürdüğü PHES'lerin verimliliği konusunda Türkiye'de uygulanan bir proje bulunmamakta, literatür incelendiğinde GES (Güneş Enerjisi Santrali) ve RES'lerin (Rüzgâr Enerjisi Santrali) şebekede neden olacağı dalgalanmalar göz ardı edilmiştir. Bu da demek oluyor ki üretilen fazla enerji, talebinin düşük olduğu dönemlerde tüketilemeyerek enerji kaybının doğmasına sebep olacaktır. Bunun önüne geçmek içim üretilen elektrik PHES'ler aracılığı ile su olarak depolanmalı ve talep artışlarında da elektriğe dönüştürülmelidir.

İHA (*International Hydropower Agency*) tarafından her sene yayınlanan, sektör temsilcilerinin, uzman ve akademisyenlerin destek verdiği trend ve tahminlerin yer aldığı 2019 raporuna göre, Dünyadaki toplam HES kurulu gücü 1292 GW olup 2018 yılında 4200 TWh elektrik üretmiştir [47]. Bu rakam ülkemizin 2018 yılı toplam elektrik üretiminin yaklaşık 14 katı anlamına gelmektedir. Dünya elektrik üretiminin %16'lık kısmı HES'ler tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu da tüm yenilenebilir enerji kaynakların üçte ikisine tekabül etmektedir (Şekil 37).



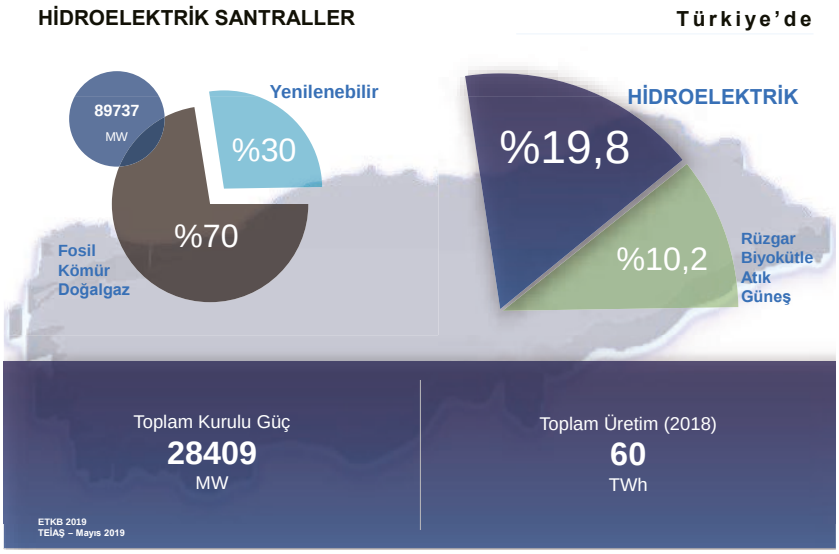
Şekil 37. *Hidroelektrik enerji üretim sisteminin toplam üretimdeki payı ([47]'den uyarlanmıştır)*

HES kurulu güç sıralamasında Çin en yakınındaki ülkenin 3 katından fazla kurulu gücü ile (352 GW) birinci sırada bulunurken ülkemiz 30 GW'a yaklaşan kurulu gücü ile Dünyada dokuzuncu, Avrupa'da ise Norveç'in ardından ikinci sırada yer almaktadır (Şekil 38). Yine aynı uluslararası raporlara yansıyan rakamlarda 2018 yılında 28 GW HES yatırımının işletmeye geçtiği belirtilmiştir. Ülkemiz hidroelektrik santrallere en çok yatırım yapan ülkeler sıralamasında dördüncü sıradadır (Şekil 38).



Şekil 38. *Ülkeler bazında HES kurulu gücü ve 2018 yılında devreye alınan yatırımlar ([47]'den uyarlanmıştır)*

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığımız tarafından 2019'da yayınlanan üretim raporları ve TEİAŞ güncel kurulu güç istatistiklerini incelediğimizde ise (Şekil 39) HES'lerin 2018 yılı üretimimiz içindeki payının %20 olarak paylaşıldığı görülmektedir [48]. HES'ler 2018 yılında 60 TWh üretimle ciddi katkı sunmuştur, hatta bazı aylar doğal gaz santrallerinin üretimdeki hâkimiyeti ve kurulu güçteki liderliğini HES'ler devralmış ve şu anda da en önemli üretim kaynağımız haline gelmiştir. Buraya kadar anlaşılmaktadır ki İHA ve İEA gibi uluslararası kuruluşlarını çalışmalarından da teyit edileceği üzere PHES'lerin de içinde yer aldığı HES'ler yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer almaktadır.

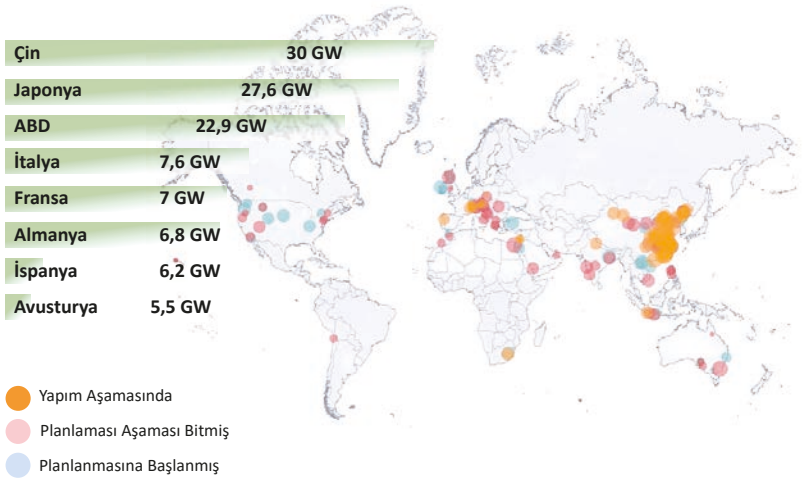


Şekil 39. Ülkemizde hidroelektrik enerji üretim sisteminin toplam üretimdeki payı ([48]'den uyarlanmıştır)

PHES'ler 160 GW'lık mevcut kurulu güç ile dünya genelinde depolama sistemlerinin %95'inden fazlasına karşılık gelmektedir [47]. ABD enerji bakanlığı (DOE) tarafından sunulan Aralık 2018 verilerine göre dünya genelinde işletmedeki, inşa halindeki ve sözleşme aşamasındaki depolama tesislerinin sayısı ve bunların öngörülen toplam kapasiteleri Tablo 9'da görülmektedir [49]. Ülkemizde henüz mevcut PHES sistemi olmamakla beraber özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin yoğun şekilde tercih ettiği bir depolama sistemidir (Şekil 40). Dünyadaki kurulu güç sıralamasında Çin ilk sırada yer alırken, ikinci sırada çok sayıda nükleer güç santraline (NGS) sahip Japonya yer almaktadır. Bu sıralamalarda yer alan ülkelerin hemen hemen hepsi PHES ekipman teknolojisine hakim olmanın yanı sıra bu sektöre hizmet eden ciddi bir ekipman imalat sanayileri vardır.

Tablo 9. Teknoloji türüne göre dünya genelinde depolama yöntemleri ve kapasiteleri [49]

Teknoloji Türü	Proje Sayısı	Güç (MW)
PHES	351	183007
Elektrokimyasal	994	3301
Termal	220	3275
Hidrojen	13	20
Toplam (Aralık 2018)		189603

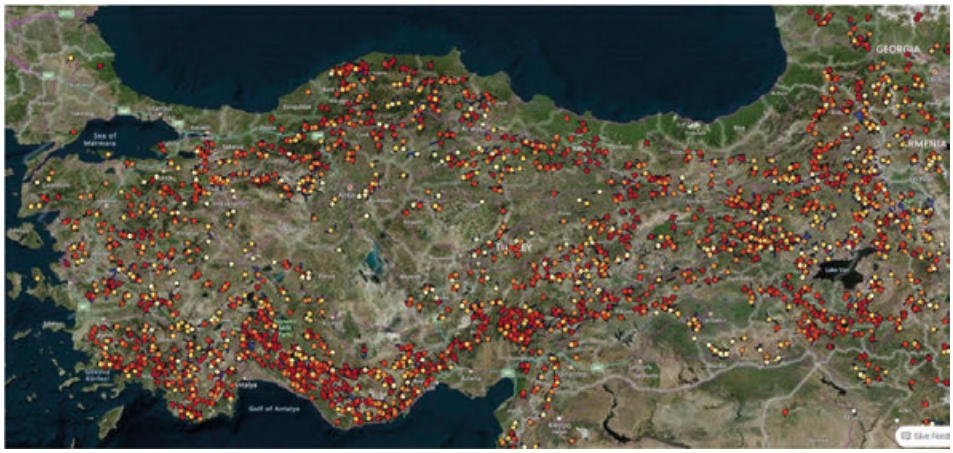


Şekil 40. *Dünyada PHES yatırımlarına genel bakış ([48]'den uyarlanmıştır)*

Avustralian National University (ANU) bünyesinde oluşturulan RE100 çalışma grubu dünya genelindeki pompalı hidroelektrik depolama alanlarını coğrafi bilgi sistemleri analizi yardımıyla haritalandırmaktadır [50]. Güncel verilere göre dünya genelinde 616 binden fazla potansiyel PHES depolama alanı bulunmaktadır. Bu bölgelerin toplam depolama kapasitesi ise 23 milyon GWh olarak hesaplanmıştır. Şekil 41'de 7,5 milyon kişiye %100 yenilenebilir enerji sağlayabilecek kapasiteye sahip PHES alanları hem global ölçekte hem de Türkiye özelinde gösterilmiştir. Kırmızıdan sarıya doğru renklendirilmiş skala maliyet öngörüsünü belirtmektedir. Kırmızı renkler maliyet açısından daha ekonomik büyük sistemlere karşılık gelmektedir. Ülkemizin yüksek kapasiteli depolama havzaları açısından yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 41. *Potansiyel PHES depolama alanları (a) küresel ölçekte, (b) Türkiye'de [50]*

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının %35'e çıkarılması, acil enerji ihtiyacı, kurulması planlanan NGS, enerji arz güvenliği, sistem regülasyonu, arz talep dengesi ve güvenli işletmecilik gibi hususlar ülkemiz için PHES yatırımını zorunlu hale getirmektedir. Önümüzdeki 10 yıl içinde devrede olması planlanan minimum 1000 MW, baz 2500 MW, azami 4500 MW gücünde planlanan tesisin takribi finansman ihtiyacı 1 milyar ABD doları olarak öngörülmekte olup 1400 MW'lık Gökçekaya PHES'in devreye alınması halinde Atatürk ve Karakaya HES'ten sonra en büyük üçüncü HES yatırımımız olacaktır. Yer seçimi ve dokümanların hazırlanması, tedarik planı ve projelendirme gibi kalemlerin yer aldığı hazırlık ve mühendislik çalışmaları için tahmini finansman bedeli 100 milyon ABD doları, inşaat 500 ila 600 milyon ABD doları, ekipman için ise 300 ila 400 milyon ABD doları öngörülmektedir. İlk yatırım maliyetlerinde en yüksek payı inşaat tarafı alıyorsa da katma değer teknoloji konusunda ekipmanların uzak ara önde olduğu gerçeğini de unutmamak gerekir. Şüphesiz ki inşaat sektöründeki altyapımız, tesisin baraj yapıları da dâhil olmak üzere tüm inşaat kapsamını tamamlayabilir yeterliliktedir. Fakat ekipmanda bahsedilen katma değer o kadar yüksektir ki ilk yatırım maliyetinde gözükmeyen birçok ihtiyaç yıllar sonra ortaya çıkarak bu kalemi inşaattan daha maliyetli bir noktaya çekecektir.

Konvansiyonel bir HES tesisinden çok da farklı ekipmanlara sahip olmayan PHES'ler çalışma ve fonksiyonel anlamda ayrılmaktadırlar. Tersinir ve üçlü üniteler şeklinde yapılan bu ayrım, tesisin ilk yatırım başta olmak üzere birçok maliyetine etki etmektedir. Tersinir üniteler, jeneratörün aynı zamanda motor olarak çalışabildiği, türbinin ise pompa görevini yaptığı sistemlerdir. Sabit ve değişken hızlı olarak gruplanırlar. Türbinin kompakt olması, yatırım ve inşaat maliyetlerini diğer sistemlere göre daha uygun bir noktaya çekmektedir. Fakat pompa modundan türbin moduna geçiş ve start-stop tepki süreleri nispeten daha fazla olmaktadır. Üçlü üniteler (*ternary*) ise birbirinden bağımsız türbin, motor/jeneratör ve bir pompadan oluşan 3 ekipmanın aynı şaftta konumlandığı sistemlerdir. Makinaların pik güçte kullanılması istenmesi halinde tersinir pompa türbinin daha avantajlı iken mod değişimi (türbin moddan pompa moduna) tersinir ünitenin 400 saniyeden fazla sürerken, üçlü ünitenin ise geçiş süresi bir dakikanın altında olmaktadır.

Anlaşılacağı üzere bir HES tesisinde katma değeri yüksek en önemli ekipman türbin/pompa ve jeneratör/motor grubudur. Pompaj depolamalı santraller için de hayati öneme sahip bu ekipmanlar su kayağımızın hem potansiyel hem de kinetik enerjisinden faydalanarak elektrik üretmek üzere tasarlanmıştır. Sanayimiz, kuruluşlarımız ve sektör olarak bunun farkında olmakla beraber Türkiye Elektromekanik Sanayii A.Ş. (TEMSAN), uzun yıllar bu katma değeri ülkemize kazandırmak için çalışmalar yürütmekte ve uygulamaktadır [51]. Dünyadaki örneklerine de bakıldığında bu ekipmanların teknolojisine sahip olmak ve yerel üretim yapabilme becerisi enerji arz güvenliği açısından da ciddi bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak projelendirme, tasarım, imalat ve satış sonrası hizmetleri bir bütün olarak ve milli imkânlarla yapılmalıdır.

Bu çalışmaların ilk adımı tasarım, analiz ve mühendislik hesaplamalarıdır. Özellikle PHES'lerde hizmet verecek türbinlerde yer alan çark yani runner en önemli ekipmandır. Runner, vibrasyon, pompa modunda çalışırken ortaya çıkacak kararsızlıklar ve kavitasyon gibi senaryoları da hesaba katarak ortalama 30 ila 40 sene işletme süresi boyunca emre amade şekilde, esnek ve geniş çalışma aralıklarında hizmet vermesi amaçlanır. Türbin çarklarının en verimli nasıl çalışacağına dair senaryolar, "Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği" yöntemleri ile ortaya koyulur, prototip öncesi hazırlanan modeller, biri de Enerji İşleri Genel Müdürlüğünün Ankara yerleşkesinde hizmet veren ve ülkemizde iki adet bulunan "Hidrotürbin Test Laboratuvarlarında" test edilerek analizlerde hesaplanan verim değerleri ve tasarım sonuçları kontrol edilir.

Tasarım kadar önemli ve asıl hedef kendi insanımızla ve kendi alt yapımızı kullanarak ucuz, hızlı ve kaliteli üretim yapmaktır. Burada tüm imalatı tek bir lokasyondan çıkarmak yerine komponent bazına indirgenmiş imalatlara ağırlık verilmesi gerekmektedir. Entegratör olarak çalışan şemsiye bir kuruluş ve komponentlerin alt üreticilerden sağlandığı bir yapı sektöre olan ilgi ve kapasiteyi de arttıracaktır. Satılan ürünün veya devreye alınmış tesisin satış sonrası hizmetinin hızlı ve eksiksiz yapılması yatırımcının memnuniyeti için son halkadır. Ürünlerin saha ve satış sonrası hizmetini vermek de teknolojiye hâkimiyet için ciddi katkılar sunmaktadır. Geri bildirimler sonraki projeler için altyapı ve yol gösterici olup işçilik ağırlıklı işlerden ziyade uzmanlık gerektiren kapsamlar tercih edilmelidir.

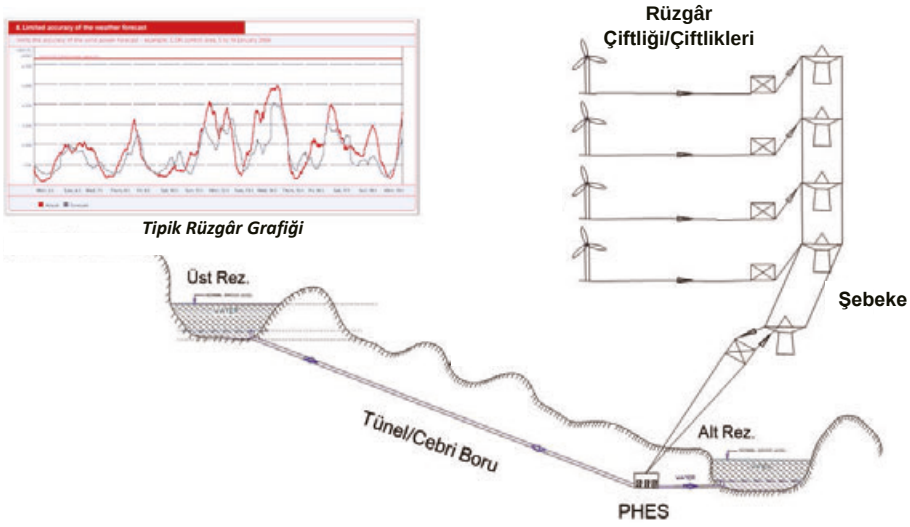
Tüm bu hizmetlerin bir işletme veya kuruluşça üstlenilmesi de sürdürülebilir olmayacaktır. Ana şemsiye kuruluşlar ve paydaş havuzlarının oluşturduğu bir sektör daha sağlıklı ve uzun ömürlü bir yapıya kavuşacaktır. Yatırımcı, sanayi ve kamu arasında bu görevi şemsiye ve katalizör kuruluş olarak TEMSAN yürütmektedir.

Aslında yerlileştirme çalışmaları 1970'li yıllarda başlamış ve bunlardan en etkileyicisi Hirfanlı HES projesi olarak bilinmektedir. Kırşehir'in Ankara sınırında bulunan Hirfanlı HES yabancı bir yüklenici tarafından yapımı üstlenilmiş 184 MVA'lık 4 üniteye sahip bir tesis olarak planlanmıştır. Santralin kurulumu aşamasında Kıbrıs Barış Harekâtı'nın cereyan etmesi akabinde oluşan ambargo ve ekonomik daralmalar yüklenicinin santralin dördüncü ünitesine ait ekipmanları teslim etmemesiyle sonuçlanmış, santral yıllarca 3 ünite olarak hizmet vermiştir. Bunun üzerine o zaman EÜAŞ, TEİAŞ, TEDAŞ gibi kurumların bir çatı altında hizmet verdiği TEK önderliğinde bir çalışma başlatılmış DSİ, Ankara Şeker Fabrikası'na ait Makina Fabrikası, MKE ve Demir Çelik Fabrikaları gibi birçok kamu ve özel kuruluşun da katkılarıyla dördüncü üniteye ait ekipmanlar yerli imkânlarla tasarlanıp, üretilip ve başarıyla devreye alınmıştır. İşte sektöre ait ilk yerli üretim hikayesi budur.

Yakın geçmişte başlayan bir başka millileştirme hareketi de TÜBİTAK KAMAK 1007 kapsamında geliştirilen MİLHES projesidir. Bu proje ile tasarımı ve üretimi tamamen yerli jeneratör, türbin ve yardımcı ekipmanların bulunduğu bir paket TEMSAN'ın da dahil olduğu bir grup üreticimiz tarafından tamamlanarak EÜAŞ'a teslim edilmiş, 2019'un son çeyreğinde devreye alma çalışmaları tamamlanacaktır. Yerli üretim için bir diğer önemli kilometre taşı da YEKDEM kapsamında yerli imalat ekipmana destek verilmesi olup yerli ekipman kullanan HES yatırımcıları ithal ürün kullananlara göre elektrik satış fiyatlarına %31 oranında ekstra katkı almaktadır. TEMSAN tarafından alınarak yatırımcının faydalanması sağlanana kadar pazardaki yabancı ekipman tedarikçileri bu sisteme soğuk bakmış, TEMSAN ürünleri ile teşvik alan ve yatırımlara yenileri eklendikçe yabancı üreticiler de yerli sanayiye yönelmeye başlamıştır. Bu yönelimin artarak devam etmesi sanayimizin kapasite ve kabiliyetlerinin artmasını, kaliteli üretimle beraber daha çok talebin gelmesini sağlamıştır. Bu süreç, regülasyonlarla yerli üretime nasıl katkı sunulacağına dair başarılı bir örnektir. Bugün büyük imalatçı markalar bizim sanayimizde ürettikleri ekipmanları başka kıtalardaki projelerde kullanıyorlarsa veya yeni üretim tesislerini ülkemizde açıyorlarsa tüm bu süreçlerin katkısı ile olmuştur.

2.6.1. Yahyalı (Kayseri) Hibrit Projesi

Rüzgâr enerjisi santrallerinden elde edilen enerji kısa zaman aralıklarında büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Kayseri İli Yahyalı İlçesi sınırları içerisinde yapılması planlanan "HİBRİT Proje" ile rüzgâr enerjisinin değişken yapısının düzenlenerek sisteme belli bir aralıkta garanti edilebilir sabit güç verilmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr santrallerinden elde edilen gücün şebekeye verilecek olan garanti güçten daha fazla olması durumunda fazla olan bu güç ile alt rezervuardaki suyun üst rezervuara pompalanması planlanmaktadır. Rüzgâr santralinden şebekeye verilecek olan garanti güçten daha az güç elde edilmesi durumunda ise aradaki farkın üst rezervuarda depolanan sudan yararlanılarak Pompaj depolamalı hidroelektrik santralden üretilecek güç ile karşılanması hedeflenmektedir. Hibrit proje kapsamında 1305 m kret kotunda 218000 m^3 hacimli değişken geometrili üst rezervuar ile alt rezervuarı Çamlıca 1 regülatörü olan 4,34 MW kurulu güce sahip Pompaj depolamalı hidroelektrik santral, 344 m uzunluğunda 3 m çapında enerji tüneli, 189 m uzunluğunda 1,20 m çapında çelik cebri boru, 1183,5 m kotunda, yarı gömülü yer altı santral binası ve 9,60 MW kurulu güçte rüzgâr santralı planlanmıştır [52]. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinden azami ölçüde yararlanılması amaçlı rüzgâr enerji santralı ve pompaj depolamalı hidroelektrik santralından oluşan Yahyalı hibrit enerji projesi Kayseri ili, Yahyalı İlçesi sınırları içinde planlanmıştır. 2013 yılı içerisinde projenin rüzgâr verisini yerinde temin etmeyi amaçlayan rüzgâr gözlem istasyonu Yahyalı İlçesi Sazak Köyü mevkiinde teçhiz edilmiş ve projenin fizibilite raporu tamamlanmıştır. Teçhiz edilen rüzgâr gözlem istasyonundan gelen gerçek zamanlı rüzgâr ölçüm verileri Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi sisteminde kayıt altına alınmaktadır. Hâlihazırda projede görev alması beklenen kurumlar ile görüşmeler devam etmektedir [53]. Hibrit PHES sisteminin şematik gösterimi Şekil 42'de verilmektedir.



Şekil 42. *Yahyalı Hibrit PHES projesi şematik gösterimi [52]*

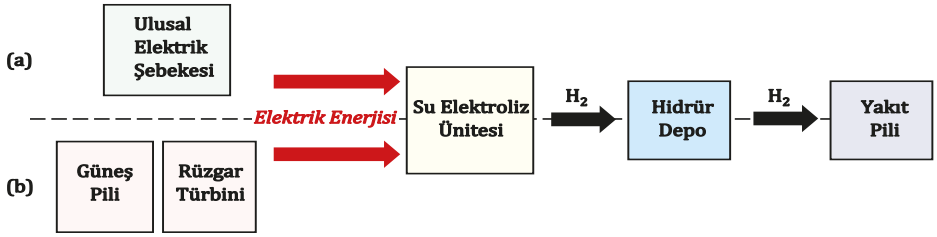
Projenin ön testlerinin gerçekleştirilmesi için Enerji İşleri Genel Müdürlüğü yerleşkesinde bulunan su kulesinde bir rüzgâr destekli pompajlı HES simülatörü kurulmuş olup prototip sistem üzerine birçok senaryo deneme imkânı bulunmaktadır. Tesis kapsamında bir üst rezervuar (30,1 m yüksekliğinde 75,57 m^3 hacimli kule tipi su deposu), alt rezervuar (59,4 m^3 hacminde alt su deposu), 12 L/s anma debisine sahip ve tasarım düşüsü 26 m olan pelton türbin tasarlanmıştır. Pelton türbinin üretici tarafından belirtilen 26 m net düşü ve 12 L/s anma debisindeki teorik çıkış gücü 2,7 kW'tır. Tesisin görüntüsü Şekil 43'te sunulmaktadır [54].



Şekil 43 *Yahyalı Hibrit PHES projesi demonstrasyonu [54]*

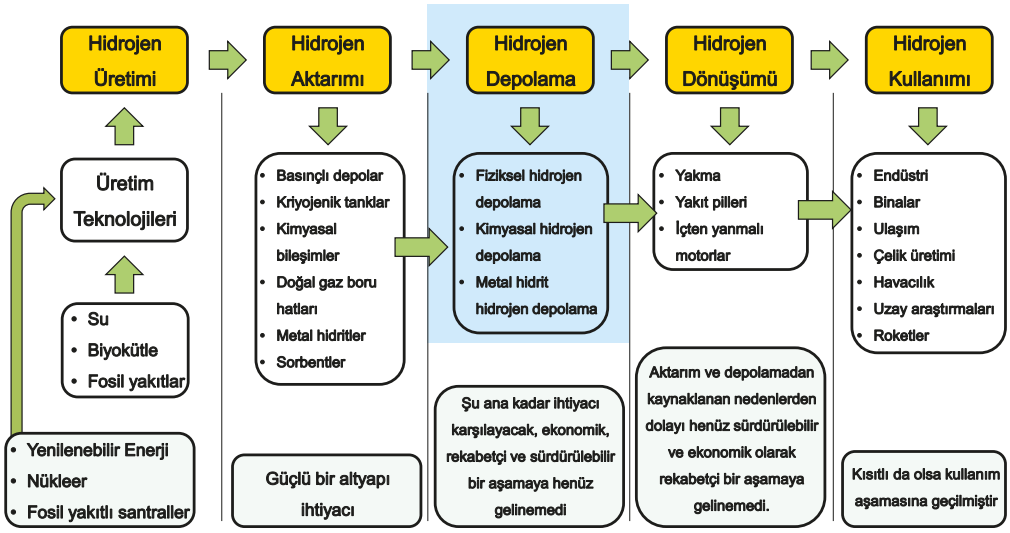
2.7. Hidrojen Depolama Teknolojisi

Endüstriyel uygulamalarda, taşımacılıkta ve güç üretim sistemlerinde fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarının kullanımı küresel ısınma ve hava kirliliğine sebep olan toksik gazların atmosfere salımına sebep olmaktadır. Özellikle şehir içi taşımacılıkta fosil yakıt kullanımı ciddi sağlık problemlerine sebep olmakta ve günlük hayatta yaşamsal konforu olumsuz etkilemektedir. Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklı enerjilerin kimyasal olarak depolanmasında ve sıfır-atık ile güç üretilmesinde hidrojen teknolojisinden yararlanılabilir. En basit anlamda güneş panellerinden veya rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisi suyun elektrolizi yoluyla hidrojenin elde edilmesinde kullanılabilir. Elde edilen hidrojen, uygun depolama teknikleri kullanılarak sıvı veya gaz formunda üretildiği yerde saklanabilir veya farklı bir yerde tüketilmek üzere taşınabilir. Yakıt pilleri hidrojenden elektrik elde edilmesinde kullanılmaktadır. Yakıt pilinde hidrojen elektriğe dönüşürken yalnızca su açığa çıktığından çevreye ve insan sağlığına olumsuz yan etkiler içermemektedir. Hidrojen teknolojisi bu nedenle üretiminden tüketime kadar bütünüyle çevre dostu olarak işletilebilmektedir. Şekil 44'te şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız hidrojen depolama alternatifleri şematik olarak gösterilmektedir. Tüketim fazlası üretimin olduğu zaman dilimlerinde suyun elektrolizi vasıtasıyla hidrojen üretimi yapılarak enerji depolanabilir (Şekil 44.a). Güvendiren ve Öztürk [55] bu yaklaşım kullanılarak Kanada'da Euro-Québec projesi kapsamında hidroelektrik santrallerden elde edilen talep fazlası enerjinin sıvı hidrojen formunda depolandığını ve Avrupa'da toplu taşıma gibi farklı tip kullanım amaçlarına yönelik ihraç edildiğini belirtmiştir. Euro-Québec projesinin detayları Drotlet vd. [56] çalışmasında sunulmaktadır. Direkt şebeke beslemeli hidrojen üretimi ve depolamasının yanı sıra, şebekeden bağımsız olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisini kullanarak hidrojen üretimi ve depolanması da mümkündür (Şekil 44.b).



Şekil 44. *Şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız hidrojen üretimi ve depolaması ([55]'ten uyarlanmıştır)*

Şekil 45 hidrojenin üretiminden son kullanımına kadar uygulanan temel aşamaları ve her bir aşama için gereklilikleri şematik olarak sunmaktadır. Hidrojen enerji zinciri olarak da isimlendirilen bu işlemler üretim, aktarım, depolama, dönüşüm ve kullanım aşamalarından oluşmaktadır. Hidrojen üretimi suyun elektrolizinin yanı sıra biyokütle veya fosil yakıtlardan da sağlanabilmektedir. Üretim işlemi sırasında gereken enerji yenilenebilir kaynaklardan, nükleer santrallerden veya fosil yakıtlı güç santrallerinden elde edilebilmektedir. Hidrojen aktarımı işleminde yüksek basınca dayanıklı tanklar, düşük sıcaklıklarda kriyojenik tanklar, metal hidiritler veya sorbentler gibi farklı aracılar kullanılabilmektedir. Hidrojen depolaması ise temel olarak kimyasal, fiziksel ve hibrit teknikler uygulanarak sıvı fazında, gaz fazında veya katı ortam içerisinde hapsedilerek gerçekleştirilmektedir. Ni [57] hidrojen depolamada öne çıkan dört tekniği şu şekilde sıralamıştır: *(i)* Yüksek basınçta sıkıştırma, *(ii)* Sıvılaştırma, *(iii)* Hidrür depolama ve *(iv)* Karbon-nanotüp depolama.



Şekil 45. *Hidrojen enerji zinciri [58]*

Hidrojenin yakıt olarak ulaşım, güç üretim tesisleri veya endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması için verimli, güvenli ve ekonomik depolama sistemlerinin tasarımı çok önemlidir. Hidrojen depolama teknolojilerinin temel olarak aşağıdaki beklentileri sağlaması gerekmektedir,

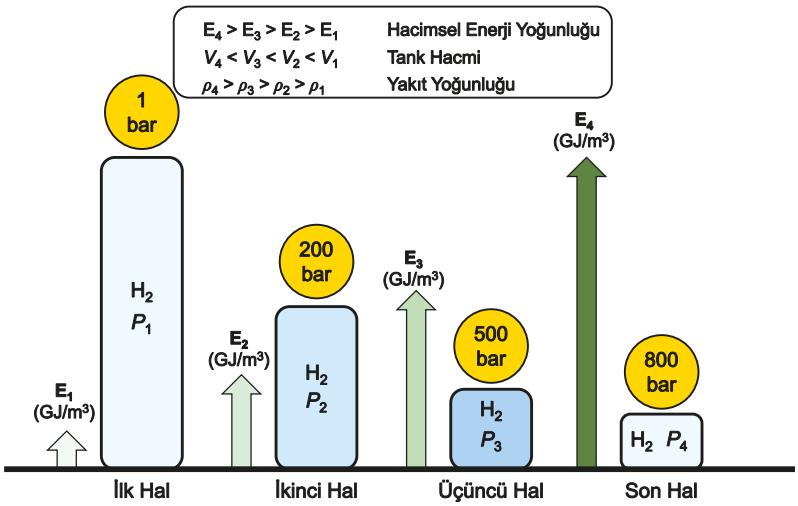
- Düşük maliyet
- Yüksek verimlilik,
- Yüksek dayanıklılık,
- Düşük ağırlık ve hacim,
- Kısa dolum süresi,
- Standartlara uygunluk,
- Yüksek verim ve uzun ömür.

Hidrojen depolamanın sağlayacağı belli başlı avantajlar aşağıdaki şekilde listelenebilir,

- Yakıtın kütlesel ve hacimsel yoğunluklarını arttırmak,
- Kullanılan sistemlerin performansını iyileştirmek,
- Onboard ve offboard uygulamaları kolaylaştırmak ve esnetebilmek,
- Yakıtın taşınabilir güç üretim kabiliyetini arttırmak,
- Yakıtın taşınabilirliğini kolaylaştırmak,
- Yakıtın farklı sektörlerde kullanımını yaygınlaştırmak

- Yakıtın ekonomik değerini yükseltmek,
- Yakıtın kullanım ömrünü arttırmak,
- Sıfır emisyonlu, yüksek verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir sistemler elde etmek.

Hidrojenin birim kütle başına enerji kapasitesi yüksek olmakla birlikte (120 MJ/kg), hacimsel olarak değerlendirildiğinde hidrojenin enerji içeriği 8 MJ/L seviyesine düşmektedir. Hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğunun arttırılması ve birim hacimde daha yüksek enerji depolama kapasitesinin elde edilmesi amacıyla yüksek basınçta hidrojen depolama teknikleri uygulanmaktadır. Şekil 46'da artan basınç ile birlikte hidrojenin enerji yoğunluğundaki değişim ve gerekli hacim miktarları şematik olarak karşılaştırılmıştır. 350 bar basınçta hidrojen gazının yoğunluğu 22,9 g/L iken, 700 bar basınçta gazın yoğunluğu 39,6 g/L'ye yükselmektedir [59].



Şekil 46. *Yüksek basınçta sıkıştırma [58]*

ABD hidrojen depolama teknik takımı yol haritası raporuna göre yakıt pilli araçlara yönelik onboard hidrojen depolamada ulaşılması hedeflenen kapasite değerleri Tablo 10'da sunulmaktadır [60]. Buna göre hacimsel depolama kapasitesinin 2020 sonunda 1,0 kWh/L değerine ulaşması ve nihai hedef olarak da 1,7 kWh/L değerinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Depolama sistemi maliyetinin ise 2020 sonunda 10 $/kWh değerinde olması ve nihai hedef olarak maliyetin 8 $/kWh değerine düşürülmesi hedeflenmiştir. Tablo 11'de ise üç farklı tasarım seviyesine ulaşmış yakıt pilli araç modellerine ait depolama basıncı, menzil ve depolanan hidrojen kütlesi gibi teknik detayları sunulmaktadır. Perakende satışa açık olan dört modelin depolama basıncı 700 bar olup 4 kg ila 5 kg arasında hidrojen depolama kapasitesine sahiplerdir. Halka açık işletim ve konsept tasarım aşamasındaki araçlarda ise hidrojen kütlesi sırasıyla 7,8 kg ve 9,5 kg'a kadar artmaktadır.

Tablo 10. *Yakıt pilli araçlarda hidrojen depolama hedefleri ([60]'tan uyarlanmıştır)*

Depolama Parametresi	2020 Hedefi	2025 Hedefi	Nihai Hedef
Kütlesel Depolama Kapasitesi (kWh/kg)	1,5	1,8	2,2
Hacimsel Depolama Kapasitesi (kWh/L)	1,0	1,3	1,7
Depolama Sistemi Maliyeti ($/kWh)	10	9	8

Tablo 11. Yakıt pilli araçlarda hidrojen depolama teknolojileri ([60]'dan uyarlanmıştır)

Yakıt Pilli Araç	Depolama Teknolojisi	Menzil (mil)	Yıl	Depolanan H_2 Kütlesi (kg)
Tasarım Seviyesi: Perakende Satış				
Hyundai Tuscon	700 bar	265	2014	5,3
Toyota Mirai	700 bar	312	2015	4,8
Honda Clarity	700 bar	366	2016	5,4
Mercedes-Benz GLC F-Cell	700 bar	300	2017	4
Tasarım Seviyesi: Halka Açık İşletim				
Ford Focus	350 bar	200	2006	4,0
Chevrolet Equinox	700 bar	199	2007	4,2
Nissan X-trail	350 bar	229	2006	-
Kia Borrego	700 bar	470	2010	7,8
Toyota Highlander FCHV-adv	700 bar	350	2011	6,0
Tasarım Seviyesi: Konsept Tasarım / Demonstrasyon				
Ford Focus	700 bar	250	2010	5,0
VW Tiguan HyMotion	700 bar	142	2007	3,2
Chevrolet Sequel	700 bar	300	2007	7,7
Ford Explorer	700 bar	380	2011	9,5

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2015 yılı projeksiyonuna göre hidrojen depolama teknolojilerinin gelecek beklentileri Tablo 12'de sunulmaktadır. Buna göre, hidrojenin metal hibrit ve karbon nanotüplerde depolanmasına yönelik AR-GE fonlarının arttırılması hedeflenmiştir. Diğer taraftan yüksek basınçlı tanklarda depolama maliyetlerini 15 $/kWh altına çekme, tuz mağaralarında hidrojen depolaması ve hidrojen sıvılaştırmada enerji kayıplarının azaltılması 2030 hedefleri arasında gösterilmektedir.

Tablo 12. Hidrojen depolama teknolojileri 2030 hedefleri ([61]'dan uyarlanmıştır)

Depolama Tekniği	2030 Hedefi
Yer altında hidrojen depolama	Hidrojenin tuz mağaralarında depolanması
Basınçlı tanklar	Yüksek basınçlı tankların malzeme maliyetini 15$/kWh altına indirilmesi
Kriyojenik depolama ve sıvılaştırma	Enerji kayıplarını %30'a düşürerek hidrojen sıvılaştırma veriminin iyileştirilmesi
Metal hidritler ve karbon nano-yapılar	AR-GE fonlarının sürekliliğinin sağlanması

Tablo 13'te fiziksel ve malzeme temelli hidrojen depolama teknolojileri konusunda yürütülen çalışma başlıkları listelenmektedir. Ülkemizde ve yurtdışında araştırma yapılan konular burada belirtilmiştir. Buna göre ülkemizde gaz sıkıştırma ve kimyasal hidrojen depolama alanlarında yalnızca depolama ve konstrüksiyon malzemeleri konularında çalışma raporlanmıştır. Diğer taraftan metal hidritlerle hidrojen depolama alt başlığında ısıl yönetim ve hacimsel depolama kapasitesinin arttırılması konularında kısmen çalışmalar bulunduğu belirtilmiştir.

Tablo 13. Hidrojen depolama alanında Yurtdışında ve Türkiye'de gerçekleştirilen araştırma konuları [58]

KONU	Fiziksel Hidrojen Depolama Çalışmaları		Malzeme Temelli Hidrojen Depolama Çalışmaları		
	Gaz Sıkıştırma	Soğuk/kriyo Sıkıştırma	Metal Hidrit	Sorbent	Kimyasal
Depolama ve konstrüksiyon malzemeleri	Yurtdışında yaygın Türkiye'de kısmen	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın Türkiye'de kısmen
Maliyet azaltma çalışmaları	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın
Hidrojen depolamada ısı yönetimi	-	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın Türkiye'de kısmen	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın
Depolama tankı maliyeti ve tank kütlesi	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	-
Verim iyileştirme	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın
Kütlesel ve hacimsel kapasitelerin arttırılması	-	-	Yurtdışında yaygın Türkiye'de kısmen	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın
Kriyojenik tank işletimi	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	-	-	-
Karbon-fiber maliyetinin azaltılması	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın
Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın	Yurtdışında yaygın

Tablo 14'te farklı tip hidrojen depolama teknolojilerinin gelecekte ulaşması hedeflenen çalışma koşulları, depolama yoğunlukları ve maliyetleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu hedeflere ulaşma noktasında AR-GE-inovasyon desteği verilen ve öne çıkan çalışma konuları ise Tablo 15'te listelenmektedir.

Tablo 14. Hidrojen depolama sistemlerinin geleceği ([62]'den uyarlanmıştır)

Depolama Teknolojisi	Hacimsel Yoğunluk (kgH_2/m^3)	İşletme Basıncı (bar)	İşletme Sıcaklığı (K)	Maliyet (USD/kgH_2)
Gaz sıkıştırma	17 – 33	350/700	Çevre	400 – 700
Kriyojenik	35 – 40	1	20	200 – 270
Kriyo-sıkıştırma	30 – 42	350	20	400
Kompleks hidritler	<120	1 – 50	423 – 573	300 – 450
Kimyasal hidritler	30	1	353 – 473	160 – 270
Metal hidritler	<150	1 – 30	Çevre – 553	>500
Sorbentler	20 – 30	80	77	-

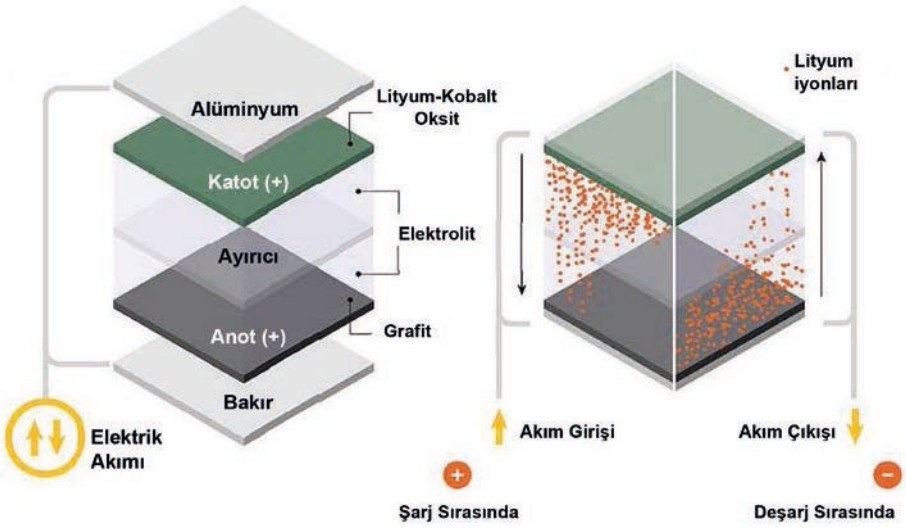
Tablo 15. Hidrojen depolama konusunda AR-GE inovasyon gereksinimi olan çalışma konuları [58]

ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR	Yeraltında	Kriyojenik sıkıştırma/ sıvılaştırma absorbsiyon	Zeolitik	Rechargable metal hidrit	Amonyak esaslı
Depolama malzemeleri ve ortamı	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Konstrüksiyon malzemeleri		AR-GE İnovasyon Gereksinimi		AR-GE İnovasyon Gereksinimi	
Kriyojenik tank işetimi		AR-GE İnovasyon Gereksinimi			
Karbon-fiber maliyetinin zazaltılması		AR-GE İnovasyon Gereksinimi		AR-GE İnovasyon Gereksinimi	-
Kütlesel ve hacimsel kapasitesinin arttılması	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Depolama yöntemleri arası entegrasyon	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Onboard/offboard uygulama potansiyeli	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Maliyet azaltma	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Isı yönetimi	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Dijitalleşme kabiliyeti	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Akıllı işletim ve depolama kabiliyeti	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Yüksek verimli sıfır emisyonlu ve düşük karbonlu olma kabiliyeti	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				
Güvenlik ve sürdürülebilirlik boyutu	AR-GE İnovasyon Gereksinimi				

2.8. Batarya Teknolojisi

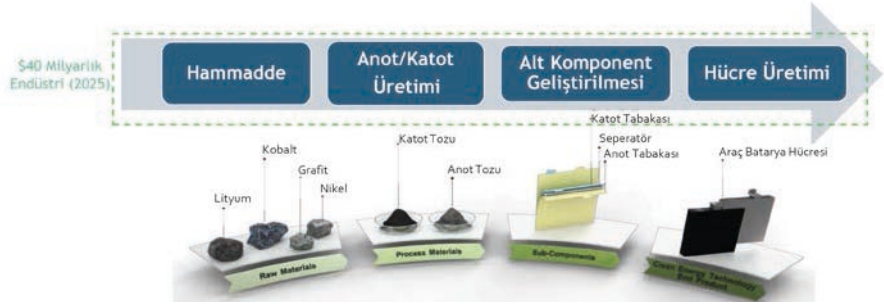
Piller, elektrik enerjisini elektrokimyasal enerjiye dönüştürerek depolayan ve istendiği anda da depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak geri verebilen depolama sistemleridir. Birden çok pilin birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelen sistemlere batarya denir. Piller, bir veya daha fazla elektrokimyasal hücre veya akış hücreleri gibi, elektrokimyasal aygıtlardan oluşur. Cep telefonu, radyo, dizüstü bilgisayar vb. elektronik cihazlardan, elektrikli araçlara, uydu ve uzay sistemlerinden, haberleşme sistemleri ve savunma sistemlerine kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Pil hücresi, metal anot (*negatif elektrot*), metal oksit katyon (*pozitif elektrot*) ile iki elektrot arasında kimyasal reaksiyonu sağlayan elektrolitten ibarettir. Anot, elektrolizde aşınırken katotta iyonik değişim reaksiyonu sonucu elektrik akımı meydana gelir. Bu reaksiyon sonucu oluşan elektrik enerjisi çeşitli aletlerde kullanılır. Şekil 47'de batarya komponentleri ile depolama (*şarj*) ve geri kullanım (*deşarj*) süreçlerindeki iyon hareketlerinin yönü şematik gösterilmektedir.



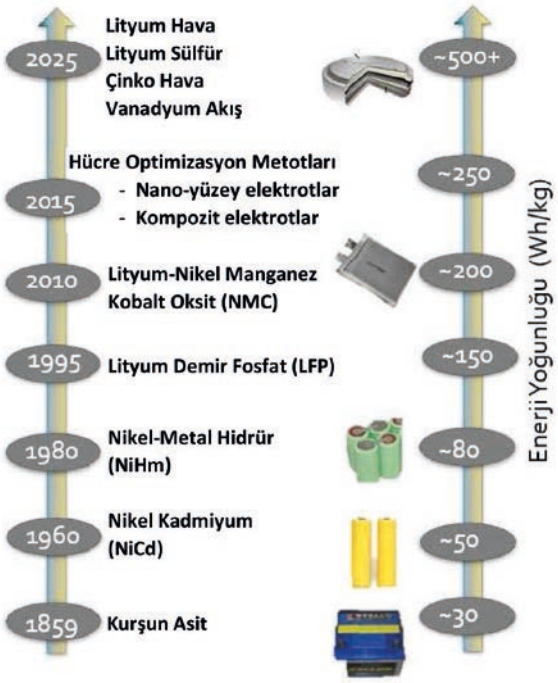
Şekil 47. *Batarya bileşenleri ve şarj/deşarj süreci ([63]'ten uyarlanmıştır)*

Batarya hücrelerinin hammaddeden hücreye dönüşüm sürecindeki temel aşamaları Şekil 48'de gösterilmektedir. İlk aşamada lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi malzemeler ham olarak temin edildikten sonra saflaştırma veya farklı özelliklerinin iyileştirilmesi için özel işlemlerden geçirilmektedir. Maddelere gerekli özelikler kazandırıldıktan sonra anot ve katot üretimi safhasına geçilmektedir. Anot folyo, grafit kaplı bakırdan üretilirken, katot folyo ise lityum-metal-oksit kaplı alüminyumdan imal edilmektedir. Alt bileşenlerin geliştirilmesi safhasında aktif malzemeler ve ayırıcı tabakalar haline dönüştürülür. Katot ve anot levhaları arasına elektrolit çözeltisi yerleştirilerek iyonların serbest şekilde hareket etmesine imkân verilir. Katot-ayırıcı-anot katmanları sarılarak veya istiflenerek tek bir batarya hücresini meydana getirir. Hücreler geliştirildikten sonra seri veya paralel formda istiflenerek voltaj ve elektrik depolama kapasitelerinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Son işlem olarak batarya ve ısıl yönetim kontrolcüleri ilave edilerek hücrelerin eş ve güvenilir çalışma koşullarda tutulması sağlanmaktadır. Daha sonrasında modüller istenen güç seviyesinin elde edilmesi amacıyla bir araya getirilerek aküyü veya pili oluşturmaktadır.



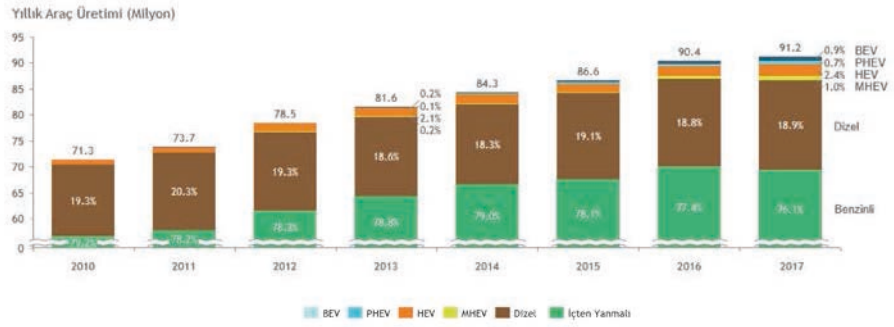
Şekil 48. *Batarya geliştirme sürecinin temel aşamaları [64]*

Uygulamada farklı tipte bataryalar kullanılmaktadır, yaygın olarak tercih edilenler *(i) Kurşun-asit*, *(ii) Nikel-kadmiyum (Ni-Cd)*, *(iii) Nikel–metal hidrat (Ni-MH)*, *(iv) Sodyum Sülfür (NaS)*, *(v) Sodyum Nikel Klor (Na-$NiCl_2$)* ve *(vi) Lityum-iyon (Li-ion)*. Şekil 49'da batarya kimyasal gelişim süreci ve batarya enerji yoğunluğunun yıllar içerisindeki değişimi bir arada verilmektedir.



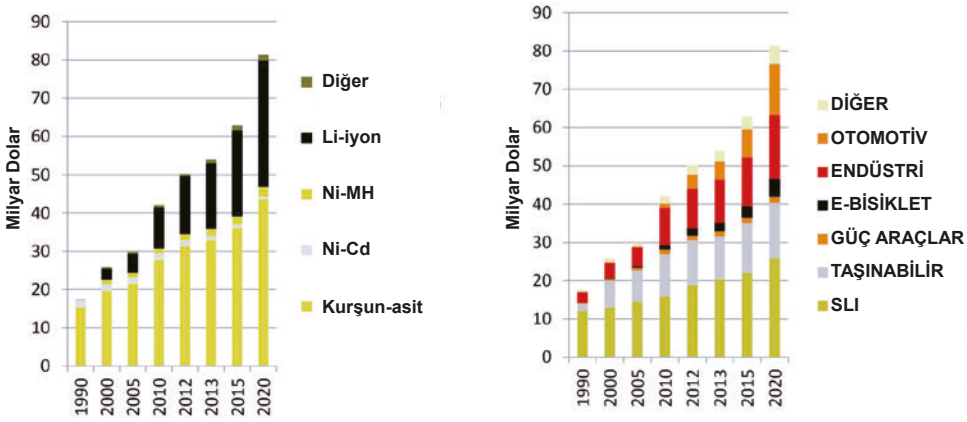
Şekil 49. *Batarya kimyasal gelişim süreci [64]*

IRENA raporuna göre 2016 yılı sonunda fotovoltaik destekli elektrik üretiminde 55 milyondan fazla konutta batarya kullanılmaktadır ve böylece 275 milyondan fazla insan güneş destekli evsel enerji tüketimini karşılayabilmektedir. Taşımacılıkta düşük karbonlu veya sıfır karbonlu çözümlerde de Dünya genelinde hızlı değişimler gözlenmektedir. 2016 yılı sonu itibariyle elektrikli araç sayısı 2 milyonun üzerine çıkmıştır. 2018 itibariyle ise elektrikli araç global satışları %6'nın üzerine çıkmıştır [9]. Şekil 50'de 2010- 2017 yılları arasındaki yıllık araç üretimi ile farklı tip elektrikli araçların toplam üretimdeki paylarında yaşanan değişimler gösterilmektedir. Burada BEV, PHEV, HEV ve MHEV kısaltmaları sırasıyla bataryalı elektrikli araç (BEV), plug-in hibrit elektrikli araç (PHEV), hibrit elektrikli araç (HEV) ve yarı-hibrit elektrikli araç (MHEV).



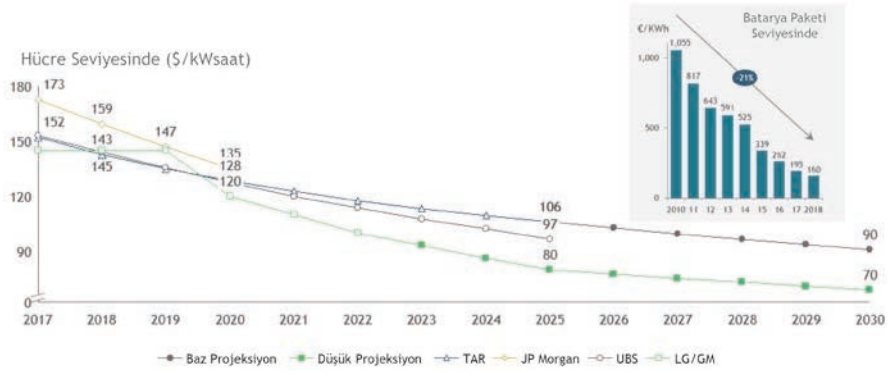
Şekil 50. *Elektrikli araçların yıllık araç üretimdeki paylarının yıllara göre değişimi ([65]'ten uyarlanmıştır)*

İki veya üç tekerlekli elektrikli araç sayısı ise dünya genelinde 250 milyonun üzerindedir. Sadece Çin'de 300000 adet elektrikli otobüs bulunmaktadır. Batarya pazarı büyük oranda kurşun asit akülerce karşılanmaktadır. Bununla birlikte lityum iyon bataryalar artan depolama gereksinimi ile pazar payını sürekli arttırmaktadır. Şekil 51'de batarya pazarındaki farklı tip pillerin paylarındaki değişimler ile sektörel kullanımdaki çeşitlilik gösterilmektedir.



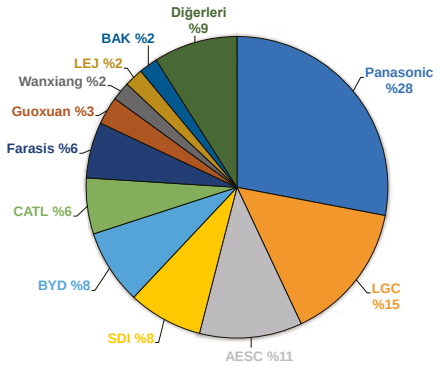
Şekil 51. Batarya pazarının yıllar içerisindeki değişimi ([66]'dan uyarlanmıştır)

2018 yılı itibariyle 70 GigaWatt-saat'lik (GWh) elektrikli araç bataryası üretilmekte olup bu kapasitenin yarısı Çin'de, geri kalanı ise çoğunlukla Amerika, Kore ve Japonya'da olmaktadır. Sadece Çin'de altmışın üzerinde batarya üreticisi olup CATL ve BYD, Çin üretiminin yarısını oluşturmaktadır. Elektrikli araç batarya maliyetleri hâlâ yüksek olup hızlı bir şekilde düşmektedir 2010 yılında 1000 $/kWh civarında olan Li-ion batarya maliyetleri hızlı bir şekilde günümüzde hücre seviyesinde 150 $/kWh'ın altına inebilmektedir. 2025 yılında bu rakamın 100 $/kWh'lere düşeceği tahmin edilmektedir. Yıllara göre değişim Şekil 52'de verilmektedir. Şekil 53'te ise mevcut binek elektrikli araçlardaki batarya kapasitelerinin OEM firmalarına göre dağılımı sunulmaktadır.



(Verilerin derlendiği kaynaklar: BCG analizi, TAR raporu, JP Morgan Global xEV Components raporu, UBS Future of Powertrain raporu, GM yıllık konferansı)

Şekil 52. Li-ion batarya maliyetinin yıllar içerisinde değişimi [64]



Şekil 53. Binek elektrikli araçlarda batarya kapasite oranları ([67]'den uyarlanmıştır)

Lityum-iyon ticari olarak yaygınlaşıp ucuzladıkça araştırmacılar daha farklı çözümlere yönelmeye başlamıştır. Bu alternatifler katı elektrolitli bataryalar, lityum sülfürler, metal hava çözümleri ve diğer alternatiflerdir. Türkiye elektrik enerjisi depolama konusunda sınırlı girişime sahiptir. Bu alandaki çalışmalar yenilenebilir enerjinin kullanım imkânını arttırmak için şebekeye entegre elektrik depolama sistemleri geliştirme ve otomotiv alanındaki elektriklendirmedir. Türkiye'de yenilenebilir kaynak kullanımı güneş ve rüzgârda 10000 MW'ı geçmiştir. Bu artış şebeke üzerindeki bozucu etkileri tetiklemektedir. Bunlardan kaçınmak için elektriği depolama önemli açılımlar sunmaktadır. Şebeke düzeyinde depolamanın yanında, yerli araç hedefi olan ülkemizde bu alanda başarı elektriklendirmiş araçların en önemli parçası olan bataryalarda da bir strateji geliştirmeye bağlıdır.

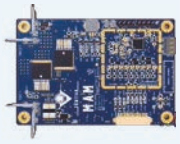
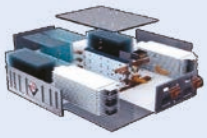
Dünya araç üretimi yıllık 98 milyon civarındadır. Bu üretim içinde Türkiye 1,5-1,8 milyon üretimle Dünya üretiminin %1,74'ünü yapmaktadır. Bu değerle Dünya'da 14. sırada bulunurken Avrupa'da en büyük 6. üreticidir. Elektrikli araç üretimi yıllık bir milyon adete ulaşmış olup hızla artmaktadır. Şu an için Dünya genelinde 3 milyondan fazla elektrikli araç trafiktedir. Dünya araç parkı 1,5 milyar civarında olup elektrikli araçlar %0,21 kadardır. Avrupa Birliğinde 2025 yılı sonrası yaklaşık 250 milyar € batarya pazarı oluşacağı, bu alanda 10 – 20 tane "Gigafactory" kurulacağını öngörmektedir. 2008'den bu yana depolama alanında 135 projeye 555 milyon € destek verdikleri belirtilmektedir. 2030 yılına kadar sistem verimliliklerinin %90'ın üzerine çıkarılması yönünde hedeflerinin olduğu, 100 kWh'lik bir sistem için depolama sistem maliyetlerinin 150 €/kWh'in altına düşürüldüğü vurgulanmaktadır. Bazı ülkelerin batarya depolamayla ilgili kurulu güçleri ve bu konudaki hedefleri Tablo 16'da verilmektedir.

Tablo 16. *Ülkelerin Depolama Durumları [64]*

OEM	Kurulacak Ülke / Bölge	Ek Fabrika Kapasitesi Beyanı (GWh/yıl)
Panasonic	Amerika Birleşik Devletleri	35 GWh/yıl (2020)
CATL	Çin	24 GWh/yıl ve 18 GWh/yıl (2020)
	Avrupa	14 GWh/yıl (2021) 98 GWh/yıl (kuruluş tarihi açıklanmamakta)
BYD	Çin	24 GWh/yıl (2019) 20 GWh/yıl ve 30 GW/yıl (2023) 10 GWh/yıl (kuruluş tarihi açıklanmamakta)
LG Chem	Avrupa	15 GWh/yıl (2022)
	Çin	32 GWh/yıl (2023)
SK Innovation	Çin	7,5 GWh/yıl (2020)
	Avrupa	7,5 GWh/yıl (2021)
	Amerika Birleşik Devletleri	9,8 GWh/yıl (2022)
LIBCOIN/BHEL	Hindistan	30 GWh/yıl (2025 – 2027)
Samsung SDI	Avrupa	1,65 GWh/yıl (2020)
Northvolt	Avrupa	32 GWh/yıl (2023)
Lithium Werks	Çin	8 GWh/yıl (2021)

Ülkemizde TÜBİTAK-MAM (Marmara Araştırma Merkezi) bünyesinde elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar için pil, modül ve bataryalar üretimi, lityum-iyon, lityum-hava ve lityum-sülfür pil uygulamaları için elektrot geliştirme, ısıl ve elektriksel batarya yönetim sistemi tasarımı ve üretimi, pilot ölçekli lityum iyon pil üretimi, magnezyum bakır iyodür batarya ve süper-kapasitör geliştirme ile elektrik şebeke dengeleme uygulamalarına yönelik enerji depolama sistemleri konularında aktif çalışmalar yürütülmektedir [68]. Merkez 2250 m^2 ofis ve 3800 m^2 laboratuvar olmak üzere toplamda 6050 m^2 kapalı alana kuruludur. Araç Teknolojileri ve Batarya Teknolojileri grupları bünyesinde farklı projelerde çalışan konusunda uzman kırkın üzerinde araştırmacı bulunmaktadır. Merkez bünyesinde malzeme geliştirme, elektrot üretimi, hücre üretimi ve prototip geliştirme konularında laboratuvarlar bulunmaktadır. Batarya teknolojileri konusunda merkez bünyesinde sunulan ürünler, görselleri ve teknik özellikleri Tablo17'de sıralanmaktadır.

Tablo 17. TÜBİTAK MAM tarafından geliştirilen batarya ürünleri [68]

Ürün	Görsel	Tanım	Özellik	Kullanım Alanı
Batarya Yönetim Sistemi		Li-ion Hücrelerin 7 seri 3 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş 16 adet batarya modülünün bir araya getirilmesi ile meydana gelen batarya paketi	• +12 V besleme • 4 adet 5 A röle çıkışı • 2 adet 10 A röle çıkışı • 2 CAN hattı • 5 dijital giriş/çıkış • 5 analog giriş (12 bit) • 80 MHz çalışma frekansı • 32 KB RAM, 16 KB Flash	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
Bağımsız Çalışan Batarya Yönetim Sistemi		Li-ion Hücrelerin 7 seri 3 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş 16 adet batarya modülünün bir araya getirilmesi ile meydana gelen batarya paketi	• 8 hücreye kadar destekleme • Stand-alone çalışma • Elektriksel korumalar • Yüksek akım, kısa devre akım • Yüksek/düşük gerilim • Yüksek sıcaklık • Pasif gerilim dengeleme. • I2C üzerinden konfigüre edilebilme.	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
Batarya Paketleri Üretimi		Elektrikli araç bataryalarından torpido bataryalarına kadar geniş kullanım alanına sahip çeşitli seri/paralel konfigürasyonlarda batarya paketleri üretimi	• 5 Wh - 100 kWh arası enerji kapasitesi seçenekleri • Azami 360 V gerilim • Azami 60 Ah kapasite • % 50/50 su-glikol soğutma sistemi • Yıldız topoloji batarya yönetim sistemi • İhtiyaca göre konfigürasyon	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
12s/2p Batarya Modülü		Li-ion Hücrelerin 12 seri 2 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş batarya modülü	• Konfigürasyon: 12 Seri / 2 Paralel • Boyut : 145 x 298 x 392 mm • Gerilim : 43.8 V • Kapasite : 75 Ah • Ağırlık : 29 kg • Enerji : 3.285 Wh • Enerji Yoğunluğu: 113 Wh/kg • Soğutma Sistemi : % 50/50 su-glikol	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
7s/8p Batarya Modülü		Li-ion Hücrelerin 7 seri 8 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş batarya modülü	• Konfigürasyon: 7 Seri / 8 Paralel • Boyut: 535 x 300 x 170 mm • Gerilim: 25.9 V • Kapasite: 104 Ah • Ağırlık: 25 kg • Enerji: 2693.6 Wh • Enerji Yoğunluğu: 107,74 Wh/kg • Soğutma Sistemi: % 50/50 su-glikol	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
21,12 kWh Batarya Paketi		Li-ion Hücrelerin 11 seri 2 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş 30 adet batarya modülünün bir araya getirilmesi ile meydana gelen batarya paketi	• Konfigürasyon: 10S/3P Modül(11S/2P) • Boyut: 1302 x 632 x 541 mm • Gerilim: 352 V • Kapasite: 60 Ah • Ağırlık: 300 kg • Enerji: 21,12 kWh • Enerji Yoğunluğu: 70 Wh/kg • Soğutma Sistemi: % 50/50 su-glikol	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
21,5 kWh Batarya Paketi		Li-ion Hücrelerin 7 seri 3 paralel konfigürasyonuyla oluşturulmuş 16 adet batarya modülünün bir araya getirilmesi ile meydana gelen batarya paketi	• Konfigürasyon: 16S Modül(7 Seri / 3 Paralel) • Boyut: 535 x 300 x 170 mm • Gerilim: 360 V • Kapasite: 60 Ah • Ağırlık: 300 kg • Enerji: 21,5 kWh • Enerji Yoğunluğu: 72 Wh/kg • Soğutma Sistemi: % 50/50 su-glikol	Otomotiv Sanayi Genel Kullanım
Lityum İyon Pil Üretim Tesisi Kurulumu		Anot ve katot aktif maddelerinden elektrotların tasarımı ve üretimi, elektrotlardan pilin tasarımı ve üretimine yönelik üretim altyapısının tasarlanması, devreye alınması ve üretim faaliyetlerinin organize edilmesi	• Prizmatik tipte 100 Ah kapasiteye kadar lityum iyon pillerin üretimi için fabrika kurulumu • Silindirik tipte (18650, 26650, 32650, 21700, vb. boyutlarda) lityum iyon pillerin üretimi için fabrika kurulumu • Pouch tipte 100 Ah kapasiteye kadar lityum iyon pillerin üretimi için fabrika kurulumu	Enerji, Otomotiv, Elektronik Sanayi

3. DEĞERLENDİRME

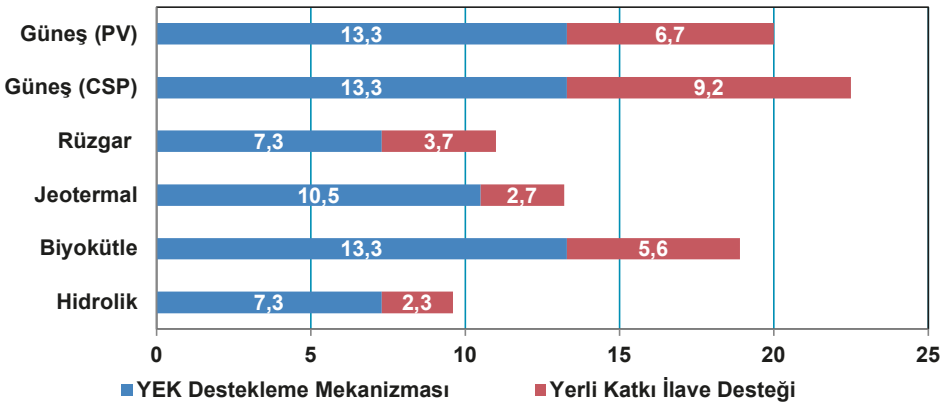
3.1. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bazında 160000 GWh/yıl hidrolik kapasitesi (barajlı ve akarsu tip dâhil), 48000 MW rüzgâr kapasitesi, (38000 MW on-shore/kara ve 10000 MW off shore/deniz), 1500 kWh/m^2-yıl ortalama küresel güneş ışınımı (güney bölgelerde yer yer 1900-2000 kWh/m^2-yıl seviyelerine çıkmaktadır), 31500 MWt jeotermal kapasitesi - 2000 MW elektriksel üretime uygun, 8,6 MTEP (1100018 MWh) biyokütle potansiyeline, 1,5-2 MTEP (17500 - 23260 MWh) biyogaz potansiyeline sahip olduğuna ilişkin kaynak tahmini yapılmaktadır. Ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2019 yılı ilk yarısı itibarıyla 7957'ye (*lisanssız santraller dahil*) yükselmiştir. Mevcut santrallerin 664 adedi hidroelektrik, 67 adedi kömür, 257 adedi rüzgâr, 48 adedi jeotermal, 327 adedi doğal gaz, 6349 adedi güneş, 245 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir [69]. 2023 yılında elektrik enerjisi ihtiyacımızın yaklaşık 414 milyar kWh olacağı ve elektrik enerjisi kurulu güç kapasitemizin 110000 MW'ın üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Bu elektrik ihtiyacının en az %30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) karşılanması hedeflenmektedir. Elektrik Enerjisi Arz Güvenliği Strateji Belgesi'ne göre yenilenebilir kaynakların elektrik enerjisi üretimi içindeki payının 2023 yılında en az %30 düzeyinde olmasının sağlanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda Tablo 18'den de görüleceği üzere 2023 yılında, hidroelektrikte 34000 MW, rüzgârda 20000 MW, güneşte 5000 MW, jeotermalde 1000 MW, biyokütlede 1000 MW olmak üzere toplamda 61000 MW kurulu güce erişilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 18. *Türkiye 2023 kurulu güç hedefleri [53]*

Kaynak	2016 (MW)	2023 (MW)
Hidroelektrik	26137	34000
Rüzgar	4562	20000
Güneş	328	5000
Jeotermal	635	1000
Biyokütle	344	1000
Toplam	**32006**	**61000**

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), bu hedeflere ulaşabilmek için; lisanssız üretimler, lisanslı üretimler ve Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) uygulamalarını başlatmıştır. Özellikle, enerji arzında dışa bağımlılığı azaltmak üzere Yerli ve Yenilenebilir enerji kaynaklarımızın azami ölçüde kullanılmasını teşvik etmek amacıyla YEK Destekleme Mekanizması (YEKDEM) yürürlüğe konmuştur. Buna göre, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin teşvik edilmesi amacıyla 31 Aralık 2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı tesisler için, on yıl süreyle alım garantisi uygulanmaktadır. Bakanlık, YEKDEM'e ilave olarak 2023 yılı için belirlediği yenilenebilir hedeflerine ulaşma yolunda yaptığı çalışmalar yanında aynı zamanda bu sektörlerde kullanılan aksamın yerlileştirilmesi/millileştirilmesi yönünde de çalışmalar yapmaktadır. Buna göre yerli üretim teşviki kapsamında belirtilen mekanik ve elektromekanik aksamın yurt içinde imal edilmiş olması halinde; YEKDEM fiyatlarına ilave olarak tesisin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle yerli katkı ilave desteği uygulamasını başlatmıştır (Şekil 54). Bu destek, 2020 yılına kadar işletmeye giren YEK'e dayalı elektrik üretim santrallerinde yurt içinde üretilmiş YERLİ MALI belgesine sahip ekipmanların kullanılması durumunda işletmeye girdiği yıldan itibaren 5 yıl boyunca uygulanmaktadır.



Şekil 54. YEKDEM ve yerli katkı ilave desteği miktarları ([69]'dan uyarlanmıştır)

Bu destekler ve yapılan Yenilenebilir Enerji Kaynakları Alanları (YEKA) yarışmaları sonucunda; RES için jeneratör, kule, kanat ve kule bağlantı elemanları; GES için taşıyıcı yapı; HES için salyangoz, türbin muhafaza gövdesi ve dağıtıcı boru, türbin çarkı ve türbin mili, ayar kanatları ve nozul, servomotor, governor (hız regülâtörü), emme borusu ve zemine bağlantı elemanları, jeneratör; JES için gaz türbini, ekzoz sistemi, yağlama sistemi, hız kontrol sistemi ve buhar ejektörü; BES için ise gaz türbini, ekzoz sistemi, yağlama sistemi, hız kontrol sistemi, gazlaştırma ve gaz temizleme grubu, kojenerasyon sistemi ve akışkan yataklı buhar kazanı üretilir duruma gelmiştir.

3.2. Türkiye'de Büyük Ölçekli Doğal gaz Depolama Projeleri

Türkiye doğal gaz arz-talep dengesi dikkate alındığında yıllık gaz talebinin karşılanmasında herhangi sorun bulunmamaktadır. Ancak, talebin yoğun olduğu kış aylarında ve talebin en üst noktaya çıktığı dönemlerde kaynak ülkelerdeki veya güzergâh ülkelerdeki aksamaların neden olabileceği dönemsel arz-talep dengesizliklerini ortadan kaldırmak için çalışmalar sürdürülmektedir.

Kuzey Marmara ve Değirmenköy Sahası

Bu kapsamda, kapasitesi 2,84 milyar Sm^3 olan Silivri, Kuzey Marmara ve Değirmenköy Doğal Gaz Depolama Tesisinin toplam depolama kapasitesinin 4,6 milyar Sm^3'e, geri üretim kapasitesinin ise 75 milyon Sm^3/gün'e çıkarılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir (Şekil 55). Bu kapsamda, Türk Petrolleri Anonim Ortaklığı (TP) mevcut tesislerin depolama ve geri üretim kapasitelerinin iki aşamada (Faz II ve III) artırılmasını öngörmüştür. Doğal gaz arz ve sistem güvenliğinin sağlanmasında depolama faaliyetinin iletim faaliyeti ile entegre şekilde sürdürülmesini teminen, 20.05.2016 tarih ve 2016/T-12 sayılı Yüksek Planlama Kurulu Kararı ile; Silivri Kuzey Marmara ve Değirmenköy Yer altı Doğal Gaz Depolama Tesisi ve Faz III ile TP'ya ait doğal gaz depolama alanı olarak kullanılabilecek tükenmiş/tükenecek doğal gaz ve petrol yataklarının, Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. Genel Müdürlüğüne devredilmesine karar verilmiştir [70].

10 MW gücünde iki adet kompresör Kuzey Marmara Sahası, 5 MW gücündeki bir adet kompresör Değirmenköy Sahası için kullanılmakta olup, 10 MW'lık bir kompresör de her iki sahaya da hizmet verecek şekilde yedek olarak tasarlanmıştır. Doğal gaz, kompresörlerde basınçlandırıldıktan sonra 3,2 km uzunluğunda 20″ boru hattı ile Kuzey Marmara Sahası'na ve 13,2 km uzunluğunda 16″ boru hattı ile de Değirmenköy Sahası'na ulaşmaktadır. Her iki sahada pig launcher (atıcı) sistemi, Depolama Tesisinde ise pig receiver (tutucu) sistemleri mevcuttur. Sahalardaki toplama manifolduna ulaşan doğal gaz Kuzey Marmara Sahası'nda bulunan 11 adet ve Değirmenköy Sahasında bulunan 9 adet kuyu kullanılarak rezervuarlara basılmaktadır. Kuyu başlarından sahalardaki toplama manifolduna gelen doğal gaz, Kuzey Marmara Sahası'nda ön ayırmaya tabii tutulmaksızın ve Değirmenköy Sahası'nda ise ön ayırmaya yapıldıktan sonra, sırasıyla 20″ ve 16″ boru hatları ile Depolama Tesisi'ne ulaşmaktadır. Doğal gaz,

Depolama Tesisine ulaştıktan sonra sıvı tutuculardan geçirilmektedir. Sıvı tutucular, özellikle iki fazlı akış rejimi ve boru hattı profilinden kaynaklanan, sıvıları toplamak için kullanılmaktadır. Kuzey Marmara ve Değirmenköy Sahalarında kuyulardan ilk üretimin başlangıç anında ve Değirmenköy Sahası'ndan düşük gaz akış debilerinde üretim yapıldığı dönemlerde (özellikle düşük toprak sıcaklıklarında), kuyulardan gelen doğal gaz sıvı tutuculardan sonra su banyolu ısıtıcılarda ısıtılmaktadır. Bu amaçla, üç adet ısıtıcı kullanılmaktadır. Gaz basıncı, Ulusal İletim Şebekesi basıncının üzerinde olacak şekilde düşürülmektedir. Basınç düşürme işleminin sonunda, sıcaklık düşümü ve gazın yoğuşma özelliklerine bağlı olarak oluşan sıvılar (hidrokarbon ve su) yüksek basınç separatörlerinde faz separasyonuna tabii tutulmaktadır. Basınç düşürme ve yüksek basınç separatöründen sonra gaz, 39 bar (g)'de -8°C olan boru hattı su çiğlenme noktası spesifikasyonunu sağlaması için gaz dehidrasyon ünitesinde kurutulmaktadır. Gaz içerisinde buhar halinde bulunan su, glikol dehidrasyon kulesinde %98,8 saflıktaki trietilen glikol (TEG) tarafından absorbe edilmektedir. Gazdan ayrıştırılan suyun içinde çözülmüş halde bulunan TEG ise, rejenerasyon sisteminde işlemden geçirilmek suretiyle, içindeki su buharlaştırılarak tekrar kullanıma hazır hale getirilmektedir. Kurutulan gaz daha sonra hidrokarbon çiğlenme noktası ayarlama ünitesine (soğutma ünitesi) yönlendirilmektedir. Ayarlama ünitesi, 67,5 bar (g)'de 0°C olan boru hattı hidrokarbon çiğlenme noktası spesifikasyonunu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Kurutma ve hidrokarbon çiğlenme noktası ayarlama üniteleri kompresör ünitelerinden önce yer almaktadır. Buradan çıkan gaz, ihtiyaç duyulması halinde kompresör ünitelerine yönlendirilmekte, ardından ölçümü yapılarak Ulusal İletim Şebekesine sevk edilmektedir [70].



Şekil 55. *Kuzey Marmara doğal gaz depolama tevsii projesi [70]*

Tuz Gölü Doğal Gaz Yer Altı Depolama Projesi

Yapım çalışmaları devam etmekte olan Tuz Gölü Doğal Gaz Yer Altı Depolama Projesinde ilk faz tamamlanmış ve doğal gaz depolanmaya başlanmıştır. 2023 yılı itibarıyla bu yer altı deposunun toplam çalışma gazı kapasitesi 5,4 milyar Sm^3'e ve geri üretim kapasitesi 80 milyon Sm^3/gün'e çıkarılacaktır. Tuz Gölü Yer Altı Doğal Gaz Depolama Projesi, Tuz Gölü'nün yaklaşık 40 km güneyinde, Aksaray ili, Sultanhanı Beldesi yakınlarında gerçekleştirilecektir. Yıllar önce bu bölgede yapılan çalışmalarda kalın tuz katmanlarına rastlanmış ve bölgenin depolama amaçlı kullanılabilirliği araştırılmıştır. 2000 yılında ise bölgede üç boyutlu sismik araştırma yapılmış ve çeşitli numuneler alınmıştır. Elde edilen sismik bilgiler ışığında bölgedeki tuz katmanlarının depolama amaçlı kullanılabileceği saptanmıştır. Proje kapsamında, yerin 600-700 metre altında başlayan ve kalınlığı ortalama 1500 metre olan tuz tabakasında yaklaşık 1100 - 1500 metre arası derinliklerde açılacak kuyulara tatlı su basılıp tuzun erimesi sağlanarak, yaklaşık 630000 m^3 fiziksel hacimde boşluklar oluşturulacaktır [71].

Depoların oluşturulması için çözeltme işleminde kullanılacak su, 120 km'lik boru hattı ile Hirfanlı Barajı'ndan getirilecek olup, işlemden çıkan tuzlu su ise Tuz Gölü'ne aktarılacaktır. Projenin en önemli noktalarından biri olan tuzlu su deşarjı ile her geçen yıl kurumakta olan Tuz Gölü'ne de aynı zamanda hayat verilecektir. Projede Dünya Bankası kriterleri doğrultusunda, çevresel etkileri adım adım izlemek ve kontrol etmek amacıyla hazırlanmış olan Çevresel Yönetim Planı (Environmental Management Plan) takip edilmektedir. Projede 6'şarlı 2 grup halinde 12 adet deponun yapılması planlanmakta olup, her bir depoda yaklaşık 80 milyon m^3 işletme gazı depolanacak şekilde toplam olarak yaklaşık 1 milyar m^3 işletme gazı depolanabilecektir. Depolarda maksimum basınç 210 bar civarında olacaktır. Proje devreye girdiğinde bu depolara, Nisan-Ekim döneminde günde 30 milyon m^3 gaz basılacak ve Ekim-Mart döneminde depolardan sisteme günde 40 milyon m^3 gaz verilebilecektir. Projenin ihale çalışmaları Dünya Bankası ile imzalanan kredi anlaşması kapsamında Dünya Bankası İhale Mevzuatına göre sonuçlandırılarak ilgili firma ile 15 Haziran 2011 tarihinde yapım sözleşmesi imzalanmıştır. Proje kapsamında; tatlı su temin ve tuzlu su deşarj boru hatlarının inşası, elektrik nakil hatları, 3 adet pompa istasyonu ve 5 adet su deposu, çözeltme işlemine yönelik yüzey tesisleri ile 12 kuyunun sondajı tamamlanmış olup; detay mühendislik çalışmaları, satınalma faaliyetleri, tesis binalarının ve diğer yüzey tesislerinin yapımı, 6 adet kavernanın çözeltme (leaching) işlemi devam etmektedir [71]. Şekil 56'da Tuz gölü doğal gaz yer altı depolama projesi şantiyesi görüntüsü verilmiştir.

Bir ilk olarak arz kaynakları ve güzergâhlarının çeşitlendirilmesi amacıyla, Yüzer LNG Depolama ve yeniden Gazlaştırma Tesisi (FSRU)'ları Aliağa/İzmir ve Dörtyol/Hatay'da işletmeye alınmıştır. Üçüncü Yüzer LNG Depolama ve Gazlaştırma Ünitesi (FSRU)'ya Sistemine yönelik çalışmalar ise devam etmektedir [72].



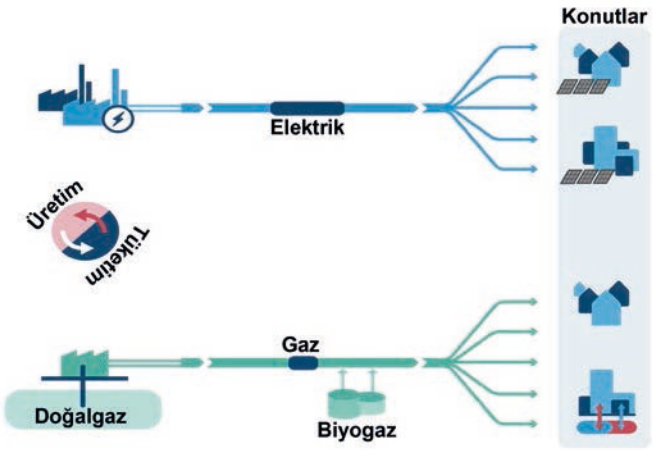
Şekil 56. *Tuz gölü doğal gaz yer altı depolama projesi 71]*

3.3. Enerji Depolamada Yeni Trendler

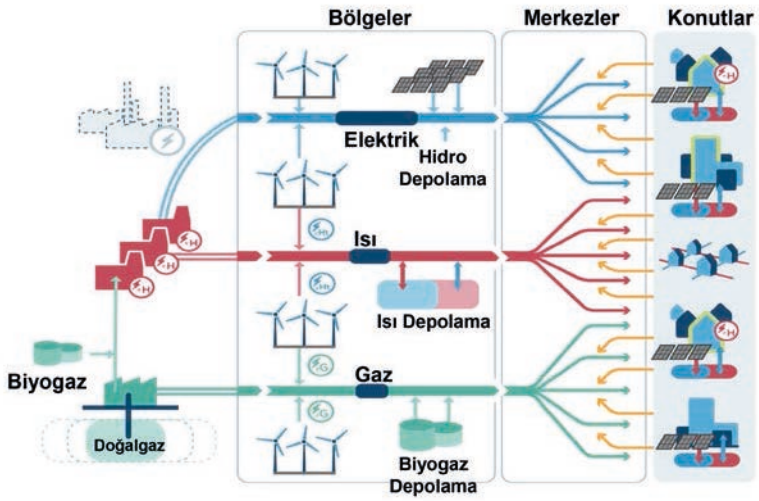
Enerjide yerinden üretim (*decentralization*); geleneksel olarak büyük enerji santrallerindeki üretimin küçük tüketicilere dağıtımı yerine, küçük çaplı yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolaması ve esnek talep yönetimi sayesinde tüketim noktasındaki üretimin artması ve geleneksel merkezi elektrik şebekesinin yerine yeni bir şebeke anlayışıdır. Şekil 57'de geleneksel merkezi güç üretim sistemleri ile yeni nesil geleceğin güç üretim sistemleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yeni nesil enerji üretim yaklaşımında öne çıkan öğeler şu şekilde listelenmektedir [73]:

- Akıllı şebekeler
- Bölgesel yenilenebilir enerji santralleri
- Hem üreten hem tüketenler: "*Prosumer*"
- Yüksek verimli sanayi süreçleri
- Veri yönetimi ve kontrolü
- Enerji depolama

Enerji arz/talep dengesinin sağlanması noktasında en önemli nokta mekanik, ısıl veya kimyasal formda enerjinin depolaması ve akıllı şebekeler ile veri yönetim uygulamaları yardımıyla sistemin sürekliliğinin sağlanmasıdır. Enerji depolama geleneksel güç üretim sistemlerinde olduğu gibi yeni nesil güç tedarik ağlarının esnek, güvenilir, sürdürülebilir ve verimli çalışması için anahtar teknoloji olacaktır.



(a) Geleneksel merkezi güç üretim/dağıtım sistemi

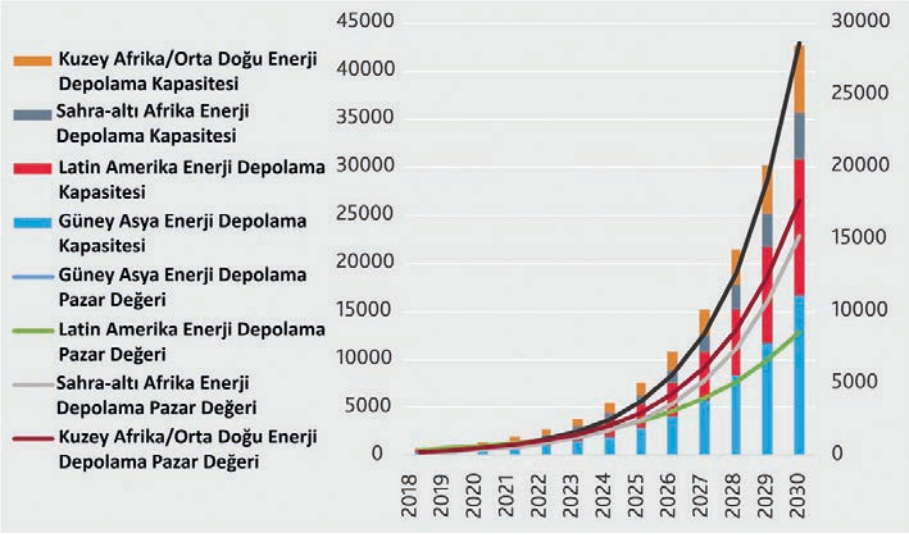


(b) Yeni nesil akıllı güç üretim/dağıtım sistemi

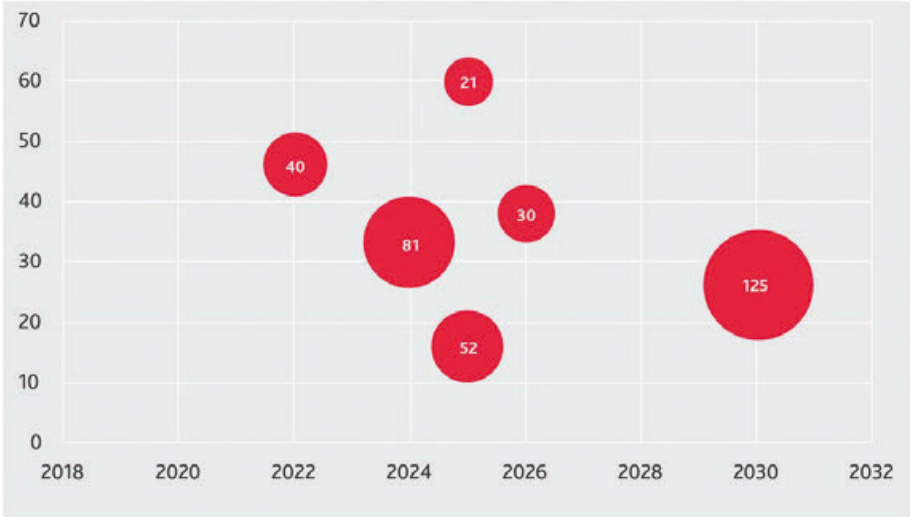
Şekil 57. *Geleneksel ve yeni nesil enerji üretim/dağıtım sistemleri ([73]'ten uyarlanmıştır)*

ABD merkezli AT&T firması AirGing projesi kapsamında Georgia'da enerji nakil hatları üzerinden internet sağlama üzerine denemeler yapmaktadır. Proje ile orta ve alçak gerilim seviyesinde elektrik hatları üzerinden internet sağlanabilecek hale geleceği öngörülmektedir. Yaklaşık sıfır enerjili yerleşkeler, yarı iletken teknolojileri, akıllı ölçüm teknolojileri, hassas döküm teknikleri, ağır ekipman dövme, yüksek hassasiyetli kaynak ve kaplama gibi daha birçok yeni trend sektörde aktif olarak kullanılmakta ve kullanılması ve geliştirilmesi için çaba harcanmaktadır.

BDO global firması enerji depolama pazar büyümesi ve kapasite değişimleri konusunda farklı analiz sonuçlarını derleyerek 2030 projeksiyonlarını oluşturmuştur [74]. Şekil 58'de dünyanın farklı bölgelerindeki enerji depolama kapasitesindeki artışlar ve pazar değeri değişimleri tahminleri sunulmaktadır. Şekil 59'da ise yıllara göre kümülatif artış hızının değişimi gösterilmektedir. Şekil içindeki baloncukların boyutu ve her birinin içindeki rakam, Gigawatt (GW) cinsinden öngörülen toplam kurulu güç kapasitesini göstermektedir.



Şekil 58. *Bölgelere göre enerji depolama kapasitesinin ve pazar değerinin değişimi [74]*



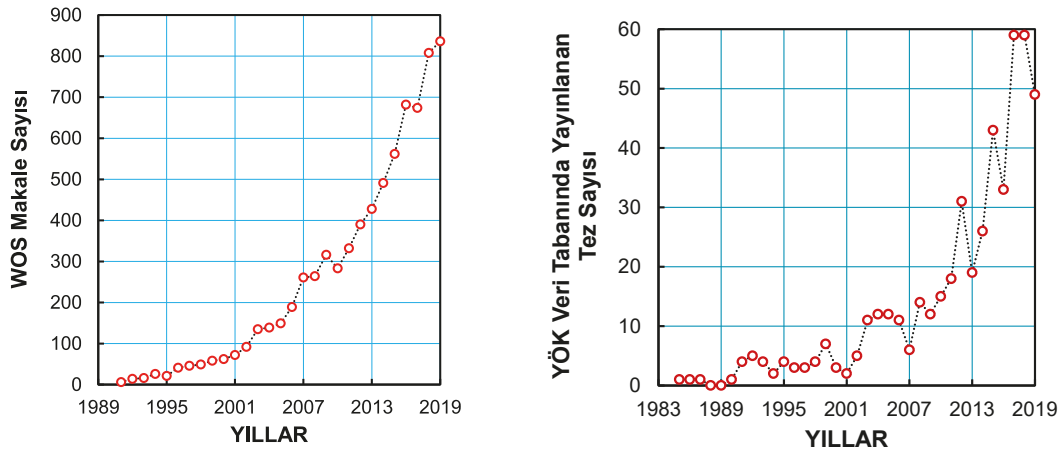
Şekil 59. *Enerji depolama kapasitesi kümülatif yıllık artış hızı [74]*

Depolama, hızla yaygınlaşan bir uygulama olup son zamanlarda üretimin, tüketimin ve hayatın her aşamasında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dünya üzerinde 6 GW'lık yıllık kurulum hacmine ulaşan depolama sistemlerinin, beş yıl içerisinde 40 GW'lık yıllık kurulum kapasitesini aşması beklenmektedir. Depolama sistemleri, elektrik şebekelerinin daha etkin, verimli, düşük karbon emisyonlu ve güvenilir çalışmasına katkı sağlamaktadır. Şebeke frekans kararlılığının sağlanması, ani güç değişimleri ve gerilim değişimlerinin bastırılması gibi amaçlarla yan hizmetlerde kullanılan depolama sistemlerinde diğerlerine göre çok daha hızlı cevap süresine sahip batarya depolama sistemlerini ön plana çıkarmaktadır.

3.4. Enerji Depolama Destek Programları ve Araştırma Konuları

Ülkemizde enerji depolama teknolojileri konusunda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar ve tamamlanan lisansüstü tez (yüksek lisans ve doktora) sayılarının yıllara göre değişimi incelediğinde (Şekil 60), ülkemizde enerji depolama konusuna ilginin artarak sürdüğü görülmektedir. Ulusal veya uluslararası destekli projeler ve işbirlikleri bu ilginin en önemli ayağını oluşturmaktadır.

Günümüzde ülkemizde enerji depolamanın farklı alt konularıyla ilgili ulusal ve uluslararası ölçekte organizasyonlar düzenlenmektedir. Ülkemizde enerji depolama konusunda kapsamlı ilk etkinlik Prof. Dr. Birol KILKIŞ ve Prof. Dr. Sadık KAKAÇ önderliğinde NATO desteğiyle 27 Haziran - 8 Temmuz 1988 tarihleri arasında Çeşme, İzmir'de düzenlenmiştir [75]. NATO destekli bir diğer enerji depolama etkinliği ise 6-17 Haziran 2005 tarihleri arasında Prof. Dr. Halime PAKSOY önderliğinde Çeşme, İzmir'de düzenlenmiştir [76]. Her iki etkinlik de döneminin enerji depolama alanında uzman bilim insanlarını bir araya getirerek, ülkemizdeki enerji depolama vizyonunun oluşmasında önemli katkı sağlamıştır. Özellikle son 5 yılda binalarda sürdürülebilirlik, enerji depolama, enerji malzemeleri, ileri batarya teknolojileri ve güneş enerjisi kaynaklı ısıtma sistemleri konularında TÜBİTAK ve YÖK tarafından araştırmacı destekleri sunulmaktadır. TÜBİTAK 1003 ve 1511 öncelikli alan çağrıları ve YÖK 100/2000 ile tanımlanan öncelikli alanlarda her çağrı döneminde enerji depolama teknolojilerini kapsayan konulara ilişkin başvurular değerlendirilmektedir. Bu çağrıların amacı temelde hem ekonomik hem de verimlilik açılarından özgün sistem/bileşenlerin tasarlanması ve ülkemize bu teknolojilerin geliştirilmesine yönelik altyapının ve bilgi birikiminin kazandırılmasıdır. Enerji depolama teknolojileri konusunda TÜBİTAK 1003 ve 1511 programları kapsamında açılan çağrılara ilişkin bir özet Tablo 19'da sunulmaktadır.



(a) Türkiye adresli makale sayısının değişimi, *(b) Türkiye üniversitelerinde tamamlanan lisansüstü tez sayıları*

Şekil 60. *Türkiye'de yıllar içerisinde enerji depolama konusunda yapılan bilimsel çalışmaların değişimi*

Tablo 19. TÜBİTAK 1003 ve 1511 programları kapsamında enerji depolama alanıyla ilgili açılan proje çağrıları

Çağrı Kodu	Proje Başlığı	Amaç	Kapsam
1511-ENE-GUCD-2016-1	**Güç ve Depolama Teknolojileri** Elektrik Güç Dönüşümü, Elektrik İletim ve Dağıtımı-Akıllı Şebekeler	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Şebekesine Optimum Entegrasyonun Sağlanması ve Santrallerden Üretilen Enerji ile Talep Arasındaki Elektrik Yüklerini Dengeleyen (load balancing) Akıllı Şebeke (smart grid) Sistemlerinin Temel Bileşenlerinin ve Teknolojilerinin Geliştirilmesi	• Akıllı enerji tüketim yönetimi için mimari, model ve algoritmaları • Sayaçlar, akım-gerilim trafosu, izolatör, al-sat üniteleri • Dağıtım bölgelerine uygulanabilir, teknik ve idari kayıplarla mücadeleye katkı sağlayacak, sağlıklı ve güvenli veri alışverişi yapabilen, sahada uygulanması kolay, düşük maliyetli, erişilebilir ve hassas ölçme düzenekleri ile otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi
1511-ENE-GUCD-2017-2	**Güç ve Depolama Teknolojileri** Elektrik Güç Dönüşümü, Elektrik İletim ve Dağıtımı-Yenilikçi Yerli Pil Teknolojilerinin Maliyet Etkin Olarak Ticari Ürüne Dönüştürülmesi	Yenilikçi Yerli Pil Teknolojilerinin Maliyet Etkin Olarak Ticari Ürüne Dönüştürülmesi	• Post-Lityum ve Magnezyum Piller • Sodyum iyon piller ve Lityum-kükürt piller • Redoks akışlı pil • Enerji üretimi için fotovoltaik piller • Yüksek kapasite, güvenlik ve uzun ömür için Post- Lityum piller • Süper-kapasitörler
1511-ENE-GUNS-2016-1	**Güneş Enerjisi** Yeni Nesil Güneş Hücreleri için Yenilikçi Malzemelerin Üretilmesi	Yüksek Verimli, Maliyet Etkin, Uzun Ömürlü Yeni Nesil Güneş Hücrelerinde ve/veya İlgili Güneş Hücrelerinin Bina Entregrasyonun Sağlanması için Güneş Enerjisinin Depolanması Aşamasında Kullanılmak Üzere Yenilikçi Malzeme/Nano-Malzemelerin Üretilmesi	• Yüksek verimli, maliyet etkin, uzun ömürlü yeni nesil güneş hücreleri için yenilikçi malzemeler (örn. boya duyarlı DSSC, organik ve ince film güneş hücrelerine yönelik nano-malzemeler) • Faz değiştiren malzemeler o 50-70°C derece aralıklarında faz değiştirebilecek, hafif, uzun ömürlü faz değiştiren malzemelerin tasarlanması o Isıtmada %40-50 enerji tasarrufu sağlayan faz değiştiren maddeler kullanılarak oluşturulacak ısı depoları ve sistemi %100 yerli teknolojiye sahip, ekonomik ömrü en az 50 yıl olan güneş enerjili yenilenebilir ısı depolama sisteminin geliştirilmesi

Tablo 19. TÜBİTAK 1003 ve 1511 programları kapsamında enerji depolama alanıyla ilgili açılan proje çağrıları (devam)

1003-ENE-DEPO-2017-2	**Güç ve Depolama Teknolojileri: Enerji Depolama Çağrı Programı** Enerji Depolama Malzemeleri	Mevcut duruma göre daha üstün enerji depolama verimliliğine sahip, sürdürülebilir, ileri malzemelerin ve bunların entegre olduğu yenilikçi çözüm ve teknolojilerin geliştirilmesi	• Yenilikçi, uzun ömürlü, mevcut duruma göre ekonomik veya daha yüksek performanslı ve uygulama potansiyeli olması şartlarıyla; o Polimer tabanlı enerji depolama malzemeleri, o 3D mikro-piller ve ince film piller, o Hibrit nano-kompozit malzemeler, o Hibrit depolama teknolojileri geliştirilmesi beklenmektedir. • Faz değiştiren malzemelerle enerji depolama teknolojileri kapsamında, o Atmosferik basınçta 40-70 °C aralıklarında faz değiştirebilecek, uygulama sıcaklık aralığında en az 200 kJ/kg depolama kapasitesine sahip, uzun ömürlü malzemelerin tasarlanması ve geliştirilmesi, o Geliştirilen malzeme ile ısıtmada en az %40 enerji tasarrufu sağlayan, ısı depoları ve sistemi %100 yerli teknolojiye sahip, ekonomik ömrü en az 40 yıl olan güneş enerjili yenilenebilir ısı depolama sisteminin geliştirilmesi.
1003-ENE-HPIL-2018-1	**Hidrojen ve Yakıt Pilleri** Hidrojen Değer Zinciri	Konvansiyonel ve/veya yenilenebilir kaynaklardan yüksek saflıkta hidrojen üretebilen, yenilenebilir enerji sistemleri ile bütünleştirilebilen, güvenli, düşük maliyetli yöntemler ile yüksek yoğunluklu, geri dönüştürülebilir ve dayanıklı depolama ve taşıma malzemelerinin geliştirilmesi ve/veya bu yöntemleri/malzemeleri kapsayacak entegre sistemlere yönelik ileri araştırmalar	Hidrojenin saflaştırılması, depolanması ve dağıtımı için: • Hidrojenin çeşitli gaz karışımlarından yüksek saflıklarda ayrıştırılmasına yönelik malzeme ve teknolojilerin geliştirilmesi • Hidrojenin sıkıştırılması için düşük maliyetli, uzun ömürlü malzeme ve kompresör sistemlerinin geliştirilmesi • Ulaşım ve sabit sistemler için yüksek kapasiteli, uzun ömürlü hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi (yüksek basınca dayanıklı hafif kompozit tank malzemeleri, yüksek kapasiteli metal hidrürler, kimyasal hidrürler, metal organik yapılar, adsorplayıcı nano yapılı malzemeler, kimyasal taşıyıcılar) • Hidrojenin doğal gaz hatları ile taşınması ve geri kazanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

Tablo 19. TÜBİTAK 1003 ve 1511 programları kapsamında enerji depolama alanıyla ilgili açılan proje çağrıları (devam)

1003-SBB-EKBY-2018-1	**Ekonomik Büyüme Çağrı Programı** Enerjide Dışa Bağımlılığın Azaltılması	Türkiye'nin enerji arz güvenliği, yerlileştirme, öngörülebilir piyasaların gelişimi, enerjide ticaret merkezi olma ve enerji verimliliğinin analizi ile sürdürülebilir büyüme odaklı politikaların geliştirilmesine yönelik bilimsel nitelikli projelerin desteklenmesi	• Enerji ticaret merkezi olmanın finansal boyutlarıyla (enerji borsası ve türevi piyasalar) araştırılması; finansal piyasaların derinleştirilmesi ve risklerin yönetilmesine yönelik önerilerin geliştirilmesi • Çeşitli enerji emtialarının fiyatlandırılmasında uluslararası bir referans noktası oluşturulması • Enerjinin depolanmasıyla (petrol ve doğal gaz depolaması, elektrik bataryaları, pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri vb.) ilgili uygulamaya dönük politika önerileri geliştirilmesi; Enerji Depolama Sistemlerinin (kimyasal, mekanik, ısı, elektriksel vb.) yaygınlaştırılmasına yönelik politika ve önerilerin geliştirilmesi (büyük ölçekli depolama sistemlerinin şebekeye etkilerinin modellenmesi, Batarya Yönetim Sistemlerine yönelik öneri ve politika geliştirilmesi) • Enerji şirketlerinin uluslararası bir oyuncu haline getirilmesine yönelik politika önerilerinin geliştirilmesi • Enerji arzında oyun kurucuların ve potansiyel yeni oyuncuların araştırılması ve mevcut durum ile potansiyellerinin incelenmesi; gelecek projeksiyonlarının geliştirilmesi • Uluslararası/ulusal karbon emisyon piyasalarının geliştirilmesine yönelik politika ve stratejiler
1003-OTO-BTRY-2018-2	**Batarya Teknolojileri Çağrı Programı** Uzun Menzilli Araç Batarya Yapı ve Sistemleri Geliştirilmesi	Ülkemiz ve dünyadaki teknolojinin mevcut durumu ve geleceği de göz önüne alınarak, elektrikli araçlar için kullanım potansiyeli yüksek olan batarya ve süper- kapasitör tiplerinin hücre ve/veya sistem bazında geliştirilmesi	Herhangi bir batarya kimyası sınırı olmaksızın hücre ve/veya sistem bazında otomotiv ve diğer elektrikli araç sektörünün ihtiyaçlarını karşılayabilecek; • Batarya ve süperkapasitörde kullanılacak anot ve katot aktif maddelerinin proje ekibi tarafından üretilen, • Batarya ya da süperkapasitör için tam hücre çalışması şeklinde kurgulanan, • Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun çevrim ve raf ömrüne sahip, • Hızlı şarj/deşarj olabilen, • Pratik uygulama sıcaklık şartlarında etkin performans gösterebilen, • Ekonomik (Maliyet analizi yapılmış)

3.5. Türkiye'nin Potansiyel Yol Haritaları

Cumhurbaşkanlığı Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu (BTYPK), Eylül 2019 toplantısında Türkiye için 12 öncelikli teknolojik alanı tespit etmiştir. Belirlenen 12 alan içerisinde yer alan "ileri fonksiyonel malzeme ve enerjitik malzeme teknolojileri" ve "enerji depolama" konuları ülkemizin enerji sektörüne verdiği önemi ve gelecek yol haritasında enerjinin öncelikli yerini göstermektedir. BTYPK tarafından tespit edilen bu alanlarla ilgili önümüzdeki dönemde yol haritaları ilan edilecektir. Türkiye'nin depolama alanında yeteneklerini arttırması için depolamadan elde edilecek kısa vadeli ekonomik faydadan ziyade, uzun dönemli planlamalar yapması oldukça önemli bir stratejidir. Oluşturulacak bu yeni yol haritaları sayesinde, teknolojiye sahip olma, teknolojiyi geliştirme ve pazara sunabilme yetenekleri gelişebilecektir. Aşağıda sıralanan noktaların önemli olduğu düşünülmektedir:

(1) Öncelikle ülkemizin bir *enerji depolama programı* olmalıdır. Bu program, enerji depolama alanındaki tüm faaliyetleri ve destekleri ülkenin stratejik önceliklerine ve hedeflerine odaklamalıdır.

(2) Pilot uygulama örneklerinin kurulması teşvik edilmeli ve pilot tesislerden elde edilen sonuçlar paydaşlara aktarılmalıdır. Bu tür tesislerde yaşanan sorunlar, üretilen çözümler ve süreçle ilgili değerlendirmelerin paylaşımı önemlidir.

(3) Pilot kurulumlarda tüm sistemde yerlilik aranmamalı, ancak seçilecek hedef alt bileşenlerin bir kısmında yüksek yerlilik oranı yakalanmalıdır. Yerlileştirme belli bir takvime bağlanmalı ve bileşenlerin yerlileştirme oranının bu takvime göre arttırılması hedeflenmelidir.

(4) Yüksek yerlilik için akademik destek sağlanmalıdır.

(5) Akademik bilgi geliştirme desteği için *ulusal enerji depolama merkezi* kurulmalı ve bu merkez hedef konularda dünyada önde gelen bir merkez olmayı hedeflemelidir.

(6) Ulusal enerji depolama programı bu merkezce koordine edilmelidir.

(7) Enerji depolama merkezi, ülkedeki tüm çalışma gruplarını (akademisyen, yatırımcı ve kamu kuruluşları) koordine etmeyi hedeflemelidir.

(8) Kurulacak merkez aynı zamanda dış ülkelerden insan kaynağı (özellikle bölge ülkeleri) için çekim merkezi olmalıdır.

(9) Merkez, sanayinin ihtiyaç duyacağı üretim ve proses geliştirmek üzere fonlara ve alt yapılara sahip olmalıdır.

(10) Başarı için liyakat ve bilimsel ahlak hâkim olmalıdır. Başarı için ortak ruh ve ortak hedef inancı oluşturulmalıdır. Bilimin tarafsızlığı ve başarının ödüllendirileceğine inanç oturtulmalıdır. Bu ortam oluşturulamazsa en iyi stratejilerle dahi başarılı olmak çok zordur.

(11) Enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşması için paydaşların katılımıyla yeni yönetmeliklerin oluşturulması, yasal düzenlemelerin yapılması ve enerji depolama uygulamalarının teşvik kapsamında ülke geneline yayılması hedeflenmelidir.

(12) Bütün yenilenebilir enerji çalışmaları mutlaka enerji depolama konularını içermeli, bunun yanında araştırma, inovasyon ve teknoloji geliştirme programları da buna göre düzenlenmelidir.

4. KAYNAKLAR

[1] https://population.un.org/

[2] IEA World Energy Balances (2018) (https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018)

[3] IEA Global Energy & CO_2 Status Report (https://www.iea.org/geco/emissions/)

[4] IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2018. IEA, Paris, 2018.

[5] https://www.teias.gov.tr/

[6] IEA World Energy Outlook 2019 (https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019)

[7] Scrosati B. (2011). History of Lithium Batteries. *Journal of Solid-State Electrochemistry*, 15(7-8), 1623-1630.

[8] "A Ten-Mile Storage Battery" *Popular Science*, Haziran 1930, s. 60.

[9] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020). Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050. Abu Dhabi.

[10] CAISO (2016) Fast Facts: What the Duck Curve Tells us About Managing a Green Grid. (http://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf)

[11] IEA, The California Duck Curve (2019) IEA, Paris (https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/the-california-duck-curve)

[12] Dincer, I. (2018). *Comprehensive energy systems*. Elsevier.

[13] Dincer I., ve Rosen M. (2011) *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. 2nd Edition, John Wiley & Sons.

[14] www.webofknowledge.com

[15] Frontier Economics (2018) Internatıonal Aspects of a Power-to-X Roadmap: A Report Prepared For The World Energy Council, Germany (https://www.frontier-economics.com/media/2642/frontier-int-ptx-roadmap-stc-12-10-18-final-report.pdf)

[16] World Energy Council (2019) Energy Storage Monitor: Latest trends in energy storage-2019 (https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf).

[17] Dincer I., ve Ezan MA. (2018) *Heat Storage: A Unique Solution for Energy Systems*. Springer.

[18] Sarı A., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, "Türkiye'de Doğal Gaz Depolama Çalışmaları", Sunum Dokümanları, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, Iğdır, 42 Sayfa, 4 Temmuz 2019.

[19] Alma M.H., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, "Yer altında Gaz Depolama Metodları", Sunum Dokümanları, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, Iğdır, 8 Sayfa, 4 Temmuz 2019.

[20] Karakilcik M., Dincer I., ve Rosen M.A. (2006) "Performance Investigation of a Solar Pond", *Applied Thermal Engineering*, 26(7), 727-735.

[21] Öztürk M., Çiçek Bezir N., ve Özek N. (2010) "Günes Havuzlarının Kullanım Ömrü Maliyet Analizi", *Pamukkale* Üniversitesi *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 247-252.

[22] Karakilcik, M. (2019) *Kişisel arşiv*.

[23] Dinçer İ., ve Hepbaşlı A. (2005) "Kanada'nın En Büyük Kuyu İçi Isıl Enerji Depolama Sistemi: Bir Uygulama", VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Teskon 2005, İzmir.

[24] Paksoy H.Ö., ve Turgut B. (2012) "Akifer Termal Enerji Depolama ile Binalarda Sürdürülebilir Enerji Kullanımı", TTMD Dergisi, 81:41-50.

[25] Yılmaz M.Ö. (2005). "Yeraltı Termal Enerji Depolamada Kullanılan Farklı Dolgu Maddelerinin Termal Özelliklerinin Araştırılması", Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

[26] Stritih, U., Rajver, D., Turgut, B., ve Paksoy, H. (2004). "Borehole thermal energy storage applications and in-situ thermal response test-Example from Turkey and situation in Slovenia", Journal of Mechanical Engineering, 50:6, 328-340.

[27] Mehling H., ve Cabeza L.F. (2008) *Heat and Cold Storage with PCM*. Springer.

[28] Ozisik M.N. (1993) *Heat Conduction*. John Wiley & Sons.

[29] Poots G. (1962) "An Approximate Treatment of a Heat Conduction Problem Involving a Two-dimensional Solidification Front", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5(5), 339-348.

[30] Jiji L.M., Rathjen K.A., ve Drzewiecki T. (1970) "Two-dimensional Solidification in a Corner", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13(1), 215-218.

[31] Voller V.R., ve Prakash C. (1987) "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1709-1719.

[32] Voller V.R. (1990) "Fast Implicit Finite-Difference Method for The Analysis of Phase Change Problems". *Numerical Heat Transfer*, 17(2), 155-169.

[33] Shamsundar N., ve Rooz E. (1988) "Numerical Methods for Moving Boundary Problems", *Handbook of Numerical Heat Transfer*, 747-786.

[34] Furzeland R.M. (1980) "A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems" *IMA Journal of Applied Mathematics*, 26(4), 411-429.

[35] Al-Saadi S.N. ve Zhai Z.J. (2013) "Modeling Phase Change Materials Embedded in Building Enclosure: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 659-673.

[36] Morgan K., Lewis R.W., ve Zienkiewicz O.C. (1978) "An Improved Algorithm for Heat Conduction Problems with Phase Change", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 12(7), 1191-1195.

[37] Cao Y., Faghri A., ve Chang W.S. (1989) "A Numerical Analysis of Stefan Problems for Generalized Multi- Dimensional Phase-Change Structures Using the Enthalpy Transforming Model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(7), 1289-1298.

[38] Cao Y. ve Faghri A. (1990) "A Numerical Analysis of Phase-Change Problems Including Natural Convection", *Journal of Heat Transfer*, 112(3), 812-816.

[39] Faghri A., ve Zhang Y. (2006) *Transport Phenomena in Multiphase Systems*. Academic Press.

[40] Cao Y., Faghri A., Juhasz A. (1991) "A PCM/Forced Convection Conjugate Transient Analysis of Energy Storage Systems with Annular and Countercurrent Flows", *Journal of Heat Transfer*, 113(1), 37-42.

[41] Güngör MG., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, "Elektrik ve Isıl Enerji Depolama Teknolojileri", Sunum Dokümanları, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, Iğdır, 17 Sayfa, 4 Temmuz 2019.

[42] Erdemir D. (2017) *Buzlu Enerji Depolama Sistemlerinin Termal ve Ekonomik Analizleri,* Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

[43] EHPA, European Heat Pump Association. The European Heat Pump Market and Statistics Report 2018. EHPA, Brussel, 2019.

[44] Kaygusuz K., Gültekin N. ve Ayhan T. (1993) "Solar Assisted Heat-Pump and Energy Storage for Domestic Heating in Turkey", *Energy Conversion Management*, 34, 335-16.

[45] Kaygusuz K. (1995) "Performance of Solar-Assisted Heat-Pump Systems", *Applied Energy*, 51(2), 93-109.

[46] Kaygusuz K. (2004) Solar Heat Pumps. in "*Encyclopedia of Energy*", Cleveland, C.J (Ed.) Vol. 5, 639-650, New York: Elsevier.

[47] International Hydropower Association (IHA), 2019 Hydropower Status Report (https://www.hydropower.org/status2019)

[48] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (https://www.enerji.gov.tr/)

[49] Usta R., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, "Yenilenebilir Enerji Görünümü, Yeni Trendler ve Depolama Sistemleri", Sunum Dokümanları, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, Iğdır, 68 Sayfa, 4 Temmuz 2019.

[50] http://re100.eng.anu.edu.au/global/

[51] Türk Elektromekanik Sanayii A.Ş. (https://www.temsan.gov.tr/)

[52] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (http://www.yegm.gov.tr/projeler/p_uygulamalar.aspx)

[53] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı – Mavi Kitap (https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Mavi-Kitaplar)

[54] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (http://www.yegm.gov.tr/projeler/dms_projeler.aspx)

[55] Güvendiren M. ve Öztürk T. (2003) "Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama", *Mühendis ve Makina*, Ağustos 2003.

[56] Drolet B., Gretz J., Kluyskens D., Sandmann F., ve Wurster R. "The Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project [EQHHPP]: Demonstration Phase", *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(4), 305-316.

[57] Ni Meng. (2006) "An overview of hydrogen storage Technologies", *Energy exploration & exploitation* 24(3), 197-209.

[58] Midilli A., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, "Hidrojen Depolama Çalışmaları ve Yeni Boyutlar", Sunum Dokümanları, Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü, 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, Iğdır, 38 Sayfa, 4 Temmuz 2019.

[59] Ozsaban M. ve Midilli A. (2016). "A parametric study on exergetic sustainability aspects of high-pressure hydrogen gas compression", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(11), 5321-5334.

[60] US Drive (2017) Hydrogen Storage Tech Team Roadmap, July, 2017.

[61] IEA, International Energy Agency http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx

[62] European Association for Storage of Energy, EASE/EERA Technology Development Roadmap on Energy Storage.

[63] Reuters Graphics (https://graphics.reuters.com/BRITAIN-EU-INVESTMENT/010021SS4F6/index.html)

[64] Hamut S., TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, Bilgi notları.

[65] IHS Markit, Ağustos 2019 raporu.

[66] Pillot C. (2018) "Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive" Avicenne Energy, Advanced Automotive Battery Conference, Mainz, Germany.

[67] IEA, Global EV Outlook 2019 (https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019)

[68] TÜBİTAK – MAM (http://mam.tubitak.gov.tr/)

[69] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (https://enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik)

[70] BOTAŞ (https://silivriebt.botas.gov.tr/index.php/tr/)

[71] BOTAŞ (https://tuzgoluebt.botas.gov.tr/index.php/tr/)

[72] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Bakanlik-Haberleri/Turkiyenin-Ilk- FSRU-Tesisi-Acildi)

[73] International Energy Agency, "Implementing Agreement for a Programme of Research and Development on Energy Conservation through Energy Storage", Strategic Plan 2016 – 2021.

[74] BDO Global (2018) "Six Charts That Reveal What Analysts Think About The Future Of Energy Storage" (https://www.bdo.global/en-gb/blogs/tech-media-watch-blog/november-1/six-charts-that-reveal-what-analysts-think-about-the-future-of-energy-storage)

[75] Kilkis B., ve Kakaç S., eds. *Energy storage systems*. Vol. 167. Springer Science & Business Media, 2012.

[76] Paksoy, H.Ö. ed., 2007. *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design* (Vol. 234). Springer Science & Business Media.

5. TÜBA-ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ ÇALIŞTAYI ve PANELİ PROGRAMI

4-5 Temmuz 2019
Iğdır Üniversitesi Karaağaç Kampüsü 15 Temmuz Şehitleri Konferans Salonu, IĞDIR

4 Temmuz 2019
Açılış Konuşmaları
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER, TÜBA Asli Üyesi
Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA, Iğdır Üniversitesi Rektörü
Prof. Dr. Ahmet Cevat ACAR, TÜBA Konsey Üyesi ve Cumhurbaşkanlığı Eğitim Öğretim Politikaları Kurulu Üyesi
Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER, TÜBA Başkanı

I. OTURUM

Oturum Başkanı: *Prof. Dr. M. Hakkı ALMA, Iğdır Üniversitesi Rektörü*

Yenilenebilir Enerji Görünümü, Yeni Trendler ve Depolama Sistemleri
Ramazan USTA, Genel Md. Yrd., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Pompaj HES Ekipmanlarının Yerlileştirilmesi Çalışmaları
İbrahim TOPRAK, TEMSAN Genel Müdürü

Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği için Enerji Depolama
Prof. Dr. Halime PAKSOY, Çukurova Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Dekanı

II. OTURUM

Oturum Başkanı: *Prof. Dr. N. Serdar SARIÇİFTÇİ, TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi*

Ulaştırmada Enerji Depolama Teknolojileri
Berkan BAYRAM, Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği Başkanı

Yeni Batarya Teknolojileri ve Endüstriyel Gelişmeler
Doç. Dr. Muhsin MAZMAN, Mutlu Akü, Yeni Teknolojiler ve Laboratuvarlar Müdürü

Türkiye'nin Bataryalı Araç Programı ve Gelişmeler
Doç. Dr. Halil (Sadi) HAMUT, Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG)

III. OTURUM

Oturum Başkanı: *Prof. Dr. Ali SARI, TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi*

Enerji Depolama Teknolojileri ve Araştırma Boyutları
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER, TÜBA-Enerji Çalışma Grubu Yürütücü

Kimyasal Enerji Depolama ve CO2 Geri Dönüşümü
Prof. Dr. Niyazi Serdar SARIÇİFTÇİ, Johannes Kepler Üniversitesi, Avusturya

Buzda Enerji Depolama Teknolojileri: Ticari bir Türkiye Uygulaması
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP, Erciyes Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Konut ve Endüstriyel Sektörlerde Isıl Enerji Depolama İmkanları
Prof. Dr. Recep YUMRUTAŞ, Gaziantep Üniversitesi Öğretim Üyesi

IV. OTURUM

Oturum Başkanı: *Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI, TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi*

Elektrik ve Isıl Enerji Depolama Teknolojileri
Mehmet Göksel GÜNGÖR, Siemens-Gamesa Renewables Uzmanı

Hidrojen Depolama Çalışmaları ve Yeni Boyutlar
Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Türkiye'de Doğal Gaz Depolama Çalışmaları
Prof. Dr. Ali SARI, Ankara Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Yer altında Gaz Depolama Metodları
Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA, Iğdır Üniversitesi Rektörü

Enerji Depolama ve Isı Pompaları Yardımıyla Konutların Isıtılması
Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Faz Değişim Malzemelerinin Geliştirilmesi ve Modellenmesi
Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi, Öğretim Üyesi

Günün Değerlendirmesi ve Kapanış

5 Temmuz 2019

PANEL: Türkiye'nin Enerji Depolama Teknolojileri Kabiliyetleri, Potansiyelleri ve Yapılması Gerekenler

Moderatör: *Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ, TÜBA Enerji Çalışma Grubu Üyesi*

İbrahim TOPRAK, TEMSAN Genel Müdürü
Ramazan USTA, Genel Md. Yrd., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
Berkan BAYRAM, Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği Başkanı
Doç. Dr. Muhsin MAZMAN, Mutlu Akü
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP, Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER, TÜBA-Enerji Çalışma Grubu Yürütücü
Prof. Dr. Niyazi. Serdar SARIÇİFTÇİ, Johannes Kepler Üniversitesi, Avusturya

Değerlendirme ve Kapanış Konuşmaları




ÇALIŞTAYI VE PANELİ
TÜBA
TÜRKİYE
BİLİMLER
AKADEMİSİ







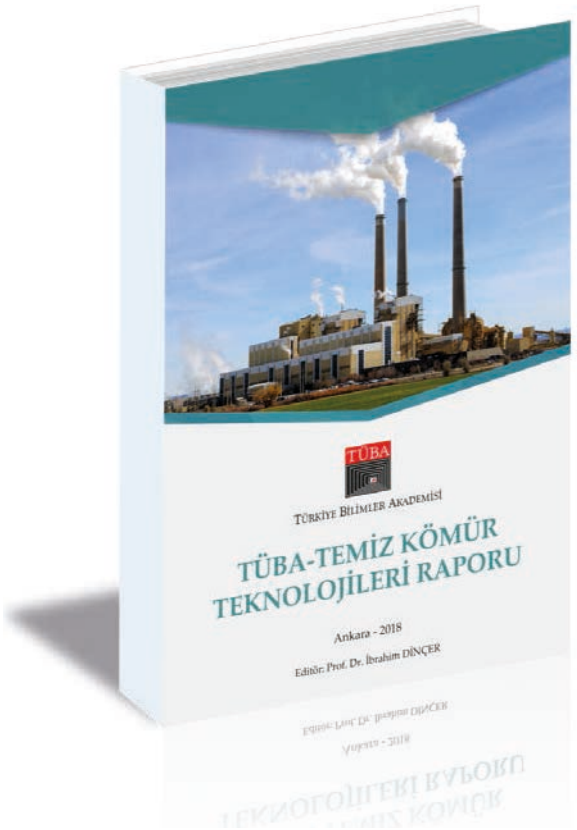





TÜBA







TÜBA-TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİ RAPORU

Kömür, endüstri devrimini takiben 19. ve 20. yüzyıllardan itibaren gündelik hayatımızı şekillendiren en önemli unsurlardan birisi olmuş; buharlı güç çevrimlerinden, elektrik santralleri ve ısıtma uygulamalarına kadar pek çok alanda birincil enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu süreçte, bir çok alternatif enerji kaynağı ortaya çıkmış olmasına ve kömürün çevreye olan etkileri nedeniyle yoğun şekilde tartışılmasına rağmen, kömürün kullanımından vazgeçilmemiştir. Günümüzde ise kömür hala gelişmiş pek çok ülkede elektrik üretiminde en yaygın kullanılan enerji kaynağıdır ve yakın gelecekte de bu lider konumunu sürdürmesi beklenmektedir. Bu sebeplerden ötürü, mevcut kömür rezervleri ve kömür enerjisi teknolojilerinin çevresel etkileri de göz önünde bulundurarak, kömürün en doğru şekilde kullanımına yönelik politika ve stratejilerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu bağlamda TÜBA-Temiz Kömür Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli yapılmış ve neticesinde bu rapor derlenmiştir. Raporda ülkemizin enerji ithalatını azaltmada kömür rezervlerinin ve temiz kömür teknolojilerinin daha verimli kullanılabilmesi için uygulanabilir çözüm, politika ve strateji önerileri ile ortaya koymak ve ülkemizin sürdürülebilir kalkınmasına katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

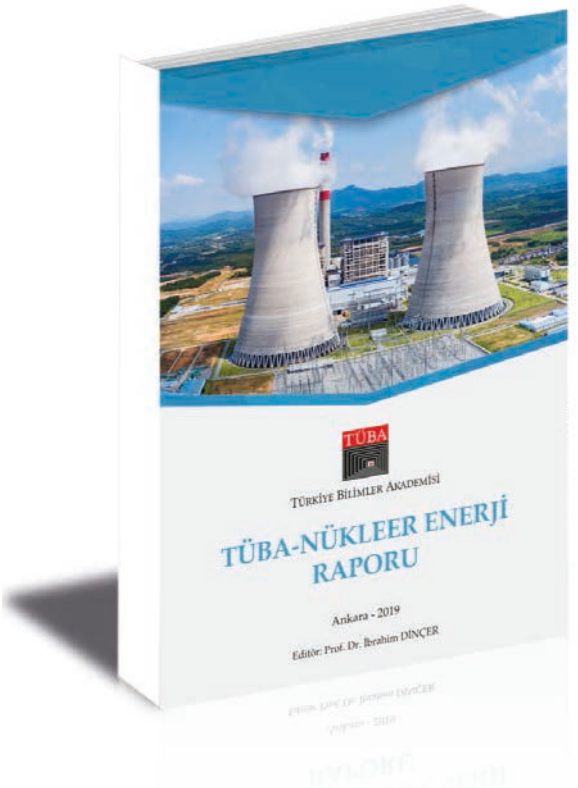
Rapor'a www. tuba.gov.tr adresi üzerinden ulaşılabilir.



TÜBA-GÜNEŞ ENERJİSİ TEKNOLOJİLERİ RAPORU

Artan nüfus, teknolojik gelişmeler ve beraberinde gelen yükselen yaşam standardları enerji ihtiyacında artışa neden olmuştur. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sürdülebilir olmaması göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple, elektrik üretiminde yer alan politik, ekonomik ve çevresel problemlerle baş etmek için, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişilmesine olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Tüm bu nedenlerden ötürü, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) bünyesinde oluşturulan "Enerji Çalışma Grubu" tarafından güneş enerjisi teknolojileri başlığı altında; kamu ve özel sektör ile üniversite temsilcilerinden oluşan geniş kapsamlı bir çalıştay ve panel düzenlenmiştir. Sunulan bildiriler temel alınarak, güncel literatürden alanında öncü bilimsel çalışmaların da derlenmesiyle bu rapor hazırlanmıştır.

Rapor'a www. tuba.gov.tr adresi üzerinden ulaşılabilir.



TÜBA-NÜKLEER ENERJİ RAPORU

Nükleer güç santrallerinin bugünü ve ülkemizdeki durumunun incelendiği Nükleer Enerji Raporu'nda; elektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynakların katkıları mercek altına alınıyor ve 2023 hedeflerine işaret ediliyor, Türkiye enerji bakımından Avrupa Birliği ülkeleri ile karşılaştırılıyor. Türkiye'nin gelişmekte olan bir ülke olduğundan hareketle endüstriyel bakımdan gelişmiş olan ülkelerin fosil yakıtları, hidrolik santralleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirerek, nükleer santralleri kurmuş olduğu vurgulanarak, nükleer enerjiye giden yolu aydınlatan bilim insanlarına dikkat çekiliyor. Nükleer bombanın gerçekleştirilmesi ve sonunda açığa çıkan muazzam enerjinin kontrolü için yapılan çalışmalarla füzyon reaksiyonunun nasıl kontrol altına alındığı anlatılırken,nükleer güç santrallerinin dünyada nasıl yayıldığı örneklerle gösteriliyor.

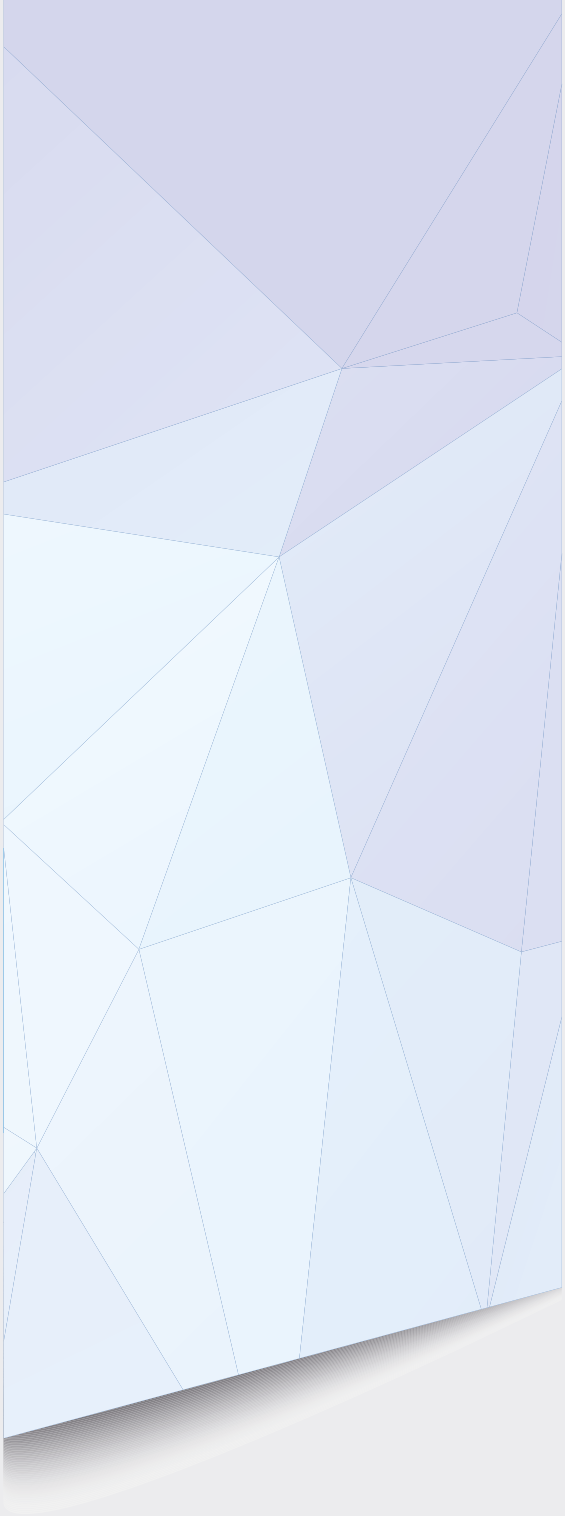
Rapor'a www. tuba.gov.tr adresi üzerinden ulaşılabilir.



TÜBA-RÜZGAR ENERJİSİ TEKNOLOJİLERİ RAPORU

Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu'nda rüzgâr enerjisi teknolojileri önce sınıflandırılmış, tarihsel ve teknolojik gelişim süreçleri incelenmiş, ülkemizdeki ve dünyadaki kullanım alanları ele alınmış ve ülkemizdeki rüzgâr enerjisi potansiyeli üzerinden yeni açılımların değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Ayrıca rüzgâr enerjisinde eğitimin boyutu ve bu bunun için gerekli olan önerilere de yer verilmiştir.

Rapor'a www. tuba.gov.tr adresi üzerinden ulaşılabilir.



TÜBA

TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ

Piyade Sokak No: 27, 06690 Çankaya/ANKARA
Tel: +90 (312) 442 29 03 Faks: +90 (312) 442 72 36

www.tuba.gov.tr

www.facebook.com/**tubagovtr**

twitter.com/**tubagovtr**