

## Japon Fukushima Daiichi Nükleer Güç Santrali (NGS) Reaktörleri Kazaları Sonrası Baz Yüklü Yeni Kuşak Nükleer Elektrik Santralleri Gelişimi

Ahmet Cangüzel Taner

Fizik Yüksek Mühendisi

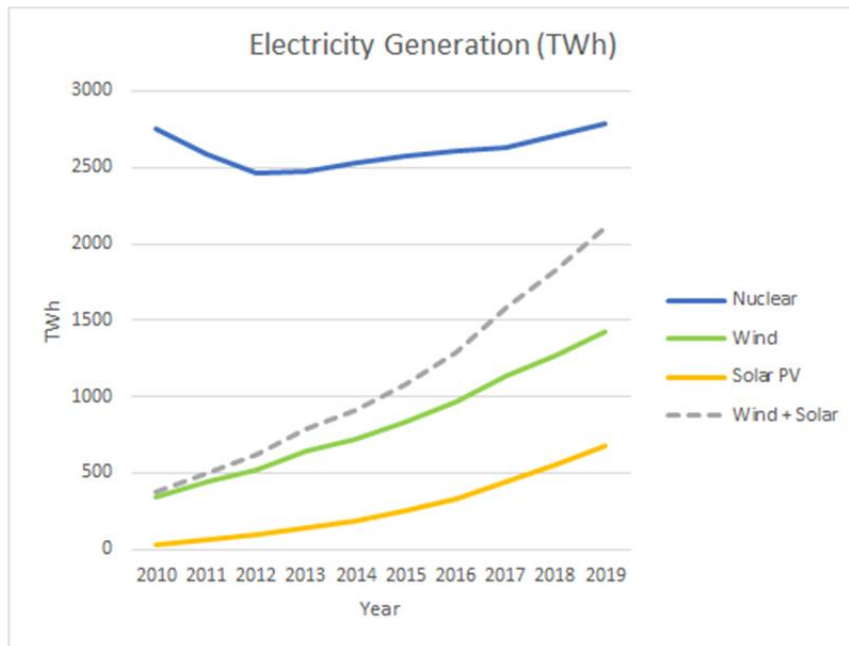
Fizik Mühendisleri Odası FMO ([canguzel.taner@gmail.com](mailto:canguzel.taner@gmail.com))

Güneş sistemi içinde yegâne yaşanabilir mavi gezegen olan dünyanın küresel enerji tüketimi ve kullanımı bakımından yoğun fosil yakıtlar bağımlılığı nedeni ile ortaya çıkan global iklimsel değişim sorunları, kamuoyunda çok ciddi kaygılar uyandırmaktadır. Günümüzde yerkürenin ısınması ve global iklim değişikliği mekanizmaları problemlerinin önlenmesi dünya gündeminin öncelikli konuları arasında yer almaktadır. Küresel karbonsuzlaştırma devrimi başlatan Birleşmiş Milletler BM 2015 Paris İklim Anlaşması hükümlerinin uygulanması ise can alıcı önem taşımaktadır. Mart 2011 tarihinde doğal afetleri müteakip ortaya çıkan Japonya Fukuşima Daiçi konvansiyonel nükleer elektrik reaktörleri kazası ile birlikte sekteye uğrayan dünya karbonsuz nükleer güç santralleri NGS kompleksleri yatırımları yeniden canlılık kazanmaktadır. Söz konusu Japon nükleer santral kazası vuku bulmasından 10 yıl sonra global inovatif nükleer enerji projeleri kapsamında süregelen son gelişmeler ve nükleer gücün dünyanın karbon nötr olma çalışmalarına ehemmiyetli katkısı bu yazıda incelenmektedir.

Yeni bin yılın (milenyumun) başlarında yeryüzünün ısınması ve global iklim değişiklikleri ile enerji kaynaklı dünya sera gazı emisyonları arasında bir ilişkinin olduğuna dair bilimsel bulgular doruk noktaya ulaşmıştır. Küresel ısınma ve global iklimsel değişim mekanizmaları sorunları çözümü yönünde ise **nükleer rönesans** görüşü ileri sürülmüştür. Temiz enerji kaynakları sistemlerine transformasyon süreci zarfında düşük karbon enerjili nükleer güç kompleksleri seçeneği öncü rolü de bilim insanları ve politika belirleyiciler tarafından benimsenmiştir. Ancak, **Tokyo Elektrik Güç Şirketi** (Tokyo Electric Power Company - **TEPCO**) tarafından işletilen 11 Mart 2011 tarihinde meydana gelen tabii afetler zinciri kökenli **Fukuşima Daiçi** klasik nükleer güç santrali **NGS** nükleer yakıt erimesi kazaları sonucu karbonsuz küresel nükleer elektrik santralleri projeleri ve yatırımları büyük bir darbe almıştır. Böylece, dünyanın ekonomik gelişimi, küresel enerji arz güvenliği ve global iklim değişiklikleri problemleri çözümleri açısından önemli sayılan çok sayıda karbonsuz nükleer güç tesisi projeleri askıya alınmıştır. Dünya nükleer emniyet kuralları, nükleer güvenlik kriterleri ve radyasyon güvenliği ölçütleri güçlendirilmesi çerçevesinde uluslararası çalışmalar sürerken bazı ülkeler karbonsuz birincil enerji kaynakları nükleer güç santrali **NGS** reaktörlerinin kademeli şekilde kapatılması kararları vermiştir. Günümüzde ise global inovasyona dayalı nükleer güvenlik sistemleri iyileştirilmesi faaliyetleri çabalarına paralel olarak küresel ısınma mekanizmaları sorunları mücadelesi kapsamında temel yük kaynağı geleneksel demode fosil yakıtlı termik santraller karşısında karbonsuz inovatif nükleer güç reaktörleri yeniden iklim dostu bir teknoloji kabul edilmektedir. Global karbonsuzlaştırma teknolojileri ve prosesleri kullanımı yönünden zorluk çeken sanayi ve taşıma sektörleri bağlamında nükleer enerji, dar alanda 7 gün 24 saat karbon nötr hizmet veren önemli bir alternatif güç kaynağı sayılmaktadır. **Uluslararası İklim Değişikliği Paneli** (International Panel on Climate Change -**IPCC**) ve **Uluslararası Enerji Ajansı** (International Energy Agency - **IEA**) gibi tarafsız kuruluşlar tarafından küresel karbonsuz nükleer elektrik tesisleri ön plana çıkarılmaktadır. Bununla beraber nükleer gücün temiz, güvenilir ve

sürdürülebilir enerji kaynağı olup olmadığı tartışmaları da kamuoyu nezdinde halen devam etmektedir. Japonya geleneksel **Fukushima Daiichi** nükleer güç reaktörleri kazaları sonrası kamuoyu desteği sağlanmasına yönelik karbonsuz yenilikçi nükleer enerji konusunda halkın aydınlatılması ve bilgilendirilmesi çalışmaları zor koşullar altında yürütülmektedir. Kamuoyunda oluşan nükleer korku, nükleer dehşet ve nükleer nefret atmosferi, karbonsuz yenilikçi nükleer güç santralleri **NGS** projelerinin geleceği üzerine gölge düşürmektedir. Öte yandan bazı ana piyasalar ve sermaye kuruluşları, karbonsuz nükleer enerjinin küresel iklim değişikliği sorunlarının azaltılması faaliyetlerine yönelik önemli katkısını ve global sürdürülebilir ekonomik kalkınma yönünden önemini dikkate almamaktadır. Böylece, ulusal inovasyona dayalı karbonsuz nükleer elektrik politikaları sekteye uğramakta aynı zamanda ilk yatırım maliyetleri yüksek olan evrimsel nükleer enerji yatırımları ekonomik sıkıntılar ve finansman zorlukları içine düşmektedir. Mevcut durumda dünyanın uzun yıllardır işletilen baz enerji kaynakları fosil yakıt yakan klasik güç santralleri üniteleri profili bağımlılığı da devam etmektedir. Karbonsuz nükleer güç üretimi en büyük darbeyi Japonya'daki nükleer kaza sonucu almıştır. **Fukuşima** nükleer yakıt erimesi kazaları ile birlikte Japon kamuoyunun nükleer enerji güvenilirliği ve kabulü son derece azalmıştır. Netice itibarıyla Japonya genelinde çalışan 50 adet nükleer elektrik reaktöründen 46 'sının işletilmesi askıya alınmıştır. Japonya'da karbonsuz nükleer güç 1960'lı yıllardan beri stratejik öncelikli yatırımlar faslında değerlendirilmiştir. Ancak, şimdilerde ise Japon elektrik üretimi portföyü kapsamında yalnızca %7.5 'lik bir yer tutmaktadır. Japon nükleer yakıt erimesi kazaları sonrası günümüzde sadece 9 adet ulusal nükleer enerji reaktörü tekrar nükleer güç üretimine başlamıştır.

2010 - 2019 seneleri arasında yıllara göre küresel karbonsuz nükleer elektrik üretimi eğrisi **terawatt-saat (TWh)** olarak **mavi çizgi** ile aşağıdaki grafikte görülmektedir. Doğa dostu karbonsuz yenilenebilir enerji kaynakları **YEK** odaklı rüzgar enerjisi santralleri **RES** türbinleri **yeşil çizgili** ve güneş enerjisi santralleri **GES** panelleri güç üretimleri **sarı çizgili** ile temsil edilmektedir. **YEK** menşeli **RES** ve **GES** üniteleri toplam elektrik enerjisi üretimleri ise kesik çizgili - - - eğri ile gösterilmektedir.



**Kaynak:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı - UAEA (International Atomic Energy Agency - IAEA) Yayınları

Dünyada bazı ülke yönetimleri kamuoyu görüşleri doğrultusunda nükleer enerji karşıtı politikalar izlemektedir. Örneğin, 2011 Japonya nükleer santral kazası meydana gelmesinden üç ay sonra Almanya Hükümeti, 2022 yılına kadar ülkesindeki tüm nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri komplekslerinin kapatılması kararı vermiştir. Alman nükleer güç üretimi gerçekleştiren 17 nükleer enerji reaktöründen 6 'sının işletilmesi sürekli olarak durdurulmuştur. Almanya ulusal elektrik üretimi kompozisyonu içeriğinde nükleer enerji %25 oranında temsil edilirken 2019 yılında %12 düzeyine gerilemiştir. Düşünce kuruluşu **Uluslararası Enerji Ajansı IEA** verilerine göre mevcut Alman elektrik enerjisi görünümü içinde temel yük kaynağı düşük kalorili kahverengi linyit ve kömür yakan termik santraller güç üretimi en büyük pay ile yer almaktadır. Belçika yönetimi de 2025 yılına kadar nükleer güç üretimi komplekslerinin kapatılması planını onaylamıştır. İtalya nükleer güç üretimi iktidardaki yönetimler tarafından desteklenmesine rağmen İtalyan kamuoyu nükleer enerji karşıtlığı nedeni ile 1990 yılından beri gerçekleşmemektedir. İspanya ve İsviçre yönetimleri, yeni karbonsuz nükleer güç santralleri **NGS** üniteleri inşaatları çalışmalarının durdurulması kararları vermiştir. Küresel boyutta toplam 65 adet karbonsuz nükleer güç reaktörü üniteleri 2011 ve 2020 yılları arasında ya kapatılmış ya da nükleer reaktör işletme ömürleri uzatılmamıştır. Böylece, dünya karbonsuz nükleer elektrik üretimi profili, 48 **GWe** nükleer enerji kapasitesi mertebesinde kayba uğramıştır. Global nükleer güç üretimi 2012 yılından itibaren ciddi düşüşler yaşamaktadır. Diğer taraftan, küresel ısınma ve global iklim değişikliği mekanizmaları krizleri çözümü yönünde çaba harcayan ülkeler, düşük karbon teknolojili yenilenebilir enerji kaynakları **YEK** kökenli rüzgar enerjisi santralleri **RES** ve güneş enerjisi santralleri **GES** elektrik üretimi sistemleri yatırımları üzerine odaklanmaktadır. Bununla beraber global düşük karbon ekonomisi açısından küresel nükleer güç üretimi, dünya elektrik üretimi kompozisyonu çerçevesinde karbonsuz hidroelektrik santralleri **HES** türbinleri komplekslerinden sonra ikinci sıradaki yerini korumaktadır.

Japonya **Fukushima Daiichi** nükleer güç santrali (**NGS**) kazası neticesi alınan dersler doğrultusunda olan bitenler ile ilgili gerçek bilgiler paylaşarak ulusal ve uluslararası düzeylerde nükleer yakıt erimesi kazaları eylem planları hazırlanmıştır. Söz konusu çalışmalarda küresel nükleer yakıt erimesi karşısında global nükleer güvenlik ve radyasyon güvenliği önlemlerinin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Özellikle işletilmekte olan nükleer elektrik santralleri ünitelerinin uzun vadeli çalıştırılması (**long term operation - LTO**), nükleer santral performans artırımı ve inovatif nükleer reaktör tasarımları üzerinde **Araştırma - Geliştirme Ar-Ge** faaliyetleri yürütülmüştür. Diğer taraftan, kurulması devam eden yeni nesil nükleer güç santralleri genelinde serbest piyasa ekonomisi koşulları ile ortaya çıkan yüksek nükleer reaktör maliyetleri, reaktörlerin inşaat ve montaj çalışma sürelerinin uzaması karşısında bazı ülkeler önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Böylece, çok büyük kapasiteli temel enerji kaynakları ileri nükleer güç reaktörleri kurulması da olası kılınmaktadır. Bu bağlamda Belarus, Çin, Güney Kore, Rusya ve **Birleşik Arap Emirlikleri (United Arab Emirates - UAE)** yenilikçi karbonsuz nükleer güç santralleri **NGS** reaktörleri örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, sodyum soğutmalı hızlı üretken reaktör (**Fast Breeder Reactor - FBR**) tasarımı **BN-800** tipi nükleer güç santrali de Rusya Federasyonu tarafından geliştirilmiştir. Rus yapımı **BN-800** nükleer güç reaktörü yatırımı maliyeti 2.17 milyar dolar ve nükleer elektrik üretimi kapasitesi 880 **MW** olan karbonsuz inovatif nükleer santral projesi Ağustos 2016 yılında faaliyete geçmiştir. Yenilikçi **BN-880** hızlı reaktör projesi sayesinde nükleer gücün uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından önemli sayılan yüksek aktiviteli nükleer atıklar minimum düzeye indirilmektedir. Öte yandan,

baz yüklü karbonsuz küçük modüler reaktörler (**small modular reactors - SMR**) yaygınlaşması da süratli biçimde sürmektedir. Birincil enerji kaynağı karbonsuz mini nükleer reaktörler, en umut veren yenilikçi nükleer enerji teknolojileri arasında kabul edilmektedir. Mevcut nükleer reaktör dizaynları ile mukayese edildiği takdirde mikro nükleer reaktör **SMR** tasarımları çok daha sadeleştirilmiştir. Modüler reaktör **SMR** dizaynları özellikle nükleer yakıt erimesi kazaları karşısında geliştirilmiş, nükleer reaktör özünde varolan zati nükleer güvenlik özellikleri (inherent nuclear safety features) ve etkin pasif nükleer güvenlik sistemleri niteliklerine sahip bir konumda bulunmaktadır. Mini modüler reaktörler **SMR** bağlantılı oluşan nükleer güç santralleri **NGS** ilk yatırım maliyetleri düşük düzeyde seyretmekte ve daha küçük şebeke sistemleri için esneklik getirmektedir. Baz yüklü karbonsuz **SMR** tipi reaktörler, çevre dostu karbonsuz yenilenebilir enerji kaynakları **YEK** tabanlı rüzgar enerjisi santralleri **RES** gülleri üniteleri ve güneş enerjisi santralleri **GES** tarlaları kompleksleri ile beraber kararlı, dengeli ve stabil elektrik üretimleri temin etmektedir. Temel güç kaynağı karbonsuz **SMR** reaktörleri sistemlerinin hidrojen üretimi ve tuzlu suyu tatlı suya dönüştürme tesisleri (water desalination plants) gibi elektriksel olmayan uygulamalara entegrasyonu da sağlanmaktadır. Ayrıca, inovatif yeni nesil nükleer santral tasarımları sayesinde daha az radyoaktif atık oluşmakta, nükleer atıkların yok edilmesi ve bertarafı prosesleri kolaylaşmaktadır. Aynı zamanda modern nükleer santral dizaynları ile birlikte çok yüksek aktiviteli tüketilmiş nükleer yakıtlar, yenilikçi nükleer güç reaktörü ünitelerinde yeniden nükleer yakıt olarak kullanılmaktadır.

2011 yılından beri kurulan küresel nükleer güç kapasitesi kapsamında Çin nükleer elektrik potansiyeli %50 'den daha fazla bir oranda görüntü sergilemektedir. Aşağıdaki resimde gösterilen Çin **Fuqing** karbonsuz nükleer güç santrali **NGS** kompleksi 27 Kasım 2020 tarihinde ülkenin çalışmakta olan 50. nükleer elektrik tesisi olarak şebekeye bağlanmıştır.

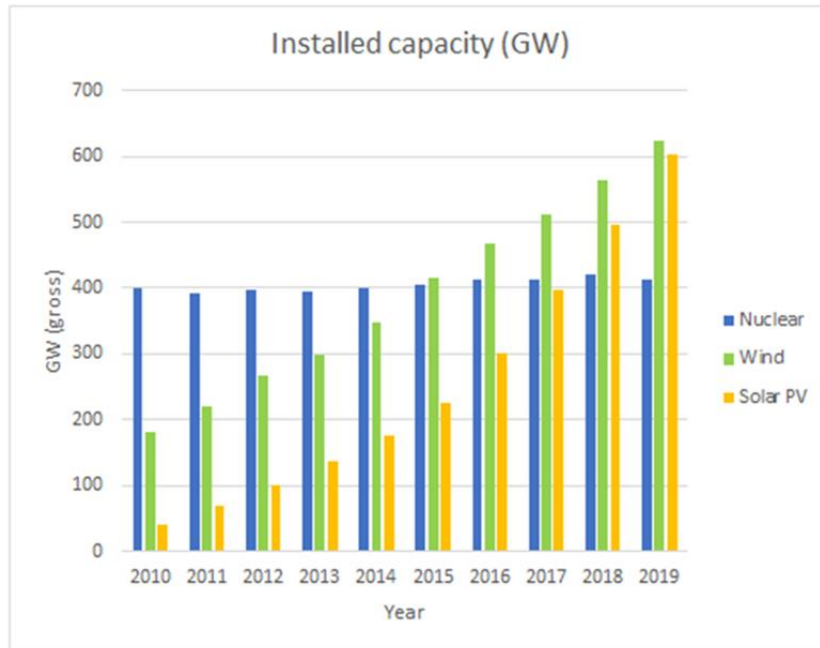


**Kaynak:** Çin Ulusal Nükleer Güç Şirketi (China National Nuclear Power Corporation - CNNP)

Japon **Fukuşima Daiçi** geleneksel nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri kazaları meydana gelmesinden yaklaşık 5 yıl sonra küresel sera gazı emisyonlarının

dizginlenmesi, sınırlandırılması, kontrol ve denetim altına alınması çalışmalarına dair uluslararası 2015 Birleşmiş Milletler BM Paris İklim Değişikliği Anlaşması hükümleri yürürlüğe girmiştir. Çok sayıda ülke karbonsuz çağdaş birincil güç kaynakları karbonsuz evrimsel nükleer elektrik reaktörü tesislerini küresel iklim değişiklikleri sorunları çözümü yönünde alternatif enerji kaynakları olarak görmeye başlamıştır. Özellikle söz konusu ülkeler genelinde karbonsuz yenilikçi nükleer santraller, ulusal enerji arz güvenliği sağlanması aynı zamanda küresel ham petrol ve doğalgaz gibi hidrokarbon ürün fiyatları tarifelerinin artışları karşısında tercih edilmektedir. Ayrıca, mevzu bahis ülkeler küresel serbest piyasa ekonomisi şartları çerçevesinde modern karbonsuz nükleer santraller sayesinde ekonomilerini rekabet edebilir düzeye çıkarmayı planlamaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı - UAEA (International Atomic Energy Agency - IAEA) ile koordinasyon ve işbirliği halinde takribi 30 ülke ilk kez karbonsuz nükleer elektrik tesisleri kurmayı programlamaktadır. Örneğin, **Bangladeş** ve **Türkiye** baz yüklü karbonsuz nükleer güç santralleri NGS reaktörleri ünitelerinin inşaatları devam etmektedir. **Belarus** ve **Birleşik Arap Emirlikleri (United Arab Emirates - UAE)** karbonsuz nükleer enerji santralleri kompleksleri 2020 yılında ilk nükleer güç üretimlerinin ulusal elektrik şebekeleri ağlarına bağlanması, nükleer gücün gelecekte dünya ülkeleri üzerinde önemli rol oynayacağını kanıtı sayılmaktadır.

Dünya nükleer güç santralleri NGS reaktörleri, YEK odaklı rüzgar enerjisi santralleri RES türbinleri ve güneş enerjisi santralleri GES panelleri kurulu güç kapasitesi GW düzeyinde 2010 - 2019 yılları arasında senelere göre dağılımı aşağıdaki şemada takribi olarak verilmektedir. Global nükleer NGS kurulu güç kapasitesi dikey **mavi band**, RES kurulu elektrik enerjisi potansiyeli dikey **yeşil band** ve GES PV panelleri (solar photovoltaic - PV) kurulu güç kapasitesi dikey **sarı band** ile işaret edilmektedir.



**Kaynak:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı - UAEA (International Atomic Energy Agency - IAEA) Yayınları

Küresel nükleer elektrik üretimi 2013 yılından itibaren tekrar artmaya başlamıştır. Arka arkaya yedi yıl boyunca büyümesi süren dünya nükleer güç üretimi 2019 yılında tarihteki ikinci en yüksek seviyesi olan 2657 terawatt-saat (TWh) düzeyine kadar

ulaşmıştır. Global nükleer elektrik üretimi rakamlarının ikinci doruk seviyesine eriştiği 2019 yılında nükleer güç güvenilir bir verim ile devreye girmiştir. Dünya karbonsuz nükleer elektrik enerjisi üretimleri, yine karbonsuz olan küresel rüzgar **RES** ve solar enerji **GES** sistemleri toplam güç üretimleri rakamlarına kıyasla 2019'da %30 daha fazla bir oranda şebekelere enerji arzı sağlamıştır. Söz konusu üretimler baz yüklü nükleer güç kurulu kapasitesi, **RES** ve **GES** toplam kurulu güç kapasitesine nazaran üçte bir oranında daha düşük olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Küresel elektrik üretimi görünümü kapsamında global nükleer güç üretimi payı 2019 yılında biraz artış göstermiştir. Dünya düşük karbon enerjili elektrik üretimi açısından global nükleer enerji güç istihali %10.4 oranına yükselmiştir. 2020 yılında koronavirüs pandemisi nedeniyle dünya elektrik enerjisi talebi önemli bir düşüş yaşamasına karşın küresel alternatif enerji kaynakları güç üretimi portföyü içeriğinde global nükleer elektrik üretimi, güvenli, esnek ve kararlı bir tarzda en büyük paya erişmiştir. Son on yıl zarfında nükleer güç gelişimi ve ilerlemesi Asya ülkelerine doğru bir dönüşüm geçirmektedir. Dünya çapında karbonsuz nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri inşaatları ve montaj çalışmalarının üçte ikisi Asya kıtası ülkelerinde devam etmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı **IAEA Güç Reaktörü Bilgi Sistemi (Power Reactor Information System - PRIS)** raporuna göre Çin nükleer elektrik enerjisi kapasitesi toplam 59 **GWe** iken sadece 2011 ve 2020 yılları aralığında 37 **GWe** nükleer güç kapasitesi ilave edilmiştir. Böylece Çin, söz konusu senelerde kaybolan nükleer enerji üretimi rakamlarını fazlasıyla dengelemiştir. Diğer taraftan, dünya karbonsuz nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri kompleksleri kurulması yatırımlarının ivmelenmesi perspektifleri arasında nükleer enerjinin yerkürenin ısınması ve global iklim değişikliği mekanizmaları sorunlarının hafifletilmesi aynı zamanda sürdürülebilir küresel ekonomik büyüme hızı üzerindeki önemli rolü sayılmaktadır. Birleşmiş Milletler **BM (United Nations UN) Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (Sustainable Development Goals - SDGs)** 2015 yılı raporunda küresel ekonomik gelişmeler, enerjiye erişim ve iklim değişikliği dahil pek çok sahada süregelen can alıcı problemlerin çözümü yönünde nükleer gücün katkısı açık bir şekilde vurgulanmaktadır. **Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (International Panel on Climate Change - IPCC) 2018 Küresel Isınma Özel Raporu (2018 IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C)** kapsamında çizilen global iklim değişikliği modeli, ortalama küresel sıcaklık artışları rakamının sanayi devrimi öncesine kıyasla 1.5°C santigratın altında tutulması açısından asıl katkının nükleer enerji sayesinde sağlanacağını işaret etmektedir. Ayrıca, **Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA)** 2019 yılı raporunda küresel karbonsuzlaştırma devrimi süreci boyunca 2050 yılına kadar nükleer enerji olmaksızın global emisyonların sıfırlanması projelerinin gerçekleşmesinin zorluğu ve maliyetlerinin yüksekliği de belirtilmektedir. Nükleer güç; küresel boyutta güvenli elektrik enerjisi temini, etkin hava kalitesi sağlanması ve fosil yakıtların tüketim artışları neticesi ortaya çıkan dünya enerji fiyatları tarifeleri istikrarsızlarının önlenmesi ile birlikte global sera gazları emisyonların limitlenmesi, kısıtlandırılması, kontrol ve denetim altına alınması tedbirleri doğrultusunda değerlendirilmektedir. Ancak, sermaye yoğun nükleer teknolojinin yüksek maliyetleri karşısında finansman zorlukları çeken bazı ülkelerin karbonsuz nükleer enerji politikaları ve projeksiyonları ise belirsiz bir konuma doğru sürüklenmektedir. **Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı IAEA** tarafından Eylül 2020 'de son yayımlanan karbonsuz nükleer güç projeksiyonları raporu, 2050 yılına kadar küresel nükleer elektrik enerji kapasitesi ya iki kat artacağını ya da mevcut seviyenin biraz altında seyredeceğini öngörmektedir. **IAEA** raporuna göre yüksek olasılıklı dünya nükleer güç kapasitesi rakamları senaryosuna ulaşılması için küresel acil

enerji ve çevre eylem planları uygulanması gerekmektedir. **Uluslararası BM Aralık 2015 Yılı Paris İklim Değişiklikleri Mutabakatı** ve diğer çevresel girişimler global nükleer gücün gelişimini desteklemesine rağmen yönetimi mümkün düşük karbon teknolojileri içeriğindeki yatırımları teşvik etmek için kararlı ulusal enerji politikaları ve market düzenlemeleri kurulması icap etmektedir. Bir diğer nükleer güç üretimi sorunu da işletme ömrünü tamamlamış klasik nükleer elektrik reaktörleri komplekslerinden kaynaklanmaktadır. Çalışmakta olan geleneksel nükleer enerji reaktörü ünitelerinin yaklaşık %70 'inin yaşı 30 yıldan fazladır. Söz konusu nükleer reaktörler işletme ömürleri 10 ya da 20 yıl içinde tamamlanacak ve nükleer reaktör sökölme (decommissioning) işlemleri başlayacaktır. Bu kapsamda 2022'de Almanya ve 2025'de Belçika'da olmak üzere 13 nükleer elektrik reaktörleri çalışma ömürleri sona erecektir. Böylece, dünya nükleer güç üretimi kapasitesi takribi 14 **GWe** 'lık kayba uğrayacaktır. Ayrıca Avrupa, Japonya ve **ABD** de işletilen konvansiyonel nükleer güç reaktörü ünitelerinin geleceği belirsizliğini korumaktadır. Yaklaşık 100 nükleer elektrik ünitesi, nükleer tesis yenileme çalışmalarını müteakiben değişen periyotlarda nükleer reaktör ömrü uzatma lisansları almış bir durumda bulunmaktadır. Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (levelized cost of electricity - **LCOE**), elektrik üretimi maliyetlerinin hesaplanmasına yönelik kullanılmaktadır. **LCOE** ile birlikte değerlendirilen nükleer santralin uzun vadeli çalışması (long term operation – **LTO**) zarfında elektrik üretiminde en düşük maliyet **MWe** başına 30 - 40 dolar aralığında seyretmektedir. Mevzu bahis maliyet çevre dostu **YEK** odaklı **RES** ve **GES** üniteleri ile mukayese edilebilir bir düzeydedir. **Uluslararası Enerji Ajansı** (International Energy Agency - **IEA**) aynı zamanda **Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü** (Organization for Economic Co-operation and Development - **OECD**) / **Nükleer Enerji Ajansı** (Nuclear Energy Agency - **NEA**) kuruluşları tarafından açıklanan en son maliyet projeksiyonları, düşük karbon ekonomisi elektrik üretimleri kapsamında hesaplanan nükleer santral **LTO** değerini en ucuz enerji kaynağı olarak ortaya çıkarmaktadır. Günümüzde 19 ülkede 53 **GWe** kapasiteli 50 adet karbonsuz yenilikçi nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri inşaatları devam etmektedir. Ancak, halihazırdaki nükleer elektrik reaktörleri kurulma hızı yavaş düzeyde ilerlemektedir. Mevcut hız ile **IAEA** yüksek ihtimalli projeksiyonu olan 2050 yılında dünya nükleer güç kapasitesi rakamlarının yaklaşık iki kat seviyeye ulaşması zor görülmektedir. **IAEA** yüksek olasılıklı global nükleer elektrik kapasitesi rakamını 2050 yılında 717 **GWe** olarak tahmin etmektedir. **IAEA** öngörüsüne göre 2050 yılı dünya elektrik üretimi profili kapsamında küresel nükleer elektrik üretimi payı rakamının biraz artarak %11 düzeyine erişmesi beklenmektedir. Global nükleer elektrik üretimi payının 2050 yılında beklenen %11 düzeyine ulaşması için ise yıllık şebekeye bağlanan nükleer reaktörlerin iki kat artması ve 1970 ile 1980 'li yıllarda şebekeye giren küresel kurulu nükleer güç kapasitesi rakamı hızının yakalanması gerekmektedir. Öte yandan, yaşanan karbonsuz klasik nükleer güç reaktörleri üniteleri ile dünya çapında giderek yaygınlaşan inovasyona dayalı, yenilikçi ve modern ileri nükleer teknolojiler arasında güvenli bir köprünün kurulması da icap etmektedir. Mevcut konvansiyonel nükleer elektrik reaktörleri ekonomik açıdan küresel serbest piyasa koşulları kapsamında rekabetçi konumunu muhafaza ederken güncel nükleer güvenlik kriterleri ve radyasyon güvenliği ölçütleri standartlarını da karşılamalıdır. Ayrıca, inovatif ileri nükleer teknolojiler ise nükleer santral lisanslandırılması engellerini başarılı biçimde aşarak **kavram kanıtı** (Proof of Concept - **PoC**) ile de desteklenmek zorundadır. **Kavram kanıtı (PoC)**, belirli bir teknoloji, yöntem veya tekniğin fizibil olduğunun doğrulanması olarak tanımlanmaktadır. Gelecek yıllarda küresel elektrik enerjisi talebi hızla artacaktır. Yükselen küresel iklim değişikliği sorunlarının çözümü yönünde

global enerji senaryoları bağlamında karbonsuz nükleer gücün önemli bir rol üstlenmesi beklentiler arasında sayılmaktadır. Dünya karbonsuzlaştırma devrimi periyodu boyunca küresel karbonsuz elektrik üretimi için **nükleer güç santralleri NGS** reaktörleri, hidroelektrik **santralleri HES** türbinleri, yenilenebilir enerji kaynakları **YEK**'e dayalı rüzgar enerjisi **santralleri RES** çiftlikleri ve güneş enerjisi **santralleri GES** panelleri ünitelerinin büyük oranlarda şebekelere bağlanması sadece ilk adım kabul edilmektedir. Ayrıca, 2050 yılına kadar küresel emisyonların sıfırlanması ve karbon nötr dünya konumuna ulaşılması çerçevesinde global sanayi, ulaşım ve inşaat sektörleri dallarında da aynı alternatif temiz enerji kaynakları yatırımları adımlarının atılması gerekmektedir. Nükleer gücün dünya serbest piyasa şartları içinde rekabet edebilir maliyet ile düşük karbonlu hidrojen üretimi gerçekleştirmesi mümkün görülmektedir., Global emisyonların atmosfere salınımlarının 1970 yılından beri 3 kat arttığı ulaştırma sektörü dalında düşük karbonlu yakıt kaynağı olan hidrojen üretimleri önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, nükleer güçten kazanılan düşük karbon enerjili hidrojen yakıtı ürünlerinin enerji depolama sektöründe kullanımı aynı zamanda bahse konu ürünlerin çelik ve amonyak üretimleri gibi sanayi proseslerinde fosil yakıtların yerine geçmesi de beklenmektedir. Bölgesel merkezi ısıtma için nükleer enerji tesisi ünitelerinden faydalanılmaktadır. Sanayi sektörünün pek çoğunda kullanılmakta olan yüksek sıcaklıklı buhar, ileri nükleer reaktörler kanalıyla sağlanabilmektedir. Nükleer enerjinin tüm potansiyelinden yararlanılması açısından gerekli olan politik eylem planları doğrultusunda önemli market düzenlemeleri, standart nükleer tasarımlar ve modüler nükleer reaktörlere dair yeni ortaya çıkan maliyetlerin kontrolü üzerinde yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Özellikle düşük karbon enerjili sistemlere girişte nükleer güç, eşit şartlar oluşturulmasına ihtiyaç duymaktadır. Şebeke ağlarına kararlı, dengeli, düzenli ve esnek güç temin eden nükleer enerjinin yüksek payına kıyasla değişken, düzensiz ve kararsız elektrik enerjisi sağlayan yenilenebilir enerji kaynakları **YEK** temelli **RES** ve **GES** üniteleri de önemini korumaktadır. Çok fazla küresel fosil yakıt tüketimleri ve kullanımları karşısında uzunca süredir uygulanmaya çalışılan karbon fiyatlandırma sistemi ile temiz **YEK** tesisleri ve karbonsuz nükleer güç santrali **NGS** reaktörleri kompleksleri finansman açığının bir bölümü karşılanacaktır. Gelecekteki enerji sistemleri, alternatif temiz enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi çalışmalarına gerek duyacaktır. Nükleer enerji; global ısınma ve iklim değişikliği mekanizmaları sorunlarının çözümü ve sürdürülebilir ekonomik gelişme yönünde önemli bir katkı sağlamaktadır. Ancak, bir zamanlar nükleer rönesans ve nükleer enerjinin yeniden doğuşu olarak adlandırılan nükleer güç, **Fukushima Daiichi** nükleer kazası sonrası kamuoyu nezdinde büyük bir nükleer korku ve nükleer şaşkınlık yaratmıştır. Nükleer enerji konusunda halkın bilgilendirilmesi ve bilimsel gerçeklere dayalı iyi bir iletişim yoluyla kamuoyunda oluşan nükleer kaygılar ve nükleer şaşkınlıkların aşılması olası görülmektedir. **Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı Genel Direktörü Rafael Mariano Grossi**, Temmuz 2020 tarihinde düzenlenen **Uluslararası Enerji Ajansı IEA** panelinde nükleer enerjinin küresel düşük karbon ekonomisi çalışmalarına yönelik katkısını vurgulamış ve son 50 yıl zarfında işletilen karbonsuz nükleer elektrik santralleri üniteleri aracılığıyla 74 **gigaton** düzeyinde karbondioksit emisyonlarının çevreye salınmasının önlendiğini ifade etmiştir. Sonuçta, 2015 yılında **BM Paris İklim Değişikliği Mutabakatı** ile başlatılan **global karbonsuzlaştırma devrimi** çerçevesinde küresel fosil yakıtlar karşısında karbonsuz nükleer güç, gelecekteki çok önemli birincil enerji kaynakları statüsünü koruyacaktır.



## Kaynaklar:

- Yeni Nesil Nükleer Güç Reaktörleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2006.
- Nükleer Güç Santralleri Gelişiminde Nükleer Emniyet ve Nükleer Güvenlik, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Nükleer Enerji Santralleri, Enerji Kaynak Çeşitliliği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Nükleer Santraller ve Gelecekteki Nükleer Enerji Projeksiyonları, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2008.
- İtalya, Nükleer Santraller, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Çevre Eylem Planları ve Enerji Eylem Planları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2009.
- İleri Nükleer Santraller, İklimsel Değişim Mekanizmaları, Küresel Isınma ve İklim Değişiklikleri Bilimsel Raporları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Temiz Enerji Kaynakları, Nükleer Elektrik Reaktörleri, Küresel Ekonomik Kriz ve Küresel Mali İflas, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- İleri Reaktörler, Karbon Borsası ve Küresel Finansal Kriz, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Amerika; Yeni Nesil Nükleer Elektrik Santralleri ve Nükleer Rönesans, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Japonya Depremi Tsunami ve Nükleer Reaktörler, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Fukushima Nükleer Güç Santralleri Kazaları Sonrası Modern Nükleer Santraller, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Japonya Deprem Tsunami Süpürtü Dalgaları Doğal Felaketler Sonucu Nükleer Reaktör Kazaları Sonrası Almanya Nükleer Enerji Politikası Sarmalı, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Avrupa Kömür Yakıt Kaynaklı Elektrik Santralleri Projeksiyonları ile Dünyanın Kirli Enerji Kaynağı Kömürün Yeniden Doğuşu ve Dirilişi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2013.
- Japonya 2011 Fukushima (Fukuşima) Daiichi Nükleer Güç Santrali NGS Kazaları Sonrası Nükleer Enerji Teknolojisinin Yeniden Canlanması, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2014.
- Japonya 2011 Yılı Deprem ve Süpürtü Dalgaları Doğal Felaketler Sonucu Fukushima Nükleer Elektrik Santrali Kapatılması Sonrası Nükleer Enerji Teknolojileri Stratejisi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2014.
- Ortadoğu Ülkeleri Mısır, Suudi Arabistan, Ürdün ve Birleşik Arap Emirlikleri Baz Enerji Kaynağı Karbonsuz Nükleer Güç Santralleri NGS Kurulması Projeleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Dünya Karbondioksit Emisyonları Yok Edilmesi Teknolojileri Uygulamaları ve Yasal Düzenlemeleri Gelişmeleri Işığında Olası BM 2015 Paris İklim Anlaşması, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Kyoto Protokolü Sonrası Olası BM 2015 Paris İklim Değişikliği Anlaşması Dünya Karbondioksit Emisyonları Artışları ve Yok Edilmesi Teknolojileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Küresel Fosil Yakıtlar Petrol, Doğalgaz, Kömür Tüketimlerinin Önlenmesi, Durdurulması ve Tasfiyesi Hakkında Batı Kamuoylarında Gelişen Eylemler, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.

- İngiltere Yüksek Kapasiteli Yeni Nesil **N**ükleer **G**üç **S**antralleri **NGS** Yerine İnovatif Küçük Modüler Elektrik Reaktörleri Kurulması Perspektifleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Japonya Mart 2011 Deprem ve Tsunami Süpürtü Dalgaları Tabii Afetler Zinciri Sonrası Japon Nükleer Enerji Santralleri Projeksiyonları Dirilişi Süreci, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Gezegeenin Geleceği Açısından Hemen Gündeme Alınması Gereken Sorunlar Arasında Sayılan Küresel Isınma ve Global İklimsel Değişim Mekanizmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Yüzde Yüz Doğa Dostu Karbonsuz Yenilenebilir Güç Kaynakları Elektrik Üretimi Tesisleri Sürdürülebilirliği ve Global Fosil Yakıtlar Enerji Piyasası Hakimiyeti, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2017.
- Suudi Arabistan Nükleer Enerji Programı ve Ortadoğu Ülkeleri Zenginleştirilmiş Uranyum ve Plütonyum - 239 (Pu -239) Nükleer Silahlar Üretilmesi Olasılığı, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Amerika Nükleer Yakıt Arz Güvenliği ve Nükleer Silahlar Geliştirilmesi Açısından Önemli Sayılan Hızlı Üretken Deneme Reaktörleri Dirilişi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Rusya Federasyonu Küresel Karbonsuz Nükleer Güç Santralleri Yatırımları ile Çin, Güney Kore, Fransa ve Amerika Nükleer Enerji Projeleri Rekabeti, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Küresel Çevreci **YEK** Kökenli **RES** Üniteleri, **GES** Kompleksleri ve Global Baz Yüklü Uranyum Yakıtlı Karbonsuz **NGS** Reaktörleri Stratejisi ile Ekonomisi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Çin, Hindistan, Türkiye, Mısır, Suudi Arabistan, Ürdün ve **BAE** Nükleer Güç Programları ile Birlikte Nükleer Yakıt Uranyum Ticareti Canlanması, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Enerji Piyasası Tekelleşmesi Önlenmesi, Küresel Fosil Yakıtlar ve Nükleer Güç ile **YEK** Menşeli **RES, GES, HES, JES** ve Biyokütle Elektrik Üretim Çeşitliliği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2018.
- Karbonsuz Hızlı Nükleer Santraller veya Hızlı Üretken Reaktörler ile Baz Yüklü Küçük Modüler Nükleer Güç Reaktörleri (**SMR**) Yatırımları Projeksiyonları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2019.
- Dünyanın En Büyük Nükleer Güç Santrali Kazaları Arasında Sayılan Japonya Fukushima Nükleer Elektrik Reaktörleri Sonrası İzlenen Japon Politikası, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2019.
- Temel Güç Kaynakları Karbonsuz Mini Nükleer Elektrik Reaktörleri ve Global Nükleer Yakıt Erimesi Kazaları Karşısındaki Teknolojik Üstünlükleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Çin Baz Yüklü Karbonsuz Yeni Kuşak Nükleer Güç Santralleri Yatırımları ve Ulusal Yenilikçi Yüksek Hızlı Tren Hatları Ağı Projeleri Gelişim Süreci, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Küresel Karbonsuzlaştırma Teknolojileri Perspektifleri ile 21. Yüzyıl Global Isınma ve İklim Değişiklikleri Sorunları Dizginlenmesi Stratejileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Dünya Karbonsuzlaştırma Devrimi Süreci Başlatan Birleşmiş Milletler **BM** 2015 Paris İklim Anlaşması Hükümleri Uygulamalarının Durumu ve Geleceği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Nuclear Power 10 Years After Fukushima: The Long Road Back, **IAEA** Yayını, 2021.