

Nükleer Enerji Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş için Bir Alternatif Olabilir mi? Kavramsal Bir Değerlendirme

Kumru Türköz¹

Özet

Kömür, petrol, doğalgaz gibi geleneksel enerji kaynakları uzun vadede küresel enerji talebini karşılamada sınırlara yaklaşmaktadır. Bu kaynakların halen küresel enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmını karşılaması ve enerji yoğunluğunun hızlı bir şekilde artması bu kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan yakıldığına yüksek düzeyde karbon açığa çıkaran bu kaynaklar iklim değişikliği ve küresel ısınma problemlerinin de temel nedenidir. Bu nedenle düşük karbon ekonomisine geçerek mevcut bu riskleri ortadan kaldırmak pek çok ülkenin öncelikli hedefi haline gelmiştir. Bu noktada, düşük karbon ekonomisi için temiz bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji ve nükleer enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkelerin karbonsuzlaştırma ya da en azından karbon yoğunluğunu azaltma hedeflerini tutturmada önemli ve temiz bir enerji kaynağı olduğu ile ilgili literatürde geniş bir fikir birliği mevcuttur. Ancak nükleer enerjinin düşük karbon ekonomisi için uzun vadeli bir alternatif olup olamayacağı halen tartışma konusudur. Buradan yola çıkarak bu çalışmada, tam olarak “karbon nötr” olarak adlandırılmasa da geleneksel enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında daha az çevresel bozulmaya yol açan nükleer enerjiyi sürdürülebilirlik, güvenlik ve çevresel boyutlarıyla ele alarak düşük karbon ekonomisi açısından kavramsal bir değerlendirme yapmak hedeflenmiştir.

1. Giriş

Kömür, petrol ve doğalgazdan oluşan geleneksel fosil yakıtlar 150 yılı aşkın bir süredir ekonomilere güç sağlamakta ve şu anda dünya enerjisinin yaklaşık

1 Doç. Dr. Balıkesir Üniversitesi, İİBE, İktisat Bölümü, kumru.turkoz@balikesir.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0640-4212

%80'ini karşılamaktadır. Fosil yakıtlar, milyonlarca yıl önce, karbonca zengin hayvan ve bitki kalıntılarının yer altında ayrıştırılıp sıkıştırılıp ısıtılmasıyla oluşmuştur. Ancak bu yakıtlar yakıldığında, depolanan karbon ve diğer sera gazları atmosfere salınmaktadır. Fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilen bu tür enerji küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık dörtte üçünden sorumludur. Bu sera gazlarının atmosferde aşırı miktarda birikmesi dünyanın ikliminde dramatik değişikliklere neden olmakta ve bu eğilimin daha fazla fosil yakıt yakıldıkça daha da kötüleşmesi beklenmektedir (Environmental and Energy Study Institute, 2023; Our World in Data, 2023).

Fosil yakıtların neden olduğu çevresel bozulmaların yanı sıra bir diğer önemli nokta ise bu kaynakların yakın gelecekteki tükenme riskidir. Mevcut bu enerji tüketim eğilimi devam ederse kömür, petrol ve doğalgaz için sırasıyla 107, 35 ve 37 yıllık gibi bir rezerv tükenme süresi olduğu belirtilmektedir. Bu ise, kömür rezervlerinin 2112'ye kadar mevcut olacağı ve hatta 2042'den sonra kalan tek fosil yakıt olacağı anlamına gelmektedir (Shafiee & Topal, 2009:181). Dolayısıyla fosil yakıtlara dayalı bir enerji geleceğine güvenmek yerel, bölgesel ve küresel düzeylerdeki çevresel sorunların yanı sıra artan dışa bağımlılık ve arz güvenliği sorunları anlamına gelmektedir (Goldemberg, 2006:2185). Bu nedenle dünyanın fosil yakıtlardan, düşük karbonlu enerji kaynaklarının (yenilenebilir teknolojiler ve nükleer enerji) hâkim olduğu bir enerji bileşimine geçmesi gerekmektedir (Our World in Data, 2023). Literatürde yenilenebilir enerji kaynaklarının düşük karbonlu ve sürdürülebilir bir ekonomiye ulaşmanın anahtarı olduğu yönünde geniş bir fikir birliği mevcuttur (Goldemberg, 2006; Omer, 2008a; Pao vd., 2014; Dinçer & Acar, 2015; Hosseini & Wahid, 2020; Shao vd., 2021; Shan vd., 2021; Banga vd., 2022; Jaiswal vd., 2022; Yue vd., 2022). Bu nedenle hem gelişmiş hem de gelişmekte olan pek çok ekonomi, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bağımlılıklarını yenilenebilir enerji kaynaklarına kaydırmak yönünde birtakım politikalar geliştirmektedir (Baz vd., 2021:1).

Düşük düzeyde sera gazı emisyonu üreten enerji kaynaklarına dayalı bir ekonomiye geçiş için bir diğer alternatif olarak nükleer enerji ön plana çıksa da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında nükleer enerji dünyaya daha çok tanıtılması gereken çığır açıcı bir yol olabilir. Çünkü nükleer enerji "karbon nötr" olarak adlandırılmasa da fosil yakıtlardan çok daha az karbondioksit (CO₂) emisyonuna neden olmaktadır (Lenzen, 2008:2178; Sadekin vd., 2019:513). Ancak nükleer enerjinin düşük karbon ekonomisine geçişteki rolü ile ilgili literatür oldukça sınırlıdır. Buradan hareket ederek bu çalışmada, nükleer enerjinin sürdürülebilir, yeşil ve düşük bir karbon ekonomisine geçiş için gerçek bir alternatif olup olamayacağını sürdürülebilirlik, güvenlik ve çevresel boyutlarıyla ele alarak

kavramsal bir değerlendirme yapmak hedeflenmiştir. Bu kapsamda, düşük karbon ekonomisine geçişte neden fosil yakıt kaynaklarından temiz enerjiye (yenilenebilir ve nükleer) doğru bir dönüşümün kaçınılmaz olduğuna değinilen giriş bölümünün ardından, ikinci bölümde nükleer enerji ve nükleer enerjinin boyutları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, nükleer enerjinin düşük karbon ekonomisine geçişteki rolü mevcut uygulama örnekleri ile değerlendirilmiş ve son olarak dördüncü bölümde genel değerlendirmelere ve birtakım politika önerilerine yer verilmiştir.

2. Nükleer Enerji ve Boyutları

Nükleer enerji, atomların suyu buhara dönüştüren bir reaktörde parçalanması ve daha sonra elektrik üretmek için bir türbinde kullanılmasıyla oluşmaktadır. Genel olarak, uranyum ve plütonyumun (U-238'den dönüştürülmüş) bölünmesinden elde edilen nükleer enerji, halihazırda elektrik enerjisi üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Brook vd., 2014:9). Nükleer enerji dünya elektrik talebinin yaklaşık %13'ünü karşılamaktadır. Bu, toplam birincil enerji arzının %5,8'ine ve küresel nihai enerji tüketiminin %2'sinden biraz fazlasına karşılık gelmektedir. Nükleer enerjinin çok düşük karbon emisyonuna sahip olduğu ve enerji üretiminin şu anda dünya çapındaki sera gazı emisyonlarının %66'sını oluşturduğu göz önüne alındığında, nükleer enerji atmosferik sera gazlarının ve buna bağlı iklim değişikliğinin yönetilmesinde önemli bir kaynak olarak kabul edilmektedir (Mez, 2012:57-58; Zinkle & Was, 2013:735; Jin & Kim, 2018:466). Hatta uzun vadede, nükleer fisyon teknolojisinin, modern endüstriyel toplumları güvenli, ekonomik, güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde yürütmek için ihtiyaç duyulacak muazzam miktarda enerjiyi sağlayabilen tek gelişmiş enerji kaynağı olduğu savunulmaktadır (Brook vd., 2014:8).

Buna rağmen nükleer enerjinin çevre kalitesi üzerindeki etkisine yönelik farklı gerekçeleriyle iki karşıt görüş bulunmaktadır. Bunlardan ilk görüşe göre; (i) Nükleer enerji, enerji bağımsızlığına katkıda bulunur. (ii) Karbon yoğunluğunu azaltabilir. (iii) Sürdürülebilir büyümede hayati bir role sahiptir. (iv) Son olarak, nükleer yakıt üretmek için kullanılan uranyum bol miktarda bulunur ve 40-60 yıl gibi çok uzun bir süre dayanır, bu nedenle nükleer enerjide hammadde sorunu yoktur. Dolayısıyla bu görüşe göre nükleer enerji, üretimi için hammadde kıtlığı olmadığından uzun vadeli düşük karbonlu bir çözüm olarak görülebilir (Peng vd., 2019:1154; Kırıkkaleli vd., 2020:3; Çağlar, 2022:199). İkinci karşıt görüşe göre ise nükleer enerji; (i) Sürdürülebilir değildir. (ii) Ekonomik değildir. (iii) Güvenli değildir ve (iv) Nükleer silahların yayılmasıyla bağlantılıdır (Brook vd., 2014:9). Bu görüşe göre ise, nükleer enerji pek çok yönüyle birtakım riskler barındırdığından

çevre kalitesi üzerindeki etkisi belirsizdir. Bu nedenle alt bölümlerde nükleer enerji mevcut bu boyutlarıyla ele alınıp detaylıca değerlendirilmektedir.

2.1. Sürdürülebilirlik Boyutu

Ekonomik literatürde sürdürülebilirlik iki kriterle tanımlanmaktadır. Genel ekolojik yaklaşıma göre birincisi, uzun vadede çevre kalitesinin düşmemesidir. Ekonomik yaklaşıma göre ise, uzun vadede bireysel refahın azalmamasıdır. İdeal durumda, bu iki kriter uzlaştırılmalıdır (Fiore, 2006:3337). Daha genel olarak "sürdürülebilirlik" terimi "bugünün ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılamak" anlamına gelmektedir (Keeble, 1988:20). Enerji seçenekleri bağlamında "sürdürülebilirlik" ise, uzun süreler boyunca (geniş bir uygarlığı kapsayan zaman ölçeğinde) gelecek nesilleri mahrum bırakmadan, çevre dostu, ekonomik ve güvenli olarak uygulanabilir bir şekilde enerji sağlama yeteneğini ifade etmektedir (Brook vd., 2014:9).

Nükleer fisyon enerjisi; hidro, rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi "yenilenebilir" olarak adlandırılan enerjiler kadar tükenmezdir. Ancak, bu enerjilerin toplamından farklı olarak, nükleer fisyon enerjisi, fosil yakıtların yerini alacak yeterli kapasiteye sahiptir. Uranyum fiyatının hızlı reaktörler tarafından üretilen elektriğin maliyetine katkısı, fiyatı 14.000 ABD Doları/kg olan altınla aynı olsa bile, üretilen elektrik 0,003 ABD Doları/kWh olacaktır. Bu maliyetle, ekonomik olarak uygun uranyum rezervleri, tüm pratik amaçlar için tükenmez olacaktır (Lightfoot vd., 2006:1). Bugünün ticari uranyum yakıtlı nükleer enerji santralleri, zaten tanımlanmış uranyum yatakları temelinde gelecek yüzyıla kadar dünyaya temiz, ekonomik ve güvenilir enerji sağlayabilir. Bu nedenle nükleer enerji yukarıda belirtilen kriterlerin tümünü karşıladığı için sürdürülebilirdir (Brook vd., 2014:9). Ancak bu noktada mutlak ve göreceli sürdürülebilirlik kavramının birbirinden ayrılmasında fayda bulunmaktadır. Mutlak sürdürülebilirlik, dünya kaynaklarının tükenmemesi ve sürekli bir kalıntı birikiminin olmaması anlamına gelmektedir. Göreceli sürdürülebilirlik ise iki veya daha fazla üretim teknolojisinin sürdürülebilirliğinin karşılaştırılmasında kullanılan bir kavramdır. Bu çerçeveden bakıldığında, yalnızca yenilenebilir kaynakların kesinlikle sürdürülebilir olduğu ancak nükleer enerjinin ise fosil yakıtlardan görece daha sürdürülebilir olduğu ayrı bir tartışma konusudur (Omer, 2008b:2277). Görece olarak daha sürdürülebilir olsa dâhi, yenilenebilir kaynakların konvansiyonel (geleneksel) teknolojilere göre daha pahalı olduğu ve kapasite faktörünün düşük olduğu düşünüldüğünde, nükleer enerji iklim değişikliğiyle mücadele etmek açısından en sürdürülebilir seçeneklerden biri olarak görülmektedir (Kök & Benli, 2017:875). Diğer taraftan mutlak

sürdürülebilirlik bir politika tercihi olduğunda, hâlihazırda olgun bir teknoloji olan nükleer enerji, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde yenilenebilir enerji kaynakları olgunlaşana kadar çevre kalitesini iyileştirmek için alternatif bir enerji olarak değerlendirilebilir (Çağlar, 2022:199). Bu nedendir ki yaklaşan iklim krizi ve azalan fosil yakıtlar (özellikle petrol) ışığında, küresel enerji sorunlarına CO₂ içermeyen, güvenli, ucuz ve sürdürülebilir bir çözüm olarak son yıllarda dikkatler nükleer enerjiye çevrilmektedir (Mez, 2012:56).

Ancak yine de nükleer enerjide mutlak bir sürdürülebilirlikten bahsedebilmek için aşılması gereken birtakım zorlukların olduğunu söylemek gerekmektedir. Bunlar arasında; (i) tüm yaşam döngüsü boyunca geliştirilmiş teknoloji ile enerji verimliliğini ve sera gazı emisyon yoğunluğunu radikal bir şekilde iyileştirmek; (ii) serbest piyasanın büyük kamu nükleer enerji sigortası sübvansiyonları olmadan nükleer endüstriyi sigortalayabilmesi ve nükleer enerjiyle ilgili riskleri azaltmak için nükleer güvensizliği ortadan kaldırmak; (iii) ömrünün sonunda tüm radyoaktif atıkları ortadan kaldırmak ve madencilik-operasyonlar sırasında çevresel etkiyi en aza indirmek; (iv) sürekli bir yenilenebilir enerji teknolojileri akışı hem teknik hem de ekonomik performansı hızla iyileştirdiğinden, nükleer endüstrinin halkın güvenini yeniden kazanması yer almaktadır (Pearce, 2012:1182).

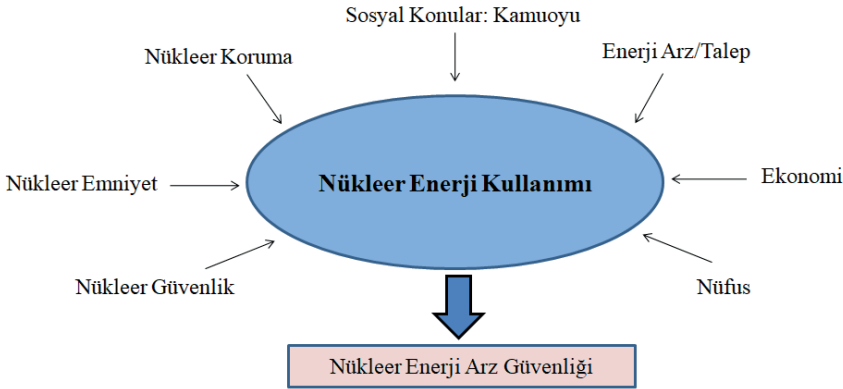
2.2. Güvenlik Boyutu

Enerji güvenliği, enerji kaynaklarının uygun bir fiyata kesintisiz olarak kullanılabilirliğini ifade etmektedir. Enerji güvenliğinin birçok yönü bulunmaktadır. Uzun vadeli enerji güvenliği, ekonomik gelişmeler ve çevresel ihtiyaçlar doğrultusunda enerji sağlamak için zamanında yapılan yatırımlarla ilgilenirken; kısa vadeli enerji güvenliği, enerji sisteminin arz-talep dengesindeki ani değişikliklere anında tepki verme yeteneğine odaklanmaktadır (International Energy Agency [IEA], 2023).

Enerji arzının güvenliği söz konusu olduğunda; petrol fiyatlarındaki oynaklık, arz ülkelerinin siyasi istikrarsızlıkları ve karbondioksit emisyonunun azaltım stratejisine olumsuz katkısıyla potansiyel olarak arz aksamasına neden olabileceğinden, çoğunlukla fosil yakıtlara ilişkin tartışmalar baskındır. Ancak Fukushima nükleer kazasının ardından nükleer enerji konusu küresel enerji güvenliği gündeminin en üst sıralarına taşınmıştır. Çünkü bu nükleer kaza yalnızca çevre üzerinde önemli bir etkiye neden olmakla kalmamış, aynı zamanda Japonya'daki elektrik arzını da ciddi şekilde etkilemiştir. Daha önce elektrik arzının yaklaşık %30'una katkıda bulunan Japonya'daki tüm nükleer santraller, güvenlik hususlarının yeniden değerlendirilmesi için kapatılmış ve

bu durum ülke çapında bir enerji kıtlığına yol açmıştır (Kosai & Yamasue, 2019:628; Kosai & Unesaki, 2020:1-2). Dolayısıyla bu durum enerji bileşiminde nükleer enerji barındıran tüm ülkeler için önemli bir tehdit olarak algılanmış ve nükleer enerjinin enerji güvenliğindeki rolünün daha kapsamlı bir şekilde ele alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda Şekil 1, nükleer enerji kullanımıyla yüksek oranda ilişkili olan çeşitli enerji unsurlarını göstermektedir.

Şekil 1. Nükleer Enerji Arz Güvenliği



Kaynak: Kosai ve Unesaki (2020:2).

Şekil 1’de yer verildiği gibi ekonomi, nüfus, enerji arzı ve talebi nükleer enerjiyle ilgili konuların temel unsurları olmakla birlikte kamuoyunun algısı gibi toplumsal konular da güçlü bir şekilde nükleer enerji kullanımına etki etmektedir (Kosai & Unesaki, 2020:2). Kim vd. (2013)’ün çalışmalarında, Fukushima nükleer kazasından sonra 42 ülkede halkın nükleer enerjiye yönelik kabulünün değişimi analiz edilmiş ve kazanın, nükleer enerjinin halkın kabulünü önemli ölçüde azalttığı açıkça ortaya konmuştur. Bu bulgu, tek bir olası riskin nükleer enerji konusundaki kamuoyu algısını kolayca etkileyebileceğini ve nükleer enerji kullanımına yönelik olumsuz izlenimlere yol açabileceğini göstermektedir. Diğer taraftan, nükleer enerji kullanımının üç yönüne ilişkin uluslararası yönetim olarak koruma, emniyet ve güvenlik nükleer enerji kullanım sürecinde özel bir faktör olarak ele alınmaktadır. Burada koruma; nükleer silahların yayılmasının önlenmesini sağlamak için çok önemli bir çerçeve olan “nükleer malzeme ve teknolojiyi yalnızca barışçıl amaçlarla kullanmakla ilgili uluslararası yasal yükümlülüklerin yerine getirildiğini” doğrulamak için bir dizi teknik önlem kapsamaktadır. Emniyet, “işçilerin, halkın ve çevrenin gereksiz radyasyon tehlikelerinden

korunmasıyla sonuçlanan uygun çalışma koşullarının sağlanması, kazaların önlenmesi veya kaza sonuçlarının hafifletilmesi” olarak tanımlanırken, güvenlik ise “nükleer malzeme, diğer radyoaktif maddeler veya bunlarla ilişkili tesisleri içeren sabotaj, yetkisiz erişim, yasa dışı aktarım veya diğer kötü niyetli eylemlerin önlenmesi, tespit edilmesi ve bunlara yanıt verilmesi” olarak ifade edilmektedir. (Findlay, 2011:2; Kosai & Unesaki, 2020:2). Dolayısıyla koruma, emniyet ve güvenlik faktörleri aslında doğrudan nükleer enerjinin içerdiği potansiyel risklerle ilgilenmektedir. Bu kapsamda enerjinin elde edildiği kaynağın güvenlik boyutu; birincil enerji kaynakların madencilikinden dönüştürülmesine, taşınmasından, enerjinin üretimine, dağıtımına ve son aşamada nihai tüketicilere tedarikine kadar olan tüm süreci kapsadığından en kritik konulardan birisidir (Augutis vd., 2009:236). Diğer taraftan nükleer enerji, bir ülkenin enerji bileşiminin bir parçası olduğunda arz güvenliğini güçlendirebilecek birtakım özelliklere sahiptir: Bunlar arasında (i) güvenilir ve uzun vadeli elektrik arzı sağlaması (ii) enerji yoğunluğunu azaltması (iii) coğrafi ve politik mevcudiyet (iv) öngörülebilir maliyetler (v) dirençli altyapı (vi) yardımcı şebeke hizmetleri (vii) endüstriyel ısı ve güç sağlaması gibi faktörler yer almaktadır (World Nuclear Association, 2023a). Bu olumlu faktörlerin yanı sıra arz güvenliği açısından birtakım riskleri beraberinde getiren nükleer enerjinin, ülkelerin enerji bileşimlerinde önemli bir paya sahip olabilmesi için teknik, ekonomik, sosyo-politik ve çevresel açıdan bütün unsurları eşzamanlı bir şekilde ele alarak arz güvenliğini maksimize etmesi gerekmektedir.

2.3. Çevresel Boyutu

Fosil yakıtlı santrallerin aksine, nükleer reaktörler çalışırken hava kirliliği veya karbondioksit üretmezler. Bununla birlikte, uranyum cevherinin çıkarılması ve rafine edilmesi ve reaktör yakıtı yapılması işlemlerinin tümü büyük miktarda enerji gerektirir. Nükleer santrallerde ayrıca, üretimi için büyük miktarlarda enerji gerektiren metal ve beton bulunur. Uranyum cevherinin çıkarılması ve rafine edilmesi için fosil yakıtlar kullanılıyorsa veya nükleer santral inşa edilirken fosil yakıtlar kullanılıyorsa, bu yakıtların yakılmasından kaynaklanan emisyonlar nükleer santrallerin ürettiği elektrikle ilişkilendirilebilir (Energy Information Administration [EIA], 2023). Ancak bu durum aslında tamamen bu süreçte ara girdi olarak kullanılan enerjinin türü ile ilişkilidir. Diğer bir ifadeyle, bu döngüde fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarından biri (özellikle hidroelektrik) tercih edilirse nükleer enerji kaynaklı emisyonlar ihmal edilebilecek seviyelerde kalabilir. Çünkü nükleer enerji hidroelektrik enerjisiyle birlikte, düşük karbonlu elektrik üretiminin belkemiğini oluşturmaktadır. Bu iki enerji kaynağı birlikte, küresel düşük

karbon üretiminin dörtte üçünü sağlamaktadır. Nükleer enerji, 2018'de 2700 TWh elektrik sağlayan 452 aktif reaktörle veya küresel elektrik arzının %10'u ile bugün ikinci en düşük karbonlu elektrik kaynağıdır. Son 50 yılda, nükleer enerji kullanımı CO₂ emisyonlarını 60 gigatondan fazla azaltmıştır ki bu oran neredeyse iki yıllık küresel enerji kaynaklı CO₂ emisyonuna eşittir (IEA, 2019).

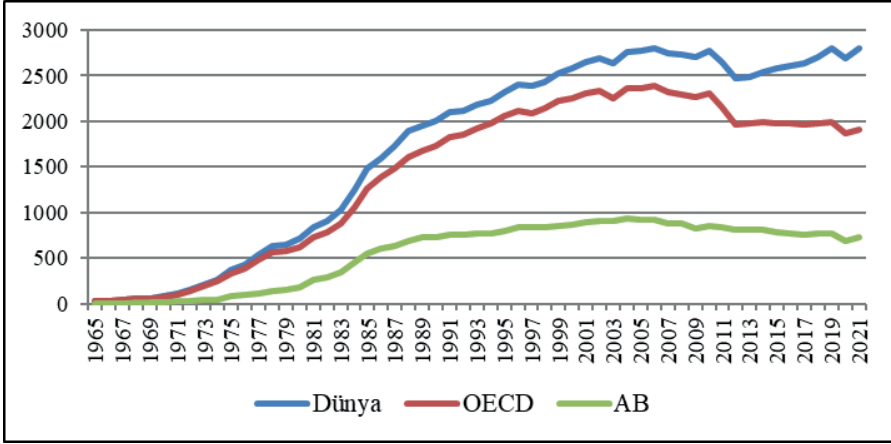
Dolayısıyla nükleer enerji, artan enerji taleplerini karşılamak ve çevre kirliliği sorunlarına derhal mücadele etmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle son dönemlerde yapılan pek çok araştırma nükleer enerjinin enerji güvenliği, sınırlı fosil yakıtlar, fosil yakıtların artan maliyetleri, kömür madenciliği felaketleri, yerel çevre baskısı ve küresel ısınma sorununa karşı stratejik bir çözüm olduğuna işaret etmektedir (Zhou & Zhang, 2010; Iwata vd., 2010; Lau vd., 2019; Mahmood vd., 2020; Vo vd., 2020; Danish vd., 2021; Sadiq vd., 2022; Kartal vd., 2023). Hatta nükleer enerjinin, CO₂ emisyonlarını azaltarak çevre kalitesini iyileştirirken, yenilenebilir enerjinin çevre koşulları üzerinde uzun vadeli bir etkisi olmadığına dair bulgular da bulunmaktadır. Bu durum, yeşil sürdürülebilirlikte nükleer enerjinin çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Nathaniel vd., 2021; Pata & Samour, 2022:1). Çünkü yaşam döngüsü boyunca nükleer santraller, birim elektrik başına yaklaşık olarak rüzgârla aynı miktarda CO₂ eşdeğeri emisyon üretirken, güneş enerjisi ile karşılaştırıldığında birim elektrik başına emisyonların üçte birini üretmektedir (World Nuclear Association, 2023b). Bir diğer hipotez olarak ise, bazı ülkelerde (BRICS gibi) nükleer enerjinin CO₂ emisyonlarını azalttığı ancak yenilenebilir enerji ile kıyaslandığında nükleer enerjinin çevre kirliliğini azaltmada daha az etkili olduğu vurgulanmaktadır (Hassan vd., 2020). Bu kapsamda eğer incelenen ülkede ya da ülke grubunda hem nükleer enerji kullanımı hem de yenilenebilir enerji kullanımı uzun vadede CO₂ emisyonlarını azaltıyorsa enerji bileşiminde en iyi seçenek nükleer ve yenilenebilir enerji karışımını birlikte hedeflemektir (Saidi & Omri, 2020). Dolayısıyla tüm yaşam döngüleri boyunca emisyonları çok düşük olan nükleer enerji, yenilenebilir enerjiye bir alternatif değil aksine düşük karbon ekonomisine geçişte kesintili enerji kaynakları olan rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları için hayati bir tamamlayıcı güç niteliğindedir (Grossi, 2020:1).

3. Nükleer Enerjide Mevcut Uygulamalar, Eğilimler ve Politikalar

Nükleer enerjiyi farklı boyutlarıyla ele alıp tartıştıktan sonra, düşük karbon ekonomisi için güçlü bir alternatif olarak işaret edilen bu enerjinin dünya genelinde tarihsel süreç içerisinde nasıl bir eğilim sergilediğini tespit etmek tartışmanın tutarlılığı açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda

nükleer enerji gelişimindeki küresel eğilimin yanı sıra enerji ve çevre politikalarında düşük karbon ekonomisini öncelikli hedef olarak belirleyen OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) ve AB (Avrupa Birliği) ülke ortalamalarında söz konusu durumun seyrine ilişkin gelişmelere Şekil 2’de yer verilmektedir.

Şekil 2. Yıllara göre Nükleer Enerji Üretiminin Gelişimi (terawatt saat cinsinden)



Kaynak: British Petroleum (2022) verilerinden derlenerek yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 2’de küresel enerji bileşiminde nükleer enerjinin yıllar itibarıyla Dünya ve OECD ülkeleri genelinde paralel bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir. AB ortalamasında ise nükleer enerji üretimi Dünya ve OECD ortalamasının oldukça altında bir eğilim sergilemektedir. Buna rağmen 2021 yılı itibarıyla nükleer enerji, dünya elektrik arzının yaklaşık %10’unu, OECD ülkelerindeki toplam elektrik arzının %17,5’ini sağlarken; Avrupa Birliği’nde bu oran yaklaşık %25 seviyelerindedir. OECD ülkeleri toplu olarak ise, dünyadaki nükleer enerjinin yaklaşık %80’ini üretmektedir. Geri kalanı ise OECD dışı 12 ekonomide üretilmektedir. Ayrıca 2002 yılından itibaren hem Dünya hem de OECD ve AB ortalamasında nükleer kapasitede kademeli olarak bir düşüş eğilimi söz konusudur. Nükleer enerjideki bu düşüş karşısında ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi için hangi kaynaklara doğru bir dönüşüm yaşandığının tespit edilmesi düşük karbon ekonomisine geçiş için belirleyici bir unsurdur. Bu kapsamda elektrik üretiminde alternatif enerji kaynaklarının payları Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Elektrik Üretiminde Alternatif Enerji Kaynaklarının Payları (%)

Dönem	Fosil Yakıtlar			Yenilenebilir Enerji			Nükleer Enerji			Diğer		
	Dünya	OECD	AB	Dünya	OECD	AB	Dünya	OECD	AB	Dünya	OECD	AB
1985	63,58	60,45	55,30	20,83	19,51	15,66	15,07	19,29	27,43	0,52	0,74	1,61
1990	63,66	59,91	53,04	19,06	17,09	13,32	16,72	22,19	32,06	0,55	0,80	1,58
1995	62,28	58,49	50,87	19,72	17,02	14,69	17,35	23,60	32,90	0,65	0,89	1,54
2000	64,26	60,38	50,08	18,40	15,85	15,50	16,58	22,71	32,34	0,76	1,05	2,08
2005	66,58	61,72	51,34	17,74	15,23	15,15	14,99	22,00	31,30	0,69	1,05	2,22
2006	66,81	61,34	51,33	17,91	15,64	15,74	14,63	22,01	30,76	0,65	1,01	2,17
2007	68,00	62,65	51,96	17,68	15,43	16,65	13,69	20,92	29,21	0,63	1,00	2,18
2008	67,41	61,92	50,35	18,60	16,38	18,08	13,40	20,73	29,51	0,60	0,97	2,06
2009	66,96	60,40	48,91	19,15	17,42	20,08	13,31	21,22	28,98	0,58	0,96	2,04
2010	67,07	60,39	47,27	19,42	17,79	21,89	12,83	20,81	28,64	0,68	1,00	2,20
2011	67,66	60,25	47,29	19,76	19,16	21,96	11,91	19,60	28,59	0,67	1,00	2,16
2012	67,88	61,06	45,28	20,64	20,15	24,83	10,83	17,80	27,71	0,65	0,99	2,18
2013	67,29	59,79	42,37	21,46	21,30	27,69	10,62	17,94	27,69	0,63	0,97	2,25
2014	66,77	58,86	39,89	22,04	22,04	29,28	10,57	18,15	28,53	0,62	0,95	2,30
2015	66,07	58,07	41,05	22,71	23,04	29,46	10,60	17,95	27,16	0,62	0,95	2,34
2016	65,12	56,90	41,56	23,52	23,88	29,75	10,49	17,81	26,32	0,87	1,41	2,37
2017	64,48	55,84	42,35	24,38	25,14	29,55	10,28	17,62	25,74	0,86	1,41	2,36
2018	64,03	55,24	39,81	25,01	25,94	32,02	10,12	17,42	25,97	0,84	1,40	2,21
2019	62,82	53,56	37,82	26,00	27,16	33,65	10,34	17,82	26,45	0,83	1,46	2,08
2020	61,26	51,47	35,12	27,86	29,81	37,92	10,02	17,18	24,60	0,86	1,54	2,35
2021	61,42	51,45	35,58	27,86	29,89	37,11	9,84	17,05	25,29	0,89	1,61	2,02
Dönem Ortalaması	65,30	58,58	45,65	21,42	20,71	23,81	12,58	19,61	28,44	0,70	1,10	2,11

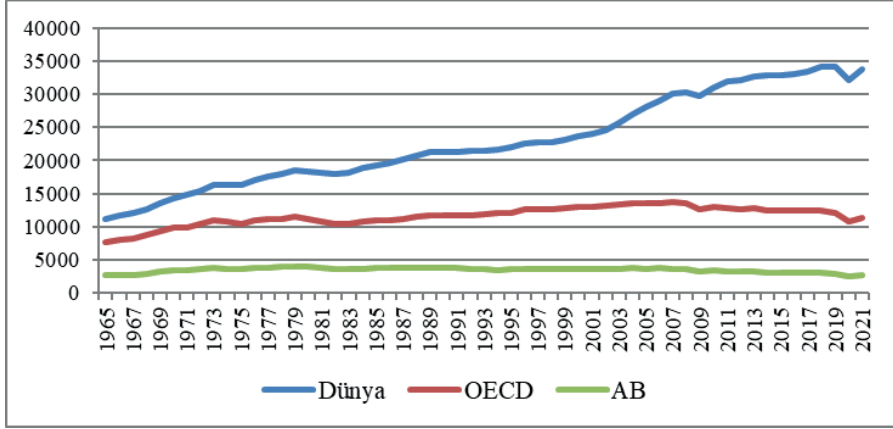
Kaynak: British Petroleum (2022) verilerinden derlenerek yazar tarafından hesaplanmıştır.

Not: Tabloda yer verilen fosil yakıtlar kömür, petrol ve doğalgaz toplamından oluşurken; yenilenebilir kaynaklar güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyoyakıtlar toplamından oluşmaktadır. Diğer olarak ifade edilen kaynaklar ise; fosil, yenilenebilir ve nükleer enerji dışında kalan kaynakları içermektedir. Örneğin; pompalanan hidro enerji, yenilenemeyen atıklar ve istatistiksel farklar (olumlu veya olumsuz) "diğer" içerisinde kategorize edilmektedir.

Tablo 1'de yer verilen verilere göre; 1985-2021 dönem ortalamasında hem küresel olarak hem de OECD ve AB ortalamasında elektrik üretiminde en büyük pay (sırasıyla yaklaşık %65, %59 ve %46) fosil yakıtlara aittir. Küresel elektrik arzında ve OECD ortalamasında en yüksek ikinci pay yenilenebilir enerji kaynaklarına aitken, AB ortalamasında elektrik üretiminde fosil yakıtlardan sonra nükleer enerjinin payı daha belirgindir. Bu kapsamda küresel ölçekte ve iklim değişikliği ile mücadeleyi enerji politikalarının merkezine yerleştiren OECD ve AB'nde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük ölçekte halen fosil yakıtlardan karşılanması düşük karbon ekonomisine geçiş için önemli bir engel olarak yorumlanabilir. Diğer taraftan incelenen

dönemde hem küresel eğilimde hem de OECD ve AB ortalamasında yenilenebilir kaynakların elektrik üretimindeki payı kademeli olarak artarken, nükleer enerjinin elektrik arzındaki payının azalma eğiliminde olması dikkat çeken bir diğer gelişmedir. Bu enerji bileşimine göre incelenen ülkelerdeki enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının nasıl bir seyir izlediğine Şekil 3'te yer verilmektedir.

Şekil 3. Yıllara göre Enerji Kaynaklı CO₂ Emisyonlarındaki Değişim (milyon ton cinsinden)



Kaynak: British Petroleum (2022) verilerinden derlenerek yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil3'e göre 1965 yılından 2021 yılına kadar geçen sürede enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonları yaklaşık %202,7 oranında bir artış sergilemektedir. Aynı dönemde OECD ülkelerinde bu artış oranı %46,6 iken; AB ortalamasında bu oran yaklaşık %4,3 seviyelerindedir. Buna göre; küresel enerji kaynaklı emisyonların 2021 yılı itibarıyla %33,3'ü OECD ülkelerinden kaynaklanmakta iken, AB'nin küresel enerji kaynaklı emisyonlara katkısı yalnızca %8 seviyelerindedir. Bu görünümün arkasında; AB'nin enerji bileşiminde düşük karbonlu ve temiz olarak nitelendirilen yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarının önemli bir yer tutması bulunmaktadır. Dünya ve OECD ortalamasında emisyon salınımlarının AB ortalamasına oranla daha yüksek seyretmesi ise halen büyük ölçüde karbon temelli fosil yakıtlara bağımlı olmalarıyla ilişkilidir.

Düşük karbon ekonomisi küresel enerji gündeminin tam merkezinde yer alsa da halen pek çok ülkede ve dünya genelinde artan karbondioksit emisyonları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan iklim değişikliği riski pahasına, fosil yakıtlar Tablo 1'de görüldüğü gibi hâkim enerji kaynağı durumundadır.

Çünkü ülkelerin enerji bileşimlerini kısa vadede değiştirememelerinin diğer bir ifade ile fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına kolayca geçememelerinin birtakım nedenleri ve zorlukları bulunmaktadır. Bunlar arasında; enerji yoğunluğu, kesinti (arz güvenliği), konum, ulaşım darboğazları (tedarik), çevresel etkiler ve arazi uygunluğu (kullanılabilirliği) gibi bazı faktörler yer almaktadır (Holechek vd., 2022:9). Daha önemli bir neden ise; genellikle tüm yakıtlar içerisinde en az vergilendirilen yakıt kaynağının kömür olması enerji bileşiminde fosil yakıtları ön plana çıkarmaktadır. Kömür, genellikle ya çok düşük ya da hiç ithalat tarifesine tabi bulunmamaktadır. Bunun aksine, yenilenebilir enerji kaynakları en az %10 ve bazı durumlarda %30'a kadar çıkan ithalat tarifelerine tabi olabilmektedir (OECD, 2015a: 1).

Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya karşı güçlü bu direnişlere rağmen AB; düşük karbon ekonomisine geçiş için daha sıkı tedbirler tasarlayarak enerji politikalarını bu hedeflere ulaşacak biçimde şekillendirmektedir. Buna göre; 1990 yılına oranla sera gazı emisyonlarında en az %40 seviyelerinde bir azalma, yenilenebilir enerjinin toplam enerji içerisindeki payının en az %32 seviyelerine yükseltilmesi ve enerji verimliliğinde en az %32,5 oranında bir iyileşme AB'nin 2030 yılına kadarki enerji politikasının temel hedeflerini oluşturmaktadır (European Commission, 2023). Bu enerji politikasında nükleer enerji de, AB'nde fosil yakıtlara düşük karbonlu bir alternatif olarak ele alınmakta ve AB'nde üretilen elektriğin yaklaşık %26'sını oluşturan 27 AB Üye Devletinin 13'ünün enerji bileşiminde kritik bir bileşeni temsil etmektedir. Ancak, 1986 Çernobil ve 2011 Fukushima nükleer felaketinin ardından, nükleer enerji AB'nde de oldukça tartışmalı hale gelmiştir. Almanya'nın 2020 yılına kadar nükleer enerjiyi aşamalı olarak durdurma kararı ve gemilerindeki çatlakların keşfedilmesinin ardından iki Belçika reaktörünün geçici olarak kapatılması, AB'nde nükleer enerjiden vazgeçilmesi yönündeki baskıyı artırmıştır. Nükleer enerjiyi enerji bileşimlerine dâhil edip etmemeyi seçen üye devletler olsa da AB mevzuatı nükleer enerji santrallerinin güvenlik standartlarını iyileştirmeyi ve nükleer atıkların güvenli bir şekilde işlenmesini ve bertaraf edilmesini sağlamayı amaçlamaktadır (European Parliament, 2023). Dolayısıyla AB enerji ve iklim çerçevesi, düşük karbon ekonomisi hedeflerine ulaşmak için temiz enerji olarak yenilenebilir ve nükleer enerjiyi enerji bileşiminin merkezine yerleştirmektedir.

OECD ülkeleri açısından bakıldığında ise; tüm ülkelerin düşük karbonlu bir ekonomiye daha etkili bir şekilde geçişini desteklemek yönünde enerji ve çevre politikaları tasarlandığı görülmektedir. Çünkü OECD tarafından yapılan bir araştırma, eğer önlem alınmazsa iklim değişikliğinin 2060 yılına kadar küresel gayrisafi yurt içi hasılayı (GSYİH) yılda %1 ila %3,3 oranında azaltabileceğini göstermektedir (OECD, 2015a:1; OECD, 2015b: 15-16).

Bu nedenle, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin Kyoto Protokolü'nü takip etmek için gelecekteki emisyon azaltımları konusunda küresel bir fikir birliği olmamasına rağmen, birçok OECD ülkesi 2050'ye kadar olan dönemde emisyon azaltımları için iddialı hedefler benimsemiştir. Bu kapsamda benimsenen düşük karbonlu bir enerji ve çevre politikasında OECD ülkelerinde nükleer enerji, 1985-2021 döneminde elektrik üretimindeki ortalama %19,6 payıyla en düşük karbonlu elektrik kaynağı durumundadır. Ancak AB'ne benzer şekilde Fukushima kazası OECD ülkelerinde de nükleer enerjinin gelişimine gölge düşürmüştür. Örneğin; Belçika, Almanya ve İsviçre aşamalı olarak nükleer enerjiyi kullanımdan kaldırma politikalarını açıklayıp onaylarken, İtalya nükleer enerjiyi yeniden devreye sokma planlarından vazgeçmiştir. Öte yandan; Çin, Çek Cumhuriyeti, Hindistan, Polonya, Kore Cumhuriyeti, Rusya Federasyonu, Türkiye, Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri ve Vietnam gibi pek çok ülke ise başlangıç planlanandan biraz daha yavaş olsa da, yeni inşaat planlarıyla düşük karbon ekonomisi için nükleer enerji kullanımına devam etme politikalarını açıklamışlardır (OECD, 2012:13-14; British Petroleum, 2022). Dolayısıyla OECD ülkelerinin enerji ve iklim çerçevesi de düşük karbon ekonomisine geçişe odaklanmakta ve bu geçişte yenilenebilir enerji kadar nükleer enerji de temiz enerji olarak benimsenmektedir.

Sonuç ve Değerlendirme

Düşük karbon ekonomisi, en temel anlamıyla düşük düzeyde sera gazı emisyonu üreten enerji kaynaklarına dayalı bir ekonomi olarak tanımlanmaktadır. Ancak tarihsel süreç içerisinde insanlığın ihtiyaç duyduğu enerji, yakıldığında yüksek düzeyde karbon açığa çıkaran fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğalgaz gibi) karşılanmış ve bu eğilim halen devam etmektedir. Bugün gelinen noktada hem fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte sınırlara ulaşacağı ve tükeneceği öngörülmesi hem de iklim değişikliğine olan büyük etkileri nedeniyle fosil yakıt kaynaklarına dayalı bir ekonominin sürdürülebilir olamayacağı açıktır. Dolayısıyla bu büyük risklerle asıl soru; kirli olarak nitelendirilen fosil yakıtlardan temiz enerji (yenilenebilir ve nükleer enerji) kaynaklarına doğru bir dönüşümün gerekli olup olmadığı değil, bu dönüşümün hangi zaman ölçeğinde gerçekleşmesi gerektiğidir. Fosil kaynakların artan kıtlığı ve artan dünya enerji talebi ile ortaya çıkan yeni çevresel gereksinimler birleşince, yarının enerjilerinin ne olacağı konusundaki tartışmalar alevlenmektedir. Bu motivasyondan hareketle bu çalışmada, daha sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir ekonomi elde etmek için temiz enerji çözümlerinde nükleer enerjinin bir alternatif olup olmayacağı sürdürülebilirlik, güvenlik ve çevresel dâhil olmak üzere çeşitli boyutlardaki fırsatlar ve zorluklar ele alınarak tartışılmaktadır.

Düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş için kademeli olarak fosil yakıtların yerini almanın kaçınılmaz sürecinde, birçok enerji teknolojisi belirli uygulamalarda dikkate alınmaktadır. Bu dönüşüm sürecinde temiz, sürdürülebilir ve alternatif bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmakta ve bu kaynakların sürdürülebilirliği ve düşük karbonlu ekonomiyi garanti edebileceği genel bir görüş birliğiyle savunulmaktadır. Ancak son dönemlerde, yenilenebilir enerji teknolojilerindeki yüksek maliyetler, devreye alınma süresinin uzunluğu, ara girdide yüksek dışa bağımlılık ve düşük yatırım oranları gibi sebeplerle nükleer enerjinin de düşük karbon ekonomisi hedefleri için bir alternatif olup olmayacağı tartışmaları gündeme gelmektedir. Bu kapsamda uzun vadede, nükleer teknolojileri; güvenli, ekonomik, güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde enerji sağlayabilecek gelişmiş bir enerji kaynağı olduğu savunulmaktadır. Çünkü nükleer enerji kullanımı, küresel karbondioksit emisyonlarını derinden azaltmanın yanı sıra metan gibi diğer önemli sera gazlarında da azaltma sağlayabilir. Diğer yandan nükleer enerji, nükleer yakıt üretmek için kullanılan uranyumun bol miktarda bulunması nedeniyle fosil yakıtların yerini alacak yeterli kapasiteye sahiptir. Bu nedenle nükleer enerji, fosil yakıtların içsel sınırlamalarına ve fosil yakıt kaynaklı iklim değişikliğine karşı etkin bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Küresel enerji görünümünün yanı sıra, enerji ve iklim çerçeveleri konusunda en stratejik uygulamaları hayata geçiren OECD ve AB gibi birliklerde mevcut elektriğin büyük bir kısmının nükleer enerjiden sağlanıyor olması pek çok ülkenin nükleer enerjiyi düşük karbon ekonomisi için bir alternatif olarak ele aldığını göstermektedir. Bu noktada Avrupa Birliği, Avrupa'da nükleer enerjiye güvenmeden emisyonlardaki artışın engellenemeyeceğini ve ayrıca küresel dekarbonizasyon politikaları üretilirken nükleer enerjinin rolü olmadan başarı mümkün olmayacağını açıkça belirtmektedir. OECD ise; Paris Anlaşması ile uyumlu olarak CO₂ emisyonlarını azaltma hızına ulaşmak ve enerji güvenliğini sağlamak için verimlilik ve yenilenebilir enerji yatırımlarında büyük artışların yanı sıra nükleer enerjide artışın gerekliliğine dikkat çekmektedir. Ancak her iki birlik politikasında nükleer enerji, düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarına bir alternatif olarak ele alınmamaktadır. Aksine, rüzgâr ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarına tamamlayıcı bir güç olarak ya da fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş döneminde yenilenebilir enerji kaynakları olgunlaşana kadar hâlihazırda olgun bir teknoloji olarak çevre kalitesini iyileştirmek için alternatif bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Nükleer enerji kullanımının yaygınlaştırılmasına dair olumlu bu tutumun yanı sıra, Fukushima ve Çernobil faciaları gibi nükleer enerji kullanımından

kaynaklı kazaların tekrarlanma ihtimalleri, nükleer enerjiye karşı olumsuz kamuoyu bilinci, nükleer silahların yaygınlaşma riski, nükleer endüstride artan faaliyetlerle ortaya çıkması muhtemel sosyal ve ekonomik eşitsizlikler gibi pek çok zorluk bulunmaktadır. Dolayısıyla çevre ekonomisi literatüründe enerji kaynakları arasında çevre kalitesine etkisi en çok tartışılan enerji türü nükleer enerjidir. Nükleer enerji bir yandan çok rekabetçi ve sera etkisine zararsızdır. Bu noktadan bakıldığında; sürdürülebilirlik, bulunabilirlik ve kabul edilebilirlik gibi gelecek hedeflerine ulaşmak için ideal bir alternatif gibi görünmektedir. Öte yandan, ise fisyonu dayalı üretim teknolojisi sağlık, çevre ve güvenlik açısından birtakım riskler barındırmaktadır. Bu bakımdan ise, nükleer enerji daha az arzu edilebilir. Bu nedenle nükleer enerji gerçekten sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir ekonomi için bir alternatif olarak değerlendirilip enerji politikalarına dâhil edilecekse, enerji güvenliği konusundaki bütün bu risklerin kontrol altına alındığından emin olunmalıdır. Diğer taraftan, nükleer enerji kullanımı enerji politikalarına dâhil edilirken farklı ülkelerdeki farklı ekonomik gelişme kalıpları, kaynak kullanılabilirliği kısıtlamaları, çevre politikaları, jeopolitik durumlar ve nükleer enerji kullanımına ilişkin yasal kısıtlamalar gibi pek çok faktör etkili olmaktadır. Dolayısıyla nükleer enerji politikaları tasarlanırken her ülkenin tarihi, çevresel ve coğrafi koşullarına bağlı olarak nükleer enerjinin kamu tarafından kabul edilmesini etkileyen tüm bu kısıtlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynakça

- Augutis, J., Krikštolaitis, R., Matuzien, V. & Pe, S. (2009). Assessment of Lithuanian power supply security depending on nuclear energy. *WIT Transactions on the Built Environment*, 108, 235-247. doi:10.2495/SAFE090231
- Banga, C., Deka, A., Kilic, H., Ozturen, A. & Ozdeser, H. (2022). The role of clean energy in the development of sustainable tourism: does renewable energy use help mitigate environmental pollution? A panel data analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59363-59373. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19991-5>
- Baz, K., Cheng, J., Xu, D., Abbas, K., Ali, I., Ali, H. & Fang, C. (2021). Asymmetric impact of fossil fuel and renewable energy consumption on economic growth: A nonlinear technique. *Energy*, 226, 120357. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120357>
- British Petroleum. (BP) (2022). Statistical Review of World Energy, 20 Temmuz 2023. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Brook, B. W., Alonso, A., Meneley, D. A., Misak, J., Bles, T. & Van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, 1, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>
- Caglar, A. E. (2022). Can nuclear energy technology budgets pave the way for a transition toward low-carbon economy: insights from the United Kingdom. *Sustainable Development*, 31(1), 198-210. <https://doi.org/10.1002/sd.2383>
- Danish, Ozcan, B. & Ulucak, R. (2021). An empirical investigation of nuclear energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emission in India: Bridging IPAT and EKC hypotheses. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(6), 2056-2065. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.008>
- Dincer, I. & Acar, C. (2015). A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 39(5), 585-606. <https://doi.org/10.1002/er.3329>
- Energy Information Administration (EIA). 2023. Nuclear Explained. *Nuclear Power and the Environment*, 19 Temmuz 2023. <https://www.eia.gov/>
- Environmental and Energy Study Institute. (2023). Fossil Fuels, 16 Temmuz 2023. <https://www.eesi.org/>
- European Commission (2023). Climate Action. 2030 Climate & Energy Framework, 22 Temmuz 2023. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- European Parliament (2023). Committee on Industry, Research and Energy. *Nuclear Energy*, 22 Temmuz 2023. <https://www.europarl.europa.eu/committees/en/itre/home/highlights>

- Findlay, T. (2010). Nuclear energy and global governance: ensuring safety, security and non-proliferation. Routledge Global Security Studies.
- Fiore, K. (2006). Nuclear energy and sustainability: Understanding ITER. *Energy Policy*, 34(17), 3334-3341. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.07.008>
- Goldemberg, J. (2006). The promise of clean energy. *Energy Policy*, 34(15), 2185-2190. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.03.009>
- Grossi, R. M. (2020). Nuclear power and the clean energy transition. Building a clean energy future. International Atomic Energy Agency (Iaea) Bulletin. The Iaea's Flagship Publication. www.iaea.org/bulletin
- Hassan, S. T., Danish, Baloch, M. A. & Tarar, Z. H. (2020). Is nuclear energy a better alternative for mitigating CO₂ emissions in BRICS countries? An empirical analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(12), 2969-2974. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.016>
- Holeczek, J. L., Geli, H. M. E., Sawalhah, M. N. & Valdez, R. (2022). A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050?. *Sustainability*, 14(8), 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- Hosseini, S. E. & Wahid, M. A. (2020). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4110-4131. <https://doi.org/10.1002/er.4930>
- International Energy Agency (IEA) (2019). Nuclear Power in a Clean Energy System, 19 Temmuz 2023. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>
- International Energy Agency (IEA) (2023). Energy Security, 18 Temmuz 2023. <https://www.iea.org/about/energy-security>
- Iwata, H., Okada, K. & Samreth, S. (2010). Empirical study on the environmental Kuznets curve for CO₂ in France: The role of nuclear energy. *Energy Policy*, 38(8), 4057-4063. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.031>
- Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., Jaiswal, K. S. & Karuppasamy, K. S. K. (2022). Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, 7, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>
- Jin, T. & Kim, J. (2018). What is better for mitigating carbon emissions—Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 464-471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.022>
- Kartal, M. T., Samour, A., Adebayo, T. S. & Depren, S. K. (2023). Do nuclear energy and renewable energy surge environmental quality in the United States? New insights from novel bootstrap Fourier Granger causality in quantiles approach. *Progress in Nuclear Energy*, 155, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104509>

- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: 'Our common future'. *Medicine and War*, 4(1), 17-25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Kim, Y., Kim, M. & Kim, W. (2013). Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy. *Energy Policy*, 61, 822-828. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.107>
- Kirikaleli, D., Adedoyin, F. F. & Bekun, F. V. (2020). Nuclear energy consumption and economic growth in the UK: Evidence from wavelet coherence approach. *Journal of Public Affairs*, 21(1), e2130. <https://doi.org/10.1002/pa.2130>
- Kok, B. & Benli, H. (2017). Energy diversity and nuclear energy for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 111, 870-877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.001>
- Kosai, S. & Unesaki, H. (2020). Quantitative evaluation of security of nuclear energy supply: United States as a case study. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100491>
- Kosai, S. & Yamasue, E. (2019). Recommendation to ASEAN nuclear development based on lessons learnt from the Fukushima nuclear accident. *Energy Policy*, 129, 628-635. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.058>
- Lau, L. S., Choong, C. K., Ng, C. F., Liew, F. M. & Ching, S. L. (2019). Is nuclear energy clean? Revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, 77, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.09.015>
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2178-2199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>
- Lightfoot, H. D., Manheimer, W., Meneley, D. A., Pendergast, D. & Stanford, G. S. (2006). Nuclear fission fuel is inexhaustible. 2006 IEEE EIC Climate Change Conference, Ottawa, Canada, (1-8). doi: 10.1109/EICCC.2006.277268.
- Mahmood, N., Danish, Wang, Z. & Zhang, B. (2020). The role of nuclear energy in the correction of environmental pollution: Evidence from Pakistan. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(6), 1327-1333. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.027>
- Mez, L. (2012). Nuclear energy—Any solution for sustainability and climate protection?. *Energy Policy*, 48, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.047>
- Nathaniel, S. P., Alam, M. S., Murshed, M., Mahmood, H. & Ahmad, P. (2021). The roles of nuclear energy, renewable energy, and economic growth in the abatement of carbon dioxide emissions in the G7 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47957-47972. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13728-6>

- OECD (2012). The Role of Nuclear Energy in a Low-carbon Energy Future. NEA No. 6887. ISBN 978-92-64-99189-7 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14562/the-role-of-nuclear-energy-in-a-low-carbon-energy-future?details=true
- OECD (2015a). Three Steps to A Low-Carbon Economy The Goal of Zero Net Emissions can be Achieved. Policy Brief, 22 Temmuz 2023. <http://www.oecd.org/>
- OECD (2015b). Aligning Policies for a Low-Carbon Economy. OECD Publishing, Paris, 22 Temmuz 2023. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264233294-en>
- Omer, A. M. (2008a). Green energies and the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(7), 1789-1821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.009>
- Omer, A. M. (2008b). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>
- Our World in Data (2023). Energy Mix, 16 Temmuz 2023. <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- Pao, H. T., Li, Y. Y. & Fu, H. C. (2014). Clean energy, non-clean energy, and economic growth in the MIST countries. *Energy Policy*, 67, 932-942. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.039>
- Pata, U. K. & Samour, A. (2022). Do renewable and nuclear energy enhance environmental quality in France? A new EKC approach with the load capacity factor. *Progress in Nuclear Energy*, 149, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104249>
- Pearce, J. M. (2012). Limitations of nuclear power as a sustainable energy source. *Sustainability*, 4(6), 1173-1187. <https://doi.org/10.3390/su4061173>
- Peng, L., Zhang, Y., Li, F., Wang, Q., Chen, X. & Yu, A. (2019). Policy implication of nuclear energy's potential for energy optimization and CO₂ mitigation: A case study of Fujian, China. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(4), 1154-1162. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.01.016>
- Sadekin, S., Zaman, S., Mahfuz, M. & Sarkar, R. (2019). Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. *Energy Procedia*, 160, 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.200>
- Sadiq, M., Shinwari, R., Usman, M., Ozturk, I. & Maghyreh, A. I. (2022). Linking nuclear energy, human development and carbon emission in BRICS region: do external debt and financial globalization protect the environment?. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(9), 3299-3309. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.024>
- Saidi, K. & Omri, A. (2020). Reducing CO₂ emissions in OECD countries: Do renewable and nuclear energy matter?. *Progress in Nuclear Energy*, 126, 103425. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103425>

- Shafiee, S. & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished?. *Energy Policy*, 37(1), 181- 189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- Shan, S., Genç, S. Y., Kamran, H. W. & Dinca, G. (2021). Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey. *Journal of Environmental Management*, 294, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113004>
- Shao, X., Zhong, Y., Liu, W. & Li, R. Y. M. (2021). Modeling the effect of green technology innovation and renewable energy on carbon neutrality in N-11 countries? Evidence from advance panel estimations. *Journal of Environmental Management*, 296, 113189. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113189>
- Vo, D. H., Vo, A. T., Ho, C. M. & Nguyen, H. M. (2020). The role of renewable energy, alternative and nuclear energy in mitigating carbon emissions in the CPTPP countries. *Renewable Energy*, 161, 278-292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.093>
- World Nuclear Association. (2023a). Nuclear Power and Energy Security, 19 Temmuz 2023. <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/nuclear-power-and-energy-security.aspx>
- World Nuclear Association. (2023b). How can nuclear combat climate change?, 20 Temmuz 2023. <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>
- Yue, X., Peng, M. Y. P., Anser, M. K., Nassani, A. A., Haffar, M. & Zaman, K. (2022). The role of carbon taxes, clean fuels, and renewable energy in promoting sustainable development: How green is nuclear energy?. *Renewable Energy*, 193, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.017>
- Zhou, S. & Zhang, X. (2010). Nuclear energy development in China: a study of opportunities and challenges. *Energy*, 35(11), 4282-4288. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.020>
- Zinkle, S. J. & Was, G. S. (2013). Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 61(3), 735-758. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.004>