



TÜRKİYE CUMHURİYETİ CUMHURBAŞKANLIĞI
STRATEJİ VE BÜTÇE BAŞKANLIĞI

ON İKİNCİ KALKINMA PLANI
2024 - 2028

ENERJİ TEKNOLOJİLERİ

ÇALIŞMA GRUBU RAPORU

ANKARA 2023



T.C. CUMHURBAŞKANLIĞI
STRATEJİ VE BÜTÇE BAŞKANLIĞI

ON İKİNCİ KALKINMA PLANI
(2024-2028)

ENERJİ TEKNOLOJİLERİ

ÇALIŞMA GRUBU RAPORU

ANKARA 2023

ISBN 978-625-8356-42-7

Bu yayının tüm hakları Strateji ve Bütçe Başkanlığına aittir.
Kaynak gösterilmek suretiyle alıntı yapılabilir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No.</u>
İÇİNDEKİLER.....	i
TABLolar	iii
ŞEKİLLER	iii
KISALTMALAR.....	iv
KATILIMCI LİSTESİ.....	vii
YÖNETİCİ ÖZETİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. MEVCUT DURUM ANALİZİ.....	6
2.1 Dünyada (Benzer Ülkeler ve Uluslararası Kuruluşlarda) Genel Durum	6
2.1.1 Dünyadaki Gelişme Eğilimleri	6
2.1.2 Uluslararası Standartlar.....	31
2.1.3 Başarılı Ülke Uygulamaları	32
2.1.4 Uluslararası Yükümlülükler.....	43
2.2 Türkiye’de Genel Durum	46
2.2.1 Kapsam ve Mevzuat.....	69
2.2.2 Ulusal Politikalar	71
2.2.3 Hedeflere Ulaşılmasının Önündeki Başlıca Sorunlar	74
2.2.4 Uluslararası Mukayeseli Olarak Türkiye İçin Temel Göstergeler ve Uluslararası Konum	75
2.3 İlişkili Temel Alanlardaki Gelişmelerin Rapor Konusu Alana Yansıması	76
2.4 Türkiye’deki Dinamikler ve Dünyadaki Eğilimlerin Muhtemel Yansımaları	78
3. PLAN DÖNEMİ PERSPEKTİFİ.....	85
3.1 Uzun Vadeli Hedefler (2053 vizyonunu içerecek şekilde)	85
3.2 On İkinci Kalkınma Planı (2028 Yılı) Hedefleri.....	87
3.3 Hedeflere Dönük Temel Amaç ve Politikalar	95
3.4 Temel Amaç ve Politikalara Dönük Uygulama Stratejileri ve Tedbirler.....	100
3.4.1 Mevzuat Alanında Yapılması Gereken Düzenlemeler	100
3.4.2 Kurumsal Yapıyı İyileştirmeye Yönelik Düzenlemeler.....	102

3.4.3 İnsan Kaynakları Alanında Yapılması Gerekenler	103
3.4.4 Altyapıyı İyileştirmeye Yönelik Yapılması Gerekenler	103
3.4.5 Mali Yükü ve Finansmanı.....	105
3.5 Plan Amaç, Hedef ve Politikalarının Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleriyle İlişkisi.	106
3.6 Plan Hedeflerini Gerçekleştirmek İçin Yapılması Önerilen Araştırmalar	108
4. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME	109
4.1 Sektörün/Tematik Konunun Ülkemizin Gelişmesine Katkısının Değerlendirilmesi .	109
KAYNAKLAR.....	113

TABLÖLAR

Tablo 1. Seçilmiş Enerji Depolama Teknolojilerinin Temel Karakteristikleri	13
Tablo 2. Bazı Ülkelerdeki Biyoyakıt Üretim Kapasiteleri ve Üretimde Kullanılan Hammaddeler	38
Tablo 3. Türkiye 2022 Yılı Elektrik Üretimini Kaynaklara Göre Dağılımı.....	47
Tablo 4. Türkiye'nin Jeotermal Kaynak Tablosu.....	57
Tablo 5. Türkiye Biyokütle Potansiyel Atlası (BEPA) Verileri.....	60

ŞEKİLLER

Şekil 1. Yakıt Türüne Göre Birincil Enerji Talebi Projeksiyonu (IEA, 2020).....	2
Şekil 2. Türkiye Elektrik Üretimini Kaynak Bazında Yıllara Göre Gelişimi	48

KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFC	Alkalin Yakıt Hücreleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ASELSAN	Askerî Elektronik Sanayi
ASME	Amerikan Makine Mühendisliği Birliği (American Society of Mechanical Engineers)
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı (Green Deal)
BAE	Birleşik Arap Emirlikleri
BECCS	Karbon Yakalama ve Depolama ile Birleştirilmiş Biyoenerji Sistemleri (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
BEPA	Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası
BOREN	Bor Araştırma Enstitüsü
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage)
CCUS	Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (Carbon Capture, Utilisation and Storage)
CdTe	Kadmiyum Tellür
CHP	Birleşik Isı ve Güç Sistemleri (Combined Heat and Power)
CO ₂	Karbondiyoksit
COP27	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 27. Taraflar Konferansı
CSP	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri (Concentrated Solar Power)
DAC	Karbondiyoksitin Doğrudan Havadan Yakalanması (Direct Air Capture)
DMFC	Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri
DOE	ABD Enerji Bakanlığı
EJ	Eksa Joule
EN	Avrupa Standartları (Europeane Norm)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETES	Elektrikli ve Isıl Enerji Depolama
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı
ETR	Ergimiş Tuz Reaktörü

EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş.
GaAs	Galyum Arsenid
GAZBİR/GAZMER	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	Güneş Enerji Santrali
GIF	Dördüncü Nesil Uluslararası Forumu (Generation IV International Forum)
GTEP	Giga Ton Eşdeğer Petrol
GW	Gigawatt
GWEC	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council)
GWh	Gigawatt Saat
HES	Hidroelektrik Santral
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
İGDAŞ	İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş.
LCOE	Seviyelendirilmiş Enerji Maliyetleri (Levelized cost of energy)
LİDAR	Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini (Light Detection and Ranging)
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LOHC	Organik Temelli Sıvı Hidrojen Taşıyıcı Kimyasallar (Liquid Organic Hydrogen Carrier)
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MCFC	Ergimiş Karbonatlı Yakıt Pili
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MW	Megawatt
NDK	Nükleer Düzenleme Kurumu
NGS	Nükleer Güç Santrali
NREL	ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)
NTE	Nadir Toprak Elementleri
NÜKEN	Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü
ODTÜ GÜNAM	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Araştırmaları Merkezi

ORC	Organik Rankine Döngüsü (Organic Rankine Cycle)
PEM	Polimer Elektrolit Membran
PEMFC	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri
PHES	Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral
PV	Fotovoltaik
REPA	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
RİTM	Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi
SCADA	Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SMR	Küçük Modüler Reaktör (Small Modular Reactor)
SODAR	Sonic Detection and Ranging
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücreleri
STB	Sanayi Teknoloji Bakanlığı
TARKİM	Tarımsal Kimya Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.
TED	Termal Enerji Depolama
TEİAŞ	Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
TEMSAN	Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
THS	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TOBB ETÜ	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
TÜBİTAK MAM	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi
TÜBİTAK RUTE	TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	Terawatt Saat
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
YMEP	Yeşil Mutabakat Eylem Planı

KATILIMCI LİSTESİ

BAŞKAN

Osman OKUR

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi

KOORDİNATÖR

Emre ÇALIŞKAN

Strateji ve Bütçe Başkanlığı

İlkgün ATIŞ

Strateji ve Bütçe Başkanlığı

RAPORTÖR

Işıl IŞIK GÜLSAÇ

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi

YENİLENEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİ ALT KOMİSYONU

BAŞKAN

Hasan Alper ÖNOĞLU

Müstakil Sanayici ve İşadamları Derneği

RAPORTÖR

Serdar BAYAR

Askeri Elektronik Sanayi

ÜYELER

Alper KALAYCI

Enerji Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği

Aydın KARAKUŞ

Türk Standardları Enstitüsü

Bora Şekip GÜRAY

Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi

Cem BALKAN

Askeri Elektronik Sanayi

Doğan GEZER

TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü

Duygu TOKMAK PITİR

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

Elif ALTINIĞNE

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Elif KAYA

Strateji ve Bütçe Başkanlığı

Furkan A. ÇALLIALP

Enerjisa

Gökhan KORKMAZ

Strateji ve Bütçe Başkanlığı

Görkem Yunus TOPCU

Cumhurbaşkanlığı Yatırım Ofisi

Hakan AKKOÇ

Smart Güneş Teknolojileri

Koray YENİGÜRBÜZ
Murtaza ATA
Nermin AVŞAR ÖZCAN
Osman UZAN
Özlem ÖNENÇ
Sevinç DEMİR
Tolga Murat ÖZDEMİR
Tolga YAKAN
Yaşar ÇELİK
Yücel KARTAL

Türk Standardları Enstitüsü
Kalyon Enerji
Elektrik Üretim Anonim Şirketi
Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği
Turkcell
Ostim Yenilenebilir Enerji ve Çevre Teknolojileri
Kümelenmesi
Elektrik Üretim Anonim Şirketi

TERMİK VE NÜKLEER TEKNOLOJİLER ALT KOMİSYONU

RAPORTÖR

Gamze SOYLU

Elektrik Üreticileri Derneği

ÜYELER

Ali YILDIRAN
Enis PEZEK
Erhan AKSU
Hakan HATİPOĞLU
Hatice Hilal ŞEN
Onur Koray YENİGÜRBÜZ
Orhan AYDIN
Ömer DOĞAN
Salih SARI
Serdar TOPRAK
Yelda ALTINSOY

Strateji ve Bütçe Başkanlığı
Elektrik Üretim Anonim Şirketi
Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
Strateji ve Bütçe Başkanlığı
Türk Standardları Enstitüsü
Ostim Organize Sanayi Bölgesi
Elektrik Üreticileri Derneği
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
Elektrik Üretim Anonim Şirketi
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

YENİ TEKNOLOJİLER-1 (ENERJİ DEPOLAMA, ELEKTRİKLİ ARAÇLAR) ALT KOMİSYONU

RAPORTÖR

Ş. Burak ATILGAN

Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.

ÜYELER

Bora BUYRUK

Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.

Cem DOĞAN

Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

Emre NADAR

İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi

İbrahim ATEŞ

Türkiye Elektrik, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu

İstemi MAVİ

Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği

Kadri AYDINOL

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Kemal SEVİM

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

Mehmet KONUK

Habaş

Onur ERGEN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Raşit ÇİLOĞLAN

Vestel

Servet ERGİNYAVUZ

Kontrolmatik

Yunus GÜLBAHAR

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

YENİ TEKNOLOJİLER-2 (HİDROJEN, CCUS, YAKIT HÜCRELERİ) ALT KOMİSYONU

BAŞKAN

Can Özgür ÇOLPAN

Dokuz Eylül Üniversitesi

RAPORTÖR

Ragıp KIZILTAŞ

Türkiye Elektrik, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu

ÜYELER

Ahmet YILDIZ

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

Berna TUNCER

Strateji ve Bütçe Başkanlığı

Can HAKYEMEZ

Türkiye Sınai Kalkınma Bankası

Cavit Burak BURAL

Avrupa Birliği Başkanlığı

Emre ATA
Gölsinem CÜCE
Hakan AKSOY
Hakan KAYSI
Kıvanç HET
Pauline SYFERT
Şehmus ALTAN

Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Shura Enerji Dönüşümü Merkezi
Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
Türkiye Kömür İşletmeleri
Alman-Türk Ticaret ve Sanayi Odası
Zorlu Enerji

YÖNETİCİ ÖZETİ

Enerji, uzun yıllardır küresel ve ulusal politikaların belirlenmesinde en önemli konulardan biri olarak görülmektedir. Son zamanlarda iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin artması, Covid-19 pandemisiyle birlikte talebin dalgalanması ve Rusya-Ukrayna krizi gibi küresel gelişmeler sonrası enerji hammadde fiyatlarının ciddi oranda yükselmesi enerjinin küresel ölçekteki önemini tekrar gözler önüne sermiştir. Söz konusu küresel olaylar ülkelere, enerji arz güvenliğinin yanında enerji bağımsızlığının da sağlanmasının oldukça kritik olduğunu göstermiştir.

Ülkemizde ithalat ve cari açığın önemli bir kısmının enerji kaynaklı olduğu düşünüldüğünde enerji üretiminde ve teknolojilerinde dışa bağımlılığın azaltılması yönünde atılacak adımlar ve alınacak tedbirler, iktisadi ve sosyal kalkınma hedeflerimizin gerçekleştirilebilmesi bakımından kritik önem taşımaktadır. Daha temiz, rekabetçi ve güvenli bir enerji sektörü, günümüzde prototip ya da ticarileşmenin erken aşamasında olan birçok yenilikçi enerji teknolojisinin benimsenmesini ve kullanılmasını gerektirmektedir. Söz konusu teknolojilerde ülkemizin araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) ve yenilik kapasitesinin geliştirilmesinin, teknoloji geliştirme altyapısının güçlendirilmesinin arz güvenliğinin artırılmasına, dışa bağımlılığın azaltılmasına ve iklim değişikliği krizini orta/uzun vadede fırsata çevrilmesine imkân sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Net sıfır emisyon hedefine ulaşma yolunda yapılan projeksiyonlarda tüm sektörlerde elektrifikasyona ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu elektrifikasyonun karşılanması için temiz enerji kaynaklarında ve teknolojilerinde önemli miktarda kapasite artışları görülmesi beklenmektedir. Güneş ve rüzgârın, mevcut durumda en hızlı gelişen elektrik üretim kaynakları olmalarının yanı sıra 2050 yılına kadar enerji pazarına hâkim olacakları da tahmin edilmektedir.

Nükleer, hidrolik, jeotermal ve biyoenerjinin talebe göre sisteme verilebilir olmaları nedeniyle güneş ve rüzgâr enerjisi kapasitelerindeki artışa bu kaynaklardaki artışın eşlik edeceği tahmin edilmektedir. Diğer yandan enerji talebinin karşılanmasında ve net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra Küçük Modüler Reaktörlerin (SMR - Small Modular Reaktor) ve diğer yenilikçi nükleer teknolojilerin de önemli rol oynaması beklenmektedir.

Kesintili üretime sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan üretimin dengelenmesi, elektrifikasyonun sağlanamadığı sektörlerde kullanılabilmesi ve emisyon

azaltımına doğrudan katkı vermesi gibi özellikleri taşıyan temiz enerji teknolojilerinin (enerji depolama, hidrojen, karbon yakalama, kullanım ve depolama gibi) önemi her geçen gün artmaktadır. Net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için önemli bir potansiyele sahip olan bu teknolojilerin hızla geliştirilmesinin ve büyük ölçekli uygulamaların yaygınlaştırılmasının enerji sektöründe sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir dönüşüm sağlamada kritik öneme sahip olacağı değerlendirilmektedir.

Hızla gelişen teknoloji, enerji sektöründe yenilenebilir enerji odağındaki yapısal değişiklikler ve pek çok ülke tarafından belirlenen net sıfır emisyon hedefleri dünya genelinde akıllı şebekelere geçişi hızlandırmaktadır. Elektrik şebekelerinin üretimden son tüketiciye kadar bütün aşamalarının dijitalleşmesi ile tüm sistemin izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi imkânı bulunmaktadır. Akıllı şebeke yatırımları ile etkin enerji yönetimi yapılabilmekte, böylece şebeke güvenilirliğinin artırılması ile enerji maliyet ve kayıplarının azaltılması sağlanabilmektedir.

Özetle, ülkemizin enerji teknolojileri alanında yerli imkânlarının ve rekabetçiliğinin artırılması, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılması, yerli enerji teknolojilerinin ihracat potansiyelinin güçlendirilmesi ve enerji sektöründe istihdamın artırılması gerekmektedir. Bu amaçlarla ilgili alanlarda kamu kurumları, özel sektör, akademi ve sivil toplum kuruluşları temsilcilerinin katkılarıyla hazırlanan bu rapor, enerji teknolojileri konusunda ülkemizin hedeflerini belirlemeye yönelik politika ve tedbir önerilerini içermektedir.

1. GİRİŞ

Ülkemizin küresel bir güç merkezi olması yolunda atılacak adımların stratejik çerçevesini oluşturacak 2053 vizyonu doğrultusunda, ülkemizin uzun vadeli hedeflerini sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı ile daha da ileriye taşıyacak olan On İkinci Kalkınma Planı, 2024-2028 dönemini kapsayacaktır. Bu rapor, ülkemizin önümüzdeki beş yıl içerisinde gelişmesini ve kalkınmasını hedefleyen ve kamuda uygulanacak olan politika ve tedbirleri belirleyecek On İkinci Kalkınma Planına girdi sağlama amacıyla oluşturulan Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu tarafından hazırlanmıştır.

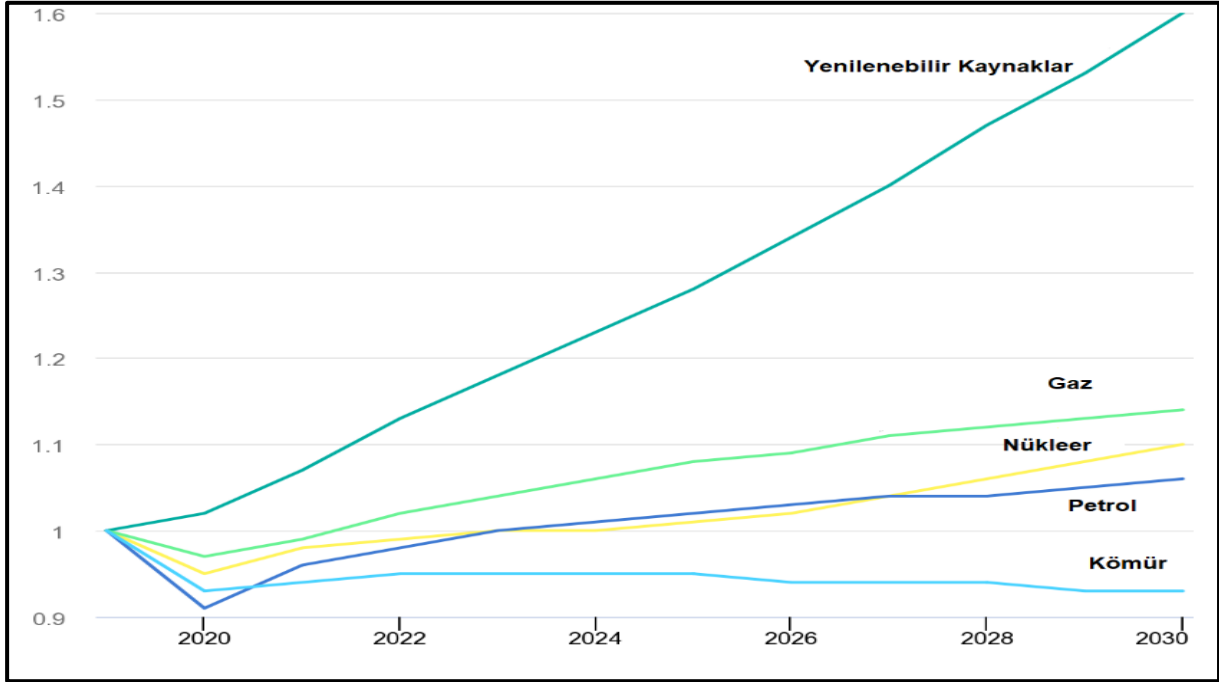
İstikrarlı ve sürdürülebilir bir ekonomik kalkınma için ülkelerin kendi enerji politikalarını geliştirmeleri ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmaları gerektiği yadsınamaz bir gerçektir. Ülkelerin cari açık vermeden, daha rekabetçi, istikrarlı ve sürdürülebilir bir büyüme sağlamak için enerji politikalarını bu yönde geliştirmeleri gerekmektedir. Daha temiz ve güvenli bir enerji sektörü, günümüzde prototip ya da ticarileşmenin erken aşamasında olan birçok yenilikçi enerji teknolojisinin benimsenmesini ve kullanılmasını gerektirmektedir. Söz konusu teknolojilerde ülkemizin Ar-Ge ve yenilik kapasitesini geliştirmesi, teknoloji geliştirme altyapısını güçlendirmesiyle iklim değişikliği krizini orta/uzun vadede fırsata çevirme imkânı da sağlanacaktır.

20. yüzyılın son çeyreğinde hissedilen ve özellikle son on yıldır artan iklim tehditleri, ülkelerin küresel ısınmayı önlemeye yönelik politikalarına hız kazandırmıştır. Dünya genelinde sera gazı emisyonlarının sektör kırılımına bakıldığında ilk sırada yüzde 73 ile enerjinin geldiği görülmektedir. Bunun büyük kısmı elektrik üretimi, sanayi, mesken ve ulaşımdaki enerji kullanımları sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, ülkeler karbon emisyonlarının büyük çoğunluğuna neden olan fosil yakıt kullanımını sınırlandırmaya, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve elektrifikasyon potansiyellerini azami ölçüde kullanmaya yönelmektedirler. Küresel karbon salımının yüzde 88'ini oluşturan 135 ülke net sıfır hedeflerini açıklamış ve bu çerçevede yenilenebilir enerji yatırımlarına hız vermişlerdir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA – International Energy Agency) verilerine göre 2022 yılında dünya çapında temiz enerjiye yapılan yatırımların tutarı 1,4 trilyon ABD doları olarak verilmiştir.¹

¹ IEA (2022). World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A) (Erişim tarihi: 15.08.2023)

Dünya nüfusundaki artışa paralel olarak enerji tüketimi de her yıl düzenli olarak artış göstermektedir. 2035 yılına gelindiğinde 1998 yılında tüketilen enerji miktarının iki katı, 2055 yılında ise üç katı enerji tüketimi olacağı tahmin edilmektedir (IEA verilerine göre 2030: 673 Gigaton Eşdeğer Petrol (GTEP), 2040: 708 GTEP, 2050: 740 GTEP).² Dünya birincil enerji talebinin yakıt türüne göre projeksiyonu Şekil 1’de verilmektedir.

Şekil 1. Yakıt Türüne Göre Birincil Enerji Talebi Projeksiyonu (IEA, 2020)



Dünya ortalamasından daha hızlı bir şekilde büyümekte olan ülkemizde bu büyümeye paralel olarak enerji tüketimi de düzenli olarak artmaktadır. Covid-19 salgınının etkisi altındayken bile küresel birincil enerji tüketimi 2020 yılında yüzde 4,5 oranında düşerken, Türkiye’nin birincil enerji tüketimi yüzde 2,7 oranında artış göstermiştir.

2000-2020 döneminde birincil enerji tüketiminde dünyada ortalama yüzde 1,8’lik bir büyüme kaydedilirken bu oran ülkemizde ortalama yüzde 3,1 olarak gerçekleşmiştir. IEA tarafından yayımlanan Dünya Enerji Görünümü 2022 raporuna göre günümüzde toplam nihai enerji tüketiminin yüzde 20’sini elektrik enerjisi oluşturmaktadır. Nihai enerji tüketiminde elektriğin payının artmasıyla birlikte elektrik enerjisinde arz güvenliğinin daha da önem

² IEA (2020). Key fuel trends in the Stated Policies Scenario, 2019-2030. IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/key-fuel-trends-in-the-stated-policies-scenario-2019-2030>, IEA. Licence: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

kazanacağı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda elektrikte arz güvenliğinin sürdürülebilmesi için yeni teknolojilerin ve yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir.³

Elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olan fosil yakıtların hızla tükendiği ve bu kaynakların çevreye verdiği zararlar göz önünde bulundurulduğunda, enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması, bugün ülkemiz de dâhil olmak üzere neredeyse tüm ülkelerin öncelikli enerji politikaları arasında yer almaktadır. Dünyada yenilenebilir kaynakların toplam elektrik enerjisi üretimindeki payında yaşanan artışa bakıldığında ise bu kaynaklara olan eğilim açıkça görülmektedir. 2011 yılında yenilenebilir enerjiden sağlanan elektrik üretiminin toplam içindeki oranı yüzde 20 iken, bu oran 2021 yılında yüzde 28'in üzerinde gerçekleşmiştir. Kaynak bazında en hızlı büyüme ise güneş ve rüzgâr enerjisinde yaşanmıştır.

Bu kapsamda önemi giderek artan teknolojilerden biri de enerji depolama teknolojileridir. Güneş ve rüzgâr gibi kaynaklardan sağlanan enerji üretimi hava koşullarına bağlı olduğundan değişkenlik göstermektedir. Gün içerisinde ve mevsimsel olarak elde edilen enerji üretimlerinde önemli farklılıklar oluşmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesindeki payının artmasıyla birlikte enerjinin depolanmasına yönelik sistemlere ilgi de artmaktadır. Enerji depolama, güneş ve rüzgâr enerjisinin kesintili çalışmasını gidermeye yardımcı olmanın yanı sıra talepte meydana gelen büyük dalgalanmalara hızlı bir şekilde yanıt vererek, şebekeyi daha duyarlı hale getirebilmekte ve yedek enerji santralleri inşa etme ihtiyacını azaltabilmektedir.

Sıfıra yakın olan sera gazı salımı, yakıt maliyetinin görece düşük olması ve böylece küresel enerji fiyatlarındaki dalgalanmalardan daha az etkilenmesi nedeniyle nükleer enerji, rekabetçi ve tercih edilen bir kaynak olarak ortaya çıkmaktadır. Güney Kore ve Çin örneklerine bakıldığında nükleer santrallerin enerji arz güvenliğine sağladığı katkıların yanında teknoloji edinimi olduğu takdirde, bir ülkenin endüstriyel anlamda atılım yapmasını tetiklediği açıkça görülmektedir. Diğer ülke örnekleri de incelendiğinde, nükleer santrallerin endüstriyel etkilerinin doğrudan devlet politikası ve liderliğine bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan özel sektörün nükleer sanayiye göstereceği ilgi devletin liderliği ve finansal desteğiyle doğru orantılı olacaktır.

³ IEA (2022). World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A) (Erişim tarihi: 15.08.2023)

Başta Avrupa olmak üzere çeşitli ülkelerin koyduğu net sıfır emisyon ya da iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltma hedeflerinde hidrojenin gelecekte önemli bir yere sahip olacağı kabul edilmektedir. Bunun temel nedeni, elektrifikasyonun yeterli olamayacağı yüksek ısı proseslerinde hidrojenin fosil yakıtlara alternatif olabileceğidir. Hidrojene ilave olarak, amonyak, metan vb. hidrojen türevleri ve ikincil ürünlerin de önümüzdeki dönemde karbonsuzlaşmada etkin bir rol oynayacakları tahmin edilmektedir.

Avrupa Birliği (AB), 11 Aralık 2019 tarihinde açıkladığı Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) ile 2050 yılına kadar iklim nötr olma yönünde hedef ortaya koymuştur. Bu hedefe ulaşmak için gereken temel politika ve önlemlerin ilk yol haritası niteliğindeki Komisyon Bildirimi'nde, öncelikli olarak geliştirilmesi gereken alanlar arasında temiz hidrojen, yakıt hücreleri, diğer alternatif yakıtlar, Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS - Carbon Capture, Utilisation and Storage) gibi teknolojilere yer verilmiştir.⁴

Karbondioksitin (CO₂) atmosferden uzaklaştırılması ilk etapta CO₂ emisyonlarını azaltmak ve önlemek için hayati önem taşıyan birçok stratejiye yardımcı olarak, iklim değişikliği etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir. *The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1,5°C Küresel Isınma Raporu* sanayileşme öncesi değerlere bakarak, ısınmayı 1,5°C ile sınırlı tutmak için 100-1.000 gigaton CO₂'nin atmosferden uzaklaştırılması gerektiğini ifade etmektedir.⁵

Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı (ETKB) tarafından Aralık 2022'de yayımlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda 2020-2035 dönemine ilişkin olarak hazırlanan senaryoda belirtilen ve aşağıda sıralanan hedeflerin ve öngörülerin On İkinci Kalkınma Planı kapsamında dikkate alınmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, 2020-2035 döneminde;

- Birincil enerji tüketiminin 205,3 Milyon Ton Eşdeğer Petrol (MTEP)'e yükseleceği,
- Elektrik tüketiminin 510,4 TWh'e ulaşacağı,

⁴ The European Green Deal (COM(2019)640 final) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁵ IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

- Elektrik enerjisinin nihai enerji tüketimi içindeki payının yüzde 24,9 oranına erişeceği,
- Enerji yoğunluğunun yüzde 35,3 oranında azalacağı,
- Elektrik kurulu gücü toplamda 189,7 Gigawatt (GW)'a ulaşırken
 - Güneş enerjisinde 52,9 GW'a
 - Rüzgâr enerjisinde 29,6 GW'a
 - Nükleer enerjide ise 7,2 GW'a ulaşılacağı hedeflenmektedir.

2020-2035 döneminde devreye alınması hedeflenen ilave kapasitenin 96,9 GW olacağı öngörülmektedir. Bu hedeflere ulaşmanın, enerji güvenliği, ekonomik kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik bağlamında, enerji teknolojilerindeki gelişme ve yenilik ile elde edileceği öngörülmektedir. Mevcut, yeni ve gelişmekte olan enerji teknolojilerindeki fırsatlar ile zorlukların anlaşılması, ülkemizin enerji güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması yolunda geliştirilecek politikalar için kritik öneme sahiptir.

2. MEVCUT DURUM ANALİZİ

2.1 Dünyada (Benzer Ülkeler ve Uluslararası Kuruluşlarda) Genel Durum

2.1.1 Dünyadaki Gelişme Eğilimleri

Rusya'nın Ukrayna'ya müdahalesi küresel bir enerji krizini tetiklemiş, Rusya'nın fosil yakıtları bir baskı unsuru olarak kullanması, Avrupa'nın da Rusya'dan petrol ve kömür ithalatına yönelik yaptırımları, küresel enerji ticaretinin ana arterlerinden birini kesmiştir (IEA, 2022). Doğal gaz, kömür ve petrol fiyatlarındaki artış dünya genelinde elektrik maliyetleri üzerindeki yukarı yönlü baskının yüzde 90'ını oluşturmuştur.

IEA yenilenebilir kaynakların, 2025 yılının başlarında kömürü geride bırakarak küresel elektrik üretiminin en büyük kaynağı haline geleceğini öngörmektedir. Tahminlere göre rüzgâr ve güneş kaynaklı elektrik enerjisinin, önümüzdeki beş yıl içinde iki kattan fazla artarak 2027 yılında küresel enerji üretiminin yaklaşık yüzde 20'sini sağlayacağı öngörülmektedir. Bu teknolojilerin 2022-2027 dönemi boyunca küresel yenilenebilir enerji üretim artışının yüzde 80'ini oluşturması beklenmektedir.⁶

Net sıfır emisyon hedefine ulaşma yolunda yapılan projeksiyonlarda tüm sektörlerde elektrifikasyona ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir. Bu ihtiyacın elektriğin doğrudan kullanımı ve yeşil hidrojen/sentetik yakıt teknolojilerinin geliştirilmesi ile karşılanabileceği belirtilmektedir. Öngörüler, elektrik ve elektrik temelli yakıtların 2030 yılına kadar AB'deki toplam nihai talebin yüzde 40'ından fazlasını, 2050 yılına kadar ise yüzde 90'ını karşılayabileceğini göstermektedir. Küresel ölçekte ise elektrik ve elektrik bazlı yakıtların 2030 yılına kadar toplam nihai talebin yaklaşık yüzde 30'unu, 2050 yılına kadar yaklaşık yüzde 70'ini karşılaması beklenmektedir.⁷

Güneş ve rüzgâr enerjileri mevcut durumda en hızlı gelişen elektrik üretim teknolojileri olup bu teknolojilerin farklı senaryo çalışmalarına göre 2050 yılına kadar enerji pazarına hâkim olmaları beklenmektedir. Önümüzdeki on yılda, küresel kurulu güneş enerjisi kapasitesinin ortalama yedi kat artarak toplamda yaklaşık 5.000 GW'a ulaşacağı öngörülmektedir. Aynı

⁶ IEA (2022). World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A) (Erişim tarihi: 15.08.2023)

⁷ Tarvydas D. (2022). Clean Energy Technology Observatory: Clean Energy Outlooks: Analysis and Critical Review – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/309952, JRC130719

dönemde, küresel rüzgâr kurulu güç kapasitesinin ortalama 3.000 GW'a ulaşması, elektrik üretiminin ise 2019 yılına kıyasla neredeyse altı kat artması beklenmektedir. Uzun dönemli projeksiyonlarda 2030 yılından sonra büyümenin devam ederek 2050 yılında küresel güneş enerjisi kapasitesinin 10.000-15.000 GW'a ulaşacağı ve toplam elektrik üretiminin yüzde 22-40'ını sağlayacağı beklenmektedir. 2050 yılına kadar, küresel rüzgâr kurulumlarının 7.000-8.000 GW'a ulaşarak dünya elektrik üretiminin yüzde 30'undan fazlasını karşılayabilir hale geleceği değerlendirilmektedir.⁸

Nükleer, hidrolik, jeotermal ve biyoenerjinin talebe göre sisteme verilebilir olmaları nedeniyle güneş ve rüzgâr enerjisi kapasitelerindeki artışa söz konusu bu teknolojilerdeki artışın eşlik edeceği tahmin edilmektedir. Çeşitli senaryolarda, bazı ülkelerde enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra yoğun olarak küçük, SMR'lerden elde edilip bu reaktörlerden elde edilen enerjinin de hidrojene dönüştürülerek hidrojen ağırlıklı depolama, ulaşım ve enerji dağıtımının yapılabileceği öngörülmektedir.⁹

IEA verilerine göre 2021 yılında küresel olarak tüketilen toplam kömürün yüzde 59'u, doğal gazın yüzde 34'ü, petrolün yüzde 4'ü, tüm yenilenebilir kaynakların yüzde 52'si ve nükleer enerjinin hemen hemen tamamı elektrik üretimi için kullanılmıştır.¹⁰

Nükleer enerjiden elektrik enerjisi üretimine yönelik talep, artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların fiyatının yüksekliği ve aşırı dalgalanmaları, iklim değişikliği, sosyal, siyasi ve teknik nedenler ile geçmişte yaşanan nükleer kazalara bağlı olarak değişse de nükleer enerji dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA - International Atomic Energy Agency) verilerine göre Mayıs 2023 itibarıyla dünyada 33 ülkede 410 ticari reaktör (368,6 GWe) işletmededir. 18 ülkede ise 58 reaktör (60,5 GWe) inşaat halindedir. Dünyada üretilen elektriğin yaklaşık yüzde 10,4'ü nükleer santrallerden karşılanmaktadır. Hemen hemen tüm senaryo çalışmalarında nükleer enerjinin elektrik üretimi içindeki payının gelecekte de (2050'de) yaklaşık yüzde 8-8,5 seviyelerinde kalacağı öngörülmektedir.

Son yıllarda küçük (<300 MWe) veya orta ölçekli (300-700 MWe) olarak sınıflandırılan nükleer reaktörlerin geliştirilmesi ve dünyada yaygın olarak kullanılması ön plana çıkmaktadır.

⁸ Tarvydas D. (2022). Clean Energy Technology Observatory: Clean Energy Outlooks: Analysis and Critical Review – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/309952, JRC130719

⁹ BloombergNEF, New Energy Outlook 2021, Executive summary, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

¹⁰ IEA (2021). World Energy Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

SMR bileşenleri ve sistemleri fabrikada üretilebilen ve modüler olarak kurulabilen, kojenerasyon uygulamalarına uygun yeni nesil nükleer reaktörler olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel büyük ölçekli reaktörlere göre güç ve boyut olarak daha küçük ve modüler yapıya sahip olan SMR'ler; daha az ilk yatırım maliyetine sahip olmaları nedeni ile daha düşük finansman riski sunarak özel teşebbüsler için yatırım açısından daha cazip olması; saha seçimi ve elektrik dışı kojenerasyon uygulamalarına imkân vermesi; kısa inşa süresi ile elektrik talebine daha hızlı karşılık vermesi; basit tasarımı, fabrikada ve seri üretime uygunluğuyla teknoloji transferini kolaylaştırması ve yerli sanayinin daha az yatırımla imalatı yer alabilmesini sağlaması gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji santralleriyle oluşturabilecekleri hibrit enerji sistemleri ile hidrojen üretimi, proses ısısı sağlama, tuzlu su arıtma ve bölgesel ısıtma gibi kojenerasyon uygulamalarına uygunluğu sayesinde karbonsuzlaşma hedeflerine önemli katkılar sunabilmektedir.

Diğer taraftan SMR teknolojilerine yönelik; ekonomik rekabet edebilirlik, lisans aşamasında yaşanabilecek zorluklar, yenilikçi tasarımların nükleer güvenlik açısından getirdiği tartışmalar, nükleer yakıt çevrimi ve işletmeden çıkarma süreçlerindeki belirsizlikler ile toplumsal kabul gibi konular halen tartışılan hususlar arasında yer almaktadır. Ayrıca dünyada geliştirilmekte olan 72 farklı SMR tasarımının varlığı, standartlaşma ve teknoloji seçimi konusunda ülkeler için zorluklar barındırmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajlar çerçevesinde SMR teknolojileri halen ülkemizin de içinde bulunduğu birçok ülkenin gündeminde önemli bir yer tutmakta olup bu teknolojilerdeki ilerlemeler yakından takip edilmektedir. Dünyada 10 ila 470 MWe arasında kurulu güce sahip 72 farklı SMR tasarımı bulunmaktadır. Ülkemizde de yatırımı halen devam etmekte olan Akkuyu Nükleer Güç Santralini (NGS) yanında gelecekte SMR kurulumunun (yerli sanayinin katılımıyla ve teknoloji edinimini sağlayacak şekilde) da çalışılması gerektiği düşünülmektedir.

2050 yılına kadar karbon nötr hedefine ulaşmak için termik güç üretiminden sıfır emisyon elde etmek amacıyla çeşitli teknolojiler üzerinde araştırmalar yürütülmek olup termik santrallerde amonyak, hidrojen vb. yakıtların kullanılması gibi alternatifler araştırılmaktadır. Kömür yakıtlı termik santralleri biyokütle santrallerine dönüştürmek ve böylece karbon nötr hale getirmek için alternatif seçenekler hâlihazırda değerlendirilmektedir. Kömür ve doğal gazın yakıt olarak kullanıldığı santrallere CCUS sistemlerinin entegre edilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Japonya'daki Hekinan Termik Santrali'nde sıfır CO₂ emisyonu hedefleri kapsamında 2030 yılına kadar kömür ile birlikte yüzde 20 oranında amonyak yakma,

2040 yılından itibaren ise sadece amonyak yakma hedefleri için çalışmalar yapılmaktadır. Doğal gazın hidrojenle belirli oranlarda karıştırılarak yakılması ve kullanımı yönünde araştırmalara ve ekipman üretimlerine başlanmıştır. Ayrıca tamamen hidrojen yakabilen termal güç ekipmanları konusunda da çalışmalar devam etmektedir. Kömür santrallerinde üretim sırasında çeşitli sıcaklıklarda ısı atılmaktadır. Bunların yanı sıra santralin tam yükte çalışmadığı gece saatlerindeki atık ısı da depolanarak, talebin yüksek olduğu zamanlarda kullanılarak yakıt tüketimi ve CO₂ azaltılabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (<140°C) depolanan atık ısılar Organik Rankine Döngüsü (ORC - Organic Rankine Cycle) kullanılarak değerlendirilirken, yüksek sıcaklıklardaki (>550°C) atık ısılar ön-ısıtma uygulamalarında değerlendirilebilmektedir.

Geliştirilmekte olan temiz kömür teknolojilerini dört ana grupta toplamak mümkündür:¹¹

- Kömür Hazırlama/İyileştirme Teknolojileri (kırma/öğütme/eleme/boyutlandırma/yıkama/kurutma/briketleme, vb): Bu teknolojiler ile kömürün bünyesindeki kükürt miktarını ve inorganik maddelerden oluşan kül miktarını azaltmak, böylelikle kirlilik yaratan ve yanmayan inorganik maddeleri baştan ayırarak kömürün kalitesini artırmak ve çevresel etkisini minimize etmek mümkündür.
- Santrallerde Verimlilik İyileştirmesi ve Emisyon Kontrol Teknolojileri: Yüksek Verimli Düşük Emisyonlu (HELE) teknolojiler kullanılarak santrallerdeki yüzde 1,5 verimlilik iyileştirmesi sayesinde planlanmayan durumlarda yüzde 5 ve CO₂ emisyonlarında yüzde 3 azalma sağlanabilmektedir. IEA tarafından yapılan bir çalışmada dünya genelinde mevcut durumdaki santral verimlilik ortalamasının yüzde 33 olduğu, bu oranın yüzde 40'a çıkarılması durumunda yıllık 2 Gt emisyon azaltmanın mümkün olduğu ve bunun Hindistan'ın yıllık CO₂ emisyonuna eşit olduğu ortaya konmuştur. Sera gazı olmayan emisyonlardan SO₂'yi baca gazı arıtma sistemleri ile yüzde 90-97; NO_x'u düşük NO_x yakıcılar ile yüzde 30, seçici katalitik indirgeme ve seçici katalitik olmayan indirgeme metotları ile yüzde 90;

¹¹ TÜBA-Temiz Kömür Teknolojileri Raporu (2018). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 25, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Temiz%20K%C3%B6m%C3%BCr%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

partikül maddeyi elektrostatik presipitator teknolojileri ile yüzde 99'lara varan yüksek verimlilikle tutmak mümkündür.

- Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim Teknolojileri (IGCC): Kömürün gazlaştırılmasını ve üretilen sentez gazından elektrik üretimini sağlayan bu teknoloji; elektrik dönüşüm veriminin konvansiyonel santrallere göre çok daha yüksek olması, yanma öncesi kirleticileri önleme teknolojisine sahip olması, daha düşük emisyon yayması, daha az su kullanıp daha az katı atık üretmesi, girdi ve ürün esnekliği (sentez gazından sadece elektrik değil ulaşımda kullanılan sıvı yakıt, hidrojen ve çeşitli kimyasalların üretilebilmesine olanak sağlaması) gibi avantajlara sahiptir.
- CCUS Teknolojileri: Fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yakalanması, kullanılması ve yer altına depolanmasını sağlayan bu teknoloji ile CO₂ emisyonlarının atmosfere salınımı engellenmektedir.

Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki artışın enerji depolama sistemlerinde yeni teknolojilerin geliştirilmesine fırsat verdiği değerlendirilmektedir. Enerji depolama sistemleri, güneş ve rüzgâr gibi kesintili ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamanın yanı sıra mevcut enerji dönüşüm sistemlerinin de verimli ve etkin bir şekilde kullanımı açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca enerji arz/talep dengesinin sağlanmasında da önemli bir rol oynamakta, sistemi sürekli, ekonomik ve güvenilir kılmaktadır.

Bloomberg NEF (BNEF) raporlarında 2021 yılı sonunda küresel enerji depolama kapasitesi 27 GW/56 GWh olarak belirtilmiştir¹². Bu değerin 2030 yılına kadar 411 GW/1.194 GWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu politikalar arasında temiz teknolojilere 369 milyar ABD doları destek sağlayan Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nin "Enflasyonu Düşürme Yasası" ve AB'nin Rus gazına olan bağımlılığını azaltmayı hedefleyen "REPowerEU" planı önemli yer teşkil etmektedir.

IEA'ya göre mevcut küresel depolama kapasitesinin çok büyük bir bölümü Pompaj Depolamalı HES'lerden (PHES) oluşmaktadır. 2020 yılı itibarıyla dünyada PHES kurulu gücü 160 GW mertebesinde olup bu kapasitenin 2026 yılında 200 GW, 2030 yılında 300 GW ve 2050 yılında 325 GW seviyesine ulaşması öngörülmektedir. Diğer yandan en hızlı büyüyen

¹² BloombergNEF, New Energy Outlook 2021, Executive summary, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

depolama teknolojisi ise batarya enerji depolama teknolojileridir. Küresel batarya kapasitesinin 2050 yılına kadar 1.000 GW'tan fazla artarak yaklaşık 50 katına çıkması beklenmektedir. Ayrıca 2050 yılında gelişmiş ülkelerde şebeke esnekliğinin dörtte birinin bataryalardan sağlanacağı öngörülmektedir.¹³

Batarya hücrelerinin hammaddeden hücreye dönüşüm sürecinde ilk aşamada lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi malzemeler ham olarak temin edildikten sonra saflaştırma veya farklı özelliklerinin iyileştirilmesi için özel işlemlerden geçirilmektedir. Maddelere gerekli özellikler kazandırıldıktan sonra anot ve katot üretimi safhasına geçilmektedir. Anot folyo, grafit kaplı bakırdan üretilirken, katot folyo ise lityum-metal-oksit kaplı alüminyumdan imal edilmektedir. Katot ve anot levhaları arasına elektrolit çözeltisi yerleştirilerek iyonların serbest şekilde hareket etmesine imkân verilmektedir. Katot-ayırıcı-anot katmanları sarılarak veya istiflenerek tek bir batarya hücresini meydana getirmektedir. Hücreler geliştirildikten sonra seri veya paralel formda istiflenerek voltaj ve elektrik depolama kapasitelerinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Son işlem olarak batarya ve ısı yönetim kontrolcülerini ilave edilerek hücrelerin eş ve güvenilir çalışma koşullarında tutulması sağlanmaktadır. Daha sonrasında modüller istenen güç seviyesinin elde edilmesi amacıyla bir araya getirilerek bataryayı oluşturmaktadır. Uygulamada farklı tipte bataryalar kullanılmakta olup 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-NiCl₂) ve (vi) Lityum-iyon (Li-ion)'dur.

Son yıllarda yüksek enerji yoğunluğu ve elektrikli araçlarda kullanımı nedeniyle lityum-iyon batarya teknolojisi öne çıkmıştır. Başta Çin olmak üzere ABD, İngiltere, Güney Kore, Japonya, Almanya ve Fransa'da değişik ölçeklerde lityum-iyon hücre üretiminin yapıldığı fabrikalar bulunmaktadır. Bu ülkeler arasında özellikle Almanya'da kurulacak lityum-iyon batarya üretim tesislerinin toplam kapasitelerinin başlangıçta 104 GWh'ı bulması planlanmaktadır. Bu ülkelerde hücre üretim teknolojileri geliştirilmekte, hücre ham madde ve bileşenlerinin üretimi ve kıymetli elementlerin geri dönüşümü yapılmaktadır. Dünyadaki lityum-iyon batarya kullanımı 2000'li yılların başlarında 2 GWh seviyelerinde iken 2019 yılında bu miktar diğer kullanım alanlarının artmasıyla birlikte 190 GWh seviyelerine

¹³ IRENA (2022). Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf?rev=460f190dea15442eba8373d9625341ae, (Erişim tarihi:15.08.2023)

ulaşmıştır. 2025 yılı öngörülerine göre tüm enerji depolama sistemlerinde lityum-iyon bataryaların pazardaki payının artacağı beklenmektedir (45 milyar ABD doları).¹⁴

Depolama teknolojilerine olan ihtiyacı artıracak olan en önemli gelişmelerden biri hiç şüphesiz elektrikli araçların yaygınlaşmasıdır. Elektrikli araç satışı 2022 yılında bir önceki yıla göre yüzde 55 artarak 10 milyon seviyesini aşmış olup toplam otomobil satışının yaklaşık yüzde 14'ünü karşılamıştır. Elektrikli araçların bu denli artmasındaki en önemli faktörün sübvansiyonlar ve teşvikler olduğu düşünülmekte olup 2022 yılında sektöre yaklaşık 40 milyar ABD doları destek sağlanmıştır.¹⁵ Elektrikli araçlardaki hızlı artış batarya arz zincirinin dayanıklılığını da test etmiştir. Pandemi, küresel krizler ve dünya ekonomisindeki yavaşlama gibi nedenlerle kobalt, lityum ve nikel gibi kritik hammadde fiyatları artmıştır. Örneğin 2022 yılı Mayıs ayında lityum fiyatı 2021 yılına göre yedi katına çıkmıştır. Bu durum 2022 yılında elektrikli araçların maliyetleri üzerinde ciddi baskı oluştursa da 2023 yılında lityum fiyatlarının 2022 yılına göre yüzde 30-40 oranında düşük seyretmesi bu baskıyı nispeten de olsa azaltmıştır. Günümüzde lityum-iyon bataryaların dörtte üçünü üreten Çin batarya arz zincirinin merkezi konumundadır. Ayrıca lityum, kobalt ve grafit gibi önemli minerallerin yarısından fazlası Çin'de bulunmaktadır.¹⁶

Lityum-iyon batarya teknolojisinde her ne kadar yapılan yatırımların çoğu otomotiv sektörü için olsa da yapılan araştırmalar batarya hücrelerinin enerji depolama sistemleri için de yoğun olarak kullanılmasını öngörmektedir. Örneğin 2020 yılı için lityum-iyon batarya toplam enerji depolama kapasitesi 14,7 GWh iken bu rakamın 2030 yılı itibarıyla 63,2 GWh olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca söz konusu teknolojilerin telekomünikasyon alanında kullanılan pillerde kurşun asit akünün pazar payından pay alacağı öngörülmektedir.

Günümüzde kullanılan enerji depolama sistemlerinden bataryalar yüksek depolama maliyetleri nedeniyle ancak küçük ve orta ölçekli depolama için kullanılmaktadır. Yüksek kapasiteye uygun PHES teknolojisi ise coğrafi sebeplerden dolayı sınırlı kullanıma sahiptir. Bataryalar küçük ölçekli uygulamalarda avantaj sağlasa da büyük ölçekli enerji santralleri için ısı enerjisi depolama sistemlerinin kullanımı ekonomik açıdan daha uygun bir seçenektir. Rüzgâr

¹⁴ Global Lithium Ion Battery Market (2020). Persistence Market Research

<https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/lithium-ion-battery-market.asp> (Erişim tarihi:15.08.2023)

¹⁵ IEA (2023). Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

¹⁶ IEA (2023). Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

santrallerinden elde edilen elektrik enerjisinin depolanması açısından yüksek verim ve düşük maliyetli bir enerji depolama çözümü olan elektrikli ve ısıt enerji depolama (ETES) öne çıkmaktadır. ETES ile bir rüzgâr türbininin kombinasyonu, taban yük (base-load) kapasitesine sahip yenilenebilir bir enerji kaynağı için ideal kurulumdur.

ETES teknolojisinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi (veya doğrudan ısıt enerji) ısıt olarak depolanmakta ve daha sonra elektrik üretimi amacıyla depolanan ısıt enerji geri kullanılmaktadır. Bu yöntemde temel olarak duyulur ısıt enerji depolama tekniğı kullanılmakta olup ısıt enerji volkanik taşlarda depolanmaktadır. Rüzgâr destekli ETES'i tasarım konusunda sürdürülebilir ve maliyet açısından etkin kılan söz konusu teknik, bağımsız ve modüler sistemler olmasından dolayı rüzgâr santrallerinin kurulu olduğu hemen hemen her yere inşa edilebilmekte ve GWh mertebesinde ısıt enerji depolamaya imkân sağlayabilmektedir.

Tablo 1'de farklı tip enerji depolama teknolojileri (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.¹⁷

Tablo 1. Seçilmiş Enerji Depolama Teknolojilerinin Temel Karakteristikleri¹⁸

Enerji Depolama Tekniğı	Güç Kapasitesi- Megawatt (MW)	Çevrim Sayısı veya Süresi	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Verimlilik (yüzde)	Tepki Süresi
Süper Kapasitör	0,01 – 1	10.000 – 100.000	10 – 20	80 – 98	10–20 ms
PHES	100 – 1.000	30 – 60 yıl	0,2 – 2	70 – 85	saniye– dakika
Sıkıştırılmış Hava	10 – 1.000	20 – 40 yıl	2 – 6	40 – 75	saniye– dakika
Volan	0,001 – 1	20.000 – 100.000	20 – 80	70 – 95	10–20 ms
Kurşun Asit	0,001 – 100	6 – 40 yıl	50 – 80	80 – 90	<saniye
Sodyum Sülfür	10 – 100	2.500 – 4.400	150 – 300	70 – 90	10–20 ms
Lityum İyon	0,1 – 100	1.000 – 10.000	200 – 400	85 – 98	10–20 ms
Akışkan	1 – 100	12.000 – 14.000	20 – 70	60 – 85	10–20 ms
Hidrojen	0,01 – 1.000	5 – 30 yıl	600 (200 bar)	25 – 45	saniye– dakika
Sentetik Doğal Gaz	50 – 1000	30 yıl	1800	25 – 50	saniye– dakika
Erimiş Tuz (ısıt)	1 – 150	30 yıl	70 – 210	80 – 90	dakika

¹⁷ 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). (Erişim tarihi:15.08.2023)

¹⁸ TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 35, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

Günümüzde en yaygın ve en uzun süredir kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektriktir. IEA raporlarına göre 2021-2030 dönemindedeki en büyük yenilenebilir kaynak olmaya devam etmesi beklenmektedir. Dünyada toplam kurulu hidroelektrik kapasitesi 1.360 GW'tır. Son yıllarda başta Çin ve Brezilya olmak üzere Asya ve Güney Amerika ülkeleri küresel hidroelektrik kapasite artışlarına yön vermiştir. Asya'daki kurulu kapasite 2017-2022 döneminde 462 GW'dan 514 GW'a yükselmiş, aynı dönemde Güney Amerika'daki toplam kapasite 175 GW'dan 192 GW'a ulaşmıştır. 2030 yılına kadar kapasite ilavelerinin çoğunun Asya ve Afrika'daki büyük projelerden gelmesi beklenmektedir. Hidrolik kaynaklı elektrik üretimi, Avrupa kıtası genelinde üretilen yaklaşık 660 TWh ile yenilenebilir enerjinin önde gelen kaynağı olmaya devam etmiştir.

Teknoloji odaklı bakıldığında dünyada hidroelektrik alanında yapılan Ar-Ge faaliyetleri; hidroelektrikte esneklik (düşük düşü ve ultra düşük düşüde çalışma, sık duruş ve kalkış için yıpranmayı önleyici çözümler, hidroelektrik enerji depolama, vb.), hidroelektrikte dijitalleşme, enerji depolama ve değişken devirli türbinler, akım kontrollü ikaza sahip jeneratörler, yenilikçi küçük-ölçekli hidroelektrik teknolojileri, çevre dostu hidroelektrik teknolojileri olmak üzere altı konuda gruplandırılmaktadır.¹⁹⁻²⁰

Bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgârdan elektrik enerjisi üretimi büyük çoğunlukla karaüstü türbinler kullanılarak yapılmakta olup 2021 yılı Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council, GWEC) raporuna göre 743 GW'lık toplam dünya kurulu gücünün 708 GW'ı karaüstü santrallerden oluşmaktadır. Özellikle 2000'li yılların başından itibaren yoğun Ar-Ge faaliyetleriyle bu türbinlerin seviyelendirilmiş enerji maliyetleri (LCOE) oldukça düşmüş ve çeşitli ülkelerde yenilenebilir enerjiyi destekleyici mevzuatların ve teşvik mekanizmalarının da çıkarılması ile rüzgâr santralleri oldukça yaygınlaşmıştır.

Karaüstü santrallere ek olarak denizüstü çalışabilen rüzgâr türbin teknolojilerinin geliştirilmesi çalışmaları özellikle son 15 yılda oldukça artmıştır. Yine GWEC 2021 raporuna göre 743 GW toplam dünya kurulu gücünün 35 GW'ı denizüstü santrallerden oluşmaktadır. LCOE bazında karaüstü türbin teknolojilerine göre ilk yıllarda oldukça maliyetli olan denizüstü sistemler, özellikle son 15 yılda yapılan Ar-Ge faaliyetleri neticesinde oldukça maliyet etkin

¹⁹ Kougias, I., Aggidis, G., et al. (2019). "Analysis of emerging technologies in the hydropower sector", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 113, 109257, ISSN 1364-0321.

²⁰ <https://www.hydropower.org/blog/six-emerging-hydropower-technology-trends> (Erişim tarihi:15.08.2023)

hale gelmiştir. Son yıllarda özellikle kuzey denizinde çok yaygın bir şekilde denizüstü rüzgâr santralleri kurulmaya başlanmıştır.

2000’li yılların başından itibaren özellikle son 20 yılda hızla artan rüzgâr enerjisi santrali (RES) kurulu gücü 2020 ve 2021 yıllarındaki agresif büyümenin ardından 2022 yılında 894 GW’a ulaşmıştır. 115 ülkede kara üstü RES bulunmakta iken deniz üstü RES ise sadece 19 ülkede mevcuttur.²¹ 2022-2026 döneminde AB’de 116 GW RES kurulumunun gerçekleştirileceği tahmin edilmektedir. Bu da yıllık ortalama 23 GW RES kurulumu olması anlamına gelmektedir. Bu yeni toplam kapasitenin dörtte üçünün karasal RES ile karşılanacağı öngörülmektedir.

Toplam kurulu güçteki deniz üstü RES payı da son yıllarda hızla artarak 2021 yılı sonu itibarıyla 57 GW’a ulaşarak yüzde 7 olmuştur. Son 20 yılda Danimarka, İngiltere, Belçika, Çin ve Almanya gibi ülkeler küresel deniz üstü RES gelişimine öncülük etmiştir. Mevcut deniz üstü RES’lerin yaklaşık yüzde 90’ı Avrupa’da (Kuzey Denizi ve Atlantik Okyanusu) yer almaktadır. Çin, 2021 yılında gerçekleştirilen deniz üstü RES yatırımlarının yüzde 80’ini oluşturmuştur. Deniz üstü RES yatırımlarında yeni bir pazar olan Vietnam ise 779 MW yakın-kıyı (near-shore) deniz üstü RES yatırımı gerçekleştirmiştir.

Hâlihazırda kurulmuş olan denizüstü santrallerdeki türbinlerin büyük çoğunluğu deniz tabanına sabitlenmiş olarak çalışan türbinlerdir. Mevcut teknoloji seviyesi ile deniz üstü türbin kurulumları ancak yaklaşık 50-60 m derinliğe kadar yapılabilmektedir. Rüzgâr akış kalitesinin kıyıda daha uzak mesafelerde daha iyi olması, 50 m su derinliğinin üzerinde deniz tabanına sabitlenmiş sistemlerin maliyetli olması ve bazı denizlerde kıta sahanlığının aniden derinleşmesi sektörün denizüstü yüzer türbin sistemlerine yönelmesine sebep olmuştur.²²

Rüzgâr üretim santrallerinin ilk yatırım maliyetleri, karaüstü santraller için (şebeke bağlantı maliyetleri dâhil) 1.000-1.400 avro/kW’tır. Denizüstü santraller (şebeke bağlantı maliyetleri dâhil) için kW başına maliyetler 2.000-3.500 avro arasında olup 50 m’yi aşan su derinliğinde açık deniz için 7.000 avro/kW’a kadar çıkabilmektedir. Tipik olarak rüzgâr enerjisi kurulumları için ortalama yıllık çalışma süreleri karada 1.800-2.200 tam yük saati ve açık denizde 3.500-4.000 tam yük saati seviyesindedir.²³

²¹ REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-04-5 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)

²² GWEC Global Wind Report (2021). <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>, (Erişim tarihi:15.08.2023)

²³ EUROGIA 2030. <https://eurogia.eu/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

Karaüstü ve denizüstü türbin sistemlerine ek olarak son on yılda Ar-Ge faaliyetlerinin oldukça yoğunlaştığı, bir diğer yenilikçi rüzgâr teknolojisi ise uçan türbin sistemleridir (AWE - Airborne Wind Energy). Özellikle yüksek irtifada (200-800 m arası) bulunan yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeli bu sistemleri oldukça çekici kılmaktadır. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) raporunda, önümüzdeki 1-4 yıl içerisinde, uçan rüzgâr enerjisi sistemleri ile ilgili, ABD’de ulusal bir Ar-Ge programının başlatılması ve bir uçuş test merkezinin kurulması, 3-10 yıl içerisinde ticari firmaların Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi ve bu firmalara test ve simülasyon konusunda destek verilmesi, 6-10 yıl içerisinde ise üretilecek, ticari potansiyeli yüksek prototiplerin NREL uçuş merkezinde denenmesi ve bazı pilot bölgelerde enerji üretim uygulamalarının başlatılması önerilmektedir.²⁴

Rüzgâr enerjisi teknolojik gelişme alanları;

- Yenilikçi rüzgâr türbini ve bileşenlerinin geliştirilmesi (yüksek mukavemetli, yüksek iç sönümlemeye sahip, geri dönüştürülebilir vb. bileşenlerin geliştirilmesi),
- Yüksek verimli ve düşük maliyetli rüzgâr enerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonu ve performans testlerinin yapılması,
- Rüzgâr türbini tasarım ve modelleme çalışmaları kapsamında türbülanslı akış simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, birbirlerine yakın olarak kurulan rüzgâr santralleri arasında iz bölgesi etkileşimlerinin doğru modellenmesi, sağanaklı akışlar (gust conditions) altında tepkilerinin incelenmesi, kanat yüzeylerinin kirlenmesi veya erozyonundan dolayı meydana gelen kanat profil değişikliklerinden kaynaklı performans kayıplarının modellenmesi, kanatlar üzerinde akış kopmalı bölgelerin yenilikçi akış kontrol teknikleri ile engellenmesi,
- Yenilikçi kontrol sistem algoritmaları geliştirilerek santrallerdeki türbin yüklerinin azaltılması ve üretimin artırılması (wake steering, thrust clipping gibi),
- Yenilikçi sensör sistemlerinin ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi (kule titreşim sönümlenmesi, bireysel hatve kontrolü, ışık tespiti ve uzaklık tayini (LİDAR) tabanlı kontrolcüler gibi),
- Akıllı rotorların geliştirilmesi, yapay zekâ uygulamalarının kullanılması,

²⁴ <https://www.nrel.gov/wind/publications.html> (Erişim tarihi:15.08.2023)

- Açık deniz rüzgâr türbinleri için yenilikçi bileşen malzemelerinin ve tasarımların geliştirilmesi, sayısal ve fiziksel modelleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve bu sistemlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesidir.

Üretim teknolojisi alanında yaşanan gelişmeler sayesinde güneş enerjisinin enerji dönüşümünde aldığı rol her geçen gün daha fazla ön plana çıkmaktadır. 2010-2020 döneminde yıllık ortalama yüzde 33 büyümeye gösteren küresel güneş enerjisi kurulu gücü, 2010 yılında 40 GW’tan 2020 yılında 710 GW seviyesine ulaşmıştır. Mevcut güneş enerjisi kurulu gücünün dört katına çıkarak 2030 yılında 3.500 GW’ı aşması beklenmektedir.²⁵

Karbon salımı ve çevresel etkisi açısından sürdürülebilir bir teknoloji olması ve çevreyle uyumlu enerji üretim imkânı sunması, gittikçe azalan kurulum ve işletme maliyetleri, gelişen verimliliği, hızlı bir şekilde devreye alınabilmesi ve hibrit kullanıma uygun olması gibi hususlar güneş enerjisinin ön plana çıkmasını desteklemektedir. Dünya güneş enerjisi kurulu gücünde lider konumda olan Çin, son yıllarda panel ve hücre üretimi pazarında da payını artırarak hücre ve panel üretim sektöründe hâkim konuma gelmiştir.

Fotovoltaik (PV), son on yılda yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi için en hızlı büyüyen teknoloji olmuştur. Küresel kümülatif PV kurulu kapasitesi, Mart 2022’de 1 TW’ı aşmış, Avrupa’da 2021 yılının sonunda 170 GW kümülatif kurulu PV kapasitesine ve kümülatif 158 TWh elektrik üretimine ulaşılmıştır. Mayıs-Ağustos 2022 arasında Avrupa’da, 2021’in aynı döneminde üretilen 77,7 TWh’ye kıyasla yüzde 28’lik bir artışa karşılık gelen 99,4 TWh güneş kaynaklı elektrik üretilmiştir.

Dünya PV pazarına 2010 yılından bu yana Uzakdoğu ülkeleri hâkimdir.²⁶ 2019 yılı özelinde PV panellerin yüzde 71’i Çin, yüzde 6’sı Malezya, yüzde 6’sı Güney Kore’de üretilmiştir.²⁷

Küresel olarak güneş enerjisi teknolojilerinde yüzde 85-95 oranında Çin’e olan bağımlılığın sona erdirilmesi amacıyla bu alanda ABD’de önemli bir politika yürürlüğe girmiştir. 2022 yılında mevzuattaki yerini alan “Enflasyonu Düşürme Yasası” çerçevesinde

²⁵ PWC (2021). Türkiye ve Dünyada Güneş Enerjisi Sektörü, Aralık 2021, <https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/enerji/turkiye-ve-dunyada-gunes-enerjisi-sektoru-raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

²⁶ Fraunhofer ISE Photovoltaics Report (2021).

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

²⁷ <https://www.statista.com/statistics/668749/regional-distribution-of-solar-pv-module-manufacturing/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

ABD Federal Hükümeti yaklaşık 70 milyar ABD dolarlık kaynağı Çin'den bağımsız bir güneş endüstrisi yaratmak için ayırmıştır. Bu kapsamda güneş hücresi üretebilmek için gerekli olan polisilikon ve solar wafer üretimi için 2032 yılına kadar kayda değer bir teşvik mekanizması ortaya konmuştur. Çin'in bu alandaki tekeli küresel düzeyde stratejik kırılganlık yaratmakta olup İngiltere ve AB'de güneş enerjisi teknolojilerinin yerli imkânlarla üretilmesi eğilimini takip etmektedir. Ayrıca ABD ve AB, Çin menşeli güneş enerjisi bileşenlerinin hâkimiyetini azaltmak üzere sıkı bir kaynak izlenebilirliği kriterleri getirmektedir.

PV piyasasının yüzde 94'ü teorik verim değeri yaklaşık yüzde 30 ile sınırlı olan silisyum soğurucu malzemesinden üretilen güneş hücrelerine aittir.²⁸ Günümüzde küçük ve orta büyüklükteki (3-20 kWp) bir PV sisteminin (çatı üstü) ortalama anahtar teslim fiyatı 5 avro/Wp, büyük sistemlerin teslim fiyatı ise 1 avro/Wp'dir.²⁸ Silisyumun doğada bol bulunması ve silisyumdan üretilen güneş hücrelerinin karbon ayak izinin düşük olması bu teknolojinin avantajlarından. Temel (düşük soğurma katsayısı ve yüksek kaliteli kristal gerekliliği) ve teknik (yüksek sıcaklık ve zararlı gaz içeren vakum prosesleri gibi) zorluklara rağmen, mikroelektronikteki bilgi birikiminden de yararlanan silisyum PV endüstrisi özellikle düşük yüzey kusur yoğunluğu ve düşük kontak direncine sahip yüksek verimli hücrelerin geliştirilmesi ile milyarlarca dolarlık bir piyasa halini almıştır. Silisyum güneş hücrelerinin maliyetinin daha da düşürülmesi için yüksek sıcaklık, toksik gaz kullanımı ve vakum gerektiren aşamaların bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bunun için katkısız silisyum güneş hücrelerinde elektron geçirgen ve boşluk geçirgen tabaka olarak çeşitli filmler kullanılabilmekte olup bu konuda henüz ticari bir ürün bulunmamaktadır.²⁹

Tek soğuruculu hücreler arasında en verimli olanı galyum arsenid (GaAs)'dir (yüzde 29,1).³⁰ Ancak üretim maliyetlerindeki yükseklik nedeniyle GaAs hücrelerin piyasaya yayılması mümkün olmamıştır. Günümüzde kadmiyum tellür (CdTe) güneş hücrelerinin laboratuvar verimi yüzde 22,1'dir. Kadmiyumun toksik dezavantajına rağmen CdTe oldukça kararlı bir malzemedir ve yaşam döngüsünde çevreye olan zararı diğer hücre teknolojileri ile benzerdir.

²⁸ EUROGIA 2030. <https://eurogia.eu/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

²⁹ İklim Şurası, Bilim ve Teknoloji Komisyonu Raporu, 2022

³⁰ J. Melskens, B. W. H. Van De Loo, B. Macco, L. E. Black, S. Smit, and W. M. M. Kessels (2018). "Passivating Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells: From Concepts and Materials to Prospects," IEEE J. Photovoltaics, vol. 8, no. 2, pp. 373–388.

Perovskit güneş hücreleri 2009 yılında keşfedilmiş olup on yıl gibi kısa bir süre içerisinde hücre verimi yüzde 25 değerini aşmıştır.³¹ Hücrelerin gösterdiği bu yüksek performans genel haliyle perovskit materyalinin yüksek soğurma katsayısı, uzun yük taşıyıcı difüzyon uzaklıkları, yüksek taşıyıcı devinirliği (mobility) ve ömrü gibi mükemmel yakın optoelektronik özelliklerinin malzemenin kolay üretim ve işlenmesine izin vermesiyle birleşmesi sonucu olduğu söylenebilir. Bunlara ek olarak yüksek kristal kalitesi ve düşük kusur yoğunluğu yüksek verimlerin önünü açmıştır. Perovskit malzemelerin içsel kararlılık problemleri ve içeriğindeki kurşun (II) katyonunun potansiyel toksik yapısı hala çalışmaların sürdüğü aktif araştırma konularındandır. Her iki problemi de çözmeye ve perovskit hücrelerin çevreye yapabileceği potansiyel etkileri engellemeye yönelik olarak hücre kaplama (encapsulation) metotları geliştirilmeye devam edilmektedir.

Silisyum teknolojisinin bazı zaafırları olmasına rağmen hali hazırda fosil yakıtlardan elde edilen elektriğe göre rekabetçi fiyat sunması ve teknolojinin dünyada yaygın olması nedenleriyle yakın ve orta gelecekte de piyasaya hâkim olması beklenmektedir. Diğer yandan Avrupa ve ABD'nin yaptığı gibi silisyum ile tandem yapıda kullanılması mümkün olan ince film teknolojilerine ve tandem teknolojisine önem verilmesi teorik limitler göz önüne alındığında kaçınılmazdır.

Bu bağlamda en umut verici ve verimli teknolojiler; III-V grubu silisyum temelli tandemler (modül verimliliği yüzde 32,7) ve perovskit/silisyum tandemlerdir (modül verimliliği yüzde 31,3). PV pazarında, pasifleştirilmiş emitör ve arka temaslı (PERC) güneş pillerinin (2022 verimliliği yaklaşık yüzde 21, 2032 verimi yaklaşık yüzde 22,5) n-tip tünel oksit pasif kontak (TOPCon) güneş pili teknolojisi (2022 modül verimliliği yaklaşık yüzde 21,3, 2032 modül verimliliği öngörüsü yaklaşık yüzde 24) ile değiştirilmesine yönelik eğilimler bulunmaktadır. Daha az malzeme tüketimi ve daha düşük maliyetlerle birlikte yüksek verimli PV teknolojileri elde etmek için Ar-Ge faaliyetleri yapılmaktadır.³²

Isıl güneş enerjisinden elektrik üreten santrallerde yüksek sıcaklıkta elde edilen ısıyla buhar üretilmektedir. Daha sonra buhar türbinden geçirilerek jeneratörden elektrik üretimi

³¹ Best Research-Cell Efficiency Chart (2021). National Renewable Energy Laboratory <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (Erişim tarihi:15.08.2023)

³² Chatzipanagi, A., Jaeger-Waldau, A., Cleret de Langavant, C., Letout, S., Latunussa, C., Mountraki, A., Georgakaki, A., Ince, E., Kuokkanen, A. and Shtjefni, D., (2022). Clean Energy Technology Observatory: Photovoltaics in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/812610, JRC130720..

sağlanmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerine (CSP - Concentrated Solar Power) entegre edilen termal enerji depolama sistemiyle ihtiyaç olduğu zaman ve miktarda elektrik üretilmesi, güneş ışınımındaki dalgalanmalardan etkilenmeden sağlanabilmektedir. CSP sistemleri doğru ya da nokta odaklı olarak iki kategoride ele alınabilir. Doğru odaklı olan sistemler, parabolik oluklu kolektör ve lineer fresnel kolektör sistemleri; nokta odaklı sistemler ise çanak ve kule sistemleridir.

CSP sisteminin istenilen performansı gösterebilmesi ve ekonomik olabilmesi için en önemli etken doğrudan gelen güneş ışınları (direct normal irradiation – DNI) seviyesinin 1.900 ile 2.100 kWh/m² aralığında olan yerlerde kurulmuş olmasıdır. Diğer bir önemli faktör ise tarımsal üretime elverişli olmayan alanlarda kurulabilmesidir. Yıllık bir GWh elektrik üretimi sağlanabilecek CSP tesisi için gerekli alanın yaklaşık 1,3 hektar olduğu kabul edilmektedir.³³

CSP sistem maliyetleri 2010-2020 döneminde yaklaşık yüzde 68 azalmıştır. Aynı dönemde yüzde 80’den fazla maliyet düşüşü yaşayan PV sistemlerden sonra yenilenebilir enerji sistemleri arasındaki en büyük maliyet düşüşü bu teknolojilerde görülmüştür. Bu maliyet düşüşüyle birlikte doğrudan güneş ışınım değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde CSP kurulumlarının arttığı görülmektedir. Bu artışta teknolojik yeniliklerin, iyileştirilmiş tedarik zincirinin ve firmaların rekabet gücünün de payı bulunmaktadır.³⁴

2010 yılında dünyadaki CSP kurulu gücü 1,2 GWe iken bu miktar on sene içerisinde dört kattan fazla artarak 2020 yılı sonunda 6,2 GWe kapasitesine ulaşmıştır. İspanya 50 tesis ve toplam 2,3 GWe kurulu güçle dünyada lider konumdadır.³⁵ CSP endüstrisinin İspanya ve ABD’nin yanı sıra BAE ve Çin’e yoğunlaştığı görülmektedir. IEA’nın 2050 yılına kadar net sıfır emisyon senaryosuna göre 2020-2030 döneminde CSP’lerde yılda yaklaşık yüzde 31 artış olması ve buna karşılık yıllık kapasite artışının yaklaşık 6,7 GW olacağı tahmin edilmektedir.³⁶

CSP santrallerinin ekonomik olarak işletilebilmeleri için 50-200 MW kapasiteye sahip olması beklenmektedir.³⁷ Bu santrallerin endüstriyel tesislerin bulunduğu alanlarda kurulması

³³Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., and Heath G. (2013). Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. Technical Report NREL/TP-6A20-56290, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden (Colorado), USA, <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

³⁴ REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-04-5 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)

³⁵ CSPFocus (2020). Generation from Spain’s Existing 2.3 GW of CSP Showing Annual Increases. In: CSP News Briefs, SolarPACES/ iea Energy Technology Network.

³⁶ IEA (2021). Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

³⁷ DLR (2021). “Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power”. https://www.dlr.de/en/latest/news/2021/01/20210330_study-solar-thermal-power (Erişim tarihi:15.08.2023)

elektriğin yanı sıra endüstriyel ısı talebinin de karşılanmasıyla CSP tesisinin kârlılığı artabilmektedir. Şili’de maden ocaklarının ve endüstriyel işleme tesislerinin bulunduğu bir alanda bu uygulamanın bir örneği bulunmaktadır.

Bu alanda dünyadaki eğilimlerden biri de maliyetleri düşürmek ve kapasite faktörlerini artırmak için CSP sistemlerini PV sistemler ile hibrit hale getirmektir. Böylece sistemler hem birbirini desteklemekte hem de enerji arzının güvenilir olması sağlanmaktadır. Fas’ta bulunan “Noor Midelt” santrali PV ve CSP sistemlerini birlikte kullanan tesislere örnek olarak verilebilmektedir.³⁸

CSP sistemlerinde teknolojik gelişme alanları;

- Geleneksel ve yenilenebilir sistemlerle hibrit çözümler geliştirilmesi (üretilen ısı enerjisinin hidrojen üretiminde kullanılması, jeotermal sistemlerle hibrit hale getirilmesi, PV/CSP hibrit sistemler gibi),
- Verimliliğin artması için yansıtıcı yüzeylerde metal oranı düşük kaplamaların geliştirilmesi ve yansıtma oranlarının artırılması,
- Isı transfer ortamı ve depolama malzemesi olarak verimli ve yüksek sıcaklıklara (> 600°C ve üzeri) dayanıklı mikro/nano partikül içerikli akışkanların, yüksek sıcaklıklara (600°C ve üzeri) dayanıklı alıcıların, ikincil yansıtıcı sistemlerin optik odaklama özelliklerinin geliştirilmesi,
- Isıl enerjiden elektrik elde edilmesi amacıyla kullanılan ORC’lerin yüksek termal ve ekserjetik verimliliklerini artırmak amacıyla; uygun ORC çevrim akışkanları, uygun proses konfigürasyonları ve bunlara uygun sistem ekipmanlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Benzer amaçla kullanılan süperkritik CO₂ çevrimleri için turbomakine, eşanjör geliştirilmesi,
- Eriyik tuzlar yerine döngüsel ekonomiye uygun olarak endüstriyel yan ürünler, endüstriyel fırın cürufaları, inşaat ve yıkıntı atıkları ve diğer kentsel atıkların, duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılması araştırılmalıdır.³⁹

Güneş enerjisinin yanı sıra jeotermal enerji de dünyada yaygın kullanımı olan bir diğer yenilenebilir enerji kaynağıdır. Jeotermal enerjinin dünya çapında doğrudan kullanım alanları; elektrik enerjisi üretimi, bölgesel ısıtma ve soğutma, sera ve su ürünleri yetiştiriciliği

³⁸ REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-04-5 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (Erişim tarihi: 15.08.2023)

³⁹ İklim Şurası, Bilim ve Teknoloji Komisyonu Raporu, 2022

uygulamaları ve endüstriyel kullanımlar olarak özetlenebilir. Dünyada en yüksek jeotermal kurulu güce sahip ülkeler ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklinde sıralanmaktadır.⁴⁰ Jeotermal enerji santrallerinin yatırım maliyetleri 1.500 avro/kW mertebesinde dir. Diğer taraftan ısı sektöründe jeotermal enerji doğrudan (düşük ve orta sıcaklık uygulamaları) veya dolaylı (çok düşük sıcaklık uygulamaları veya ısı pompaları) uygulamalar ile kullanılmaktadır. Bu sektörde, doğrudan merkezi ısıtma sistemleri için yatırım maliyetleri 300-1.000 avro/kW, ortalama kapasiteleri 5-20 kWth olan jeotermal ısı pompaları için ise yatırım maliyeti yaklaşık 2.000 avro/kW seviyesindedir. Bununla birlikte elektrik uygulamaları için günümüzde Ar-Ge çalışmaları Gelişmiş Jeotermal Sistem (EGS) geliştirilmesi konusuna odaklanmıştır.⁴¹

Jeotermal akışkanlar içerisinde farklı tip mineraller ve yüksek konsantrasyonlarda ağır metaller bulunabilmektedir. Bu akışkanlardan kritik elementlerin geri kazanılması konusunda önemli Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Yüzeye çekilen jeotermal akışkanın çevreye ve insan sağlığına zarar vermemesi için yeniden kuyuya basılması gerekmektedir. Re-enjeksiyon öncesinde lityum, platin, altın, gümüş ve paladyum gibi değerli metallerin akışkandan ayrılması, jeotermal kaynaktan elde edilen elektrik ve ısıl gücün yanı sıra ilave bir katma değer yaratmaktadır.

Jeotermal enerji kaynaklı güç üretiminde arz/talep arasındaki dengenin sağlanması veya belirli bölgelerde üretilen enerjinin farklı amaçlarla transfer edilebilmesi için enerjinin farklı depolama alternatifleriyle değerlendirilmesi gerekmektedir. Enerji depolama alternatifleri jeotermal sistemlere entegre edilerek hem şebekede yaşanan ani yük değişimlerinden kaynaklanan dalgalanmalar sönümlenmekte hem de farklı sektörlerde kullanıma yönelik enerji kullanım çeşitliliği oluşturulabilmektedir. Örnek olarak uygun kimyasal dönüşümler yapılarak jeotermal kaynaktan elde edilen elektrik veya ısıl enerji kullanılarak hidrojen, metanol, amonyak, vb. kimyasallar elde edilerek farklı bölgelerde/sektörlerde kullanılmak üzere depolanabilmektedir.⁴²

⁴⁰ IRENA (2022). Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf?rev=460f190dea15442eba8373d9625341ae, (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴¹ EUROGIA 2030. <https://eurogia.eu/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴² TÜBA Jeotermal Enerji Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 41, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Jeotermal%20Enerji%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

Biyokütle enerjisi, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ekonomiler için enerji ihtiyaçlarının sürdürülebilir şekilde karşılanabilmesine katkı sağlama potansiyeli bulunan önemli bir yenilenebilir kaynak olarak kabul edilmektedir. Biyokütle, enerji elde etmek için doğrudan yakılabilen bir hammadde olmasının yanı sıra enerji yoğunluğunun artırılması gibi pratik uygulamalar için katı, sıvı veya gaz olmak üzere çeşitli biyoyakıtlara dönüştürülebilmektedir. Biyoenerji ise biyokütlelerin doğrudan veya çeşitli termokimyasal işlemler ile bir enerji taşıyıcı forma (yanıcı gazlar ve sıvılar) dönüştürülmesiyle elde edilen biyoyakıtların kullanılmasıyla üretilen bir enerji kaynağını ifade etmektedir.⁴³

Modern biyoenerji, yenilenebilir enerjinin yüzde 55'ini ve küresel enerji arzının yüzde 6'sından fazlasını oluşturan, dünyadaki en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır.⁴⁴ 2050 yılına kadar net sıfır emisyon senaryosu, 2030 yılına kadar fosil yakıtların yerini alacak biyoenerji kullanımında hızlı bir artış öngörmektedir. Modern biyoenerji kullanımı 2010-2021 döneminde yılda ortalama yaklaşık yüzde 7 artmış olup halen yükseliş eğilimindedir. 2021-2030 döneminde biyoenerji kurulumlarında her yıl yüzde 10 artış öngören net sıfır emisyon senaryosuna sadık kalmak için kurulumların hızlanması gerekmektedir.

IEA'ya göre 2012 yılında 100 EJ (Eksa Joule) olan elektrik ve ısı üretimindeki biyoenerji katkısının 2050 yılına kadar 160 EJ'e çıkacağı ve bunun yanında 2050 yılına kadar biyoenerji ile 3.000 TWh elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilebileceği, bunun da dünya elektrik üretiminin yüzde 7,5'ini karşılayabileceği öngörülmektedir. Ayrıca 2050 yılına kadar hem sanayinin ısı ihtiyacı (22 EJ, talebin yüzde 15'i) hem de konut sektörünün ısı ihtiyacı (24 EJ, talebin yüzde 20'si) biyoenerji ile karşılanabilecektir.

Danimarka, Finlandiya ve Estonya'da üretilen elektrik enerjisinin yüzde 15'inden fazlası biyokütle yakıtlı birleşik ısı ve güç (CHP) sistemleriyle sağlanmaktadır. Bu ülkeleri İngiltere, İsveç, Almanya ve Brezilya izlemektedir. Diğer ülkelerde, biyokütle bazlı elektrik üretiminin toplam elektrik üretimi içindeki payı yüzde 2-5 arasında değişmektedir. İsviçre'de şehir çöpleri elektrik enerjisi üretimi için önemli bir yakıt kaynağıdır.⁴⁵

⁴³ TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu (2022). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 46, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴⁴ <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴⁵ IEA Bioenergy Countries' Report (2021). Implementation of bioenergy in the IEA Bioenergy member countries IEA Bioenergy ExCo November 2021 https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountriesReport2021_final.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA - International Renewable Energy Agency) Dünya Enerji Geçişleri Genel Görünüm 2022 raporu 1,5°C Senaryosunda, ulaşımda biyoyakıt kullanımının 2019-2030 dönemindedört kattan fazla artarak 17 EJ'e, 2050'ye kadar ise altı kattan fazla artarak 25 EJ'ün üzerine çıkması beklenmektedir.⁴⁶

IEA tahminlerine göre toplam küresel biyoyakıt talebinin 2022-2027 döneminde 35.000 milyon litre/yıl olmak üzere yüzde 22 artması ve ABD, Kanada, Brezilya, Endonezya ve Hindistan'ın bu artışa öncülük etmesi öngörülmektedir.⁴⁷ AB, 2030 yılına kadar ulaşımda yenilenebilir enerjinin payını en az yüzde 14'e çıkarmayı hedeflemekte olup bu hedefe gelişmiş biyoyakıtların minimum yüzde 3,5'lik payı da dâhil edilmektedir. AB Konseyi ve Avrupa Parlamentosu, söz konusu hedef ve ReFuelEU girişimi doğrultusunda Nisan 2023'te açıklanan bir karar ile sürdürülebilir havacılık yakıtlarının kerosen ile 2025 yılında yüzde 2, 2030 yılında yüzde 6, 2035 yılında yüzde 20, 2040 yılında yüzde 34 ve 2050 yılında yüzde 70 oranında karıştırılması konusunda anlaşmaya varmıştır.

Günümüzde uluslararası pazarda biyoyakıt üretimi birinci nesil (biyoetanol, biyogaz, biyodizel) biyoyakıtlarla sınırlıdır. Birinci nesil biyoyakıtlardan farklı olarak lignoselülozik hammaddelerden türetilen ikinci nesil (biyoalkoller, selülozik biyo-etanol, biyo-yaglar, fischer-tropsch dizeli ve benzini, biyohidrojen ve sıvı alkanlar) biyoyakıtlarda bulunmaktadır.⁴⁸

İkinci nesil biyoyakıtların dönüşüm teknolojileri ile ilgili olarak araştırmalar devam etmekte olup bu araştırmalarda arazi kullanımı ve CO₂ emisyonu azaltma potansiyeli gibi faktörler üzerinde durulmaktadır.⁴⁹ İkinci nesil biyoyakıtların üretiminde günümüz yakıtlarının üretilmesinde kullanılan petrol ve şeker endüstrilerinin mevcut altyapısından yararlanılmaktadır. Bu nedenle birinci nesil biyoyakıtlardan ikinci nesil biyoyakıtlara doğru geçişin mevcut altyapı olanaklarından dolayı daha kolay ve istikrarlı bir şekilde gerçekleşeceği kabul görmektedir.⁵⁰ Günümüzde lignoselülozik biyokütle, biyorafineri teknolojileri

⁴⁶ IRENA (2022). Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf?rev=460f190dea15442eba8373d9625341ae, (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴⁷ <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁴⁸ Gomez, L. D., Steele-King, C. G., & Mcqueen-Mason, S. J. (2008). Sustainable Liquid Biofuels From Biomass: The Writing's On The Walls. New Phytologist, 178(3), 473-485.

⁴⁹ Damartzis, T., & Zabaniotou, A. (2011). Thermochemical Conversion Of Biomass To Second Generation Biofuels Through Integrated Process Design-A Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 15(1), 366-378.

⁵⁰ Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An Overview Of Second Generation Biofuel Technologies. Bioresource Technology, 101(6), 1570-1580.

aracılığıyla çok az ya da hiç atık bırakmadan enerjiye, katma değerli kimyasallara, ikincil nesil biyoyakıtlara ve polimerik malzemelere dönüştürülebilmektedir.

Mikroalglerle dayanan biyokütle üretimini ifade eden üçüncü nesil biyoyakıtların geliştirilmesi kapsamında ürün veriminin artırılması ve yakıtın saflaştırılmasının yanı sıra üretim maliyetlerinin daha da azaltılması için kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmektedir.⁵¹

Son zamanlarda biyoyakıt alanında yeni bir bakış açısı yaratan dördüncü nesil biyoyakıtlar (fotobiyolojik güneş yakıtları, elektroyakıtlar), biyolojik sistemlerin mikroorganizmaların üretkenliğini artırmak için genetik olarak değiştirilebildiği “sentetik biyoloji” adı verilen yeni bir kavram üzerinde kurulmuştur. Genetiği değiştirilmiş mikroorganizmalar, ışık, su ve CO₂ gibi sonsuz hammaddeleri dördüncü nesil biyoyakıtlara dönüştürebilir.⁵² Benzer şekilde metabolik olarak tasarlanmış mikrobiyal yakıt üretim yolları (elektro-biyoyakıtlar) ile PV veya inorganik su ayırma katalizörleri kombinasyonu, sıvı yakıtların verimli üretimi ve depolanması için güçlü bir şekilde gelişmekte olan teknolojidir.⁵³

IEA’nın net sıfır senaryosuna göre;

- 2021 yılında neredeyse sıfır olan küresel havacılık yakıtı talebinin karşılanmasındaki biyokerosen payının 2030 yılına kadar yüzde 7’yi aşması,
- 2021 yılında çoğunluğu karayolu ulaşımında olmak üzere 2,1 milyon varil petrol eşdeğeri/gün olan sıvı biyoyakıt tüketiminin, 2030 yılında dört kat artarak yaklaşık 8 milyon varil petrol eşdeğeri/gün olması,
- 2021 yılında sanayi sektöründe çoğunluğu çimento ve kâğıt endüstrilerinde kullanılan 11 EJ biyoenerjinin 2030 yılında 17 EJ’ün üzerine çıkması,
- 2050 yılında biyoenerji uygulamalarının yüzde 10’unda CCUS teknolojilerinin kullanılmasıyla 1,3 Gt CO₂’nin tutulması; tutulan CO₂’nin yüzde 45’inin biyoyakıt üretiminde, yüzde 40’ının elektrik üretim sektöründe, geri kalan kısmının ise başta çimento sektörü olmak üzere ağır sanayide kullanılacağı tahmin edilmektedir.

⁵¹ Dutta, K., Daverey, A., & Lin, J. G. (2014). Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. *Renewable energy*, 69, 114-122.

⁵² TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu (2022). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 46, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁵³ Aro, E. M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. *Ambio*, 45(1), 24-31.

AB strateji dokümanlarında, doğrudan elektrifikasyonun teknik ve uygun maliyetli bir seçenek olmadığı uygulamalarda, özellikle ulaşım, enerji tüketen ve enerji yoğun endüstriyel sektörler için uzun vadeli karbon nötr çözümler sağlamak amacıyla sentetik yakıtlar (doğrudan güneş yakıtlarını da içerir) ve sürdürülebilir gelişmiş biyoyakıtlar dâhil olmak üzere gelişmiş yenilenebilir yakıtlara odaklanılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Hızla gelişen teknoloji, enerji sektöründe yenilenebilir enerji odağındaki yapısal değişiklikler ve pek çok ülke tarafından belirlenen sıfır karbon hedefleri; dünya genelinde akıllı şebekelere geçişi hızlandırmaktadır. Elektrik şebekelerinin üretimden son tüketiciye kadar bütün aşamalarının dijitalleşmesi ile tüm sistemin izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi sağlanmaktadır.

Akıllı şebekelere yönelik yatırımlar ile etkin enerji yönetimi sağlanmakta, şebeke güvenilirliği artmakta, piyasalar şeffaflaşmakta, enerji maliyet ve kayıpları azalmaktadır. Akıllı şebekeye geçiş elektrik şebekesinde pek çok farklı uygulamanın hayata geçirilmesini gerektirdiğinden dünya çapında ülkeler bu geçişi ihtiyaçlarına göre gerçekleştirmektedir. ABD ve Çin gibi büyük coğrafyalara yayılmış gelişmiş ülkeler iletim ve dağıtım şebekelerinin güncellenmesine ve dijitalleştirilmesine öncelik vermekte, AB dağıtık enerji kaynakları ile yenilenebilir enerji kaynaklarının yönetilmesine odaklanmakta, Vietnam gibi kısa sürede yüksek yenilenebilir enerji kurulumu gerçekleştiren ülkeler ise şebeke kararlılığı ve esnekliğini sağlamak için şebeke yönetimine ilişkin önlemler almaktadır. Bunların yanı sıra giderek karmaşıklaşan ve yönetilmesi zorlaşan elektrik şebekelerinin etkin ve hızlı yönetimi için dünya genelinde Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA, Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) ve enerji yönetim sistemleri yaygınlaşmakta ve son tüketicilerin akıllı sayaç kullanımları artmaktadır.

AB strateji dokümanlarında, ulaşım, sanayi ve binalar gibi elektrifikasyonun zor olduğu sektörlerde iklim nötrlüğe katkıda bulunacak şekilde, farklı enerji taşıyıcıları için farklı ağırları aynı anda koordineli bir şekilde planlayan ve işleten esnek ve dayanıklı sistemler geliştirilmesi; enerji sistem kararlılığını sürdürmek için geliştirilmiş ve/veya yeni teknolojilere ve enerji vektörlerine dayalı enerji sisteminin esnekliğinin artırılması; bilgi teknolojilerinin, enerji yönetimini optimize ettiği teknolojilerin ve sistemik yaklaşımların geliştirilmesi konularının desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Akıllı şebekeler kapsamında teknoloji gelişme alanları;

- Yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşması nedeniyle dağıtım sistemlerinde izleme ihtiyacını gidermek amacıyla, başta akıllı sayaçlar olmak üzere alçak gerilim ve orta gerilim şebekelerini izlemek için düşük maliyetli ölçüm/izleme cihazlarının geliştirilmesi,
- Verimli enerji kullanımı doğrultusunda, karbonsuz enerji üretim birimlerinin, enerji depolama sistemlerinin ve elektrikli araçların sayısının artması beklenmektedir. Bu bağlamda öncelikle hane/ev seviyesinde sonrasında da şebeke işletmecilerince bu bileşenlerin efektif kullanımını sağlayacak durum farkındalığı ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesi,
- Enerji arz güvenilirliğini artırmak üzere yaygınlaşması beklenen mikro şebeke uygulamaları için özel donanım ve yazılım geliştirilmesi,
- Farklı enerji ve kaynak şebekeleri/sistemleri birbiri ile etkileşim halindedir. Bu etkileşimi ele alan, enerji verimini ve sürdürülebilirliğini maksimize edecek sistemlerin sistemi anlayışına sahip kontrol/izleme yapılarının ve bunları gerçekleştirebilecek saha ekipmanlarının geliştirilmesi,
- Artan sistem boyutunun veri miktarı ve çeşitliliğini de artırması nedeniyle büyük veri analizi alanında ve ayrıca siber güvenlik konularında çalışmalar yapılmalıdır.⁵⁴

Enerji dönüşümünde önemli rol oynayan batarya, yenilenebilir enerji kaynakları ve akıllı şebekelerin yanı sıra hidrojen enerjisi de geleceğin temiz ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Enerji dönüşümü için hidrojenin kilit bir öncelik olarak ele alınmasının birçok nedeni bulunmaktadır. Hidrojen bir enerji taşıyıcısı olmakla birlikte doğrudan hammadde olarak da bazı proseslerde kullanılabilir. Yakıt olarak farklı proseslerde ve uzun vadeli depolanarak kullanılabilir, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrolizör yoluyla üretilip (yeşil hidrojen) daha sonra yanma prosesiyle tüketildiğinde ortaya su buharı çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, karbon emisyonuna neden olmayan temiz bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Bu nedenle, tüm ekonominin karbondan arındırılabilmesi için önemli bir çözüm olma potansiyeline sahiptir. Nitekim Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 27. Taraflar Konferansı'nda (COP-Conference of the Parties) hidrojen en çok görüşülen ve tartışılan konulardan biri olmuştur. Hidrojen ekosistemi içerisinde hidrojen üretimi, depolanması, dağıtımı (taşınması) ve kullanımı birlikte

⁵⁴ İklim Şurası, Bilim ve Teknoloji Komisyonu Raporu, 2022

ele alınmalıdır. Bu bağlamda, yeşil hidrojen üretimi için de yenilenebilir enerji kapasitelerinin genişletilmesi hızlandırılmalıdır.

Dünya genelinde 2021 yılında yaklaşık 94 milyon ton hidrojen üretilmiştir.⁶⁴ Bu üretimin yaklaşık yüzde 47'si doğal gazdan (buhar reformasyonu ve metan pirolizi), yüzde 27'si kömürden (kömür gazlaştırma), yüzde 22'si petrolden (kısmi oksidasyon) ve sadece yüzde 4'ü elektrolizden üretilmiştir. Özellikle Avrupa ülkeleri yenilenebilir kaynaklardan yeşil hidrojen üretimi konusunda yatırımlarını artırmaktadır.

Yeşil hidrojen üretimi konusunda su elektrolizi yöntemi yaygın olarak kabul gören yöntem olsa da farklı yöntemler üzerine de araştırmalar ve yatırımlar yapılmaktadır. Biyokütleden termokimyasal ve biyolojik dönüşüm ile hidrojen elde etmek üzerine de yoğun çalışmalar bulunmaktadır. Bu bağlamda gazlaştırma (sabit yatak, akışkan yatak, plazma, süperkritik su gazlaştırma vb.) ve fermantasyon gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Ayrıca mikroalglerden biyofotoliz ve fotofermantasyon yoluyla da hidrojen üretilmektedir.

Nükleer enerji kullanılarak elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen pembe hidrojen olarak adlandırılmaktadır. Dünyada düşük kaliteli linyitlerden hidrojen üretimi ve iletimi noktasında çeşitli girişimler (Avustralya ve Japonya) bulunmaktadır. Uzun vadede daha sürdürülebilir olan yeşil hidrojenin kullanımı tercih edilmelidir.

Hidrojen depolama konusunda en yaygın olarak kullanılan yöntem özellikle otomotiv uygulamalarında sıkıştırılmış (350 veya 700 bar) gaz olarak depolamadır. Bunun yanında, uzun mesafe havacılık ve denizcilik uygulamalarında sıvı hidrojen kullanımı öne çıkmaktadır. Düşük basınçta yüksek hacimsel yoğunlukta depolama gerektiren uygulamalarda metal hidrit tank geliştirme üzerine çalışmalar da mevcuttur. Diğer yandan, endüstriyel ölçekte yüksek miktarda depolama için terk edilmiş tuz mağaraları ve petrol rezervuarlarının kullanımı da öne çıkmaktadır.

Hidrojenin düşük maliyetle, güvenli şekilde taşınması için farklı yöntemler geliştirilmektedir. Boru hatlarıyla taşınması en ucuz yöntem olmakla birlikte uzun zaman ve altyapı yatırımları gerektirmektedir. Öte yandan uzun dönemde mevcut doğal gaz boru hatlarının hidrojen iletimi amacıyla yeniden kullanılabilmesi (*repurposing*) sayesinde, boru hattı yatırımlarının atıl kalmasının önlenilebileceği ve yatırım maliyetinde yeni altyapı inşasına kıyasla önemli ölçüde tasarruf sağlanabileceği öngörülmektedir. Kısa vadeli ve hızlı çözüm için hidrojenin gaz formasyonunda yüksek basınçlı tanklarda (250-1.000 bar) karayoluyla taşınması

veya Organik Temelli Sıvı Hidrojen Taşıyıcı Kimyasallar (LOHC-Liquid Organic Hydrogen Carrier) yöntemiyle petrol türevi sıvı içerisinde karayolu ile taşınması gibi yöntemler üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin Almanya, gelecekte hidrojen ithalatında kullanılmak üzere sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) terminallerini dönüştürmek için çözümler üzerinde çalışmaktadır.

Küresel çapta hidrojen, amonyak ve metanol üretiminde ve rafineri uygulamalarında, kullanılmaktadır. Dünya genelinde hidrojenin öncelikle sanayi sektöründe (rafineri, kimya, demir-çelik vd.) kullanılmasına, sonrasında ise (daha uzun mesafeli) ulaştırma alanında (gemi, havacılık, karayolu taşımacılığı) değerlendirilmesine yönelik bir eğilim bulunmaktadır. Ayrıca depolama potansiyeli sayesinde hidrojenin elektrik şebekelerinin dengelenmesinde rol oynayabileceği değerlendirilmektedir.

Hidrojen teknolojileri ve pil/batarya teknolojileri, güvenilir ve sürdürülebilir enerji çözümleri sağlamak için şebeke dışı uygulamalarda (hibrit güç sistemleri, enerji depolama uygulamaları vb.) birbirini tamamlayabilecektir. Genel olarak, hidrojen teknolojilerini ve pilleri şebeke dışı uygulamalarda birleştirmek, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlayabilecektir. Yakıt hücresi sistemlerinin yüksek maliyeti ve hidrojen yakıt istasyonlarının sınırlı mevcudiyeti gibi bu teknolojileri birlikte kullanmanın bazı zorlukları olsa da, devam eden Ar-Ge çalışmaları, gelecekte bu teknolojilerin daha yaygın bir şekilde benimsenmesine yol açabileceğini göstermektedir.

Yakıt hücreleri, bir yakıt ve bir oksitleyicinin reaksiyonu yoluyla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. En gelişmiş yakıt hücresi türlerinden bazıları (a) Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC) (b) Katı oksit yakıt hücreleri (SOFC) (c) Doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMFC) (d) Alkalın yakıt hücreleri (AFC) olarak sıralanabilir. Genel olarak, PEMFC'ler, özellikle ulaşım uygulamalarında yakıt hücreleri arasında en yüksek yaygınlık oranına sahipken, bunu sabit enerji üretiminde SOFC'ler takip etmektedir. DMFC'ler ve AFC'ler gibi diğer yakıt hücresi türlerinin yaygınlık oranları mevcut durumda çok daha düşüktür, ancak Ar-Ge faaliyetleriyle performanslarının iyileştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi çalışmalarına devam edilmektedir.

Yakıt hücreleri, verimlilikleri ve düşük emisyonları nedeniyle geleneksel güç kaynaklarına bir alternatif olarak önem kazanmaktadır. Yakıt Pili ve Hidrojen Enerjisi Derneğinin (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association) bir raporuna göre ABD'de 2020

yılında yaklaşık 115 MW yakıt hücresi kapasitesi kurulmuş ve bu oran bir önceki yıla göre yüzde 70’lik bir artış sergilemiştir. Ek olarak rapor, ABD’nin yedek güç, ulaşım ve şebeke desteği gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan yaklaşık 25.000 yakıt hücresi sistemine ev sahipliği yaptığını belirtmektedir.

Diğer taraftan iklim stratejilerinin bir bileşeni olarak CO₂ giderme önem kazanmıştır. Bu teknoloji biyoloji ve mühendislik ürünü veya hibrit çalışmalar kullanılarak atmosferden CO₂ çekilmesine yönelik bir dizi yaklaşımı ifade etmektedir. Teknolojiye ilişkin örnekler arasında ağaçlandırma, Karbondioksitin Doğrudan Havadan Yakalanması (DAC - Direct Air Capture) ve karbonun yakalama ve depolanmasıyla (CCS) elde edilen biyoenerji gibi yöntemler bulunmaktadır.

Paris Anlaşması’nın onaylanmasının ardından, dünya çapında CCUS teknolojilerine olan ilgi artmıştır. 2053 net sıfır emisyon hedeflerine yönelik olarak milli rezervimiz olan linyit kömürlerinin temiz enerji teknolojileriyle değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmekte olup elektrik üretimine karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerinin de dâhil edileceği teknolojik çalışmalar yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. CCUS teknolojilerinin, fosil yakıt ikamesi olarak kullanılabilecek biyolojik kökenli olmayan yenilenebilir yakıt üretiminde de kullanılması son yıllarda ilgi görmektedir.

CO₂ tutma teknolojileri kapsamında, hava gibi derişik bir kaynaktan, oldukça düşük (yaklaşık 410 ppm) konsantrasyonda bulunan CO₂’yi yakalama ve tutma yöntemine dayanan, DAC teknolojilerine olan ilgi son yıllarda artmıştır. Biyoenerji teknolojilerinin (atıktan enerji tesisleri elde etme amaçlı yakma, gazlaştırma sistemleri, vb.) CCUS teknolojileri ile birlikte kullanıldığı (BECCS - Bioenergy with Carbon Capture and Storage) uygulamalar negatif CO₂ emisyonu potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Bu kapsamda demir-çelik sektöründe demir cevherinin indirgenmesinde biyokömür kullanılması konusu da önem kazanmaktadır.

Dünya genelinde 100’den fazla CCUS tesisi bulunmaktadır. Bunların arasında, DAC için kurulan 20’den fazla tesis mevcuttur. AYM ile birlikte özellikle Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması’nın (SKDM) uygulanmaya başlandığı bir dönemde üreticilerin karbon ayak izini azaltmaları ya da sıfırlamaları için CCUS tesislerine daha fazla ihtiyaçları olacağı tahmin edilmektedir.

CCUS’nin depolama başlığında, CO₂’nin taşınması da önemli bir husus haline gelmiştir. CO₂’nin yakalama operasyonu yapıldıktan sonra uygun depolama alanına taşınması için boru

ağları Avrupa içerisinde oluşturulmaya başlanmış olup altyapı çalışmaları artırılmaktadır. Birçok farklı ülke ve fon mekanizması tarafından yenilikçi veya ölçek seviyesi yükseltici CCUS çağrıları açılmaktadır. HorizonEurope, The Accelerating CCUS Technologies (ACT) 4, CCUS Innovation 2.0 bunlardan birkaçıdır. Uluslararası forumlar oluşturularak konu ile ilgili bilgi birikimleri paylaşılırken, devletler ile özel sektör arasında organik bağ kurularak geçiş aşamasının kolaylaştırılması hedeflenmektedir.

CO₂ hem ekolojik hem de teknolojik yollarla hibrit şekilde atmosferden uzaklaştırılabilmektedir. Bu kategori, BECCS ve bitkisel maddelerden üretilen ve atmosferden CO₂'yi uzaklaştırmanın bir yolu olarak toprakta depolanan odun kömürü olan biyokömürlü karbon sekestrasyonu ile biyoenerjiyi (BEBCS) kapsamaktadır. Günümüzde biyoenerjiden salınan CO₂'nin yakalanması, daha sonra ayrıştırılması ile küçük ölçekli biyokömür üretimi (toprak iyileştirme kullanımı için) gerçekleştirilmektedir. Bir dizi çalışma hem BECCS hem de BEBCS'nin yılda milyarlarca ton CO₂'yi giderecek şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ama toprak, su ve biyokütle üretimi için besin taleplerinde olan rekabet, bu tür yöntemleri sınırlandıracak faktörler olarak görülmektedir.⁵⁵

2.1.2 Uluslararası Standartlar

Dünyada yaygın olarak kullanılan, uygulanan ve örnek alınan enerji teknolojileri/nükleer endüstri özelindeki uluslararası standartlar (ASME, EN, ASTM, ISO, vb.), güçlü bir tedarik zinciri kurmak için iyi bir örnek teşkil etmektedir. Bağımsız Devletler Topluluğunda ise “Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification (EASC)” tarafından hazırlanan teknik standartlar GOST olarak adlandırılmakta ve bu standartlar Rusya Federasyonunda kapsamlı olarak uygulanmaktadır. Ülkemizde de malzeme ve ekipmanlara yönelik uluslararası standartların eşleniklerinin bulunması, eşleniği olmayanların millileştirilmesi ve bu standartlara göre imalatçıların ürünlerinin testi ve sonrasında sertifikalandırılması çalışmaları Türk Standardları Enstitüsü (TSE) tarafından yürütülmektedir.

Günümüzde biyodizelin özellikleri ve nitelikleri uluslararası biyodizel standart şartnamelerine uygun olmalıdır. Bu özellikler uluslararası olarak Amerikan Standardı ASTM

⁵⁵ Creutzig, F., Ravindranath, N.H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F. vd. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. GCB Bioenergy, 7, 916–944.

6751-3 veya AB Standardı EN 14214 ile kontrol edilmektedir.⁵⁶ Hidrojenin üretimi, taşınması ve kullanımı için, güvenlik kodları, standartlar ve yönetmelikler gereklidir. ABD’de farklı bakanlıkların altında (su, çevre, kirlilik) bu standartlaşmalar bütünlük oluşturmayacak şekilde mevcuttur. AB, hidrojenle ilgili teknik standartlar, yasal düzenlemeler ve tanımlar oluşturulmasına uluslararası alanda liderlik yapmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda AB Komisyonu tarafından AB gaz piyasası kurallarının, hidrojen dâhil yenilenebilir ve düşük karbonlu gazları da kapsayacak şekilde yeniden düzenlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Öneriler, yenilenebilir ve düşük karbonlu gazlara ilişkin tanımlar, bunların sertifikasyonu ve mevcut gaz altyapısına enjeksiyonuna yönelik kurallar içermektedir. Türkiye’de bir hidrojen standardizasyon ve sertifikalandırma sistemi kurulurken, AB ile hâlihazırda var olan ticari ilişkiler ve Türkiye’nin gelecekte Avrupa’ya yeşil hidrojen ihraç etme potansiyeli de dikkate alınarak, ilgili AB mevzuatının dikkate alınması konusu değerlendirilmelidir.

2.1.3 Başarılı Ülke Uygulamaları

ABD’de 2022 yılında 787,4 terawatt-saat (TWh) elektrik üretiminin yaklaşık yüzde 20’si faal 92 nükleer güç reaktörü tarafından üretilmiştir. Bunun yanı sıra toplamda 1.117 MWe kurulu güce sahip olacak 1 reaktör inşa halindedir. 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için nükleer enerjinin payının yüzde 52 mertebesine çıkartılması gerektiği tahmin edilmektedir. ABD Enerji Bakanlığı (DOE) Nükleer Enerji Ofisi, bu hedefe ulaşmak için “Nükleer Enerji Araştırma ve Geliştirme Yol Haritası” oluşturmuş ve bu dokümanda dört temel program belirlemiştir. Birinci program “Hafif Su Reaktörü Sürdürülebilirlik Programı”dır. Bu programa göre mevcut nükleer santrallerin işletme ömrünün mevcut 60 yıllık lisans süresinin (40 yıllık ilk lisans ve 20 yıllık lisans yenileme) ötesine uzatılması ve uzun vadeli güvenilirliğin sağlanması amaçlanmaktadır. Sırasıyla ikinci, üçüncü ve dördüncü programlar Yeni Nesil Nükleer Santral, Gelişmiş Reaktör Konseptleri ve Gelişmiş SMR programları olup güvenlik, teknik, ekonomik ve çevresel ilerlemeleri ve yeni nesil nükleer enerji teknolojilerini desteklemektedir. Bu programda, gelişmiş SMR’ler ve gelişmiş reaktör konseptleri aracılığıyla yüksek sıcaklıklı reaktörlere odaklanılarak gelişmiş reaktör teknolojilerinin araştırılması amaçlanmakta, sıvı metal, florür tuzu gibi soğutucuları kullanan gelişmiş nükleer fisyon enerji sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Yakıt Döngüsü Teknolojileri Ofisi sürdürülebilir

⁵⁶ Atadashi, I., Aroua, M. ve Aziz, A.A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:1999- 2008.

yakıt döngüleri geliştirilmesi amacıyla uranyum kaynak kullanımını iyileştirmek, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak, atık üretimini en aza indirmek, güvenliği artırmak ve yayılma riskini sınırlamak için Ar-Ge çalışmaları yürütmektedir.

Birleşik Krallık Nükleer Yenilik Programı (NIP) kapsamında; gelişmiş yakıtlar, gelişmiş imalat ve malzemeler, yakıt geri dönüşüm ve yeniden işleme, gelişmiş reaktör tasarımı ve düzenleme, stratejik araç takımları ve tesisler, gelişmiş modüler reaktörler (AMR), işletmeden çıkarma, robotik teknolojiler ve termal hidrolik tesisi konularında alt programlar oluşturulmuştur. Ek olarak, hidrojen üretimi, sentetik yakıt üretimi, bölgesel ve endüstriyel ısıtma ve DAC gibi elektriğin ötesinde nükleer enerji kullanımına ilişkin birkaç özel alan da araştırılmaktadır.

İngiltere hükümeti, 2050 yılı enerji politikaları ve hedefleri doğrultusunda, enerji ve endüstride düşük karbonlu teknolojilerin, sistemlerin ve iş modellerinin ticarileştirilmesini hızlandırmak için 2020 yılında Net Sıfır İnovasyon Portföyü (NZIP) adı verilen 1 milyar sterlinlik bir fon ve ayrıca yeni nesil nükleer teknolojilere yatırım yapmak için 385 milyon sterlin büyüklüğünde Gelişmiş Nükleer Fonunun (ANF) kurulduğunu duyurmuştur. Ayrıca, Haziran 2009'da "Düşük Karbon Salımı Stratejisi (Low Carbon Industrial Strategy)"ni açıklamıştır. Bu kapsamda; İngiltere'de yeni nükleer santrallerin kurulumu sırasında, İngiliz firmalarının endüstriyel katkısının artırılması amacıyla "Nükleer İleri İmalat Araştırma Merkezi (Nuclear Advanced Manufacturing Research Center / NAMRC)" kurulmuştur. Ayrıca Ulusal Nükleer Yüksekokulu (NCFN) gibi çeşitli uygulamalarla nükleer sektörünün ihtiyaç duyduğu kalifiye personelin yetiştirilmesi amaçlanmaktadır.

Güney Kore'de 13 Haziran 2023 itibarıyla toplam 24.489 MW kurulu güce sahip 25 nükleer reaktör işletmede olup toplam 4.020 MW kurulu güce sahip 3 reaktör ise inşaat halindedir. 2021 yılında ülke elektriğinin yüzde 28'i (150 GWh) nükleer santrallerden sağlanmıştır. Günümüzde Güney Kore, milli reaktör teknolojisini ihraç edebilecek seviyeye gelmiştir. Ülkenin ilk üç reaktörü anahtar teslim proje olarak yaptırılmıştır. Sonraki altı reaktör ise yerel yükleniciler ve imalatçıların katılımı ile yabancı şirketlerin liderliğinde gerçekleştirilmiştir. Onuncu nükleer reaktörden başlayarak, tasarım ve ekipman imalatı Güney Kore milli standartlarıyla yapılmaya başlanmıştır. Ülkenin teknoloji transferi yaklaşımı; yabancı tedarikçilerin denetim ve gözetimi altında iş başı eğitim ve iş başı katılım şeklinde tarif edilmektedir.

Aralık 2020’de Güney Kore Hükümeti, ülkenin nükleer teknoloji geliştirme yeteneklerini kullanarak küresel nükleer enerji pazarındaki değişikliklere yanıt vermek için üç strateji geliştirmiştir; Bu stratejiler; “SMART” isimli SMR tasarımının inşaatına başlanması ve uluslararası işbirlikleri ile SMART’ın yaygınlaşması, 2030’larda küresel pazarda rekabet avantajına sahip olmak için “i-SMR” (innovative small modular reactor) isimli yeni nesil SMR tasarımının geliştirilmesi ve elektrik üretimi dışındaki alanlarda da (desalinasyon, hidrojen üretimi, proses ısısı) SMR kullanımına hazırlık olarak klasik hafif sulu basınçlı su reaktörü teknolojisine alternatif teknolojilerdeki araştırmaların teşvik edilmesi şeklindedir.

Fransa’nın enerji politikası, uluslararası fosil yakıt piyasalarının değişkenliğine karşı kırılganlığı azaltmak ve Paris İklim Anlaşması tarafından belirlenen taahhütleri yerine getirmek amacıyla yenilenebilir enerji, nükleer enerji, alternatif enerjiler ve enerji verimliliği yatırımları ile enerji bağımsızlığının artırılması için yerli üretim teknolojilerinin geliştirilmesine büyük önem vermektedir. Ayrıca Fransa’nın hazırlamış olduğu 2019-2023 dönemi enerji planı, nükleer sektörün geleceği için çeşitli yapılandırma eylemlerini içermektedir. Bu eylemler; 40 yılı dolduran mevcut santrallerin ömürlerinin teknik imkânlar ölçüsünde uzatılması, mevcut nükleer yakıt çevrimi politikasının 2040 yılına kadar sürdürülmesi, SMR’lerin geliştirilmesine destek sağlanarak nükleer teknolojilerin kendi içinde çeşitlendirilmesi olarak özetlenebilir.

Rusya Federasyonu Hükümeti tarafından 2003 yılında onaylanan yeni enerji stratejisinde; enerji verimliliğinde artış, çevre üzerindeki etkilerin azaltılması, artan sürdürülebilir kalkınma, enerji gelişimi ve rekabet gücü konularına önem verilmektedir. Enerji stratejisi, gerektiğinde belgenin en az beş yılda bir değiştirilmesi gerektiğini de belirtmekte olup en son belge 2035 yılına kadar olan dönemi kapsamaktadır. Bu çerçevede enerji sektörü için hedefler; doğal gaz kullanımının verimliliğinin ve iç tüketimdeki payının artırılması, hidrokarbon hammaddelerinin derinlemesine işlenmesi ve kapsamlı kullanımı, kömür kalitesinin artırılması ve kömür üretim hacimlerinin stabilizasyonu, yerel, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, yeni nesil NGS’lerin güvenlik ve güvenilirliğinin artırılması ve yenilikçi NGS’lerin geliştirilmesidir.

Çin’de 13 Haziran 2023 itibarıyla toplam 53.181 MW kurulu güce sahip 55 reaktör işletmede olup toplam 21.608 MW kurulu güce sahip olacak olan 21 reaktör ise inşaat halindedir. 2022 yılında 418 TWh elektrik enerjisi nükleer santrallerden sağlanmıştır. Çin’in

nükleer enerji alanındaki büyük sıçraması “Westinghouse Electric Company (WEC)” ile yaptıkları teknoloji transferi anlaşmalarıyla başlamıştır.

2003 yılında Çin devlet kurumları tarafından “Self-Reliance/Öz Yeterlilik” programı hazırlanmıştır. Program açık biçimde yerli nükleer santral tasarım ve kurulumuna odaklanmıştır. 2006 yılında WEC ile teknoloji transferi ve lisans anlaşmaları yapılmıştır. Özetle devlet kurumları ve şirketlerin liderlik ettiği öz yeterlilik amaçlı bir üst plan dâhilinde WEC ile yapılan teknoloji transferi ve lisans anlaşmaları sonucunda Çin kendi reaktör teknolojisini ve ekipman imalatçılarını on yıl içerisinde ortaya çıkarmıştır.

Ufuk Avrupa programı çerçevesinde Avrupa’da bir yandan mevcut panellerin konut, tarım ve ulaştırma sektörleriyle entegrasyonunu artırmaya yönelik çalışmalar ile diğer yandan PV endüstrisini tekrar güçlendirmek amacıyla özellikle yeni nesil ince film ve tandem güneş hücrelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar teşvik edilmektedir.

Yenilikçi silisyum hücrelere dayanan gigafabrikaların Avrupa’da kurulması yönünde de çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi Bosch Rexroth ve Fraunhofer ISE tarafından İspanya’da kurulması planlanan 5 GW kapasiteli Greenland Gigafactory PV fabrikasıdır. Diğer yandan ABD’de dünya üretim kapasitesinde önemli paya sahip olan CdTe güneş hücresi üreticisi First Solar, silisyum tabanlı hücrelerde ise arkadan kontak yapısı sayesinde verim avantajı olan (ancak maliyet dezavantajı bulunan) SunPower firmaları uzun yıllardır faaliyet göstermektedir.

CSP uygulamalarında dünyada en yüksek kurulu güç 2,3 GW ile İspanya’da ardından 1,7 GW ile ABD’de bulunmaktadır. 2019 yılında en hızlı büyüme 242 MWe ile İsrail’de “Megaim” (güneş kuleli ve enerji depolamasız) ve “Negev” (oluklu parabolik kolektörlü, 4,5 saat termal enerji depolama (TED) kapasiteli) projeleriyle gerçekleşmiştir.⁵⁷ Çin’de her biri 50 MWe kapasitede dört CSP santralinde lineer fresnel kolektör ve 6-13 saat arasında değişen sürelerde TED kapasitesi bulunmaktadır. Ayrıca 250 MWe ile beraber 2,4 GWh TED projelerinin yapımı devam etmektedir. Güney Afrika’da 100 MW’lık parabolik oluklu ve 4,5 saatlik TED sistemi devreye alınmış olup 2030 yılına kadar 100 MWe güneş kuleli bir sistem yapılması planlanmaktadır. Kuveyt’te 50 MWe’lik parabolik oluklu “Shagaya” projesi bu ülkedeki ilk uygulama olup 350 MWe’lik CSP kurulması planlanmaktadır. 2019 yılında

⁵⁷ DLR (2021). “Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power”. https://www.dlr.de/en/latest/news/2021/01/20210330_study-solar-thermal-power (Erişim tarihi: 15.08.2023)

kurulan en küçük sistem 9 MWe gücünde ve dört saat depolama kapasiteli Fransa'daki "eLLO" projesidir. Halen inşaatı devam eden 900 MWe oluklu parabolik, 300 MW güneş kuleli ve 14 MW lineer Fresnel kolektörlü projenin yüzde 60'ı BAE'de Noor-1 projesi kapsamında bulunmaktadır. Şili'de 110 MW'lık güneş kuleli "Cerro Dominador" projesi 2021 yılında devreye girmiştir. 2021 yılında Yunanistan'da 52 MW'lık güneş kuleli "MINOS" projesinin Girit adasında Çin konsorsiyumu tarafından yapılması planlanmıştır. Yeni projelerin tamamında TED sistemleri bulunmakta olup PV sistemleriyle paralel uygulamaların sayısı da artmaktadır.

Dünyada endüstriyel proseslerde kullanılan CSP sistemleri için yatırım desteği veren ve aynı zamanda fosil yakıtlar için verilen destekleri kaldıran ülkelerin sayısı artmaktadır. Bu ülkelerden biri Meksika olup 2020 yılında devreye alınan sistem sayılarında Çin'den sonra Meksika ikinci sırada yer almıştır. Bunun nedeni de Meksika'daki endüstriyel prosesler için CSP sistemlerinin, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), akaryakıt ve dizel gibi fosil yakıtlarla maliyet açısından rekabet edebilir hale gelmesidir. Almanya'da ise 2012 yılından beri devam eden finansman modeliyle sadece 2020 yılında yaklaşık 1,5 MWth kapasiteli on yeni sistem devreye alınmıştır.⁵⁸ Avusturya'da toplam kurulum maliyetleri 2013-2020 döneminde yüzde 55 düşmüştür. Almanya'da bu düşüş 2014-2020 döneminde yüzde 45 olurken, Meksika'da 2010-2020 döneminde yüzde 17 olmuştur. Üretilen ısı enerjisinin seviyelendirilmiş maliyetlerine (LCOHEAT) bakıldığında ise Meksika'da ağırlıklı ortalama 2020 yılında 0,039 ABD doları/kWh olarak hesaplanmıştır.⁵⁹ Genel olarak maliyetlerin ciddi düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir.

IRENA verilerine göre, 2022 yılı sonu itibarıyla dünyadaki toplam rüzgâr kurulu gücü yaklaşık olarak 1.797,7 GW'a ulaşmıştır. Avrupa'nın 2022 yılı sonu itibarıyla toplam kurulu gücü ise 481,3 GW olmuştur. Almanya, rüzgâr enerjisi açısından lokomotif ülke konumunu sürekli olarak korurken, onu İspanya, İngiltere ve Fransa izlemektedir. Özellikle son on yılda yıllık rüzgâr santrali kurulumu önceki yıllara göre önemli miktarda artış göstermiştir.⁶⁰

⁵⁸ REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-04-5 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁵⁹ IRENA (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf?rev=c9e8dfcd1b2048e2b4d30fef671a5b84 (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁶⁰ TÜBA Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu (2019). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 28, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-R%C3%BCzg%C3%A2r%20Enerjisi%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

ABD ve birkaç Avrupa ülkesi (Danimarka, İspanya, Hollanda) rüzgâr enerjisi teknolojileri geliştirilmesi alanında öncü durumdadır. Teknoloji geliştirme konuları; jeneratörlerin verimliliğinin artırılması ve gürültüsünün azaltılması; kanat hatve kontrolünün iyileştirilmesi; düşük ve orta rüzgâr hızları için jeneratörlerin etkinliğinin modellenmesi ve doğrulanması için yöntemler geliştirilmesi; yenilikçi türbinler geliştirilmesi; birim maliyetin azaltılmasına yönelik yöntemler geliştirilmesi ve türbin operasyonlarının optimize edilmesi alanlarına yönelmektedir. Rüzgâr enerjisi teknolojileri alanında öncü kurum/firmalar içinde ilk sırada Aloys Wobben onu takiben Mitsubishi Heavy Industries, General Electric (GE Wind), and Vestas Wind Systems yer almaktadır.

Dünyada jeotermal enerji kullanım hızının doğal oluşum hızına göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir.⁶¹ Bu nedenle jeotermal kaynakların kendini yenileyebilecek şekilde uygun kullanımının temin edilmesi bir zorunluluktur. İzlanda ve Yeni Zelanda jeotermal kaynakları geliştirme konusunda uzun bir geçmişe sahip olup jeotermal uygulamalar konusunda öne çıkan ülkeler arasındadır. Hak sahipliği, kaynak kullanımı ve elektrik piyasası düzenlemelerine ilişkin farklı geçmişleri olmasına rağmen, her ikisi de birbirine bağlı yasalar oluşturarak sürdürülebilir çevre ve enerji düzenlemelerini hayata geçirmişlerdir. Ülkemiz jeotermal kaynaklarının kullanım geçmişi göz önüne alındığında bu iki ülkeyle benzer tarihsel tecrübeye sahip olduğu görülmektedir. Kamu ve özel sektör yatırımları neticesinde gelinen noktada jeotermal kullanım kapasitemiz artmış olmasına rağmen uygulamada çok yönlü sorunlar yaşanmaktadır. Sürdürülebilir enerji kullanımının temini açısından gelecek nesillerin de faydası gözetilerek jeotermal enerji kaynaklarımızın korunması ve geliştirilmesi hususları dikkate alınarak etkin kullanımı önemli görülmektedir.

Dünya genelinde enerji bitkileri yetiştiriciliği ve biyoyakıt üretimi büyük önem kazanmıştır. Tablo 2’de, dünyada bazı ülkelerin biyoyakıt üretim kapasiteleri ve bu üretimde kullanılan hammaddeler özetlenmiştir.

⁶¹ Campen B.V. & Petursdottir H. (2016). Geothermal Sustainability Regulation in Iceland and New Zealand. European Geothermal Congress 2016, 19-24 Sept 2016, Strasbourg, France

Tablo 2. Bazı Ülkelerdeki Biyoyakıt Üretim Kapasiteleri ve Üretimde Kullanılan Hammaddeler⁶²

Ülke	Ürün	Enerji Bitkisi	Biyoyakıt Üretimi
ABD	Biyometanol	Mısır	66 milyar litre/yıl
	Biyodizel	Soya, Kanola, Mısır, Pamuk, Fıstık, Ayçiçeği	9,5 milyon litre/yıl
Almanya	Biyodizel	Kanola, Mısır, Şeker Pancarı	3,2 milyon ton/yıl
	Biyometanol	Mısır, Buğday, Arpa, Şeker Pancarı Şeker kamışı	613 bin ton/yıl
	Biyogaz	Mısır silajı, Çim, Şeker pancarı	132 bin Nm ³ /h
İsviçre	Biyodizel	Tall Yağı (ağaç ürünlerinin işlenmesinden sonra oluşan yağ)	1,6 milyar litre/yıl
	Biyometanol	Mısır, Talaş, Saman, Şeker Kamışı	190 milyon litre/yıl
	Biyogaz	Mısır silajı, Çim, Şeker Pancarı	1,3 TWh/yıl
Çin	Biyogaz	Çim, Bitkisel Artıklar	14,5 milyar m ³ /yıl
	Biyometanol	Mısır, Pirinç, Akdarı, Kassava, Şeker kamışı	3,4 milyar litre/yıl
	Biyodizel	Palmiye, Sumak, Kanola, Akdarı	2,5 milyar litre/yıl
Brezilya	Biyometanol	Şeker kamışı, Mısır	37 milyar litre/yıl
	Biyodizel	Mısır	6,4 milyar litre/yıl

AB’de 2020 yılında biyoyakıt üretiminde en çok kullanılan kaynak kanola bitkisi olmuştur. Aynı yılda Kuzey Avrupa ülkelerinde ise 930.000 ton kanola yağı kullanılmıştır. Ayrıca İsviçre’de birincil enerji tedarikinde kömürün ardından biyoyakıtlar ikinci sırada yer almaktadır. Biyokütlenin geniş çapta kullanılması açısından dünyadaki en iyi örneklerden biri Brezilya’dır. Ülkede yaklaşık beş milyon taşıt, 1989 yılından beri yakıt olarak benzin yerine şeker kamışı veya benzeri ürünlerden elde edilen saf biyometanol, yine birçok araç da benzin/etanol karışımını kullanmaktadır.

⁶² Koçar, G., (2021). Enerji Bitkileri ve Biyoyakıt Üretimi, TÜBA–Biyokütle Enerjisi Çalıştay ve Paneli, 4-5, Kasım 2021

Çin’de enerji bitkilerinden elde edilen biyoenerji, kömür ve petrolden sonra en büyük yerli enerji kaynağı olup enerji tüketiminin yüzde 15’ini karşılamaktadır.⁶³ Ülkede bir milyanın üzerindeki nüfusun büyük çoğunluğu yakıt olarak biyokütle kullanmakta olup daha çok yemek pişirme ve aydınlatma amacıyla kullanılan biyogaz üretimi için beş milyondan fazla küçük tesis bulunmaktadır. Onbinlerce orta ve büyük ölçekli tesisden üretilen biyogaz ise elektrik üretimi ve büyük fabrikaların enerji gereksinimi için kullanılmaktadır.⁶⁴ Hindistan’da ise halen çeşitli büyüklükte bir milyondan fazla biyogaz üretim tesisi bulunmaktadır.

İsveç, enerjisinin yüzde 16’sını biyokütleden elde etmektedir. Avusturya’da irili ufaklı biyokütle ile çalışan enerji üretim sisteminin toplam gücü 1.200 MW’a ulaşmıştır. Bu ülke de enerjisinin yüzde 13’ünü biyokütleden sağlamaktadır. ABD’de biyokütle kaynaklı elektrik kurulu gücü 9.000 MW’ı aşmış olup ülkenin toplam enerji üretiminin yüzde 4’ü biyokütleden karşılanmaktadır.⁶⁴

Günümüzde enerji üretim sistemlerinde birden fazla kaynağın birlikte kullanıldığı hibrit sistemler gittikçe önem kazanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit olarak birlikte kullanıldığı sistemler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Güneş ve biyokütle enerjisinin entegre edilmesiyle kurulan santraller, daha yüksek bir verimlilik ile çalışmakta olup daha düşük hava kirliliğine neden olmaktadır. Bu entegrasyon, parabolik oluklu kolektörler tarafından toplanan ısınn biyokütle yakıtlı bir kojenerasyon tesisinin buhar döngüsüne beslenmesiyle sağlanabildiği gibi biyokütle kazanlı merkezi ısıtma sistemlerinde üretilen proses ısısının güneş kolektöründen elde edilen ısıyla birlikte merkezi veya bireysel ısıtma sistemlerinde kullanılması ile de sağlanabilmektedir. Bu kapsamda literatürde birçok simülasyon ve deneysel çalışmalar mevcuttur. 2012 yılından beri faaliyet gösteren ve 22,5 MWe kurulu güce sahip olan Termosolar Borges santrali İspanya’daki ilk ve tek operasyonel hibrit CSP-biyokütle enerji santralidir. Bu tesis çoğunlukla orman kalıntılarından ve yerel tarımsal ürünlerden toplanan ve yüzde 45 nem içeriğine sahip olan yaklaşık 66 ton/yıl biyokütle tüketmektedir.⁶⁵

⁶³ Puricelli, S., Cardellini, G., Casadei, S., Faedo, D., Van den Oever, A. E. M., & Grosso, M. (2021). A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110398..

⁶⁴ TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu (2022). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 46, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

⁶⁵ Mohaghegh, M. R., Heidari, M., Tasnim, S., Dutta, A., & Mahmud, S. (2021). Latest advances on hybrid solar–biomass power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-24.

Enerjide tüketim yerinde üretim, geleneksel olarak büyük enerji santrallerindeki üretimin küçük tüketicilere dağıtımına yerine, küçük çaplı yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolaması ve esnek talep yönetimi sayesinde tüketim noktasındaki üretimin artması, yeni bir yaklaşım olarak aşağıda verilen öğeler ile karşımıza çıkmaktadır:

- Akıllı şebekeler
- Bölgesel yenilenebilir enerji santralleri
- Hem üreten hem tüketenler (Prosumer)
- Yüksek verimli sanayi süreçleri
- Veri yönetimi ve kontrolü
- Enerji depolama⁶⁶

Enerji arz/talep dengesinin sağlanmasında en önemli husus mekanik, ısı veya kimyasal formda enerjinin depolanması 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 olarak karşımıza çıkmaktadır.

Başta ABD ve AB olmak üzere dünya genelinde enerji depolamanın tüm alt alanlarında yüksek bütçeli araştırma projeleri sağlanarak enerji depolama konusundaki bilgi birikiminin artırılması hedeflenmektedir. Projeler temel düzeyde Ar-Ge altyapısının artırılmasından yüksek kapasiteli ürünlerin geliştirilmesi ve kullanıma sunulmasını kapsayan geniş bir yelpazede gerçekleştirilmektedir. Enerji depolama sistemlerinin farklı sektörlere adaptasyonun hızlandırılması amacıyla malzeme geliştirme, sistem entegrasyonu, sistem kontrolü, sistem modellenmesi gibi çeşitli açılardan bilimsel çalışmalar yürütülmektedir.⁶⁷

Yeşil hidrojen üretimi ve elektrolizör teknolojisinde Avrupa ülkeleri, yakıt hücresi teknolojilerinde ise Asya ülkeleri öne çıkmaktadır. Almanya’da kamu ve sanayi sektörü (örn. çelik ve bakır) arasında hidrojen Ar-Ge faaliyetleri (elektrolizör geliştirilmesi vb.) ve finansman sağlanması hususunda güçlü bir işbirliği bulunmaktadır. Bu ortak Ar-Ge faaliyetleri, ilgili

⁶⁶ IEA (2015). “Implementing Agreement for a Programme of Research and Development on Energy Conservation through Energy Storage”, Strategic Plan 2016 – 2021.

⁶⁷ TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 35, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

teknolojileri geliştirmek ve onları pazara hazır hale getirmek için oldukça önemlidir. Bunun yanında, karbonsuzlaşma sürecindeki firmalara önemli destekler sunulmaktadır. AB, finansman çerçeve programları kapsamında uzun yıllardır temiz hidrojen üzerine araştırma ve yenilikleri desteklemekte ve güncel AB çerçeve programı olan Ufuk Avrupa (2021-2027) kapsamında konuya ilişkin desteklerini sürdürmektedir.

Almanya, Belçika, Hollanda gibi Avrupa ülkeleri hidrojen altyapısının gelişimi için büyük miktarlarda hibe açıklamışlardır. Diğer yandan hidrojenin taşınması ile ilgili dünyada bazı ülkeler (Kanada, Avustralya vb.) coğrafi konumlarından dolayı sorunlar yaşamaktadır. Bölgesel hidrojen şebekeleri kurulması hususunda çalışmalar sürdürölmekte olup bu alanda 7 Nisan 2022 tarihinde dört AB üyesi ülkenin - Romanya, Polonya, Slovakya ve Macaristan - doğal gaz iletim sistem operatörleri arasında bir mutabakat zaptı imzalanmıştır.

Hidrojen ticareti konusunda da çeşitli ülkeler arasında anlaşmalar yapılmaktadır. Örneğın Almanya, Kanada'nın rüzgârdan elde ettiğı hidrojeni ve Avustralya'nın güneşten elde ettiğı hidrojeni ithal etmek için anlaşmalar yapmıştır. Mayıs 2022'de açıklanan REPowerEU Planı'nda, AB'nin, 2030 yılına kadar 10 milyon ton yerli üretimin yanı sıra 10 milyon ton yeşil hidrojen ithal etme hedefine ulaşmak amacıyla, Akdeniz, Kuzey Denizi ve Ukrayna üzerinden üç büyük hidrojen ithalat koridoru geliştirilmesini destekleyeceği ifade edilmektedir.

AB'nin dış enerji stratejisi bağlamında potansiyel tedarikçilerle hidrojen ve diğer yeşil teknolojilerde işbirliğine yönelik uzun vadeli ortaklıklar kurma çalışmalarına hız verdiği gözlemlenmektedir. Bu kapsamda yenilenebilir hidrojen ithalatını kolaylaştırmak için partner ülkelerle Yeşil Hidrojen Ortaklıkları kurulması öngörölmüştür. Buna yönelik olarak ilk aşamada Avrupa, Afrika ve Körfez ülkeleri arasında hidrojen ticaretini kapsayan bir Akdeniz Yeşil Hidrojen Ortaklığı geliştirilmesine yönelik olarak 11 Nisan 2022'de AB ile Mısır arasında uzlaşya varılmıştır. AB ile Azerbaycan arasında 18 Temmuz 2022 tarihinde imzalanan mutabakat zaptıyla yeşil hidrojen alanında işbirliğinin temelleri atılmıştır. Kasım 2022'de Birleşmiş Milletler İklim Değışikliği Çerçeve Sözleşmesi 27. Taraflar Konferansı kapsamında AB, Kazakistan, Namibya ve Mısır ile yenilenebilir hidrojene ilişkin üç ayrı mutabakat zaptı daha imzalamış olup Fas ile görüşmeler devam etmektedir.

Hidrojenin taşınması konusunda da uluslararası projeler geliştirilmeye başlanmıştır. Yakın zamanda Portekiz'den İspanya'ya ve İspanya'dan Akdeniz üzerinden Fransa'ya yeşil hidrojen taşıyacak H2Med boru hattı projesine ilişkin anlaşma imzalanmıştır. Avrupa'nın

hidrojen omurgasına yönelik ilk adım olarak değerlendirilen projenin 2030 yılına kadar tamamlanması beklenmektedir. AB kaynaklarından fonlanması öngörülen hat ile AB'nin yeşil hidrojen tüketiminin yüzde 10'unun (yılda yaklaşık iki milyon ton) taşınması hedeflenmektedir.

Glasgow'daki 2021 BM İklim Değişikliği Konferansında, Paris Anlaşması hedeflerine uyum sağlanamaması nedeniyle karbon teknolojilerinde ilerlemeye duyulan ihtiyaç tekrar vurgulanmıştır. Küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlamak için emisyonları azaltmada toplumun karbonsuzlaştırılmasının tek başına yetersiz olacağı ve bu emisyon açığını kapatmak için “negatif emisyon” faaliyetleri gerektiği ifade edilmiştir. Bu çerçevede atmosferden CO₂ giderebilen teknolojilerin net sıfır emisyon ekonomisine ulaşmak için oldukça önemli olduğu belirtilerek konuya küresel boyutta dikkat çekilmiştir. Bazı büyük şirketler (Microsoft, Stripe, Shopify ve Swiss Re), DAC teknolojilerine yatırım yapmayı taahhüt ederek, hem iklim değişikliğinin etkileriyle mücadele etmeyi hem de DAC tabanlı CO₂'yi gidermeye yönelik pazarı geliştirmeyi vurgulamışlardır.⁶⁸

CCS alanında çok ciddi çalışmalar yürütülmekte olup yeni kurulan çok sayıda tesis bulunmaktadır. Şu anda dünya çapında faaliyet gösteren ve yılda yaklaşık 0,01 MtCO₂ yakalayan 19 DAC tesisi bulunmaktadır. 2024 yılında ABD'de 1 MtCO₂/yıl yakalama kapasiteli (ilk büyük ölçekli) bir tesisin faaliyete başlaması beklenmektedir. IEA tarafından hazırlanan net sıfır emisyon senaryosunda DAC'nin, 2030 yılına kadar 85 MtCO₂/yıl ve 2050 yılına kadar yaklaşık 980 MtCO₂/yıl yakalayacak kapasiteye ulaşması hedeflenmiştir.⁶⁹ Farklı tür adsorbanların geliştirilmesi, rejenerasyon stratejisi, hava kontaktörlerinin geliştirilmesi Ar-Ge'ye açık alanlar olarak değerlendirilmektedir.

Karbon yakalama konusunda 2020 yılına kadar, Kanada - Saskatchewan'da bulunan Boundary Barajında dört milyon tondan fazla ve Shell'e ait Quest santralinde ise beş milyon tonun üzerinde CO₂ yakalanmıştır. 2020 yılında Norveçli enerji şirketi Equinor'un, CCS teknolojisiyle birlikte doğal gazdan sıfır emisyonlu hidrojen üretmeyi hedefleyen Hydrogen to Humber Saltend (H2H Saltend) projesinin İngiltere'de başlayacağı açıklanmıştır.⁷⁰ Dünyanın bir başka büyük karbon yakalama tesisi ise ORCA olup aynı zamanda dünyanın ilk iklim pozitif DAC ve depolama tesisidir. Tesisin sektörün öncülerinden olma sebebi ise DAC teknolojisini

⁶⁸ Pitchbook (2021). Annual Fintech Report, 2021

⁶⁹ IEA (2022). Direct Air Capture 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁷⁰ TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu (2022). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 46, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

CO₂ depolama ile birleştirerek, endüstriyel ölçekte doğrudan CCS'ye izin veriyor olmasıdır. Eylül 2021'de devreye girmiş olan en son ünitesiyle birlikte İzlanda'daki bazalt oluşumlarında jeolojik depolama için yılda dört bin ton CO₂ yakalama kapasitesine ulaşmıştır.⁷¹

CCS teknikleriyle entegre olarak metanol üretimi konusunda da son yıllarda çalışmalar hızlanmıştır. Bu çalışmalar kapsamında yakalanan CO₂'nin metanol gibi çok yönlü bir kimyasal ve yenilenebilir yakıt formuna dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Çin'in Anyang şehrinde bulunan ve metanol üretimine 2021 yılı itibarıyla başlayan CO₂-metanol tesisi ile yılda 160.000 ton CO₂'nin yakalanması ve yılda 110.000 ton metanol üretilmesi planlanmaktadır.⁷² Bir diğer CO₂-metanol üretim tesisi olan MefCO₂ Haziran 2019'da faaliyete geçmiştir. MefCO₂ günde yaklaşık 1,5 ton CO₂ yakalayarak bir ton metanol üretebilmektedir. MefCO₂ tesisi şu anda AB'deki en büyük baca gazı CO₂ türevli metanol sentez tesislerinden biridir.⁷³ İsveç'te kurulan FRESME tesisi ise saatte 50 kg CO₂ yakalama kapasitesine sahiptir. MefCO₂ projesinde olduğu gibi burada da benzer şekilde CO₂ kaynağı olarak baca gazı kullanılmaktadır.

2.1.4 Uluslararası Yükümlülükler

İklim değişikliği ile mücadelede en güncel uluslararası metin olan Paris İklim Anlaşması, ülkelerin mümkün olan en yakın zamanda toplam sera gazı emisyonunun karbon yutağına eşit olması anlamına gelen net sıfır olma hedefine ulaşmasını gerektirmektedir. Küresel net sıfıra ulaşmak için ülkelerden net sıfır yol haritalarını ve hedef tarihlerini ilan etmesi beklenmektedir.

Bu kapsamda önde gelen ülkelerden ABD, Çin, Rusya ve Hindistan hedef yıllarını sırasıyla 2050, 2060, 2060 ve 2070 olarak belirlerken Türkiye bu tarihi 2053 yılı olarak ilan etmiştir.⁷⁴

Diğer taraftan AB 11 Aralık 2019 tarihinde, ekonomisinin tamamını kapsayan ve döngüsel ekonomi, dijitalleşme, karbonsuzlaşma ve uygun maliyetli, temiz ve güvenli enerji arzı hedeflerini içeren AYM'yi ilan etmiştir. AYM ile AB'nin sera gazı emisyonlarını 1990

⁷¹ ORCA (2021). <https://climeworks.com/roadmap/orca> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁷²Eckstein, D., Künz, V., Schäfer L., (2021). Global Climate Risk Index, <https://www.germanwatch.org/en/cr> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁷³ MefCO₂, (2019). <https://www.aspire2050.eu/mefco2> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁷⁴ Hedef 2053: Termik Santrallerin Geleceği Çalıştayı, Çalıştay Sonuç Raporu (2022). 25-26 Mayıs 2022, Ankara, Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santraller Daire Başkanlığı

seviyesine göre 2030 yılına kadar en az yüzde 55 azaltması ve Avrupa'nın 2050 yılına kadar dünyanın ilk iklim nötr kıtasına dönüştürülmesi öngörülmektedir.

AYM'nin uygulanması sektörel düzeyde kabul edilen stratejiler ve yeni oluşturulan veya tadil edilen mevzuat ile şekillenmektedir. Bu kapsamda AB'nin iklim, enerji, arazi kullanımı, ulaştırma ve vergilendirme bağlantılı mevzuatının, "2030 yılına kadar en az yüzde 55 oranında net sera gazı azaltımı" hedefiyle uyumlu hale getirilmesi için Temmuz 2021'de Fit for 55 paketi yayımlanmıştır. SKDM, sosyal iklim fonu, sürdürülebilir havacılık ve denizcilik yakıtlarına yönelik yeni mevzuat teklifleri de paketin unsurları arasındadır. Enerji başta olmak üzere taşımacılık, binalar, sanayi, ticaret gibi birçok sektörü kapsamakta olan düzenlemelerin, gerek AB üye ülkeleri gerekse AB ile yakın ticari ilişki içerisinde bulunan tüm ülkeler üzerinde önemli etkilerinin olması kaçınılmaz görünmektedir.

Ukrayna savaşının tetiklediği enerji krizi sonrası AB'nin Rus fosil yakıtlarına bağımlılığını hızla sonlandırma amacıyla yayımladığı REPowerEU Planı ile AYM kapsamında öngörülmüş olan temiz enerji dönüşümü çabalarının daha da hızlandırılması hedeflenmiştir.

AB'nin ithal fosil yakıtlara bağımlılığını hızla azaltması ve 2050'de iklim nötr kıta olma hedefine ulaşması için yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasına büyük önem atfedilmektedir. Bu doğrultuda REPowerEU Planı ile hâlihazırda Fit for 55 paketi kapsamında önerilmiş olan enerji bağlantılı hedeflerin yükseltilmesi önerilmiştir.

Mart 2023'te AB Konseyi ve Avrupa Parlamentosu AB Yenilenebilir Enerji Direktifinin (RED II) güncellenmesine ilişkin çalışmalarda geçici siyasi uzlaşya varmıştır. Buna göre AB'nin 2030 için bağlayıcı yenilenebilir enerji hedefi mevcut yüzde 32 seviyesinden en az yüzde 42,5'e yükseltilmekte olup ayrıca REPowerEU'da önerilmiş olan yüzde 45 oranına ulaşma yönünde bir indikatif hedef belirlenmektedir. Bu kapsamda yatırım izin süreçleri basitleştirilmekte ve ulaştırma, sanayi, binalar, bölgesel ısıtma ve soğutma sektörlerine özgü iddialı yenilenebilir enerji (hidrojen dâhil) hedefleri belirlenmektedir.

Hidrojenin, AYM kapsamında temiz enerji dönüşümü için kilit bir rol oynaması beklenmektedir. REPowerEU planı ile AB Hidrojen Stratejisinde yer verilen 2030 yılına kadar AB'de 10 milyon ton yeşil hidrojen üretimi hedefine ilave olarak 10 milyon ton hidrojen ithalatı hedefi konulmuştur. Öte yandan AB Komisyonu, AB Yenilenebilir Enerji Direktifi gereğince yenilenebilir hidrojenin tanımına ve üretimine ilişkin kurallar önerisini Şubat 2023'te sunmuş

olup söz konusu kurallar AB üye ülkelerindeki üreticilerin yanı sıra AB'ye ihraç yapmak isteyen ülkelerdeki üreticiler için de bağlayıcılık arz edecektir.

AB'de çok dinamik seyreden söz konusu mevzuat güncelleme ve hazırlık süreçleri AB aday ülkesi ve AB'nin en büyük altıncı ticaret ortağı olan ülkemizce de yakından takip edilmektedir.

Ülkemiz Paris Anlaşması kapsamında 2030 yılına kadar referans senaryodan yüzde 21 azaltımı içeren taahhüdünü Ulusal Katkı Beyanı ile revize ederek 2030 yılı için yüzde 41 oranında azaltıma yükseltmiştir.

Türkiye Ulusal Katkı Beyanı bildirimi, 2012 yılının baz yıl (referans yılı) olarak kabul edildiği Birinci Ulusal Katkı Beyanında (ve Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı'nda) belirtilen referans senaryoya kıyasla, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonunu yüzde 41 azaltacağını (2030 yılında 695 Mt CO₂ eşdeğeri) teyit etmektedir. Türkiye'nin güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı tüm ekonomiyi kapsamaktadır ve kapsamlı azaltım ve uyum eylemlerinin yanı sıra uygulama araçlarına yönelik değerlendirmeleri de içermektedir. Türkiye en geç 2038 yılında emisyonlarını tepe noktasına ulaştırma niyetindedir. Yeni azaltım hedefi, bilim ve eşitlik temelinde önemli ölçüde daha iddialı oluşu temsil etmektedir ve 2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşmaya yönelik ileriye doğru atılan adımlardan biridir.⁷⁵

2023 yılında AB'de yayımlanan SKDM Tüzüğü ile AB, üretimin iklim değişikliği politikaları daha az sıkı olan ülkelere kayması sonucunda oluşabilecek karbon kaçağı riskini önlemeyi amaçlamaktadır. AB, söz konusu mekanizma ile üretim esnasında salınan karbon emisyonlarına yönelik olarak ithal ürünler için ilave ücret getirmeyi, böylelikle diğer ülkelerde daha temiz üretim yapılmasını sağlamayı ve AB üreticilerinin rekabetçiliğini korumayı hedeflemektedir. SKDM'nin ilk aşamasında, karbon yoğunluğu yüksek altı sektör bulunmakta olup bunlar çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre, hidrojen ve elektrik sektörleridir. 1 Ekim 2023 tarihi itibarıyla başlayacak ve 2025 yılının sonuna kadar sürecek olan mekanizmaya geçiş döneminde AB ithalatçıları herhangi bir mali yükümlülük altına girmeyecek, SKDM'ye tabi ithal ürünlerde gömülü emisyonları raporlayacaktır. SKDM, 2026 yılında tam olarak uygulamaya geçtiğinde, AB ithalatçıları, SKDM dâhilindeki ithal malları için SKDM sertifikası satın alacaktır.

⁷⁵ T. C. Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (2023). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

Hidrojen konusunda Avrupa, ihracat ve boru hatları, dekarbonizasyon teknolojileri ve sertifikasyon süreçleri ile ilgili bir çerçeve koymaktadır. 15 Aralık 2021’de AB Komisyonu tarafından hidrojen ve karbondan arındırılmış gaz piyasalarına ilişkin mevzuat önerileri paketi açıklanmıştır. AB Hidrojen Stratejisini temel alan pakette, hidrojen şebekelerinin işletilmesi, finansmanı, hidrojen karışımlarının ve gaz kalite parametrelerinin şeffaflığı, doğal gaz şebekelerinin hidrojen taşınması için yeniden kullanılması, ayırıştırma (unbundling) ve ayrımcı olmayan şebeke erişimi hakkında yeni kurallar önerilmekte, düşük karbonlu hidrojen ve ondan üretilen sentetik yakıtlar için bir sertifikasyon sistemi teklif edilmektedir.

8 Temmuz 2020 tarihinde açıklanan AB Hidrojen Stratejisi ile AB’de yeşil hidrojenin yaygınlaştırılmasına yönelik 2050 yılına kadar aşamalı hedefler ortaya konmuştur. Stratejide, mevcut fosil bazlı üretimden kaynaklı emisyon salımlarını hızla azaltmak için düşük karbonlu hidrojen formlarına da kısa ve orta vade için yer verilmektedir. Ayrıca stratejide, Pan-Avrupa hidrojen şebekesinin omurgasına ilişkin planlamanın ve hidrojen yakıt ikmal istasyonları ağının 2030’a kadar tamamlanması öngörülmektedir. Bu doğrultuda Fit for 55 paketi kapsamında, karayolu ağlarında belirli aralıklarla hidrojen yakıt ikmal noktaları kurulması, hidrojenin doğal gazla harmanlanması, mevcut doğal gaz şebekelerinin hidrojen taşımaya uygun hale getirilmesi ve sektör bazlı hidrojen hedefleri belirlenmesine yönelik öneriler ilgili oldukları mevzuat revizyon çalışmaları bağlamında tartışılmaktadır.

2.2 Türkiye’de Genel Durum

Ülkemiz elektrik enerjisi kurulu gücü 2023 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla 104.037 MW’a ulaşmıştır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı ise yüzde 30,3 hidrolik, yüzde 24,4 doğal gaz, yüzde 21 kömür, yüzde 11 rüzgâr, yüzde 9,2 güneş, yüzde 1,6 jeotermal ve yüzde 2,5 diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2023 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla 11.621’e (Lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir. Mevcut santrallerin 751 adedi hidroelektrik, 67 adedi kömür, 360 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 345 adedi doğal gaz, 9.544 adedi güneş, 491 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir.

2021 ve 2022 yıllarında devreye alınan enerji kaynaklarının yüzde 97’sini yenilenebilir enerji kaynakları, geri kalanını ise kojenerasyon oluşturmaktadır. 2021 yılında güneş ve rüzgâr enerjisinde yaklaşık 3.000 MW’lık kapasite devreye alınmıştır. Türkiye bu bakımdan dünyanın önde gelen ülkeleri arasındadır.

Türkiye, yenilenebilir enerji kurulu kapasitesi bakımından dünyada on ikinci ve Avrupa’da beşinci, jeotermal ve hidrolik kurulu kapasite bakımından ise Avrupa’da sırasıyla birinci ve ikinci ülke konumundadır. Rüzgâr ve güneş enerjisinin toplam üretim içindeki payı ise yüzde 15,5’i aşarak Asya kıtasındaki en yüksek orana ulaşmıştır. Bunun yanında, IEA 2022 Yenilenebilir Enerji İstatistikleri’ne göre Türkiye, dünyada enerji geri kazanım sistemleri en yoğun ikinci ülkedir. (Türkiye Cumhuriyeti Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023)

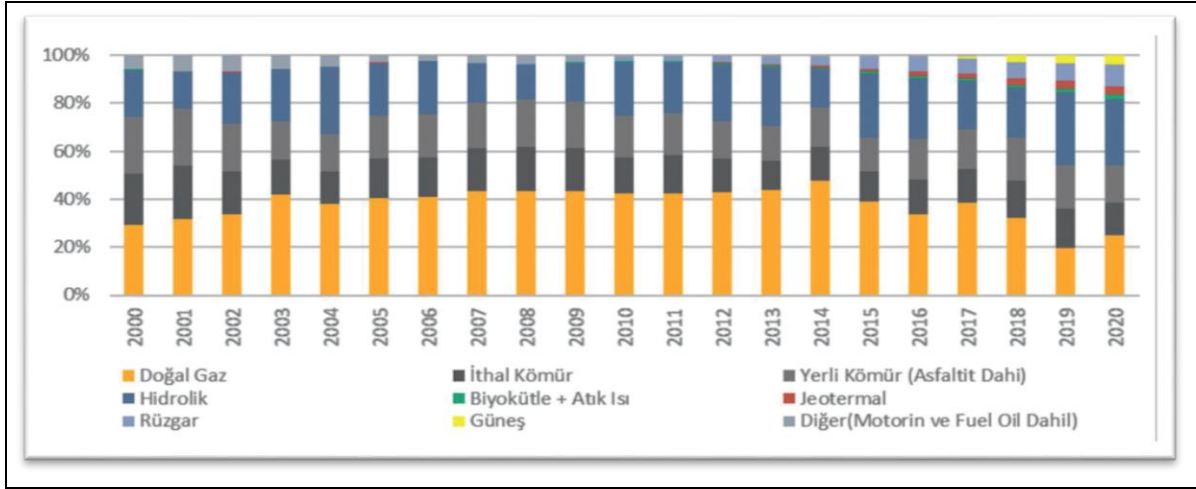
Yerli ve yenilenebilir kaynaklarımızın kurulu güçteki artışının yansıması elektrik üretiminde de görülmektedir. Tablo 3’e göre 2022 yılında üretilen 326 TWh elektrik enerjisinin yüzde 39,2’si hidrolik, rüzgâr, güneş ve jeotermal kaynaklardan elde edilmiştir. Biyoyakıt santrallerinin toplam elektrik üretimdeki payı yüzde 2,44 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 3. Türkiye 2022 Yılı Elektrik Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı⁷⁶

Kaynak	Elektrik Üretimindeki Oranı (yüzde)
Doğal Gaz	21,9
Kömür (Linyit, T.Kömürü, Asfaltit, İthal kömür)	35,03
Atık Isı	0,29
Sıvı Yakıtlar	1,12
Biyoyakıtlar	2,44
Jeotermal	3,40
Hidrolik	20,48
Güneş	4,64
Rüzgâr	10,71

⁷⁶ https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (Erişim tarihi:15.08.2023)

Şekil 2. Türkiye Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Yıllara Göre Gelişimi⁷⁷



Şekil 2’de görüleceği üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payı özellikle 2014 yılından itibaren artış eğilimindedir. 2000’li yılların başından günümüze kadar yüzde 20 seviyelerinde olan yenilenebilir kaynakların toplam elektrik üretimi içindeki payı günümüzde yüzde 40’lar seviyesine ulaşmıştır. Artan yenilenebilir elektrik üretimi emisyon azaltımını da desteklemektedir

AB’ye potansiyel katılımının bir parçası olarak Türkiye, elektrik altyapısını Avrupa enterkonnekte şebeke altyapısına entegre ederken, aynı zamanda her türlü yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi de dâhil olmak üzere genel bir enerji çeşitlendirme stratejisi izlemektedir.

Ülkemizde 2023 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla 31,6 GW’lık kurulu güce sahip olan kayıtlı toplam 751 adet hidroelektrik santral (HES) bulunmaktadır. Hidrolik kaynaklı elektrik üretimi mevsimsellikten doğrudan etkilenmekte olup 2018-2022 döneminde yıllık ortalama yaklaşık 70 TWh seviyesindedir. 2023 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla 44 HES ve 13,8 GW’lık kurulu güce sahip olan EÜAŞ, Türkiye toplam hidroelektrik kurulu gücünün yaklaşık yüzde 44’ünü teşkil etmektedir. 2021 yılında Türkiye’de hidroelektrik üretiminin toplam elektrik üretimindeki payı yüzde 17 olarak raporlanmıştır.⁷⁸

⁷⁷ Özata, İ. (2021). Türkiye’nin Biyokütle Enerji Potansiyeli, Mevcut Durumu ve Geleceği, TÜBA –Biyokütle Enerjisi Çalıştay ve Paneli, 4-5 Kasım 2021

⁷⁸ <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> (Erişim tarihi:15.08.2023)

2022 yılı sonu itibarıyla EÜAŞ portföyünde yer alan HES'lerden 26,7 milyar kWh elektrik enerjisi üretilmiş olup bu üretim Türkiye toplam elektrik enerjisi üretiminin yüzde 8'ine, Türkiye toplam hidroelektrik üretiminin yüzde 40'ına karşılık gelmektedir.

Ülkemizde kurulan ilk HES 1902 yılında devreye alınmıştır. Diğer yenilenebilir teknolojilere göre olgunlaşmış bir alan olan hidroelektrikte dünyada ve ülkemizde akademi, kamu ve özel sektörde araştırma geliştirme, altyapı, yayın konularında ciddi bir birikim oluşmuştur.

Ülkemizde ana havzalardaki büyük rezervuarlı santral kurulumlarının sonuna gelinmektedir. Bu nedenle hidroelektrikte önümüzdeki yıllarda kullanılmayan potansiyelin ortaya çıkarılması için düşük veya ultra düşük düşümlü HES'ler kurulacağı, içme suyu, sulama kanalı, arıtma tesisi gibi basınç düşüşü içeren noktalarda kurulu gücü görece düşük santraller inşa edileceği öngörülmektedir.

Teknoloji odaklı bakıldığında ülkemizde hidroelektrik alanında yapılan Ar-Ge faaliyetleri beş konuda gruplandırılabilir. Bunlar; yenileme ve modernizasyon çalışmaları, büyük ölçekli türbin ve jeneratör gibi kritik alt sistemlerin yerleştirilmesi, hidroelektrikte dijitalleşme, içme suyu şebekelerinden ve tarımsal sulama sistemlerinden elektrik elde etme çalışmaları ile havza optimizasyonu ve akım tahminidir.

Ülkemizde hidroelektrik test altyapısı olarak Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi (TOBB ETÜ) Hidro Su Türbini Test Merkezi ve Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş. (TEMSAN) Hidrolik Türbinler Model Test Laboratuvarı bulunmaktadır. Bununla birlikte ülkemizde HES bileşenlerinin yerli olarak tasarımı ve üretimi, kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve diğer konularda EÜAŞ, TENMAK, TÜBİTAK, TEMSAN ve TOBB ETÜ gibi kuruluşlar tarafından ortaklaşa yürütülen farklı projeler bulunmaktadır.

2006 yılında orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak 200 metre yatay çözünürlükte hazırlanan Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) verilerine göre yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızlarına sahip kullanılabilir alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde RES kurulabileceği kabul edilmiş ve Türkiye'de kurulabilecek toplam RES kapasitesinin 47.849,44 MW olduğu belirlenmiştir. Ancak REPA'nın güncellenmesi ile elde edilen rüzgâr kaynak bilgileri, gelişen rüzgâr türbini teknolojileri, günümüz yatırım maliyetleri ve değişen

kullanılamaz alan kabulleri gibi faktörler dikkate alınarak Türkiye’de kurulabilecek toplam RES kapasitesinin revize edilmesi çalışmalarına devam edilmekte ve potansiyelin çok daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Aralık 2022 sonu itibarıyla RES kurulu gücümüz 11.396 MW olup toplam kurulu güç içerisindeki oranı yüzde 10,97’dir.⁷⁹

Türkiye’nin rüzgâr enerjisi konusunda ortaya koyduğu ulusal hedeflere ulaşabilmesini, bu hedeflere ulaşırken teknolojik dışa bağımlılığını en aza indirmeyi ve dünya rüzgâr enerjisi pazarında pay ve söz sahibi olabilmesine katkıda bulunmayı amaçlayan ODTÜ RÜZGEM - Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2011 yılında mülga Devlet Planlama Teşkilatı’nın altyapı proje desteği ile kurulmuştur. Söz konusu gelişmiş laboratuvar altyapısıyla birlikte rüzgâr enerjisi konusunda uzman insan kaynağı yetiştirmeye yönelik doktora ve yüksek lisans düzeyindeki çalışmaları ile teknoloji geliştirmeye devam etmektedir. Aynı zamanda, Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi-RİTM, İTÜ, TÜBİTAK MAM, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi ve Harran Üniversitesi’nde de rüzgâr enerjisiyle ilgili araştırma ve inceleme çalışmalarında bulunmaktadır.

Türkiye’nin ilk yerli rüzgâr türbininin (4 MW) ETKB ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB)’nin işbirliğiyle, EÜAŞ ve Askeri Elektronik Sanayi (ASELSAN) çalışmaları ile üretilmesi ve Alaçatı RES’e pilot kurulum yapılması planlanmakta ve bu alanda yurt dışına bağımlılığın azaltılması amaçlanmaktadır. Bu çalışmanın devamı niteliğinde, ihtiyaç duyulacak öncelikli alanların belirlenerek, kamu-üniversite işbirliği ile yeni Ar-Ge projelerinin yürütülmesi öngörülmektedir.

Denizlerdeki mekânsal planlama çalışmaları Temmuz 2014’te yayımlanan 2014/89/EU numaralı ve Deniz Mekânsal Planlama isimli AB direktifi ile de öncelikli strateji konularından biri olarak belirlenmiş, tüm AB ülkelerinin 2021 yılına kadar mekânsal planlama çalışmalarını bitirmesi ve en az izleyen her 10 yılda bir bu çalışmaların güncellenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca denizüstü rüzgâr çiftliklerinin çevresel etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla çevresel faktörlerin belirlenip uzun dönemli izlenmesi ve ilgili araştırmaların yapılması amacıyla Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) uzmanları, deniz biyolojisi, ekoloji, kuşlar vb. çevre konularına yönelik ve izleme yöntemleri alanında çalışan uzmanlar ile işbirliği ön plana çıkacaktır.

⁷⁹ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim tarihi:15.08.2023)

2018 yılında ülkemizde ETKB tarafından Saros, Kıyıköy ve Gelibolu alanlarında yapılan ilk denizüstü rüzgâr enerjisi ihalesi (200 MW kapasite) başvuru olmadığından iptal edilmiştir. Denizüstü rüzgâr enerjisi alanında ilerleme katedilebilmesi için gerekli olan deniz mekânsal planlama ve çevre etki değerlendirmesi konularında, ülkemizdeki ilgili kurumların işbirliği ile izinler ve lisanslamaya yönelik mevzuat oluşturulması gerekeceği öngörülmektedir. Tüm bu konularda, kamu-üniversite işbirliği (örneğin ODTÜ RÜZGEM, ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü, vb.) araştırma projeleri ve ülkemizdeki insan kaynağı kapasitesini geliştirmeye yönelik eğitimler verilmesi gerekmektedir.

Denizüstü rüzgâr enerjisi için belirlenen potansiyel alanlar için uzun süreli denizüstü rüzgâr ölçümleri ve meteorolojik (rüzgâr hızı, yönü, sıcaklık, nem vb), oşinografik (dalga boyu, dalga hızı, akım vb.) ölçümler yapılması amacıyla Meteoroloji Genel Müdürlüğü, ETKB ve ilgili kurumların işbirliği ile ölçüm direği/istasyonlar (MetMAST, MetOCEAN) kurulmasının ve veri toplanmasının gündeme geleceği öngörülmektedir. Bu ölçümler için, türbin yüksekliğinde (veya yüzde 80 yüksekliğinde) kurulum/kullanım/sökümü oldukça maliyetli olan klasik ölçüm direği kullanımının yanı sıra dünyada kullanımı giderek yaygınlaşan platform üstü LİDAR/SODAR (Sonic Detection and Ranging), yüzen LİDAR ve uydudan ölçüm yöntemlerinin öne çıkacağı ve ülkemizde de bu uygulamaların yer edinebileceği öngörülmektedir.⁸⁰

Son olarak, ülkemizin ilk yerli uçan rüzgâr türbininin kurulması için uçan rüzgâr türbin sistemleri araştırmalarının yaygınlaştırılması, projelerin artması, bu konudaki startup firmaların desteklenmesi gerekmektedir.

Rüzgâr enerjisi sektörüne bakıldığında bazı sözleşmelerde yerlilik oranlarının yüzde 65'lere çıktığı görülmektedir (Örneğin ASELSAN ve EÜAŞ arasında imzalanan 4,3 MW'lık türbin sözleşmesi). Yerlileştirme kapsamında ETKB tarafından ihalesi yapılan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) RES 1 projesinde de yüzde 65'lik yerlilik şartı bulunmaktadır. Bu kapsamda daha önce yerlileştirilmemiş sistem ve alt sistemler için yerlileştirme çalışmaları yürütülmektedir. Yerli sanayinin desteklenmesi ve yurtiçi katma değerin artırılmasına yönelik ETKB'nin YEKA ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) modellerinin devamı ve yerlilik oranlarının zaman içinde artırılması büyük önem arz etmektedir.

⁸⁰ <http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2018/05/fb002.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

Yerlileştirilen ve yerlileştirilmesi yönünde çalışmaları sürdürülen rüzgâr türbini bileşenleri; nasel, türbin kulesi, kule bağlantı elemanları ve parçaları, kanat, rotor hub, ana/sabit şaft, hub ve nasel dış kabinleri, nasel ana şasi, soğutma sistemi, hidrolik sistem, türbin jeneratörü, türbin trafosu, güç dönüştürücü, elektronik güç kontrol üniteleri, topraklama ve yıldırım koruma sistemleri, izleme, veri toplama ve kontrol sistemleri, vb. olarak verilmektedir.

Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. ETKB tarafından hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Aralık 2022 sonu itibarıyla güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz 9.486 MW olup toplam kurulu güç içerisindeki payı yüzde 9,1'dir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de 11,6 milyon adet bina bulunmakta olup bu miktarın yaklaşık yüzde 87'si konut nitelikli binalardır. Türkiye'nin bina stokuna her yıl 100.000'den fazla yeni bina eklenmektedir. Bu binaların çatı ve cephelerine önümüzdeki yıllarda büyük miktarlarda güneş enerjisi yatırımlarının yapılabileceği öngörülmektedir. Sanayi, konut veya bireysel amaçlı kullanımlar için gerek duyulan enerji ihtiyacını, doğrudan güneşten sağlamak mümkün değildir. Bu sebeple güneş enerjisi çeşitli şekillerde dönüştürülerek kullanılabilir.

Güneş ışınlarından yararlanmak için pek çok teknoloji geliştirilmiştir. Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte bir kısmı güneş enerjisini ışık ya da ısı enerjisi şeklinde direk olarak kullanırken, diğer teknolojiler güneş enerjisinden elektrik elde etmekte kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin kullanım alanları arasında, doğrudan veya dolaylı elektrik üretimi, sıcak su elde edilmesi, alan ısıtma ve soğutma, sanayi kuruluşları için proses ısı enerjisi ve sera ısıtması sayılabilir.⁸¹

2017 yılında ilk YEKA ihalesi Konya-Karapınar bölgesinde 6,99 ABD doları-cent/kWh alım garantisi ile panelin tüm bileşenlerinin yerli üretilmesi ve Ar-Ge yatırımı şartı ile yapılmıştır. Bu ihalenin sonucu olarak 1.350 MW kapasiteli güneş enerji santralinin (GES) kurulumu 2023 yılında tamamlanmıştır. 2021 yılında yapılan YEKA GES-3 ihalesinde toplam kapasitesi 1.000 MW olan 74 adet dağınık küçük GES'lerin kurulumu planlanmıştır. Bu ihalede firmalar tarafından ortalama 21,8 kuruş/kWh fiyat teklifi yapılmıştır. Bu fiyat ve YEKDEM'in alım garantisi verdiği fiyat GES'lerin ülkemizdeki rekabetçi konumunu ortaya koymaktadır.

⁸¹ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

2019 yılında, binalarda 10 kW'a, fabrika ve işletmelerde ise sözleşme güçlerini geçmemek koşuluyla öz tüketimlerini karşılayabilecek mahsuplaşma esası ile GES kurarak ürettikleri enerjiyi şebekeye satabilmeleri konusunda da düzenleme yapılmıştır. Tüm bu gelişmeler neticesinde 2022 yılında güneş enerjisinin Türkiye elektrik enerjisi üretiminde payı yüzde 4,64'e ulaşmıştır.

Türkiye PV araştırmaları, ulusal araştırma merkezleri (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Araştırmaları Merkezi- (ODTÜ-GÜNAM), TENMAK, TÜBİTAK) üniversitelere bağlı merkezler (Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Enerji Verimliliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Detektörü Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi) ve az sayıda firmanın (Kalyon PV, GTC ve Parla Solar) araştırma merkezlerinde yapılmaktadır.

TÜBİTAK 1007 programı olan Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Yerli Güneş Enerjisi Santral Teknolojilerinin Geliştirilmesi (MILGES) projesi kapsamında TÜBİTAK MAM, ODTÜ-GÜNAM ve Bereket Enerji tarafından Şanlıurfa'nın Ceylanpınar ilçesinde hücre, panel ve güç elektroniği sistemlerinin yerli üretildiği 6 MW GES kurulumu gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde sadece Kalyon PV üretim tesisinde kütük, wafer ve hücre üretimi yapılmakta olup genel itibarıyla bu tesiste yüzde 80'nin üzerinde bir yerlilik oranına ulaşılmıştır. Diğer taraftan ülkemizde güneş paneli üreten 30'un üzerindeki üretici, ana bileşen olan güneş hücresini ithal etmektedir. Bu üreticilerin ürettikleri güneş panellerinin yerlilik oranı yüzde 30-40 mertebesinde olup genellikle katma değeri düşük olan ekipmanları içermektedir.

Güneş enerjisi santrallerinde kullanılmak üzere tasarlanıp geliştirilen solar eviricilerin yerleştirilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu eviricilerin 2023 yılı son çeyreğinde pazara sunulması beklenmektedir. Bu çerçevede YEKA-GES projelerinde ve YEKDEM desteklerinde yüksek yerlilik oranına sahip ürünlerin desteklenmesine devam edilmesi önem arz etmektedir.

Geniş bir kapsama sahip olan akıllı şebeke kavramı Türkiye'de de farklı uygulamalar ile hayata geçirilmektedir. Akıllı şebeke uygulamaları yüksek çeşitliliğe sahip olduğu için başta Elektrik Şebeke Yönetmeliği olmak üzere farklı mevzuatlar ile düzenlenmektedir. 2019-2023

döneminde On Birinci Kalkınma Planı ile uyumlu olacak şekilde; akıllı şebeke uygulamaları yaygınlaştırılmış, elektrik şebekelerinin ve sistemlerinin güçlendirilmesi ve esnek hale getirilmesi için önlemler alınmış, akıllı sayaç ve uzaktan okuma gibi sistemlerin kullanımı artırılmış, enerji altyapısının daha etkin ve güvenli işletilmesi sağlanmış, Milli SCADA sistemlerinin geliştirilmesi çalışmaları yürütülmüştür.

Enerjinin iyi kullanılabilmesi için sahada şebekelerin güncellenmesi (donanımsal anlamda) ile işletmeci ve kullanıcılara destek olacak enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Konu ile ilgili Türkiye’deki önemli projeler ve işbirlikleri arasında RİTM projesi, Milli Güç Kalitesi Projesi, Milli Akıllı Sayaç Sistemleri Projesi sayılabilmektedir.

Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği ilk defa 2021 yılında yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Böylelikle depolama faaliyetleri tanımlanmış ve piyasa katılımcılarının rolleri belirlenmiştir. Buna göre depolama tesislerinin müstakil, üretim tesisine bütünleşik, tüketim tesisine bütünleşik, şebeke işletmecisi tarafından kurulan ve Ar-Ge amaçlı olarak beş farklı şekilde kurulabileceği belirlenmiştir. 2022 yılında yapılan değişikliklerle depolama yönetmeliği güncel halini almış ve depolama tesisi kuracak yatırımcıların, rüzgâr ve güneş santrali kurmak için önlisans alma hakkı tanımlanmıştır. Bu gelişmeler neticesinde 100 GW’ın üzerinde rüzgâr ve güneş enerji santrallerine entegre depolama tesisi kurmak için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)’na önlisans başvurusu yapılmıştır. Yapılan başvurular EPDK tarafından incelenerek uygun olanlar Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)’ye iletilecektir. TEİAŞ şebeke kısıtları doğrultusunda bağlantısı uygun olan başvuruları değerlendirecektir.

Ülkemizde TÜBİTAK-RUTE (Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü) bünyesinde elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar için pil, modül ve batarya üretimi, lityum-iyon, lityum-hava ve lityum-sülfür pil uygulamaları için elektrot geliştirme, ısı ve elektriksel batarya yönetim sistemi tasarımı ve üretimi, pilot ölçekli lityum-iyon pil üretimi, magnezyum-bakır-iyodür batarya ve süperkapasitör geliştirme ile elektrik şebeke dengeleme uygulamalarına yönelik enerji depolama sistemleri konularında aktif çalışmalar yürütülmektedir. Merkez bünyesinde malzeme geliştirme elektrot üretimi, hücre üretimi ve prototip geliştirme konularında laboratuvarlar bulunmaktadır. TÜBİTAK-RUTE Batarya Araştırma Grubu ise

pilot ölçekte kese tipi hücrelerde 0,5 MW/yıl ve prizmatik hücrelerde ise 3 MW/yıl üretim kapasitesine sahiptir.

Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG), 2019 yılında Türkiye'nin ilk bataryalı aracını tanıtmış ve ilk modelin seri üretimine 2022 yılı son çeyreğinde başlamıştır. Projeyle birlikte STB tarafından devreye alınan “Elektrikli Araçlar için Hızlı Şarj Altyapısı Destek Programı”nın Türkiye'nin karayolu taşımacılığında daha geniş bir elektrifikasyonu tetiklemesi beklenmektedir.

Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumu itibarıyla aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır. Ülkemizin her tarafında yayılmış yaklaşık 1.000 adet doğal çıkış şeklinde değişik sıcaklıklarda jeotermal kaynaklar mevcuttur. Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa'da birinci, kurulu güç bakımından ise dünyada dördüncü sıradadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelandadır. Jeotermal kaynaklarımızın yüzde 90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, çeşitli endüstriyel uygulamalar vb.) için, yüzde 10' u ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur.

Türkiye'nin muhtemel jeotermal ısı potansiyeli 35.500 MWt, elektrik üretimi potansiyeli ise 4.500 MWe olarak tahmin edilmektedir. Bölgesel ısıtmanın yanı sıra elektrik üretiminde de yaygın olarak kullanılan jeotermal enerji kurulu gücü Aralık 2022 sonu itibarıyla 1.691 MW olup toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise yüzde 1,63'tür. Jeotermal enerji yatırımları; diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgâr, güneş ve biyokütleyle göre yapısal farklılıklar göstermekte olup sermaye ve teknoloji yoğun bir yatırım süreci gerektirmektedir. Megavat başına yatırım maliyetleri, rüzgâr enerjisine göre ortalama üç kat daha fazla olup 3,5-4 milyon ABD doları seviyesindedir. Ayrıca yer altı belirsizliği nedeniyle risk katsayısı diğer yenilenebilir enerji türlerine göre daha yüksek seviyededir.

Türkiye Jeotermal Derneği verilerine göre Türkiye'de şehir ısıtmasında 1.033 MWt; sera ısıtmasında 820 MWt; kaplıca tesisleri, termal oteller gibi ticari ısıtmada 420 MWt; otel ve kaplıcalarda kullanılan termal su ısıtmasında 1.205 MWt; meyve sebze kurutmada 1,5 MWt; soğutmada 0,3 MWt; toprak kaynaklı jeotermal ısı pompasında 8,5 MWt gibi değerlere

ulaşılmıştır.⁸² Ülkemiz dünyada; jeotermal sera ısıtmasında birinci (4.500 dönüm), kurulu jeotermal elektrik üretiminde (1.595 MWe) ve jeotermal şehir ısıtma gibi jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında dördüncü (200.000 konut veya 3.500 MWt) sıradadır. Ülkemizde jeotermal enerjiden 19 yerleşim biriminde merkezi konut ısıtması, 23 sahada seracılık ve yaklaşık 350 adet termal tesiste tedavi ve termal turizm amaçlı yararlanılmaktadır.⁸³ Ayrıca bu kaynak balık yetiştiriciliği, kuru buz eldesi, endüstriyel ve tarım ürünlerinin kurutulması (yün kurutma, meyve kurutma vb.), ısı pompası gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Ülkemiz jeotermal sektörünün genel durumu Tablo 4’te özetlenmektedir. Sıcaklığı 30°C üzerinde 347 jeotermal saha bulunurken, alt sınır olarak 20°C alındığında toplamda 600 jeotermal kaynak grubu yer almaktadır.⁸⁴ Bu alanlardan 44 tanesi yüksek entalpiye sahip olup elektrik üretimi amacıyla kullanılabilir potansiyele sahiptir. Ülkemiz, sıcaklığı 30°C üzerinde olan jeotermal kaynak zenginliği bakımından dünyada yedinci, sıcaklık alt sınır değeri 20°C olarak belirlendiğinde ise Avrupa’da birinci sırada yer almaktadır.⁸⁵

Elektrik üretimi yapılabilecek sahaların jeotermal alanlar içerisindeki oranı yüzde 12’dir. Yüzde 88 paya sahip düşük ve orta entalpili alanlar ise başta konut ve bölgesel ısıtma olmak üzere, sera ısıtması, sağlık ve termal turizm sektörlerinde değerlendirilmektedir.⁸³

⁸² Mertoğlu O. (2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Dünyada ve Türkiye’de Jeotermal uygulamalar ve Teknolojiler”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020..

⁸³ TÜBA Jeotermal Enerji Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 41, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Jeotermal%20Enerji%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁸⁴ Akkuş İ. (2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Türkiye’de Jeotermal Enerji Gerçeği: Potansiyel ve Sorunlara Genel Bir Bakış”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.

⁸⁵ Akkuş İ. (2017). Neden jeotermal enerji? Türkiye için önemi, hedefler ve beklentiler. Mavi Gezegen Dergisi, 23, 25–39..

Tablo 4. Türkiye'nin Jeotermal Kaynak Tablosu⁸⁶⁻⁸⁷

Jeotermal Saha	Saha Sayısı Sıcaklığı ($\geq 30^{\circ}\text{C}$)					347
Doğal Çıkış	Saha Sayısı Sıcaklığı ($\geq 20^{\circ}\text{C}$)					600
Alan Dağılımı	Yüksek/Düşük-orta Entalpili Alanlar		44/303	%12-88		
	Elektrik Üretimi		44	%12		
	Isıtma/Termal Kullanım		153/135	%43-45		
Potansiyel	Tahmini Teorik Potansiyel (MWth)					52.700-62.000
	Kullanılabilir Potansiyel (MWth)					20.000
Kuyu	Tahmini kuyu sayısı					>2.500
Değerlendirme	Doğrudan Kullanım	Saha	Yerleşim	Kurulu Güç (MW)	Miktar	
	Merkezi Isıtma	154	18	1.223	137.650	Konut Eşdeğeri
	Termal Kullanım	135		1.205	450	Adet
	Sera Isıtması	154		834	4.350	Dönüm
	Termal Tesis Otel Isıtması	154		420	46.400	Konut Eşdeğeri
	Jeotermal Isı Pompası			7,6	845	Konut Eşdeğeri
	Tarımsal Kurutma	154	3	1,5	-	
	Soğutma	1	1	0,35	-	
	TOPLAM			3.487	184.550	Konut Eşdeğeri
	Elektrik Üretimi	Saha	Uygulama	Santral	Kurulu Güç (MW)	Üretim (MW)
		44	20	64	1.672	1557,71
	Sıvı CO ₂ Üretimi	Kapasite (ton/yıl)				240.000
	Toplam CO ₂ Üretimi	Kapasite (ton/yıl)				400.000

Geliştirilebilir jeotermal sistemlerin Türkiye’de uygulanmasının jeotermal kaynaklarımızın etkin bir şekilde değerlendirilmesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu konuda Ar-Ge çalışmalarına başlanması ve gerek insan kaynağı gerekse de teknoloji

⁸⁶ Mertoğlu O. (2020). TÜBA-Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Dünyada ve Türkiye’de Jeotermal uygulamalar ve Teknolojiler”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020..

⁸⁷ TÜBA Jeotermal Enerji Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 41, Ankara,

<https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Jeotermal%20Enerji%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

aktarımı ve geliştirilmesi konusunda ihtiyaç duyulan adımların orta ve uzun vadede atılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Atık ısı, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve kojenerasyon sistemleri ile desteklenen absorpsiyonlu çevrimlerin, düşük sıcaklıklara soğutmada kullanılması enerji tüketimini azaltmakta, önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri ozon tabakasına zarar veren soğutucu akışkan kullanımını azaltmasından ve atık ısı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilebilmesinden dolayı cazip bir seçenek haline gelmiştir. Özellikle harici ve ucuz bir ısı kaynağının bulunması durumunda absorpsiyonlu sistemler konvansiyonel sistemlerle karşılaştırıldığında akışkanın sıkıştırılması için daha düşük güçlere gereksinim duyduklarından daha avantajlı duruma geçmektedirler. Ülkemizde İzmir Jeotermal A.Ş. binası jeotermal akışkan ısı kullanılarak soğutulmaktadır. Buna ilişkin teknolojilerin ve araştırmaların geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Türkiye’de İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından “REFLECT Avrupa’da jeotermal sistemlerde kabuklaşma” ve “CRM kritik minerallerin kazanımı” başlıklı AB destekli projeler yapılmaktadır. Ülkemizde jeotermal sistemlerde kabuklaşmayı önlemek amacı ile CO₂’nin jeotermal akışkana beslenmesi ile ilgili dünyadaki ilk uygulaması Tuzla Jeotermal sahasında yapılmıştır.

AB Ufuk 2020 programı destekli GECO (Geothermal Emission Control) projesi kapsamında, jeotermal rezervuarlarda sürdürülebilirliğin sağlanması ve santrallerin daha çevre dostu olması hedeflenmektedir.⁸⁸ Proje, jeotermal enerji kaynaklı emisyonların yeniden kullanımı ve depolanması amacıyla yakalanması ve yoğunlaştırılmış halde rezervuara reenjekte edilmesi prensibiyle, jeotermal enerji üretiminden kaynaklanan emisyon oluşumunu minimize etmeyi planlamaktadır. GECO’nun emisyon kontrol yaklaşımı, yoğunlaşmayan gazların yakalanarak, jeotermal akışkanda çözündürülmesi ve rezervuara reenjekte edilmesinden oluşmaktadır.

Ufuk 2020 destekli GeoSmart projesiyle jeotermal santrallerin esnekliğinin ve verimliliğinin artırılması amacıyla ısı enerjisi depolarının esnek ORC çözümleriyle birleştirilmesi ve düşük talebe sahip dönemlerde depolanan enerjinin talebin daha yüksek olduğu dönemlerde geri kullanılması planlanmaktadır. Proje kapsamında Belçika Ballmatt ve

⁸⁸ Halaçoğlu U.(2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Jeotermal Enerji Santrallerinde Çevreci ve Verimlilik Artırıcı Teknolojiler”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020..

Zorlu Enerji Kızıldere sahalarında bu teknolojiye uygun ısı enerjisi depolama sistemlerinin kurulması planlanmaktadır.

Ufuk 2020 kapsamında hibe alan GEOPRO projesiyle çok yüksek sıcaklıklara ve yüksek konsantrasyonlara sahip sıvıların ısı ve kütle transfer davranışları hakkında deneysel veriler üretilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilecek veriler, jeotermal enerji santrallerindeki güç üretim sistemlerinin daha etkin bir şekilde tasarlanmasını ve işletilmesini sağlayarak enerji maliyetini rekabetçi seviyelere düşürecek bir dizi yeni tasarım ve işletim aracında girdi olarak hizmet edecektir. Proje konsorsiyumunda Türkiye'nin yanı sıra, İzlanda, Norveç, Birleşik Krallık, Almanya, İsviçre ve Fransa yer almaktadır.⁸⁹

ERA-NET destekli SUCCEED (Synergetic Utilization of CO₂ Storage Coupled with Geothermal Energy Deployment) programı CO₂ kullanımı ve depolanmasının yanı sıra pilot ölçekte CO₂'nin rezervuara enjekte edildiği jeotermal alanlarda kullanılabilecek en gelişmiş ölçüm, izleme ve doğrulama teknolojilerini test etmeyi ve göstermeyi amaçlamaktadır. Birleşik Krallık, İzlanda, İtalya, Hollanda ve Türkiye konsorsiyumunda sürdürülmektedir. Proje sonucunda etkili bir CCS ve CCUS teknolojisi geliştirilerek, gerek iklim değişikliği ile mücadele alanında gerekse ticari alanda sektöre fayda sağlanması planlanmaktadır.⁹⁰

5346 sayılı Kanuna göre biyokütle; ithal edilmemek kaydıyla; belediye atıklarının (çöp gazı dâhil) yanı sıra bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri olmayan tarımsal atıkları, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları olarak tanımlanmaktadır. Başlıca biyokütle kaynakları; Tarımsal Biyokütle Kaynakları (yağlı tohumlu bitkiler -kanola, ayçiçeği, soya vb.), şeker ve nişasta bitkileri (patates, buğday, mısır, şeker pancarı vb.), elyaf bitkileri (keten, kenevir, sorgum, miskantus, vb.), bitkisel artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk, vb.); Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen Biyokütle Kaynakları (orman ve ormancılık endüstrisi atık ve artıkları, enerji ormanları, enerji bitkileri); Hayvansal Biyokütle Kaynakları (büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar); Kentsel ve Endüstriyel

⁸⁹ Halaçoğlu U.(2020). TÜBA-Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, "Jeotermal Enerji Santrallerinde Çevreci ve Verimlilik Artırıcı Teknolojiler", Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.

⁹⁰ Halaçoğlu U.(2020). TÜBA-Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, "Jeotermal Enerji Santrallerinde Çevreci ve Verimlilik Artırıcı Teknolojiler", Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.

Atıklardan Elde Edilen Biyokütle Kaynakları (Biyolojik kökenli endüstri atıkları, belediye atıkları, arıtma çamurları) olarak belirtilmektedir.

ETKB tarafından biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre toplanabileceği değerlendirilen atıklarımızın toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3,9 MTEP/yıl'dır. Biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç Aralık 2022 sonu itibarıyla 2.309 MW olup toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise yüzde 2,2'dir.⁹¹ Tablo 5'te biyokütle kaynakları özelinde atık miktarları, teorik ve ekonomik enerji eşdeğerleri görülmektedir.

Tablo 5. Türkiye Biyokütle Potansiyel Atlası (BEPA) Verileri⁹²

Bileşenler	Veriler
Toplam Hayvan Sayısı	422.832.374 Adet
Hayvansal Atık Miktarı	193.878.079 ton/yıl
Hayvansal Atıkların Enerji Değeri (Teorik)	4.385.371 TEP/yıl
Bitkisel Üretim Miktarı (Orman Hariç)	171.399.002 ton/yıl
Bitkisel Atık Miktarı	62.206.754 ton/yıl
Bitkisel Atıkların Enerji Eşdeğeri (Teorik)	25.384.268 TEP/yıl
Bitkisel Atıkların Enerji Eşdeğeri (Ekonomik)	1.462.159 TEP/yıl
Belediye Katı Atık Miktarı	32.170.975 ton/yıl
Belediye Atıklarının Enerji Değerleri (Teorik)	3.373.011 TEP/yıl
Belediye Atıklarının Enerji Değerleri (Ekonomik)	485.858 TEP/yıl
Orman Atıklarının Enerji Değeri (Ekonomik)	859.899 TEP/yıl
Atıkların Toplam Ekonomik Enerji Eşdeğeri	3.892.422 TEP/yıl

⁹¹ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle> (Erişim tarihi:15.08.2023)

⁹² Özata, İ. (2021), Türkiye'nin Biyokütle Enerji Potansiyeli, Mevcut Durumu ve Geleceği, TÜBA-Biyokütle Enerjisi Çalıştayı ve Paneli, 4-5 Kasım 2021

Türkiye’de modern biyokütle enerjisi yöntemi olarak en fazla biyokimyasal dönüşüm yöntemlerinden biyogaz üretimi gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde 157 adet farklı büyüklükte ve kapasitede biyogaz tesisi mevcuttur.⁹³ Ülkemizdeki biyogaz tesislerinin çoğunda, büyükbaş hayvan gübresi kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda enerji bitkilerinin ve bitki artıklarının da kullanımına ve yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde kurulu ve aktif olarak biyoetanol üretiminin gerçekleştirildiği üç fabrika mevcuttur. Bu tesisler ve yıllık üretim kapasiteleri sırasıyla Çumra Şeker (şeker pancarı ve melas kullanılarak) 84 milyon litre/yıl, Tarımsal Kimya Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş. (TARKİM) (mısır ve buğday kullanılarak) 40 milyon litre/yıl ve TEZKİM (mısır kullanılarak) 26 milyon litre/yıl’dır. Diğer taraftan ülkemizdeki biyodizel üretimi yıllık yaklaşık 244 bin ton seviyesindedir. Biyodizel üretiminin gerçekleştirildiği hammaddeler, pamuk yağı (yüzde 32), atık bitkisel yağlar (yüzde 30), kanola yağı (yüzde 26), diğer yağlar (yüzde 8) ve aspir yağı (yüzde 4) şeklinde sıralanmaktadır. Ülkemizde biyodizel üretiminin gerçekleştirildiği toplam beş tesis bulunmaktadır.⁹⁴

Ege Üniversitesi’nde 1999 yılında disiplinler arası bir yaklaşımla faaliyete başlayan “Biyokütle Enerji Teknolojileri Araştırma Grubu” yenilenebilir enerji kaynakları ve özellikle biyokütle enerjisi konusunda hammadde üretiminden dönüşüm teknolojisine, elde edilen ürünün son kullanıcıya ulaştırılmasından kullanımının yaygınlaştırılması ve sanayi işbirliklerine kadar oldukça geniş bir yelpazede çalışmalarını sürdürmektedir. Enerji bitkileri ve biyoyakıt üretimi konusunda Ar-Ge çalışmaları, ulusal-uluslararası kaynaklı projeler kapsamında devam etmektedir. Bu kapsamda farklı biyokütlelerden biyoyakıt ve toprak düzenleyici olarak biyokömür üretimi, hayvansal atıklardan biyogaz üretimi, tarımsal atıkların biyokompozit yapı malzemesi üretiminde kullanılması çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Ayrıca TÜBİTAK MAM Temiz Enerji Teknolojileri Araştırma Grubu da, biyokütlenin termokimyasal yöntemlerle (yakma, gazlaştırma, piroliz, hidrotermal karbonizasyon, vb.) değerlendirilerek katma değerli ürünlere (hidrojen, metan, FT dizel, metanol, DME, vb.) dönüştürülmesi konularında çalışmalar yapmakta olup laboratuvar ve pilot ölçekli tesislerde deneme üretimleri gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan Tarım ve Orman Bakanlığı Karadeniz

⁹³ Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021

⁹⁴ Koçar, G., (2021). Enerji Bitkileri ve Biyoyakıt Üretimi, TÜBA –Biyokütle Enerjisi Çalıştay ve Paneli, 4 – 5 Kasım 2021

Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'nde tarımsal kaynaklardan enerji üretimi araştırmaları gerçekleştirilmektedir.

Oksi-yanma teknolojisi son yıllarda gelişen ve kömür ile biyokütlenin yakılmasıyla CO₂'in tutulmasını birlikte gerçekleştirmeye imkân veren en önemli teknolojilerden biridir. Bu teknolojiye kömür veya biyokütle, atmosferik veya basınçlı akışkan yataklarda ve oksijence zengin ortamda yakılmaktadır. Dünyada oksi-yanma çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Oksi yanma çalışmalarının büyük bir kısmı pulverize kömür yakma ile ilgilidir. Akışkan yatak yanma çalışmaları son on yılda hız kazanmıştır. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmında atmosferik basınçta çalışan akışkan yataklar kullanılmaktadır. Oksi basınçlı akışkan yatak çalışmaları ise yeni başlamıştır. Ülkemizde de TÜBİTAK tarafından tamamlanan OKSİ-BAY projesi kapsamında kömür ve biyokömür karışımlarını basınçlı oksi-yanma sisteminde yakma konusunda 30 kWth kapasiteye sahip basınçlı bir oksi-kabarcıklı akışkan yatak yanma sistemi tasarlanmış ve devreye alınmıştır.

Türkiye'nin özellikle ağır iş sınıfındaki araçlarında (tır, kamyon, otobüs, gemi gibi) yüksek dizel kullanım oranları (yıllık 25 milyon ton civarı), sıvı biyoyakıt kullanımının bir müddet daha devam edeceğini göstermektedir. Araçların ticari ömür süreleri ve ağır motorlardan elektrikli araçlara dönüşümün gerçekleşme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Türkiye'nin yaklaşık 20 yıllık bir dönem için biyoyakıt ihtiyacı duyacağını göstermektedir.

Yenilenebilir enerji alanında yakaladığımız ivmenin biyoyakıtlarla birlikte artarak devam edebilmesi, Ar-Ge ve yenilik yoluyla bir dönüşümün sağlanabilmesi ve kendi enerji kaynaklarımızın değerlendirilmesi için yerli biyokütle kaynaklarından biyoyakıt üretebilen bir konuma gelinmesi önem arz etmektedir. Dünya örneklerine bakıldığında, çeşitli ülkelerin biyoyakıt geleceklerinde Ar-Ge ve yenilik eksenli bir dönüşüm gerçekleştirmekte olduklarını görmek mümkündür. Bu örneklerin ortak noktaları arasında stratejik çerçevenin iyi çizilmiş olması ve özendirici hedeflerin belirlenmesi yer almaktadır.

Biyoyakıtların Türkiye'de kullanımı için kritik öneme sahip biyorafineri modelleri son dönem AB programlarında ve Ufuk Avrupa proje çağrılarında önemli yer bulmaktadır. Ülkemizin ilk biyorafinerisi 2021 yılında mikroyosun hammaddesinden biyoyakıt ve diğer katma değerli ürünlerin elde edilmesi amacıyla kurulmuştur.⁹⁵ AB ve Türkiye Cumhuriyeti mali

⁹⁵ <https://independent.boun.edu.tr/> (Erişim tarihi:15.08.2023)

işbirliği çerçevesinde finanse edilen ve STB tarafından yürütülen Rekabetçi Sektörler Programı kapsamında inşa edilen biyorafineri, rüzgâr enerjisi destekli olarak çalışmakta olup fotosentez koşulları altında CO₂ destekli büyüyen mikroyosun hammaddesi üretimi ile Avrupa'nın ilk karbon-negatif biyorafinerisi olmuştur. Bu tesiste biyojet yakıtı, biyodizel, biyohidrojen, biyometan ve biyoetanol da dâhil olmak üzere toplam 11 adet endüstriyel ürün geliştirilmektedir. Biyorafineriler, biyoyakıtların petrol türevli fosil yakıtlara kıyasla ekonomik uygulanabilirliğini artıracak önemli stratejilerden biri olarak önümüzdeki 20-30 yıllık süreç için yüksek önem taşımaktadır. Mikroyosun biyokütle kaynakları dışında özellikle selülozik etanol üretilen hammadde girdileri işleyen biyorafineriler (tarımsal atıklar, orman atıkları, gibi) kurulmaya ve işletilmeye devam etmekte olup Sustainable Aviation Fuel (SAF) üretimi yapan biyorafinerilerin yakın dönem içinde kurulmaya başlanması beklenmektedir.

Oksi-yanma teknolojileri ile CO₂ tutma, yanma öncesi CO₂ tutma, biyoenerjiden elde edilen hibrit sistemler, yanma sonrası kaynaktan yakalama ve depolama gibi karbon yakalamanın birçok metodu ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Birlik programları ile desteklenen projeler kapsamında CCUS ile zenginleştirilmiş petrol üretimi, termik santrallerden kaynaklı emisyonu yakalama ve onu depolamaya yönelik potansiyelin belirlenmesi, karasal bölgede CO₂ depolamanın kanıtlanması, jeotermal sahalara CO₂ enjeksiyonu konuları çalışılmıştır.⁹⁶ Diğer taraftan özel şirketler tarafından, hem kendi öz kaynaklarıyla hem de AB projeleri kapsamında “Modifiye Karbon Nanotüplere ve Metal-Organik Çerçevelere Bağlı Yenilikçi Absorbanlar Geliştirilmesi”, “Karbondioksitin 3B Yazıcı ile Basılacak Reaktör ve Katı Oksit Hücresi Teknolojisiyle Pazarda Talep Gören Dimetil Eter Ürününe Dönüştürülmesi” gibi projeler yürütülmektedir. Yine EÜAŞ tarafından TÜBİTAK MAM ile “Hibrit Proseslerde Karbon Yakalama Teknolojilerinin İncelenmesi” projesi yürütülmüştür. Diğer taraftan Türkiye’de DAC konusuna yönelik yeterli çalışma bulunmadığından ilave araştırmalara ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir.

Yeşil hidrojen üretimi konusunda ülkemiz henüz başlangıç aşamasındadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılmakta olan gri/kahverengi hidrojenin yeşil/mavi olarak sınıflandırılan ve karbon emisyonu olmayan hidrojene dönüştürülmesi için önemli seviyede projeye, fon desteğine ve yetişmiş personele ihtiyaç duyulmaktadır. TÜBİTAK MAM

⁹⁶ Low Carbon Turkey (2021). AB Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi Düzenleyici Etki Analizi Çalışması. URL: http://www.lowcarbonturkey.org/wpcontent/uploads/2019/05/LCDTR_KYDD_MevcutDurum_CaglarSinayuc.pdf, Haziran 2023

bünyesinde TENMAK bütçe destekli Polimer Elektrolit Membran (PEM) elektrolizör geliştirme çalışmaları tamamlanmıştır. Aynı zamanda, TÜBİTAK MAM'da "Kömürden Mavi Hidrojen Üretim Projesi" Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) destekli olarak gerçekleştirilmektedir. Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü ve Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü tarafından 2016-2020 döneminde "Biyokütleden Gazlaştırma Yoluyla Hidrojen Üretim Teknolojisi (BioH₂)" isimli TÜBİTAK TARAL 1003 projesi yürütülmüştür. Projede yenilenebilir ve ulusal enerji kaynaklarımızdan biri olan biyokütleden, gazlaştırma yoluyla enerji ve ulaşım sektörlerinde kullanılmaya yönelik hidrojen üretmeye yarayan bir teknolojinin geliştirilmesi ve sonuçların bir pilot sistem üzerinde uygulanması amaçlanmıştır. Bu sayede ülkemiz, tamamen yerli kaynak ve imkânlarla geliştirilen yeşil hidrojen üretim teknolojisi ile kurulan pilot ölçekte bir tesis, teknolojik bilgi birikimi ve tecrübeli insan kaynağına sahip olmuştur.

TÜBİTAK 1007 programı kapsamında desteklenen ve TKİ'nin müşteri kurum olarak yer aldığı "Biyokütle ve Kömür Karışımlarından Sıvı Yakıt Üretimi-TRİJEN" isimli proje, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yönetiminde İstanbul Teknik Üniversitesi, Marmara Üniversitesi ve HABAŞ işbirliği ile pilot ölçekli entegre sistem olarak 2016 yılında tamamlanmıştır. Projede, ülkemizin sürdürülebilir kalkınması ve enerji güvenliği açısından yaygın ve ulusal kaynak olan kömür ve biyokütle karışımlarından sıvı yakıtların üretimi, temiz ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi ve elde edilen sonuçların pilot ölçekte uygulanması amaçlanmıştır. Böylece, gazlaştırma, gaz temizleme, gaz şartlandırma ve sıvı yakıt üretimi teknolojilerine yönelik endüstriyel tesis kurulumu öncesi gerekli olan tasarım, imalat, montaj, devreye alma, işletme ve tekno-ekonomik uygulanabilirlik hakkında büyük bir teknolojik birikim oluşturulmuştur. Diğer yandan TKİ tarafından desteklenen pilot ölçekli yerli kömür kaynaklarının gazlaştırılması ile hidrojen/metanol üretimi projesi (Tunçbilek Kömür Gazlaştırma) TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü tarafından tamamlanmıştır.

Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliğinin (GAZBİR/GAZMER) ülkemizde yürüttüğü bir başka proje ise doğal gaz hatlarına hidrojen karıştırılması projesidir. Gazbir-Gazmer Temiz Enerji Merkezi'nde test etmek amacıyla oransal olarak ortalama yüzde 5-10-15-20'ye kadar hidrojen ile yüzde 95-90-85-80'e kadar doğal gaz karıştırılarak test amaçlı yakma işlemiyle başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Gazbir-Gazmer, Şubat 2021'de Temiz Enerji Merkezi'nde yüzde 20 hidrojen-yüzde 80 doğal gaz karışımını evsel cihazlarda test etmeye başlamış, ilk

sonuçların başarılı olduğu ve asıl sonuçların uzun süreli deneylerde ortaya çıkacağı bildirilmiştir. Proje kapsamında elde edilen ilk sonuçlara göre; mevcut doğal gaz iç tesisatlarında ve tüketici cihazlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmaksızın hidrojenin, dağıtım ağlarında doğal gazla birlikte en fazla yüzde 20 oranında (hacim olarak enerji içeriği bakımından yüzde 6 oranına eşdeğer) karıştırılabileceği öngörülmektedir.

Söz konusu projenin amaçları arasında; yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilen hidrojenin doğal gazla harmanlanması ile elde edilen kompozit gazın kullanımı, söz konusu gazın sanayide kullanılan gaz ekipmanlarına etkileri ile endüstriyel yakıcılarda kullanılabilmesi için gerekli testlerin yapılması, deniz suyundan hidrojen üretilmesi için düşük maliyetli fotokatalizörlerin geliştirilmesi ile Konya ve Balıkesir illerinde bu amaçla üretim ve test merkezlerinin kurulması gibi hedeflerin ön plana çıktığı görülmektedir.

Bu konuda bir diğer proje 2004-2009 döneminde Avrupa Komisyonu FP6 tarafından desteklenen ve TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsünün de ortak olduğu NaturalHy projesidir (39 ortak, 15 gaz sanayi temsilcisi, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü ve İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş., (İGDAŞ)). Projede; üretim, taşıma ve son kullanım göz önünde bulundurularak Avrupa doğal gaz ağına hidrojen beslemenin pratikleri değerlendirilmiştir. Proje sonucunda doğal gazı yakıt olarak kullanan cihazların çoğu güvenli bir şekilde yüzde 20'ye kadar hidrojen karıştırılabileceğini göstermiş ancak bu seviyenin üzerinde, cihazların ayarlanması veya bazı parçalarının değiştirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, güvenlik ve verimlilik nedenleri ile tüm cihazların düşük hidrojen oranlarında dahi sertifikalanması gerekmektedir.

TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü 2001 yılından bu yana hidrojen konusundaki çalışmalarına devam etmektedir. Enstitü, TENMAK Bor Araştırma Enstitü (BOREN) işbirliği ile üç tane sodyum bor hidrürlü yakıt pilli araç projesi tamamlamış, sodyum bor hidrürden hidrojen üretim sistemi ve 200 W yakıt pili entegre edilmiş bir insansız hava aracı (İHA) geliştirmiştir. Ayrıca 2002-2008 döneminde yine AB tarafından desteklenen “Molten Carbonate Fuel Cell Ship Power Generation Systems - MCFC_NAV” isimli projede F76 dizel yakıtından hidrojen üretim sistemi, 150 kWe kapasiteli mikrotürbin ve 500 kWe kapasiteli MCFC sistemi TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yerleşkesinde kurulmuştur.

TÜPRAŞ Ar-Ge Merkezi'nin, Koç Üniversitesi ile işbirliği içinde sürdürdüğü “Hidrojen Sülfür Gazının Elektrokimyasal ve Foto-elektrokimyasal Yöntemlerle, Hidrojen

Gazı ve Elementel Kükürde Ayrıştırılması Projesi”nde yakıtların kükürt içeriğinin giderilmesi için hidrojen kullanılması üzerine laboratuvar ölçekli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Kömürün çevresel etkilerini azaltmaya yönelik olarak TKİ; kömürün zenginleştirilmesi, gazlaştırılması ile kömürden kritik minerallerin kazanımı, organomineral gübre ve hümik asit üretimi konularında çeşitli kurum ve kuruluşlarla işbirliği içinde Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. EÜAŞ, termik santral baca gazı emisyonlarının plazma teknolojileri yardımıyla giderilmesi konusunda TÜBİTAK MAM ile işbirliği yapmaktadır.

Dünyada enerji arzının karşılanması amacıyla nükleer teknoloji araştırmalarının yaygınlaşması Türkiye’yi de harekete geçirmiştir. Ülkemizde Akkuyu ve Sinop’a NGS kurulma kararı alınarak, Türkiye Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu arasında Mersin-Akkuyu sahasında bir NGS tesisine ve işletimine dair işbirliğine ilişkin anlaşma 12 Mayıs 2010 tarihinde imzalanmıştır. 27 Nisan 2023 tarihinde ilk reaktör için gereken nükleer yakıt sahaya getirilmiş olup santralin 1.200 MW kapasiteli ilk ünitesinin bu tarihi izleyen azami iki yıl içerisinde devreye girmesi beklenmektedir.

Ülkemizdeki nükleer teknolojinin altyapısının gelişimi için önemli rolü olan iki adet araştırma reaktörü bulunmaktadır. Bunlardan ilki, TENMAK Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü (NÜKEN) İstanbul Yerleşkesinde (mülga TAEK’e bağlı mülga ÇNAEM) kurulu bulunan 5 MW gücündeki TR-2 araştırma reaktörü, diğeri ise İstanbul Teknik Üniversitesi’nde kurulu bulunan 250 kW gücündeki TRIGA MARK II araştırma reaktörüdür. Hali hazırda ülkemizin en büyük nükleer tesisi konumunda bulunan TR-2 araştırma reaktörü kapalı durumdadır. Binanın depreme karşı güçlendirilmesi projesi ve reaktörün modernizasyonu tamamlanmış olup yeniden hizmete açılabilmesi için Nükleer Düzenleme Kurumundan (NDK) işletme lisansı beklenmektedir. Eğitim ve araştırma amacıyla kullanılmakta olan İTÜ TRIGA MARK II araştırma reaktörü ise işler durumdadır ve özellikle nötron aktivasyon analizi, öğrenci deneyleri ve bilimsel amaçlı malzeme ışınlamaları uygulamaları konusunda talep görmektedir.

TR-2 araştırma reaktörü 5 MW gücünde açık havuz tipi bir malzeme test reaktördür. Geçmişte TR-2 araştırma reaktöründe nükleer tıpta ve endüstride ihtiyaç duyulan radyoizotoplar üretilmiş, nötron aktivasyon analizi yöntemiyle malzeme karakterizasyonu uygulamaları yapılmış, nükleer mühendislik, fizik mühendisliği gibi bölümlerin öğrencileri için staj imkânları sağlanmış, lisansüstü düzeyde tez araştırmalarına yardımcı olunmuştur. TR-2 araştırma reaktöründe izotop üretimi ve diğer çalışmalar 1995 yılına kadar devam ettirilmiştir.

1995'ten 2009 yılına kadar deprem riski sebebiyle düşük güçte çalışmalar sürdürülmüştür. 2009 yılı sonunda eski yakıtların taze yakıtlarla değiştirilmesi için reaktörün çalışmalarına ara verilmiştir. Reaktörün yeniden işletmeye alınabilmesi için gereken lisanslama süreci kapsamında, reaktör binasının depreme karşı dayanıklılığını artırmak üzere başlatılan güçlendirme projesi 2013 yılı sonunda tamamlanmıştır. Reaktörün güvenlik analiz raporu hazırlanarak 2017 yılında NDK'ya yakıt yükleme izni almak üzere sunulmuş olup değerlendirme sonucu beklenmektedir.

TR-2 araştırma reaktörünün tekrar devreye alınması halinde öncelikli olarak ülkemizin nükleer teknoloji geliştirme çalışmalarının yanı sıra nükleer tıp ve endüstriyel alanda kullanılan radyoizotoplardaki dışa bağımlılığı azalacak, nükleer enerjiye geçiş aşamasında bulunan ülkemizdeki yetişmiş insan gücünün ve nükleer alandaki bilimsel araştırmaların artmasına katkı sağlanacaktır. TR-2 araştırma reaktöründeki ışınlama rejimleri ve radyoizotop üretim tekniklerinde yapılabilecek geliştirmeler ile radyoizotop üretimi kapasitesinin artması ve dışa bağımlılığın minimize edilmesi sağlanacaktır.

Türkiye'nin ilk ve tek lisanslı radyoaktif atık tesisi olan, 1989 yılında kurulan Radyoaktif Atık Yönetimi Tesisi TENMAK-NÜKEN İstanbul yerleşkesinde bulunmaktadır. Söz konusu tesiste, düşük aktiviteli radyoaktif atıkların toplanması, sınıflandırılması, işlenmesi, depolanması, radyoaktif atık yönetimi uygulamalarında ulusal ve uluslararası mevzuata uygun olarak işlemlerin yürütülmesi, yüksek aktiviteli atıkların teslim alınıp geçici depolanması ve fiziksel güvenliklerinin sağlanması ile yüksek düzeyli radyoaktif atıkların işlenmesi ve depolanmasına yönelik faaliyetler yürütülmekte ve ilgili konularda araştırmalar yapılmaktadır.

Bunların yanı sıra Ankara Üniversitesi Gölbaşı yerleşkesinde Türk Hızlandırıcı ve Işınlama Laboratuvarı (TARLA-Turkish Acceleration and Radiation Laboratory) bulunmaktadır. TARLA, Orta Avrupa'da 12 sinkrotron ve 7 SEL tesisi arasında Polonya'daki SOLARIS ve Ürdün'deki SESAME sinkrotron tesisleri arasında tek hızlandırıcı tabanlı ileri araştırma altyapısına sahip araştırma ve ışınım kaynağı tesisidir. Küresel ölçekte rekabet edebilecek bir araştırma altyapısı olarak TARLA'da ilk etapta, süper-iletken teknoloji ile hızlandırılan parçacıklar yüksek akıllı polarize Gama ışını ($>10^{10}$ ph / cm² / MeV) ve kızıl-ötesi bölgesinde yüksek parlaklıkta Serbest Elektron Lazeri (5-350 μ m, 1 MW peak, 100 W ortalama) üretilmesi amaçlanmaktadır.

Ülkemizde elektron hızlandırıcı teknolojisine dayalı uygulamalar, ikisi özel sektör olmak üzere (mülga TAEK-SANAEM tesisle beraber) üç tesiste yürütülmektedir. Özel sektörün kurduğu elektron hızlandırıcısı tesisleri Ankara ve Bursa'dadır. Bunların yanı sıra; Abant İzzet Baysal Üniversitesi-Nükleer Radyasyon Dedektörleri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (NÜRDAM) radyasyon dedektörleri ve teknolojileri alanında milli ve yerli ürünlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesinde yeni kurulan Nükleer Algılayıcılar ve Robotik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (NAR) amacı yüksek radyasyon alanında çalışabilir nükleer radyasyon algılayıcıları sistemleri ve robotik uygulamaları, algılayıcılarda kullanılan kristallerin üretilmesi alanlarında çalışmalar yapmaktır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) bünyesinde yer alan Hızlandırıcı Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (İVME-R) 15 Nisan 2019 tarihinde faaliyete geçmiştir. İVME-R hâlihazırda Parçacık Fiziği ve Nükleer Fizik Araştırmaları, Malzeme Bilimi ve Uygulamaları, Yüksek Enerji Fiziği, Uzay ve Hızlandırıcı Sektörü, Savunma ve Güvenlik Sektörü, Yaşam Bilimleri ve Medikal Uygulamalar alanlarında faaliyet göstermektedir. İVME-R'e temel teşkil eden "Parçacık Radyasyonu Testleri Oluşturma Laboratuvarı Projesi" kapsamında ise TENMAK Proton Hızlandırıcı Tesisi (PHT)'nin Ar-Ge çalışmaları için planlanan hızlandırıcı çıkışı Avrupa Uzay Ajansı (ESA) standardını karşılayacak hale dönüştürülerek işletilmektedir.

Ülkemiz, 2018 yılında Dördüncü Nesil Uluslararası Forumuna (GIF - Generation IV International Forum) üyelik ve teknoloji geliştirme çalışmalarında uluslararası işbirliklerine dâhil olmak için başvuruda bulunmuştur. Günümüze kadar yapılan müzakereler ve teknolojik yeterlilik değerlendirmeleri neticesinde, GIF yönetim kurulu ülkemizin üyeliğine olumlu yaklaşmış fakat bu alanda bir ülke planının oluşturulması gereğini öne sürmüştür. Dolayısı ile dördüncü nesil reaktörler konusunda ülkemizin yol haritasının kabul görmesiyle üyelik başvuru sürecimizin tamamlanması mümkün kılınacaktır.

Ülkemizde ETR (ergimiş tuz reaktörleri) teknolojileri konusunda hedef odaklı deneysel çalışmalar henüz başlamamış olmakla birlikte farklı kurumlar bünyesinde çalışmalar yürütülmektedir. Başta İTÜ ve Hacettepe Üniversitesi olmak üzere akademik açıdan ve TENMAK-NÜKEN'de nükleer mühendislik bilgisayar kodlarıyla çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca, 16 Haziran 2016 tarihinde resmi olarak Ulusal Nükleer Teknoloji Geliştirme Programı

(UNUTEP) TÜBİTAK MAM'ın önderliğinde başlatılmıştır ve halen devam etmektedir. TÜBİTAK MAM'ın "Nükleer Teknoloji Programı" çerçevesinde hem TÜBİTAK MAM'daki, hem de ülkemizdeki mevcut nükleer altyapı değerlendirilmiş, hangi altyapı ihtiyacının bulunduğunu ortaya çıkaracak inceleme yapılmış olup nükleer reaktör teknolojileri konusunda fizibilite raporu hazırlanmıştır. Dünyada en kapsamlı toryumlu ETR teknolojisi geliştirme çalışması yapan AB Horizon-2020 kapsamında SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactors) projesinde aktif gözlemci statüsünde yer alan Türk şirketi FİGES ile TÜBİTAK, 2019 yılı Temmuz ayında tamamlanan proje kapsamında ETR'nin birincil ısı değiştiricisinin tasarımını gerçekleştirmiştir.

Diğer taraftan, III ve III+ nesil, günümüzde işlevsel ya/ya da kurulum aşamasındaki reaktörler sınıfını temsil etmektedir. Bu reaktörler, güvenliği artırılmış, maliyeti nispeten düşürülmüş ve II. nesil reaktörlere göre çalışma ömrü uzatılmış reaktörler olup; bunların içerisindeki Hafif Su Reaktörleri (LWR) günümüzde esasen en olgun seviyeye ulaşmış teknolojilerdir. III ve III+ nesil, ileri hafif su reaktör teknolojileri kullanan SMR'ler son yıllarda nükleer teknoloji alanında önde gelen ülkeler tarafından yaygın bir şekilde geliştirilmektedir. Ülkemiz gibi nükleer teknoloji alanına yeni adımlar atmakta olan ülkeler için nükleer enerjiden elektrik enerjisi üretilmesi amacıyla düşük ilk yatırım sermayesi gerektiren, ileri nükleer teknolojilerin kullanıldığı, düşük güçlü (300 MWe'a kadar), Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor-PWR) temelli SMR teknolojisine ilişkin bilgi ve teknoloji birikimine ve altyapıya sahip olunmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

2.2.1 Kapsam ve Mevzuat

Sürdürülebilir ve iklim dirençli kalkınma yönünde sektörel politikalara rehberlik eden genel mevzuat ve politika belgeleri aşağıda yer almaktadır;

- On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)
- Çevre Kanunu (1983)
- Enerji Verimliliği Kanunu (2007)
- Orta Vadeli Program (2023-2025)
- Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2023) ve Eylem Planı (2011-2023)
- Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011-2023)
- Enerji Verimliliği Stratejisi ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023)

- Ulusal Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı (2053)
- Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021)
- Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020-2035)

Türkiye'nin iklim eylemlerini geliştirmek için hazırlanmakta olan ve mümkün olan en kısa sürede tamamlanması hedeflenen birincil mevzuat ve politika belgeleri aşağıda yer almaktadır;

- On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)
- Uzun Vadeli Düşük Emisyonlu Kalkınma Stratejisi (Uzun Vadeli Strateji)
- İklim Kanunu
- II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı
- Yerel İklim Değişikliği Eylem Planı Yönetmeliği
- Uzun Vadeli İklim Değişikliği Stratejisi
- Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı
- Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim Stratejisi
- Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi ve Eylem Planı
- Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası
- Emisyon Yoğun Sektörler için Yol Haritası
- İkincil ETS Mevzuatı
- Türkiye için Karbondioksit Yakalama ve Kullanım Teknolojileri Yol Haritası ve Uygulama Planı
- Türkiye Deniz Üstü Rüzgâr Yol Haritası
- Çelik, Alüminyum ve Çimento Sektörleri için Sıfır Karbonlu Yol Haritası

2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşılması, doğal çevrenin korunması ve rekabetçiliğin artırılması için kaynak verimli ve sürdürülebilir döngüsel ekonomi son derece önem taşımaktadır. Bu bağlamda, 16 Temmuz 2021'de 2021/15 sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile Türkiye'nin "Yeşil Mutabakat Eylem Planı" (YMEP) yayımlanmıştır. Dokuz ana başlık altında 32 hedef ve 81 eylem içeren Eylem Planı, Türkiye'de endüstrilerin yeşil dönüşümü ve özellikle ticaret ve sanayiye ilişkin alanlarda önlemlerin kabul edilmesi üzerinde durmaktadır. YMEP, düşük karbonlu, kaynak verimli ve döngüsel ekonomik yapı yönünde yeşil dönüşümün kolaylaştırılması amacıyla İklim Değişikliğiyle Mücadele; Yeşil ve Döngüsel Ekonomi; Yeşil Finansman; Sınırdaki Karbon Düzenlemeleri; Temiz, Erişilebilir ve Güvenli

Enerji Temini; Sürdürülebilir Tarım; Sürdürülebilir Akıllı Ulaştırma ve Diplomasi gibi çok çeşitli alanlarda yapılacak eylemleri içermektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nda enerji sektörü için birincil kılavuz politika belgeleri ve sektörel mevzuat aşağıda verilmiştir.⁹⁷:

- Enerji Verimliliği Kanunu (2007)
- Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına Dair Kanun (2005)
- Jeotermal Kaynaklar ve Maden Suları Kanunu (2007)
- Elektrik Piyasası Kanunu (2013)
- Doğal Gaz Piyasası Kanunu (2001)
- Nükleer Güç Santrallerinin Kurulması ve İşletilmesi ile Enerji Satışına Dair Kanun (2007)
- Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretiminin Belgelendirilmesi ve Desteklenmesi Hakkında Yönetmelik (YEKDEM) (2013)
- Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik (2011)
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023)
- Enerji Verimliliği Strateji Belgesi ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023, güncellenecek)
- Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022-2035)

2.2.2 Ulusal Politikalar

Küresel iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir dönüm noktası olan Paris Anlaşması, 12 Aralık 2015 tarihinde kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Ülkemiz, 27 Eylül 2021 tarihinde 2053 net sıfır emisyon hedefini açıklamış ve ardından 10 Kasım 2021 tarihinde Paris Anlaşmasına taraf olmuştur. Paris Anlaşması çerçevesinde 2030 yılı için daha önce yüzde 21 olarak açıklanmış olan emisyon azaltım hedefinin yeni Ulusal Katkı Beyanı çerçevesinde yüzde 41'e yükseltildiği Kasım 2022'de gerçekleşen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP 27) açıklanmıştır.

⁹⁷ T.C. Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (2023). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

Ticaret Bakanlığı tarafından 2021 yılında hazırlanan Yeşil Mutabakat Eylem Planında ülkemizin yenilenebilir enerji ve düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji verimliliğinin geliştirilmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Söz konusu Eylem Planı taslağında 32 hedef ve 81 eyleme yer verilmiştir (Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021).

21-25 Şubat 2022 tarihinde gerçekleştirilen İklim Şurasında, ülkemizin 2053 net sıfır emisyon ve yeşil kalkınma hedefleri doğrultusunda orta ve uzun vadeli stratejisinin belirlenmesine ilişkin olarak 217 tavsiye kararı ortaya çıkmıştır.⁹⁸ Bu kararlardan sekiz tanesi Temiz, Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı ile ilgili olup aşağıda yer almaktadır.

1. Yüksek verime ve yaşam ömrüne sahip, hafif, esnek ve maliyet-etkin; bina, araç, tarım ve su yüzeyi gibi uygulamalara sinerjik ve ergonomik olarak entegre edilebilecek PV hücre, panel ve sistemler geliştirilmelidir.
2. Yüksek verimli CSP sistemleri ve bileşenleri geliştirilmelidir. Bu kapsamda geliştirilebilecek teknolojiler; spektral yansıtıcılığı yüksek (>yüzde 99) aynalar; üstün kaplama teknolojileriyle ve faz değiştiren malzemelerin entegre edildiği, yüksek soğurucu ve düşük enerji kaybı özelliklerine sahip alıcılar; yüksek özgül enerjiye sahip ve termofiziksel özellikleri yüksek sıcaklık dalgalanmalarına dayanıklı ısı transfer ortamı; yüksek sıcaklıkta faz değiştiren maddelerle desteklenmiş, kaskatlı termal enerji depolama sistemleridir.
3. Yüksek verime ve düşük enerji maliyetine sahip, içinde bulunduğu habitat ile daha uyumlu ve uygun tasarımlarla çok amaçlı kullanılabilen karaüstü, denizüstü ve uçan (airborne) rüzgâr enerjisi sistemleri ile hibrit yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi sağlanmalıdır.
4. Jeotermal enerji alanında derin sondaj ve yönlü sondaj teknolojileri, diğer enerji kaynaklarıyla kaskatlı olarak entegre edilebilecek ve farklı sektörlerdeki ihtiyaçları karşılayabilecek sistemler, sıcak kuru kaya teknolojileri gibi yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi sağlanmalıdır.
5. Hidrojenin enerji taşıyıcısı, yakıt ve değerli kimyasalların eldesinde hammadde olarak kullanılmasına yönelik değer zincirinin her aşamasında öncü teknolojilerin geliştirilmesi sağlanmalıdır. Bu kapsamda geliştirilebilecek teknolojiler; yenilenebilir ve diğer düşük karbonlu enerji kaynaklarından, linyit, biyokütle ve organik atıklardan

⁹⁸ İklim Şurası, Bilim ve Teknoloji Komisyonu Raporu, 2022

karbon tutma teknolojileri ile bütünleşmiş hidrojen üretimi teknolojileri; bor hidrür bileşikler, metal hidritler, sıvı organik hidrojen taşıyıcıları gibi depolama teknolojileri; kriyojenik soğutma ile sıvı hidrojen taşıma teknolojileri; sanayinin ihtiyaç duyduğu amonyak, metanol vb. katma değerli ürünlerin eldesi; enerji yoğun sektörlerde CO₂ azaltma ve/veya değerlendirilmesi; ulaşım, mobil ve evsel alanlarda yakıt pili uygulamalarına yönelik teknolojilerdir.

6. Temiz ve güvenli nükleer enerji teknolojilerinde çığır açıcı yaklaşımlardan olan yeni nesil SMR teknolojileri geliştirilmeli; bu reaktörlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu; elektriğin yanında diğer faydalı çıktıları (ısı, temiz su, hidrojen, alternatif yakıtlar vb.) üretebilecek entegre sistem teknolojilerinin ve nükleer atık yönetim teknolojilerinin geliştirilmesi sağlanmalıdır.
7. Katma değer potansiyeli yüksek organik atıkların ve mikro alglerin biyokimyasal, termokimyasal ve hidrotermal teknolojilerle biyoyakıtlar (katı, sıvı, gaz) ve hidrojen gibi ürünlere dönüştürülmesine yönelik sıfır atık, döngüsel ekonomi ve çoklu ürün amaçlı yenilenebilir enerji destekli entegre biyorafineriler ve yenilikçi teknolojiler geliştirilmelidir.
8. Siber, fiziksel, sosyal katmanlardan oluşan enerji sistemlerinde, değer zincirindeki tüm faaliyetlerin verimli ve maliyet etkin şekilde çalışmasını amaçlayan, dijital teknolojilere dayanan, enerji verimliliği sağlayan otonom enerji yönetim sistemlerinin ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesi sağlanmalıdır.

Orta Vadeli Program (2023-2025) kapsamında enerji teknolojilerinin geliştirilmesi için alınan kararlar aşağıda sıralanmıştır;

- Türkiye'nin sahip olduğu çeşitli yerli ve yenilenebilir kaynaklar kullanılarak enerji arz güvenliğine destek olacak Ar-Ge çalışmaları ve yatırım projeleri yürütülecektir.
- Yeşil dönüşüm altyapısının oluşturulması için başta tarım, sanayi, ulaştırma ve enerji sektörlerinde olmak üzere yeşil teknoloji Ar-Ge projeleri desteklenmeye devam edilecek, yeşil hidrojen ve enerji depolama gibi emisyon azaltılmasına katkı sağlayan teknolojilerin yatırım ekosistemi geliştirilecektir.
- Yeni rüzgâr ve güneş enerji santral projeleri tesis edilerek yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik kurulu gücü artırılabilecek, Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı ve benzeri mekanizmalarla yerli üretim, Ar-Ge ve teknoloji transferi faaliyetleri desteklenecektir.

ETKB tarafından hazırlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022) kapsamında; 2030 yılına kadar 1,7 GW yerli kömür santralinin sisteme dâhil olacağı, 2035 yılına kadar ise toplam nükleer enerji santrali kurulu gücünün 7,2 GW'a ulaşacağı planlanmıştır. Ayrıca, 2030 yılına kadar süreçleri devam eden 2,4 GW gücünde doğal gaz santralinin devreye gireceği varsayılmıştır. 2035 yılına kadar termik santrallerin elektrik üretimdeki payının yüzde 34,2'ye düşmesi, nükleer santrallerin payının ise yüzde 11,1'e yükselmesi öngörülmüştür.

2.2.3 Hedeflere Ulaşılmasının Önündeki Başlıca Sorunlar

2.2.3.1 Mevzuattan Kaynaklanan Sorunlar

3453 sayılı Karar ile “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)” kapsamında 1 Temmuz 2021'den 31 Aralık 2025'e kadar işletmeye girecek Yenilenebilir enerji kaynak (YEK) belgeli üretim tesisleri için uygulanacak fiyat, üretim teknolojisine bağlı olarak kilovatsaat başına Türk Lirası cinsinden belirlenmiştir. Bu haliyle YEKDEM yatırımcıların ilgisini çekmemektedir.

Ülkemizde nükleer sektör ihtiyaçlarına özel olarak hazırlanmış bir teşvik mekanizması bulunmamaktadır. Mevcut teşvik mekanizması, ilave üretim ve test altyapısı ihtiyaçlarının karşılanması ile lisans ve teknoloji transferi anlaşmalarında etkin rol oynamamaktadır. Nükleer enerji teknolojileri ile nükleer mühendislik gibi kritik alanlarda yetenekli kişilerin lisans ve lisansüstü eğitim almasını teşvik edecek burs ve destek programları devreye alınmalıdır.

Türkiye'de hidrojenin lisanslanması, üretimi, iletimi ve dağıtımını düzenleyen yasal bir çerçeve henüz oluşturulmamıştır. Mevcut durumda sadece enerji verimliliği ile ilgili alternatif bir yakıt olarak tanımlanmış ve ulaştırma ile ilgili birkaç yönetmelikte bahsi geçmiştir. Bunun yanında hidrojen güvenliği başta olmak üzere ilgili teknolojik alanlarda ve standardizasyon konularında mevzuat altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu, 5307 sayılı LPG Piyasası Kanunu ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanundahidrojenle ilgili düzenlemelere yer verilebileceği düşünülmektedir.

2.2.3.2 Kurumsal Yapılanmadan Kaynaklanan Sorunlar

Enerji sektörüne bütüncül olarak hitap edecek ve yerleştirmeyi ön plana çıkaracak politikaların koordinasyonunu sağlamak üzere Cumhurbaşkanlığına bağlı Enerji Endüstrisi

Başkanlığı gibi (Savunma Sanayii Başkanlığı örneğinde olduğu gibi) bir yapının kurulmasıyla mevcut kapasitenin azami ölçüde kullanımının sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Yenilenebilir teknolojiler konusunda gerekli planlamayı yapacak, yetki sahibi ve muhatap olarak başvurulabilecek yapılara ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir. Bu yapının varlığı sayesinde, ekosistem paydaşlarının organizasyonu yapılandırılabilir ve sektörün birbirleri ile iletişimi sağlanabilecektir. Örneğin Almanya’da, federal hükümet tarafından bu amaçlarla oluşturulan Ulusal Hidrojen Konseyi bulunmaktadır. Konsey, araştırma ve bilim kurumlarının yanı sıra şirketlerden vb. oluşan bağımsız bir danışma organıdır.

2.2.3.3 İnsan Kaynaklarından Kaynaklanan Sorunlar

Enerji sektöründe, farklı enerji teknolojileri ile verimli, güvenli ve sürdürülebilir enerji üretimini, depolanmasını ve dağıtımını sağlamak için farklı disiplinlerde birikim ve becerilere sahip kalifiye çalışan eksikliği bulunmaktadır.

2.2.3.4 Altyapıdan Kaynaklanan Sorunlar

Her bir enerji teknolojisi kapsamında özel ekipmanlara ve altyapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin yeşil hidrojen üretimi; elektrolizörler, yenilenebilir enerji sistemleri, depolama tankları, boru hatları ve kompresörler dâhil olmak üzere özel ekipmanlar gerektirmektedir. Uygun şekilde tasarlanmış ve bakımı yapılmış ekipman ve altyapılar, güvenilir bir hidrojen ekosisteminin oluşturulması için önem arz etmektedir.

Nükleer teknoloji altyapısı geliştirme faaliyetlerinin desteklenebilmesi için nükleer malzeme testleri, radyoizotop üretimi, bilimsel ve deneysel çalışmalar gibi çok amaçlı kullanıma uygun bir araştırma reaktörünün olması gerekmektedir.

Altyapının neredeyse tamamının yurt dışına bağımlılık içermesi sebebiyle sektördeki üretici adaylarının ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olmakta, bu da özellikle yeni teknolojilerin geliştirilmesine ve üretimine ilgi duyan sanayici ve girişimcilerin önünde bir engel oluşturmaktadır.

2.2.4 Uluslararası Mukayeseli Olarak Türkiye İçin Temel Göstergeler ve Uluslararası Konum

Ülkemiz orta vadede üç farklı sahada 12 nükleer reaktöre sahip olacak şekilde toplamda 15 GWe kapasiteli nükleer santraller kurmayı planlamaktadır. Bu kapsamda Mersin ilinde

Akkuyu Nükleer Santrali'nde toplam 4.800 MW kurulu güce sahip VVER-1200 tipi dört reaktör kurulacaktır. Yerlileştirme hedefi doğrultusunda ETKB, Akkuyu Nükleer A.Ş. ve ana yüklenici Titan2-IC İçtaş İnşaat A.Ş. tarafından 17 Kasım 2020 tarihinde 5,9 milyar ABD doları yerli tedarik miktarı öngören “Yerlileştirme Planı ve Yol Haritası” imzalanmış, bu hedef Mayıs 2021’de 6,5 milyar ABD doları olarak revize edilmiştir. 2023 yılı ilk çeyreği itibarıyla proje kapsamında 9,1 milyar ABD doları harcanmış olup yaklaşık yüzde 47, yani 4,3 milyar ABD doları tutarında (Türkiye menşeli şirketlerden ekipman, malzeme ve hizmet alımı, vergi, lisans, harç, Türk personele ödenen maaşlar) yerli katkıya ulaşılmıştır.

Dünyanın gündeminde yer alan SMR teknolojileri de ülkemizce yakından takip edilmektedir. Bu bağlamda, Türkiye Nükleer Enerji A.Ş. tarafından çeşitli SMR tasarımlarının ülkemizde konuşlandırılmasına yönelik uygunluk analiz çalışmaları yapılırken, NDK tarafından SMR’lerin lisanslanmasına yönelik olarak IAEA tarafından yapılan çalışmalar takip edilmektedir. TENMAK NÜKEN, SMR ile ilgili olarak uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından gerçekleştirilen tasarım ve analiz çalışmalarını takip etmektedir.

Türkiye’de özellikle pil hücresi üretimi alanında Aspilsan Enerji bir ilk olarak üretime başlamıştır. 2020 yılında inşaat temellerini attığı lityum-iyon batarya fabrikasıyla başlangıçta yılda 21 milyon hücre üretmeyi hedeflemektedir. Önümüzdeki süreçte ise Kontrolmatik firmasının prizmatik pil hücresi üretimine başlaması planlanmaktadır.

2053 yılına yönelik net sıfır emisyon hedefi açıklamış olan ülkemizin karbonsuz ekonomi vizyonu bağlamında, AB ile hidrojen alanında yakın işbirliği temin etmesinin ve bu kapsamda Akdeniz Yeşil Hidrojen Ortaklığı ve benzeri girişimlere dâhil olmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Ülkemizin hidrojen teknolojileri alanında atılım yapabilmesi için yapılacak planlama hazırlanırken Avrupa’da bu alanda başarı sağlamış olan modellerin ve açıklanan yol haritalarının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda özellikle destek mekanizmalarının ve özel sektörün üstlendiği rolün analiz edilmesi önemlidir. Bununla beraber yeni enerji teknolojilerinin geliştirilmesi anlamında uluslararası işbirliklerinin sayısının artırılması ve ilişkilerin güçlendirilmesi ülkemiz açısından yararlı olacaktır.

2.3 İlişkili Temel Alanlardaki Gelişmelerin Rapor Konusu Alana Yansıması

İklim Şurası kapsamında, TÜBİTAK koordinasyonundaki Bilim ve Teknoloji Komisyonu’nda, ülkemizin 2053 net sıfır emisyon hedefi ve yeşil kalkınma politikası doğrultusunda, “İklim Değişikliği, Çevre ve Biyoçeşitlilik”, “Temiz ve Döngüsel Ekonomi”,

“Temiz Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı”, “Yeşil ve Sürdürülebilir Tarım”, “Sürdürülebilir Akıllı Ulaşım” olmak üzere beş ana temada Ar-Ge ve yenilik temelli çözümler üretmek için çalışmalar yürütülmüş, bahsi geçen beş temada 33 öncelikli Ar-Ge ve yenilik konusu belirlenmiştir.

AYM ve İklim Değişikliğine Uyuma Yönelik Ar-Ge ve yenilik konuları temel alınarak, Temiz, Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı Teknolojilerinin geliştirilmesi kapsamında, “PV Hücre Panel ve Sistemlerinin Geliştirilmesi”, “Yüksek Verimli CSP Sistemlerinin Geliştirilmesi”, “Karaüstü, Denizüstü ve Uçan (Airborne) Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinin Geliştirilmesi”, “Yenilikçi Jeotermal Sistemler ve Teknolojilerin Geliştirilmesi”, “Hidrojenin Enerji Taşıyıcısı, Yakıt ve Değerli Kimyasalların Eldesinde Hammadde Olarak Kullanılmasına Yönelik Öncü Teknolojilerin Geliştirilmesi”, “Yeni Nesil Küçük Modüler Reaktör Sistemlerinin Geliştirilmesi”, “Yenilenebilir Enerji Destekli Entegre Biyorafinerilerin Geliştirilmesi” ve “Sistemler Arası Etkileşimleri Dikkate Alan Otonom Enerji Yönetim Sistemlerinin Geliştirilmesi” olmak üzere sekiz ana konu tanımlanmıştır.

TENMAK Ar-Ge destekleri kapsamında “Hidrojen Teknolojileri ve Yakıt Hücresi Çağrısı” ile “Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama Teknolojileri Çağrısı” açılmıştır. İlgili konular kapsamında yapılacak projelerin Teknoloji Hazırlık Seviyesinin (THS) en az dört olması ve THS’nin sekiz seviyesine çıkarılıp gerçek ortamda kullanılabilecek teknolojik bir ürüne dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Hidrojen Teknolojileri ve Yakıt Hücresi Çağrısı kapsamında üç ana konu öncelikli olarak hedeflenmiş olup bunlar; temiz hidrojen üretim teknolojileri (günlük en az 100 kg üretim kapasitesinde olması); depolama ve sıvılaştırma teknolojileri (günlük en az 100 kg depolama kapasitesinde olan yüksek basınçlı depolama tankları, yeni nesil malzeme ile üretilen tanklar, sodyum bor hidrür depolama, metal hidrür esaslı adsorbanlı depolama, yeni nesil kimyasal depolama sistemleri); yakıt hücresi teknolojileridir (uygulama alanına göre en az 10 kW güç çıkış kapasitesine sahip olup modüler bir paket olması).

“Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama Teknolojileri Çağrısı” kapsamında üç ana konu öncelikli olarak hedeflenmiş olup bunlar; karbon yakalama teknolojileri (yüzde 95 üzerinde verimli ve günlük en az 1 ton tutabilecek kapasitesini sağlayabilir olması); karbon kullanım ve faydalı ürüne dönüştürme teknolojileri (karbonun yüksek verim, düşük maliyetle ve modüler olarak yakıtlar, kimyasallar ve karbonatlı mineraller gibi faydalı ürünlere

dönüştürülmesi); karbon depolama teknolojileridir (günlük en az bir ton depolama kapasitesi ile yüksek verim ve düşük maliyete sahip modüler depolama seçeneklerinden rezervuarlara kadar geniş kapsamlı depolama seçenekleri).

TENMAK NÜKEN’de çok amaçlı kullanıma uygun yerli araştırma reaktörü tasarım programı kapsamında 20 MW termal gücünde yüksek nötron akılı yerli araştırma reaktörünün kalp tasarımına yönelik nötronik ve ısı-hidrolik analizler üzerine bir proje gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, ülkemizde kurulacak olan nükleer güç santrallerinin lisanslanması sürecinde ihtiyaç duyulan teknik desteği verebilecek bilgi ve yeterliliğe ulaşmak için çalışmalar yürütülmekte, ileri nükleer reaktörler kapsamındaki yeni nesil (IV. nesil) nükleer reaktörler ile ilgili olarak proje ve faaliyet çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Ayrıca yeni nesil reaktör tasarımları arasında olan Ergimiş Tuz Reaktörü (ETR - Molten Salt Reactor) için fizibilite çalışmaları yapılmaktadır. TÜBİTAK MAM ile ortaklaşa yürütülen bu projede, 300 MW termal enerjiye sahip ileri reaktör tasarımı ve prototip üretimi için gerekli kavramsal tasarım, finansal ve teknolojik fizibilite çalışmaları hedeflenmektedir.

2.4 Türkiye’deki Dinamikler ve Dünyadaki Eğilimlerin Muhtemel Yansımaları

AB Konseyi ve Avrupa Parlamentosu’nun Enerji Depolama Paketi’nde yapmış olduğu tanımlamaya göre enerji depolama; elektrik enerjisinin tekrar elektrik enerjisine dönüştürülecek şekilde depolanması (batarya, vb.) ve elektrik enerjisinin başka bir enerji taşıyıcısına dönüştürülmesi şeklinde depolanması (elektroliz ile hidrojen üretilmesi gibi) olarak ikiye ayrılmıştır (The Clean Energy Package, 2019).

Elektrik enerjisinin tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere depolanmasını sağlayan batarya depolama teknolojilerinin kurşun-asit, nikel-kadmiyum, sodyum sülfür, sodyum nikel klorit ve lityum iyon bataryalar gibi farklı alternatifleri bulunmaktadır. Günümüzde özellikle lityum iyon bataryalar ön plana çıkmaktadır. Lityum-iyon bataryaların maliyetleri henüz istenilen seviyelere düşmemiş olsa da gelişen teknoloji ile maliyetler azalmaya devam etmektedir. Arz güvenliği açısından tek tip depolama yerine farklı depolama tekniklerine yönelim önem arz etmektedir. Farklı depolama yöntemlerinden olan PHES’ler genel olarak ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliğine rağmen enerji depolama sisteminin ömrünün uzun olması ve diğer batarya depolama tekniklerindeki gibi kritik minerallere ihtiyaç duyulmaması gibi nedenlerle sistemin yerli ve milli olarak daha güvenilir olmasını sağlamaktadır.

Batarya depolama teknolojilerinin üretilmesinde kritik mineraller oldukça önemlidir. Bu minerallerin büyük çoğunluğunun farklı ülkelerde bulunması nedeniyle ülkemizde arzı fazla olan minerallere yönelik geri kazanım vb. odaklı Ar-Ge çalışmalarının artırılması ve bu mineraller kullanılarak etkin batarya depolama teknolojilerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca ülkemizde PHES'lerin uygulanabilir olup olmadığına yönelik gerekli fizibilite çalışmaları yapılmasının ve kurulumuna ilişkin çalışmaların başlatılmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinin en önemli bileşeni pil hücresidir. Özellikle batarya paketlemelerinde kullanılan pil hücreleri genel olarak uzak doğudan ithal edilmektedir. Bu durumda yerli üreticiler fiyat konusunda rekabet edememektedir. Yurtdışından gelen pil hücresi ve bataryaların kalitesine bakılmaksızın ithal edilebilmesinin Türkiye'de yerli üreticilere zarar vereceği öngörülmektedir. Bu çerçevede ülkemizdeki batarya üretim tesisi yatırımları dikkate alındığında bu tesislerin hücre üretiminde ihtiyaç duyacağı lityum, nikel, mangan, kobalt, grafit gibi madenlerin mümkün olduğunca yerli temini olası üretim kesintilerine karşı büyük öneme sahiptir.

Depolama teknolojilerinin ömrünü tamamlaması sonrası imhası veya geri kullanımı önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda atık yönetiminin de üzerinde durularak bu teknolojilerin tekrar kullanımı veya çevreye zarar vermeden imhası üzerinde çalışmaların da yapılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Enerji depolamada bir diğer önemli konu depolamaya yönelik hedeflerin konulmasıdır. Hedef belirleme; piyasa oyuncularına, yatırımcılara, kamu kuruluşlarına ve hatta politika yapıcılara uzun vadeli yol gösterici olacaktır. Böylece sektöre yönelik yatırımlar daha fazla olacak ve sektördeki gelişmeler ivme kazanacaktır. Söz konusu hedefler 2053 net sıfır emisyon hedefleri göz önünde bulundurularak hazırlanmalı ve sürdürülebilir, gerçekçi ve agresif hedefler olarak sektörde yapısal değişiklikleri sağlayabilmelidir. Yapısal değişikliklerin sağlanabilmesi ve batarya teknolojilerinin gelişerek yaygınlaşabilmesi için mevzuat çalışmalarının da hız kazanması gerekmektedir. Bununla birlikte batarya teknolojilerine yönelik yapılan çalışmalara destek/teşvik verilmesi sektörün ülkemizde de gelişmesini hızlandıracaktır. Bahsi geçen destekler ile ayrıca bu sektörde yetişen kalifiye personelin beyin göçüyle başka ülkelere gitmesinin önlenebileceği değerlendirilmektedir.

Karbon salımının azaltılabilmesi ve yerli üretimin artırılması amacıyla dünyada olduğu gibi ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçleri ve bu kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi miktarı artmaktadır. Bununla birlikte elektrikli araçların günlük hayata daha fazla girmesi ve sayılarının ülkemizde yüzbinleri aşması durumunda elektrik enerjisine olan ihtiyaç daha da artacak ve ayrıca farklı zamanlarda sisteme yük binmesine neden olacaktır.

Şebeke esnekliğinin artırılabilmesi amacıyla batarya depolama, PHES, talep tarafı katılımı, akıllı şehirler ve şebekeler gibi araçların değerlendirilmesi önemlidir. Ayrıca talep tarafının yönetilebilmesi amacıyla enerji tüketiminin az olduğu zamanlarda elektrikli araç şarjını teşvik edecek fiyat bazlı düzenlemelerin yapılabileceği veya şarj istasyonlarının, tüketimin yoğun olduğu yerlere kurulmasıyla yerimli enerji üretimi sağlayacak kaynak kurulumların yapılabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte tüketimin yoğun olmadığı zaman dilimlerinde elektrik üretiminin sürmesi ve bu üretimin israf olmaması açısından depolama teknolojileri oldukça önemli görülmektedir. Dolayısıyla elektrikli araç sayılarının artmasının enerji depolamaya olan ihtiyacı daha da artıracak aşîkârdır. Batarya teknolojileri geliştirilerek elektrikli araçlara hızlı şarj olma, daha uzun menzile sahip olma ve daha güvenilir olma imkânı tanınabilir. Bu gelişme alanlarına yönelik olarak ülkemizde Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarının hız kazanması, mevzuat ve şebeke altyapısının desteklenmesi gerekmektedir.

Bir diğer depolama türü olan enerjinin enerji taşıyıcısına dönüşmesi kapsamında da günümüzde bilinirliği artan teknoloji hidrojen teknolojisidir. Elektrolizör ile hidrojen üretimi ve sonrasında üretilen hidrojenin araçlarda, ısınmada veya sanayide yakıt olarak kullanılması konuları ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda hidrojen teknolojilerine yönelik çalışmaların da hızlandırılması, AB'nin yeşil hidrojen ihtiyacını karşılamada Türkiye'nin önemli bir alternatif olmasına yönelik stratejik kararlar alınması ve mevzuat altyapısının oluşturulmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir. Ancak ileride yaşanabilecek su kıtlığı gibi sorunlar da dikkate alındığında suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi konusunun dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Yakın vadeli hedefler arasında mevcut doğal gaz hatlarına hidrojen eklenmesi ilk etapta öne çıkmaktadır. Bu konuda bilimsel ve teknolojik araştırmaların sayısında dünya genelinde bir artış da görülmektedir. Bu doğrultuda, pilot uygulamaların sayısı artmakta ve kapsamı genişlemektedir. AB'nin 2050 net sıfır karbon hedefi uyarınca Birlik ülkelerindeki hidrokarbon kullanımının ortadan kaldırılması ve önemli ölçüde hidrojenle ikame edilmesi planlanmaktadır.

Ülkemizde de geçiş dönemi için hidrojen ve doğal gazın belirli oranlarda karıştırılması düşünülebilir, ancak bunun gerçekleştirilebilmesi için hidrojen maliyetlerinin de şu anki seviyesinin en azından yüzde 30'una inmesi gerekmektedir. Yapılan analiz çalışmalarına binaen mevcut doğal gaz hatlarında değişiklik yapmadan yüzde 5-15 oranda hidrojen karıştırmanın fizikî olarak mümkün olabileceği anlaşılmaktadır.

Güneş ve rüzgâr gibi süresiz enerji kaynaklarından üretilen fazla elektriğin elektrolizör aracılığıyla hidrojene çevrilmesi, elde edilen hidrojenden sentetik yakıtların (amonyak, sentetik metan, metanol, sentetik kerosen vb.) üretilmesi de ülkelerin öncelik verdiği konular arasındadır. Bu bağlamda metanasyon reaktörlerinde, hidrojen ve endüstriyel çıkış gazlarından yakalanan veya biyokütleden elde edilen biyogazdan ayrıştırılan CO₂'nin birleştirilmesiyle sentetik metan üretilip mevcut doğal gaz hatlarına beslenmesi sağlanabilmektedir.

Almanya gibi bazı ülkeler kısa vade için mavi hidrojen seçeneğini de değerlendirmektedir. Fakat mavi hidrojenin kısa süreli kullanımı, yalnızca CCUS ve kalan emisyon için sınır değerleriyle birlikte dikkate alınmaktadır. Karbon yakalama maliyetlerinin aşağıya çekilmesiyle birlikte, yeşil hidrojene geçiş aşamasında mavi hidrojenin belirli bir süre boyunca kullanılacağı tahmin edilmektedir.

2035 yılından sonra dünya genelinde kömürden ve yeşil hidrojenden amonyak üretiminin de artması beklenmektedir. Dünya genelinde 2050 yılında hidrojen üretiminin yıllık 500-600 milyon ton civarına ulaşması ve toplam enerji ticaretinin üçte birinin yeşil hidrojen üzerinden gerçekleşmesi öngörülmektedir. Dekarbonizasyon çabaları ve uzun vadeli kullanım bağlamında, yalnızca yeşil hidrojen sürdürülebilir ve uygulanabilir olarak kabul edilmektedir.

Yeşil hidrojenin enerji ticareti için yeni fırsatlar yaratacağı düşünülmektedir. Gelecekte hidrojenin yaklaşık yüzde 25'inin küresel ticarete konu olabileceği öngörülmektedir. Bunun yarısının deniz yoluyla taşınan amonyak şeklinde diğer yarısının ise Avrupa ve Latin Amerika'da yoğunlaşacak hidrojen boru hatları aracılığıyla olacağı tahmin edilmektedir. Hidrojenden elde edilen ve ticareti yapılan ürünlerin yaklaşık yüzde 70'i, taşımanın ardından yeniden hidrojene dönüştürülmek yerine hammadde ve yakıt olarak kullanılabilecektir. Nakliye mesafesi ve alıcının talebi dikkate alınarak yeşil hidrojenin en uygun şekilde taşınmasının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yakıt hücresi alanında maliyetlerin düşürülmesi dünya genelinde en öncelikli konular arasında yer almaktadır. Yakıt hücrelerinde katalizör olarak kullanılan platin (Pt) katalizör yükünün düşürülmesi veya platinsiz katalizör kullanımı, yenilikçi ve daha düşük maliyetli membran ve iyonomer kullanımı, yenilikçi üretim metotları ve optimize sistem tasarımı ile yan elemanlar kullanımı konuları önemini artırmaktadır. DOE tarafından doğrudan hidrojenle çalışan 80 kWe entegre ulaşım yakıt pili güç sistemlerinde, nihai hedef 850 Watt/litre, 650 Watt/kg, yüzde 70 verim, 8.000 saat dayanıklılık ve 30\$/kWnet olarak belirlenmiştir.

AB’de SKDM ile karbon kaçağı ile mücadele, yeşil dönüşüm (geçiş) eylemleri ile ekonomiyi karbondan arındırma çalışmalarına başlanmıştır. CCUS teknolojileri ile yakalanan CO₂, karbon piyasasında ekonomik değere, karbon nötr ürünlerde ham maddeye, emisyon ticaret sistemlerinde denkleştirmeye söz konusu olabilmekte, Ulusal Sera Gazı bildiriminde yutak kategorisinde yer alabilmektedir. Ayrıca, SKDM’nin etkilerinin hafifletilmesinde rol oynayacaktır. Bu sebeple hem küresel hem de ulusal politika adımlarının CCUS faaliyetlerinde belirleyici olacağı düşünülmektedir.

Ülkemizde yıllık 400-500 bin ton hidrojen üretimi gerçekleştirildiği tahmin edilmektedir. Bu miktarın büyük kısmı fosil kaynaklı buhar metan reformasyonu yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Bunun yanında hidrojen büyük oranda üretildiği tesis içerisinde tüketildiğinden üretim ve tüketim miktarlarına ilişkin verilerin elde edilmesinde zorluklar yaşanmaktadır.

Talep açısından bakıldığında hidrojen, petrokimya sektörünün (petrol rafinasyonu dâhil) ve çoğunlukla gübre üretiminde kullanılan amonyak üretiminin ana bileşenlerinden biridir. Mevcut hidrojen kullanımı da dikkate alındığında petrokimya sektörünün, proseslerinde hammadde olarak doğal gaz yerine yeşil hidrojeni kullanacak ilk sektör olabileceği düşünülmektedir. Rafinerilerin ve petrokimya tesislerinin 2025 yılından sonra daha fazla yeşil hidrojen üreteceği varsayılmaktadır. 2050 yılına kadar rafineriler de dâhil petrokimya sektöründe hidrojen talebinin, hidrojenin doğal gaza yüzde 10 ikamesi durumunda 0,06 Mt/yıl, yüzde 5 ikamesi durumunda ise 0,03 Mt/yıl olacağı tahmin edilmektedir.

Türk çimento sektörü, yaklaşık 150 milyon ton/yıl çimento üretim kapasitesine sahip olup Avrupa’ya önemli bir ihracatçı olarak kabul edilmektedir. Çimento üretimine yeşil hidrojenin katılması, Türkiye çimento endüstrisinin uzun vadeli rekabet gücü için önemli bir konudur. Çimento endüstrisinin bölgesel olarak dağılmış yapısı, bölgesel yeşil hidrojen

üretimini desteklemektedir. Yeşil hidrojenin, çimento sektöründeki üretim süreçlerinde kömür kullanımının yerini alacağı kabul edilmektedir. 2050 yılına kadar çimento sektörü hidrojen talebinin, hidrojenin doğal gazı yüzde 10 ikamesi durumunda 0,18 Mt/yıl olacağı, yüzde 5 ikamesi durumunda ise 0,09 Mt/yıl olacağı tahmin edilmektedir.

Hidrojen gıda sektöründe özellikle yağ sanayisinde çeşitli alanlarda proses maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerin hidrojen ihtiyacını yeşil hidrojen üretimi ile karşılaması desteklenmelidir. Yeşil hidrojenin ağır sanayide fosil yakıtların yerine kullanılması, Türkiye’de ihracat yapan ağır sanayinin uzun vadeli rekabet gücü ve iklim hedeflerine ulaşılması bağlamında değerlendirilmelidir.

Ayrıca önemli jeotermal ısı potansiyelimizin olduğu ülkemizde, konvansiyonel olmayan jeotermal kaynak arama çalışmalarına yönelik (Kızgın kuru kaya, EGS vb.) Ar-Ge çalışmalarına başlanması ve bu konuda gerek insan kaynağı gerekse de teknoloji aktarımı ve geliştirilmesi konusunda gerekli adımların orta-uzun vadede mutlaka atılması gerektiği değerlendirilmektedir.

CCUS teknolojileri, AYM’nin, Avrupa İklim Kanununun ve benzer tekliflerin kabulü ile 2030 hedefleri içerisinde önemli bir konum edinmiştir. Yüksek karbon emisyonuna sahip demir çelik ve çimento fabrikaları gibi tesislerin emisyonlarının düşürülmesi noktasında CCUS teknolojilerinin önem kazanacağı tahmin edilmektedir.

Paris İklim Anlaşmasının getirdiği yükümlülükler, küresel ısınma ile mücadele, elektrikli araçların yaygınlaşması, artan kuraklık tehdidi nedeni ile desalinasyon ihtiyacının artacağının öngörülmesi gibi faktörlerin nükleer gibi temiz baz yük kaynaklarına ihtiyacı dramatik biçimde artıracığı tahmin edilmekte olup arz güvenliğinin bir milli güvenlik meselesi olduğu göz önünde bulundurularak nükleer enerjide öz yeterlilik kazanmanın Türkiye için önemli bir seçenek olduğu düşünülmektedir. Bu noktada, nükleer santral projelerinde kamunun sahipliği, alım garantisi vermesi ve transfer edilen teknolojiyi firmalara aktarması; yerli firmaların sektöre girişi için en önemli teşviklerden biri olacağı değerlendirilmektedir. Nükleer sektörde “talebin marka farkındalığı” çok yüksek olduğu için; yerli tedarik zincirinin kendi ülkemizde tecrübe kazanmadan uluslararası pazara giriş yapması hemen hemen imkânsızdır. Bu nedenle, başlangıçta ülkemizde ekipman alım garantili projeler ile yerli firmaların nükleer güvenlik sınıfındaki ürünlerde tecrübe kazanması gerekmektedir. Bunun tek yolunun kamu sahipliğinde ya da kamunun çoğunluk hissesine sahip olduğu nükleer santral projelerinin

yürütülmesiyle mümkün olacağı değerlendirilmektedir. Kamunun sahipliği için; “Korea Electric Power Company (KEPCO)” ve “Électricité de France (EDF) benzeri, kamunun çoğunluk hissesine sahip olduğu, santral işletmecileri teşkil edilmelidir. Ancak; yabancı ülkelerdeki EDF, KEPCO gibi örneklerle bakıldığında, bahse konu şirketlerin sadece NGS’lerden elektrik üretimi faaliyeti ile sınırlı kalmadığı, elektrik endüstrisinin tüm alanlarında faaliyet göstererek ayakta kaldıkları görülmektedir. Elektrik üretim santrallerine yönelik olarak Türk firmalarının gerçekleştireceği yatırımlarda; ülkemizde üretimi mümkün olmayan ekipmanların yerleştirilmesi için gerekli olan altyapının kurulmasında (özel imalat tezgâhları ve test platformlarının tedarik edilmesi, sistem ve ürün sertifikasyonu, vs.), özel sektöre devlet tarafından uzun vadeli kredi ve hibe desteği gibi teşvik edici mekanizmalar sunulabilir.

3. PLAN DÖNEMİ PERSPEKTİFİ

3.1 Uzun Vadeli Hedefler (2053 vizyonunu içerecek şekilde)

2053 net sıfır emisyon hedefi, ulusal ve uluslararası yükümlölükler ve dünyadaki değişken jeopolitik/stratejik koşullar çerçevesinde belirlenen hedefler;

- Yenilenebilir enerji alanına yönelik yerli teknolojilerin geliştirilmesinin çeşitli teşvikler ile desteklenerek yeni yatırımlarda yerli teknolojilerin ve yerli aksam kullanımının artırılması önemlidir. Stratejik güneş hücresi bileşenlerinde (MgSi, PolySi, Ingot, Wafer, Hücre), batarya hücrelerinde ve rüzgâr türbinlerinin stratejik bileşenlerinde (rotor hub, şanzıman) yerlilik şartı olmaksızın kapasite tahsisleri yapılmaması,
- Batarya hücresi üretiminde yerli üretim kapasitesinin artırılmasını teminen kapasite tahsislerinde yerlilik şartı aranmalıdır. Ancak yerlilik şartı bir oran olarak değil bileşen bazında belirlenmelidir. Kapasite tahsisleri yapılırken özellikle stratejik güneş ve rüzgâr enerjisi bileşenlerinde de yerlilik şartı getirilmelidir. Bileşenlerin yerli olması durumunda ise yatırım tutarının belirli bir oranına kadar devredilebilir vergi teşviği uygulanması,
- Yüksek verime ve yaşam ömrüne sahip, hafif, esnek ve maliyet-etkin; bina, araç, tarım ve su yüzeyi gibi uygulamalara sinerjik ve ergonomik olarak entegre edilebilecek PV hücre, panel ve sistemlerin geliştirilmesi,
- Yüksek verimli CSP sistemleri ve bileşenlerin diğer enerji teknolojileri (PV, biyokütle ve jeotermal, ısı pompası, kojenerasyon, trijenerasyon, vb.) ile entegre edilmesi,
- Güneş yakıtlarının (hidrojen, amonyak, metanol, etanol vb.) geliştirilmesi,
- Karaüstü, denizüstü ve uçan (airborne) rüzgâr enerjisi sistemleri ile hibrit yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi,
- Jeotermal enerji alanında derin sondaj ve yönlü sondaj teknolojileri ile yüksek verimli sistemler ve sıcak kuru kaya teknolojileri gibi yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi,
- Hidroelektrik teknolojileri kapsamında su türbini çark kanadı tasarımlarının yapılması, değişken devre uygun güç elektroniği sistemlerinin geliştirilmesi, koruma ve kontrol sisteminin uyumlandırılması,

- Nükleer araştırma ve güç reaktörü tasarımı, kurulumu, işletimi, bakımı ile nükleer atık depolama ve bertaraf tesislerinin kurulumu ve işletilmesine yönelik milli yetkinliğin geliştirilmesi,
- Yeni nesil SMR teknolojilerinin geliştirilmesi, SMR'lerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu, elektriğin yanında diğer faydalı çıktıları (ısı, temiz su, hidrojen, alternatif yakıtlar vb.) üretebilecek entegre sistem teknolojilerinin ve nükleer atık yönetim teknolojilerinin geliştirilmesi,
- Nükleer yakıt ve malzeme teknolojisi, nükleer zarf malzemesi geliştirilmesi, bor 10 izotop zenginleştirme, nano oksit katkılı nikel/demir temelli alaşımların proton ve nötron radyasyonu hasarlarının araştırılması ve korozyon çalışmaları gibi konuların dikkatle izlenmesi; projelendirilerek desteklenmesi ve devamında her bir başlığın endüstriyel tasarım aşamalarına taşınması,
- Hidrojenin; enerji taşıyıcısı, yakıt ve değerli kimyasalların eldesinde hammadde olarak kullanılmasına yönelik değer zincirinin her aşamasında teknolojilerin (hidrojen üretim, depolama ve taşıma teknolojileri, yakıt pili teknolojileri, vb.) geliştirilmesi,
- Atık ve besin zincirinde yer almayan kaynaklardan elde edilecek lignoselülozik hammadde kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla, yenilikçi teknolojiler (termokimyasal, biyokimyasal vb.) kullanılarak sürdürülebilir hidrojen, sentetik yakıtlar (sentetik metan, biyoetanol, sentetik dizel, sürdürülebilir havacılık yakıtı, vb.) ve katma değeri yüksek ve geniş pazara sahip kimyasalların (amonyak, metanol, vb.) üretilmesi,
- Biyoyakıt eldesi süreçlerinde açığa çıkan katma değeri yüksek yan ürünlerin (organik gübre, biyokömür, kül, gliserin, selüloz elyaf, biyoplastik, furfural, karbonlu malzemeler vb.) değerlendirilmesi ve biyorafineri modelleri ile teşvik edilmesi,
- Sanayi sektörlerinde düşük karbonlu üretime ulaşmak için karbon tutma teknolojileri kapsamında yenilikçi teknolojiler (absorpsiyon, adsorbsiyon, membranla ayırma, oksiyenleme, kimyasal döngü, doğrudan atmosferden yakalama vb.) ile birlikte yenilenebilir enerji ve yeşil hidrojene dayalı yakma teknolojileri, mikrodalga, infrared, plazma, vb. teknolojilerin geliştirilmesi,
- Sanayi sektörlerinde tutulan CO₂'yi yararlı ürünlere (sentetik metan, metanol, dimetil eter, olefin, vb.) dönüştürmek için yenilikçi ve maliyet etkin kimyasal, elektrokimyasal ve biyokimyasal katalizör ve reaktör teknolojilerinin geliştirilmesi,

- Özellikle sülfür ve kül içeriği çok yüksek olan yerli kaynağımız linyitin, temiz kömür teknolojileriyle (gazlaştırma, oksijenleme, kimyasal döngülü yakma vb.) değerlendirilmesi, katma değerli ürünlere dönüştürülmesi. Süperkritik akışkanlı buhar ve gaz türbinleri kullanımı, yeni nesil baca gazı temizleme teknolojilerinin geliştirilmesi,
- Enerji sistemlerinde; değer zincirindeki tüm faaliyetlerin (arz, talep, üretim, dönüşüm, iletim, dağıtım ve depolama) verimli ve maliyet etkin şekilde çalışmasını amaçlayan, dijital teknolojilere dayanan, ölçeklenebilen, sistemler arası etkileşimleri dikkate alarak enerji verimliliği sağlayan otonom enerji yönetim ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesi,
- Enerji yoğunluğu yüksek batarya hücre teknolojileri (Katı Hal, Li-Metal, Li-Sülfür, Li-Hava, Lityum sonrası bataryalar, vb.), yüksek verimli batarya üretim süreçleri ve verimli batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesi,
- Batarya katot ve anot malzemeleri açısından zengin rezervlere sahip olmayan ülkemizde ilerleyen dönemlerde artan elektrikli araç sayıları da dikkate alındığında yaşanabilecek lityum, nikel, kobalt vb. kritik mineraller için şimdiden önlem alınması, ilgili kritik madenlere sahip ülkeler (Lityum-Şili ve Avustralya, Kobalt-Demokratik Kongo Cumhuriyeti, Nikel-Filipinler, Manganez-Güney Afrika, Alüminyum-Gine ve Çin, Bakır-Şili, vb.) ile ikili tedarik anlaşmaları yapılması,
- Yeni nesil akıllı, entegre ve yüksek hızlı şarj teknolojileri (dinamik şarj, entegre şarj altyapısı vb.) geliştirilmesidir.

3.2 On İkinci Kalkınma Planı (2028 Yılı) Hedefleri

Hedeflerin; izlenebilir, raporlanabilir olmasının ve izleme yapılırken kullanılacak veriye ilişkin kaynağın net olarak belirlenmesinin On İkinci Kalkınma Planının doğru bir şekilde izlenmesi bakımından oldukça önemli olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca belirlenen hedefin bir performans göstergesi olduğu dikkate alınarak hedeflerin buna uygun şekilde seçilmesinin önemli olacağı düşünülmektedir. Bu çerçevede;

- İlk aşamada yenilenebilir enerji teknolojileri, nükleer ve yerli temiz kömür teknolojilerinin geliştirilmesi ile ilgili ülkemiz özelinde yol haritaları düzenlenmelidir. Yol haritalarını takiben teknoloji geliştirme programları oluşturularak tüm faaliyetler ve destekler ülkemizin stratejik önceliklerine ve hedeflerine odaklanılmalıdır.

- SMR teknolojilerine yönelik çalışmaların yapılması, bu reaktörlerin ısı ve elektrik enerjisi çıktılarından yararlanarak hidrojen üretimi, metanol ve amonyak gibi yakıtların geliştirilmesi ve bu çıktıların gemi taşımacılığı ve tarım gibi uygulamalarda değerlendirilmesi konularında Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.
- Nükleer santrallerin güvenliğinin geliştirilmesi çalışmaları kapsamında sayısal hesaplama altyapıları, termal/hidrolik-nötronik, yakıt ve malzeme performansı kodları temini ve geliştirilmesi, teorik hesaplamaların ve benzetim çalışmalarının yapılması konularında Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.
- Plan dönemi içerisinde; Akkuyu NGS elektrik üretimine başlayacak, büyük ölçekli ikinci bir NGS projesi için inşaat hazırlık çalışmaları yapılacaktır.
- Radyasyon ölçme, izleme ve uyarı sistemi teknolojilerinin geliştirilmesi ve kurulması, bu kapsamda yerli aktif/pasif radyasyon dedektör teknolojilerine yönelik çalışmaların desteklenmesi (aktif doz ölçer konusunda çalışmalar devam etmektedir) gerekmektedir.
- Nükleer atık yönetim sistemi teknolojilerinin geliştirilmesi konusunda Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.
- Nükleer fisyon yanında nükleer füzyondan da enerji üretmeye yönelik çok uluslu projelere (Örneğin International Thermonuclear Experimental Reactor/ITER) katılım sağlanması değerlendirilmelidir.
- Net sıfır emisyon hedefine ulaşılabilmesi amacıyla mevcut kömür santrallerinde bulunan türbin adası ve yardımcı tesisleri kullanabilecek SMR'lerin ekonomik ömrünü doldurmuş kömür santrallerinin yerine kurulması alternatifinin değerlendirilmeye alınması konusu değerlendirilmelidir.
- Eski kömür yakıtlı termik santrallerin verimlilik artırıcı yenilikçi rehabilitasyonlarının yapılması, kontrol sistemlerinin yenilenmesi ve yanma optimizasyonlarının belli aralıklarla yapılarak verimli ve sürekli çalışması yönünde teşvik edici önlemler alınması gerekmektedir.
- Yerli kömürlerimizin temiz kömür teknolojileri ile değerlendirilmesi ve katma değerli ürünlere dönüştürülmesi konusunda çalışmaların yapılması gerekmektedir.
- Kömür yakıtlı termik santrallerde alternatif yakıtların kullanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilebilmesi için Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmelidir.
- Termik santrallerin baca gazlarının arıtılması kapsamında CCUS kapsamlı Ar-Ge çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

- CCUS konularında izlenecek yol haritasının oluşturulması, bununla birlikte sürdürülebilir karbon döngüsü konusunda fırsat yaratabilecek yenilikçi teknolojilerin (absorpsiyon, adsorpsiyon, membranlı ayırma, oksijenleme, kimyasal döngü, vb.) belirlenmesi çalışmalarına ağırlık verilmesi gerekmektedir.
- Stratejik bileşen olan güneş hücresi üretiminde tam bağımsızlık hedefiyle;
 - Yıllık en az 40.000 ton metalurjik silisyum (MgSi) üretilmelidir.
 - Yıllık en az 30.000 ton PolySi olarak ifade edilen saflaştırılmış silisyum üretilmelidir.
 - Ülkemizin yıllık wafer ve hücre üretimi önümüzdeki 5 yılda yıllık asgari 10 GW düzeyine çıkarılmalıdır (mevcut 0,75 GW).
- CSP termal enerji depolama sistemlerinin güç santralleri, hidrojen teknolojileri ve endüstri (demir-çelik vb.) uygulamalarına adapte edilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin yapılması gerekmektedir.
- CSP sistemlerinde yüksek spektral yansıtma oranına sahip (>yüzde 99) ayna ve kaplama teknolojilerinin ve düşük yoğunluk, yüksek özgül ısı sığası ve viskoziteye sahip ısı transfer ortamlarının geliştirilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin yapılması gerekmektedir.
- CSP sistemlerinin PV ya da rüzgâr enerjisi santralleri ile birlikte uygulandığı hibrit uygulamalarının geliştirilmesi ile gece ve gündüz arasında güç üretiminde oluşan uyumsuzluğun giderilmesi ve şebekedeki dalgalanmaların önlenmesine katkıda bulunularak yenilenebilir enerji kaynaklarından daha etkin bir şekilde yararlanılabilmesi değerlendirilmelidir.
- Isıl güneş sistemlerinin ısıtma, soğutma, iklimlendirme ve sanayi alanlarında yaygın olarak kullanılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin (ısı pompası, vb.) yapılması gerekmektedir.
- 10 MW üstü yüzen türbin sistemlerinde verimi artırma amaçlı ağırlık azaltıcı, stabilite artırıcı, lojistik kolaylaştırıcı, yenilikçi ve modüler tasarımların ve yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi, bakım onarım faaliyetlerine özel tasarlanmış deniz araçlarının geliştirilmesi, bu sistemlerin ekosisteme olası zararının en aza indirgenmesi amacıyla teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Karaüstü veya denizüstü rüzgâr santrallerinde türbin geometrisinin farklı koşullar altındaki davranışının yüksek başarımlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD)

simülasyon ve modelleme araçlarıyla tahmin edilmesi, yapay zeka temelli kontrol sistemlerinin ve yenilikçi sensör teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

- Jeotermal enerjinin, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre bir şekilde kullanımına imkân verecek teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Jeotermal akışkanın deniz suyu arıtımında kullanımına yönelik teknolojilerin ve jeotermal kritik element madenciliğine ilişkin teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi sağlayacak ORC sistemlerin ve gerektiğinde sıcaklık seviyelerini yükseltecek (heat upgrading) teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Jeotermal sondaj kuyularının tasarımlarının ekosisteme ve tarım alanlarına yönelik olumsuz etkilerinin giderilebilmesi, maliyetlerinin düşürülmesi için yeni teknolojilerin (kapalı döngü, milimetrik dalga teknolojisi, plazma teknolojisi, vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.
- Jeotermal kaynaklı sismiklerin ölçülmesine ve izlenmesine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Linyit, biyokütle ve organik atıklardan termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretiminin geliştirilmesi, bu sistemlerin CCUS teknolojileri ile entegre edilmesi gerekmektedir.
- Biyokimyasal, termoliz, fotoelektrokimyasal, fotoelektroliz, fotoelektrokataliz, fotobiyoliz, sonik/ultrasonik yöntemler ile hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Doğal gaz/metan/biyometan pirolizi yoluyla hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Yenilenebilir enerjiden elektroliz yolu ile maliyet etkin yeşil hidrojen üretimi teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretimi kapsamında; deniz suyunun tuzdan arındırılması da dâhil olmak üzere yeni su arıtım teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Hidrojenin kullanımına yönelik olarak mevcut altyapı değişiklikleri ve dönüşüm (taşıma, depolama, dolum istasyonları vb.) teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

- Hidrojen ve hidrojen karışımli yakıtlar için yakma sistemleri teknolojilerinin (yakıcılar, gaz türbini vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.
- Yüksek basınçlı hidrojen depolama sistemleri, bor hidrür bileşikleri, metal hidrürler, zeolit, karbon temelli adsorbanlar (karbon nano tüp vb.), LOHC vb. hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Hidrojenin yeraltında depolanması (tuz, doğal gaz ve petrol sahaları) teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik fizibilite etütlerinin yapılması ve projelendirilmesi yönünde çalışmalara ağırlık verilmesi gerekmektedir.
- Çeşitli proseslerden üretilmiş hidrojenin temizlenmesi, ayrıştırılması, koşullandırılması için teknolojilerin (katalizörler, basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA), membran, membran reaktör teknolojileri vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.
- Yakıt hücresi teknolojilerinin farklı uygulamalarda (ulaşım, evsel, taşınabilir uygulamalar) kullanımına imkân verecek teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Yakıt hücresi/elektrolizör sistemlerinde kullanılan katalizör, membran, bipolar plaka, conta vb. bileşenlerin yerli üretimine yönelik Ar-Ge çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Platin, paladyum, titanyum, iridyum gibi değerli madenlerin yakıt hücrelerinden veya elektrolizörlerden geri kazanımı üzerine teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Enerji yoğun sektörlerde (demir-çelik, çimento, seramik, vb.) CO₂ azaltma ve/veya değerlendirme amacıyla hidrojen veya biyokütle kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Hidrojenin hammadde olarak kullanımıyla, alternatif yakıtların ve kimyasalların üretim teknolojilerinin (yenilenebilir metan, metanol, etanol, dimetil eter (DME), amonyak, kerosen vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.
- Hidrojen enerji sistemlerindeki yardımcı ekipman ve teçhizatların (kompresör, sensör, valf, sızdırmazlık ekipmanları, akış ölçme ve kontrol bileşenleri vb.) yerli olarak geliştirilmesi için uygun altyapı ve finansmanın sağlanması gerekmektedir.
- Hidrojen ekosisteminin tüm elemanlarının (üretim, depolama, dağıtım ve kullanım) yer aldığı hidrojen vadileri kurulmalıdır. Rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi enerji kaynaklarından hidrojen üretimi, farklı metotlarla depolanması (sıkıştırılmış gaz, sıvı, katı hidrojen depolama) ve farklı şekillerde kullanılmasına (ulaşım, kimyasal üretimi vb.) yönelik uygulama projeleri yapılmalıdır.

- Hidrojen üretiminde AB'ye ihracatta önemli bir aktör olunabilmesi için uluslararası girişimlere dâhil olunarak özellikle boru hattı ile taşımacılıkta çoklu anlaşmalar yapılmalıdır.
- Elektrokimyasal, termokimyasal ve fotonik yöntemler ile CO₂'in değerlendirilmesi kapsamında biyoyakıt ve değerli kimyasalların üretimi ve biyorafineri uygulamalarına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamur ile tarım, orman, hayvancılık ve sanayi kaynaklı diğer atıkları biyokimyasal (enzimatik, mikrobiyal çevrimler dâhil), termokimyasal (piroliz, gazlaştırma vb.) ve hidrotermal (hidrotermal sıvılaştırma, karbonizasyon, kritik üstü gazlaştırma vb. katalitik iyileştirme dâhil) teknolojilerle yenilenebilir katı, sıvı, gaz yakıtlara, hidrojene ve tarım uygulamalarında kullanılacak faydalı ürünlere (biyopestisit, toprak düzenleyici vb.) dönüştürebilecek teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Mikroalg ve/veya yenilenebilir biyokaynaklardan çeşitli sektörlerin kullanımı için sıvı yakıt (sürdürülebilir havacılık ve denizcilik yakıtları dâhil) ve değer zinciri yaratacak yan ürünleri (protein, biyoplastik, biyogübre, vb.) üretme amaçlı, sıfır atık, döngüsel ekonomi ve çoklu ürün eldesine yönelik, maliyet-etkin yenilenebilir enerji destekli entegre biyorafineri teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Kritik amaçlı binalardan (kamu, hastane, askeri gibi) başlamak üzere tüm binaların iklim değişikliğine, afet durumlarına ve enerji kesintilerine dirençliliğinin artırılması için sensör ağları ile gerçek zamanlı izleme ve müdahaleyi mümkün kılan otomasyon teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Binaların ve kentlerin, entegre enerji sistemleri ile birlikte dijital ikizlerinin modellenmesi; binalara ve yapıları çevreye dair büyük veri setlerinin oluşturulması gerekmektedir.
- Yapay zekâ teknolojilerinin yanı sıra numerik analizleri de içeren büyük veri analizi yöntemlerinin her bir sistem (elektrik şebekesi, binalar, ulaşım, su şebekesi vb.) ve sistemler arası için geliştirilmesi gerekmektedir.
- SCADA ve gerçek zamanlı izleme sistemleri ile siber güvenlik (blokzincir yapıları, anomali tespiti, siber saldırı, yanlış veri, kaçak kullanım vb.) üzerine yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca farklı SCADA ve izleme sistemlerinin birbirleri ile entegre çalışmasının sağlanması gerekmektedir.

- Sistemlerin sistemi anlayışına uygun (farklı sistemlerin birbirine etkilerini gözeten) karar destek sistemlerinin ve otonom enerji yönetim sistemlerinin ölçeklenebilir olarak tasarlanması gerekmektedir.
- Maliyet-etkin yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin ve sistemlerinin, depolama ünitelerinin, elektrikli araçların, akıllı bina sistemlerinin yönetilmesine yönelik algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir.
- CO₂ emisyonu yoğun sektörlerde (çimento, seramik, demir-çelik, vb.) CO₂ tutma maliyetinin düşürülmesi amacıyla bu sektörlerin proseslerine uygun yenilikçi karbon tutma teknolojilerinin (adsorban, membranlar, enzimleri kullanan prosesler, iyonik sıvılar, vb.) geliştirilmesi gerekmektedir.
- ORC teknolojisi ile özellikle düşük sıcaklıklarda (minimum 50°C) atık ısı kazanımı teknolojilerinin, ısı pompalarının (>250°C) ve etkin ısı değiştirici teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- CCUS teknolojileri kapsamında, CO₂'den yakıtlar (sentetik metan, kerosen vb.), kimyasallar (metanol, DME, vb), polimerler (polikarbonat, vb), diğerleri (elementel karbon vb) ve değerli ürünlerin üretilmesi kapsamında, yenilikçi kimyasal, elektrokimyasal ve biyokimyasal katalizörlerin ve proseslerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Orman kökenli biyokütleler, tarım kökenli biyokütleler (domates, ayçiçeği, pamuk, çeltik sapları gibi), enerji bitkileri, fındık, ceviz, kayısı çekirdeği kabukları, gıda tesisleri atıkları ve hayvansal biyokütlelerin değerlendirilmesi amacıyla, biyoprosesler (biyogaz, biyoetanol, biyodizel üretimi), termokimyasal prosesler (piroliz, gazlaştırma teknolojileri ile aktif karbon, karbonca zengin malzeme, pirolitik yağ, sıvı yakıt, platform kimyasalları, hidrojen zengin sentez gazı, yeşil hidrojen, yeşil metanol, amonyak, etilen/propilen monomerleri üretimleri), hidrojen ve karbon dioksit teknolojilerinin (katalitik ve elektrokimyasal indirgeme yöntemleriyle sentetik yakıtlar ve kimyasal üretim teknolojileri) geliştirilmesi gerekmektedir.
- Biyokütle, biyoatık vb. atık çeşitlerinin yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesi için yenilikçi biyoenerji teknolojilerinin geliştirilmesi (ısı pompası dâhil ısıtma uygulamalarının yaygınlaştırılması), biyoyakıt eldesi, organik atıktan elde edilebilecek biyogazın biyometan (yeşil metan) veya biyobütanol olarak yükseltilmesini sağlayan teknolojilerin geliştirilmesi, biyogaz üretim kapasitesini artırmaya yönelik ileri

oksidasyon prosesi entegreli yerli anaerobik çürütücülerin ve kojenarasyon ünitelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

- Organik içeriği yüksek arıtma çamurlarının kurutularak, gazlaştırılarak veya hidrotermal karbonizasyon ile katı yakıta dönüştürülmesi, gazlaştırılması ile sentetik gaz ve hidrojen üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Elektronik atıklardan nadir toprak elementleri (NTE) dâhil olmak üzere AB Komisyonu tarafından belirlenen kritik elementlerin geri kazanımı amacıyla sürdürülebilir hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Batarya geri dönüşümü için sürdürülebilir, uygun maliyetli ve düşük çevresel etkiye sahip hidrometalurjik ve solvometalurjik süreçlerin, yüksek saflıkta öncü malzemelerin geri kazanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi (örneğin: Li-CoO₂'den yüksek saflıkta CoSO₄, Co(OH)₂ üretimi) gerekmektedir.
- Mevcut teknolojiye kıyasla daha kısa zamanda şarj imkânı sağlayan yenilikçi şarj teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Elektrikli araçlar için akıllı ve entegre şarj sistemleri ile teknolojik altyapının geliştirilmesi gerekmektedir.
- Mobilite uygulamalarında kullanılmak üzere katı hal Li-Metal batarya hücrelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Yüksek enerji yoğunluklu ve yüksek çevrim sayısına sahip uzun ömürlü Lityum- Sülfür ve Lityum - Hava temelli batarya teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sodyum-iyon, magnezyum-kükürt, sodyum-hava, potasyum-iyon, çinko-iyon gibi çığır açıcı alternatif batarya teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Ülkemizde yoğun olarak bulunan madenlerden batarya bileşenlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Ülkemizdeki mevcut HES'lerin yenileme ve modernizasyon çalışmaları, kritik alt sistemlerin yerlileştirilmesi (büyük ölçekli türbin ve jeneratörlerin geliştirilmesi vb.), dijitalleşme, içme suyu şebekelerinden ve tarımsal sulama sistemlerinden elektrik elde etme çalışmaları, havza optimizasyonu ve akım tahmini konularında Ar-Ge çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

3.3 Hedeflere Dönük Temel Amaç ve Politikalar

On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028) dönemi için belirlenen hedeflere ulaşılabilmesi amacıyla çalışma grubu faaliyetleri kapsamında önerilen temel amaç ve politikalar;

- Yeni enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımı ile küresel rekabet avantajının sağlanması ve bu kapsamda öncelikle yenilenebilir enerji ve nükleer santrallerde yerli olarak geliştirilmiş teknoloji ve ürünlerin payının artırılmasına yönelik teknoloji programları ve politikalar oluşturulması, ülkemizin teknoloji ve ekipman ithalatçısı konumundan çıkarılıp, zengin “know-how” birikimiyle katma değerli ihracat yapan ülke konumuna getirilmesi,
- Nitelikli ve geniş kapsamlı (tasarım, yerli üretim yazılım, doğrulama ve test, vb) yerlilik oranı hesaplanması yönünde bir çalışma yapılması,
- Yerli tasarlanan ve üretilen bileşenlerin kredilendirilebilir olmasına yönelik YEKA’lar gibi destekleyici projelerin üretilmesi,
- Yenilenebilir enerji teknolojileri kapsamında kaynak, teknoloji ve sektör özelinde ekosistemin tüm paydaşlarına yönelik somut hedeflerin tanımlandığı yol haritalarının ve iş modellerinin oluşturulması,
- Yenilikçi enerji teknolojileri kapsamında atılan adımlar ve ilerlemeler ile ilgili bilgi yayınının artırılması amacıyla yıllık konferansların düzenlenmesi, aylık bültenler ile de ilgili konularda faaliyet gösteren kurumların güncel olarak bilgilendirilmesi,
- Enerji teknolojileri alanında Ar-Ge, yatırım, test laboratuvarları kurulması ve özel sektör- üniversite- kamu işbirliğinin artırılmasının desteklenmesi,
- Sektörde yapılan Ar-Ge çalışmaları kapsamında birbirine benzer pilot tesislerin kurulmasını ve mükerreriği önlemek amacıyla kamu kaynaklarını etkin kullanmak adına yapılan çalışmaların ve sonuçlarının paylaşıldığı bir platformun oluşturulması, pilot tesislerden elde edilen sonuçların paydaşlara aktarılması,
- GIF ve Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör (ITER-International Thermonuclear Experimental Reactor) gibi uluslararası işbirliği çalışmalarına katılım sağlanması,
- SMR teknolojilerinin, özellikle özel sektör yatırımı ve yerli imkânlar ile kurulumu (lisanslama dâhil yasal çerçevelerin gözden geçirilmesi) ve işletimine yönelik iş

modelleri ve yol haritasının geliştirilmesi, SMR kurulabilecek potansiyel sahaların belirlenmesi ve ülkemizin SMR vizyon belgesinin oluşturulması,

- Yenilenebilir kaynaklı enerji üretimi anlık değişimler gösterebildiği için termik santrallere şebeke dengeleme yönünden sağlayacağı ciddi katkı sebebiyle, kömür yakıtlı termik santrallerin operasyonel faaliyetlerinde değişikliğe gidilerek esnekliğinin artırılması yönünde incelemelerin yapılması, konu kapsamında yapılacak yatırımların cazip hale getirilmesi için destek mekanizmalarının geliştirilmesi,
- Elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesi, yaygınlaştırılması ve elektrolizör verimlerinin artırılması için teşvik paketleri oluşturularak yerli üreticilerin desteklenmesi,
- Geçiş aşamasında pazarın büyümesini kolaylaştırmak ve yeşil hidrojenin uygulanabilirliğini artırmak için yeşil hidrojen üreticileri ve kullanıcılarının desteklenmesi,
- Gelecekteki hidrojen talebini karşılamaya yönelik elektrolizör kapasitelerinin tahsisi ve yerleri ile buna bağlı oluşacak ilave yenilenebilir enerji kapasitelerinin belirlenmesi,
- “Avrupa Hidrojen Omurgası” gibi Türkiye için de kapsamlı bir altyapı modelinin kurulması,
- Mevcut doğal gaz boru hatlarında ve yeni kurulacak hidrojen boru hatlarında hidrojen taşınmasına yönelik bir mevzuat çalışmasının yapılması,
- Yeni hidrojen boru hatları inşa etmek yerine kullanım kapasitesi azalmış doğal gaz boru hatlarının hidrojen taşımaya uygun hale getirilmesinin önemli maliyet avantajlarına sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu açıdan doğal gaz iletimi ve dağıtımı ile hidrojen altyapısının geliştirilmesi aşamasında eşgüdüm sağlanması, yerel, bölgesel ve sınır ötesi hidrojen taşımacılığı için ek bir boru hattı ağının oluşturulması,
- Toplu taşıma araçları, nakliye araçları ve iş makinelerinin enerjisini hidrojenden sağlayan yakıt hücreli elektrikli araçlara dönüşmesine paralel olarak hidrojen dolum istasyonlarının kurulması ve çoğaltılması,
- Yakıt hücresinin yerli imkânlarla geliştirilmesine yönelik çalışma yürüten kurumlara kolaylık sağlanması, bu alandaki tedarik zincirinin gelişiminin desteklenmesi, alt bileşen geliştiren araştırma kurumlarının çalışmalarının desteklenmesi,
- Yerli olarak temini mümkün olmayan veya henüz geliştirme safhasında olduğu için ithal edilen girdi ürünlerde vergi avantajları sağlanması,

- Hem yakıt pili dizinlerinin, hem de alt bileşenlerin yerli ve milli olarak geliştirilebilmesi adına araştırma kurumları nezdinde projelerin teşvik edilmesi; aynı zamanda bu projelerde ortaya çıkacak bilgi birikiminin ticarileşebilmesi için firmaların altyapı kurmalarına yönelik bazı teşvik programlarının (Ülkemizde düşük teknoloji hazırlık seviyesinde bulunan teknolojilerin belirli bir olgunluk seviyesine çıkarılması, ticarileştirilmesi ve yurt dışındaki rakipleriyle rekabet edebilir seviyeye gelebilmesi 5-10 yıl gibi süreler alabilmektedir. Hidrojen ekosisteminde dışa bağımlılığın engellenmesi, stratejik ürünler geliştiren firmaların bu süreler boyunca desteklenmesi ile mümkün olabilir.) uygulanması,
- CO₂'nin karbon yoğun proseslerden ayrılarak; sentetik yakıt hammaddesi, gıda sektörü uygulamaları, zayıf petrol madeni yataklarını güçlendirme vb. alanlarda kullanılması için işbirliği çağrılarının geliştirilmesi ve uygulamaya alınması,
- Entegre biyorafineri tesislerinin yaygınlaşmasına yönelik fizibilite çalışmalarının yapılması ve tesis sayısının artırılmasına yönelik destek çağrılarının geliştirilmesi ve uygulamaya alınması,
- Biyokütle kaynaklarından geniş çaplı ve sürdürülebilir şekilde yararlanılması amacıyla kurulacak olan biyorafineriler, biyokütleden ileri düzey biyoyakıt ve yüksek verimli ısı/güç üretimi için esnek termo-kimyasal ve biyo-kimyasal yöntemlerle en elverişli teknolojilerin ve değer zincirlerinin ticari açıdan iyileşmesini sağlarken, biyokütle hammadde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, üretilmesi, yönetilmesi ve hasat edilmesine yönelik faaliyetlere katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda Türkiye'nin biyoyakıt sanayisini desteklemek amacıyla uzun vadeli Ar-Ge ve uygulama çalışmaları geliştirilmesi,
- Çiftçilerin, besin zincirinde yer alan bitki yetiştiriciliğinin yanı sıra enerji bitkisi tarımına da teşvik edilmesi ve ek gelir sağlamaları yönünde düzenlemeler yapılması,
- CO₂ tutulumu yüksek olan C4 enerji bitkilerinin yetiştiriciliğinin teşvik edilmesi,
- Biyoyakıt üretimi amacıyla bitki seçiminin ülkemizin mevcut tarımsal altyapı ve sosyoekonomik düzeyinin dikkate alınarak yapılması, kurulacak tesislerde öncelikle bu bitkilerin atıklarının değerlendirilmesi ve biyokütle hammadde arzındaki kısıtlar nedeniyle aynı bölgedeki yatırımların hammadde odaklı olarak planlanması,
- Hammadde maliyetlerinin rekabet edebilir seviyeye getirilmesinde, özellikle marjinal alanlarda uygun enerji bitkilerinin yetiştiriciliğinin teşvik edilmesi, hammaddelerin

erişilebilirliğindeki risk ve maliyetlerin düşürülmesi için biyokütlenin lojistiği konusunda iyileştirmelerin, hammaddelerin tedariği konusunda uzun vadeli sözleşmelerin yapılması,

- Karbon nötr/negatif enerji üretilmesi ve sertifikalandırılmasının teşvik edilmesi,
- Konut, ticari ve sanayi yapılarında güneş enerjisi kullanımının artırılabilmesi için çatı planları hazırlanmalı, yatırımların yaygınlaşmasına yönelik alternatif iş modelleri (çatı kiralama, enerji satın alma sözleşmeleri, leasing, toplulaştırma, vb.) kullanılması,
- Enerji alanında kullanılan kritik teknolojilerin (rüzgâr türbini bileşenleri, evirici ve güç dönüştürücüler, SCADA ve bileşen kontrol sistemleri, akıllı sayaçlar vb.) yurtiçinde tasarımının ve üretiminin teşvik edilmesi,
- 2035 yılı kurulu güç ve 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşabilmek için lisanslı, lisanssız ve YEKA süreçlerinin değişen makroekonomik ve teknolojik yönelimler ile aktif olarak takip edilip, iyileştirilmesi suretiyle artan kapasitelerle uygulanmaya devam ettirilmesi,
- Covid-19 pandemisi döneminde birçok sektörde olduğu gibi yenilenebilir enerji projelerinde de tedarik zinciri açısından birçok sorunla karşılaşılmıştır. Hammadde tedarikinde yaşanan sorunları da gözeterek YEKA projelerindeki yerli ürün şartının yerli ürün geliştirme ve üretimini destekleyecek şekilde genişletilmesinin gerektiği değerlendirilmektedir. İhalelerde yerlilik istenen bileşenlerin sadece lisans altında ülkemizde üretilerek ya da sadece alt sistemlerin montajının gerçekleştirilmesi ile yerli malı belgesi alması yerine; özellikle stratejik öneme sahip teknolojilerin veya doğrudan ithal edilen ürünler için, Türkiye’de yürütülen mühendislik faaliyetleri (ürün/sistem tasarım ve geliştirme, üretim ve doğrulama, yazılım ve test, vb.) ile geliştirilip üretilen bileşenlerin desteklenmesi ve bu mühendislik faaliyetlerinin şartnamelerde yer alması,
- Yeni YEKA yarışmalarında mümkün olan en üst düzeyde yerlilik oranının uygulanması ve bu oranın zaman içinde artırılmasının hedeflenmesi,
- Daha önce üretilemeyen rüzgâr türbini bileşenlerinin yerli olarak tasarlanıp üretilmesi konularının desteklenmesi,
- Yerli tasarım/üretim eviricilerin santrallerde kullanımının desteklenmesi ve ihalelerde Yerli Malı Belgesi’ne ek olarak yerli tasarım ve üretim şartının da aranması,
- Ticaret Bakanlığı’nın ilk defa piyasaya sunulacak olan yerli tasarım ve üretime sahip eviriciler için de solar panellerde olduğu gibi anti-damping uygulaması,

- Barajlı HES’lerin işletme verimliliğinin artırılması ve günümüz şebeke isteklerine cevap verecek şekilde modern kontrol sistemleri ile donatılması ve su türbini yenilemesi ile üretim verimliliğinin artırılmasını teminen yapılacak yenileme çalışmaları kapsamında, TÜBİTAK MAM, TEMSAN ve TOBB ETÜ HİDRO önderliğinde yerli üretici ve startup şirketlerini de içine alacak şekilde HES ekosisteminin geliştirilmesi, bu ekosistemin komşu veya Balkan ülkelerinden başlayarak Avrupa ülkelerine teknoloji ve hizmet ihracını desteklemesi,
- İçme suyu şebekesinde yer alan ve sürtünme yoluyla basınç düşüren basınç kırıcı vanaların yerine mikro HES üniteleri kurulmasıyla elektrik üretilerek şehirlerimizin yeşil dönüşümü için bu potansiyelin ekonomiklik gözetilerek uygun illerde şebekeye dâhil edilmesi,
- HES alanında dijitalleşme çalışmalarına hız verilerek dinamik bakım–planlama ve kestirimci bakım gibi yeni nesil dijital teknolojilerin hayata geçirilmesi ile işletme verimliliğinin artırılmasının sağlanması,
- Eski teknoloji ya da kurşun içerikli batarya kullanılmasının çevresel sorunlara yol açma potansiyelinin değerlendirilmesi, depolama koşullarının ilgili yönetmeliklerde dikkate alınması,
- Depolama teknolojilerine yönelik yerli tasarım ve üretimin (batarya ve evirici/güç dönüştürücü) desteklenmesi,
- Güneş ve rüzgârın elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde kısıtlar oluşturmalarına karşın şebeke ve baz yük planlamasının yapılması, dağıtım şirketlerine bu konuda roller verilmesi (Yerli teknoloji SCADA sistemleri kullanılmasının zorunlu tutulması gibi),
- Dağıtımına bağlı yenilenebilir enerji santrallerinin şebeke kısıtları doğrultusunda ve belirli oranlarda dağıtım firması tarafından dispatch edilebilmesini sağlayacak bir yapının kurulması (Bu bağlamda, dağıtım sistem operatörlerinin SCADA/DMS sistemlerinin bazı Dağıtık Enerji Kaynakları Yönetim Sistemi fonksiyonlarını yerine getirmesi),
- Şebeke kısıtlarını bağlantı noktasında daha iyi yönetebilmek için enerji depolama sistemiyle bütünleşmiş yenilenebilir enerji (GES ve RES) santrallerinin kurulmasına yönelik teşviklerin sağlanması
- Mikro şebekelerin kurulmasına, toplulaştırılarak şebeke entegrasyonunun sağlanmasına yönelik mevzuatların oluşturulması,

- Akıllı şebeke uygulamalarının yaygınlaştırılmasına ilişkin ayrıntılı mevzuat ve piyasa altyapısının oluşturulması,
- Ülke genelinde kritik öneme sahip enerji şebekelerinin yerli şebeke yönetim teknolojileri (SCADA vb.) ile yönetilmesinin sağlanmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi,
- Elektrik şebekesinin tamamında (üretim, iletim, dağıtım ve son tüketim) dijitalleşmenin artırılması ve mevcut şebekenin yüksek oranda akıllı hale getirilmesi, bu doğrultuda şebeke izlenebilirliğinin ve kontrol edilebilirliğinin artırılması, akıllı sayaç kullanımının yaygınlaştırılması, talep tarafı katılımının artırılması, şebeke esnekliğinin ve dayanıklılığının geliştirilmesi ve akıllı şebekelere ilişkin yerli teknolojinin (donanım ve yazılım) yaygınlaştırılmasıdır.

3.4 Temel Amaç ve Politikalara Dönük Uygulama Stratejileri ve Tedbirler

3.4.1 Mevzuat Alanında Yapılması Gereken Düzenlemeler

- Çeşitli Ar-Ge destekleri ile geliştirilmiş yenilenebilir temelli enerji tesislerinin ticari hale gelebilmesi için bürokratik süreçlerin kolaylaştırılması ve AB'deki *Green Deal Industrial Plan*, ABD'deki *Inflation Reduction Act*, Avusturalya'daki *Climate Change Bill*, Japonya'daki *GX Green Transformation* benzeri modellerin oluşturulması,
- Başta NGS ve termik santraller olmak üzere enerji arz güvenliği konusunda kritik öneme sahip olan enerji tesislerine yönelik ekipman ve malzeme üretimini amaçlayan asgari 15 milyon TL bedelli yatırımların “Proje Bazlı Teşvik Sistemi” içerisinde değerlendirilmesi,
- Elektrik üretim santralinde kullanılan ve ülkemizde üretimi mümkün olmayan ürünlerden uygun görülenlerin “Öncelikli Ürün Listesi Tebliği” kapsamına alınması ve bu ürünlerin üretimi için imalatçılar tarafından alınacak üretim tezgâhlarının ve test platformlarının KDV'den muaf tutulması ve kredi faiz desteği sağlanması,
- Nükleer teknolojide bilgi ve yetkinliği artıracak, bilimsel çalışmalara katkı sağlayacak ve nükleer tıp ve endüstri alanında ihtiyaç duyulan radyoizotop üretimi konusunda bölgesel ihtiyacı karşılayacak olan yerli araştırma reaktörünün tasarımı, imalatı ve kurulumu konusunda ülkemizdeki üniversitelerin, kamu kurumlarının ve özel sektörün katılımının teşvik edilmesi,

- Ülkemizin ileri nükleer reaktör teknolojisi transferine uygun ülke ve firmalar ile işbirlikleri yapması,
- Hızlandırıcı teknolojilerin baca gazı arıtma gibi endüstriyel alanlarda kullanımının TÜBİTAK ve TENMAK marifeti ile teşvik edilmesi,
- SMR’lerin özel sektör eliyle ve yerli imkânlar ile kurulmasını teşvik edecek yasal mevzuatların hazırlanması,
- Yeni binalara belli bir oranda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması şartı getirilerek, güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşması,
- Elektrikli araçların elektrik sisteminde herhangi bir soruna yol açmaması için elektrik iletim ve dağıtım altyapısının güçlendirilmesi,
- Denizüstü rüzgâr enerjisi alanında ilerleme sağlanabilmesi için gerekli olan deniz mekânsal planlama ve çevre etki değerlendirmesi konularında ülkemizdeki ilgili kurumların işbirliği ile izinler ve lisanslamaya yönelik mevzuat oluşturulması,
- Denizüstü rüzgâr türbinleri için su altı enerji hatları ile ilgili mevcut çalışmaların geliştirilmesi, muhtemel kurulum alanlarının belirlenmesi ve mevzuatla desteklenerek kurulumlarının kolaylaştırılması,
- Her enerji kaynağının dinamikleri, elektrik üretim maliyetleri, santral kurulum şekilleri, kullanılan ekipmanları ve bu ekipmanların üretim süreçleri birbirlerinden keskin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklardan dolayı, kamu otoritesi tarafından temel kanunda yapılan değişiklikler, bir yenilenebilir enerji kaynağına avantaj sağlarken, bir başkasına dezavantaj oluşturabilmektedir. Her kaynak için ayrı hazırlanmış, sade ve anlaşılır yasal mevzuatlara ihtiyaç duyulması,
- CSP sistemlerinin geleneksel termik santrallere göre yatırım maliyetinin yüksek olması sebebiyle bu sistemlerde elektrik üretilmesi halinde alım garantilerinin uygulanmasına yönelik yasal düzenlemeler yapılması,
- Hidrojen üretim, taşıma ve iletim tesisleri için “iş sağlığı ve güvenliği” mevzuatını da içerecek şekilde hidrojen ile ilgili bütünleyici bir mevzuat hazırlanması,
- Hidrojen katkılı doğal gazın üretimi, depolanması ve satışı ile ilgili mevzuat hazırlanmalıdır. Biyogazın doğal gaz boru hatlarına eklenmesi ile de ilgili mevzuatın oluşturulması gerekmektedir. Avrupa’da, örneğin Almanya’da hidrojen önceden var olan mevzuatlar içerisinde değerlendirilmektedir ve bu mevzuatlar ile entegre edilmiştir. Bu kapsamda, Fit for 55 paketi ve ardından gelen REPowerEU Planı kapsamında

AB'nin hâlihazırda devam eden mevzuat çalışmalarının ülkemizce yakından takibi ve bu konuda AB Komisyonu ve ilgili AB kurumlarıyla yakın temasın sürdürülmesi,

- Dünyada hidrojen enerjisi alanındaki geçerli standartlar temel alınarak Türkiye için de benzer standartlar oluşturulması,
- Avrupa ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de düşük karbonlu yakıt standardı oluşturarak kullanıcıların düşük karbonlu tüketime yönelmesini sağlayacak standart altyapısının oluşturulması gerekmektedir.

3.4.2 Kurumsal Yapıyı İyileştirmeye Yönelik Düzenlemeler

- Cumhurbaşkanlığı altında (Savunma Sanayi Başkanlığı örneği) enerji sektöründe yenilenebilir enerji, nükleer, enerji depolama ve hidrojen teknolojileri başta olmak üzere yerileştirmeyi hedefleyen, buna yönelik stratejileri belirleyen teşvik, koordinasyon ve izlemeden sorumlu Enerji Endüstrisi Başkanlığının kurulması için çalışma başlatılması gerekmektedir.
- Başta nükleer ve termik santraller olmak üzere enerji sektöründe bakım ve onarım hizmeti verebilecek altyapının geliştirilmesi gerekmektedir.
- Türkiye'nin nükleer reaktörler konusunda uzun vadede öz yeterlilik kazanması hedefine yönelik olarak kapsamlı bir yol haritası ve plan hazırlanacaktır. Bir ülkenin nükleer reaktör sahibi olabilmesi için IAEA tarafından tanımlandığı şekliyle öncelikli olarak 19 altyapı (bütçeleme, finans, radyoaktif atık, mevzuat vs.) alanında çalışmalarını tamamlaması gerekmektedir. Bu bağlamda, ülkemizde bu altyapı alanlarındaki her türlü eksik ivedilikle giderilmelidir. Nükleer santrallerde güvenlik kültürünün geliştirilmesine yönelik bağlantılı her sektör güvenlik kültürü konusunda üst düzeye ulaştırılmalıdır. Buna lisanslama, denetim, işletme, bakım onarım vs. alanında faaliyet gösteren her bir bakanlık kamu-özel kurum ve kuruluşlar ile şirketler de dâhildir.
- Yenilikçi yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi amacıyla sanayi üniversite ve kamu kurumu işbirlikleri artırılmalı, çeşitli teşvik ve destek mekanizmaları oluşturulmalı ve bu konuda uluslararası işbirliklerinin geliştirilmesi desteklenmelidir.

3.4.3 İnsan Kaynakları Alanında Yapılması Gerekenler

- Sektörün insan kaynağını daha aktif ve verimli kullanmak ve yeni insan kaynağı oluşturmak üzere yol haritası hazırlanmalıdır.
- Sektörün ihtiyaç duyacağı kalifiye işgücünün teknik ve uygulamalı eğitim alabileceği üniversiteler ve diğer ilgili kurumlarla işbirliği içinde çalışan, sertifikalı eğitim verebilecek ulusal akademilerin kurulması sağlanmalı, genç nesillerin sektörde çalışması burs ve destekler ile teşvik edilmelidir.
- Enerji teknolojileri alanında ihtiyaç duyulan insan kaynağının yetiştirilmesine yönelik ülkemizin mevcut eğitim ve öğretim altyapısı yeni müfredat ile geliştirilmeli, yurt içi/yurt dışı mesleki gelişim programları yaygınlaştırılmalıdır.
- Santral kurulumları sırasında denetim ve belgelendirme konularında eğitilmiş, sertifikalı, muayene ve denetim uzmanlarının yetiştirilip görev alması gerekmektedir.
- Enerji teknolojileri alanında ortaöğretim seviyesinde eğitim programları kurulmalıdır, nitelikli ara elaman ihtiyacının giderilmesi amacıyla meslek yüksekokullarında ilgili bölümler açılmalıdır.
- Yeni ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi kapsamında girişimcilik uygulamalarının sayısının artırılmasına yönelik start-up ekosistemi desteklenmelidir.
- Enerji santrallerinin çevresel etkilerinin değerlendirilebilmesi ve çevresel faktörlerin belirlenip uzun dönemli izlenmesi ve ilgili araştırmaların yapılması amacıyla, disiplinler arası çalışmaları sağlayacak platformların oluşturulması önem arz etmektedir. Bu kapsamda, kamu-üniversite araştırma projeleri ve ülkemiz insan kaynağının kapasite gelişimine yönelik eğitimlerin verilmesi gerekmektedir.
- Yeni enerji teknolojileri (özellikle depolama, hidrojen ve CCUS) araştırma ve uygulama merkezlerinin üniversitelerde ya da ilgili kamu enstitüleri kapsamında kurulmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

3.4.4 Altyapıyı İyileştirmeye Yönelik Yapılması Gerekenler

- 2053 yılı hedeflerimiz ile bütünleşmiş, bu hedeflerin gerçekleştirilmesi yolunu Ar-Ge ve yenilik ile belirleyen ve enerji teknolojileri alanında gerçekleştirilebilecek atılımlarla bu hedeflerin ötesine geçmeyi teşvik eden bir stratejinin hayat bulmasına yönelik platform yapılarına, kamu-üniversite-sanayi-STK işbirliğini kurabilen Ar-Ge merkezlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

- Enerji sistemlerinde kullanılan bilişim teknolojilerinde meydana gelebilecek siber güvenlik saldırıları; enerji hizmetlerinin durmasına, aksamasına, büyük ölçekli ekonomik zarar görülmesine, kamu düzeninin bozulmasına, can kaybı yaşanmasına ve hatta ülkelerin ulusal güvenliğinin tehlikeye düşmesine neden olma risklerini içermektedir. Dolayısıyla tüm santraller için siber güvenlik konusunda gerekli tedbirleri almak ve konu hakkında yeterli bilgiye sahip olmak önem arz etmektedir.
- Nükleer yakıt ve malzeme araştırmaları, yaşlanma testleri, ulusal ve bölgesel ölçekte radyoizotop üretimi ve deneysel çalışmalar gibi çok amaçlı kullanıma uygun yüksek nötron akıllı yerli bir araştırma reaktörünün (en az 20 MW termal güce sahip) kavramsal tasarımı gerçekleştirilmelidir. Mevcut araştırma reaktörlerinin istenilen nitelikte ve etkin olarak kullanılması için gerekli çalışmaların ve tedbirlerin alınması gerekmektedir.
- Nükleer tesislerde kullanılacak yapı, sistem, bileşen, ekipman ve malzemeler için milli test ve muayene altyapısının güçlendirilmesi ve/veya özel sektörün teşvik edilmesi sağlanmalıdır.
- Uranyum, toryum gibi radyoaktif elementlerin çıkarılması ve araştırmaların teknolojik yeniliklere dönüşebilmesi kapsamında Eti Maden İşletmeleri, Maden Tetkik Arama Kurumu, TENMAK NATEN vb. kurumların altyapılarının geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sanayileşme İcra Komitesi tarafından enerji teknolojileri alanındaki yerlileştirilebilecek ürünler belirlenmelidir.
- Nükleer güç santrallerinden oluşacak atıkların kontrollü bir şekilde bertaraf edilebilmesi amacıyla TENMAK tarafından atık tesislerinin kurulması önem arz etmektedir.
- Denizüstü rüzgâr enerjisi için belirlenen potansiyel alanlar için uzun süreli deniz üstü rüzgâr ölçümleri ve meteorolojik (rüzgâr hızı, yönü, sıcaklık, nem vb.), oşinografik (dalga boyu, dalga hızı, akım vb.) ölçümler yapılması amacıyla ilgili kurumların işbirliği ile ölçüm direği/istasyonlar (MetMAST, MetOCEAN) kurulmasının ve veri toplanmasının gündeme geleceği düşünülmektedir. Bu ölçümler için, türbin yüksekliğinde (veya yüzde 80 yüksekliğinde) kurulum/kullanım/sökümü oldukça maliyetli olan klasik ölçüm direği kullanımının yanı sıra dünyada kullanımı giderek yaygınlaşan platform üstü LİDAR/SODAR, yüzen LİDAR ve uydudan ölçüm yöntemlerinin öne çıkması ve ülkemizde de bu uygulamaların yer edinebileceği öngörülmektedir.

- Doğal gaz boru hatlarının hidrojen taşımada kullanılabilmesi için gerekli teknolojik dönüşümün yapılması önemlidir. Doğal gaz depolama alanlarının aynı zamanda hidrojen depolama alanları olarak kullanılması için çalışmalar yapılmalıdır.
- Hidrojenle çalışan toplu ulaşımda kullanılan otobüslerin, yük taşımacılığında kullanılan nakliye araçlarının ve bazı iş makinalarının (forklift vb.) ülkemizde yaygınlaşması için gerekli altyapının tesis edilmesi gerekmektedir.
- Hidrojen altyapısı ve üretim sahaları kurulurken elektrik şebekesi, depolama tesisleri, taşıma ve elektroliz üniteleri arasında entegre bir yapının oluşturulması dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yeşil hidrojen üretimi için Türkiye, yerel yenilenebilir enerji kapasitesini ve elektrolizör kapasitesini hızla geliştirmelidir.
- Ülkemizin bugün için kayda değer herhangi bir ticari hidrojen ithalatı ve ihracatı yoktur. Avrupa’da 2030 yılında 20 milyon ton yenilenebilir hidrojen ihtiyacı olması öngörülmektedir. Bu amaçla “REPowerEU” planı kapsamında 10 milyon ton yeşil hidrojenin Avrupa’nın kendi içerisinde, 10 milyon ton yeşil hidrojenin ise Avrupa dışından karşılanacağı belirtilmiştir. 2050 yılında Avrupa’nın ihtiyaç duyacağı hidrojeni yüzde 10-20 oranında ithal edeceği ve bu ithal hidrojenin de yüzde 50-60 oranında yeşil hidrojen olacağı öngörülmektedir. Bu talep doğrultusunda, ülkemizin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli dikkate alındığında yeşil hidrojen ihracatı hususunda önemli fırsatlar yakalayabileceği düşünülmektedir.. Bu sebeple, ülkemiz ile Avrupa ülkeleri arasında hidrojen boru hattı altyapısının kurulmasının fayda sağlayabileceği düşünülmektedir.

3.4.5 Mali Yükü ve Finansmanı

Yeni enerji teknolojileri genel olarak pahalı sistemler olup ülkemiz bu alanda yüksek oranda dışa bağımlıdır. Diğer yandan bu teknolojilerdeki yedek parça temininde küresel zorluklar yaşanmaktadır. Bunun yanında Ar-Ge faaliyetlerini gerçekleştirirken ihtiyaç duyulan analiz ve test hizmetlerinin maliyetleri de yüksektir. Bu çerçevede Ar-Ge alanında uluslararası işbirliği, bilgi alışverişi ve know-how transferi yapılması dikkate alınmalıdır.

CCUS teknolojileri tesislerin işletme maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle SKDM kapsamında ülkemizin güçlü olduğu ve dekarbonizasyonu zor olan sanayi sektörlerinin (demir-çelik, alüminyum ve çimento vb.) olumsuz yönde etkilenmemesi için hidrojen ve CCUS teknolojilerinin yerli olarak geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Hâlihazırda endüstriyel

uygulamalarda DAC ile bir ton CO₂ yakalama maliyeti yaklaşık 100-300 ABD doları arasında değişmektedir. Bu sistemlerin sürdürülebilir olması için yakalama maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple söz konusu alandaki Ar-Ge ve pilot çalışmalar için yerel fonların yanında Horizon Avrupa, Dünya Bankası gibi fonlara başvurulabileceği ve diğer ülkeler ile ortaklaşa projeler geliştirilebileceği düşünülmektedir.

3.5 Plan Amaç, Hedef ve Politikalarının Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleriyle İlişkisi

Ülkemiz, enerjide dışa bağımlılığı yüksek olan ülkeler arasındadır. Önümüzdeki süreçte nüfus artışı ve sektörel aktivitelere paralel olarak ekonomimizin güçlü bir şekilde büyümeye devam etmesi beklenmektedir. Bu büyüme aynı zamanda enerji ihtiyacımızı da artırma potansiyeli barındırmaktadır. Küresel ölçekte yaşanan enerji krizi, enerjide dışa bağımlı olmanın getireceği riskleri tekrar gözler önüne sermiştir. Enerjide dışa bağımlı olmamız nedeniyle küresel enerji arz problemleri ve fosil yakıtlardaki fiyat dalgalanmalarının ekonomimizi olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla önümüzdeki dönemde enerjide dışa bağımlılığımızı azaltacak yerli temiz teknolojilerin gelişimi kritik öneme sahiptir.

Ülkemizin 2053 yılı net sıfır emisyon hedefinin gerçekleşebilmesi için yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği potansiyellerinden maksimum seviyede faydalanılması gerekmektedir. Bunun yanında son tüketici sektörlerde elektrifikasyona geçiş hem verimliliği artıracak hem de tüm ekosistemin karbonsuzlaşmasında kritik rol oynayacaktır. Tüm bu etmenlerin yanında, özellikle karbonsuzlaşması zor olan sanayi sektörlerinde yurt içinde üretilen yeşil hidrojenin ve türevlerinin kullanımı önemli olacaktır.

Hem enerjide dışa bağımlılığımızın azalması ve sürdürülebilir büyümenin sağlanması hem de 2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasında ithal fosil yakıtların kullanımı yerine yenilenebilir enerji ve diğer temiz teknolojilere geçişin yapılması elzemdir. Hidrojene ek olarak, türevleri ve ikincil ürünleri de belirleyici bir rol oynayacaktır. Elektrifikasyon sağlamadığı durumda, fosil yakıtların yerine hidrojen, türevleri ve ikincil ürünlerin kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu kapsamda yurt içinde üretilen yeşil hidrojen ve türevleri, CCUS teknolojileri olmak üzere, ekonominin karbonsuzlaşmasını sağlayacak temiz teknolojilere yönelmesi 2053 net sıfır hedefine ulaşmayı sağlarken, aynı zamanda sürdürülebilir büyümeye ve enerjide bağımsız bir ülke olmamıza katkı sağlayabilecektir.

Yeşil hidrojenin ağır sanayide fosil yakıtların yerine kullanılmasının, Türkiye’de ihracat yapan ağır sanayinin uzun vadeli rekabet gücü (örn. SKDM’nin potansiyel etkisi) ve iklim hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynayabileceği düşünülmektedir. Dekarbonizasyon çabaları ve uzun vadeli kullanım bağlamında, yeşil hidrojen sürdürülebilir ve uygulanabilir olarak kabul edilmelidir. Ayrıca yeşil hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kapasitelerinin artırılması gerekmektedir.

BM tarafından hazırlanan “sürdürülebilir gelişme hedefleri” insanlığın gelecekte daha iyi ve sürdürülebilir bir yaşam sürebilmesi amacıyla oluşturulmuş 17 ana hedefi kapsamaktadır. Bu hedeflerin her biri birbiriyle ilişkili ve ortak bir amaç doğrultusunda birbirini tamamlayıcı bir yapıda desteklenmektedir. Sıralanan 17 hedef doğrultusunda eylem planları oluşturularak ilgili karar alıcı mekanizmalarla eş güdüm sağlanmaktadır. Tüm hedeflere 2030 yılı itibarıyla ulaşarak, insanlığın şu anda yaşadığı ve gelecekte çok daha geniş kitleleri etkilemesi öngörülen problemlerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Sıralanan 17 hedeften “Erişilebilir ve temiz enerji” eylemi Çalışma Grubu konusu ile ilgilidir.⁹⁹ Bu eylemin alt maddeleri aşağıda yer almaktadır.

7.1. 2030’a kadar uygun fiyatlı, güvenilir ve modern enerji hizmetlerine evrensel erişimin sağlanması,

7.2. 2030’a kadar yenilenebilir enerjinin küresel enerji kaynakları içindeki payının önemli ölçüde artırılması,

7.3. 2030’a kadar küresel enerji verimliliği ilerleme oranının iki katına çıkarılması,

7.a. 2030’a kadar yenilenebilir enerjiyi, enerji verimliliğini, gelişmiş ve daha temiz fosil yakıt teknolojilerini kapsayan temiz enerji araştırmaları ve teknolojilerine erişimi kolaylaştırmak için uluslararası işbirliğinin geliştirilmesi ve enerji altyapısı ve temiz enerji teknolojisi alanlarına yatırımın teşvik edilmesi,

7.b. 2030’a kadar özellikle en az gelişmiş ülkeler, gelişmekte olan küçük ada devletleri ve karayla çevrili gelişmekte olan ülkeler olmak üzere gelişmekte olan ülkelerde, bu ülkelerin destek programları çerçevesinde herkese modern ve sürdürülebilir enerji hizmetleri sunabilmek için altyapının genişletilmesi ve teknolojinin geliştirilmesi,

⁹⁹ <https://turkiye.un.org/tr/sdgs> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

8.2. Yüksek katma değerli ve emek-yoğun sektörlerle odaklanarak çeşitlendirme, teknoloji geliştirme ve yenilik getirme aracılığıyla ekonomik verimliliğin daha yüksek seviyelere çekilmesi,

9.1. Herkes için uygun fiyatlı ve eşitliğe dayalı bir erişime vurguda bulunarak ekonomik kalkınmayı ve insanların esenliğini desteklemek için bölgesel ve sınırlararası altyapıyı kapsayan kaliteli, güvenilir, sürdürülebilir ve dayanıklı altyapıların oluşturulması,

9.4. 2030 yılına kadar her ülkenin kendi kapasitesine uygun olarak harekete geçmesiyle, kaynakların daha verimli kullanımının artırılması ve temiz ve çevresel açıdan daha sağlam teknolojiler ve sanayi süreçlerinin daha çok benimsenmesi yoluyla altyapının ve güçlendirme sanayilerinin sürdürülebilir hale gelecek biçimde geliştirilmesi,

9.5. Özellikle gelişmekte olan ülkeler olmak üzere bütün ülkelerde, 2030 yılına kadar yenilikçiliğin teşvik edilmesi ve her bir milyon kişi içindeki araştırma-geliştirme alanında çalışan kişi sayısının, kamu araştırmalarının, özel araştırmaların ve hükümet harcamalarının önemli ölçüde artırılması yoluyla bilimsel araştırmanın geliştirilmesi ve sanayi sektörlerinin teknolojik yetkinliklerinin genişletilmesi,

9.b. Sanayi çeşitliliği ve sanayi ürünlerinde değer artırımını için uygun bir politika ortamının yaratılması aracılığıyla gelişmekte olan ülkelerde yurt içi teknoloji gelişiminin, araştırma ve yenilikçiliğin desteklenmesidir.

3.6 Plan Hedeflerini Gerçekleştirmek İçin Yapılması Önerilen Araştırmalar

Plan hedeflerini gerçekleştirmek amacıyla temiz, erişilebilir ve güvenli enerji arzı konusunda PV, CSP ve endüstriyel ısıtının kullanımı, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen, temiz kömür, yeni nesil nükleer reaktör, biyo-yakıt, biyoenerji dönüşümü ve biyorafineri, enerji sistemleri ve elektrik şebekeleri, hidroelektrik enerji, enerji depolama ve CCUS teknolojileri konularında araştırmalar yapılması önerilmektedir.

4. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

4.1 Sektörün/Tematik Konunun Ülkemizin Gelişmesine Katkısının Değerlendirilmesi

Enerji, küresel ve ulusal politikaların belirlenmesinde ülkelerin en önemli konulardan biri olmuştur. Son zamanlarda iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin artması, Covid-19 sonrası dönemde emtia fiyatlarının dalgalanması ve Rusya-Ukrayna savaşı gibi küresel krizler sonrası enerji hammadde fiyatlarının ciddi oranda yükselmesi enerjinin küresel ölçekte önemini gözler önüne sermiştir. Söz konusu küresel olaylar ülkelere, enerji arz güvenliğinin yanında enerji bağımsızlığının da sağlanmasının oldukça kritik olduğunu göstermiştir.

Ülkemizde ithalat ve cari açığın önemli bir kısmının enerji kaynaklı olduğu düşünüldüğünde enerji üretiminde ve teknolojilerinde dışa bağımlılığın azaltılması yönünde atılacak adımlar ve alınacak tedbirler iktisadi ve sosyal kalkınma hedeflerimizin gerçekleştirilebilmesi bakımından kritik önem taşımaktadır.

2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji ve enerji depolama teknolojileri yatırımlarının artması ve entegrasyon sürecinin hızlanması beklenmektedir. Söz konusu teknolojilerde ülkemizin Ar-Ge ve yenilik kapasitesinin geliştirilmesine, teknoloji geliştirme altyapısının güçlendirilmesine ve bu sayede iklim değişikliği krizini orta/uzun vadede fırsata çevirmesine imkân sağlanmalıdır.

Enerjide ciddi bir dönüşüm için elektrik üretiminde fosil yakıtlar yerine büyük oranda güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklara geçiş, enerji verimliliği önlemleri ve arabalardan, binalarda ısıtma ve soğutmaya kadar yaygın bir şekilde elektrifikasyon gereklidir. Elektrifikasyonu zor olan sektörler arasında çelik, çimento, kimyasallar, uzun mesafeli karayolu taşımacılığı, deniz taşımacılığı ve havacılık bulunmaktadır. Özellikle bu sektörler için temiz enerjiye geçişte hidrojen kullanımı çok iyi bir alternatiftir. Ancak, hidrojen ekonomisine geçişi mümkün kılmak için ülkesel ve küresel teknolojik ilerlemelere ihtiyaç vardır. Rapor kapsamında verilen önerilerin ülkemizin hidrojen ekonomisine geçişine katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

Türkiye'nin biyokütle enerji politikalarının oluşturulması kapsamında gerekli mevzuat düzenlemelerinin yapılması, altyapı yatırımlarının oluşturulması ve biyoyakıt odaklı Ar-Ge çalışmalarının gerçekleştirilmesiyle biyokütle enerjisi yakın gelecekte Türkiye'nin iç enerji pazarında daha etkin bir yere sahip olacaktır.

Ülkemizdeki önemli jeotermal ısı potansiyelinin değerlendirilmesi için konvansiyonel olmayan jeotermal kaynak arama çalışmalarına yönelik (kızgın kuru kaya vb.) Ar-Ge çalışmalarına başlanması ve bu konuda gerek insan kaynağı gerekse de teknoloji aktarımı ve geliştirilmesi konusunda gerekli adımların orta-uzun vadede atılması gerektiği değerlendirilmektedir.

PV ve CSP teknolojileri kapsamında hem verim artışına hem de birden fazla faydalı çıktı eldesine yönelik (elektrik, ısıtma, soğutma, güneş yakıtları vb.) Ar-Ge çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve bu teknolojilerin başta biyokütle ve jeotermal sistemler olmak üzere diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle entegre uygulamaları yaygınlaştırılmalıdır.

Rüzgâr teknolojileri kapsamında yüksek verimli karaüstü, denizüstü ve uçan (airborne) rüzgâr enerji sistemleri ve bu sistemler ile entegre hibrit yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Özellikle yerlileştirilen ve yerlileştirilmesi yönünde çalışmaları sürdürülen kritik rüzgâr türbini bileşenlerinin yerlilik yüzdelerinin artırılması amaçlanmalıdır.

Hücre ve/veya sistem bazında otomotiv ve diğer elektrikli araç sektörünün ihtiyaçlarını karşılayabilecek; ekonomik, yüksek enerji ve güç yoğunluğu ile uzun çevrim ve raf ömrüne sahip, hızlı şarj/deşarj olabilen, pratik uygulama sıcaklık şartlarında etkin performans gösterebilen batarya teknolojilerinin geliştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki paylarının artmasından ve değişken üretime sahip olmalarından dolayı gün içi piyasasındaki saatlik oynamalara karşın enerjide tedarik sürekliliğinin sağlanması için esnek üretim ve talep yönetiminin yapılabilmesi önem kazanmaktadır. Enerji ihtiyacı duyan, enerji üreten ve enerjiyi depolayan sistemlerin bir uyum içinde enerji arzını güvenilir hale getirerek durum farkındalığını artıran ve karar desteği sağlayan enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Başta akıllı sayaçlar olmak üzere alçak ve orta gerilim şebekelerini izlemek için kullanılacak düşük maliyetli ölçüm/izleme cihazlarının, şebekede enerji arz güvenilirliğini artırmak üzere mikro-şebeke yapılarının, karar destek sistemlerinin, sistemlerin sistemi anlayışına sahip kontrol/izleme yapıları ve bunları gerçekleştirebilecek saha ekipmanlarının ve siber güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Enerji depolama teknolojileri, enerji dönüşümünün önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın hale gelmesiyle birlikte enerji depolama

teknolojilerinin geliştirilmesi ve benimsemesinin giderek daha da kritik hale geleceği düşünülmektedir. Enerji talebi ve arzı arasındaki dengeyi sağlayarak sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli bir rol oynayan enerji depolamanın geleceğin güç sistemlerinin temel taşı olmaya devam etmesi beklenmektedir. Enerji depolama stratejisi, Türkiye'nin önceliklerine ve kaynaklarına dayalı olarak belirlenmelidir. Enerji depolama projelerinin yerel ihtiyaçları karşılaması, enerji güvenliğini artırması ve sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunması önemlidir.

2053 yılı net sıfır emisyon hedefi kapsamında yerli kömürün kullanımında CCUS ve temiz kömür teknolojilerinin değerlendirilmesine yönelik olarak arz güvenliği, makro-ekonomik ve sosyal etkileri içeren analizler yapılmalı ve bir yol haritası belirlenmelidir. Ayrıca yerli kömürün katma değerli ürünlere dönüştürülmesi konusunda çalışmalar yapılması önem arz etmektedir.

Nükleer sektörün gereksinimleri göz önünde bulundurularak hazırlanacak kapsamlı resmi politika belgeleriyle devletin liderliği ve yatırım desteği altında gerçekleştirilecek ilerlemelerin, hem nükleer santrallerde yerli sanayinin payını artırabileceği hem de enerji, maden, petro-kimya, demir-çelik gibi katma değeri yüksek diğer endüstrilere katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca Akkuyu ve diğer nükleer santral projelerinde kazanılacak endüstriyel tecrübeyle uzun vadede sürdürülebilir ve ihracat gücü yüksek yerli nükleer sanayi kurulabilecektir.

Yenilenebilir hidrojen ile düşük karbonlu hidrojen, Türkiye'nin uzun vadede iklim nötr olma hedefiyle en uyumlu seçenek olarak görülmektedir. Yenilenebilir hidrojen, elektrolizör üretimi Türkiye'de yeni iş imkânları ve ekonomik büyüme yaratacak ve uygun maliyetli entegre enerji sistemini destekleyecektir. Ayrıca Türk sanayiinde, gıda, demir-çelik, cam, ulaşım, metanol, amonyak üretimi vb. sektörlerde kullanılan/kullanılacak hidrojen ihtiyacı için düşük karbonlu hidrojen üretilmesi hatta üretilen hidrojenin küresel pazara sunulması hedeflenmelidir.

Ülkemizde, büyük kapasitede (100 MW'a kadar) elektrolizörlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu elektrolizörlerin, daha büyük rafinerilerde, çelik fabrikalarında ve kimyasal komplekslerde mevcut talep merkezlerinin yanına kurulabileceği düşünülmelidir. 2030 yılından önce 100 MW ölçekli yenilenebilir hidrojen üretimine adanmış büyük rüzgâr ve güneş santralleri için somut planlar oluşturulmalıdır. Mevcut fosil yakıtlı hidrojen üretim tesisleri,

CCS teknolojileri ile güçlendirilerek karbondan arındırılmalıdır. Politika odağı açısından, nispeten kısa bir süre içinde böylesine sürdürülebilir bir ölçek büyütme tam teşekküllü bir hidrojen ekosistemi oluşturmak için yatırımların teşvik edilmesini gerektirecektir.

Genel olarak Türkiye'nin enerji teknolojileri alanında yerli yeteneklerinin ve rekabetçiliğinin artırılması, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılması, yerli enerji teknolojilerinin ihracat potansiyelinin güçlendirilmesi ve enerji sektöründe istihdamın artırılması için;

- Enerji teknolojileri alanında yerli Ar-Ge faaliyetleri teşvik edilmeli ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi desteklenmelidir. Üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel sektör arasında işbirliği artırılmalı ve enerji teknolojilerinde öncü araştırma merkezleri oluşturulmalıdır.
- Ulusal ve uluslararası düzeyde teknoloji transferi mekanizmaları geliştirilmeli ve enerji teknolojilerindeki en iyi uygulamaların paylaşılması sağlanmalıdır. Yabancı teknoloji ve deneyimlerden yararlanılarak, yerli endüstrinin gelişimi ve rekabetçiliği artırılmalıdır.
- Yeni enerji teknolojilerinin test edilmesi ve ticarileştirilmesi için pilot proje tesisleri oluşturulmalıdır. Bu projeler, yeni teknolojilerin performansını değerlendirmek, maliyetleri düşürmek ve ölçek ekonomisi sağlamak için önemlidir.
- Teknoloji transferinin hızlandırılması ve yerli şirketlerin küresel pazarda rekabet edebilirliğinin artırılması amacıyla yerli ve yabancı şirketler arasında işbirliği ve ortaklıklar teşvik edilmeli ve enerji teknolojileri alanında bilgi ve kaynak paylaşımını destekleyen platformlar oluşturulmalıdır.
- Enerji teknolojileri konusunda uzman yeteneklerin yetiştirilmesi için eğitim programları ve kurslar düzenlenmeli ve üniversitelerde enerji teknolojileriyle ilgili lisansüstü programlar ve araştırma projeleri teşvik edilmelidir.

Yerli enerji teknolojisi geliştiricilerinin ve girişimcilerinin desteklenmesi amacıyla finansal mekanizmalar oluşturulmalıdır. Devlet destekleri, teşvikler, kredi imkânları ve risk sermayesi fonları gibi kaynaklar, yeni teknolojilerin ticarileştirilmesi ve pazarlanması sürecinde önemli rol oynayabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akkuş İ. (2017). Neden jeotermal enerji? Türkiye için önemi, hedefler ve beklentiler. Mavi Gezegen Dergisi, 23, 25–39.
- Akkuş İ. (2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Türkiye’de Jeotermal Enerji Gerçeği: Potansiyel ve Sorunlara Genel Bir Bakış”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.
- Aro, E. M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. Ambio, 45(1), 24-31.
- Atadashi, I., Aroua, M. ve Aziz, A.A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:1999- 2008.
- Best Research-Cell Efficiency Chart (2021). National Renewable Energy Laboratory <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (Erişim tarihi:15.08.2023)
- BloombergNEF, New Energy Outlook 2021, Executive summary, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Campen B.V. & Petursdottir H. (2016). Geothermal Sustainability Regulation in Iceland and New Zealand. European Geothermal Congress 2016, 19-24 Sept 2016, Strasbourg, France
- Chatzipanagi, A., Jaeger-Waldau, A., Cleret de Langavant, C., Letout, S., Latunussa, C., Mountraki, A., Georgakaki, A., Ince, E., Kuokkanen, A. and Shtjefni, D., (2022). Clean Energy Technology Observatory: Photovoltaics in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/812610, JRC130720.
- Creutzig, F., Ravindranath, N.H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F. vd. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. GCB Bioenergy, 7, 916–944.
- CSPFocus (2020). Generation from Spain’s Existing 2.3 GW of CSP Showing Annual Increases. In: CSP News Briefs, SolarPACES/ iea Energy Technology Network.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021
- Damartzis, T., & Zabaniotou, A. (2011). Thermochemical Conversion Of Biomass To Second Generation Biofuels Through Integrated Process Design-A Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 15(1), 366-378.
- DLR (2021). “Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power”. https://www.dlr.de/en/latest/news/2021/01/20210330_study-solar-thermal-power (Erişim tarihi:15.08.2023)

- utta, K., Daverey, A., & Lin, J. G. (2014). Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. *Renewable energy*, 69, 114-122.
- Eckstein, D., Künzel, V., Schäfer L., (2021). Global Climate Risk Index, <https://www.germanwatch.org/en/cri> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- EUROGIA 2030. <https://eurogia.eu/> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Fraunhofer ISE Photovoltaics Report (2021). <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Global Lithium Ion Battery Market (2020). Persistence Market Research <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/lithium-ion-battery-market.asp> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Gomez, L. D., Steele-King, C. G., & McQueen-Mason, S. J. (2008). Sustainable Liquid Biofuels From Biomass: The Writing's On The Walls. *New Phytologist*, 178(3), 473-485.
- GWEC Global Wind Report (2021). <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>, (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Halaçoğlu U.(2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, “Jeotermal Enerji Santrallerinde Çevreci ve Verimlilik Artırıcı Teknolojiler”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.
- Hedef 2053: Termik Santrallerin Geleceği Çalıştayı, Çalıştay Sonuç Raporu (2022). 25-26 Mayıs 2022, Ankara, Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santraller Daire Başkanlığı
- IEA (2015). “Implementing Agreement for a Programme of Research and Development on Energy Conservation through Energy Storage”, Strategic Plan 2016 – 2021.
- IEA Bioenergy Countries’ Report (2021). Implementation of bioenergy in the IEA Bioenergy member countries IEA Bioenergy ExCo November 2021 https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountriesReport2021_final.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IEA (2021). World Energy Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IEA (2021). Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)

- IEA (2022). World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A) (Erişim tarihi: 15.08.2023)
- IEA (2022). Direct Air Capture 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IEA, Key fuel trends in the Stated Policies Scenario, 2019-2030. IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/key-fuel-trends-in-the-stated-policies-scenario-2019-2030>, IEA. Licence: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IEA (2023). Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IRENA (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf?rev=c9e8dfcd1b2048e2b4d30fef671a5b84 (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IRENA (2022). Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf?rev=460f190dea15442eba8373d9625341ae, (Erişim tarihi:15.08.2023)
- IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C.An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- İklim Şurası, Bilim ve Teknoloji Komisyonu Raporu, 2022
- Koçar, G., (2021). Enerji Bitkileri ve Biyoyakıt Üretimi, TÜBA –Biyokütle Enerjisi Çalıştay ve Paneli, 4 – 5, Kasım 2021
- Kougias, I., Aggidis, G., et al. (2019). “Analysis of emerging technologies in the hydropower sector”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 113, 109257, ISSN 1364-0321.

- Low Carbon Turkey (2021). Ab Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi Düzenleyici Etki Analizi Çalışması. URL: http://www.lowcarbonturkey.org/wpcontent/uploads/2019/05/LCDTR_KYDD_MevcutDurum_CaglarSinayuc.pdf, Haziran 2023
- MefCO2, (2019). <https://www.aspire2050.eu/mefco2> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Melskens, J., Van De Loo, B. W. H., Macco, B., Black L. E., Smit, S., Kessels, W. M. M. (2018). “Passivating Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells: From Concepts and Materials to Prospects,” IEEE J. Photovoltaics, vol. 8, no. 2, pp. 373–388.
- Mertoğlu O. (2020). TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli, “Dünyada ve Türkiye’de Jeotermal uygulamalar ve Teknolojiler”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 19 – 21 Şubat 2020.
- Mohaghegh, M. R., Heidari, M., Tasnim, S., Dutta, A., & Mahmud, S. (2021). Latest advances on hybrid solar–biomass power plants. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1-24.
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., and Heath G. (2013). Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. Technical Report NREL/TP-6A20-56290, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden (Colorado), USA, <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- ORCA (2021). <https://climeworks.com/roadmap/orca> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- Özata, İ. (2021), Türkiye’nin Biyokütle Enerji Potansiyeli, Mevcut Durumu ve Geleceği, TÜBA –Biyokütle Enerjisi Çalıştay ve Paneli, 4 – 5 Kasım 2021
- Pitchbook (2021). Annual Fintech Report, 2021
- Puricelli, S., Cardellini, G., Casadei, S., Faedo, D., Van den Oever, A. E. M., & Grosso, M. (2021). A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110398.
- PWC (2021). Türkiye ve Dünyada Güneş Enerjisi Sektörü, Aralık 2021, <https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/enerji/turkiye-ve-dunyada-gunes-enerjisi-sektoru-raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-04-5 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (Erişim tarihi:15.08.2023)

- Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An Overview Of Second Generation Biofuel Technologies. *Bioresource Technology*, 101(6), 1570-1580.
- Tarvydas D. (2022). Clean Energy Technology Observatory: Clean Energy Outlooks: Analysis and Critical Review – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/309952, JRC130719
- T. C. Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (2023). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
- The European Green Deal (COM(2019)640 final) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu (2022). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 46, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 35, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- TÜBA Jeotermal Enerji Teknolojileri Raporu (2020). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 41, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Jeotermal%20Enerji%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- TÜBA Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu (2019). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 28, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-R%C3%BCzg%C3%A2r%20Enerjisi%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)
- TÜBA-Temiz Kömür Teknolojileri Raporu (2018). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 25, Ankara, <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBATemiz%20K%C3%B6m%C3%BCr%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi:15.08.2023)

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). (Erişim tarihi:15.08.2023)

İnternet Siteleri

<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://www.hydropower.org/blog/six-emerging-hydropower-technology-trends> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://independent.boun.edu.tr/> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://www.nrel.gov/wind/publications.html> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2018/05/fb002.pdf> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://www.statista.com/statistics/668749/regional-distribution-of-solar-pv-module-manufacturing/> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> (Erişim tarihi: 15.08.2023)

https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (Erişim tarihi: 15.08.2023)

<https://turkiye.un.org/tr/sdgs> (Erişim tarihi: 15.08.2023)



TÜRKİYE CUMHURİYETİ CUMHURBAŞKANLIĞI
STRATEJİ VE BÜTÇE BAŞKANLIĞI

YÖNETİM HİZMETLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
BİLGİ VE BELGE YÖNETİMİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI

Ankara 2023

Necatibey Cad. No: 110/A 06570 Yücetepe - ANKARA
Tel: +90 (312) 294 50 00 • Faks: +90 (312) 294 52 98
ISBN NO: 978-625-8356-42-7

STRATEJİ VE BÜTÇE BAŞKANLIĞI YAYINLARI BEDELSİZDİR, SATILAMAZ.