

UZUN DÖNEMLİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR ENERJİ STRATEJİSİ OLARAK

Prof. Dr. Uğur Çevik [*Karadeniz Teknik Üniversitesi*
Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Atom ve Molekül Fiziği ABD

Nükleer sistem, yüksek enerji üretim kapasitesi ve düşük karbon salımı imkânıyla enerji dünyasına açılan önemli bir sayfadır. Nükleer enerji serüveninin dünden bugüne geldiği nokta ve Türkiye'nin bu serüvende üstleneceği rol, sürdürülebilir enerjinin geleceği açısından son derece önemlidir.

NÜKLEER ENERJİ

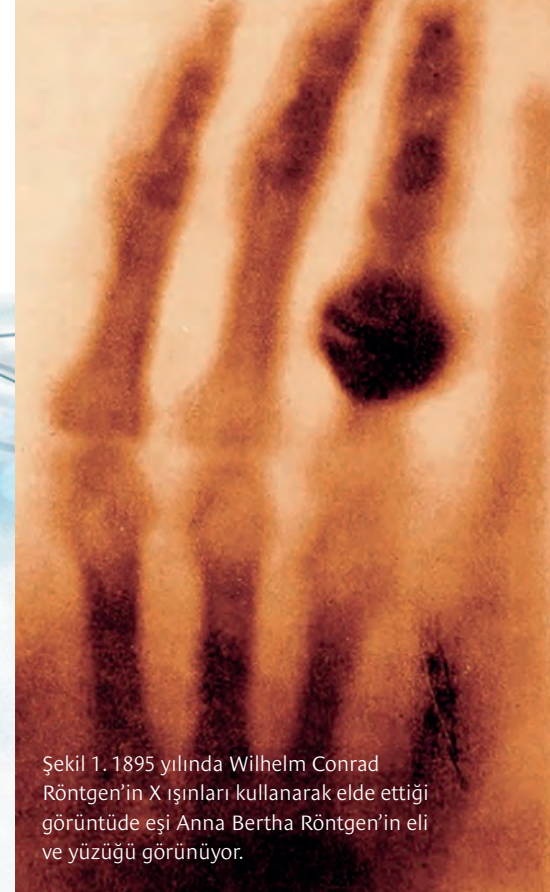


Nükleer Teknoloji ve Nükleer Enerji

1789 yılında Alman kimyager Martin H. Klaproth (1743-1817) tarafından uranyumun keşfi nükleer çalışmaların ilklerinden biri olsa da 1895 yılında Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen'in (1845-1923) X ışınlarını keşfetmesi nükleer fiziğin başlangıcı kabul edilir. Bu keşif ile başlayan bilimsel gelişmeler, II. Dünya Savaşı'nın (1939-1945) sonunda atom bombasının kullanılmasına kadar büyük ilerlemeler kaydetti. 1953 yılında ise Birleşmiş Milletler Genel Kurulu'nda ABD Başkanı Dwight D. Eisenhower'ın "barış için atom" önerisi, nükleer gücün enerji alanında refah ve gelişim için kullanılmasının başlangıcı oldu ve akabinde 1957 yılında Uluslararası Atom Enerji Ajansının kurulmasına zemin hazırladı. O yıllarda başlayan ve günümüze kadar devam eden süreçte nükleer teknoloji insanlığın refahı için kullanılageldi.

Tarihsel Süreç

Wilhelm Conrad Röntgen, bir Crookes tüpünü indüksiyon bobinine bağlayarak içinden yüksek gerilimli elektrik akımı geçirdiğinde tüpten oldukça uzakta duran bir cam kavanozun içindeki baryum platinosiyanyür kristallerinde birtakım parıldamaların oluştuğunu gözlemledi ve bunlara neden olan ışınlar (o zaman bilinmedikleri için) X ışınları adını verdi. X ışınlarını keşfi ile de 1901 yılında ilk Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Değişik cisimlerin bu ışınları farklı oranlarda geçirebildiğini, kurşun plakalarınsa ışınları geçirmediğini gözlemleyen Röntgen, içinde fotoğraf plağı bulunan bir kasetin üzerine eşi Anna Bertha Ludwig'in elini yerleştirerek parmak kemiklerinin ve yüzüğünün görüntüsünü elde etti.



Şekil 1. 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in X ışınları kullanarak elde ettiği görüntüde eşi Anna Bertha Röntgen'in eli ve yüzüğü görünüyor.



X ışınlarının keşfinden etkilenen Fransız Fizikçi Antoine Henri Becquerel (1852-1908), bu ışınlar ile fosfor ışınımı arasında bir ilişki olup olmadığını anlamaya çalıştı. Bunun için farklı fosforesan maddeleri güneş ışığına tuttuktan sonra bu maddeleri siyah kâğıda sarılmış bir fotoğraf camının üstüne koyacak ve ışının kâğıdı geçerek camı etkileyip etkilemediğini kontrol edecekti. Becquerel, havanın yağmurlu olmasından dolayı uranyum tuzlarını birkaç gün güneş ışığına maruz bırakamadı. Güneşin açmasını beklediği bu günlerde siyah kâğıda sarılı film ve üstüne konmuş uranyum bileşiği çekmecesinde tuttu. Daha sonra filmi banyo edince uranyum kristalinin güneş ışığına maruz kalmadığı hâlde film üzerinde iz bıraktığını gördü. Becquerel, bu ışınları siyah kâğıdı geçip fotoğraf camını kararttıkları için (X ışınlarına benzer şekilde) görünmez bir ışın olarak tanımladı. Deneyleri tekrarlayınca, Güneş'e maruz bırakmaya gerek olmadığını ve uranyum tuzlarının kendiliğinden ışın yaydığını anladı, böylece 1896 yılında doğal radyoaktiviteyi keşfetti.



Marie Curie ve Pierre Curie.

Marie Curie (1867-1934) ve Pierre Curie (1859-1906), aynı yıllarda madenin keşfedilen bu yeni özelliğini incelediler. Marie Curie, ilk olarak farklı uranyum bileşiklerinin radyasyonunu ölçerek bunun uranyumun atomik yapısından kaynaklanan bir özelliği olduğunu kanıtladı. Daha sonra bilinen diğer elementleri inceleyerek benzer özelliğe sahip başka elementler olup olmadığını araştırdı. İlk olarak toryum bileşiklerinin uranyum gibi ışıma yaydığını ve bunun elementin atomik yapısından kaynaklandığını keşfetti. O gün için yalnızca uranyum ve toryum elementlerinde gözlenen bu yeni özellik için "radyoaktivite" adını önerdi (1898). Curie'ler uranyum içeren ancak uranyumdan daha aktif olan katranlı cevher üzerinde çalışmaya başladılar ve katranlı cevher içinde en az iki yeni radyoaktif element olduğunu keşfettiler (sonradan bunların polonyum ve radyum olduğu anlaşıldı). Madam Curie, bir uranyum fabrikasından çıkan yaklaşık 1 ton katranlı cevher atığını işleyerek radyumu arındırmayı ve yeni bir element olduğunu kanıtlamayı başardı (1902). Curie'ler ile Becquerel doğal radyoaktif üzerine yaptıkları çalışmalarla 1903 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldüler.

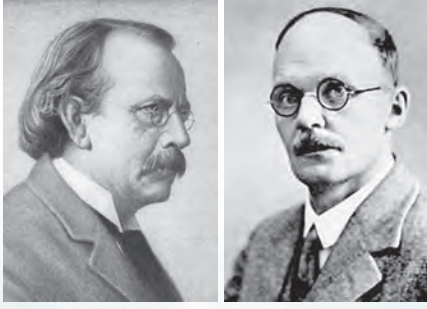


Irene Joliot-Curie ve Frederic Joliot-Curie

Irene Joliot-Curie (1897-1956) ve Frederic Joliot-Curie (1900-1958), 1934 yılında yaptıkları çalışmalarla yapay radyoaktiviteyi keşfettiler. Joliot-Curie'ler alüminyum yaprağını alfa parçacıkları ile bombardıman ettiklerinde radyoaktif kaynak hedeften uzaklaştırıldığında dahi alüminyumun radyoaktif özellik gösterdiğini gözlemlediler. Böylelikle kararlı elementlerin de yapay olarak radyoaktivite kazanabileceğini göstererek yapay radyoaktiviteyi keşfettiler ve bu buluşları nedeniyle 1935'te Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazandılar.

1897'de İngiliz fizikçi Joseph John Thomson (1856-1940), katot ışınları ile yaptığı deneyler sonucu atomların yapısında elektronların da olduğunu keşfetti. Böylece o güne kadar bölünemez olarak düşünülen atomun iç yapısının araştırılmasına yönelik çalışmaların hız kazanmasına yol açtı. Thomson buluşu ile 1906 yılında Nobel Fizik ödülünü almaya hak kazandı. Nükleer fiziğin öncüsü olarak anılan Ernest Rutherford (1871-1937), radyoaktivite ile ilgili yaptığı çalışmalarla 1899 yılında iki farklı ışınma keşfetti ve bu ışınmalara neden





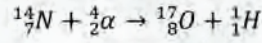
Joseph John Thomson

Hans Geiger

olan parçacıkları birbirinden ayırt etmek için onları “alfa” ve “beta” olarak adlandırdı. Hemen akabinde 1900 yılında Paul Ulrich Villard (1860-1934), radyumdan yayılan ışınmayı incelerken “gama” ışınlarını keşfetti.

1910 yılında Hans Geiger (1882-1945) ve Ernest Marsden (1889-1970), Ernest Rutherford başkanlığında yaptıkları meşhur alfa saçılma deneyi sonuçlarına dayanarak merkezinde pozitif yüklü bir çekirdeğin olduğu atom modelini geliştirdiler. Rutherford daha sonra Frederick Soddy (1887-1956) ile radyum kaynağından salınan alfa parçacıklarını azot atomlarına çarptırdı ve bu sırada alfa parçacıklarının beklenenden daha uzun menzilli ışınlar yaptığını gözlemledi. Bu ışınları açıklayabilmek için bir dizi deney gerçekleştirdiler ve sonuçta daha uzun menzilli bu ışınların nedeninin hidrojen

çekirdeği olduğuna karar verdiler. Böylelikle azot atomlarının oksijen atomuna dönüşebildiğini göstererek ilk yapay çekirdek dönüşümünü gerçekleştirdiler (1919).



Rutherford, artı yüklü hidrojen çekirdeğine “proton” adını verdi ve bu parçacığın tüm atomların çekirdeklerinde bulunan temel bir yapı taşı olduğunu keşfetti (1920). Çekirdeği ve protonu keşfeden Rutherford, bu parçacıkların tek başlarına çekirdeğin kütlesini oluşturamayacaklarını da fark etti ve çekirdekte protonların kütlesi kadar bir kütleyi sağlayacak yüksüz parçacıklar da olması gerektiğini öngördü. James Chadwick (1891-1974), bazı çekirdek tepkimeleri üzerinde yaptığı araştırmalar sonucunda, çekirdekte protonlardan başka taneciklerin de bulunduğunu deneylerle belirledi (1932). Chadwick,

önce bir berilyum levhayı α tanecikleri ile bombardıman etti. Bunun sonucunda berilyum metali, α ışınlarına benzeyen çok yüksek enerjili ışınlar yayınladı. Daha sonraki deneyler bu ışınların protonun kütlesinden biraz daha büyük bir kütleye sahip elektrik yükü taşımayan yüksüz taneciklerden oluştuğunu gösterdi. Chadwick, bu taneciklere “nötron” adını verdi ve bu sayede 1935’te Nobel Fizik Ödülü’nü aldı.

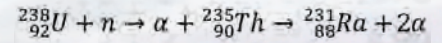


1905 yılında Albert Einstein (1879-1955), özel görelilik teorisini çalışırken elde ettiği $\Delta E=mc^2$ formülüyle kütle ve enerji arasındaki ilişkiyi ortaya çıkardı. Bu eşitlik, atomun çekirdeğinde yatan büyük enerjiyi keşfetmeye duyulan ilgiyi artırdı. Rutherford’un daha hafif atomların çekirdek yapılarını parçalayabilmek için daha bü-





1938 yılında bu çarpışmaları tekrarlayan Otto Hahn (1879-1968) ve Fritz Strassmann (1902-1980) nötronların uranyumla çarpışması sonucu radyum oluştuğu sonucuna vardılar:



yük enerjili alfa parçacıkları ya da benzer fırlatıcıların gerekliliğine dikkat çekmesinin de etkisiyle ilk doğrusal hızlandırıcıyı geliştiren John Cockcroft (1897-1967) ve Ernest Walton (1903-1995), 700 kV ile hızlandırdıkları protonları lityum atomuna göndererek onu parçalamayı başardılar. 1930'da gerçekleşen bu çalışma, yapay olarak atom çekirdeğinin ilk defa parçalanması olarak tarihe geçti. Cockcroft ve Walton bu çalışmaları ile 1951'de Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazandı. Bu çalışmanın önemli bir sonucu ise parçalanma sonucu ortaya çıkan enerjydi, bu enerji Einstein'ın öngördüğü enerji miktarı ile örtüşüyordu.

Enrico Fermi (1901-1954), nötronların ağır elementler ile çarpıştırılmasının ilginç sonuçlar verebileceğini düşündü. Fermi, elementleri sistematik olarak bu yeni parçacıklarla bombardıman etmeye başladı.

Genelde karşılaştığı şey nötronun hedef element tarafından yakalanması ve ardından beta bozunumu ile protona dönüşerek atom numarasının bir artmasıydı. O zaman için bilinen en ağır element olan uranyum (Z=92) ile bu deneyi gerçekleştirdiğinde, uranyum nitrat çözeltisini nötron kaynağının yakınına yerleştirdi ve Geiger sayacı ile beta bozunumlarını gözlemledi. Beşten fazla farklı yarılanma süresi tespit etti ve 13 dakikalık yarılanma süresine sahip radyoaktif çekirdeği kimyasal metotla ayırtırmayı başardı. Fermi bu yeni radyoaktif çekirdeğin bilinen hiçbir elementin izotopu olmadığı, 93 ya da 94 atom numaralı yeni bir element olduğu sonucuna vardı (1934). Bu keşfi ile Fermi 1938'te Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Aynı yıl Alman fizikçi Ida Noddack (1896-1978), Fermi'nin ispatının yetersiz olduğunu, 13 dakikalık yarı ömre sahip radyoçekirdeğin aslında ${}_{43}^{101}\text{Tc}$ olduğunu iddia etti.

Avusturyalı fizikçi Lise Meitner (1878-1968) bu sonucun olanaksız değilse de çok düşük ihtimalli olduğunu ve bu konudaki çalışmalarına devam edilmesi gerektiği konusunda ısrarcı oldu. Otto Hahn ve ekibi, çalışmalarının devamında daha hafif bir element olan baryumu bulduklarını Meitner'e söylediler. Meitner, o zaman için yaygın olan kanının aksine, bunun mümkün olabileceğini düşünerek Otto





Frisch (1904-1979) ile bu konuyu tartışmaya başladı. Sıvı damlası modelini göz önünde bulundurarak nötronların uranyum çekirdeğinin parçalanmasına yol açabileceğini öngördüler. Bu teoriye göre, küresel sıvı damlası biçimindeki çekirdekte yüzey gerilimi kuvvetleri ile Coulomb itmesi dengededir. Çekirdek, bir termal nötron yakalayınca, ortaya çıkan uyarılma enerjisi meydana gelen ara çekirdekte titreşimlere neden olur ve damla küresel şekilden ayrılarak elipsoit biçimini alabilir. Yüzey gerilim kuvvetleri damlayı eski küresel biçimine getirmeye, uyarılma enerjisi ise şekli daha fazla bozmaya çalışır. Uyarılma enerjisi yeterli düzeyde değilse elipsoit, yüzey gerilimleri etkisiyle tekrar küresel biçimine döner ve uyarılma enerjisi fotonlar şeklinde salınır. Bu hâlde çekirdek parçalanması yerine ışıcı yakalama olayı gerçekleşir. Eğer uyarılma enerjisi yeterli büyüklükte ise damla bir ipek kozası biçimini alır ve sonunda Coulomb itmesi ile kozanın iki yuvarlağı birbirinden ayrılır ve çekirdek parçalanması gerçekleşir. Meitner ve Frisch

bu olaya bir biyolog arkadaşlarından öğrendikleri “filyon” adını verdiler (1938), filyon öncesinde hücre bölünmesi için kullanılırdı.

Bu keşfin sonuçlarını ilk kavrayanlardan biri Macar fizikçi Leo Szilard (1898-1964) oldu. Szilard, 1933 yılında, yani filyonun keşfinden beş yıl önce, bir nötron yuttuğunda birden fazla nötron açığa çıkaran bir atom çekirdeği bulunursa zincirleme reaksiyon gerçekleştirilebileceğini ve böylece çok büyük bir enerjinin elde edilebileceğini öngörmüştü. Meitner’den duyduğu filyon fikrini Amerika Birleşik Devletleri’ne (ABD) taşıyan Niels Bohr’u (1885-1962) bir kongrede dinlerken Szilard aradığı atomun uranyum olabileceğini fark etti. 1939’da Fermi, Szilard, Walter Zinn (1906-2000) ve Herbert L. Anderson (1914-1988) farklı metot ile filyon sonucu nötronların açığa çıktığını gösterdiler. Szilard, Fransız meslektaşı Frederic Joliot’un da benzer bir sonuç elde ettiği haberini alınca ona şu satırları yazdı: “Bir nötrondan fazlası serbest bırakılabildiğine göre zincirleme bir etkinin de oluşturulması mümkündür. Bu

bilgi, her halükârda -ama özellikle de bazı hükümetlerin elinde olursa- son derece tehlikeli bombaların yapımına yol açabilir.”

Filyonun termal nötronlar ile gerçekleştiği artık bilinen bir gerçektir. Bu nedenle zincirleme reaksiyonun gerçekleşebilmesi için filyon sonrası açığa çıkan birkaç MeV enerjili nötronların enerjisinin 1 eV’ün da altına indirilmesi için çalışmalar yapılmıyordu. Almanya’da Walther Bothe (1891-1957) yaptığı deneyler



sonucunda grafitin bu amaçla kullanılamayacağını söyledi. Szilard, bu sorunun kaynağının, kullandıkları grafitin, boron içermesi olduğunu ve boronun yavaşlatılan nötronları soğurduğunu fark etti. Almanlar Bothe'nin sonucunu tartışmasız kabul ederek yönlerini ağır suya çevirdiler. O dönem Almanların nükleer çalışmalarının başında olan Werner Heisenberg (1901-1976), eğer ağır su yerine grafit kullanılsaydı atom bombasının yapılması mümkün olur muydu sorusunu, "Muhtemelen!" diyerek yanıtlamıştı.

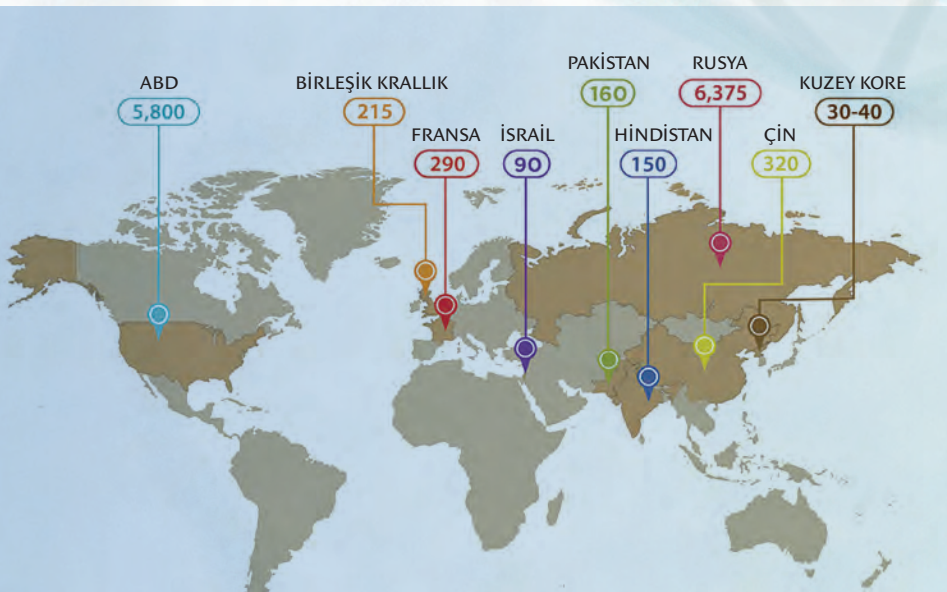
Almanların, atom bombasını geliştirememelerinin nedenlerinden biri de kritik kütleyi yanlış hesaplamalarıydı. Heisenberg, bomba yapımı için gereken kritik kütleyi hesaplarırken yanlışlık yapıp gerçek miktarın çok üstünde bir değer bulmuş ve bu miktarı elde etmenin mümkün olmayacağını düşünerek bomba yapımı konusunda isteksiz davranmıştı.

16 Temmuz 1939'da Szilard, Eugene Wigner (1902-1955) ile birlikte Einstein'ı ziyaret etti ve nükleer fisyonun tehlikeli askeri potansiyeline işaret edip Almanların bu silahları geliştirmekte olabileceğini belirttiler. Görüşme sonunda hep birlikte ABD Başkanı Franklin Roosevelt'a (1882-1945) onu bu konuda uyarayan bir mektup göndermeye karar verdiler. Einstein'ın imzasıyla yollanan mektup 11 Ekim 1939'da Roosevelt'e ulaştı. Roosevelt, uranyum komitesinin kurulmasına karar verdi (21 Ekim 1939). 6 Aralık 1941'de Roosevelt atom bombası geliştirme çalışmalarının hızlandırılmasına karar verdi. Artık Fermi'nin atom bombasını geliştirmesi için önünde hiçbir maddi engel kalmamıştı. Çalışmalar Chicago Üniversitesinde bir yıl sonra ilk meyvesini verdi ve 2 Aralık 1942 tarihinde ilk nükleer zincir reaksiyon gerçekleştirildi. Zincirleme nükleer reaksiyon ba-

şarıldığına göre, geriye uranyum bombasını yapmak kalmıştı. Bu son adım için çalışmaların yeni adresi Los Alamos oldu ve projenin bilimsel yöneticiliğine Robert Oppenheimer (1904-1967) getirildi. Proje, 16 Temmuz 1945'te amacına ulaştı ve dünya tarihinin ilk atom bombası New Mexico çölünde patlatıldı.

Zincirleme reaksiyonu yıllar öncesinden öngören Szilard atom bombasının kullanılmasının neden olacağı sonuçları da gayet iyi öngörebiliyordu. Bu nedenle bombanın kullanımının neden olacağı tahribatı anlatmak için devrin ABD Başkanı Harry Truman'a (1884-1972) ulaşmaya çalıştı ancak başarılı olamadı. 6 Ağustos 1945'te Hiroşima'ya 64,1 kg zenginleştirilmiş uranyum bulunan Little Boy, 9 Ağustos 1945'te ise Nagazaki'ye 6,2 kg plütonyum bulunan Fat Man atıldı. Hem Hiroşima'da hem de Nagazaki'de yüz binlerce kişi patlama anında öldü, sağ kalanlar ise yayılan radyasyon sonucu zarar gördü.

ABD'nin fisyon tipi nükleer patlamayı gerçekleştirmesinden 4 yıl sonra, 1949'da Rusya, arkasından İngiltere, Fransa ve Çin atom bombalarını patlattılar. Yeni nükleer silah geliştirme ve denemeleri günümüzde de devam ediyor. Şekil 2'de nükleer savaş başlığına sahip ülkeleri görebilirsiniz.



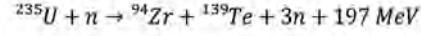
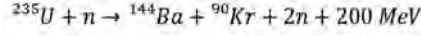
Şekil 2. 2020 tahmini küresel nükleer savaş başlığı envanterleri (Arms Control Association).

Nükleer Güç Santralleri

Nükleer silah çalışmalarının insanlık için ne kadar tehlikeli olduğunun anlaşılmasından sonra nükleer teknoloji çalışmaları tarım, hayvancılık, gıda güvenliği, tıp, sanayi, elektronik ve uzay teknolojileri gibi yüksek teknolojik alanlara kaydı. Bunların en önemlilerinden birisi de enerji sektöründe yer alan nükleer güç santralleridir.

Atom, bir çekirdek ve çekirdeği saran elektron bulutundan oluşur. Bazı atomların çekirdeği diğer atomlarınkiler gibi kararlı değildir ve kararlı hâle gelmek için kendiliğinden ışımaya uğrarlar. Bunlara radyoaktif atomlar denir. Uranyum da radyoaktif elementlerdendir. Uranyumun dikkate değer bir özelliği de bir nötron ile bombardıman edildiğinde ortalama 2,5 nötron ve iki orta büyüklükteki çekirdeğe bölünmesidir. Fiyon öncesi parçacıkların toplam kütlesi fiyon sonrası ürünlerin kütlelerinin toplamından büyüktür, bu fark Einstein'ın ünlü formülü ($\Delta E=mc^2$) uyarınca ürün olarak ortaya çıkan çekirdeklerin ve nötronların kinetik enerjisidir.

Ürün çekirdekler ortamdaki komşu atomlarla çarpışarak kinetik enerjilerinin çoğunu kaybeder. ^{235}U 'un fiyonu farklı şekillerde gerçekleşebilir ve bu süreçlerde açığa çıkan enerji miktarı ile nötron sayısı farklıdır.



Bir nükleer güç santrali, kontrollü zincirleme reaksiyon koşulları altında uranyum atomunun bölünmesi sırasında açığa çıkan enerjiyi, elektrik üretimi için kullanmaya yarar. Burada açığa çıkan enerji, diğer enerji üretim çeşitleri ile kıyaslandığında oldukça büyüktür. Örneğin, uranyumun 1 gramında $2,56 \times 10^{21}$ atom vardır ve bu atomların tümünün fiyona uğraması sonucu yaklaşık $8,8 \times 10^{10}$ J enerji açığa çıkar. Benzer şekilde 1 gram kömürden elde edilecek maksimum enerji ise yaklaşık $3,3 \times 10^4$ J civarındadır. Görüldüğü üzere, atomun çekirdeğinde gerçekten çok büyük miktarda enerji bulunur.

Yakıt

Bir nükleer güç santralini işletmek için en temel gereksinim zincirleme fiyonu gerçekleştirebilecek izotoplardır. Bu izotoplar, düşük enerjili (termal) nötronlar ile fiyona uğrayabilen fisil ve yalnızca belli bir enerjinin üstündeki nötronlar ile fiyona uğrayabilen fertil izotoplar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal olan tek fisil ^{235}U olup doğada bulunan uranyumun yalnızca %0,3'lük kesimidir. Geri kalanın ise hemen hemen tamamı fertil olan ^{238}U 'dir. Günümüzdeki ticari nükleer güç reaktörleri çoğunlukla fiyon reaksiyonunun termal nötronlarla gerçekleştirilmesine dayanan tasarımlardır ve zenginleştirilmiş uranyuma ^{235}U oranı %3-4'e çıkarılmış) ihtiyaç duyarlar. Dünyamızın fisil uranyum stoku, enerji ihtiyacımızı uzun bir süre karşılayabilmekten



uzaktır (yaklaşık 200 yıl). Bu nedenle ^{238}U 'in bir hızlı (yüksek enerjili) nötron yutarak fisil olan ^{239}Pu 'a dönüşmesi ve bu şekilde yakıt olarak kullanılmasını amaçlayan, bir bakıma hızlı nötronlar ile kendi yakıtını üretebilen hızlı üretken reaktörlerin (Fast Breeder Reactor-FBR) geliştirilmesine çalışılıyor. Bu tür reaktörlerin yaygın kullanımı ile dünya uranyum rezervlerinin enerji potansiyeli 100 misli artırılabilir.

Ayrıca okyanuslar dünyanın bütün büyük şehirlerine binlerce yıl enerji sağlayabilecek miktarda uranyum içerir. Tabii ki uranyumun sudan ayrılabilmesi, bu noktadaki en büyük problemdir. Uranyumun deniz suyundan elde edilmesi hâlen verimsiz ve pahalı olsa da geleceğin nükleer enerji planlamalarında önemli bir adım olan uranyum cevheri madencilğine önemli bir alternatiftir.

Yavaşlatıcı (Moderatör)

Fisyon sonucu açığa çıkan nötronlar hızlıdır (yüksek enerjili) ve fisyonun gerçekleşebilmesi için yavaşlatılmaları gerekir. Bu amaçla reaktör kalbine konulan yavaşlatıcı denilen maddeler bu işi yapar. Bu nedenle uranyum metali çubuklar hâlinde imal edilir ve aralarından yavaşlatıcı madde geçirilir. Yavaşlatıcı maddenin düşük nötron soğurma özelliğine sahip olması gerekir, aksi takdirde zincirleme reaksiyon gerçekleşmez. Reaktörlerde üç tür yavaşlatıcı kullanılır: ağır su (D_2O), hafif su (H_2O) ve

grafit. Ağır su, hem hafif su hem de grafitte oranla çok daha az nötron soğuran, mükemmel bir yavaşlatıcıdır. Bu özelliği ile doğal uranyum yakıtla çalıştırılabilen reaktörlerde kullanılır. Günümüzde en yaygın kullanılan yavaşlatıcı ise hafif sudur.

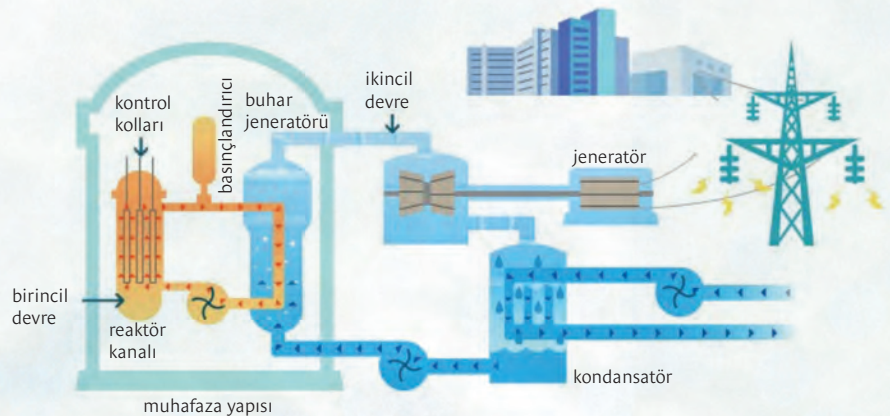
Soğutucu

Soğutucu, fisyon neticesinde oluşan ısının yakıt çubukları eritmesine fırsat vermeden çıkışını sağlar. Güç reaktörlerinin tasarımındaki en önemli bileşen, soğutucunun ısı transferindeki verimliliğidir. Soğutucu malzemeler, ısı sığası yüksek olan gazlar (hava, CO_2 , helyum), su, ağır su ve diğer sıvılar olabilir. Soğutma suyu, reaktör içerisinde dönüp durdukça radyasyon biriktirir ve bu radyasyonun dışarı sızması gerekir.

Genelde nükleer güç üretimi, esas itibarıyla, basınçlı hafif su reaktörü (Pressurized Light-Water Moderated and Cooled Reactor-PWR) ve kaynar hafif su reaktörü (Boiling Light-Water Cooled and Moderated Reactor-BWR)'ne dayanır. PWR'lerde

fisyon yoluyla reaktör kalbinde üretilen ısı, birincil sistem içinde yakıt elemanlarından suya aktarılır (Şekil 3). Yüksek basınçlı su (158 bar) soğutucu pompalarıyla dolaştırılır ve reaktör kalbinde 292°C 'den (giriş) 326°C 'ye (çıkış) ısıtılır. Daha sonra, ısısını ikincil bir buhar sistemine aktardığı dört ayrı buhar üreticine doğru akar. İkincil sistemde, 68 bar ve 285°C 'de buhar üretilir. Buhar, türbin ve jeneratörü çalıştırır. Türbinden çıkan buharın yoğunlaştırıcudan geçirilmesiyle elde edilen su, buhar üreticilerine geri pompalanır. Yoğurturucuya aktarılan atık ısı nehir, göl, deniz suyu veya bir soğutma kulesi yoluyla çevreye bırakılır.

Diğer bir hafif su reaktör türü olan BWR'ler de nötronların yavaşlatılması ve kalbin soğutulması amacıyla kalp içinden geçen suyun, kalbin üst kısmında kaynamasına izin verilir. Soğutucu ve yavaşlatıcı olarak ağır su kullanan PHWR'lerde ise yakıt olarak doğal uranyum kullanılır. Nükleer endüstrinin daha verimli ve güvenli reaktörler tasarlama ve radyoaktif atıkların güvenli depolanması ile ilgili çalışmaları devam ediyor.



Şekil 3. Basınçlı su reaktörlerindeki su çevrimleri (Kaynak: CLP Group).

Dünyada Nükleer Enerji

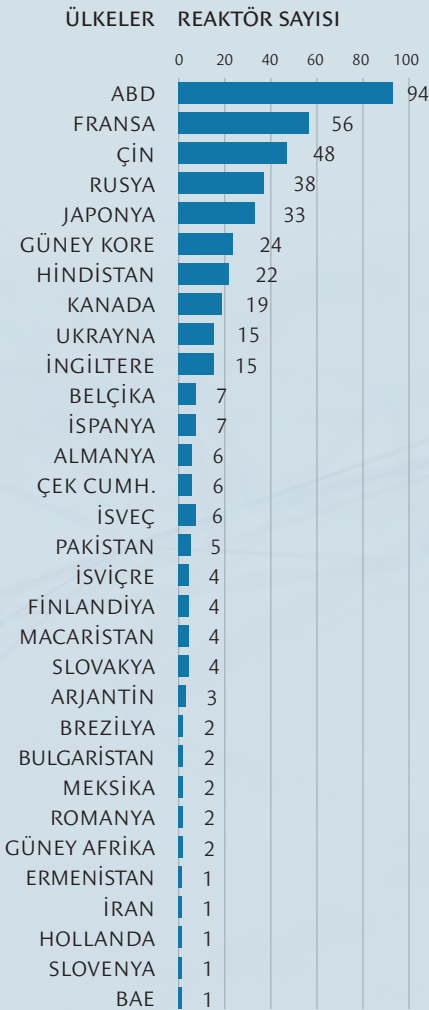
II. Dünya Savaşı'nın ardından nükleer teknolojinin enerji üretimi için kullanımına yönelik çalışmalar hız kazandı ve ilk ticari Nükleer Güç Santrali (NGS) Sovyetler Birliği'nin Obninsk şehrinde kuruldu. 27 Hazi-

ran 1954 tarihinde 5 MWe'lik enerji üretim kapasitesiyle hizmete başlayan bu santral, 29 Nisan 2002 tarihine kadar hizmet vermeyi sürdürdü. Sovyetler Birliği'nin ardından sırasıyla İngiltere (1956), ABD (1957), Fransa (1959) ve Almanya (1961) bu teknolojiye sahip ülkeler arasına katıldı, diğer gelişmiş ülkelerden çoğu da sırasıyla NGS'ler inşa edip kullanıma açtı. Diğer taraftan, İtalya, Litvanya ve Kazakistan mevcut reaktörleri ömürlerini tamamladıktan sonra yeni reaktörler inşa etmeyecek nükleer enerjiden vazgeçen ülkelerdir. Bu konuda bir diğer ilginç örnek Avusturya'dır. Avusturya'daki ilk ve tek nükleer santral 1970'li yıllarda inşa edilmiş ancak 1978'de düzenlenen bir referandumda halkın çoğunun karşı çıkması üzerine bu santral hiçbir zaman faaliyete geçmemiştir. Daha sonra kabul edilen bir yasayla da ülkede nükleer enerji üretimi yasaklanmıştır. Öte yandan, Türkiye, Bangladeş, Beyaz Rusya ve Birleşik Arap Emirlikleri ilk kez NGS'ye sahip olmak için gün sayan ülkelerdir. Bugün dünyada toplam 32 ülkede aktif 443 nükleer reaktör bulunuyor (Şekil 4). Bu reaktörlerin toplam net kurulu kapasitesi 393.084 MWe'dir. Zaman içerisinde devre dışı kalmış 188 NGS ile birlikte 1954 yılından bugüne reaktör işletim deneyimi tam 18.830 reaktör yılı buluyor.

Günümüzde en çok NGS'ye sahip ülke ABD (94) olup onu sırasıyla Fransa (56), Çin (50), Rusya (38) ve Japonya (33) izliyor. Dünya nüfusunun yaklaşık %60'ı, yani 4,5 milyar

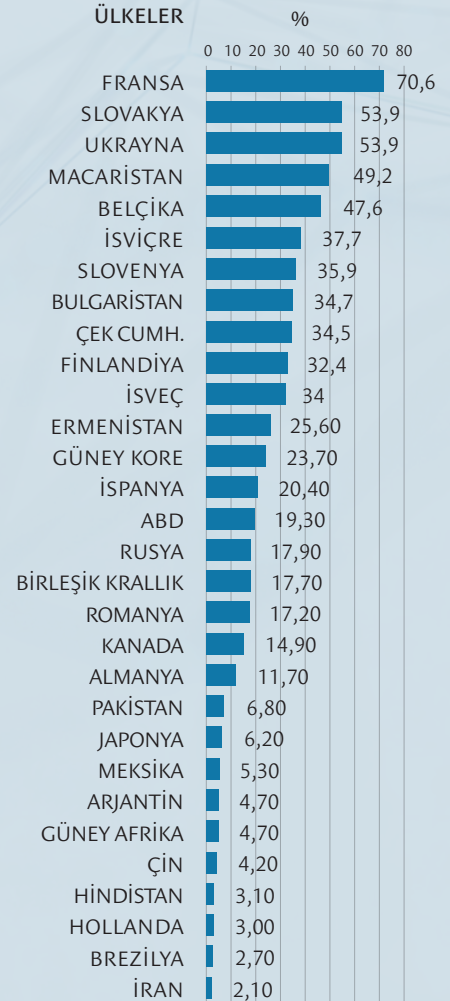
dan fazla insan nükleer güç santrallerinin bulunduğu ülkelerde yaşıyor. Dünyadaki enerji ihtiyacının yaklaşık %11'i nükleer enerjiden karşılanıyor. Bununla birlikte, dünyada elektrik üretiminin nükleer enerjiden karşılanma oranı en yüksek ülke %70,6 ile Fransa'dır. Fransa'yı %53,9 ile Slovakya ve Ukrayna, %49,2 ile Macaristan, %47,6 ile Belçika takip ediyor (Şekil 5).

ÜLKELERE GÖRE AKTİF REAKTÖR SAYISI



Şekil 4. Ülkelere göre aktif reaktör sayıları. Veriler Birleşmiş Milletler (BM) bünyesinde faaliyet gösteren Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu Nükleer Reaktör Bilgi Sistemi (IAEA-PRIS)'nden alınmıştır.

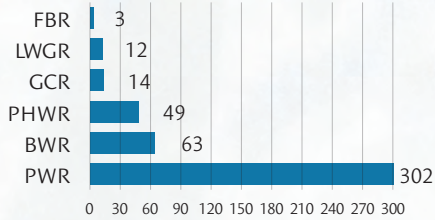
NÜKLEER ENERJİNİN TOPLAM ENERJİ ÜRETİMİNDEKİ PAYI



Şekil 5. Ülkelerde nükleer enerjinin toplam enerji üretimindeki payı. Veriler BM bünyesinde faaliyet gösteren IAEA-PRIS'ten alınmıştır.

Dünya genelindeki nükleer reaktörlerin türlerine bakacak olursak Basınçlı Hafif Su Reaktörlerinin (Pressurized Light-Water Moderated and Cooled Reactor-PWR) 302 adet ile başı çektiğini görürüz. Benzer şekilde yapılmakta olan 50 reaktörün 43 tanesi de yine PWR'dir. İkinci sırada 63 adet ile Kaynar Hafif Su Reaktörleri (Boiling Light-Water Cooled and Moderated Reactor-BWR), üçüncü sırada ise 49 adet ile Basınçlı Ağır Su Reaktörleri (Pressurized Heavy-Water Moderated and Cooled Reactor-PWHR) bulunuyor. Ayrıca dünyada 14 adet Gaz Soğutmalı Reaktör (Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor-GCR), 12 adet Grafit Yavaşlatıcılı Su Soğutmalı Reaktör (Light-Water Cooled, Graphite Moderated Reactor-LWGR) ve 3 adet Hızlı Üretken Reaktör (Fast Breeder Reactor-FBR) mevcuttur (Şekil 6).

TÜRLERİNE GÖRE REAKTÖR SAYILARI

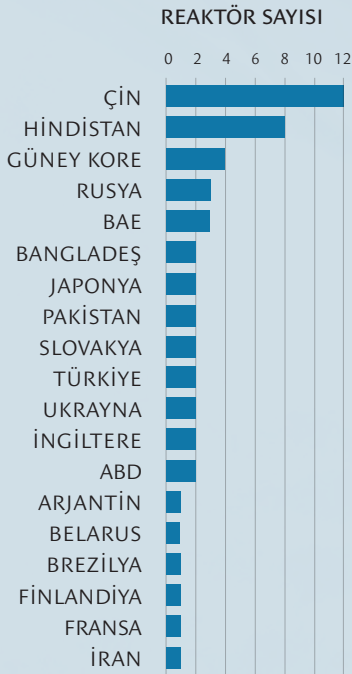


Şekil 6. Ülkelerde bulunan nükleer reaktörlerin türlerine göre sayıları. Veriler BM bünyesinde faaliyet gösteren IAEA-PRIS'ten alınmıştır.

Reaktörlerin yaşlarına baktığımızda ise en yaşlı 5 reaktörün 52 yıldır faaliyette olduğu görülüyor. Diğer reaktörlerden 96 tanesi 41-51, 192 tanesi 31-40, 51 tanesi 21-30 ve 33 tanesi de 11-20 yaş aralığındadır. Ayrıca 10 yaşın altında da 63 tane reaktör bulunuyor.

Günümüzde NGS inşaatları, özellikle gelişmekte olan ülkelerde devam ediyor. 2021 yılı itibarı ile Türkiye'nin de dâhil olduğu 19 ülkede 50 nükleer reaktör inşa hâlinde (Şekil 7). Bu 50 reaktörün %80'e yakını Asya'da (yaklaşık %25'i Çin'de) bulunuyor. Yapım aşamasında en çok reaktörü olan beş ülke ise sırasıyla Çin (12), Hindistan (6), Güney Kore (4), Rusya (3) ve Birleşik Arap Emirlikleri'dir (3). Diğer yandan, Batılı toplumlar, enerji tüketimi açısından bir doygunluğa ulaştıkları için yeni NGS siparişleri azalmış olup mevcut nükleer santrallerini kullanmaya devam etmektedirler.

İNŞAATI DEVAM EDEN REAKTÖR SAYILARI



Şekil 7. Ülkelere göre inşaatı devam eden reaktör sayıları. Veriler BM bünyesinde faaliyet gösteren IAEA-PRIS'ten alınmıştır.



Reaktör Tipi	PWR
Reaktör Ömrü	60 yıl
Soğutucu	Hafif Su
Moderatör	Hafif Su
Nötron Spektrumu	Termal Nötron
Yakıt	Maksimum %5 zenginleştirilmiş U içeren UO_2 alternatif olarak MOX uygunluğu
Yakıt Yükleme Döngüsü	12 (18) ay
Yakıt Değişim Süresi	4 yıl
Termal Kapasitesi	3200 MWth
Elektrik Üretim Kapasitesi	1170 MWe
Soğutucu Basıncı	16,2 MPa
Soğutucu Sıcaklık Döngüsü	298,2°C – 328,9°C

Tablo 1. VVER-1200 reaktörünün teknik özellikleri (IAEA, 2011)

TÜRKİYE’NİN NÜKLEER ADIMLARI

Türkiye’nin Nükleer Enerjide Geçmişi ve Bugünü

Türkiye, 1955 yılında 1. Cenevre Konferansı’ni takiben ABD ile Atom Enerjisinin Sivil Kullanımına Dair İş Birliği Anlaşması’ni imzalayan

ilk ülkedir. Bu anlaşmadan sonra Türkiye, nükleer alanda gerekli bilimsel ve teknik altyapılar ile insan kaynağını yetiştirmek üzere girişimlere başladı. 1956 yılında, henüz Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) resmi olarak kurulmamışken, Ankara’da Başbakanlık’a bağlı Atom Enerjisi Komisyonu (AEK) kuruldu. Bu kurum 9 Temmuz 1982’de çıkartılan yasa ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) adını aldı. 1956 yılında devlet bütçesi kullanılarak bir araştırma reaktörünün kurulması planlandı, ilk masraflarını karşılamak amacı ile bir bütçe ayrıldı ve İstanbul’da Küçükçekmece Gölü kenarında arazi kamulaştırıldı. Akabinde 1957 yı-

lunda nükleer bilimlere ait deneysel çalışmaları yürütmek üzere TR-1 araştırma reaktörünün yapım ihalesini American Machine Foundary firması aldı. 1 MW gücündeki TR-1 reaktörü 1959-1962 yılları arasında bu merkezde inşa edildi. İlk kez 6 Ocak 1962’de kritik edildikten sonra 27 Mayıs 1962’de işletmeye açıldı ve 1977 yılına kadar çalıştırıldı. Aynı yerde TR-1 reaktörünün ardından 5 MW gücündeki TR-2 reaktörü, 10 Aralık 1981’de kritik edilip 25 Aralık 1981’de işletmeye açıldı. Bu tarihlerde bir diğer araştırma reaktörü de İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü bünyesinde kurulmuştu (1979).

Nükleer güç üretimi kurmak için planlar yapan Türkiye, ilk hamlesini 1970’te 300 MWe’lik bir santral için fizibilite çalışması yürüterek yaptı. Daha sonra 1973’te 80 MWe’lik gösteri santrali inşa edilmesine karar verildi fakat bu hedef gerçekleştirilemedi. 1976 yılında Başbakanlık Atom Enerjisi Komisyonu tarafından Mersin Akkuyu Sahası için yer lisansı alındı. 1980’de santrali inşa etme teşebbüsü, hükümetin finansal garanti eksikliğinden ötürü başarısız oldu. 1993’te nükleer santral inşaatı ülkenin yatırım programlarına dâhil edildi fakat revize edilmiş ihale şartnameleri 1996 Aralık ayına kadar yayınlanamadı. Akkuyu’da 2000 MWe’lik bir santral için Westinghouse+Mitsubishi, AECL ve Framatome+Siemens’ten teklifler alınmasına rağmen Haziran 1998 ve Nisan 2000 arasında hükümetler son kararlarını geciktirip ekonomik sebeplerden dolayı planları iptal ettiler.

Ülkemizin yarım asırlık nükleer güç santrali kurma hedefi, Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında, Türkiye Cumhuriyeti'nde Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma'nın 12 Mayıs 2010 tarihinde imzalanmasıyla gerçekleşmeye başladı. Bu anlaşma, Akkuyu sahasında her bir ünitesi 1200 MWe olan 4 üniteli Rus tasarımı VVER reaktörü kurulmasını öngörüyor. Mersin'e 140 km uzaklıktaki Akdeniz kıyısında, Akkuyu mevkiinde nükleer santral yapımı için Rus Devlet Nükleer Enerji Şirketi Rosatom ile anlaşıldı. İnşaat lisansı 2 Nisan 2018 tarihinde TAEK tarafından onaylandı ve böylece Akkuyu Nükleer Santrali'nin ilk ünitesinin temeli yapılan törenle atıldı. 3 Nisan 2018 tarihinde ilk betonu dökülen birinci ünitenin 2023 yılında devreye girmesi ve santralin 60 yıl boyunca işlemeye devam etmesi öngörülmektedir.

2021 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla ülkemizin kurulu gücü 96.271 MW'a, elektrik tüketimi ise 290.874.400 kWh'e ulaştı. 2021 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı şöyledir: %32,2'si hidrolik enerji, %26,6'sı doğal gaz, %20,6'sı kömür, %9,4'ü rüzgâr, %7,9'u güneş, %1,6'sı jeotermal ve %1,7'si ise diğer kaynaklar. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkeleri arasında, en yüksek enerji talep artış oranına sahip ülkelerden biri olan Türkiye'nin, orta ile uzun vadede bu konumunu koruyacağı öngörülmektedir. Bu gelişmeler göz önünde bu-



lundurulduğunda, ülkemizin enerji ithalatına bağımlı olduğu gerçeği, enerji güvenliği açısından dikkat çekiyor. Enerji ithalatçısı ve bu alanda dışa bağımlı ülkeler için enerji bağımlılığundan kurtulmak, ekonomik bağımsızlığa ulaşabilmek açısından büyük önem taşıyor. Bunun yanında jeopolitik belirsizlik ortamı, fosil yakıt kullanımında sürdürülebilirlik çerçevesinde limitlere yaklaşılması ve dramatik sinyaller vermeye başlayan iklim değişikliği, ülkeleri kendi enerji döngülerini bir an önce yeniden oluşturmaya mecbur kılıyor. Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluşunun 100. yılının kutlanacağı 2023 yılına yönelik vizyon dâhilinde, ülkemizdeki toplam kurulu güç kapasitesinin 120 GW'a çıkarılması ve nükleer enerji santrallerinin işletmeye alınması hedefleniyor.

Akkuyu Projesi

Akkuyu'da Rus tasarımı 3. nesil PWR tipi VVER-1200 reaktörlerinin kurulması planlanıyor (Tablo 1). VVER-1200 reaktörleri, işletimde olan VVER-1000 reaktörlerinin güvenlik ve performans açısından geliştirilmiş modelleridir. Bununla birlikte, VVER reaktörü, dünyanın en güvenli reaktörlerinden biri kabul ediliyor. Rusça kısaltması ile VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) ya da İngilizce kısaltması ile WWER (water-water energetic reactor) reaktör tasarımları, Batı'nın nükleer enerji standartları ile ilişkilendirilen otomatik kontrol, pasif güvenlik ve koruma kabı sistemlerini birleştirmek için geliştirildi. 1960'tan beri 67 adet VVER reaktör inşa edildi. 2. nesil reaktör tasarımları, 1971 son-

rası yeni güvenlik kriterleri eklenerek geliştirildi. 3. nesil VVER-1000 serisi tasarımlarında yeni güvenlik önlemleri ve üretim kapasitesinin artışı sağlandı. 1980'lerin başında VVER-1000 V-320 tasarımlarda gerçekleştirilen gelişmelere ek olarak VVER-1000 AES-91 ve AES-92 tasarımlarına teknolojik ve ekonomik yeniliklere ilaveten pasif ve aktif güvenlik sistemleri de eklenmiştir. VVER tipi reaktörler, Rusya Federasyonu'nun yanı sıra Çin, Çek Cumhuriyeti, Finlandiya, Macaristan, Hindistan, Slovakya ve Ukrayna gibi ülkelerde hâlihazırda inşaat ve işletim aşamalarında bulunuyor.

Nükleer teknolojinin, insanlığın enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanımı için 1953 yılında başlayan süreçten bu yana, nükleer güç santralleri, özellikle gelişmiş ülkelerde hızlıca yaygınlaştı. Günümüzde yüzlerce santral dünya genelinde elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %11'ini karşılıyor ve hâlihazırda mevcut santrallere gün geçtikçe yenileri ekleniyor. Ülke olarak bu yarışa geç katılmış olsak da 2023 yılında Mersin Akkuyu'da çalıştırılması planlanan reaktör ile nükleer güç santrallerinden elektrik üreten ülkeler arasına dâhil olacağız. Sadece bu reaktörün tüm enerji ihtiyacımızı karşılaması mümkün olmayacağı gibi Sinop'ta yapılması planlanan diğer nükleer güç santrali de bu konuda yeterli olmayacaktır. Dolayısıyla yerli ve millî, yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarını kullanarak ülkemizin enerji konusundaki dışa bağımlılığını azaltmak durumundayız. ■



Kaynaklar

Rom Harré, *Büyük Bilimsel Deneyler*, Çeviren: Sinan Kılıç, Say Yayınları, 2014.

Edmund Blair Bolles, *Galileo'nun Buyruğu, Bilim Yazılarında Bir Derleme*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, Çeviren: Nermin Arık, 11. Baskı 2011.

Ioan James, *Büyük Fizikçiler Galileo'dan Yukava'ya*, Çeviren: Sibel Erduman, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları, 2. Baskı, 2015.

Kenneth S. Krane, *Nükleer Fizik*, Çeviri editörü: Prof. Dr. Başar Şarer, Palme Yayıncılık.

Arthur Beiser, *Modern Fiziğin Kavramları*, Çeviren: Gülşen Öngüt, Akademi Yayıncılık.

U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, *The History of Nuclear Energy*.

G. Kessler, *Nükleer Filyon Reaktörleri*, Çeviren: Süleyman Sırrı Öztekin, 2003.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Türkiye'nin Nükleer Santral Projeleri: Soru-Cevap*, Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Yayın Serisi, Ocak 2016.

Cem İskender Aydın, *Nuclear Energy in Turkey: Past, Present and Future*, Yeditepe University Department of Economics, Notes on Economy, 2018.

<https://www.armscontrol.org/>

<https://www.clpgroup.com/>

<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

<https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report-2011>