

21. yüzyılın enerji kaynaklarının enerji dönüşümü çerçevesinde değerlendirilmesi

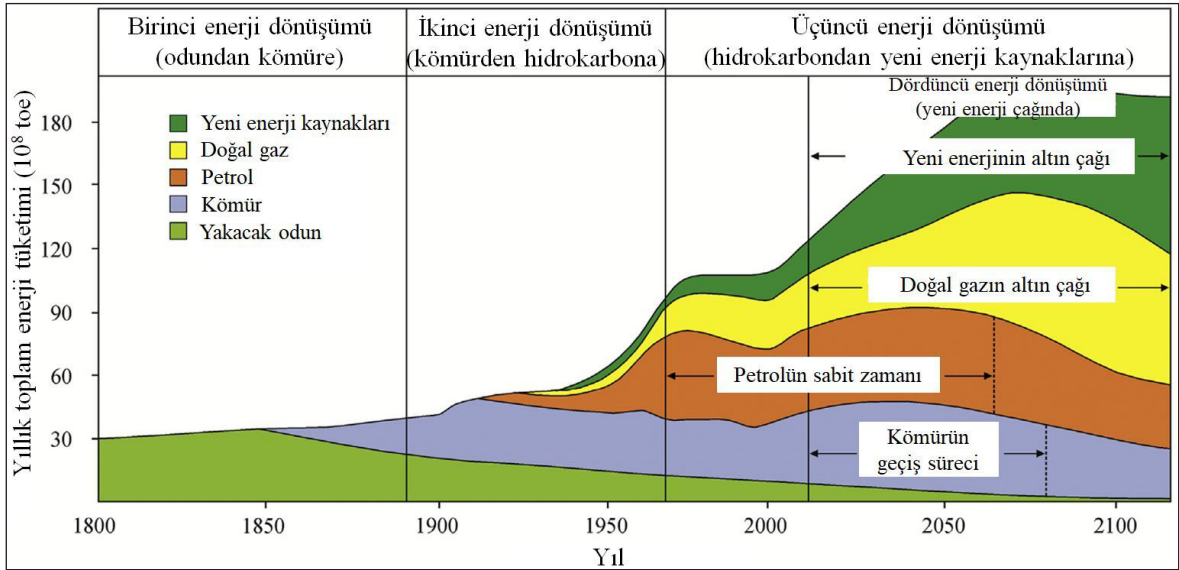
Deniz Yağmur KAYHAN¹

Öz

İklim değişikliğinin süregelen ve gelecekte de olabilecek potansiyel etkilerinin anlaşılması ile küresel sıcaklık artışının 1,5°C'de sınırlandırılması ve sera gazı emisyonlarında net sıfıra ulaşılması hedefleri belirlenmiş olup; çeşitli anlaşmalar, komisyonlar ve senaryolar ışığında duyurulmuştur. Geçmişte enerji ihtiyaçları odaklı olarak gerçekleşen enerji dönüşümlerinden farklı olarak, günümüzde iklim odaklı kaygılar daha etkin rol oynamaktadır. Dünyadaki çevresel ve ekolojik farkındalıklar, artan enerji talebi ve teknolojik gelişmelerle birlikte; yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz enerjiler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu makalede, 21. yüzyılın enerji kaynakları ve teknolojileri arasında gösterilen; jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar enerjisi, biyoenerji, nükleer enerji, karbon yakalama, kullanma ve depolama ile hidrojen kullanma ve depolamaya son yıllarda yayınlanmış küresel raporlardaki istatistiksel veriler eşliğinde değinilmiş olup; bu enerjilerin gereklilikleri, avantajları ve bazı teknik özellikleri aktarılmıştır. Türkiye'ye odaklanıldığında ise, Avrupa'da yenilenebilir enerjide en büyük artışı sağlayan yedi ülke arasında bulunması ile bu hususta dünyada iyi bir konuma sahip olduğu söylenebilir. Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde kullanılanlar arasında ilk üç sırada; hidroelektrik, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi yer almaktadır.

1. Giriş

Çeşitli sektörlerdeki hızlı, teknolojik ve bilimsel gelişmeler, enerji ve doğal kaynakların tüketim trendlerinde yıllar içerisinde gerçekleşen değişimler, iklim ve çevre konusundaki toplumsal kaygılar, enerji verimliliği, enerji talebi ve nüfus artışı gibi konular tarih boyunca enerji dönüşümünü zorunlu kılmıştır (Craig, 2022). Zou vd. (2016)'ne göre, enerji dönüşümünde odundan kömüre birinci enerji dönüşümü, kömürden diğer hidrokarbon kaynaklarına ikinci enerji dönüşümü ve hidrokarbondan yeni enerji kaynaklarına üçüncü enerji dönüşümü olmak üzere üç farklı dönüşüm dönemi bulunmaktadır (Şekil 1). Aynı zamanda, dördüncü enerji dönüşümünün de yeni enerji çağında olacağı öngörülmektedir. Geçmişte baktığımızda, ilkel insanlar kereste gibi malzemeleri; pişirme, ısınma ve diğer gerekli ihtiyaçlar için kullanmışlardır. Kömür madenciliklerinin gelişmesi ile yakacak odun temel enerji hammaddesi olarak geri planda kalmış ve kömür kullanımı artmıştır. Watt'ın 1769'da ilk buharlı makineyi geliştirmesi, kömürün birinci enerji hammaddesi olmasına temel hazırlamıştır (Zou vd., 2016). Kömürle çalışan ilk enerji santrali olan Holborn Viaduct Enerji Santrali 1882'de Londra'da açılmıştır (Anthony, 2017). Bu gelişme kömür endüstrisine ivme kazandırarak birinci enerji dönüşümüne (odundan kömüre geçiş) katkı sağlamıştır. 1886'da Daimler, yüksek petrol ve doğal gaz talebinin getirisi ile içten yanmalı motoru icat etmiştir. Sondaj ve yerbilimlerdeki



Şekil 1- Enerji dönüşümü trendlerinin ve öngörülerinin yıllara göre dağılımı (Zou vd., 2016'dan değiştirilmiştir).

¹Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Deniz Araştırmaları Dairesi Başkanlığı, Ankara.

diğer operasyonlar için, teknolojik gelişmelerle birlikte, hidrokarbon üretimi önemli ölçüde artmıştır. 1965 yılında, petrol ve doğal gazın enerjideki payı %50'yi geçerek, en çok kullanılan enerji kaynağı olarak kömürün yerini almıştır. Bu gelişme, ikinci enerji dönüşümünü (kömürden diğer hidrokarbonlara geçiş) sağlamıştır (Zou vd., 2016). M. King Hubbert tarafından, 1956 yılında, petrol üretim tahmini üzerine oluşturulan çan eğrisi olan Hubbert Eğrisi'nde petrol üretiminin bir tepe noktasına ulaştıktan sonra düşüş trendine gireceğinden bahsedilmektedir (Hubbert, 1956; Laherrère, 2000). Daha sürdürülebilir bir dünya ve düşük karbonlu enerjiye geçiş ise üçüncü enerji dönüşümünü (hidrokarbondan yeni enerji kaynaklarına geçiş) başlatmıştır. Geleneksel fosil yakıtların aksine; güneş, rüzgar, jeotermal, hidrojen enerjisi, karbon yakalama, kullanma ve depolama (carbon capture, utilization and storage, CCUS) gibi yeni enerji kaynaklarının birçoğu yenilenebilir ve doğal gaz, kömür ve petrole kıyasla daha az emisyonu sebep olması ile fosil yakıt enerjisi ile yeni enerji geçişi arasında bir köprü sağlayabilmektedir (Zou vd., 2016). Ayrıca, mevcut enerji geçişinin öncelikler gibi yenilikler ve piyasalar göz önünde bulundurularak gerçekleşmesinden ziyade, antropojenik iklim değişikliğine acil çözüm arayan yönetimlerin etkisinde gerçekleşmesi beklenmektedir (Gardiner vd., 2023). Bu gerekli geçişin sağlanabilmesi için de, enerji dönüşümünün temel adımları olan; fiziki altyapı, iklim politikası ve düzenleyici unsurları ile kapasiteleri öne çıkmaktadır (IRENA, 2023a).

2. 21. Yüzyılın Enerji Kaynakları

Üçüncü enerji dönüşümünde bahsi geçen enerji kaynakları; yenilenebilir (nükleer enerji hariç) (Raza vd., 2016), sürdürülebilir ve temiz enerji odaklı kaynaklardır. Net-sıfır karbon emisyonuna ulaşabilmek ve küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında (yaklaşık 1,5°C'de) tutabilmek için gerekli olan hedefleri destekleyen ve Birleşmiş Milletler'in oluşturduğu sürdürülebilir kalkınma amaçlarına (küresel amaçlar veya sustainable development goals, SDG) uygun olan bu kaynak ve teknolojilerin günümüzde öneminin arttığı görülmekte ve gelecekte de kullanımının artması beklenmektedir. Bu enerji kaynakları ve teknolojileri arasında jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar enerjisi, biyoenerji, nükleer enerji, CCUS ile hidrojen kullanma ve depolama öne çıkmaktadır. Bahsi geçen kaynaklar, SDG'lerden öncelikli olarak SDG7 (Erişilebilir ve temiz enerji), SDG13 (İklim eylemi), SDG12 (Sorumlu üretim ve tüketim) ve SDG9 (Sanayi, yenilikçilik ve altyapı) olmak üzere birçok SDG'yi desteklemektedir (Kayhan, 2022).

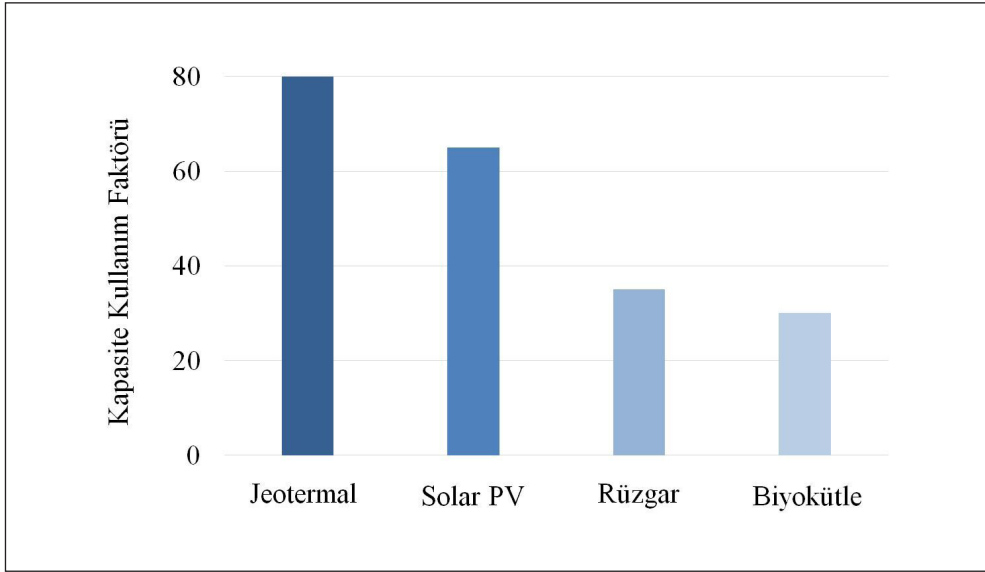
2.1. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerindeki termal enerjiden oluşur ve yüzeye su ve buhar yolu ile taşınabilir. Jeotermal enerji kaynakları, genellikle tektonik ve volkanik olarak aktif jeolojik alanların yakınında bulunmaktadır. İzlanda, Yeni Zelanda, Filipinler ve El Salvador gibi ülkeler bu enerjiyi elektrikte önemli bir pay sahibi olarak kullanmaktadır. Elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma gibi birçok amaç için kullanılabilir (IRENA, 2020a). Günümüzde, toprak kaynaklı ısı pompası teknolojisi (ground source heat pump, GSHP) ve geliştirilmiş jeotermal sistemler (enhanced geothermal systems, EGS) gibi jeotermal enerji elde etmek amacıyla kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Robbins, 2020). EGS'de jeotermal kaynakların işletilmesi için hidrolik çatlatma yöntemi kullanılmaktadır (McClure ve Horne, 2014).

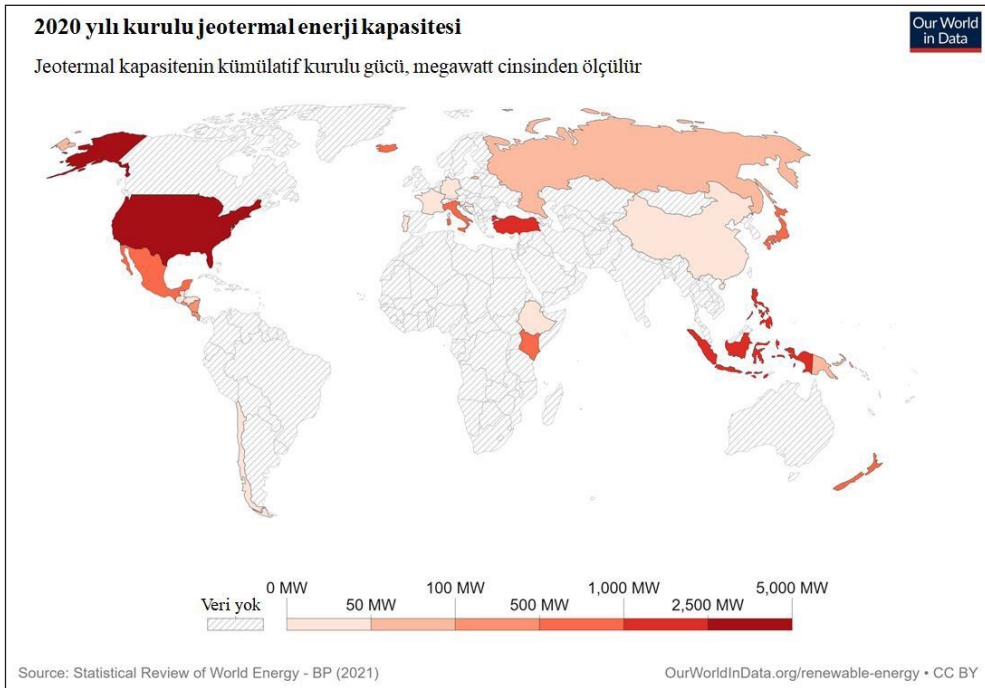
Jeotermal enerji, temiz hava standartlarını karşılayabildiği için oldukça avantajlıdır. Azot oksit (NO_x) emisyonuna sebep olmaz; çok düşük seviyede karbondioksit (CO_2), kükürt dioksit (SO_2), hidrojen sülfür (H_2S) gibi sera gazlarının salınımına yol açabilir (U.S. Department of Energy, t.y.a). Ayrıca, jeotermal enerji santrallerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları genellikle rezervuarların jeolojik yapısından kaynaklanmaktadır (Fridriksson vd., 2017). Bütün bunların yanında, jeotermal enerji santrallerinin sebep olduğu karbon ayak izi fosil yakıtlara kıyasla düşüktür (GreenMatch, 2021; TWI, t.y.).

Jeotermal enerji, güvenilir bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş/solar fotovoltaikleri (photovoltaics, PV), rüzgar türbinleri ve biyoenerjiden farklı olarak; güneş, rüzgar ve biyokütle gibi belirli koşullara ihtiyaç duymadığından yıl boyunca kullanılabilir (Anderson ve Rezaie, 2019; GreenMatch, 2021). Bu durum, güneş PV, rüzgar ve biyokütlenin sırasıyla 65, 35 ve 30 kapasite kullanım faktörlerine sahip olmasına rağmen, jeotermal enerjinin kapasite kullanım faktörünün 80 olması ile açıklanmıştır (Şekil 2). Ayrıca, jeotermal sistemleri nispeten daha uzun ömürlüdür (genellikle 25 ila 50 yıl arası) (GreenMatch, 2021). Ancak, jeotermal enerji konuma özgü bir enerji olduğundan, santrallerinin bu enerjinin erişilebilir olduğu yerlerde inşa edilmesi gerekmektedir (TWI, t.y.).

2020 yılında dünyanın kurulu jeotermal kapasitesi 14.075 MW olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu kapasiteler zaman içinde artan trendlere sahiptir (IRENA, 2020a; Our World in Data, 2021). Ayrıca, Miranda-Barbosa vd. (2017), jeotermal enerjinin diğer enerji teknolojileri ile birleştirilmesi ile daha faydalı hale getirilebileceğine değinmiştir.



Şekil 2- Çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirlik faktörü (GreenMatch, 2021'den yeniden çizilmiştir).



Şekil 3- 2020 yılında dünyanın kurulu jeotermal enerji kapasitesi (megavat, MW cinsinden) (Our World in Data, 2021'den değiştirilmiştir).

Karbon yakalama ve depolamanın (carbon capture and storage, CCS) jeotermal enerji ile birleştirilmesinin, CO₂ emisyonlarında azalma, inşaat maliyetlerinde azalma ve ısı transferi için su yerine CO₂ kullanılmasını sağlayabileceği için daha avantajlı olduğunu belirtmiştir.

2.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneş ışığının kullanılabilir enerji formlarına dönüştürülmesi ile elde edilmektedir. Bu teknolojinin örnekleri arasında güneş/solar PV, güneş enerjisiyle soğutma ve ısıtma ile güneş enerjisiyle termal elektrik üretimi gösterilebilir (IEA, 2022a).

Güneş enerjisi, çeşitli yöntemler ile üretilebilmektedir. Bu yöntemlerden biri güneş pilleri olarak da adlandırılan PV'dir. Solar PV'ler, 1954 yılında Bell Telefon Laboratuvarları'nda icat edilmiştir ve güneş ışığını elektrığe çeviren cihazlardır. Günümüzde modern PV, yenilenebilir enerjilerde en hızlı büyüyen alanlardan birisidir. Solar PV, enerji nakil hatlarından uzakta yaşayan insanlar için elektrığe erişmek üzere mini şebekelere güç sağlamak için kullanılabilir. Bir diğer yöntem ise yoğunlaştırılmış güneş enerjisidir (concentrated solar power, CSP). Bu teknolojide, güneş ışınlarını yoğunlaştırmak için aynalar yer alır ve büyük ölçekli enerji santrallerinde elektrik üretmek için kullanılabilir bir yöntemdir (IRENA, 2020b). Parabolik oluk, güç kulesi ve çanak motor gibi farklı sistemlere sahiptir (U.S. Department of Energy, t.y.b).

Solar PV üretimi 2020'de 821 TWh'ye ulaşmıştır ve dünyada elektrik üretmek için en düşük maliyetli seçenek olarak değerlendirilmektedir. Şekil 4'te yenilenebilir enerjilerin 2020-2026 yılları arasındaki yıllık kapasiteleri verilmiştir (IEA, 2021a). IEA (2021b)'ye göre, dağıtılmış ve şebeke ölçeğindeki PV'lerin, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla 2026 yılına kadar en yüksek paya sahip olacakları öngörülmektedir.

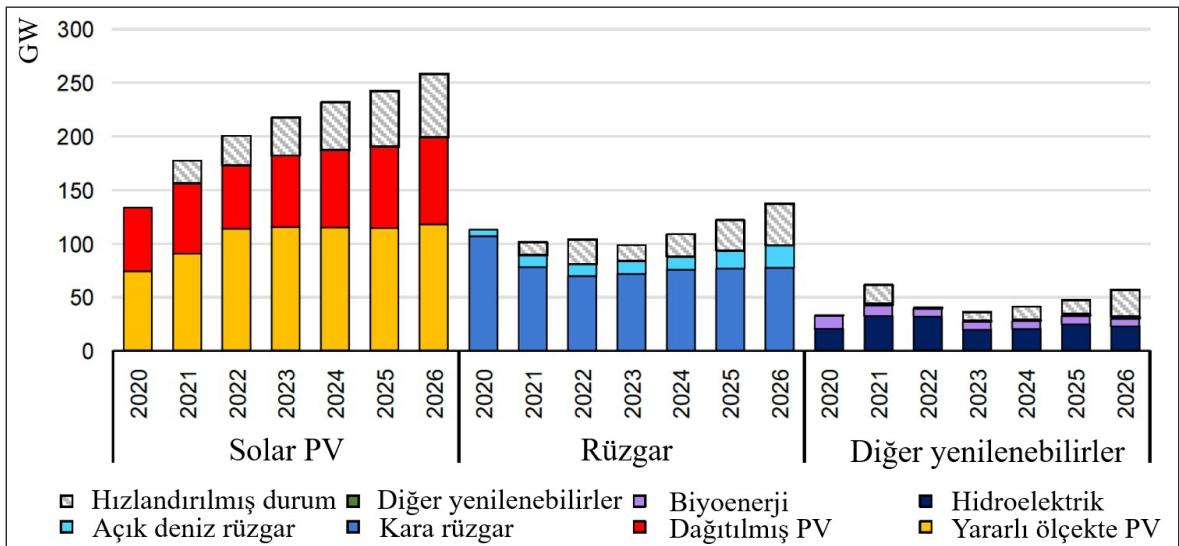
2.3. Hidroelektrik

Hidroelektrik, elektrik üretmek için hareketli suyun doğasını kullanır. Hidroelektrik enerjinin çalışma prensibi; yükselti farklılıklarını kullanarak elektrik üreten baraj veya derivasyona dayanmaktadır. Birçok yenilenebilir enerji kaynağına kıyasla nispeten az maliyetlidir. Ayrıca; su temini, sulama desteği ve taşkın kontrolü için de avantajlıdır

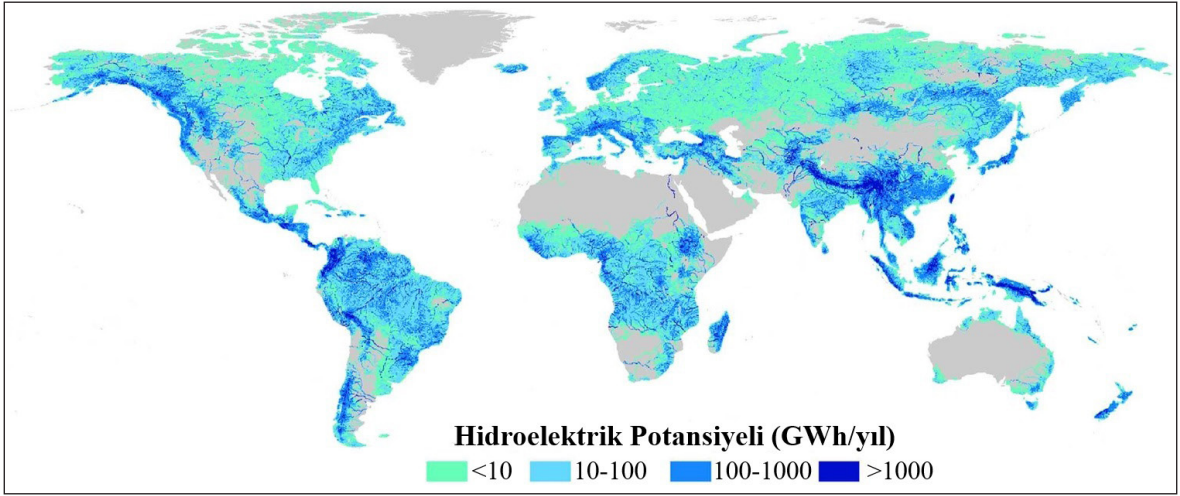
(U.S. Department of Energy, t.y.c). Konvansiyonel hidroelektrik üretiminde temelde üç tip teknoloji mevcuttur. Bunlar; su tutma veya rezervuar, nehir tipi ve pompaj depolamalı hidroelektriktir (pumped storage hydropower, PSH) (IRENA, 2023b). Dünyanın hidroelektrik potansiyeli dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Hidroelektrik kapasite artışı 2020'de 12,1 GW ile en fazla Çin'de gerçekleşmiştir (IEA, 2021c). 2021'de küresel hidroelektrik üretimi 15 TWh azalarak (%0,4 düşüş ile) 4.327 TWh olmuştur. Üretimdeki bu düşüşe; Brezilya, Amerika Birleşik Devletleri, Türkiye, Çin, Hindistan ve Kanada gibi hidroelektrik açısından zengin ülkelerde yaşanan kuraklık ile normalden daha düşük hidroelektrik üretimi sebep olarak gösterilmiştir (IEA, 2022b).

Hidroelektrik, düşük karbonlu elektrığın en büyük kaynağıdır. 2020'de küresel elektrik üretiminin altıda birini (kömür ve doğal gazdan sonra), neredeyse 4.500 TWh ile nükleerden %55 daha fazla olacak şekilde, üretim karşılayan hidroelektrik teknolojileri, dünyanın ana düşük karbonlu elektrik üretim kaynağıdır ve diğer tüm yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazlasını üretmektedir (Şekil 6). Hidroelektrik, 1990'larda küresel elektrik üretiminin %17-19'unu oluştursa da; artan rüzgar ve güneş kapasiteleri ve doğal gaza dayalı elektrik üretiminin büyümesi nedeniyle 2000'lerin başından bu yana biraz düşerek yaklaşık %17'ye gerilemiştir (IEA, 2021d).

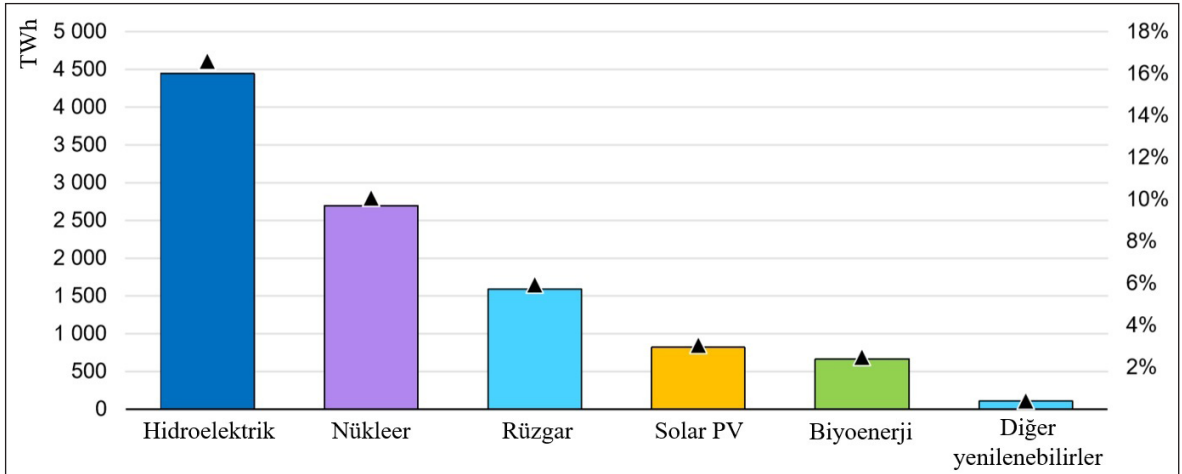
Hidroenerji ve okyanus enerjisi içerisinde bir alt başlık olarak gelgit enerjisinden de bahsedilebilir. Gelgit enerjisi; Güneş, Dünya ve Ay arasındaki yerçekimi etkisi nedeniyle gelgitlerin doğal yükselişi ve düşüşü yoluyla üretilir. Elektrik dahil faydalı



Şekil 4- 2020 ile 2026 yılları arasında yenilenebilir enerjilerde yıllık kapasite değişimleri (IEA, 2021a'dan değiştirilmiştir).



Şekil 5- Dünyadaki hidroelektrik potansiyeli dağılımı (Hoes vd., 2017'den değiştirilmiştir).



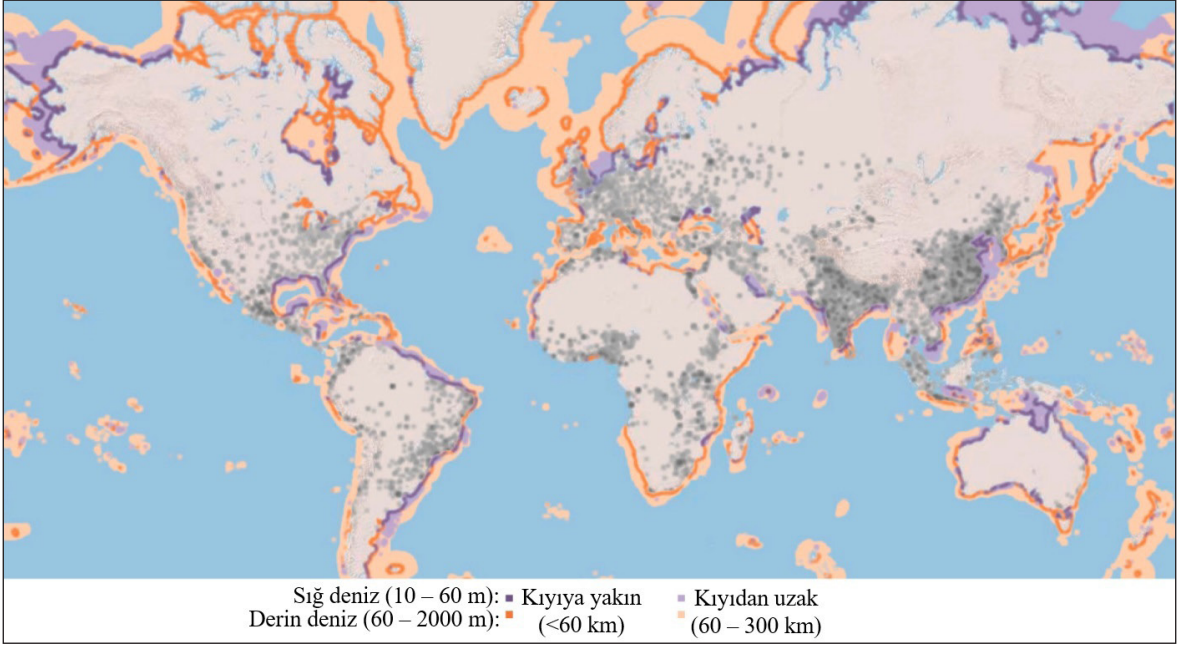
Şekil 6- 2020 yılında teknolojiye göre düşük karbonlu elektrik üretimi ve küresel elektrik arzındaki payları (IEA, 2021'den değiştirilmiştir).

formlara dönüştürülebilir. Su, havadan daha yoğun olduğu için rüzgar enerjisinden bile daha güçlüdür. Bu nedenle, aynı türbin çapı ile daha fazla güç üretebilmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojinin nispeten yüksek maliyeti ve coğrafi sınırlamaları en büyük dezavantajlardır (PNNL, 2021). Gelgit enerjisi barajı ve gelgit türbini olarak farklı türleri bulunmaktadır (EIA, 2021).

2.4. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisinde, hareket halindeki havanın kinetik enerjisi kullanılarak elektrik üretilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinde rüzgar, kinetik enerjinin dönme enerjisine dönüştürülmesini sağlar. Bu dönme enerjisi jeneratöre aktarılır ve elektrik enerjisi üretilir. Rüzgar, hem karada hem de denizde küresel olarak enerji üretimi için yüksek potansiyele sahiptir (Şekil 7) (IRENA, 2023c). 2021'de kurulu toplam 830 GW'lık rüzgar enerjisi kapasitesinin %93'ü

karadaki sistemlerden, kalan %7'si ise açık denizdeki rüzgar santrallerinden gelmektedir. Kara rüzgar sistemleri dünya çapında 115 ülkede mevcut olan gelişmiş bir teknolojidir. Açık deniz rüzgar sistemleri ise sadece 19 ülkede mevcut kapasite ile genişlemenin ilk aşaması olup, önümüzdeki yıllarda sayılarının artması beklenmektedir (IEA, 2022c). Rüzgar enerjisi özelinde ülkelere odaklanıldığında; Çin 2018'de 20,6 GW, 2019'da 26,1 GW ve 2020'de 71,7 GW ile en büyük rüzgar kapasitesi ilavesine sahip ülkedir. Çin'i sırasıyla 2020'de 16,9 GW ile Amerika Birleşik Devletleri, 11,1 GW ile Avrupa Birliği ve Birleşik Krallık takip etmektedir (IEA, 2021e). 2021'de rüzgar üretimi büyümesinin neredeyse %70'ini Çin sağlarken, onu %14 ile ABD ve %7 ile Brezilya izlemiştir. Avrupa Birliği, 2020 ve 2021'deki rekor kapasite artışına rağmen, alışılmadık derecede uzun süreli düşük rüzgar koşulları nedeniyle 2021'de rüzgar enerjisi üretiminde %3 oranında düşüş yaşamıştır (IEA, 2022c).



Şekil 7- Denizlerde rüzgar potansiyeli haritası (IEA, 2019a’ dan değiştirilmiştir).

2.5. Biyoenerji

Biyoenerji, biyokütle olarak bilinen, bitki ve alg bazlı organik maddelerden elde edilebilen enerji çeşididir. Tarımsal ürün kalıntıları, ormancılık artıkları, mikroalgler, evsel, endüstriyel ve ayrıştırılmış katı atıklar ile odunsu bitkiler bu organik maddelere örnek olarak gösterilebilmektedir (U.S. Department of Energy t.y.d.,e). Modern biyoenerji, yenilenebilir enerjinin %55’ini ve küresel enerji arzının %6’sından fazlasını oluşturarak, dünyadaki en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur. Biyokütle, geleneksel kullanımının yanı sıra; sıvı biyoyakıt, biyogaz, elektrik ve ısınma, endüstri gibi farklı alanlarda da kullanılabilir. Aynı zamanda, gelecek senaryolarında kırsal bölgelerde geleneksel kullanımının yerini biyogaz çözümler, ile biyoetanol gibi daha yeni yöntemlere bırakacağı öngörülmektedir (IEA, 2022d).

Biyoenerji ve biyokütle bazlı enerji ürünleri geniş çeşitliliğe sahiptir ve örnek olarak Peter vd. (2022)’nin mikroalglerin bu çeşitlilikteki önemi ile ilgili çalışmasına değinilebilir. Bu çalışmaya göre, mikrobiyal yakıt hücresi ile biyoelektrik, transesterifikasyon ile biyodizel, mikroalg biyokütlesinin biyokimyasal dönüşümü ile biyogaz, biyoetanol ve biyohidrojen, termokimyasal dönüşümü ile elektrik, sentez gazı (syngas), biyo-yağ ve odun kömürü üretilebilir (Peter vd., 2022). Forsberg vd. (2021) ise, sıvı fosil yakıtların büyük ölçekli nükleer biyorafinerlerde üretilebilmesine değinmiştir. Bu ve benzeri sistemlerin temel gerekliliği

ise lignoselülozik malzemeler gibi biyokütle hammaddeleri (enerji kaynağı olan, atmosferdeki CO₂’yi azaltan ve yakılarak CO₂ oranını artırmayan) ve yaklaşık günlük 250.000 varile eşdeğer üretim kapasitesindeki büyük ölçekli üretim tesisleri ve gerekli hidrojen ve ısı için nükleer enerjinin mevcut olmasıdır. Bu sistem, yalnızca sıvı biyoyakıtların değil, aynı zamanda anaerobik çürütme ile biyometan (yenilenebilir doğal gaz), yavaş ve hızlı piroliz ile sıvı biyo-yağlar ve katı peletler gibi bazı ara ürünlerin üretimine de imkan sağlayabilmektedir (Forsberg vd., 2021).

Biyoenerji, aynı zamanda başka yenilenebilir enerji teknolojileri ile de birleştirilerek uygulanma imkanına sahiptir. Örnek olarak; biyoenerji ile CCS’nin bir arada kullanımı, CO₂’nin biyojenik bir kaynaktan yakalandığı ve kalıcı olarak depolandığı herhangi bir enerji yolunu içerir. Güncel olarak, özellikle biyoetanol uygulamalarında yılda yalnızca yaklaşık 2 Mt biyojenik CO₂ tutulmaktadır ve 2030’a kadar 40 Mt CO₂/yıla ulaşması hedeflenmektedir (IEA, 2022e).

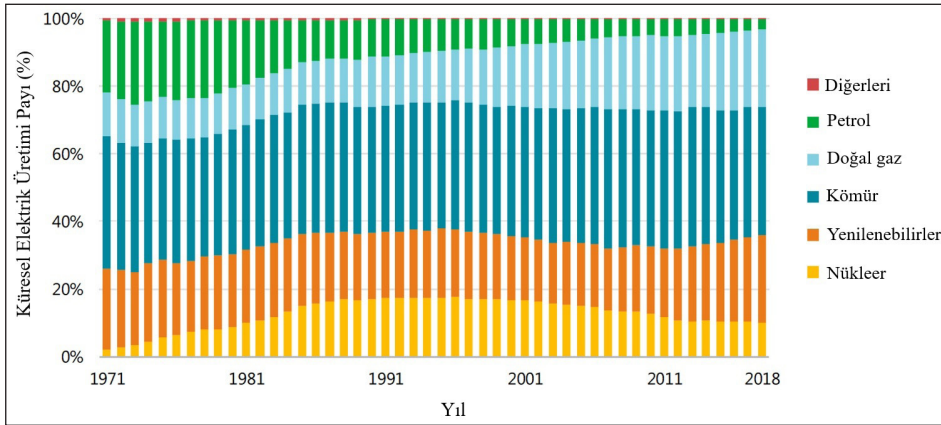
2.6. Nükleer Enerji

Nükleer enerji, atomların çekirdeklerinden elde edilen enerji şeklidir. Bu enerji iki yöntem ile üretilebilmektedir: Fiyon-atom çekirdeklerinin birkaç parçaya ayrılması veya füzyon-atom çekirdeklerinin bir araya gelmesi. Nükleer enerji santrallerinde, nükleer reaktörler ve ekipmanları, fiyon yoluyla ısı üretmek için en yaygın olarak uranyum-235 ile

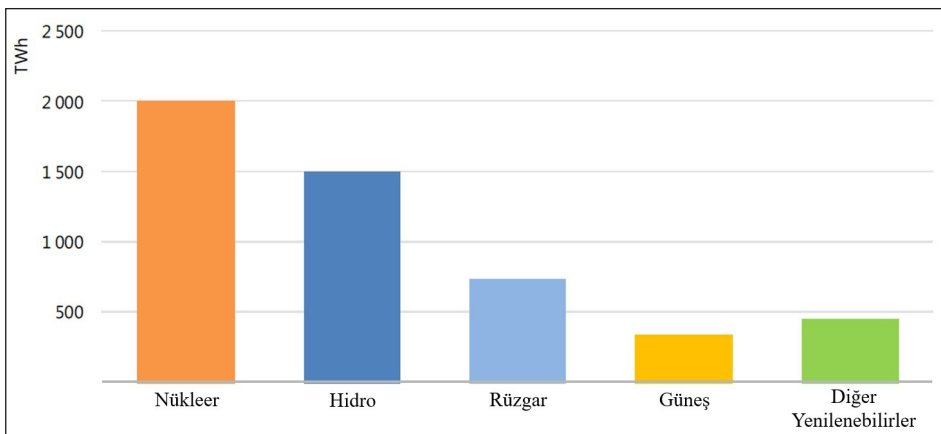
beslenen zincirleme reaksiyonları kullanır ve kontrol eder. Isı, buhar üretmek için reaktörün soğutma maddesi olan suyu ısıtır. Buhar, düşük karbonlu elektrik üretmek için elektrik jeneratörünü harekete geçirerek türbinleri döndürmek için kanalize edilir (IAEA, 2022).

Nükleer enerji, 2020 yılında küresel elektrik üretiminde yaklaşık %10'luk bir paya sahiptir (IEA, 2022f). 1990'lı yılların sonunda bu hususta %18'lik bir pay oluştursa da, 2000-2018 yılları arasında düşüş trendi göstermektedir (IEA, 2022g) (Şekil 8). Bu azalan orana rağmen nükleer enerji, hidroelektrikten sonra ikinci en büyük düşük emisyonlu elektrik kaynağıdır ve gelişmiş ekonomilerde lider kaynaktır (IEA, 2022f). 2018 yılına bakıldığında, gelişmiş ekonomilerdeki düşük karbonlu elektrik üretiminin %40'ını sağlaması ile bu hususta en yüksek paya sahip elektrik kaynağı olmuştur (Şekil 9). Nükleer enerji, son 50 yılda 55 Gt CO₂ emisyonunu önleyerek temiz enerji geçişlerinde de önem arz etmektedir (IEA, 2019b). Çin'de ilk deneysel toryum bazlı nükleer reaktör 2021 yılında kurulmuştur. Gobi Çölü'nde kurulan bu deneysel reaktör başarıya ulaşırsa, 100.000'den

fazla hane için elektrik üretiminin hedeflendiği yeni bir reaktör inşa edilmesi planlanmaktadır. Toryumun baskın nükleer yakıt olan uranyuma kıyasla daha bol bulunabilen ve verimli bir alternatif olması bu gelişmelerde önemli rol oynamaktadır (IAEA, 2023). Erimiş tuz reaktörü (molten salt reactor, MSR), basınçlı su reaktörü (pressurized water reactor, PWR), kaynar su reaktörü (boiling water reactor, BWR) gibi toryum bazlı nükleer reaktör çeşitleri bulunmaktadır (IAEA, 2012, t.y.). Bazı ülkeler, kamuoyu ve güvenlik endişeleri nedeniyle nükleer santralleri kapatmayı planlarken, on dokuz ülkede yeni nükleer santrallerin inşası devam etmektedir (BBC News, 2021; Blenkinsop, 2021; IEA, 2022g). Bu durum, nükleer enerjinin geleceği konusunda belirsizliğe yol açmaktadır. Ayrıca, bazı modern yenilenebilir enerjiler ve doğal gaz, nükleer enerjiye kıyasla nispeten ekonomik ve hızlı alternatifler sunmaktadır (IEA, 2022g). Sonuç olarak, nükleer enerji net-sıfır emisyon yolculuğu için iyi bir kaynak oluştururken, aşılması gereken ekonomik ve teknik zorlukların varlığı ile tüm ülkelerin nükleer enerjiyi bir seçenek olarak takip etmeyeceği tahmin edilmektedir (IEA, 2022f).



Şekil 8- Enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki payı (IEA, 2019b'den değiştirilmiştir).



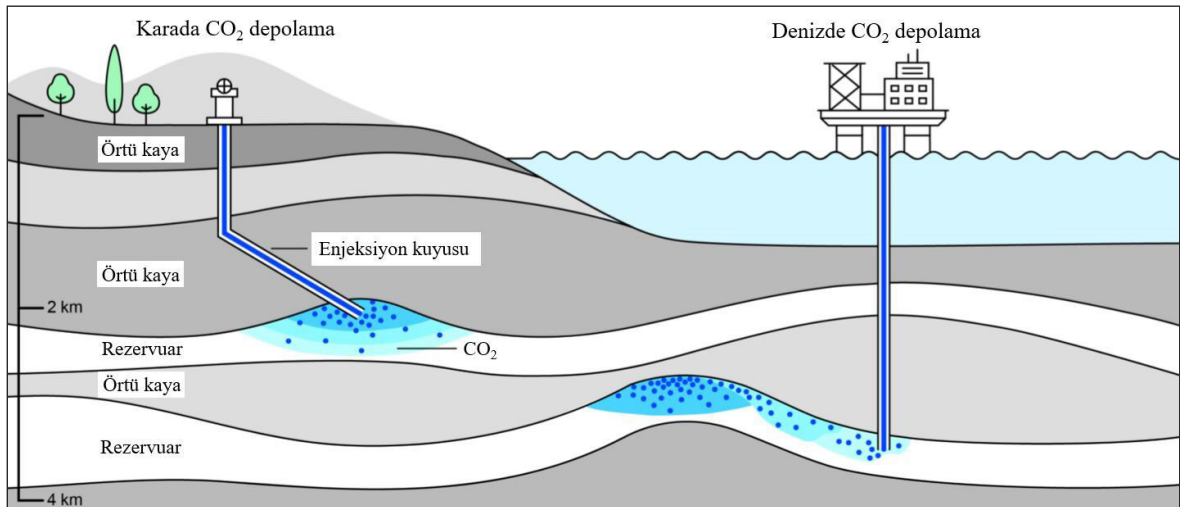
Şekil 9- 2018'de gelişmiş ekonomilerdeki düşük karbonlu elektrik üretimi (IEA, 2019b'den değiştirilmiştir).

2.7. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama

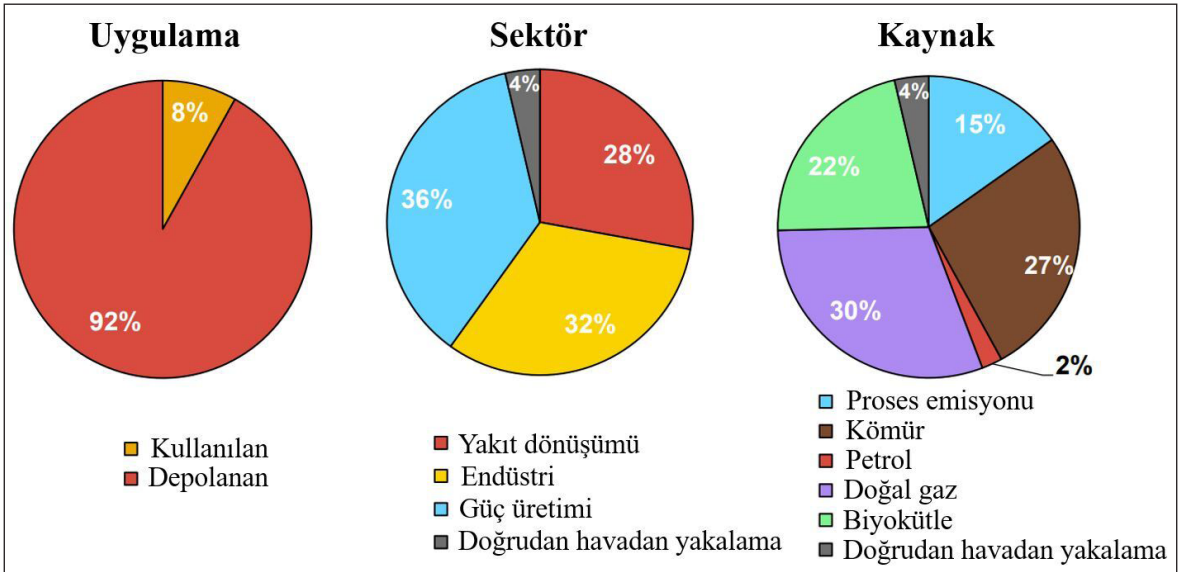
CCUS teknolojisi, 1970'lerden bu yana fosil yakıt endüstrisinde gelişmiş petrol geri kazanımı (enhanced oil recovery, EOR) amacıyla yeraltına CO₂ enjeksiyonu ile uygulanmaktadır. İlk kez EOR amacı dışında, sera gazı emisyonlarını azaltma amacıyla geliştirilen CO₂ depolama projesi, 1996 yılında Norveç'teki Slepner gaz sahasında devreye alınmıştır (IEA, 2022h). CCUS temelde dört adımdan oluşmaktadır. Bunlar, CO₂'nin yakalanması; projenin ölçeğine göre boru hattı, gemi, demiryolu veya kamyon ile CO₂'nin taşınması; fayda sağlayacak ürünlerde karbon geri dönüşümü yoluyla CO₂'nin kullanımı ve derin yeraltı jeolojik sahalarda CO₂ depolanmasıdır (Kayhan, 2022). Bu jeolojik sahalarda, yüzeye doğru gaz sızıntısını engelleyen, düşük geçirgenlikli örtü kaya ile kaplanmış, yüksek gözenekliliğe ve geçirgenliğe sahip akifer ve tüketilmiş hidrokarbon rezervuarları ile düşük geçirgenlik ve uzun vadeli yeraltı stabilitesi sağlayan tuz yapılarında kapanılmayı içermektedir (Tarkowski vd., 2021). Belirtilen derin yeraltı sahalarda CO₂ enjeksiyonu karada ve denizde uygulanabilmektedir (Şekil 10). Tipik olarak, CO₂ yoğun fazda, yüksek basınca sahip (> 100 bar) 800 m'den derin yeraltı alanlarına enjekte edilebilir. Rezervuar içerisinde yüksek sıcaklık ve basınçtaki CO₂, süperkritik akışkan (supercritical fluid) gibi davranır (sıvı gibi yoğun ancak gaz gibi düşük viskoziteli). Bu durum, depolama alanını efektif kullanabilme imkanı sağlamaktadır (IEA, 2022h). Biyoenerji ile karbon yakalama ve depolama (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) ve doğrudan havadan karbon yakalama ve depolama (direct air capture with carbon capture and storage, DACCS) gibi çeşitli karbon yakalama ve depolama

teknikleri bulunmaktadır ve petrol, inşaat, elektrik, demir-çelik, hidrojen, kağıt, kimya gibi birçok sektörde de uygulanma yöntemleri mümkündür (IEA, 2011, 2019c, 2020, 2022e, h, i, j; ICRLP, 2018; Patrizio vd., 2021). Bu sektörlerden özellikle de hidrojen depolama çeşitli çalışmalarda ayrı başlıkta, yeni hidrojen teknolojileri ile birleştirilerek, ele alınabilmektedir (IEA, 2019d, 2022j; OIES, 2023).

2022 yılında küresel olarak faaliyette olan CCUS'yi endüstriyel süreçlere, yakıt dönüşümüne ve enerji üretimine uygulayan yaklaşık 35 adet ticari tesis bulunmaktadır. Bu tesislerin yıllık toplam CO₂ yakalama potansiyeli yaklaşık 45 Mt'dur. Proje geliştiricileri, 2030 yılına kadar faaliyete geçecek ve yılda 220 Mt'dan fazla CO₂ yakalayacak 200'den fazla yeni karbon yakalama tesisi için hedeflerini açıklamışlardır. Günümüzde, operasyonel aşamada olan CO₂ tutma kapasitesinin yaklaşık %65'i, en düşük maliyetli CO₂ yakalama uygulamalarından biri olan doğal gaz işleme tesislerinde bulunmaktadır. Belirlenen proje planları ışığında 2030 yılına kadar yıllık CO₂ yakalama kapasitesinin hidrojen üretiminden yaklaşık 70 Mt, elektrik üretiminden 70 Mt ve endüstriyel tesislerden (çimento, çelik ve kimyasallar) 20 Mt olması öngörülmektedir (IEA, 2022i). IEA (2020)'de verilen grafiklere göre, sürdürülebilir kalkınma senaryosunda 2020-2070 yılları arasında depolanan küresel kümülatif CO₂'nin %92 ile kullanılan CO₂'den (%8) büyük bir farkla fazla olacağı, sektörel olarak sırasıyla; güç üretimi, endüstri ve yakıt dönüşümünün büyük paya sahip olacağı, ve CO₂ kaynağı olarak doğal gaz, kömür, biyokütle ile prosten elde edilen emisyonun en yüksek pay sahibi olacağı öngörülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10- Karada ve denizde CO₂ enjeksiyon kuyularının gösterimi (IEA, 2022h'den değiştirilmiştir).



Şekil 11- Sürdürülebilir kalkınma senaryosuna göre 2020-2070 yılları arasında uygulamaya, sektöre ve kaynağa göre küresel kümülatif CO₂ oranları (IEA, 2020'den değiştirilmiştir).

2.8. Hidrojen Kullanma ve Depolama

Hidrojen, enerji dönüşümüne iki temel noktada katkı sağlayabilmektedir. Birincisi, hidrojenin mevcut uygulamalarında daha temiz ve alternatif enerji kaynaklarından elde edilmiş hidrojenin kullanılması, ikincisi ise hidrojenin günümüzde kullanılan yakıtlara alternatif olarak yer alması ve bu uygulamalarda elektriğin daha çok kullanılmasına tamamlayıcı olarak görev almasıdır. Bu ikinci durumda; ulaşım, elektrik, ısıtma ve çelik üretimi gibi alanlarda hidrojen saf haliyle kullanılabilir ya da sentetik metan, sentetik sıvı yakıtlar, amonyak ve metanol gibi hidrojen bazlı yakıtlara dönüştürülebilirler. Endüstri için hidrojen talebi 1975'ten günümüze kadar üç kat artmıştır. Saf haldeki hidrojene olan talep yılda yaklaşık 70 milyon ton'dur (IEA, 2019d). Sanayi alanında, çoğunlukla su elektrolizinden ve CCUS uygulamalarının eşlik ettiği fosil yakıtlardan hidrojen üretimi projeleri ön plana çıkmaktadır. Düşük emisyonlu hidrojen, özellikle Avrupa'da fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmanın bir yolu olarak gösterilmektedir (IEA, 2022j).

Günümüzde yeşil hidrojen ve mavi hidrojen terimleri ön plana çıkmaktadır. Yeşil hidrojen, suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojendir. Bu yöntem ile sadece hidrojen ve oksijen üretilmektedir. Hidrojen gerekli uygulamalar için kullanılırken, oksijen de hiçbir olumsuz etkiye sebep olmadan atmosfere salınabilir. Yeşil hidrojen üretmeye yönelik olan süreç, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları tarafından da desteklenmektedir.

Mavi hidrojen, buhar-metan reformasyonu (steam methane reforming, SMR) veya otomatik termal reformasyon (auto thermal reforming, ATR) yolu ile; suyun hidrojen ve CO₂'ye ayrıştırılmasını ve CO₂'nin yakalanıp depolanmasını ifade etmektedir. Bu husustan dolayı, CCUS ile işbirliği içerisinde ilerleyen bir süreçtir. Diğer terimsel ifadeler olan; gri, pembe ve sarı hidrojene bakıldığında ise gri hidrojen uzun yıllardır üretilmektedir. Mavi hidrojene benzer şekilde SMR veya ATR yoluyla üretilmesine rağmen gri hidrojende ayrıştırılan CO₂ atmosfere salınmaktadır. Pembe hidrojen, yeşil hidrojene benzer olarak elektroliz yoluyla üretilirken güç kaynağı olarak nükleer enerji kullanılmaktadır. Sarı hidrojen ise elektroliz yoluyla üretilen bir diğer hidrojendir ve güneş enerjisi yoluyla elde edilmektedir. Gelecek için oluşturulan hedef, gri hidrojenden yeşil ve mavi hidrojene geçiştir (Petrofac, t.y.).

3. Türkiye'de 21. Yüzyılın Enerji Kaynakları

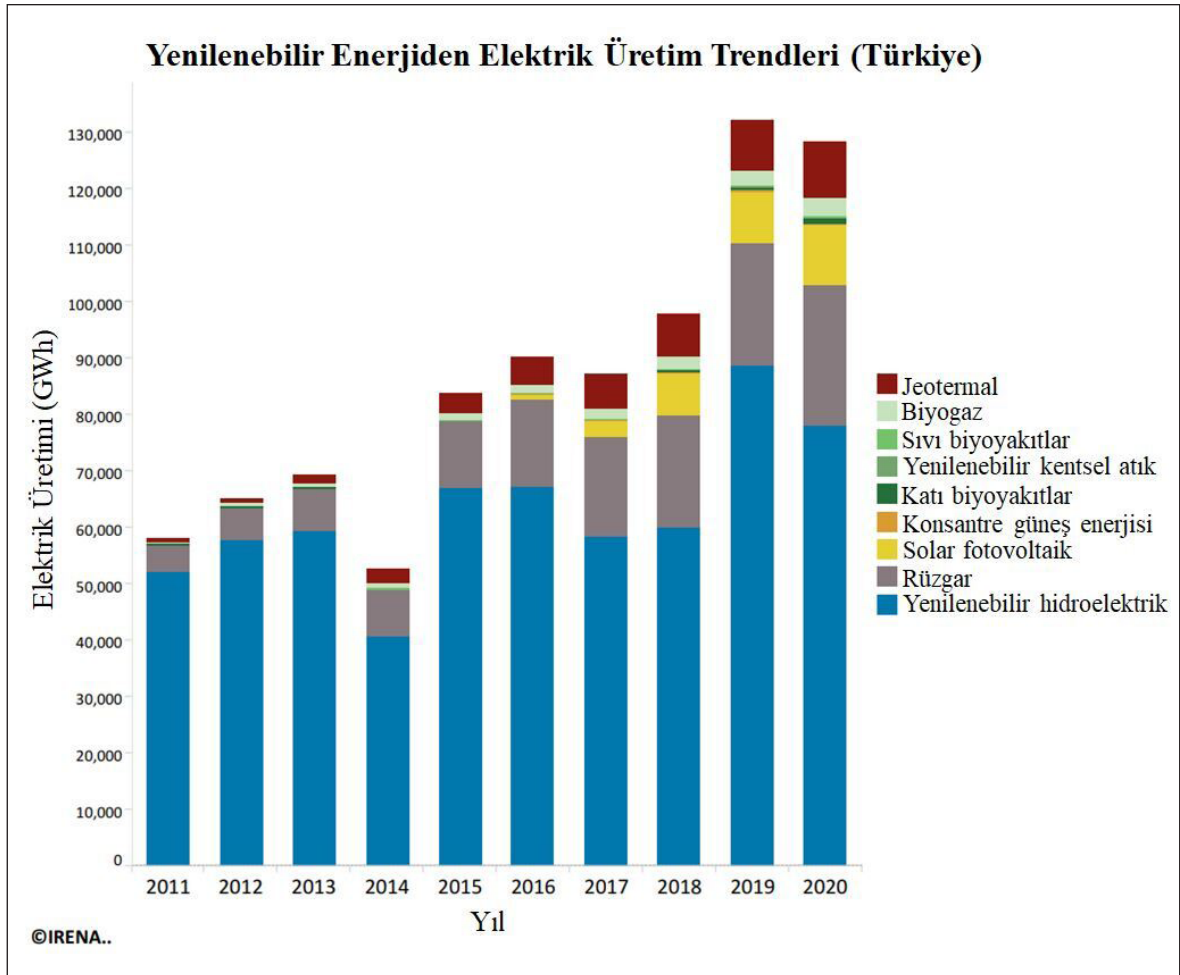
Türkiye yenilenebilir enerjide Birleşik Krallık, Almanya, Fransa, İspanya, Hollanda ve Polonya ile birlikte Avrupa'daki artışın dörtte üçünü karşılayan yedi ülke arasında yer almaktadır (IEA, 2023). Türkiye'nin toplam yenilenebilir enerji kapasitesi 2021 yılında 55.943 MW olmuştur (IRENA, 2023d). Türkiye'de yenilenebilir enerjiden elektrik üretim trendlerine odaklanıldığında, 2020 yılında yenilenebilir hidroelektrik 78,094 GWh ile ilk sırayı almaktadır. Onu sırasıyla rüzgar enerjisi 24,828 GWh, güneş enerjisi 10,950 GWh, jeotermal enerji 10,028 GWh, biyoenerji 4,389 GWh izlemektedir

(IRENA, 2022) (Şekil 12). Avrupa'daki hidroelektrik kapasite artışına Türkiye çoğunlukla sıfırdan inşa edilen rezervuar kurulumları ile öncülük etmekte olup, Avrupa'da bu husustaki rezervuar bazlı artışın %70'ten fazlasını oluşturmaktadır (IEA, 2021d).

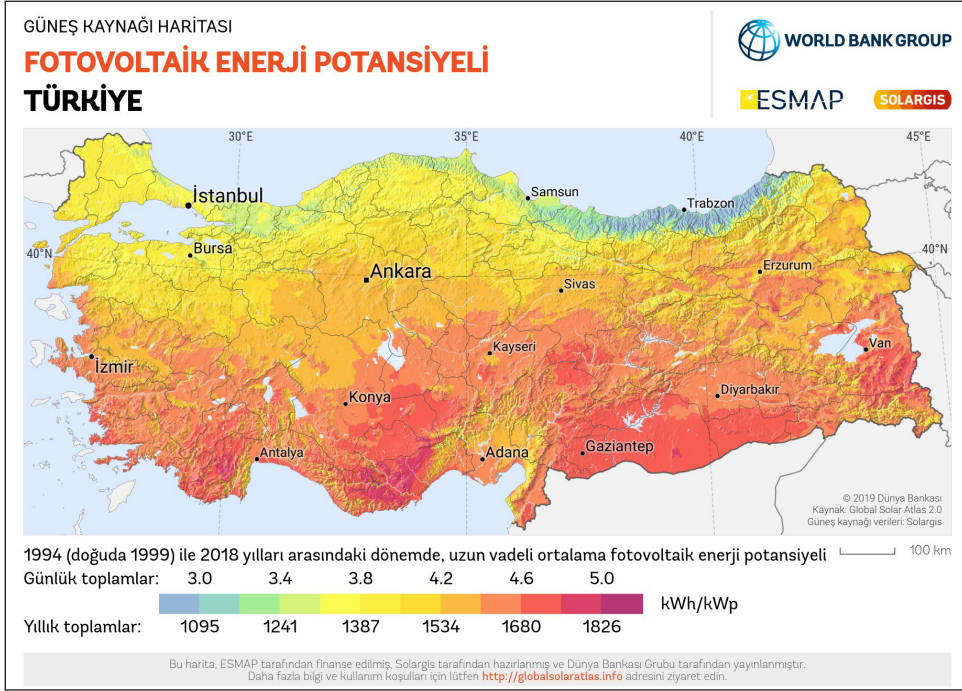
Diğer yandan, IEA (2021a)'da 2021 ile 2026 yılları arasında Türkiye'deki yenilenebilir enerji kapasitesinde beklenen artış yaklaşık 26 GW'tır (%53). IEA (2021a)'ya göre, bu kapasitenin büyük bir kısmının %80 oranında, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi tarafından karşılanması beklenmektedir. Türkiye'nin güneyi güneş enerjisinde daha fazla potansiyele sahiptir (Solargis, 2020) (Şekil 13) ve 2021 ile 2025 yılları arasında Türkiye'nin yirmi güneş enerjisi pazarından biri olması beklenmektedir (Solar Power Europe, 2021). Türkiye'nin yenilenebilir enerji pazarının büyümesinin hidroelektrikten daha düşük maliyetli güneş ve rüzgar enerjisine kayacağı görüşüne de IEA (2021a)'da değinilmiştir.

Jeotermal enerjide Türkiye 2020 yılında 1.613 MW ile iyi bir kapasiteye sahiptir (Our World in Data, 2021) (Şekil 3). IEA (2021f), Kenya ve Endonezya ile birlikte son beş yılda jeotermal kapasitedeki büyümenin büyük bir kısmından Türkiye'nin sorumlu olduğunu duyurmuştur. Türkiye, 2015 yılında; Çin, Japonya, ABD ve İzlanda'nın ardından zengin jeotermal enerji kaynaklarına sahip olma açısından dünyada beşinci sırada yer almaktadır (Mohtasham, 2015).

IRENA (2022)'deki 2021 verilerine göre dünyada toplam 12.677.403 kişinin çalıştığı yenilenebilir enerji üretim teknolojileri sektöründe Türkiye'de istihdam edilen personel sayısı 112.420'dir. İstihdam sayısında; dünyada solar PV, sıvı biyoyakıtlar ve hidroelektrik alanları ilk üç sırayı oluştururken; Türkiye'de hidroelektrik, rüzgar enerjisi ve solar ısıtma/soğutma alanları öne çıkmaktadır.



Şekil 12- Türkiye'de yenilenebilir enerjiden elektrik üretim trendleri (2011-2020) (IRENA, 2022'den değiştirilmiştir).



Şekil 13- Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli haritası (Solargis, 2020).

4. İklim Değişikliği Çerçevesinde 21. Yüzyılın Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP21)'nda imzalanan Paris İklim Değişikliği Anlaşması ile küresel ortalama sıcaklık artışının sanayi öncesi seviyelerde, bir diğer deyişle 2°C'nin altında tutulması ve bu artışın özellikle 1.5°C ile sınırlandırılması hedeflenmiştir (Birleşmiş Milletler, 2015; Avrupa Komisyonu, t.y.a). Uluslararası Enerji Ajansı'nın yayınladığı 2050 Senaryosuna Göre Net-Sıfır Emisyonlar, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin 1,5°C Küresel Isınma Özel Raporu ve Avrupa Komisyonu'nun Yeşil Mutabakat'ının ortak hedefi 2050 yılına kadar sera gazında net-sıfır emisyona ulaşabilmektir (IPCC, 2018; IEA, 2021g, 2022k; Avrupa Komisyonu, t.y.b). 21. yüzyılın enerji kaynakları, hem bu belirtilen temel hedefleri hem de Birleşmiş Milletler'in tanımladığı SDG'leri destekler niteliktedir. Bu enerji kaynakları çoğunlukla temiz, yenilenebilir, çevre dostu ve sürdürülebilir kaynaklardır.

21. yüzyılın kaynak ve teknolojilerinin enerji dönüşümündeki rollerine iklim değişikliği ve emisyon azaltımı açısından değinilebilir. Örnek olarak, Davies ve Simmons (2021), yeni avantajlı hidrokarbon kaynaklarının ve CCUS'in bu dönüşümde önemli ölçütler olabileceğine değinmiştir. Haszeldine vd. (2018) de fosil yakıtlara olan bağımlılığın önümüzdeki süreçte de devam edebileceğinden

CCUS'nin karbon emisyonunu azaltmak için gerekli olduğunu belirtmiştir. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik, nükleer enerji gibi bahsi geçen 21. yüzyılın enerjileri düşük emisyonlu elektrik kaynaklarıdır ve kapasite artışları ile kullanımları gelişmiş ekonomilerde yükselen trendlere sahiptir (IEA, 2021a).

Dünyadaki petrol talebi 2040'a kadar günde 110 milyon varil veya üstü olacak şekilde devam eder ve gerekli emisyon azaltımları gerçekleştirilemez ise küresel sıcaklık artışının 3,5-5,5°C olacağı öngörülmektedir. Sıcaklık artışını 2°C'nin altında sınırlayan senaryolarda ise 2020'lerde petrol talebinde zirveye ulaşıp, 2040'ta günlük 70-90 milyon varile düşülmesi beklenmektedir. 1.5°C senaryolarında ise hedefe ulaşılabilmesi için bu düşüşün 2040'ta 65-70 milyon varil günlük petrol talebine kadar olması gerekmektedir. Fakat covid pandemisi zamanlarında bile dünyadaki günlük petrol tüketimi 80 milyon varil olmuştur (Craig, 2022). 21. yüzyılda enerji arzında hala en büyük pay fosil yakıtlara aittir. IEA (2021h)'de geçen 2019 verilerine bakıldığında 606 EJ'lük dünya toplam enerji arzında kaynak paylaşımlarında %80,9 ile fosil yakıtlar yüksek bir farkla ilk sırayı alırken onu %9 ile biyoyakıtlar ve atıklar, %5 ile nükleer enerji, %2,5 ile hidroelektrik, %2,2 ile diğer enerji kaynakları izlemiştir. Craig (2022), fosil yakıt üreten bölgelerdeki hükümetlerin, işletmelerin ve insanların ekonomilerini koruyacaklarına ve fosil yakıt çağının yakın zamanda

sona ermemesi ihtimaline değinmiştir. Gelecek senaryolarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki hızlı büyümeye rağmen, dünyanın artan nüfusunun sosyal ve ekonomik beklentilerinin karşılanabilmesi için petrol, doğal gaz ve kömürün yüksek oranda kullanılabilmesi öngörülmüştür (IEA, 2021g, i, 2022l; Craig, 2022). Belirtilen bütün durumlar göz önünde bulundurulduğunda, alternatif enerji kaynakları ve teknolojileri ile emisyon azaltıcı yöntemlere ağırlık verilmesi belirlenen senaryo hedeflerine yaklaşılmasında fazlasıyla önem arz edecektir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Mevcut iklim krizi ve dünyanın buzul çağından (icehouse), sıcaklığın yüksek olduğu sera çağı (greenhouse) dönemine geçişte olduğu göz önünde bulundurulduğunda, çeşitli anlaşmalar, komisyonlar ve senaryolarda belirtilen küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerde tutma hedefinin önemi daha çok anlaşılmaktadır. Enerji dönüşümü; yeni kaynak ve teknolojilerin artması, bilimsel, çevresel ve ekonomik koşullardaki değişimler ile dünya tarihi boyunca gerekli olmuştur. Günümüz şartlarında da hidrokarbondan yeni enerji kaynaklarına geçiş ile enerji dönüşümünün gerçekleşeceğine birçok çalışmada yer verilmiştir. Fosil yakıtlar arasında kömür ve petrole kıyasla çevreye verdiği zarar göreceli olarak daha az olan doğal gaz ve petrol şirketlerinin EOR teknolojisindeki tecrübeleri ile uygulamaya yatkın olduğu, CO₂ emisyonu azaltımı sağlayan ve CO₂'yi faydalı formlarda kullanmayı hedefleyen CCUS gibi kaynaklar ve yöntemler, enerji dönüşümünde köprü görevi görebilirler. Jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar enerjisi, biyoenerji, nükleer enerji ve CCUS, 21. yüzyılda bu dönüşümde ön plana çıkan enerji kaynakları ve teknolojileri arasında yer almaktadır. Bunlara ek olarak, nihai kullanımların elektrifikasyonu gibi yine karbon salınımını engellemeyi sağlayan yöntemler de bu amaç açısından önem arz etmektedir.

Bu makalede değinilen 21. yüzyılın enerji kaynaklarına odaklanıldığına;

1. Jeotermal enerji diğer birçok yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında; kapasite kullanım faktörünün en yüksek olması, sera gazı salınımında temiz hava standartlarını karşılayabilmesi, Türkiye'nin dünya genelindeki jeotermal kapasite artışlarında büyük bir paya sahip olması ile,
2. Güneş enerjisi; dünyada elektrik üretmek için en düşük maliyetli seçenek olarak

değerlendirilmesi, solar PV ile yenilenebilir enerjide lider pazarlardan biri olması, Türkiye'nin güneş enerjisinde iyi bir potansiyele sahip olması ile,

3. Hidroelektrik; düşük karbonlu elektriğin en büyük kaynağı olması, Türkiye'de yenilenebilir enerjiden elektrik üretim yöntemlerinde büyük bir farkla ilk sırayı alması, yenilenebilir enerji üretimi teknolojileri sektöründe Türkiye'de istihdam edilen personel sayısı bakımından birinci olması ile,
4. Rüzgar enerjisi; açık deniz rüzgarı ile gelecekte iyi bir potansiyele sahip olması, Türkiye'de yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminde ve bu alandaki istihdamda ikinci sırada olması ile,
5. Biyoenerji; dünyadaki en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olması, diğer yenilenebilir enerji kaynakları ve teknolojileri ile birlikte kullanılabilmesi ile,
6. Nükleer enerji; ikinci en büyük düşük emisyonlu elektrik kaynağı ve gelişmiş ekonomilerde düşük karbonlu elektrik üretiminde ilk sırada olması ile,
7. CCUS; CO₂'yi yakalayıp faydalı ürüne veya petrol sektöründen aşına olunan şekilde yeraltında depolanması ile, CO₂ emisyonu azaltımını desteklemesi, çeşitli sektörlerde uygulanma imkanının olması ile,
8. Hidrojen kullanma ve depolama; hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından da elde edilebilmesi ve gri hidrojenen yeşil ve mavi hidrojene geçişin öncüsü olması ile enerji dönüşümü çerçevesinde öne çıkmaktadır.

Değinilen Belgeler

- Anderson, A., Rezaie, B. 2019. Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future. *Applied Energy* 248, 18-34.
- Anthony, S. 2017. UK has first coal-free power day since the Industrial Revolution. *Ars Technica*, 24 Nisan. 4 Eylül 2023'te <https://arstechnica.com/science/2017/04/uk-first-coal-free-power-day/baglantisindan-ulasilmistir>.
- Avrupa Komisyonu (European Commission) t.y.a. Paris Agreement. 10 Temmuz 2023'te https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en bağlantısından ulaşılmıştır.

- Avrupa Komisyonu (European Commission) t.y.b. A European Green Deal. 3 Ocak 2022'de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europeangreen-deal_en bağlantısından ulaşılmıştır.
- BBC News 2021. Belgium agrees to close controversial ageing nuclear reactors. 29 Aralık 2021'de <https://www.bbc.com/news/world-europe-59768195> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Birleşmiş Milletler (The United Nations) 2015. Paris Agreement. 25. s.
- Blenkinsop, P. 2021. Belgian government reaches compromise on nuclear power exit. Reuters. 29 Aralık 2021'de <https://www.reuters.com/markets/commodities/belgian-government-reaches-deal-nuclearexit-media-2021-12-23/> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Craig, J. 2022. The “Energy Transition”: myth or reality? EPJ Web of Conferences 268, 00004.
- Davies, A., Simmons, M.D. 2021. Demand for ‘advantaged’ hydrocarbons during the 21st century energy transition. Energy Reports 7, 4483-4497.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2021. Tidal power. 15 Ocak 2022'de <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/tidal-power.php> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Forsberg, C.W., Dale, B.E., Jones, D.S., Hossain, T., Morais, A.R.C., Wendt, L.M. 2021. Replacing liquid fossil fuels and hydrocarbon chemical feedstocks with liquid biofuels from large-scale nuclear biorefineries. Applied Energy 298, 117225.
- Fridriksson, T., Merino, A.M., Orucu, A.Y., Audinet, P. 2017. Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Power Production. Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15..
- Gardiner, N.J., Roberts, J.J., Johnson, G., Smith, D.J., Bond, C.E., Knipe, R., Haszeldine, S., Gordon, S., O'Donnel, M. 2023. Geosciences and the Energy Transition. Earth Science, System and Society v. 3, 1-22.
- GreenMatch, 2021. Advantages and Disadvantages of Geothermal Energy – The Source of Renewable Heat. 11 Ocak 2022'de <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/04/advantages-and-disadvantages-of-geothermalenergy> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Haszeldine, R.S., Flude, S., Johnson, G., Scott, V. 2018. Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. Philosophical Transactions Royal Society A 376.
- Hoes, O.A.C., Meijer, L.J.J., van der Ent, R.J., van de Giesen, N.C. 2017. Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential. Plus One 12 (2).
- Hubbert, M.K. 1956. Nuclear energy and the fossil fuels. American Petroleum Institute, Spring Meeting of the Southern District, 7-9 Mart.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2012. Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems. IAEA Nuclear Energy Series Publications, 157 s.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2022. What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power. 23 Haziran 2023'te <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2023. Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis. 6 Eylül 2023'te <https://www.iaea.org/newscenter/news/thorium-long-term-potential-in-nuclear-energy-new-iaea-analysis> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). t.y. Molten salt reactors. 6 Eylül 2023'te <https://www.iaea.org/topics/molten-salt-reactors> bağlantısından ulaşılmıştır.
- ICRLP (The Institute for Carbon Removal Law and Policy). 2018. DACCS. Carbon Removal Fact Sheet.
- IEA (International Energy Agency). 2011. Combining Bioenergy with CCS: Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC and the Kyoto Protocol. IEA Publications, 28 s.
- IEA (International Energy Agency). 2019a. World Energy Outlook Special Report: Offshore Wind Outlook 2019. IEA Publications, 96 s.
- IEA (International Energy Agency). 2019b. Nuclear Power in a Clean Energy System. IEA Publications, 99 s.
- IEA (International Energy Agency). 2019c. Transforming Industry through CCUS. IEA Publications, 58 s.
- IEA (International Energy Agency). 2019d. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. IEA Publications, 199 s.
- IEA (International Energy Agency). 2020. Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: CCUS in clean energy transitions. IEA Publications, 171 s.
- IEA (International Energy Agency). 2021a. Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. IEA Publications, 173 s.

- IEA (International Energy Agency). 2021*b*. Solar PV. 13 Ocak 2022'de <https://www.iea.org/reports/solar-pv> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2021*c*. Hydropower. 15 Ocak 2022'de <https://www.iea.org/reports/hydropower> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2021*d*. Hydropower Special Market Report: Analysis and forecast to 2030. IEA Publications, 122 s.
- IEA (International Energy Agency). 2021*e*. Wind Power. 13 Ocak 2022'de <https://www.iea.org/reports/wind-power> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2021*f*. Geothermal Power. 10 Ocak 2022'de <https://www.iea.org/reports/geothermal-power> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2021*g*. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. IEA Publications, 222 s.
- IEA (International Energy Agency). 2021*h*. Key World Energy Statistics 2021. IEA Publications, 80 s.
- IEA (International Energy Agency). 2021*i*. World Energy Outlook 2021. IEA Publications, 383 s.
- IEA (International Energy Agency). 2022*a*. Solar. 13 Ocak 2022'de <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*b*. Hydroelectricity. 6 Temmuz 2023'te <https://www.iea.org/reports/hydroelectricity> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*c*. Wind Electricity. 3 Temmuz 2023'te <https://www.iea.org/reports/wind-electricity> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*d*. Bioenergy. 7 Temmuz 2023'te <https://www.iea.org/reports/bioenergy> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*e*. Bioenergy with Carbon Capture and Storage. 7 Temmuz 2023'te <https://www.iea.org/reports/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*f*. Nuclear Power and Secure Energy Transitions. IEA Publications, 93 s.
- IEA (International Energy Agency). 2022*g*. Nuclear. 17 Ocak 2023'te <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*h*. CO₂ Storage Resources and their Development: An IEA CCUS Handbook. IEA Publications, 125 s.
- IEA (International Energy Agency). 2022*i*. Carbon Capture, Utilisation and Storage. 2 Temmuz 2023'te <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IEA (International Energy Agency). 2022*j*. Global Hydrogen Review 2022. IEA Publications, 282 s.
- IEA (International Energy Agency). 2022*k*. Global Energy and Climate Model: Documentation. IEA Publications, 124 s.
- IEA (International Energy Agency). 2022*l*. World Energy Outlook 2022. IEA Publications, 522 s.
- IEA (International Energy Agency). 2023. Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027. IEA Publications, 157 s.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Special Report: Global Warming of 1.5°C. 3 Ocak 2022'de <https://www.ipcc.ch/sr15/> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2020*a*. Geothermal energy. 8 Ocak 2022'de <https://www.irena.org/geothermal> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2020*b*. Solar energy. 13 Ocak 2022'de <https://www.irena.org/solar> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) 2022. Geothermal energy. 16 Ocak 2023'te <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2023*a*. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, Volume 1. IRENA, Abu Dhabi, 175 s.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2023*b*. The changing role of hydropower: Challenges and opportunities. IRENA, Abu Dhabi, 83 s.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2023*c*. Wind energy. 3 Temmuz 2023'te <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy> bağlantısından ulaşılmıştır.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2023*d*. Renewable energy statistics 2023. IRENA, Abu Dhabi, 426 s.
- Kayhan, D.Y. 2022. Net-sıfır emisyonu ulaşabilmek adına karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) faaliyetlerinin endüstride sürdürülebilir kalkınma açısından önemi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 34, 16-26.

- Laherrère, J.H. 2000. The Hubbert Curve: Its Strengths and Weaknesses. *Oil and Gas Journal*, 18 Şubat.
- McClure, M.W., Horne, R.N. 2014. An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 72, 242-260.
- Miranda-Barbosa, E., Sigfusson, B., Carlsson, J., Tzimas, E. 2017. Advantages from combining CCS with geothermal energy. *Energy Procedia* 114, 6666-6676.
- Mohtasham, J. 2015. Review Article – Renewable Energies. *Energy Procedia* 74, 1289-1297.
- OIES (The Oxford Institute for Energy Studies). 2023. Hydrogen storage for a net-zero carbon future. OIES Paper ET23.
- Our World in Data. 2021. Installed geothermal energy capacity, 2020. 11 Ocak 2022'de <https://ourworldindata.org/grapher/installed-geothermal-capacity> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Patrizio, P., Fajardy, M., Bui, M., Dowell, N.M. 2021. CO₂ mitigation or removal: The optimal uses of biomass in energy system decarbonisation. *iScience* 24, 102765.
- Peter, A.P., Koyande, A.K., Chew, K.W., Ho, S-H., Chen, W-H., Chang, J-S., Krishnamoorthy, R., Banat, F., Show, P.L. 2022. Continuous cultivation of microalgae in photobioreactors as a source of renewable energy: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154, 111852.
- Petrofac t.y. The difference between green hydrogen and blue hydrogen. 5 Eylül 2023'te <https://www.petrofac.com/media/stories-and-opinion/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/> bağlantısından ulaşılmıştır.
- PNNL (Pacific Northwest National Laboratory). 2021. Tidal Energy. 15 Ocak 2022'de <https://www.pnnl.gov/explainer-articles/tidal-energy> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Raza, R., Akram, N., Javed, M.S., Rafique, A., Ullah, K., Ali, A., Saleem, M., Ahmed, R. 2016. Fuel cell technology for sustainable development in Pakistan – An over-view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 450-461.
- Robbins, J. 2020. Can Geothermal Power Play a Key Role in the Energy Transition? The Yale School of Environment. 8 Ocak 2022'de <https://e360.yale.edu/features/can-geothermal-power-play-a-key-role-in-the-energy-transition> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Solar Power Europe. 2021. Global Market Outlook: For Solar Power 2021-2025. 134 s.
- Solargis. 2020. Solar resource maps of Turkey. 12 Temmuz 2023'te <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/turkey> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., Tarkowski, P. 2021. Storage of hydrogen, natural gas, and carbon dioxide – Geological and legal conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 20010-20022.
- TWI (The Welding Institute) t.y. What are the advantages and disadvantages of geothermal energy? 11 Ocak 2022'de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/geothermal-energy/pros-and-cons> bağlantısından ulaşılmıştır.
- U.S. Department of Energy t.y.a. Geothermal Power Plants – Meeting Clean Air Standards. 8 Ocak 2022'de <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-powerplants-meeting-clean-air-standards> bağlantısından ulaşılmıştır.
- U.S. Department of Energy t.y.b. Concentrating Solar Power. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- U.S. Department of Energy t.y.c. Hydropower Basics. 15 Ocak 2022'de <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics> bağlantısından ulaşılmıştır.
- U.S. Department of Energy t.y.d. Bioenergy Basics. 4 Eylül 2023'te <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-basics> bağlantısından ulaşılmıştır.
- U.S. Department of Energy t.y.e. Biomass Resources. 4 Eylül 2023'te <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biomass-resources> bağlantısından ulaşılmıştır.
- Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., Xiong, B. 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B* 3, 1-11.