

Sürdürülebilir Gelişme ve Nükleer Enerji

Prof. Dr. Hasan SAYGIN

**İstanbul Teknik Üniversitesi
Enerji Enstitüsü Müdürü**

&

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı Başkanı

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), Atom Enerjisi Komisyonu Üyesi

90'lı yıllarda belirginleşen ve giderek artan bir önem kazanan sürdürülebilir gelişme kavramı, ekonomi, çevre ve sosyal refah olmak üzere üç boyutta sürdürülebilirliği kapsamakta olup, birbirini tamamlar nitelikteki farklı boyutlar arasındaki ilişkiyi ve bunlar arasında denge kurmak zorunluluğunu ifade etmektedir[1]. Dünyanın giderek artan enerji gereksiniminin bu dengeyi koruyacak şekilde karşılanması, sürdürülebilir gelişmenin ekonomi, çevre ve sosyal refah boyutlarının her biri ile yakından ilgilidir. Bu bağlamda, bilim ve teknoloji toplumun farklı ve çoğu zaman zıt çıkarlarına hitap eden sorunlarıyla mücadele etmek ve onlara yanıt vermek durumundadır. Nüfus artışına ve sanayi ve teknolojiye bağlı gelişmelere bağlı olarak her geçen gün daha fazla enerji tüketen Dünyada ülkeler enerji arz güvenliğini sağlamak için kısa, orta ve uzun vadede çözümler aramaktadır. Sürdürülebilir bir gelişmenin hedeflendiği günümüzde enerji politikaları tek boyutlu olarak düzenlenmemektedir. Enerji politikalarının, hem enerji hem de çevre güvenliğini mümkün olan en düşük maliyetle karşılayacak şekilde oluşturulması zorunludur. Enerji politikalarının ve stratejilerinin belirlenmesindeki ana hedef enerji arz güvenliğinin teminat altına alınmasıdır. Enerji güvenliğini garantiye almanın en önemli yöntemlerinden birisi, çeşitliliğinin sağlanmasıdır. Enerji arzında çeşitliliğin sağlanması, enerji kaynaklarının ve teknolojilerinin yanısıra arz mekanizmalarının (yerli ve ithal arzın, şebeke üretiminin ve yerel üretimin dengelenmesi), arzı sağlayan ülkelerin ve enerji hatlarının çeşitlendirilmesi olmak üzere bir kaç farklı yolla gerçekleştirilmektedir[1]. Bu bağlamda, jeopolitik unsurları da gözardı etmeksizin Ülkenin ve/veya bölgenin özgül koşullarına en uygun enerji karışımının oluşturulması elzemdir.

Çağdaş Fizikteki gelişmelerin sonucu olarak yirminci yüzyılın ortalarında doğan nükleer güç teknolojisi, bilimsel açıdan çok önemli bir devrimsel bir gelişmedir. Bu nedenle, 1950'li ve 60'lı yıllara karşılık gelen bu dönemde, teknolojik ilerleme nükleer teknoloji ile eşleştirilmiş, gelişmiş ülkelerin pek çoğu enerji karışımında fosil yakıtlı enerji kaynaklarına en önemli alternatif olarak görülen nükleer enerjiye enerji güvenliği ve bağımsızlığı gibi nedenlerle azımsanamayacak ölçüde yer vermişlerdir. Ancak, 1950'li yıllardan bu yana ticari kullanımda olan ve uzun süre teknolojik gelişmişliğin simgesi olarak görülen nükleer güç santrallerine dünyanın bakışı giderek farklılaşmıştır. Bunun nedeni, günümüzde çevre faktörünün son derece önemli hale gelmiş olmasına karşın, özellikle kullanılmış yakıtlardan kaynaklanan radyoaktif atık sorununa hala tatmin edici bir çözümün bulunamamış olmasının yanısıra nükleer santrallerin işletme güvenliğini iyileştiren her türlü düzenlemenin sistemin maliyetini daha da artırarak ekonomik rekabet gücünü azaltmasıdır. Öte yandan, fosil yakıtlardan enerji üretimi esnasında yanma ürünleri olarak ortaya çıkan sera gazlarının neden olduğu çevre kirliliği ve küresel ısınmaya bağlı olarak meydana gelen iklim değişiklikleri nedeniyle, ekolojik dengeyi tehdit eden gelişmeler ortaya çıkmaktadır. Bu durum, enerji üretiminde yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılmasına yönelik yoğun çabaların yanısıra, sera gazı yayını düşük olan nükleer santrallerin fosil yakıtlı enerji kaynaklarından kaynaklanan yayını dengeleyeceği gerekçesiyle nükleer santrallerin yeniden gündeme getirilmesine neden olmaktadır.

Kamuoyunda ve bilim camiasında, sürdürülebilir gelişmenin sağlanmasında nükleer enerjinin rolü üzerine farklı görüşler mevcuttur. Radyoaktif atık sorununun yanısıra işletme güvenliğine ve silahlanmaya yönelik riskler nedeniyle, mevcut nükleer güç teknolojisinin çevreyi ve insan sağlığını ciddi olarak tehdit eden zararlı bir teknoloji olduğu ve tümüyle devre dışı bırakılması gerektiği şeklindeki nükleer enerji karşıtı görüş, çevreci gruplar, sivil toplum örgütleri ve bazı siyasi hareketler tarafından etkin bir şekilde desteklenmektedir. Özellikle, kamuoyunda nükleer enerjiye karşı şiddetli bir tepkinin oluşmasına neden olan TMI ve Çernobil Kazalarında sonra önemli ölçüde yayınlanan bu görüş doğrultusunda, bazı ülkeler çalışmakta olan nükleer reaktörlerini devre dışı bırakmaya kadar varan nükleer karşıtı kararlar almıştır. Bu yaklaşımın en önemli örneklerinden biri Almanya'da gerçekleşmiştir. Sürdürülebilir bir gelişmenin sağlanmasına yönelik tartışmalar devam ederken, nükleer enerji karbon yayınına azaltılması için düşünülen enerji seçenekleri arasından çıkartılmıştır. Ancak, enerji sisteminin sürdürülebilirliğini sağlamak için nükleer enerjiden mutlaka faydalanılması gerektiğini savunanlar da hala mevcuttur ve bu görüşü paylaşılanların çoğu Dünyadaki nükleer topluluğun üyeleridir. Bunlar görüşlerini; nükleer güç santrallerinin karbondioksit ve diğer zararlı sera gazlarının yayınına katkısının çok düşük olduğu; yeni yenilenebilir (rüzgar, güneş, ticari biyokütle)

enerji teknolojilerinin hala demonstrasyon aşamasında olmasına karşın nükleer teknolojinin fosil yakıtlı enerji teknolojileri ile ekonomik rekabet gücüne sahip gelişmiş bir teknoloji olduğu; Dünyanın elektrik ihtiyacının karşılanması için % 16'lık paya sahip olan nükleer enerjinin enerji sektöründen kaynaklanan karbondioksit yayılımının % 8 oranında azalmasını sağladığı; karbon ve diğer çevre vergilerinin yürürlüğe konulması halinde nükleer enerjinin rekabet gücünün artacağı; nükleer enerjinin yeterli fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan ülkelerde enerji bağımsızlığının ve çeşitliliğinin sağlanmasına katkı sağladığı; bilim, sanayi, tıp ve tarım sektörünün genel gelişimi üzerinde olumlu etkileri olduğu ve sosyal gelişmeyi desteklediği; Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da ki bir çok ülkenin bir kaç on yıldır nükleer güç teknolojisinin sağladığı avantajlardan yararlanmakta olduğu şeklindeki gerekçelere dayanmaktadır. Kamuoyunda ciddi kaygılara yol açan işletme güvenliği, radyoaktif atıkların depolanması ve nükleer silahların yayılmasına ilişkin hususlarda, nükleer enerjinin gelişimine ket vuracak ve sürdürülebilir enerji seçenekleri arasından çıkarılmasını haklı gösterecek kadar ağır sorunların olmadığını savunmaktadırlar. Bu iddialarını ise, TMI ve Çernobil kazalarından sonra benimsenen yeni uluslararası güvenlik normlarına uygun çok daha güvenli reaktör tasarımlarının geliştirilmiş olduğu, mevcut reaktörlerin iyileştirilerek işletme güvenliğini arttıran geniş önlemlerin alınmasıyla yeterince güvenilir hale getirildiği; radyoaktif sızıntıya neden olacak ciddi bir kaza riskinin çok düşük olduğu; radyoaktif atık hacminin oldukça sınırlı olduğu ve atıkların uzun dönemde depolanması için yeterince güvenli tekniklerin bulunduğu şeklindeki argümanlara dayanarak savunmaktadırlar. Bu bağlamda, günümüzde hedeflenen ileri nükleer teknolojilerin temel misyonunun, güvenlik, silahsızlanma ve atıkların bertaraf edilmesine ilişkin henüz karara varılmamış hususların ele alınması, kendini ispatlamış bulunan mevcut nükleer teknolojinin işletme güvenliğini ve maliyet etkinliğini arttırmak amacıyla kademeli olarak geliştirilmesiyle nükleer gücün rekabet gücünün artırılması ve kamuoyu onayının kazanılması olduğunu savunmaktadırlar[2-3]. Nükleer topluluğun önemli bir bölümü, nükleer teknolojiye ilişkin gelişmenin devrimsel olmaktan çok evrimsel olması gerektiği doğrultusundaki bu görüşü desteklemektedir.

Bununla birlikte, evrimsel gelişme görüşüne nükleer topluluğun tüm üyeleri katılmamaktadır. Bir bölümü de, nükleer güvenlik, silahsızlanma ve atıkların depolanmasının henüz tam olarak kavranmamış sorunları ve cevaplandırılmamış ciddi soruları içerdiğini kabul etmekte ve varolan sorunların çözümünün kavramsal farklılıklar içeren tümüyle yeni tasarımları, bir başka deyişle, nükleer teknolojiye devrimsel bir gelişimi gerektirdiğini düşünmektedir. Bu görüşü paylaşanlar, nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payının artırılmasının, ancak nükleer teknolojiye devrimsel bir gelişme ile sağlanabilecek yenilikçi tasarımlarla mümkün olabileceğini ve düşük kapasiteli, minimum koruma gerektiren, küçük şebekelere uygun, hatta şebeke bağlantısız kullanılabilen özel tasarlanmış yenilikçi reaktörlerin mahalli ve endüstriyel ısı arzı, suyun tuzdan arındırılması, yakıt sentezi gibi (başta hidrojen üretimi olmak üzere) elektrik üretimi dışındaki alanlarda da kullanımın sağlanabileceğini ifade etmektedir[2-6]. Güvenlik, atık ve nükleer silahların yaygınlaşmasına ilişkin sorunların çözülmesine olanak sağlayacak yenilikçi reaktör tasarımlarına ve yakıt çevrimlerine yönelik çeşitli kavramlar üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: Nükleer yakıt çevriminde esnekliği sağlamak için reaktördeki nötron sayısının çoğaltılmasını ve uzun ömürlü bazı radyoizotopların yakılması sağlamak üzere hızlandırıcı kullanımına dayanan "Hızlandırıcıyla Sürülen Sistemler" (Accelerator Driven Systems); Uranyum tabanlı yakıt çevrimlerine nazaran çok daha düşük miktarda uzun yarı ömürlü radyoizotop ihtiva eden ve aynı zamanda kullanılmış yakıt akış miktarını azaltacak ve reaktörün çalışma ömrü süresince yeniden yakıt yükleme işleminden kaçınılmasını sağlayacak uzun ömürlü (10-20 yıl) reaktör kalbi tasarımı için önemli bir potansiyel teşkil eden Toryum-Uranyum 233 bazlı yakıt çevriminin kullanılması; radyoaktif atık miktarının önemli ölçüde azalmasına olanak sağlayan nükleer atıkları susuz yeniden işleme yöntemleri; pasif güvenlik özelliklerine dayanan reaktör tasarımları; nükleer silahlanmaya karşı dirençli reaktör ve yakıt çevrimi kavramları. ABD'nin Hızlı Entegre Reaktörlerine ve Rusya'nın kullanılmış yakıtları Kuru Yeniden İşleme Yöntemi ile Kuple Hızlı Reaktörlerine ilişkin yeni tasarımların yukarıda belirtilen kavramların tümüne etkin olarak hitap ettiğine inanılmaktadır.

Nükleer Teknolojinin Günümüzdeki Gelişimi ve Sorunları

Nükleer teknoloji günümüzde evrimsel gelişimden devrimsel bir gelişime doğru bir değişim ve geçiş sürecindedir. Nükleer güç reaktörlerinin evrimi, ilk reaktör prototiplerini kapsayan I. Kuşak, günümüzde işletimde olan reaktör tiplerinin çok büyük bir kısmını temsil eden II. Kuşak, TMI ve Çernobil kazasından sonra 1980'leri ve 1990'ların başını kapsayan dönemde kamu-özel sektör işbirliği ile geliştirilen ileri hafif sulu reaktör teknolojisini temsil eden III. Kuşak ve günümüzde hedeflenen devrimsel tasarımları temsil eden IV. Kuşak Reaktörler olmak üzere 4 farklı tasarım kuşağı ile temsil edilmektedir (Bkz. Şekil:1). Çeşitli yenilikçi reaktör tasarımlarının ve yakıt çevrimlerinin gelecekteki ticari kullanım olasılıkları bakımından değerlendirildiğinde nükleer fisyon teknolojisinde 2020 yılından itibaren önemli değişimlerin gerçekleşmesi beklenmektedir (Bkz. Tablo 1). Nükleer füzyon reaktörlerinin ticarileşmesine ilişkin durum ise halen belirsiz olup, 2050 yılından önce kadar bu bağlamda önemli bir ilerleme kaydedilemeyeceği öngörülmektedir [3].

Geliştirilmiş yeni nükleer güç santralleri, daha önce örneği görülmemiş derecede kapsamlı tasarımlara dayanan, yüksek düzeyde işletme güvenliği sağlayan sistemleri içermekle birlikte, diğer enerji teknolojileri ile rekabet edebilecek hale gelmeleri için ekonomik olarak daha da iyileştirilmeleri gerekmektedir. Yeni nükleer güç santralleri 1700-3100 \$/kW_e olan maliyetleri ile, özellikle gaz arzı için gereken altyapının olduğu yerlerde günümüzün birleşik çevrimli gaz santralleri rekabet edebilecek güçte değildir [6]. Nükleer güç santrallerinin geleceği, ekonomik olarak rekabet edebilir yenilikçi tasarımların gerçekleştirilmesine ve bu endüstrinin işletme güvenliği konusunda kamuoyunun güvenini yeniden kazanmasına bağlıdır. Ancak işletme güvenliğinin sağlanması da tek başına yeterli değildir. Radyoaktif atık sorunu nükleer güç teknolojisinin en önemli ve çözümü en güç problemini teşkil etmektedir. Radyoaktif atıkların uzun dönemde idaresi sorunun can alıcı noktasını oluşturmaktadır. Günümüzde kullanılan yakıtlardan kaynaklanan radyoaktif atık idaresine ilişkin olarak üç farklı yol benimsenmektedir : (i) Kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesiyle Uranyum ve Plutonyumun ayrıştırılarak tekrar çevrime sokulması ve geri kazanılamayan ürünlerin depolanması (kapalı çevrim); (ii) kullanılan yakıtların doğrudan atık olarak değerlendirilerek yeniden işleme maruz bırakılmaksızın havuzlarda soğutulduktan sonra (yaklaşık 10-50 yıl) uzun süreli depolama için derin jeolojik oluşumlara yerleştirilmesi (açık çevrim); (iii) Atıkların yeniden işlenmesi veya doğrudan depolanması konusunda kesin bir karara varılabilmesi için nihai depolarına konulmadan önce uygun koşullarda geçici olarak bekletilmesi [4].

Bu noktada, nükleer reaktörlerden çıkan kullanılan yakıtlardan kaynaklanan radyoaktif atık sorununun henüz kesin ve kalıcı bir çözümün bulunamamış olduğu ve bu teknolojiye sahip en gelişmiş ülkeler için dahi atıkların güvenli bir şekilde depolanmasının önemli bir sorun teşkil ettiği vurgulanmalıdır. Bu nedenle, Dünyada nükleer enerji alanındaki çalışmalar yenilikçi reaktör tasarımlarının geliştirilmesinin yanısıra yüksek seviyeli radyoaktif atıkların idaresine odaklanmıştır. Kullanılmış yakıtlar, reaktörün çalışması esnasında gerçekleşen nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan ve yarı ömrü birkaç saatten yüzbinlerce yıla kadar değişen orta ve uzun ömürlü radyoaktif izotopları içermektedir. Bu nedenle, radyoaktif atıkların binlerce yılı kapsayan çok uzun zaman aralıklarında güvenle saklanabileceğinin garanti altına alınması zorunludur. Bunun için, Radyoaktif atıkların, camlaştırılarak ve/veya , bakır, çelik ve titanyum gibi malzemelerden yapılmış metal muhafazalara konularak tampon işlevi gören beton, kil ve tuz tabakaları veya granit, bazalt kütleleri ihtiva eden derin jeolojik oluşumlarda depolanmasına yönelik projeler mevcuttur. Bazı ülkeler bu amaçla kullanılacak jeolojik oluşumlar için yer belirlemesine ve bunların lisanslanmasına yönelik çalışmaları sürdürmesine karşın, bu henüz dünyanın hiç bir ülkesinde uygulamaya konmamış olması nedeniyle denenmemiş bir yöntemdir. Depolama sürelerinin jeolojik değişimlerin meydana gelebileceği kadar uzun olması nedeniyle ortaya çıkan jeolojik riskler (su ile dolan kayalarda meydana gelebilecek çatlamlar ve iklim değişikliklerinin olası etkileri gibi) ve radyonüklidlerin biyosfere difüzyonu gibi Doğadan kaynaklanan risklerin yanısıra, çok uzun dönemde meydana gelebilecek şimdiden öngörülmesi mümkün olmayan sosyal değişikliklerin neden olabileceği insan kaynaklı riskler söz konusudur[5]. Bu nedenle, bu yöntem hem bilimsel hem de etik olarak önemli soru işaretlerini barındırmaktadır. Binlerce yıllık süreleri kapsayan çok uzun zaman aralıkları nedeniyle, güvenli olduğu öne sürülen depoların ve depolama yöntemlerini doğa bilimleri ilkelerine göre tasarlanan klasik deneysel yöntemler ile test etmek mümkün değildir. Bu nedenle, önerilen çözüm yöntemlerinin yeterliliğine ilişkin şimdiden kesin yargılarda bulunmak bilimsel düşünce ve bilimsel yöntemin yanısıra bilim etiği ile de bağdaşmamaktadır. Ayrıca, nükleer enerji ile ilgili kararın aynı zamanda siyasi bir karar olduğunu vurgulanmalıdır. Ancak, günümüzde atılacak her adım sonraki kuşakların geleceğini de 50 veya 100 yıl değil, yüzbinlerce yıl etkileyeceğinden, herhangi bir siyasi karar vericinin - parlamentodaki oy çokluğu hatta referandum yoluyla halkın onayı sağlansa dahi - bu doğrultuda karar alması etik değildir.

Dünyada Nükleer Enerji Kullanımı ve Küresel Stratejiler

Nükleer enerji küresel düzeyde enerji üretiminde %16'lık bir paya sahip olmakla birlikte, bu durum ülkeden ülkeye ya da bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişmektedir. Dünyanın en büyük nükleer enerji parkını ihtiva eden ABD, Dünyadaki kurulu kapasitenin % 30'una sahiptir. Avrupa Birliği'ndeki 15 ülkenin 7'si, farklı oranlar olmakla birlikte, nükleer enerjiyi kullanmaktadırlar. 2000 yılı itibariyle elektrik üretiminde nükleer enerjinin payı Fransa'da % 78.2 Belçika'da %60.1, Almanya'da % 35, İspanya'da ve Fillandya'da %30, İngiltere'de % 28.6, Hollanda'da % 3.1'dir. Rusya ve Doğu Avrupa, Dünyanın kurulu nükleer kapasitesinin %13'ünü oluşturmaktadır. Ancak şimdilerde öncelik reaktörlerin Batı'nın güvenlik standartlarını sağlayacak şekilde güncellenmesine verilmektedir. Japonya, toplam kapasitesi 43.5 GWe olan 53 reaktörüyle ulusal elektrik üretiminin % 36'sını nükleer enerjiden sağlamaktadır. Bununla birlikte, nükleer enerjiyi hiç kullanmayan bir çok ülke olduğu gibi, halen faydalanmakla birlikte bu enerji kaynağını devre dışı bırakmayı planlayan ülkelerde vardır. Zıtlıklar içeren bu görünüm nükleer enerjinin ekonomik ve teknolojik ölçütlerin yanısıra politik ve stratejik ölçütlerle de değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Halen işletimde bulunan toplam 443 reaktörün 146'sı Avrupa Birliği'n de, 125'i Kuzey Amerika'da, 92'si Asya'da ve 67'si Doğu Avrupa Ülkelerinde bulunmaktadır (Bkz. Tablo 2) Ancak, bu dağılımın 70'li ve 80'li yıllardaki enerji politikalarının ve eğilimlerinin bir sonucu olduğu vurgulanmalıdır. İptal edilen

nükleer güç kapasitesine ilişkin veriler (Bkz. Tablo 2) ise, nükleer enerji alanında Dünyada geçerli olan güncel eğilimleri yansıtmaktadır. Kuzey Amerika ve Avrupa Birliği Ülkelerinde kurulu nükleer kapasitenin bir bölümü devre dışı bırakılmasına karşın daha önce kurulması planlanan önemli ölçüde nükleer güç kapasitesine ilişkin projeler iptal edilmiş olup, sipariş edilen veya kurulma aşamasında olan tek bir nükleer santral dahi bulunmamaktadır[4]. Avrupa Birliğinde, nükleer güce sahip olan 8 üye ülkeden 5'inin moratoryumu kabul etmiş veya nükleer enerjiden tümüyle vazgeçme kararı almış bulunmaktadır.

Nükleer enerjinin günümüzdeki durumu küresel boyutta değerlendirildiğinde, Batı Ülkelerinin bu alanda varolan belirsizlikler nedeniyle nükleer enerjiye ilişkin nihai kararı vermek üzere “bekle ve gör” tutumunu benimsedikleri görülmektedir. Nükleer enerjiye sahip olan gelişmiş ülkelerin çoğunluğu, yeni reaktör kurmaktan kaçınmakta ve varolan reaktörlerin ıslah ederek lisans süresini uzatmayı tercih etmektedir. Bu yaklaşım, radyoaktif atık ve işletme güvenliğine ilişkin olarak günümüzün teknolojisinde varolan sorunların çözümlenmesini sağlayacak ileri tasarımların ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi için zaman kazandırmakta, böylece hem bilimsel ve teknik verilere bağlı olarak daha objektif ve sağlıklı kararların alınabilmesine hem de politik olarak da hassas bir konuda karar alma sürecinin ötelenmesine imkan tanıyarak kamuoyunun tepkisinden kaçınılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu alanda önemli yatırımlar yapmış bulunan ülkeler için nükleer enerjiden ani bir dönüşün başta ekonomi olmak üzere her alanda getireceği yük gelişmiş ülkelerin dahi başa çıkmakta zorlanacağı kadar ağırdır. Bunun belirli bir plan dahilinde yapılması uygun olduğundan bu yaklaşım geçiş süreci için de zaman kazandırmaktadır. Günümüzde bu alanda varolan belirsizlikler nedeniyle, Batı Ülkeleri'nde belirgin bir durgunluk gözlenmesine, hatta bu ülkeler nükleer enerjiden tam bir dönüşün başlangıcında gibi durmalarına karşın, bu alanda en yüksek dinamizm Asya Ülkeleri'nde gözlenmektedir. Bunun nedeni, bu ülkelerde ekonomik büyüme ve özellikle Çin'deki demografik dinamizm nedeni ile hızla artan enerji ihtiyacını karşılama zorunluluğuna bağlı olarak, nükleer enerjinin hala önemli bir seçenek olarak görülmesidir. Japonya'da 4 yeni reaktör kurulmaktadır. Çin'de şu anda işletilmekte olan yalnızca 2 reaktör olmakla birlikte, 9 reaktör kurulma aşamasındadır ve 2015 yılına kadar 25 yeni reaktörün devreye sokulması planlanmaktadır. Bu nedenle, Çin Batı'nın nükleer endüstrisi için en önemli potansiyeli oluşturmaktadır [4].

Nükleer güce ilişkin olasılıkların özel bir belirsizliğe sahip olduğu Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından da vurgulanmaktadır. IEA tarafından sunulan, 2030 yılına kadar olan dönemi kapsayan en son enerji projeksiyonlarına ilişkin verilerde yukarıda betimlenen tabloyu yansıtmaktadır. IEA'nın projeksiyonlarına göre, günümüzde işletilmekte olan reaktörlerden bir bölümünün belirtilen süre içerisinde çalışma ömrünü tamamlayacak ve bazılarının da tasfiye edilecek olmasına rağmen, kurulması planlanan reaktör sayısının az olması nedeniyle nükleer enerjinin dünyanın enerji dengesindeki rolü belirgin bir şekilde azalacaktır. Nükleer güç üretimi içinde bulunduğumuz on yılın sonuna doğru en yüksek değerine ulaşarak, daha sonra kademeli olarak azalacaktır. Dünyanın birincil enerji talebinde halen % 7 olan payı 2010'a kadar aşağı yukarı korunmakla birlikte 2030'da bu oran %5'e azalmış olacaktır. Nükleer enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı ise daha hızlı azalarak, 2000'de % 17 iken 2030'da % 9'a düşecektir. Günümüzde mevcut reaktörlerden % 40'ının 2030'a kadar emekliye ayrılacağı öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının projeksiyonlarına göre, nükleer güç üretimindeki en büyük azalma Kuzey Amerika ve Avrupa'da gerçekleşecektir. Geçiş ekonomisi ülkelerindeki nükleer kapasite de azalacaktır. Çünkü bu ülkelerde kurulması planlanan az sayıdaki nükleer santral emekliye ayrılan santrallerin neden olduğu azalmayı karşılayacak kapasitede değildir. Bu ülkelerin, 2030 yılına kadar mevcut santrallerinin dörtte üçünü emekliye ayırması beklenmektedir. Litvanya, Slovakya ve Bulgaristan Avrupa Birliğinin Standartlarına uymayan eski teknoloji ürünü reaktörlerini on yıl içerisinde kapatmak üzere Avrupa Birliği ile fikir birliğine varmışlardır. Rusya bölgedeki en iddialı nükleer programa sahip olmakla birlikte, yeni santrallerin finanse edilmesi oldukça zor görülmektedir. Nükleer güç kullanımı, çoğu Asya'da yer alan yalnızca bir kaç ülkede artacaktır. Japonya ve Kore bölgedeki en büyük nükleer santral kurulmasına yönelik programa sahiptir. Nükleer gücün Çin ve Hindistan'da da artacağı öngörülmekle birlikte, her iki ülkede de nükleer enerji 2030 yılına kadar enerji karışımında marjinal bir kaynak olarak kalacağı öngörülmektedir [2-12].

Avrupa Komisyonu tarafından Kasım 2000'de yayımlanan ve Avrupa Parlamentosu tarafından onaylanan, Avrupa Birliğinde enerji arz güvenliğinin sağlanması için ortak bir stratejinin oluşturulmasına yönelik konuların ele alındığı *Yeşil Kitap*'da (Green Paper), Birlik Ülkelerinin gelecek 20-30 yıldaki enerji arz güvenliğini ve Kyoto Protokolü çerçevesindeki taahhütlerini karşılamasını sağlayacak hedefler saptanmıştır. Söz konusu *Yeşil Kitap*' da nükleer enerjinin durumu ve Avrupa Birliği'nin enerji arzındaki rolüne ilişkin konular masaya yatırılmıştır. Avrupa Birliğinde, nükleer güce sahip olan 8 üye ülkeden 5'inin moratoryumu kabul etmiş veya nükleer enerjiden tümüyle vazgeçme kararı almış bulunduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, Fransa, İngiltere ve Fillandya'nın nükleer enerjiyi durdurma kararı almamakla birlikte, Fillandya dışındaki ülkelerde, önümüzdeki yıllarda yeni nükleer santral kurulma olasılığının bulunmadığı da bildirilmektedir. Günümüzde alınmış bulunan moratoryum veya devre dışı bırakma kararlarının Avrupa Birliği'nin 2012'ye kadar taahhüt edilen Kyoto hedeflerini

karşılamaya yeteneğini etkilemeyeceği öngörülmektedir. Bununla birlikte, nükleer gücün orta ve uzun dönemde tasfiyesinin Avrupa Birliğinin elektrik üretiminin % 35'inin daha yenilenebilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarından karşılanması ve enerji talebinin tahminen artacağı da göz önünde bulundurulduğunda ek olarak verimliliğe ilişkin önemli çabaların da sarf edilmesi anlamına geldiği, bu nedenle, Birliğe Üye Ülkelerin seçimlerinin olabildiğince geniş bir aralığı kapsamasının gerekliliği göz önünde bulundurularak nükleer seçeneğin onu benimseyen ülkeler için halen açık tutulduğu belirtilmektedir. Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Diğer Ülkelerdeki durumun da esas olarak bu şekilde olduğu ifade edilmektedir. Ancak Yeşil Kitap'ın yayımlanmasının ardından başlatılan yoğun münazaralarda varılan temel sonuç da Nükleer Endüstrinin geleceğinin belirsiz ve başta radyoaktif atık sorununa hiç bir kuşkuyla yer bırakmayacak kalıcı bir çözümün bulunmasına bağlı olduğudur [8-10]. Bu nedenle, Avrupa Birliği 2000-2006 dönemi için Altıncı Çerçeve Araştırma Programı kapsamında, nükleer araştırmaları, özellikle nükleer güvenlik ve atık idaresinin geliştirilmesine yönelik çalışmaları desteklemeyi tevdî etmiştir[10]. Mevcut nükleer güç teknolojilerine eşlik eden ciddi sorunların varlığına rağmen, bu teknolojiye sahip olan ve nükleer seçeneği muhafaza eden Avrupa Ülkelerini nükleer enerjiden tümüyle vazgeçmekten alıkoyan iki temel neden vardır: Bu ülkelerde kişi başına enerji tüketiminin buna bağlı olarak da CO₂ yayımının çok yüksek olması nedeniyle Kyoto protokolü ile verilen CO₂ yayımına ilişkin taahhütler ve fosil yakıtların yetersiz olması nedeniyle enerji bağımsızlığına yönelik kaygılar. Bununla birlikte Avrupa Komisyonu arz güvenliğinin yalnızca dışa bağımlılığı azaltma ve yerli üretimin desteklenmesi şeklinde algılanmasının fazla yüzeysel ve yanıltıcı olacağını, bunlara ek olarak jeopolitik koşulları ve anlamlarını gözardı etmeksizin, kaynakların ve teknolojilerin çeşitlendirilmesini de hedefleyen çok daha geniş kapsamlı politikaların gerekliliğini ifade etmektedir. Yeşil Kitap'la ilgili olarak yapılan münazaralarda, üye ülkelerin bazılarında % 80'e ulaşan ithalata bağımlılığının kaçınılmaz olduğu ve dışa bağımlılığın doğru bir şekilde idaresinin bağımlılığın düzeyinden daha önemli olduğu konusunda fikir birliğine varılmıştır. Avrupa Birliği konuyu enerji bağımsızlığından çok enerji güvenliği temelinde ele almakta ve arz güvenliğinin sağlanması için gerek arzı gerekse geçişi sağlayan ülkelerle iyi ilişkiler kurulması ve enerji alışverişinin getireceği karşılıklı bağımlılık temelinde, bağımlılığa ilişkin risklerin idare edilebilirliğine dayanan bir çözümü benimsemektedir[8-13].

Sonuç ve Değerlendirme

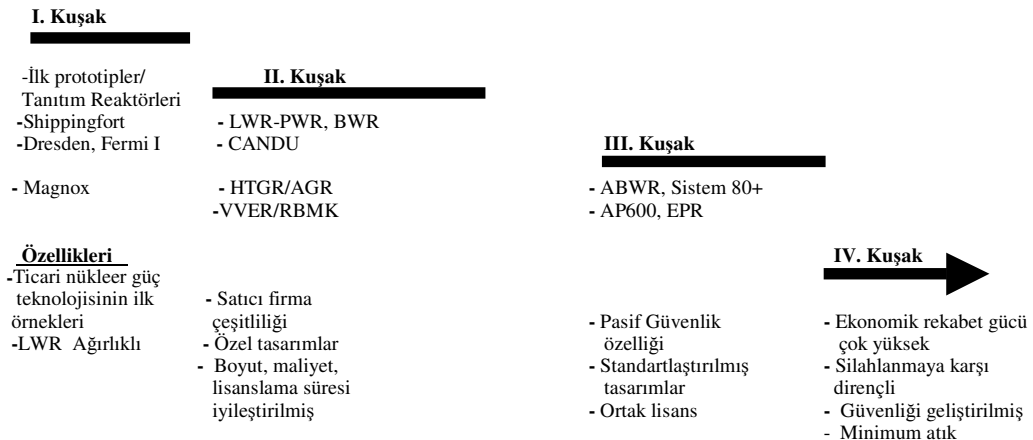
Dünyada nükleer teknolojinin sürdürülebilir gelişmedeki rolüne ilişkin tartışmaların devam etmesine karşın, nükleer enerjinin ya da daha doğru bir deyişle, günümüz nükleer güç teknolojisinin geleceğinin belirsiz olduğu hususunda konsensus oluşmuştur. Nükleer enerjinin geleceği, i) Nükleer atık idaresi ve depolanmasına ilişkin sorunlara mutlak bir çözüm bulunmasına; ii) Yeni kuşak nükleer güç santrallerinin ekonomik olarak sürdürülebilirliğinin sağlanmasına; iii) Nükleer silahlanma ve küresel ısınma ile mücadele için uygulanan strateji ve politikaların başarısına bağlıdır[2-12]. Bu bağlamda, nükleer teknolojinin geliştiği ve hızla yükseldiği yıllarda (Fransa örneğinde olduğu gibi) Ülkemizin nükleer reaktör edinme çabaları anlamlı görülebilecek iken, günümüzde bu alanda varolan belirsizlikler nedeniyle nükleer teknoloji transferi yönünde bir adım atmak için bulunduğumuz zaman diliminin uygun olmadığı açıktır.

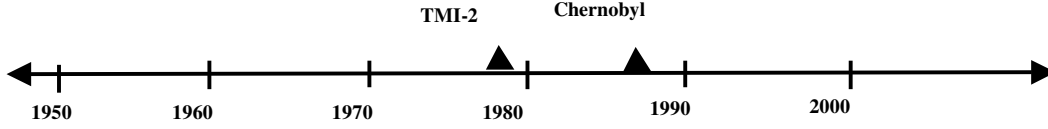
Teknoloji transferinin sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunması için transfer edilen teknolojinin de sürdürülebilir olması gerekir. Bu bağlamda, ülkenin özgül koşullarına uygun olarak belirlenen doğru teknolojinin doğru zamanda transferi önemlidir. Ülkemizin nükleer enerjiye ilişkin stratejileri belirlenirken, nükleer teknolojiyi üreten ve kullanan gelişmiş ülkelerin 1950'li yıllardan beri kazandığı deneyimi göz önünde bulundurmak ve bu ülkelerin konu ile ilgili günümüzdeki duruşunu iyi değerlendirmek gerekmektedir. Bir başka deyişle, böyle bir belirsizlik ortamında nükleer enerji hususunda sağlıklı bir karara varılabilmesi olası gözükmediğinden, gelişmiş ülkelerin bu alandaki duruşuna koşut olarak nükleer ve diğer enerji teknolojilerindeki yeni gelişmelerin beklenmesi doğru olacaktır. Nükleer güç teknolojisinde yeni yakıt çevrimlerine ve buna bağlı olarak yenilikçi tasarımlara yönelik beklentiler nedeniyle belki de günümüzde varolan nükleer teknolojiye tümüyle vaz geçilmesi olasılığı "nükleer teknolojiye sahip olmak" şeklindeki gerekçeleri geçersiz kılmaktadır. Ancak günümüzün nükleer güç teknolojisinde var olan işletme güvenliğine ve özellikle de radyoaktif atık sorununa ilişkin problemlere kesin ve ekonomik çözümler bulunduğu takdirde, ülkemiz için en uygun nükleer teknolojinin belirlenerek transfer edilmesi enerji çeşitliliğinin sağlanması için makul bir yaklaşım haline gelebilecektir. Ayrıca, teknoloji satın almakla transfer etmek arasında uzun ve zorlu bir süreç bulunduğu, karmaşık ve ileri bir teknoloji olan reaktör ve yakıt teknolojisine sahip olmak için gereken bilimsel, teknolojik, ve ekonomik gelişmişlik düzeyine sahip olmayan gelişmekte olan ülkelerde, bu alanda varolan sorunların sonuçlarının gelişmiş ülkelere oranla çok daha ağır yaşanacağı tartışmasız bir gerçektir. Ne teknolojik ne de ekonomik bağımsızlığı bulunmayan bir Ülkenin nükleer santral satın alarak enerji bağımsızlığına ne derece katkı sağlayabileceği ise tartışmaya açıktır. Bu bağlamda, nükleer araştırmalar alanında çalışan bilim insanlarına da, son derece önemli görev ve sorumluluklar düşmektedir. Gerçekte bu alanda çalışan bilim insanlarına düşen, nükleer enerjinin tıpta, endüstride ve araştırma alanında barışçıl kullanımının yanısıra nükleer enerjinin enerji karışımındaki katkısının devamını sağlayarak gelecekteki enerji probleminin çözümü için günümüz teknolojisinde

var olan sorunları bünyesinde barındırmayan yenilikçi nükleer güç teknolojilerin geliştirilmesi için çalışmak dışında; mevcut nükleer güç teknolojisine ilişkin doğru kararlar alınabilmesini sağlamak için herhangi bir psikolojik savunma mekanizması geliştirmeden sorunları dolaysız bir yaklaşımla doğrudan ele alarak ve nükleer enerjiye ilişkin ekonomik, teknolojik, siyasi ve etik sağlıklı değerlendirmelerin yapılabilmesi için nesnel ölçütleri ortaya koymak ve gereken bilimsel ve teknolojik bilgiyi eksiksiz sunarak kamuoyunun yanılmasını önlemektir

Kaynaklar

- [1] International Energy Agency, "Toward a Sustainable Energy Future", OECD/IEA, 2001.
- [2] Marcus, G. H. , " Considering The Next Generation of Nuclear Power Plants", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 37, No.1-4, 2000.
- [3] Mourougov, V. M., " Role of Nuclear energy For Sustainable Development", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 37, No.1-4, 2000.
- [4] Percebois, J., "The Peaceful Uses of Nuclear Energy: Technologies of the Front and Back-ends of the Fuel Cycle", *Energy Policy*, Vol. 31, 2003.
- [5] Romerio, F., " The Risks of the Nuclear Policies", *Energy Policy*, 26 83), 1998.
- [6] Sims R.E.H. at al "Carbon emission and mitigation cost comparison between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation", *Energy Policy*, Vol. 31, 2003.
- [7] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2002 .
- [8] European Commission, *Green Paper " Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply"*, European Communities, 2001.
- [9] Commission Staff Working Paper, Progress Report on the Response to the Green Paper " *Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply*", December 2000-October 2001, Commission of the European Communities, Brussels, 3.12.2001, SEC(2001).
- [10] *Final Report on the Green Paper " Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply"*, Commission of the European Communities, Brussels, 26.6.2002, COM(2002),321 Final.
- [11] Taylor D. M., " *Situation and Perspective for Nuclear Energy in Europe*", Paper given at conference celebrating 100th anniversary of birth of Enrico Fermi, held in Pisa, Italy, October 2001.
- [12] Taylor, D. M., " *Nuclear's Role in Europe's Energy Future*", Paper prepared for SMI conference on Nuclear Power in London, UK, January 2002.
- [13] De Esteban, F., " *The Future of Nuclear Energy in European Union*", Background paper for a speech made to a group of senior representatives from nuclear utilities in the context of a "European strategic exchange", brussels, May, 2002.





Şekil 1 IV. Kuşağa Doğru Nükleer Güç Reaktörlerinin Evrimi

Tablo 1	Çeşitli Tipte Reaktör ve Yakıt Çevrimlerinin Geliştirilmesine Yönelik Beklentiler [3]
----------------	---

Sistemin Tipi	Tam Ticari Kullanıma Sunulma Olasılığı	Ticari Kullanıma Sunulması İçin Tahmini Tarih
Küçük Boyutlu Reaktör Sistemleri:	Yüksek	2015
Elektrik Üretimi İçin	Yüksek	2015
Yerel Isıtma İçin	Yüksek	2015
Deniz Suyunun Tuzda Arındırılması İçin	Yüksek	2015
Hidrojen Üretimi Dahil Endüstriyel Isı İçin	Yüksek	2020
Yenilikçi Hızlı Reaktör Sistemleri	Yüksek	2020
Toryum tabanlı Yakıt Çevrimini Kullanan Filyon Reaktörleri	Yüksek	2020
Ergimiş Tuz Sistemleri	Orta	2020'den sonra
Hızlandırıcı Tahrikli Kritikaltı Sistemler	Orta	2020'den sonra
Füzyon Reaktörleri, Hibrid Füzyon Sistemleri	Hala Belirsiz	2050'den sonra

Tablo 2 Nükleer Enerjinin Dünyadaki Durumu [4].

Bölge	Kurulu Güç Kapasitesi (Birim Sayısı)	Kurulma Aşamasında Bulunan Kapasite (Birim Sayısı)	İsmarlanan Kapasite (Birim Sayısı)	Servis Dışı Bırakılan Kapasite (Birim Sayısı)	İptal Edilen Kapasite (Birim sayısı)
Kuzey Amerika ^a	113,043 MW (125)			12,254 MW (51)	151,175 MW (139)
Avrupa Birliği ^b	124,194 MW (146)			11,716 MW (48)	32,592 MW (40)
Avrupa Dışı Avrupa ^c	3709 MW (7)			8 MW (1)	3120 MW (4)
Doğu Avrupa ^d	15,077 MW (67)	19,455 MW (24)	2560 MW (4)	5260 MW (20)	48,301 MW (54)
Asya ^e	65,903 MW (92)	21,695 MW (27)	5267MW (9)	184 MW (3)	11,946 MW (13)
Diğer ^f	4713 MW (7)	1921 MW (2)			2063 MW (3)
Toplam	356,639 MW (443)	43,071 (53)	7827 MW (13)	29,422 MW (123)	249,197 MW (253)