

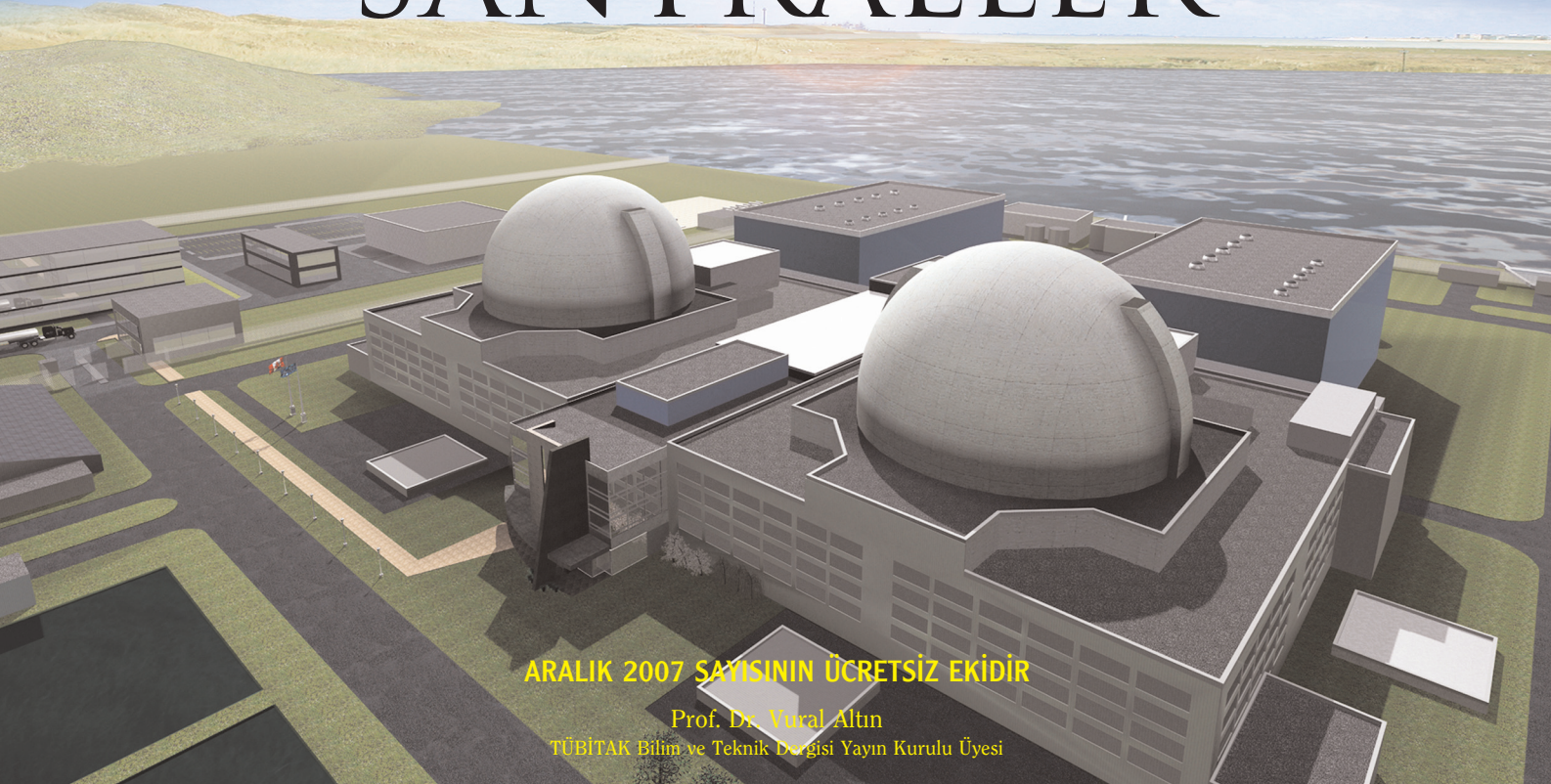
AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



TÜBİTAK

YENİ UFUKLAR 4. NESİL NÜKLEER SANTRALLER



ARALIK 2007 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

Prof. Dr. Vural Altın

TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi Yayın Kurulu Üyesi

NÜKLEER ENERJİNİN

Küresel enerji: 2006 yılı itibarıyla Dünya'nın 6,5 milyarı bulan nüfusu, 450 EJ enerji (1 EgzaJoule = 10^{18} Joule) tüketti. Bazı devletler ayrıntılı istatistik tutmadıklarından, bu rakamlar yaklaşık. 450 EJ enerji, petrolün kütleli enerji yoğunluğu kg başına 45 'milyon joule' (MJ) olarak alınırsa, 10 milyar ton petrole eşdeğer. Bu miktar enerji, yıl boyunca sabit hızla tüketildiği varsayılırsa, insanlığın 14 'trilyon watt' (TW) güç düzeyinde çalıştığına işaret ediyor. Dolayısıyla, kişi başına tüketim açısından dünya ortalaması 70 'milyar joule' (GJ) ve 2,2 kW güce karşılık geliyor. Yetişkin bir insanın metabolizması 120 W ısı güce sahip %15 verimle çalışan bir sistem oluşturduğuna ve örneğin otomobil motoru gibi tipik bir makina %25 kadar verimle çalıştığına göre; ortalama dünya insanı, emrinde 30 kadar 'insan eşdeğeri enerji robotu' çalıştırmakta. Yani, Dünya'daki fiziksel işlerin hemen tamamı, enerji makineleri tarafından yapılıyor ve bu açıdan, insan eşdeğeri 'etkin nüfus' 200 milyar civarında. Verimlilik oranı elektrikli motorlar için çok daha yüksek olduğundan, bu rakam aslında daha da büyük. Fakat, önemli olan şu ki; insanın fiziksel işlere mahkum olması, yapısına ve doğasına uygun olmadığı gibi, ekonomik açıdan da anlamsız bir durum.

Nitekim, toplam enerji tüketiminin %68'inden, dünya nüfusunun %15'ini

oluşturan gelişmiş ülkeler sorumlu. Kalan %32'si, %85 nüfus payına sahip bulunan gelişmekte olan ülkelere ait. Dolayısıyla, kişi başına ortalama tüketim, gelişmiş ülkelerde 250 GJ/yıl (7,9 kW). Diğerlerinde ise 25 GJ/yıl (0,8 kW) kadar. Bu dengesizlik nedeniyle, kişi başına çalıştırılan 'robot'ların sayısı, gelişmiş ülkelerin bazılarında 160'ı buluyor. Tek başına dünya enerji tüketiminin dörtte birinden sorumlu olan ABD, 200 milyarlık 'etkin nüfus'un 50 milyarını oluşturmakta. Enerjinin akılcı kullanımı açısından iyi bir örnek oluşturmamakla beraber, bu sayede o denli etkin...

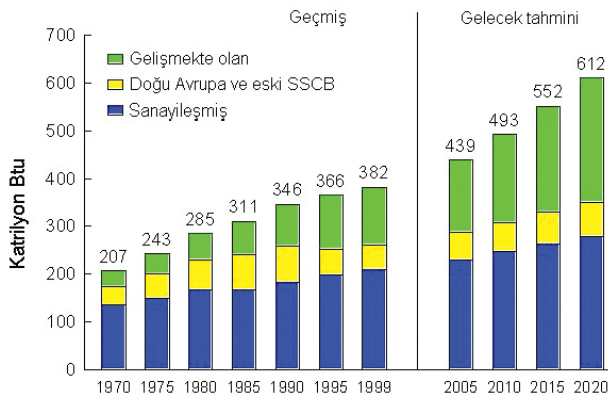
Öte yandan, tüketimin %80'ine yakını üç fosil yakıttan türetilmiş. Yani, insanlığın iş yapma yeteneğinin %80'i, petrol, kömür ve doğal gazla bağlı. Daha doğrusu, bu unsurların kütlece tamamına yakını oluşturulan, sadece iki atoma; karbon ve hidrojene dayalı. Fosil yakıt zıyafetinde, petrol %39 payla başı çekiyor. Kömür ve doğal gaz, yaklaşık %24'er payla petrolü izliyor. Tüketilen miktarlar, yaklaşık olarak; 4,9 'milyar ton' (Gt) kömür, 30 milyar varil (3,8 Gt) petrol ve 2,8 trilyon metreküp doğal gaz. Birincil enerji tüketiminin bileşiminde, yenilenebilir ve nükleer kaynaklar, %7,8 ve %6,5'lik paylarla, dördüncü ve beşinci sırada gelmekte.

Elektrik: Elektrik enerjisi 2006 yılı itibarıyla, toplam enerji tüketiminin %18'ini oluşturmuş. Birincil enerji ar-

zının üçte birinden fazlası elektrik üretiminde kullanılmış ve 3,64 'trilyon watt'lık (TW) kurulu güçle, 15 trilyon kWh üretim yapılmış. Bunun %70'i fosil yakıtlara dayalı. Dolayısıyla kişi başına dünya ortalamaları, yıl boyunca 560 W güç ve 2300 kWh tüketim düzeyinde. Fakat, elektriğin tüketimi, birincil enerji tüketiminden daha da dengesiz. Toplamın %80'i, dünya nüfusunun %15'ini oluşturan gelişmiş ülkelerin, kalan %20'si de, %85 nüfus payına sahip bulunan gelişmekte olan ülkelerin insanları tarafından tüketilmiş. Kişi başına yıllık tüketim, Batı Avrupa'da 9.000 ve ABD'de 12.000 kWh'a ulaşıyor. Petrol zengini olan Nijerya'da ise, sadece 113 kWh. Yani 13 wattlık bir ampulü yıl boyunca ayakta tutabilecek kadar. Dünyada halen 2 milyardan fazla insanın elektriğe ulaşımı yok. Bir o kadarı, gerilim kalitesi düşük ve kesintili güç imkanına sahip.

Gelecek tahminleri: Dünya nüfusunun 2030 yılına kadar, giderek azalan bir hızla artıp, 8,3 milyara ulaşması bekleniyor. Uluslararası Enerji Ajansı IEA'nın referans senaryosuna¹ göre, halenki enerji tüketim kalıpları hakiyetini sürdürecektir. Dünya ekonomisinin yılda ortalama %3 büyüdüğü ve buna paralel olarak, enerji yoğunluğunun tasarruflar aracılığıyla yılda %1 azaltıldığı varsayılacak olursa; dünya enerji talebi yılda %2 oranıyla büyüyecek ve 2015'e kadar toplam %30 arta-

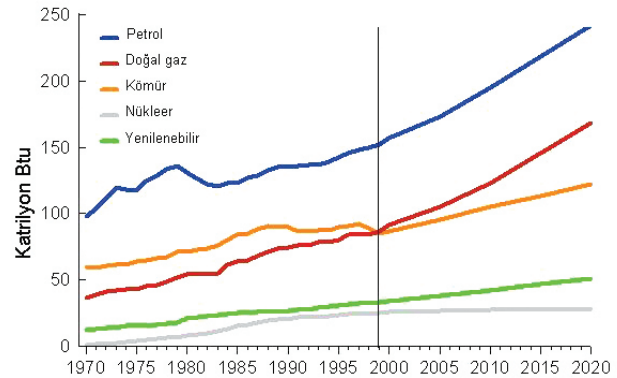
Dünya Enerji Tüketimi, bölgelere göre: 1970-2020



Kaynak: 'International Energy Outlook 2002', IEA

Şekil 1. (1 Btu = 1055 Joule)

Dünya Enerji Tüketimi, yakıt türüne göre: 1970-2020

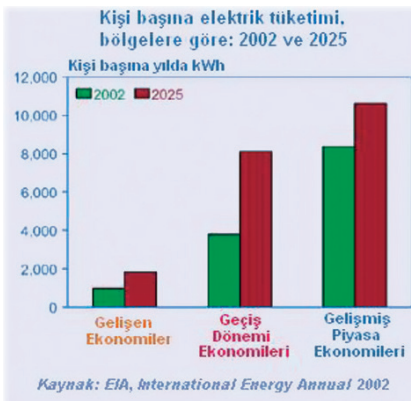


Kaynak: 'International Energy Outlook 2002', IEA

Şekil 2. (1 Btu = 1055 Joule)

KÜRESEL GEREKÇELERİ

rak, 13 milyar ton petrol eşdeğeri 590 EJ'a, 2030'a kadar da %68 artarak, 17 milyar ton petrol eşdeğeri 760 EJ'a ulaşacak. Bu artışın %70'ten fazlası, Asya, Afrika ve Latin Amerika'nın gelişmekte olan ülkelerinde, %30'u tek başına Çin'den gerçekleşecek. Bu ülkelerin ekonomileri ve nüfusları, OECD ülkeleri ortalamasından çok daha hızlı büyüyor. Dolayısıyla, küresel enerji talebinin ağırlık merkezi bu coğrafyalara doğru kaymakta. Bu ülkeler arasında en hızlı büyüyen Çin ve Hindistan, gelişmelerini görece bol, fakat düşük kaliteli olan yerli kömür rezervlerine dayandırmayı planlıyor.



Şekil 3

Elektrik, çok farklı amaçlarla kullanılabilen, son kullanımı temiz olan bir enerji formu. Bu sayede çok çeşitli iş imkanlarını beraberinde getiriyor. Bu yüzden, küresel talebi genel enerjiye oranla, özellikle gelişmekte olan ülkelerde daha hızlı artacak gibi görünmekte. Dolayısıyla, IEA tahminlerine göre; dünya elektrik tüketiminin, yılda ortalama %2,4 hızla artması ve 2030 yılına kadar ikiye katlanıp 30 trilyon kWh'a ulaşarak, birincil enerji tüketimi içerisindeki payını %22'ye çıkarması bekleniyor. O zaman dahi, 1,4 milyar insan hala elektriksiz olacak...

Mevcut eğilimlerin devam etmesi halinde, 2030 yılına kadarki tüketim artışının %83'ü fosil yakıtlara dayalı olarak gerçekleşecek ve bu yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı hafifçe artıp, %81'e çıkacak. Kömür tüketiminin yılda ortalama %2,5 hızla artması ve halen 4,9 Gt/yıl olan tüketim hızının,

2030'a kadar ikiye katlanarak, 9,8 Gt/yıl'ı bulması bekleniyor. Öngörülere göre, doğal gazın tüketim hızı biraz daha yavaş, yılda %2,4 artarak; 2015'te 3,8 trilyon ve 2030'da da 5,15 trilyon metreküpe ulaşacak. Petrolün tüketimi ise, yılda %1,6 ile, en düşük artış hızına sahip. 2015'te 98 varil/gün (4,5 Gt/yıl), 2030'da 118 varil/gün (5,5 Gt/yıl) değerlerine ulaşacak.

Kömür en bol kaynak olduğundan, görünür gelecek için fiyatında şaşırtıcı artışlar beklenmiyor. Fakat petrol fiyatları baskı altında...

Rezervler: Fosil yakıt kaynakları biyolojik kökenli. Milyonlarca yıllık süreçlerde oluştu. Yenilenebilir değil. Dolayısıyla, varlıklarının sınırlı olması gerekiyor. 1 Ocak 2006 itibarıyla, dünyanın mevcut teknolojilerle çıkartılabilecek olan 'bilinen rezervler'i, yaklaşık olarak; 908 milyar ton kömür, 160 milyar ton eşdeğeri 1,3 milyar varil 'alışıldık petrol' ve 173 trilyon metreküp doğal gaz.² Dünya üzerinde homojen dağılmış olmadıkları için; enerji kaynaklarının dörtte bire yakını, petrolün ise yarıdan fazlası uluslararası ticarete konu. Üç fosil yakıt, toplam enerji ticaretinin %90'ını oluşturmaktadır. Bu durum, enerji piyasalarının istikrarını ve temin güvenliğini, uluslararası ilişkilerin belirleyici etkenlerinden birisi haline getiriyor. Bu açıdan en önemli göstergelerden birisi; 'bilinen rezervler'in, halenki yıllık tüketim hızına oranı. Bu oran; kömür için 185, petrol için 42, doğal gaz için 62 yıl.³ Fakat, bu enerji yeterliliği göstergesi coğrafyalar arasında, gerginliklere yol açabilecek kadar büyük farklılıklar sergilemektedir.

Geçmiş saha deneyimlerine göre, geliştirilmiş bir petrol alanından sağlanan üretim, 'Hubbert zirvesi' denilen bir en yüksek değere ulaştıktan sonra, bir çan eğrisi oluşturacak şekilde azalıyor. Benzer bir davranış, dünya çapındaki petrol üretimi için de sözkonusu. Nitekim, en büyük petrol rezervleri 1960'lı yılların başlarında keşfedilmiş iken; o zamandan bu yana, yeni keşfedilen petrol yataklarının büyüklü-

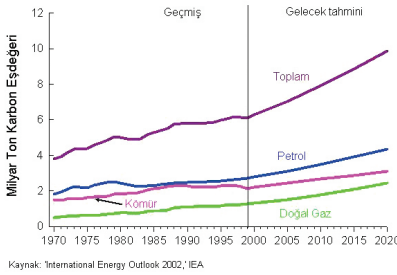
ğü giderek azalmakta. Bu keşifler yine de, daha küçük boyutlu olmalarına rağmen, rezervleri genişleterek, 'bilinen rezervlerin tüketim hızına oranı'nı, tüm zamanların en yüksek değeri olan 42'ye yükseltti. Fakat 1990'ların sonlarından beridir, her yıl keşfedilen yeni rezervlerin tutarı, yıllık tüketim hızının altında seyrediyor. Dolayısıyla, yakın gelecekte üretim grafiğinin yataylaşmasıyla sonuçlanacak olan bir üretim zirvesine şimdiden ulaşılmış olması olasılığı var.⁴ Nitekim, İskoçya'nın Kuzey Denizi alanlarındaki petrol üretimi, 1990'larda zirveye ulaştıktan sonra azalmaya başladı. Benzeri bir durum, dünyanın en büyük; örneğin Kuveyt'in Burgan, Meksika'nın Cantarell, Suudi Arabistan'ın Gavar gibi diğer bazı petrol sahaları için de sözkonusu. Çin, ülkedeki en büyük iki petrol sahasındaki üretimin azalacağını açıkladı. IEA'nın 2004 yılı küresel enerji manzarası değerlendirmesinde, dünyanın en fazla petrol üreten 48 ülkesinden 33'ünde üretimin azalmakta olduğu bildiriliyor. Hubbert eğrisinde, fizikteki potansiyel enerji eğrisinden farklı olarak; zirveye tırmanış, inişten daha kolay. Çünkü iniş sırasında, her yeni varilin çıkartılması giderek zorlaşmakta ve maliyet artmakta. Bu, sadece parasal terimlerle değil, aynı zamanda 'enerji maliyeti' açısından da böyle. Nitekim, 20. Yüzyıl'ın başlarında yapılan petrol keşiflerinde, her 100 varil petrolün aranıp bulunması ve çıkartılıp işlenmesi için, 1 varil petrol harcanıyordu. Yani 100:1'lik bir kazanç oranıyla çalışılıyordu. Bu oran 1920'lerde 50'ye indi. Halen 5 civarında olduğu tahmin edilmekte. Suudi petrol alanlarında 10...

Üretim zirvesi civarındaki yataylaşma sırasındaki talep artışları ancak, fiyatların sürekli olarak artmasıyla dengelenebilir. Halbuki, hızla büyüyen ulaştırma sektöründeki sıvı yakıtlar, hemen tümüyle petrol ürünlerine dayalı ve bu sektör fiyat artışlarına karşı duyarsız. Bu durumun mevcut arz kısıpları zorlaması kaçınılmaz. Dolayısıyla, petrol fiyatlarının, hem talebin yukarı çekişi, hem de artan maliyetle-

rin alttan itiş ile yükselmesinin beklenmesi gerekiyor. Üretim düşerken fiyatların yükselmesi; öte yandan, fiyat artışlarına karşı duyarsız davranan talebin artması, temin kalıplarındaki herhangi bir aksamanın şoka dönüşebileceğine işaret etmekte. Kısacası, petrol piyasaları kırılgan ve oynak...

Doğal gaz kendisini, başta güç üretimi alanında olmak üzere, görece temiz bir seçenek olarak kanıtladı. Üretiminin 2020'den sonra zirveye ulaşması bekleniyor. Yeni anlaşmalarda fiyatı petrole giderek daha ağırlıklı bir şekilde endekslediğinden, piyasası olgunlaştıkça, fiyatının petrol fiyatlarını daha yakından izlemesi kaçınılmaz görünüyor.

Dünyada Enerji Kaynaklı Karbon Emisyonları, yakıt türüne göre, 1970-2020



Şekil 4

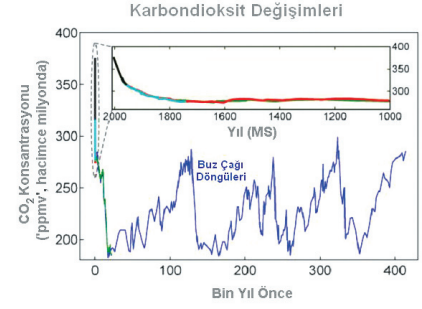
Bu iki yakıt üzerindeki baskıların hafifletilmesi amacıyla, görece bol olan kömürün sıvılaştırılması ve gazlaştırılması teknolojilerinin geliştirilmesi gündemde. Fakat bu işlemler büyük miktarda süreç ısı gerektirdiğinden, birincil enerji talebini daha da arttıracaklar. Öte yandan, yerleşim alanlarındaki hava kirliliğinin azaltılmasına yönelik olarak, hidrojene ulaşım sektörünün gelecekteki enerji taşıyıcısı gözüyle bakılıyor. Bu değerlendirme kamuoylarında seyrek olmayarak, hidrojenin 'yakıt' olduğu yanlışına yol açmakta. Halbuki, dünyamızda serbest hidrojen yok: Ya hidrokarbonlarda bağlı halde, ya da suyun bileşiminde yer alıyor. Hidrokarbonlar 'fosil yakıt' olarak zaten kullanılmakta. Suyun ise, hidrojenini ayırtmak için, enerji harcanarak parçalanması gerekiyor. Hidrojen yakıldığında tekrar su buharına dönüştüğüne göre, ortada suyla başlayıp suyla biten bir döngü söz konusudur. Böyle bir kapalı döngüden net enerji elde etmek mümkün değil. Hatta, çevrim kayıpları nedeniyle, elde edilecek olan hidrojenin içerdiğinden da-

ha fazla enerjinin harcanması kaçınılmaz. Dolayısıyla, hidrojenin doğada bulunan enerji kaynaklarından, ek bir enerji maliyeti ödenerek üretilmesi gerekmektedir. Bunun da, fosil dışı kaynaklar kullanılarak yapılması lazım. Çünkü, küresel ısınma endişeleri nedeniyle, fosil yakıt kullanımı, Kyoto Protokolü ve uzantıları doğrultusunda azaltmaya yönelik, giderek yoğunlaşmakta olan uluslararası çabalar var.

Emisyonlar: Saf karbonun yakılan her gramı, 3,7 gram karbondioksit üretiyor. 2006 yılında fosil yakıt kullanımı nedeniyle atmosfere, 7,3 milyar ton karbon eşdeğeri 27 milyar ton karbondioksit salındı. IEA'nın görece muhafazakar tahminlerine göre, bu eğilim yılda %1,7 oranında artarak devam edecek ve emisyon miktarı 2015 yılında 33, 2030 yılında 40 milyar tona ulaşacak.

Dünya'nın ısıma gücünün, ortalama yüzey sıcaklığının dördüncü katıyla orantılı olması (σT^4), iklimte, davranışı kolay değişmeyen gürbüz bir yapı kazandırmakta. Fakat, atmosferin opaklığındaki değişimlerin, yüzey sıcaklığındaki salınımların genişliğinde önemli değişikliklere yol açması olasılığı var. Dolayısıyla, insanın doğal karbon döngüsüne %1 kadar olduğu tahmin edilen görece sınırlı katkısının, doğal dengeleri insan hayatını olumsuz şekilde etkileyecek yönde değiştirmesi mümkün.

Nitekim, 'sera gazı etkisi'nin ana göstergesi olarak kullanılan 'atmosferdeki karbondioksit yoğunluğu'nun



Şekil 5

geçmiş değerleri, Antarktika'da yapılan EPICA ve Vostok buzul kayıt incelemelerinde, dolaylı yöntemlerle ölçüldü. Sonuçlar bu değer, geçmiş 400.000 yıl boyunca, 'hacimce milyondalık oran' (ppmv) olarak, 220 ile 280 arasında değiştiğini gösteriyor. Halbuki bu oran şimdi, son 650.000 yılın en yüksek değeri olan 380 ppmv'ye ulaşmış durumda. Uluslararası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) çalışmaları, hakim eğilimlerin devam etmesi halinde, sözkonusu değerin 20-30 yıl içinde 450 ppmv'yi aşarak, ortalama küresel sıcaklığın yüzyılın sonuna kadar 3.6 °C artmasına yol açacağına işaret ediyor. Dolayısıyla, bu artışı 445 ppmv değerinde durdurmak amacıyla; arazi kullanım kalıplarının ve tarım uygulamalarının değiştirilmesi, bunun yanında, başta güç üretiminden kaynaklanan bileşen olmak üzere, fosil yakıt emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir. Bu hedefin 2030 yılı itibarıyla, dünya gayrisafi iç hasılasının %3'üne mal olacağı sanılıyor.⁵

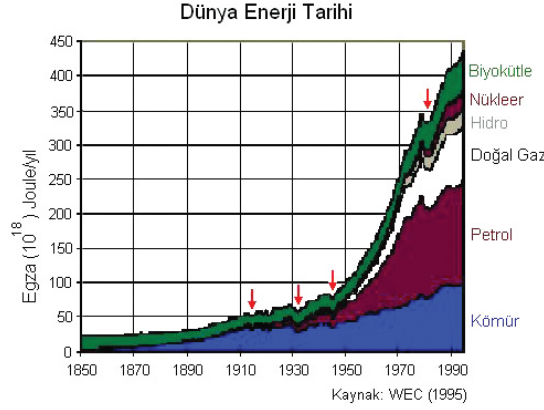
Emisyonları azaltma stratejisinin önemli bir parçası, kömürü temiz yak-

Tablo 1.

Kaynak	Enerji yoğunluğu, Q	Birim	% karbon	CO ₂
Hidrojen	121	MJ/kg	0	
Ham petrol	45-46	MJ/kg	89	70-73 g/MJ
LPG	49	MJ/kg	81	59 g/MJ
Doğal gaz	39	MJ/m ³	76	51 g/MJ
Kömür:	Antrasit	32.5	67	90 g/MJ
	Bitümlü	24		
	Linyit	14-19		
Odun (kuru)	16	MJ/kg	42	94 g/MJ
Nükleer fizyon (U235)	90.000.000	MJ/kg		

ma ve karbondioksit yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi. Fakat, herhangi bir enerji kaynağının çevre etkisini azaltmaya yönelik her çaba, beraberinde, o yakıttan sağlanan enerji kazancını azaltan ve dolayısıyla kullanılan miktarını arttıran ek bir maliyet getirmekte. Dolayısıyla, bu teknolojilerin; ucuz ve fakat düşük kaliteli kömür rezervlerini kullanmakta kararlı görünen gelişmekte olan ülkeler tarafından pahalı bulunmaları ve bu gerekçeyle, en fazla ihtiyaç duyulduğu coğrafyalarda yaygın şekilde kullanılmamaları olasılığı var. Sonuç olarak, IPCC hedefinin enerji bileşeni, alternatif enerji kaynaklarının daha büyük oranda devreye sokulmasını gerektiriyor.

Yenilenebilir kaynaklar: Yenilenebilir enerji kaynaklarının ortak bir özelliği, dağınık olmaları ve taşıdıkları enerji yoğunluklarının, fosil yakıtlarınkilere oranla çok düşük olması. Bu yüzden, büyük ölçekli ‘yoğun’ üretim birimleri olarak çalışan fosil yakıt santrallerinin işlevini üstlenebilmeleri için; hidro hariç, büyük sayılarla kurulmaları gerekli ve mevcut şebeke yönetim araçlarının henüz alışıksız olmadığı bir şekilde, ‘dağıtık’ güç üretmeleri kaçınılmaz. İlgili enerji yoğunluklarından bazıları Tablo 1’de veriliyor. 1000 MWe gücündeki örnek bir santral için kıyaslamalı gereksinimler de Tablo 2’de...



Şekil 6

Bu kaynakların en yaygın olanı jeotermal. Fakat, elektrik üretimine elverişli düzeyde yüksek sıcaklıklar görece seyrek. Rüzgar gücü değişken, güneşinki ise kesintili. Buna rağmen, artan fosil yakıt fiyatları, bu iki kaynağın güç sektöründe rekabet edebilir hale gelmesini sağladı. Gerçekten de, şebekeye bağlı olarak rüzgar ve güneş enerjisine dayalı elektrik üretimi, düşük bir düzeyden başlamış olmakla birlikte, hızla büyüyor. Rüzgar halen, dünya genelinde 40 ‘milyar watt’ (GW) kurulu güce sahip. Uygulamada başarılı olan tipik kapasite kullanım faktörleri; rüzgar için %30 civarında, güneş (fotovoltaik) için ise %20’nin altında. Bu durum her iki kaynağın da; ya dış maliyetlerini arttıran bir şekilde yedek sistemlerle, ya da halen küçük ölçekte pahalı olan, büyük ölçekte ise henüz var olmayan depolama teknolojileriyle desteklenmelerini gerektiriyor.

Hidro ve şebekeye bağlı diğer yenilenebilir kaynaklardan yapılan elektrik üretimi, doğal gaz ve kömürüne yakın bir hızla, yılda %2,4 büyümekte. Bu artış hızının devam edeceği ve yenilenebilir kaynakların birincil enerji arzındaki payının, şimdiki %8’den, 2030 yılında %9’a çıkacağı sanılıyor. Bu artışın büyük bir kısmı, Çin ve Hindistan gibi, OECD dışı ülkelerde gerçekleşecek. OECD ülkelerinde ise, hidroelektrik kapasite zaten halen büyük oranda geliştirilmiş olduğundan, asıl vurgu; rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle üzerinde. Hedeflenen büyüme hızı %3,3.

Biyoyakıtlar, başta ulaşım sektörü olmak üzere, önemli katkılarda bulunacak potansiyele sahipler. Şimdiden, taşımacılıktaki yakıt tüketiminin %1’ini sağlıyorlar ve bu payın, 2030 yılında %4’e ve hatta, IEA’nın alternatif senaryosuna göre %7’ye ulaşması mümkün. Etanolün üretim maliyetlerinin, biyodizelinkinden daha hızlı düşmesi olası görülüyor. Fakat her iki ürün de, tarım ve otlak alanlarıyla rekabet halinde. Dolayısıyla, %7 hedefi, yeni üretim teknolojilerinin geliştirilmesini veya beslenme alışkanlıklarının ciddi şekilde değiştirilmesini gerektirmekte.

Geçiş dönemi: Bilim, teknoloji ve refah alanındaki tüm çarpıcı başarılarıyla birlikte 20. Yüzyıl medeniyeti, fosil yakıtlar üzerine inşa edildi. Tüketimlerdeki düzenli büyüme, aralıklı inişlerle birlikte, yandaki şekilde görülmekte. Neredeyse 20. Yüzyıl’ın tarihini, bu görece eski grafikten okumak mümkün. Kırmızı oklardan en soldaki birincisi, I. Dünya Savaşı’na karşılık gelen iniş işaret ediyor. İkincisi, dünya ekonomisinde 1929 yılında patlak veren ‘Büyük Bunalım’ı izleyen düşüşe denk gelmekte. Üçüncüsü II. Dünya Savaşı’na karşılık geliyor. 1973 Orta Doğu Savaşı civarında küçük bir iniş daha var. Bunun ardından; 1979 İran Devrimi’yle başlayıp, İran-İrak Savaşı’yla devam eden ‘Petrol Şoku’ geliyor.

Geçen yüzyıldaki her zor dönem, küresel enerji kullanımında bir azalmaya yol açmış. Dolayısıyla, bu gözlemin tersinin de geçerli olduğunu varsaymak ve gelecekte, küresel enerji temin sistemlerinde yaşanacak aksama-

Tablo 2.

Kaynak	1000 MWe güç için gereksinim
Kömür (30MJ/kg)	100 kg/s → 2.4 Mt/y ^a
Doğal gaz (39 MJ/m ³)	77 m ³ /s → 1.8 Mm ³ /y ^a
Petrol (45 MJ/kg)	66 kg/s → 1.6 Mt/y ^a
Hidro (980 J/kg) ^b	1000 t/s ^b
Rüzgar (60 J/m ³) ^c	24 Mm ³ /s → 20 m kanatlı yaklaşık 4000 türbin ^d
Güneş (1kW/m ²)	33 km ² panel ^e
Doğal uranyum	3.9 g/s → 92.2 t/y ^f

^a 1/3 ısı verim ve %75 kapasite kullanım faktörü varsayımıyla.

^b 100 m düşüş ve %100 çevrimi verimi varsayımıyla.

^c 30 km/h rüzgar hızı varsayımıyla.

^d %25 kapasite kullanım faktörü ve %100 çevrim verimi varsayımıyla.

^e 15% güneşlenme faktörü ve %20 çevrim verimi varsayımıyla.

^f 1/3 ısı verim, %75 kapasite kullanım faktörü ve U-238’den 1/3 oranında katkı varsayımıyla.

ların, insanlık tarihinin en karanlık dönemlerine eşlik etmesinin beklenmesi gerekir. Dünya fosil yakıtlara geçen yüzyılda olduğu düzeyde bağımlı olmaya devam ettiği ve geliştiği ya da geç kaçınılmaz olan Hubbert zirvesine geçeceğinden erken ulaşıldığı takdirde; üretimin yataylaşmasından sonraki aşama, kronik bir aksamaya eşdeğer sürekli bir iniş süreci oluşturacağına göre; benzeri tarih sayfalarının, çan eğrisinin iniş tarafında olağan durum haline gelmesi büyük olasılık.

Kısacası; fosil yakıtlar, 20. Yüzyıl'da Dünya genelinde başarılan ekonomik gelişmenin temelini oluşturdular. Görece yüksek enerji yoğunlukları, hızlı enerji akışlarını ve dolayısıyla yüksek güç düzeylerini mümkün kıldılar. Dünya bu sayede; hızla gelişip, büyük mesafe kaydetti. Fakat tüketilme hızlarının artık, gelecek nesillere karşı sorumluluk kapsamında; hem küresel ısınma sorununun ağırlaşmaması, hem de yeterlilik sürelerini uzatacak şekilde tasarruflu kullanılmalarının sağlanması için azaltılması gerekiyor. Bu amaçla, yenilenebilir enerji kaynaklarından daha üst düzeyde yararlanılacak. Fakat, yenilenebilir enerji kaynaklarının, mevcut teknolojilerle kitleler için gereksinimlerine yanıt verilebilme ve fosil yakıtlar üzerine inşa edilmiş olan yaşam biçimlerini ayakta tutabilme yeteneği şimdilik yok gibi görünüyor. Fosil yakıtların yerine büyük oranda kullanılabilirliği; ya ekonomilerin büyüme hızlarının 'sürdürülebilir' düzeylere indirilmesini, ya da çevrim verimlerinin arttırılıp, büyük ölçekli depolama tekniklerinin hızla geliştirilmesini gerektirmekte. Dolayısıyla, dünyamız halen enerji konusunda; fosil yakıt bileşeninin aşırı tüketiminden kaynaklanan çevre hasarı ve makul fiyatlarla enerji temin edebilme güvencesine sahip olamamak gibi iki tehditte birden, aynı anda karşı karşıya. Hakim yaşam biçimlerinde ve gelecekte beklentilerde önemli bir değişiklik olmadığı takdirde, yenilenebilir enerji kaynaklarının, daha yoğun enerji kaynaklarıyla desteklenmeleri gerekli. Nükleer enerji karşımıza bu bağlamda, seçenek olmaktan da öte, bir zorunluluk olarak çıkıyor.

Nükleer: 1980'lerden bu yana eklenmiş olan kapasitenin küçüklüğüne rağmen, nükleer enerji, dünyanın sü-

rekli artagelen birincil enerji arz sistemindeki %6,5'lik payını korudu. Bu, reaktörlerin yönetim tekniklerinin ve güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi sayesinde mümkün oldu. Örneğin ABD'deki nükleer santrallerin 1980 yılında %56,3 olan ortalama kapasite kullanım faktörü, 1990'da %66'ya, 2006'da %89,6'ya çıktı. Nükleer enerji halen, 369 GWe kurulu kapasite ile, yılda 2,5 trilyon kWh elektrik üretiyor ve dünya genelinde %68 kapasite kullanım faktörüyle çalışıyor.

Nükleer enerji yatırımlarının, doğalgaz veya kömür santrallerinden iki önemli farkı var: İlk yatırım maliyetinin yüksek, inşaat süresinin uzun olması. Nükleer santrallerde kW başına kapasite kuruluş maliyeti 2500-3000 ABD dolarını bulurken, bu rakam doğalgaz santralleri için 800-1000 dolar civarında. Sonuç olarak, nükleer enerji üretiminde, birim üretim maliyetinin %80 kadarı ilk yatırımlardan, kalanı yakıt ve işletme masraflarından oluşur. Doğalgaz veya kömür santralleri için bu oranlar, yaklaşık olarak tam tersinedir. Öte yandan, doğalgaz santralleri 1-2 yıl içinde kurulabilirken, bir nükleer santralin inşası asgari 4-5 yıl alır. Dolayısıyla, bir nükleer santral yatırımının getirisi, uzunca bir süreye yaygın büyük bir ilk yatırım sürecinin ardından başlar. Nükleer enerji bu yüzden, geçmişte daha ziyade sermaye zengini ülkelerin harcı olmuştur. İşletmenin ilk 5 yılında, amortisman bedelleri gelir akışından düşüldüğünden, birim üretim maliyeti yüksek görünür; sonra hızla düşer. Bu nedenle, nükleer enerjinin maliyeti yüksek gösterilmek istendiğinde, bu ilk 5 yıllık maliyetler kullanılır. Halbuki, gerçekçi bir değerlendirme için, projenin tüm ömrüne yönelik bir 'yaşam döngüsü maliyeti' hesabının dikkate alınması gerekir. Bu hesap ise, paranın zaman değeri nedeniyle; inşaat süresine ve paraya biçilen yıllık asgari paha anlamına gelen 'iskonto haddi'ne karşı çok duyarlıdır. Bu ikincisini piyasalar belirler, fakat ikincisi kontrol edilebilir bir değişkendir. İnşaat öngörülen sürede tamamlandığı takdirde, proje umulanı verir. Aksi halde, evdeki hesap alt üst olur ve muhasebenin rengi kırmızıya kayar. Bu nedenle, nükleer santral projelerinin önceden en ince ayrıntısına kadar

özenle planlanıp, ilk adımların kararlılıkla atılması ve inşaatı bir kez başlandıktan sonra hızla tamamlanması, ondan sonra da santralin yüksek kapasite faktörüyle kullanılabilirliği gerekir.

Öte yandan, elektrik üretiminde, gün boyunca sürediginden ve 'temel yük' düzeyi denilen asgari talep, yakıtı ucuz olan ve sürekli çalıştırılan santrallerle karşılanır. Bu düzeyin üzerindeki talep salınımları, yani 'zirve yük' için ise; talep düzeyindeki değişimleri izleyebilen ve devreye çabuk sokulup çıkartılabilen, buna karşılık yakıtı görece pahalı olabilen santraller kullanılır. Dolayısıyla, yakıt maliyetleri görece düşük olan nükleer santraller, temel yük gereksinimlerine karşılık vermeye uygunlar. Düşük kapasite faktörleriyle çalışan yenilenebilir güç kaynaklarını, nükleer kapasiteyi genişleterek desteklemek akla yatkın bir strateji. Özellikle, 2030 yılındaki birincil enerji arzının yarıya yakınının elektrik üretimi amacıyla kullanılacağı beklentisi göz önünde bulundurulursa, neredeyse zorunlu da...

Fakat, EIA tahminlerine göre 2030 yılında, kurulu nükleer güç 438 GWe olacak. Üretim ise 3,3 trilyon kWh'a ulaşarak, birincil enerji kaynakları içindeki %6,5'lik payını koruyacak. IEA'nın 'alternatif senaryo'su daha yüksek, 519 GWe kurulu güç ve birincil enerji payında hafif bir artış öngörüyor. Bu ikinci senaryonun gerçekleşmesi, kamoyunun nükleer teknolojiyle ilgili endişelerinin giderilebilmesine bağlı. Gerçi kamuoyunun nükleer enerjiyi algılayış biçimi gelecekte, önemli oranda değişecek gibi görünüyor. Fakat, bu arada ciddi bazı enerji yetersizliği sorunlarının yaşanması mümkün. Ondan sonra dahi, nükleer enerjinin, kendisinden beklenen ek talepleri karşılayıp karşılayamayacağı henüz belli değil. Bunu, IV. Nesil nükleer reaktör tasarımlarının başarısı belirleyecek.

Dipnotlar:

1 International Energy Outlook 2006, June 2006, DOE/EIA-0484(2006).

1 "Worldwide Look at Reserves and Production," Oil & Gas Journal, Vol. 103, No. 47 (December 19, 2005), pp. 24-25.

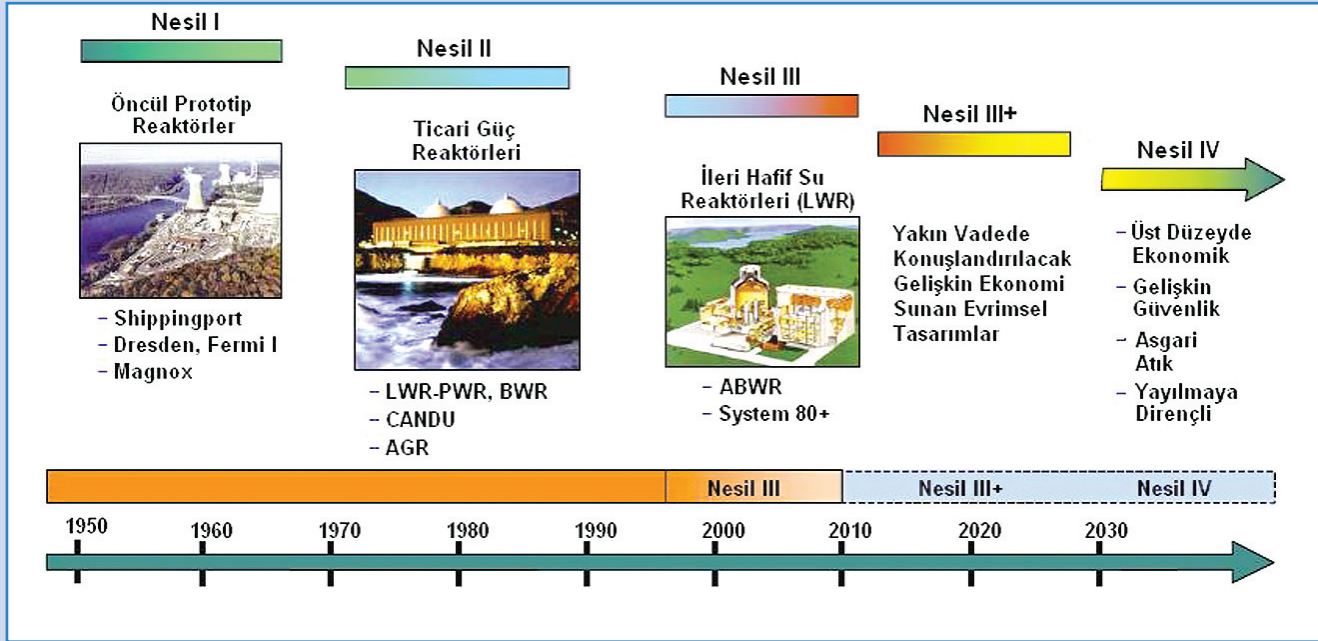
3 Aynı yazıda.

4 C.J. Campbell, J.H. Laherrère, The End of Cheap Oil, Scientific American, March 1998.

5 Working Group III contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.

6 EIA, <http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/analysis/nuclearpower.html>

IV. NESİL YOL HARİTASI: NÜKLEER REAKTÖR TASARIM STRATEJİLERİ



Bu yazıda IV. Nesil nükleer reaktörlerin tasarım kriterleri, fisil ve doğurgan çekirdeklerin bilinen nükleer özelliklerinin ışığı altında inceleniyor. Kriterlerin çelişen doğası, kaçınılmaz olarak yol açtığı tasarımların çokluğuyla birlikte irdeleniyor. Sistemlerin seçilme yöntemi gözden geçirilmekte ve geliştirilmeye aday olarak seçilen tasarımlar, farklı kriterlere hizmet potansiyelleri açısından değerlendirilerek, gerçekleştirilmeleri yönündeki zorlukların ve araştırma güçlüklerinin açıklığa kavuşturulmasına çalışılmaktadır.

Reaktör nesilleri: 1950 ve 60'lı yıllarda öncü prototipler olarak inşa edilen ilk reaktörler I. Nesil olarak anılmakta. İkinci nesil üniteler 1970'lerde, halen çalışmakta olan ticari güç santrallerinin bileşenleri olarak inşa edildiler. III. Nesil 1990'lı yıllarda, güvenlik ve ekonomi açısından anlamlı iyileştirmeler sunan evrimsel bazı tasarım özellikleriyle donatılmış olarak geliştirildiler. Bunlardan bazıları özellikle Doğu Asya'da

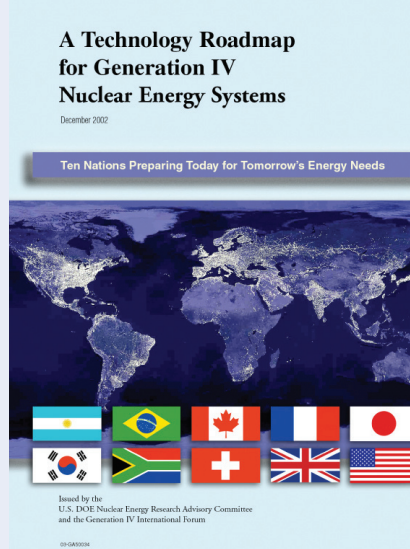
inşa edilmiş durumda ve geliştirilmeleri yönünde devam eden çalışmalar, 'yakın zamanda devreye sokulabilir' nitelikteki, III+ Nesil denilen tasarımlara yol açtı. 2030 yılına kadar inşa edilecek olan yeni santraller büyük olasılıkla bu tasarımlar arasından seçilecek. Bu yelpazedeki gelişmeler çoğunlukla, nükleer enerjinin küresel enerji karışımında halen üstlenmiş olduğu paya hizmet amacına yönelikti. Fakat, halenki enerji tüketim kalıplarının sürdürülebilirliği, giderek artan bir güçle sorgulanmakta. IV. Nesil reaktör tasarımları, bu soruların bir ürünü.

Nasıl ki düşük yoğunluklu enerji kaynakları, güç üretiminde daha büyük zorluklara karşılık güvenlik vaa-dinde bulunuyorsa, yüksek yoğunluklu enerji kaynaklarıyla çalışmak da, başta, zor koşullar altında çalışmak zorunda kalan malzemelerin dayanıklılık ve güvenilirliği olmak üzere, kendi özgün sorunlarına sahip. Bu ve diğer alanlarda yapılması gereken araştırmalar, geçen 20-30 yıl boyunca,

nükleer enerji sektöründe yaşanan durgunluk nedeniyle aksadı. Ancak şimdi, görece yakın bir gelişme olan IV. Nesil tasarımlarının kapsamı çerçevesinde ele alınacaklar. Nükleer endüstrinin yeni gelişen enerji ihtiyaçlarına uyum sağlaması, daha küçük üretim birimleriyle yerel ihtiyaçlara yanıt verebilir hale gelerek, yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtık olması zorunlu olan üretim ağlarında destek rolü üstlenebilmesi, zaman ve araştırma gerektiriyor. Bu karmaşık sorunla başa çıkmak amacıyla, ABD liderliğindeki 10 ülke geleceğin IV. Nesil olarak bilinen nükleer enerji sistemleri üzerinde araştırmalar konusunda işbirliğine yönelik bir çerçeve üzerinde anlaştılar. IV. Nesil bir nükleer enerji sistemi, çevre ile tüm etkileşimlerini kapsayacak biçimde tanımlanır. Dolayısıyla, nükleer reaktör ve enerji dönüştürme bileşenlerinin yanında, cevherin eldesinden atığın nihai depolanmasına kadar, yakıt döngüsü için gereken tüm tesisleri de içermektedir.

IV. NESİL KİSTASLARI

Bu kapsamlı araştırma programını yönetmek üzere 100'den fazla uzmanın katılımıyla bir teknik ekip oluşturuldu. İlk adımda, alternatif sistemleri değerlendirmek için bir 'Değerlendirme Yöntemi Grubu' kuruldu. Önce nükleer enerjiden genel beklentiler, 'hedef alanları' ve her alandaki araştırma gereksinimleri, 'hedef'ler olarak belirlendi. Bu süreci nükleer enerji sistemlerinin görünürdeki geliştirilmeye muhtaç, bir bakıma zaaflı oluşturan yönleri yönlendirdi. Birinci hedef alanı, "şimdi-ki nesillerin ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin toplumsal ihtiyaçları karşılama yeteneğini zaaflı uğratmamasının ve geleceğin belirsiz derinliklerine kadar arttırmak suretiyle karşılama yeteneği" şeklinde tanımlanan 'sürdürülebilirlik' oldu. Bu, tüm enerji sistemlerine yönelik genel bir beklenti; çünkü toplumda enerjinin, sürdürülebilirlik ilkelerine göre üretilmesine yönelik giderek artan bir istek var. Bu ilkeler; doğal kaynakların ve çevrenin korunmasını, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinin zaaflı uğratılmamasını ve üzerlerine gereksiz külfetler yüklenmemesini şart koyuyor. Halen çalışan ve gelecekte kurulacak olan nükleer güç santralleri, uygulanan yüksek güvenlik standartları sayesinde ve yanma süreçlerine dayanmaksızın enerji ürettiklerinden dolayı, olağan çalışma koşulları altında iyi bir çevre icraatına sahipler. Fakat, ürettikleri radyoaktif atıklar kamuoyu tarafından ciddi bir çevre tehdidi ve gelecek nesiller üzerinde haksız bir yük olarak algılanmakta. Öte yandan, yakıt yeterliliğinin uzun süreler için güvence altına alınması ve nükleer reaktörlerin daha geniş kapsamlı enerji gereksinimlerine hizmet edebilme yeteneğinin geliştirilmesi gerekiyor. Bu sürdürülebilirlik düşünceleri, ağırlıklı olarak yakıt dönüşünün ön ve arka cepheyle ilgili. Dolayısıyla, sürdürülebilirlik alanında; 'kaynak kullanımı' ile, 'atığın azaltılması ve yönetimi' olmak üzere iki hedef belirlendi. Bu



iki hedef; yakıtın etkin kullanımı, geliştirilmiş atık yönetimi ve çevre etkilerinin en aza indirgenmesine yönelik bütünleşik gereksinimleri kapsıyor ve nükleer enerjinin salt elektrik üretiminin ötesindeki yararlarını arttıracak olan yeni enerji ürünlerinin geliştirilmesinin yolunu açıyor.

Nükleer enerjinin bir diğer zaaflı, geçmişteki ekonomik sicilinin karışık olması. Gelecekte rekabete karşı

dayanıklı olabilmesi için, alternatiflerine göre açık maliyet avantajlarına sahip olması lazım. Sermaye yoğun bir seçenek olması itibarıyla, böyle bir avantajı edinebilmesi; hem yatırımların gecelik maliyetlerinin, hem de başlangıç yatırımının görece uzun olan inşaat süresi boyunca karşılaştığı riskin azaltılmasına bağlı. Dolayısıyla, 'ekonomi' ikinci hedef alanı olarak seçilirken, 'yaşam döngüsü maliyeti' ve 'sermaye riski', bu alandaki teknoloji hedefleri olarak belirlendi.

Halen 12.000 reaktör yılına varan işletme deneyimi, genel olarak iyi bir güvenlik kaydı sergilemekte. Ciddi kaza olasılıkları, alternatif teknolojilere oranla çok daha düşük. Fakat bu özellik, bir ayrıcalık olmaktan ziyade, zorunluluk. Çünkü, sanayi süreçlerinin çoğu, ürettikleri zarar potansiyeli taşıyan unsurları çevreye sürekli olarak saldıklarından, çevre üzerinde zamana yaygın ve fakat düşük genlikli bir negatif etkiye sahipler. Halbuki bir nükleer santral, olağan işletme sırasında çevreye hemen herhangi bir şey yaymazken, ürettiği

4 Hedef Alanı	8 Hedef	15 Kıstas	24 Ölçü
Sürdürülebilirlik	SU1: Kaynak kullanımı	SU1-1: Yakıt kullanımı	Yakıt kaynaklarının kullanımı
	SU2: Atığın azaltılması ve yönetimi	SU2-1: Atığın azaltılması	- Atık kütlesi - Hacmi - Isı yükü - Radyoaktif zehirlenme
Ekonomi	EC1: Yaşam döngüsü maliyeti	EC1-1: Gecelik inşaat maliyetleri	Gecelik inşaat maliyetleri
	EC2: Sermaye riski	EC2-1: Üretim maliyetleri	Üretim maliyetleri
Güvenlik ve Güvenilirlik	SR1: İşletme güvenliği ve güvenilirliği	EC2-1: İnşaat süresi	İnşaat süresi
	SR2: Kalp hasarı	EC1-1: Gecelik inşaat maliyetleri	Gecelik inşaat maliyetleri
Yayımla Direnci ve Fiziksel Koruma	SR3: Saha dışı acil durum yanıtı	SR1-1: Güvenilirlik	Zorunlu hizmet dışı kalma sıklığı
		SR1-2: İşçi/halk- olağan dozu	Olağan dozlar
		SR1-3: İşçi/halk kaza dozu	Kaza dozları
		SR2-1: Gürbüz güvenlik özellikleri	- Güvenilir reaktivite kontrolü - Güvenilir bozunma ısısı nakli
		SR2-2: İyi tanımlanmış modeller	- Baskın olay- belirsizlik - Uzun yakıt ısısal yanıt süresi - Bütünleşik deneylerin ölçeklendirilebilirliği
		SR3-1: İyi tanımlanmış kaynak terimi/enerji	Kaynak terimi
		SR3-2: Gürbüz hafifletme özellikleri	- Enerji yayma mekanizması - Uzun sistem zaman sabitleri - Uzun süreli ve etkin gecikme
	PR1: Yayımla Direnci ve Fiziksel Koruma	PR1-1: Saptırmaya ve beyan dışı imalata yatkınlık	- Ayrıştırılmış malzeme - Kullanılmış yakıt özellikleri
		PR1-2: Tesislerin zedelenilebilirliği	Pasif güvenlik özellikleri

zarar potansiyeli taşıyan unsurları, radyoaktivite envanteri olarak kalbinde biriktiriyor olur. Dolayısıyla, ciddi bir kazanın yer alma olasılığı oransız derecede düşük olmakla birlikte, bu düşük olasılık gerçekleştiği takdirde, böyle bir kazanın olası etkisi, keza oransız derecede büyüktür. Kamunun ve elektrik üretim şirketlerinin nükleer santral güvenliğini algılayışı bu nokta üzerinde odaklanmış halde ve bu durum, halen düşük olan ciddi kaza olasılıklarının daha da azaltılmasını zorunlu kılmakta. Bu nedenle, 'güvenlik ve güvenilirlik' üçüncü hedef alanı olarak ortaya çıktı. Alan hedefleri: 'İşletme güvenliği ve güvenilirliği', 'kalp hasarı', 'saha dışı acil durum önlemleri.'

Son olarak, nükleer silah edinme yeteneğinin nükleer enerjinin sivil kullanımı aracılığıyla yaygınlaşması olasılığının uluslararası ana kaygılardan birini oluşturması, 'yayılma direnci ve fiziksel koruma'nın dördüncü hedef alanı olması gerektiğine işaret ediyordu. Bu alanın, aynı başlık altında tek bir hedefi var.

Özet olarak, nükleer enerjiden genel beklentiler 'hedef alanları' olarak listelendi. Yani: 'Sürdürülebilirlik', 'ekonomi', 'güvenlik ve güvenilirlik', 'yayılma direnci ve fiziksel koruma'. Her alandaki teknoloji güçlükleri 'hedef' olarak tanımlandı. Bu aşamada tüm dünyaya, bu hedeflerin bazılarını veya tümünü karşılayabileceğine inanılan nükleer enerji sistemleriyle ilgili önerilerin iletilmesi çağrısında bulunuldu. Bir düzineye yakın ülkeden 100'e yakın tasarım geldi. Her hedef için, icraat göstergesi olarak, bir veya daha fazla sayıda 'ölçüt' belirlendi. Herhangi bir hedefin birden fazla kıstası olması halinde, kıstaslara, hedefin tatminine yönelik bir tartım yapabilmek üzere ağırlıklar atandı. Her kıstas için, bu kıstasa göre icraatı değerlendirmek amacıyla, 'ölçek' denilen bir derecelendirme yapıldı. Bazı kıstaslar için, her birinin olası tatmin edilme düzeyini temsil eden sayısal 'ölçü'ler oluşturuldu. Ölçüler, temsili bir ileri hafif su reaktörünün temel icraat çizgisine göre saptandı. Hedef alanları, hedefler, kıstaslar ve ölçekler listesi aşağıdaki tablodaki gibi.

SEÇİM SÜRECİ

Daha sonra; su, gaz, sıvı metal soğutmalı ve sıradışı reaktör tasarımlarını kapsayacak şekilde, önerilen sistemleri gözden geçirip yeterliliklerini, 'değerlendirme yöntemleri grubu' tarafından geliştirilmiş olan eleme araçlarını kullanarak değerlendirmek üzere, 'teknik çalışma grupları' (TWG) oluşturuldu. Çok sayıda sistem tasarımı sunulmuş olduğundan, TWG'ler bunları, benzer özelliklere sahip alt kümelere ayırdı. Hedeflere ulaşabilmek açısından makul yeterliliğe sahip olmayan veya gerçekleşmesi fazla uzak ya da teknik açıdan imkansız olan altkümeleri veya tasarımları elemek amacıyla, 'yeterlilik elemesi' denilen ilk eleme yapıldı. Bundan sonra, kalan tasarımlara daha özenli bir son eleme uygulanarak, IV. Nesil'in temelini oluşturacak olan altısı seçildi. Bu amaçla, her sisteme; kıstaslar kümesini sağlama açısından taşıdığı düşünülen yeterlilik düzeyinin göstergesi niteliğinde, belirsizlikleriyle birlikte olasılıklar atandı. Yakın dönemde kullanım açısından yeterliliği güçlü görülen bir dizi tasarım da değerlendirildi ve bunlardan 16'sı, 'Uluslararası Yakın Dönem Kullanımı'na aday seçildiler. Ayrıca, ABD'de bağımsız olarak yürütülen bir çalışmayla 'Yakın Dönem Kullanımı'na aday seçilmiş bulunan 6 tasarım daha var. Üç gruba araştırma çabalarının birbirini desteklemesi bekleniyor.

IV. Nesil tasarımlarının bir listesi, alttaki tabloda verilmekte. Aşağıda, bu sistemlerin tasarım özellikleri arasındaki etkileşimler ile, hizmet ettikleri hedefler ve kıstaslardan bazıları, özet bir şekilde gözden geçiriliyor.

IV Nesil Sistem	Acronym
Gaz soğutmalı Hızlı Reaktör sistemi	GFR
Kurşun soğutmalı Hızlı Reaktör sistemi	LFR
Ergimiş Tuz Reaktör sistemi	MSR
Sodyum soğutmalı Hızlı Reaktör sistemi	SFR
Süper Kritik Su soğutmalı Reaktör sistemi	SCWR
Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör sistemi	VHTR

Sürdürülebilirlik (SU)

Nükleer güç teknolojisinin ilk yıllarında uranyumun kıt bir kaynak olduğu düşünülüyordu. Reaktörler ve yakıt

döngüsü, kullanılmış yakıtın, plutonyum ve uranyum içeriğini geri kazanmak üzere hızla işleneceği varsayımıyla geliştirildi ve yakıt döngüsünün arka cephesi, atık depolama tasarımları da dahil olmak üzere, yalnızca üst düzey atığın depolanacağını varsaydı. Fakat, nükleer kapasite genişlemesi Three Mile Island kazasından sonra yavaşlayıp, Çernobil kazasından sonra da neredeyse durunca, uranyum fiyatları 1981 yılında, tarihinin en düşük düzeyi olan 50\$/kg'a indi ve yakın zamanlara kadar yükselmedi. Öte yandan hızlı reaktör programları, olumsuz ekonomileri ve karşılaşılan bazı malzeme sorunları nedenleriyle durduruldu. Dolayısıyla, yakıtın yeniden işlenmesi pahalı hale geldi ve ayrıca, ABD'nin başını çektiği bazı ülkeler, nükleer silahların yayılması endişeleri nedeniyle, 'tek geçişli yakıt döngüsü'ne geri döndüler. Halbuki bu döngü doğal uranyum gereksinimi açısından, enerji üretimi için ağırlıklı olarak doğal uranyumun düşük oranlı U-235 bileşenine dayandığından, kaynak kullanımı en yoğun olan döngüdür. Ayrıca, kullanılmış yakıtı radyoaktif atık saydığından, en fazla miktarda atığı üretir.

Dünyada halen aktif olan toplam 367 GW gücündeki 438 reaktörün, ikisi hariç hepsi termal reaktör tipinde ve bunların çoğu, 'tek geçişli yakıt döngüsü' ile çalışıyor. 1000 MWe gücündeki tipik bir hafif su reaktörünün yıllık gereksinimi, %3-4 düzeyinde zenginleştirilmiş 20-25 ton yakıt olduğuna göre, mevcut filonun yılda 9.000 ton kadar kullanılmış yakıtı açması beklenir. Gerçekte, kullanılmış yakıt stoğuna her yıl ilave edilen miktar 12.000 ton. Bu miktar, diğer enerji teknolojilerinin ürettiği atık miktarlarına göre küçük olmakla birlikte, mevcut depolama kapasitelerini zorlayan düzeyde bir talep oluşturuyor. Öte yandan, %3-4 düzeyinde zenginleştirilmiş 20-25 ton yakıt, yaklaşık olarak 200 ton doğal uranyumdan elde edilebilir. Dolayısıyla, işletmedeki kapasitenin yıllık doğal uranyum gereksinimi, 70.000 ton civarında olmalı. Bu gereksinimin %10 kadarı, askeri amaçlı plutonyum stokları

nın ‘mızraklardan sabanlar’ programı gereğince azaltılması sayesinde, bir diğer %10 kadarı da, kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden elde edilen MOX yakıtla karşılanıyor. Dünya’daki, eldeki teknoloji kullanılarak şimdiki fiyatlarla çıkartılabilecek olan doğal uranyumun ‘bilinen rezervler’i 3,5 milyon ton dolayında. Askeri stoklarla birlikte, ‘tahmini rezervler’ 4,8 milyon tonu bulabilir. Dolayısıyla, halen bilinen ve tahmini ekonomik uranyum kaynakları, ‘tek geçişli yakıt döngüsü’nü en azından yüzyılın ortalarına kadar desteklemeye yeterli.

Tek geçişli yakıt döngüsünün ön ve arka cephe özellikleri, mevcut uranyum kaynaklarını ve atık depolama kapasitelerini zorlayabileceğine göre; yakıt döngüsü nükleer gücün sürdürülebilirliğinin odak noktasını oluşturuyor. Bu sürdürülebilirliğin, yakıt kaynaklarının uzun vadeli yeterliliğinin güvence altına alınması ve radyoaktif atıkların asgariye indirilmesi olmak üzere, iki hedefi var. Dolayısıyla, yol haritası çalışmasının erken bir aşamasında, sunulan tasarımların sürdürülebilirlik açısından yeterliliğini kıyaslamalı bir değerlendirmeye tabi tutmak üzere bir ‘Yakıt Döngüsü Çakışma Alanları Grubu’ (FCCG) oluşturuldu. Grup; tek geçişli yakıt döngüsü, plutonyumun kısmen geri kazanıldığı döngü, plutonyumun tümüyle geri kazanıldığı döngü ve uranyum ötesi elementlerin tam dönüşümlü döngüsü olmak üzere, dört tür döngü tanımladı. Daha sonra her döngü gelecek yüzyıl için, nükleer enerjinin elektrik üretiminde halen sahip olduğu piyasa payını koruyacağı varsayımıyla modellendi. Diğer tahmin seçeneklerine dayalı bazı duyarlılık incelemeleri de yapıldı.

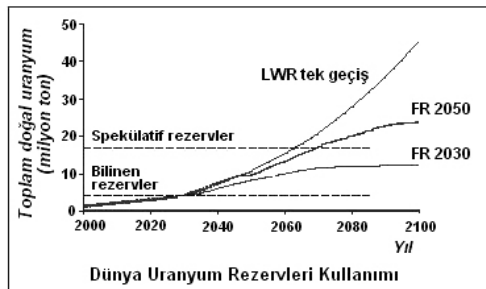
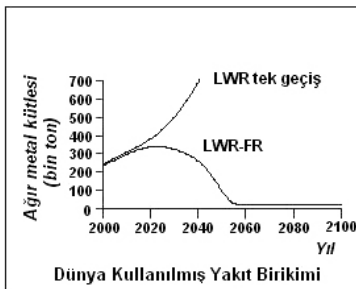
FCCG tek geçişli yakıt döngüsüne dayalı bir stratejide nükleer enerjinin rolünün artmasının karşısındaki sınırlayıcı etkenin, alt soldaki şekilde görüldüğü gibi, dünyadaki depo hacmi oldu-

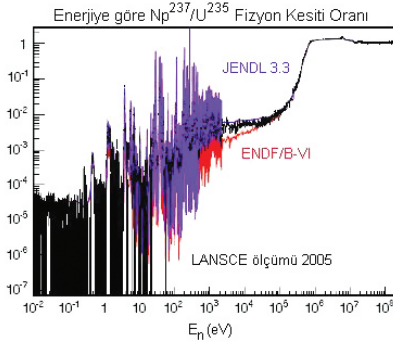
ğunu saptadı. Bu durum önümüzdeki birkaç onyıllık içerisinde yeni depoların kurulmasını gerektirdiğinden, önemli bir sorun haline geliyor. 100.000 ton kapasiteli tipik bir deponun maliyetinin birkaç milyar doları buluyor olması, tartışmalı konuşlandırma sorunlarıyla birlikte, hızlı bir gelişmeyi engelleyecek gibidir. 50 yıldan sonraki uzun vadede, madencilik ve çıkarma teknolojilerinde kırılma niteliğinde gelişmeler gerçekleşmediği takdirde, alt soldaki şekilde görüldüğü üzere, uranyum kaynaklarının yeterliliği de sınırlayıcı bir etken olmaya başlıyor. Fakat geri kazanım yoluyla, her iki sorunu da hafifletmek mümkün.

Tipik bir hafif su reaktöründe, kalpten çıkan yakıt ağırlıkça; %96 uranyum, %1 plutonyum, %3 fizyon ürünleri ve ikincil aktinidlerden oluşur. Uranyum bileşeni hala %0,8-1 oranında zengindir ve plutonyumun 1/3’ü, fisil olmayan çift kütle sayılı izotoplardan oluşurken, kalanı fisildir. Bu uranyum ve plutonyum kullanılmış yakıttan ayrıştırılıp, fakirleşmiş uranyumla seyreltilerek, MOX yakıtı imalatında kullanılabilir. Üst düzey radyoaktif atık olarak geride, başlangıçtaki kütlelerin sadece %3’ünü oluşturan fizyon ürünleri ile ikincil aktinidler kalır. Böylelikle, kullanılmış yakıtın hacmi iki merteye azaldığı gibi, başlangıçtaki yakıttan daha fazla enerji elde etmek de mümkün hale gelir. Fakat, kullanılmış yakıttan sıyrılan uranyum, enerji üretimi sırasındaki çekirdek dönüşümlerinin ürettiği, fisil olmayan U-232 ve U-236 izotoplarını da içermektedir. Bu çekirdekler U-235, U-238’den çok daha hızlı bozunurlar ve ayrıca, U-232’nin bozunma ürünlerinden Ta-208 gibi bazıları, güçlü gama ışıyıcısıdır. Dolayısıyla, yeniden işleme sürecinin, yakıtın kalpten çıkartılmasından sonra, radyoaktivitenin birikmesine fırsat vermeyecek şekilde, yeterince kısa bir sürede yapılması gerekir. Aksi halde biriken radyoaktivite, uzak-

tan kumanda ve zırhlama tekniklerinin daha yoğun kullanımını gerektireceğinden, yeniden işleme sürecini daha karmaşık bir hale koyar. Yeniden işleme pahalı bir süreçtir. Fakat, zenginleştirmeye gereksinimin kalmayışı bunu kısmen telafi ettiği gibi, sonuçta üretilen yüksek düzeyli atık miktarının azalmış olması ek bir yarar daha sağlar. 7 adet UO₂ yakıt demetinden, bir MOX yakıt demeti ile bir miktar camlaştırılmış yüksek düzeyli atık elde edilirken, işlem; doğrudan depolamanın yol açacağı hacim, kütle ve maliyetin %35’iyle sonuçlanır. Dolayısıyla, yakıtın yeniden işlenmesiyle MOX imalatı, Avrupa’da tercih edilen yol olmuştur. Fransa ve İngiltere birlikte, yılda 5.000 tona yakıtın işleme kapasitesine sahip ve geçen 35 yılda, 55.000 tondan fazla kullanılmış yakıt yeniden işlendi. Termal reaktörlerin yakıt stoğunun %30’a kadarki kısmı için MOX yakıtı kullanmak mümkün ve nitekim, Avrupa’daki 32 reaktörde bu uygulama halen kısmen yapılıyor. Japonya 2010 yılı itibarıyla, termal reaktörlerinin üçte birinde, esas olarak atık hacmini azaltmak amacıyla MOX yakıtı kullanıyor olmayı hedeflemekte. Bu teknoloji, Rusya ve ABD arasında varılmış olan nükleer başlıkların azaltılmasına yönelik anlaşma uyarınca askeri plutonyum stoklarının yok edilmesinde de kullanılmakta olup, halen dünya nükleer enerji üretiminin %10’unu sağlıyor.

Fakat, çift sayılı izotoplar genel olarak, dolayısıyla plutonyumun ve aktinidlerinkiler de, 1 MeV’un altında enerjili nötronlar için çok düşük fizyon kesitlerine sahiptirler. MOX yakıtın bir termal reaktörde kullanılması sırasında bu izotoplar, ardışık nötron yutmaları sonucunda kısmen fisil izotoplara ve sonuç olarak fizyon ürünlerine dönüşürmektedirler. Genelde birkaç, örneğin Pu-242 için 4 ve Am-241 için 3 nötron gerektiren bu çekirdek dönüşümleri; nötron ekonomisini baskılar ve ayrıca, oluşum hızından yavaş seyreterek, plutonyumun izotop bileşiminin giderek bozulmasına ve aktinidlerin daha fazla birikmesine yol açarlar. Dolayısıyla, kullanılmış MOX yakıtı, yeniden işlenerek termal reaktörlerde kullanılmaya uygun değildir. Halen kullanılmış yakıt olarak depolanmakta olup, depo gereksinimini arttırmaktadırlar.





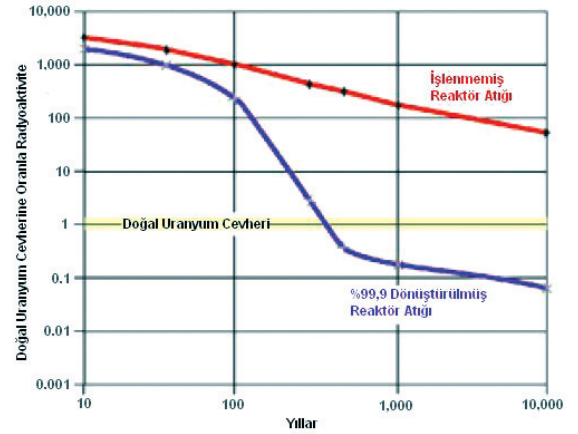
Halbuki bu istenmeyen çekirdekler, yüksek enerji düzeylerinde oldukça büyük fizyon kesitlerine sahipler. Kesitlerin hepsi ayrıntılı olarak bilinmemekle birlikte, örneğin Np-237'nin fizyon kesitinin U-235 standardıninkine oranının, yukarıdaki şekilden görüleceği gibi, gelen nötronun enerjisine bağlı olarak, 10 merteye kadar değiştiği ölçülmüş durumda. Dolayısıyla, bu çekirdekleri hızlı bir nötron akısında, çok daha büyük bir etkinlikle fizyona uğrutup, birikmelerini engellemek suretiyle nötron ekonomisini iyileştirmek mümkündür. Bu ise, kullanılmış yakıtın tekrar tekrar işlenmesini ve döngünün kapatılmasını mümkün kılar. Bu nedenlerle, seçilen IV. Nesil tasarımlardan dördü; GFR, LFR ve SFR hızlı reaktör tipinde iken, bir dördüncüsü, yani SCWR, termal ya da hızlı olarak inşa edilebilir nitelikte. Dördünün; GFR, LFR, MSR ve SFR; kapalı yakıt çevrimiyle çalışması ve aktinit yönetimini hedeflemeleri amaçlanırken, SCWR'nin de bu şekilde tasarlanmaması mümkün. Tek istisna, VHTR.

Kaynak Kullanımı (SU1): Hızlı reaktörlerin üstün nötron ekonomisi aynı zamanda, U-238'in fisil plutonyuma daha yüksek bir verimle dönüştürülmesini mümkün kılar. Hızlı reaktörlerde 1'den büyük dönüştürme oranları başarılabilir. Ki bu, dünya doğal uranyum kaynaklarının enerji potansiyelinin yaklaşık 60 misline katlanması anlamına gelir. Ayrıca, MSR tasarımı, U-238 veya Th-232 çekirdeklerini, ergimiş tuz içerisinde çözünmüş floridler halinde, doğurgan yakıt olarak kullanabilir. Florid temelli MSR'nin termal veya epitermal spektruma sahip olması sayesinde, Th-232 en yüksek dönüşüm faktörlerini yakalar. Böylelikle üretilen fisil U-233, hızlı veya termal reaktörlerin yakıt gereksinimlerini desteklemekte kullanılabilir. Bu, mevcut doğal uranyum rezervlerine, üç misli daha bol olan toryum rezervlerini ek-

mek suretiyle, yakıt verterliliğini çok büyük oranda artırır.

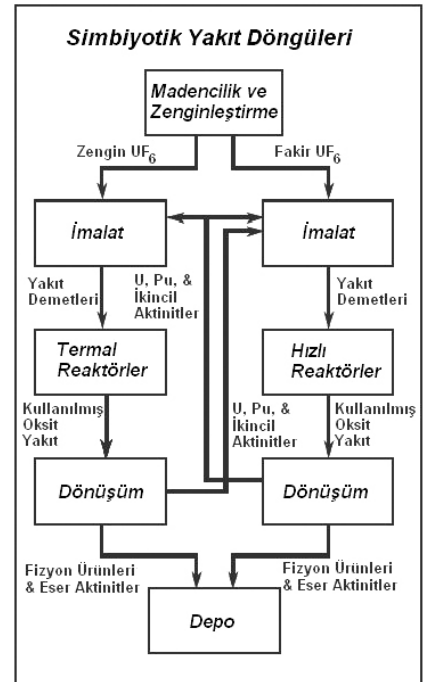
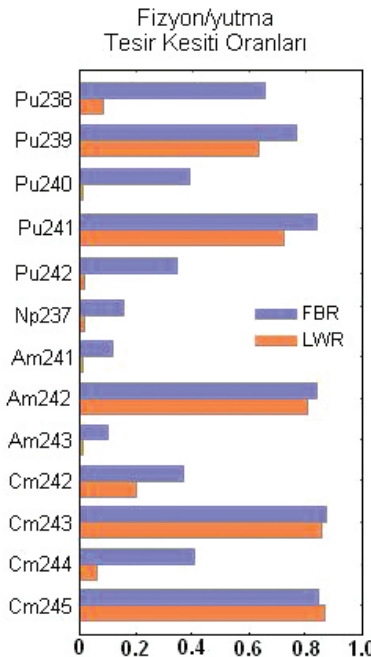
Atığın Azaltılması ve Yönetimi (SU2): LWR kullanılmış yakıtının MOX üretimi için yeniden işlenmesi sırasında halen, sadece uranyum ve plutonyum ayrıştırılıp kullanılmakta, aktinitler fizyon ürünleriyle birlikte üst düzey atığın parçası olarak geride bırakılmaktadır. Fizyon ürünleri çoğunlukla, her biri yaklaşık 30'ar yıl yarılanma ömrüne sahip olan Sr-90 ve Cs-137 izotoplarından oluşur. Bu çekirdeklerin kendilerinin güvenli bir şekilde saklanmaları gereken süre, yaklaşık 10 yarılanma ömrüne eşdeğer, 300 yıl kadardır. Fakat, çok daha uzun yarılanma ömürlerine sahip olan aktinitler, bu süreyi birkaç bin yıla çıkarır. Halbuki aktinitlerin hepsi de, alttaki şekilde görüldüğü gibi, hızlı bir reaktörde çok daha büyük fizyon/yutma oranına sahiptirler. Dolayısıyla, aktinitleri fizyon ürünlerinden ayırıp hızlı bir reaktörde yakmak, üst düzey atık yönetimini kolaylaştıracaktır.

Ayrıca, geride kalan fizyon ürünlerinin başlıcalarını oluşturan iki izotoptan Sr-90, besin yoluyla alınma açısından birincil risk unsurunu, Cs-137 ise, birincil ısı kaynağını oluştururlar. Depo hacmi esas olarak bozunma ısısının



uzaklaştırılması gereksinimine göre belirlendiğinden, bu iki izotopun birbirinden ayrıştırılması, kapasite kullanımı açısından yarar sağlayacaktır. Cs-137 bozunma ısı daha fazla azalana kadar yerüstünde depolanırken, daha az ısı üreten Sr-90 yeraltı deposuna konularak, besin zincirinden uzak tutulabilir.

Aktinit yönetimi, yakıt sürekli işlenebildiği takdirde, termal bir reaktörde de başarılabilir. MSR termal reaktör tasarımı, sıvı yakıtı sayesinde böyle bir yeteneğe sahip. Onun bu özelliği, IV. Nesil tasarımları arasına girmesinde önemli bir rol oynadı. Güvenli depolama süresini önemli miktarda azaltabilmek için, aktinitlerin %99,9 veya daha yüksek oranda ayrıştırılmaları gerekir. Üstteki şekilde %99,9'luk ayrıştırma düzeyi için, dönüştürülmüş ve işlenmemiş atıkların doğal uranyuma oranla aktivite düzeyleri görülüyor.



Bütün bu olasılıkları araştırmaya yönelik incelemeler, çeşitli reaktör tiplerinin, 'simbiyotik yakıt döngüleri' denen kapsamda birlikte çalışma yeteneklerinin daha iyi anlaşılmasını sağladı. Örneğin yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi; termal sistemlerden çıkan aktinitler hızlı sistemlerde, dünyadaki aktinit envanterinin azaltılmasını sağlayacak şekilde yakılabilirler. Ayrıca, gaz veya su soğutmalı termal reaktörlerde gerçekleşen yanma oranlarındaki iyileştirmeler, bu tür simbiyotik sistemlerde aktinit yönetimini kolaylaştırabilir. Bir dizi sistemin farklı kümelerinin dünyanın tümü için daha gülbüz ve arzu edilir bir simbiyotik sistem sağlayabileceğinin anlaşılması, tek bir sistem yerine altı farklı sistemin IV. Nesil olarak seçilmesinde yönlendirici etken oldu.

Ekonomi (E)

Şimdiki nesil nükleer reaktörler, daha çok temel yük santral olarak kullanıldıklarından, rekabet edebilen fiyatlarla elektrik ürettirler. Fakat inşaat maliyetleri yüksek, lisanslama süreçleri ise, bazen öngörülemez kadar uzun. ABD'de 1979 Three Mile Island kazasından sonra yeni siparişlerin iptal edilmesinin asıl nedeni, kamuoyundaki tartışmalardan çok, elektrik üretim şirketlerinin yüksek ilk yatırım maliyetleri için, zaten uzun olan ve sıkılaştırılan güvenlik önlemlerinin yol açtığı gecikmeler nedeniyle daha da uzayan inşaat süreleri boyunca finans kaynağı sağlamakta zorluk çekmeleri olmuştu. IV. Nesil tasarımlar, ilk yatırım maliyetlerini azaltıp inşaat sürelerini kısaltarak, bu yükü hafifletmeyi hedefliyor. Nükleer enerjinin rekabet gücü ayrıca, daha geniş bir enerji gereksinimleri yelpazesine yanıt verebilir hale getirilmesiyle de arttırılabilir. IV. Nesil sistemlerin; üre sentezi, kağıt üretimi, ağır petrolün çıkartılması ve kökürten arındırılması, ham petrolün işlenmesi, nafta, etan ve ilgili ürünlerin eldesi, kömürün gazlaştırılması, demir, çimento ve cam üretimi gibi değişik ısı süreç uygulamalarında da kullanılmaları mümkün. Bazıları için gereken asgari sıcaklık 600°C civarında olduğundan, GFR, MSR, LFR ve VHTR sistemleri bu uygulamalara hizmet etme yeteneğine sahipler. Dolayısıyla, IV. Nesil

tasarımlara; elektrik üretimi, hidrojen üretimi ve süreç ısısı, aktinit yönetimi olmak üzere üç ana görev biçildi. Seçilmiş olan tasarımların beklenen icratları ve gerektirdikleri ana araştırma alanları aşağıdaki tabloda kabaca belirtiliyor.

Aktinit yönetiminin piyasa değeri halen belirsiz, uygulama deneyimlerinin sonucunda ortaya çıkacak. Fakat, hidrojen şimdiden önemli bir ürün, esas olarak azotlu gübrelerin imalatında ve ham petrolün işlenmesinde kullanılıyor. Dünyadaki yıllık tüketimi yılda 50 milyon ton kadar olup, yılda %10 artıyor. Ulaşım sektörünün gelecekteki enerji taşıyıcısı sayılmakta. Halen, hemen tümü doğal gazın ısı parçalanmasıyla üretiliyor ve bu yöntem, karbondioksit salımına yol açıyor. IV. Nesil tasarımlardan dördünün bu sektöre girmesi planlanıyor.

Termal VHTR tasarımı, iyot-sülfür (I-S) sürecini kullanarak yüksek verimle hidrojen üretme yeteneğine sahip olması sayesinde, ekonomik değerlendirmede üst sıralarda yer aldı. GFR ve LFR tasarımları da keza, bu uygulama alanının gerektirdiği yüksek sıcaklıkları hedefliyor. Hidrojenin yakın vadede kullanım imkanları arasında ham petrolün işlenmesi var. Bu uygulama, 50-500 MWt arası kapasite büyüklüğünde santraller gerektirebilir. Fakat, doğal gazın buharla yeniden yapılandırılması yöntemini kullanarak hidrojen üreten tesisler için en son verilen siparişler 2000 MWt'i buluyor. Daha uzun vadede ulaşım sektörünün enerji taşıyıcısı olarak kullanımı için, büyük miktarlarla taşınmasının zorluğu nedeniyle, hidrojen büyük olasılıkla yerel olarak üre-

tilip tüketilecek. Bu 'dağınık' nitelik, birkaç yüz MWt düzeyinde küçük kapasiteli birimlere gereksinim duyulacağı anlamına geliyor. Böyle küçük birimler aynı zamanda, yerel şebekelerde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi için yedekleme birimleri olarak kullanılmaya da uygundur. Dolayısıyla, hidrojen üretimine yönelik IV. Nesil tasarımları, küçükten büyüğe uzanan geniş bir kapasite yelpazesine sahipler. Bu durum, modüler ve hatta batarya tipi reaktör tasarımı olasılığını ve gereksinimini beraberinde getiriyor. Böyle bir esneklik başka yararlar da sağlar. Çünkü, esasta temel yük birimleri olarak kullanılan şimdiki nükleer güç santralleri, denetim altındaki kamu ve özel elektrik üretim şirketleri tarafından satın alınıp işletilmekteydiler. Halbuki, elektrik piyasalarının serbestleştirilme süreci, dağınık ve daha küçük ölçekli işletmelerin sahneye çıkmasına yol açıyor. Dolayısıyla, küçük ve hatta talep izleyen birimler, değişen piyasa gereksinimlerini daha iyi karşılayabilecekler.

Yaşam Döngüsü Maliyeti (E1): Yaşam döngüsü maliyetlerinin azaltılması, daha düşük santral maliyetleri ve daha kısa inşaat süreleriyle başarılabılır. Daha küçük birimler sermaye gereksiniminin azalması anlamına geldiği gibi, modüler tasarım da, inşaat sürelerini kısaltıp, hem üretimin hem de süreçlerin standartlaştırılmasını sağlamak suretiyle gecikmeleri azaltabilir. Batarya ve modüler seçeneklerin ekonomikliği; uçak, kamyon ve otomobil imalatı, açık deniz petrol kulelerinin inşası ve gemi yapımı gibi sanayi sek-

	Spektrum, Döngü	Büyüklik	Uygulama	Ar-ge gereksinimi
Gaz soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR)	Hızlı-kapalı	Orta: 600MWt/288MWe	Elektrik, Aktinit yönetimi, Hidrojen	Yakıt, malzeme, güvenlik.
Kurşun alaşım Hızlı Reaktör (LFR)	Hızlı-kapalı	Batarya: 50/150MWe (15-20 yılda yakıt yenileme) Modüler: 300/400MWe Büyük: 1200MWe	Elektrik, Aktinit yönetimi, Hidrojen	Yakıt, malzeme uyumluluğu
Sodyum alaşım Hızlı Reaktör (SFR)	Hızlı-kapalı	Ara: 150/500MWe Orta/Büyük: 500/1500MWe	Elektrik, Aktinit yönetimi	İleri yakıt işleme
Çok Yüksek Sıcaklıklı gaz Reaktörü (VHTR)	Termal-açık	Orta: 600MWt	Elektrik, Hidrojen, Süreç ısısı	Yakıt, malzeme, H ₂ üretimi
Süper Kritik Su Reaktörü (SCWR)	Termal-açık, Hızlı-kapalı	Büyük: 1700MWe	Elektrik	Malzeme, güvenlik
Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)	Termal-kapalı	Büyük: 1000MWe	Elektrik, Aktinit yönetimi, Hidrojen	Yakıt, yakıtın yeniden işlenmesi, malzeme, güvenlik ve güvenilirlik

törlerinde kullanılan fabrika temelli kitlesel üretim ve hızlı montaj tekniklerinin nükleer alana uyarlanmasıyla arttırılabilir. Fakat, modüler tasarımın ekonomisi, büyük birimlerin ölçek ekonomisinden sağladıkları yarar nedeniyle henüz belirsiz. Bu nedenle, SCWR tasarımı büyük kapasiteyi muhafaza ederken, ikincil devreyi ve bununla ilgili pompa ve diğer donanım gereksinimlerini ortadan kaldırmak suretiyle, 900 \$/kW düzeyinde kapasite maliyetlerini hedefliyor.

Sermaye Riski (E2): Nükleer projelerin ekonomik riskleri; üretim ve zamanında inşaat konularındaki yenilikçi tekniklerin yanında, belirsizlikleri asgariye indiren sağlıklı maliyet tahmini araçlarının kullanılmasıyla da azaltılabilir. Nükleer güç endüstrisi halen tek bir ürüne alışmış durumda ve maliyetleri birden fazla ürün arasında dağıtmaya alışkın değil. Modüler ve büyük kapasiteli santrallerin ekonomikliği ile ilgili sorun çözülmek zorunda. Öte yandan, ileri işleme tekniklerinin kullanımı, yakıt döngüsünün maliyet analizini önemli oranda değiştirecek. Dolayısıyla, yatırım kararlarının alınmasında kullanılacak 'bütünleşik nükleer enerji ekonomisi modeli' oluşturmak üzere; sermaye ve üretim maliyetleri, nükleer yakıt döngüsü maliyeti, enerji ürünleri, santral büyüklüğü belirlenmelerine yönelik güncelleştirilmiş ekonomik modellerin geliştirilmesi gerekiyor.

Güvenlik ve Güvenilirlik (SR)

Güvenlik ve güvenilirlik hedefleri; güvenli ve güvenilir işletme, kazaların gelişkin yönetimi ve sonuçlarının asgariye indirilmesi, saha dışı acil durum önlemlerine ihtiyacın azaltılması unsurlarını kapsıyor. Nükleer güç santralleri geçmişte yüksek güvenlik ve güvenilirlik standartlarına uygun icraat sergiledi ve bu sayede yüksek kapasite kullanım faktörlerine ulaşmayı başardılar. IV. Nesil tasarımlar bu icraatı, alternatif enerji üretim teknolojilerine karşı avantajı koruyarak, ilave yeniliklerle daha da iyileştirmeyi hedefliyor. Bu sadece başarılı üretim yapmakla değil, aynı zamanda, çoğunluğu yeni teknolojiler gerektiren santral bileşen-

lerinin başarılı bir şekilde arayüzlendirilip bütünleştirilmesiyle mümkün olabilir.

Tasarımların her biri için yapılması gereken pek çok araştırma işi var ve bu etkinlikler, üç aşamaya ayrılmış bulunuyor. Birincisi, olabilirlik ve ilkelere ispatı konularındaki ana sorunların çözümlendiği 'geçerlilik' aşaması. İkincisi; reaktör, işleme tesisleri veya enerji çevirim teknolojileri gibi ana alt sistemlerin geliştirilip en iyileştirildiği 'icraat' aşaması. Üçüncü aşama ise, 'kanıtlama' aşaması. Hepsisi de yeni ve yenilikçi teknolojileri içerdiğinden, IV. Nesil tasarımlarının her biri için büyük olasılıkla bir kanıtlama aşaması gerekecek. Başarılı bir kanıtlama sonrasında sistem, endüstriye ait bir etkinlik oluşturan 'ticarileştirme' aşamasına gelebilir.

İşletme Güvenliği ve Güvenilirliği (SR1): IV. Nesil sistemlerin tümü, malzemeler için uzun hizmet süreleri ve yakıtlar için görece yüksek yanma yeteneği gerektirmektedir. Çoğu, hızlı veya epitermal nötron enerji spektrumuyla çalışmak üzere tasarlanmıştır. Örneğin hidrojen üretimine yönelik I-S süreci 800°C'nin üzerinde ısı gerektirir ve sıcaklık ne kadar yükselirse, süreç verimi o kadar artar. Dolayısıyla umulan çıkış sıcaklıkları GFR için 850°C, VHTR için 1000°C'dir ve MSR'ninki, 850°C'ye ulaşabilir. SCWR, LFR ve SFR 800°C'nin altında ısı verirler, bu yüzden I-S sürecini kullanmaları düşünülmüyor. Güvenlik paylarıyla birlikte, GFR'ın çalışma koşulları; 1400°C sıcaklığa, 250 GWD/MTHM'lik yanma (ağır metalin tonu başına GW.gün enerji üretimi) düzeyine ve malzemenin radyasyon karşısında uğradığı hasarın ölçüsü olan 'atom başına yer değiştirme'nin (dpa) 100-150 arasında değerlerine karşılık gelmektedir. VHTR tasarımı, 1000°C'lik çıkış sıcaklığını başarmak için, yakıt sıcaklıklarının olası bir kazanın ardından en yüksek değer olarak 1800°C'ye ulaşmasına ve 150-200 GWD/MTHM'lik azami yanma düzeylerine izin vermek zorundadır. LFR sisteminde alternatif olarak, daha düşük sıcaklıkta çalışan ve 700°C civarında hidorjen üretebilecek olan Ca-Br sürecinin geliştirilmesi önerilmektedir. Öte yandan, kalbin iç bileşenleri için en yüksek dozlar, termal tasarımlarda

10-30 dpa iken, hızlı tasarımlarda 100-150 dpa'ya ulaşabiliyor. Bu dozlar malzemenin, ısınma altında kararlılık ve ısınmanın kırılabilirlik, sünme ve paslanma üzerindeki etkiler açısından ağır taleplerde bulunmaktadır. Dolayısıyla, yeni yakıt tipleri ile yapı malzemeleri için yeni alaşımların geliştirilmesi gerekiyor ve bu durum, tasarım güçlüklerine yenilerinin eklenmesini gerektiriyor. MSR tasarımının; ergimiş tuz kimyası, aktinidlerin ve lantanitlerin yakıttan çözünürlüğü, ısınan ergimiş tuz yakıtın yapısal malzemelerle ve grafitle uyumluluğu, metal atomlarının ısı değiştiricilerde kümelenmesi gibi bir dizi 'teknik yapılabilirlik' sorunu var. SCWR tasarımı, 250 atm (25 MPa) düzeyindeki yüksek çalışma basıncı, soğutucu sıcaklıklarının ve yoğunlukların kalp boyunca büyük değişimlere uğraması gibi nedenlerle, özgün çalışma koşullarına sahip. SCWR malzemelerinin, ısınma altında ve düşünülen sıcaklık ve basınç aralıklarındaki davranışı hakkındaki mevcut bilgiler yetersiz. Halen, termal veya hızlı spektrumlu SCWR'lar için yakıt kılıfı ve yapısal malzeme olarak herhangi bir alaşım belirlenmiş değil. Bunlar, üstesinden gelmesi gereken çok geniş bir dizi teknik güçlükten yalnızca bazıları.

Kalp Hasarı (SR2): IV. Nesil nükleer enerji sistemlerinde kalp hasarının oluşma olasılığı ve olduğu takdirde düzeyi çok düşük olacak. Fakat, tasarımlardan bazıları için bu hayati konuda daha fazla çalışmaya gerek var. Örneğin SFR tasarımında pasif güvenlik garantisi gerekiyor. Ana ihtiyaçlar, yakıtın erimesi halinde oluşan tortunun reaktör tankı içerisinde soğutulabileceğinin gösterilmesi ve hasarlı bir reaktörün yeniden kritik olması olasılığını ortadan kaldıracak pasif mekanizmaların varlığının garanti altına alınması. SCWR tasarımında işletme basıncı çok yüksek olduğundan, hızlı bir basınç kaybı sırasında yakıt zarfının balonlaşma olasılığı var. Bu; zirkonyum alaşımıyla kılıflı yakıt çubuklarının 'soğutucu kaybı kazası' (LOCA) analizlerinde çalışılmış olan, fakat SCWR tasarımı için düşünülen ostenit ve ferrit-martensit esaslı paslanmaz çelikler ya da nikel esaslı alaşımla kılıflanmış yakıt için henüz üzerinde çalışılmamış olan önemli bir olgu.

Saha Dışı Acil Durum Yanıtı (SR3):

Reaktör sahası dışındaki acil durum önlemlerine olan gereksinimin azaltılması, kamuoyunun nükleer enerjinin güvenliği hakkındaki kuşkularını azaltacaktır. Kendiliğinden güvenlik özelliklerinin artırılması, gürbüz tasarımlar, konuda uzman olmayan bireyler tarafından kolayca anlaşılabilen şeffaf güvenlik özellikleri, bu açıdan yararlı olacak.

Yayılma Direnci ve Fiziksel Koruma (PR)

Yayılma direnci ve fiziksel koruma, nükleer malzemelerin ve tesislerin kontrolü ve güvence altına alınması için gereken önlemleri inceler. Bu hedeflerin amacı; nükleer enerji sistemlerinin sahip olduğu yayılma direncinin etkinliğini gelişen yeni koşullar altında da sürdürmek ve yeni tesislerin gürbüzlüğünü arttırmak suretiyle, terörizme karşı fiziksel korumayı güçlendirmektir. En sıkı önlemlerden bazıları yakıt döngüsüyle ilgilidir.

Kullanılmış yakıtın MOX imalatına yönelik olarak işlenmesinde kullanılan alışıldık PUREX işleme tekniğinde, uranyum ve plutonyum birlikte ayrıştırılır. Bu, radyoaktivite yükünün çoğunu, aktinitler ve fizyon ürünleriyle birlikte atık suyunda bırakarak, uranyum-plutonyum karışımının işlenmesini kolaylaştırır. Plutonyum uranyumdan kimyasal olarak ayrıştırılabildiğinden, sürecin nükleer yayılma riskini arttırdığı kanaati var. Dolayısıyla, IV. Nesil'in kapalı yakıt döngüsü stratejisinin parçası olarak, yeni ayrıştırma teknikleri geliştiriliyor. Planlanan ileri ayrıştırma teknolojileri; plutonyumu ayrıştırmaktan kaçınmayı ve yayılma direncini arttıracak diğer özelliklerin devreye sokulmasını, sürece etkin güvenlik önlemlerinin katılmasını öngörmekte. Dikkate değer bir ayrıntı olarak, yeniden işlemeyi öngören IV. Nesil sistemlerinin tümü, malzemelerin silah yapımına yönelik olarak erişilebilirliğini ve cazibesini yakıt döngüsünün her aşamasında azaltmak amacıyla, plutonyumu diğer aktinitlerden ayrıştırmaktan kaçınıyor. Üzerinde çalışılmakta olan, 'gelişkin sulu' ve 'yakarak işleme' ('pyroprocessing') süreçleri olarak bilinen, iki ana seçenek var.

Gelişkin sulu işleme, U/Pu saflaştırılmasının devre dışı bırakılıp, uranyumun kristalleştirilmesi ve ikincil aktinit eldesi adımlarının eklendiği, basitleştirilmiş bir PUREX sürecinden oluşmakta. Uranyumun kristalleştirilmesi, ağır metal kütesinin büyük bir kısmını karışımdan başlangıçta ayırarak, süreç akışının aşağı aşamalarından eleme oluyor. Daha sonra U/Pu, Np ile birlikte, yeniden işleme sürecinde kullanılmalarını mümkün kılacak oranlarda radyoaktiviteden arındırılmış olarak, karışımdan sıyrılıyor. Kristalleştirmeye alternatif olarak, uranyumun sıyrılması için bir de UREX süreci var. Bu süreçte, işlemin ilk adımı olarak uranyum sıyrılır. Plutonyum ve ikincil aktinitlerle uçucu olmayan fizyon ürünleri, bir sonraki aşamaya gönderilir. İşlemin sıyırma ve ovma aşamalarına asetonhidroksamik asit (AHA) ilavesi, plutonyum ve neptünyumun ayrıştırılabilirliğini büyük oranda azaltarak, PUREX sürecinin sıyırma adımındakine oranla daha etkin yayılma direnci sağlar. Sürecin ana akıntısı tuz içermediğinden, düşük düzeyli atık hacimleri azalır. Oksit yakıt döngüsünde, U/TRU'un (uranyumun uranyum ötesi elementlere kütlece oranının) %99'dan fazlasının geri dönüşümü amaçlanıyor ve yeniden işleme ürününün radyoaktiviteden arındırılma oranı 100'den büyük. Sürecin ana kısmı ağırlıklı olarak mevcut teknolojilere dayandığından, uygulanabilirlik sorunları az. Dolayısıyla, bu yakıt döngüsü hızla kanıtlanma aşamasına ulaştırılabilir.

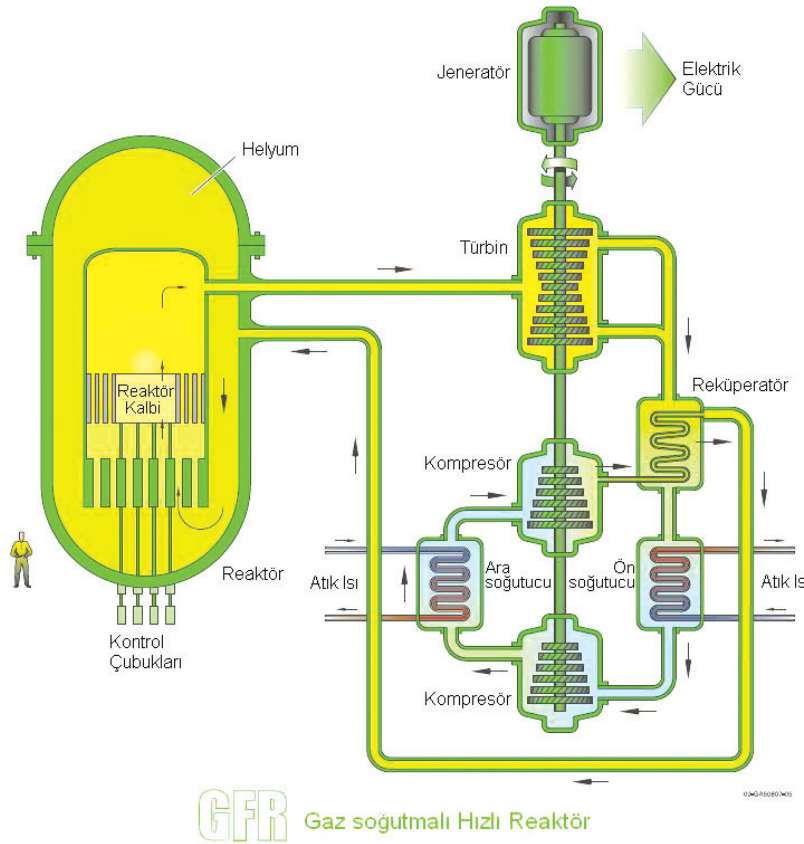
Yakarak işleme süreçleri; uçucu hale getirme, birbirine karışmayan metal-metal veya metal-tuz fazlarını kullanarak 'sıvıdan sıvıya' sıyırma, ergimiş tuzda elektro-saflaştırma, kısmi kristalleştirme gibi değişik aşamalardan yararlanır. Süreçler genellikle, ya LiCl+KCl or LiF+CaF₂ örneklerindeki gibi ergime noktası düşük olan klorid veya florid benzeri erimiş tuzlardan, ya da kadmiyum, bizmut veya alüminyum gibi erimiş metallere dayalıdır. Metal yakıtlara, oksitlerden daha kolay uygulanabilirler. Dolayısıyla, gereken ilk adım, aktinit oksitlerin metale indirgenmesidir. Öte yandan, yakarak işlemin yüksek geri dönüşümü başaran teknikleri, sadece uranyum için mühendislik ölçeğinde geliştirilmiş olup, neptünyum, amerisyum ve kuryum dahil ol-

mak üzere, tüm uranyum ötesi elementlerin dönüşümü, sadece laboratuvar ölçeğinde kanıtlanmış haldedir. Dolayısıyla, gereken ikinci adım, plutonyum dahil olmak üzere uranyum ötesi elementler için dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesidir. Kuryum, en fazla bozunma ısısını üretmesi, birim kütle başına en güçlü nötron kaynağını oluşturması ve süreç sırasında kullanılacak defalık miktarları sınırlayan çok küçük bir kritik kütleye sahip olması nedenleriyle, dönüştürülmesi zor bir aktinittir. Şimdiki sulu işleme teknikleri, uranyum ötesi elementleri teker teker sıyırmak üzere, her biri için farklı süreç dizileri kullanmakta. Eğer Np, Pu, Am ve Cm'u akıntıdan tek bir adımda birlikte ayrıştırabilen bir süreç geliştirilirse; tüm aktinitlerin dönüşüm maliyeti, kaza riski ve yayılma zaafı önemli miktarlarda azalmış olacak. Yakıt işleme teknolojilerinin başarısı, yakıtın, yüksek sıcaklık, radyasyon ve saldırgan kimyasal ortamlar gibi sert çevre koşulları altında işlenmesi ve imalatını mümkün kılan malzemelerin seçimine bağlı. Fakat, nükleer enerjinin yakıt döngüsü maliyetinin, üretim maliyetinin sadece %20 kadarını oluşturması; 'sürdürülebilirlik ve güvenlik' ile 'ekonomi ve güvenlik' hedef ikililerinin birbirinden ayrı tutulabilmesi gibi bir esneklik sağlıyor. Yani, tek geçişli döngüden daha maliyetli bir gelişkin yakıt döngüsü, toplam ekonomiyi ciddi şekilde etkilemeksizin, benimsenip gerçekleştirilebilir.

Seçilen altı sistemin özellikleri, özet olarak şöyle...

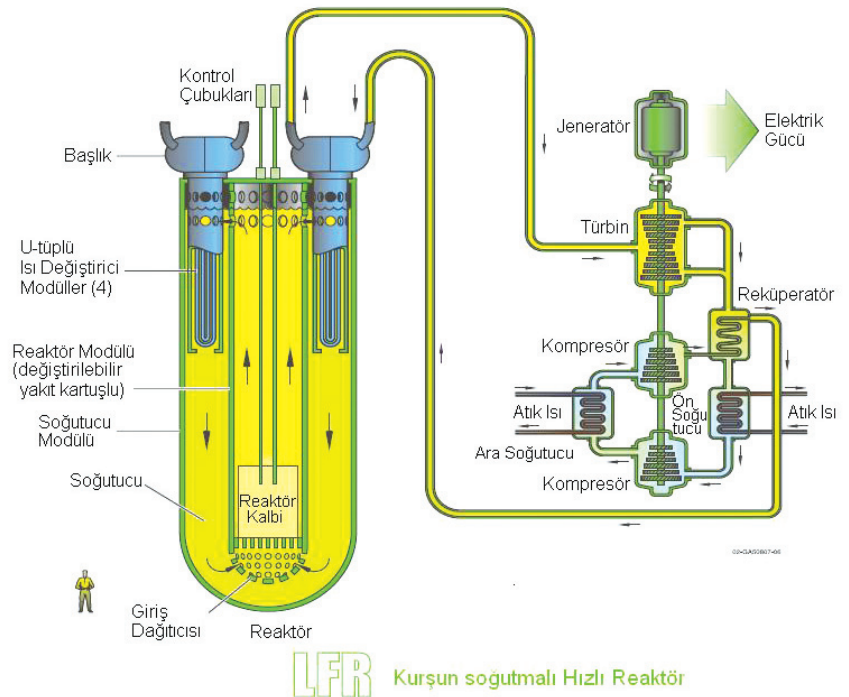
IV. Nesil Sistemler Gaz soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR):

Hızlı nötron spektrumuna sahip. Doğurgan uranyum çevrimini ve aktinid yönetimini verimli bir şekilde başaran kapalı bir yakıt döngüsü var. Tüm aktinidlerin yeniden işlenmesi için, santral alanında yakıt işleme tesisi öngörülüyor. Bu tesis; gelişkin sulu, pirometalürji veya diğer kuru işleme süreçlerine dayalı olabilecek. Kullanılmış yakıtın santral alanında işlenmesiyle, aktinitlerin tümü tekrar döngüye sokularak, uzun yararlanma

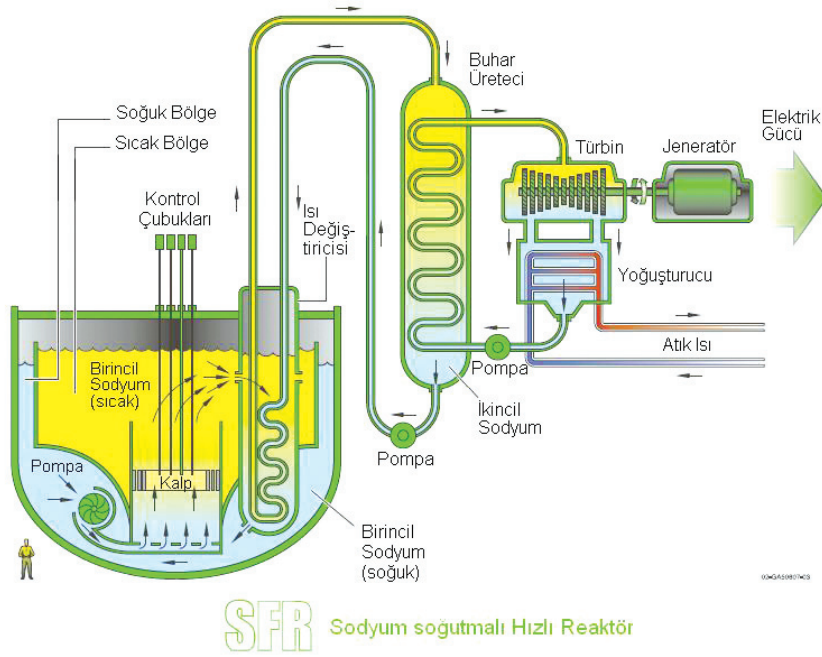


ömürlü radyoaktif atıların oluşumu asgariye indirilecek. Referans reaktörü 600MWt-288MWe kapasiteli. Helyumlu soğutma sistemi, geliştirilmiş veya geliştirilmekte olan diğer helyum soğutmalı reaktörler gibi, 850°C çıkış sıcaklığında çalışacak ve yüksek ısı verim amacıyla, Brayton döngülü bir gaz türbinini doğrudan döndürecek. Elektrik gücü yanında, termokimyasal yöntemle hidrojen üretimini ve süreç ısısı eldesini destekleyebilir. Elektrik üretimi için helyum, bir gaz türbinini Brayton döngüsü çerçevesinde doğrudan döndürüyor. Yakıt, fakirleşmiş uranyum yanında, fisil veya doğurgan diğer malzemeleri de içerebiliyor. Yüksek sıcaklıkta çalışabilecek olan ve fizyon ürünlerini bünyesinde tutma yeteneğinin yüksek olması istenen yakıt tasarımları arasında; kompozit seramik yakıt, ileri yakıt parçacıkları veya seramik kaplamalı aktinid bileşikler var. Kalp geometrisi ise, çubuk veya plaka şeklindeki yakıt gruplarına veya prizma şeklindeki bloklara dayandırılacak. Yakıt elemanları ve yakıt döngüsü üzerindeki araştırmaların başarısına bağlı olarak 2025'te devreye girebilir.

Kurşun soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR): Hızlı nötron spektrumu yanında, doğurgan uranyum çevrimini ve aktinid yönetimini verimli bir şekilde başaran kapalı bir yakıt çevrimine sahip. Soğutma işlemini, kurşun veya ötektik kurşun-bizmut karışımından



oluşan sıvı metal, doğal konveksiyonla başarıyor. Yakıt, fakir uranyum metal veya nitrattan oluşuyor. Aktinidlerin tümü, bölgesel veya merkezi bir yakıt işleme tesisi aracılığıyla tekrar döngüye sokulacak. Birimlerin; gelişmekte olan ülkelerin küçük elektrik şebekelerinde kullanılmak üzere fabrikada inşa edilmiş 10-30 yıl ömürlü 50-150 MW'lık 'batarya'lardan, 300-400 MW'lık modüler birimlere veya 1200 MWe'lik santrallara kadar çeşitli büyüklüklerde olması öngörülüyor. Halen ulaşılmış bulunan 550°C'lik işletme sıcaklığının, malzeme araştırmalarının başarısına bağlı olarak 800°C'ye çıkartılması ve birimlerin böylelikle, termokimyasal hidrojen üretiminde kullanılmalarının mümkün hale getirilmesi düşünülüyor. Bu reaktör Rusya'nın 40 yıldır denizaltılarında kullandığı, U+Pu nitrid yakıtlı ve kurşun-bizmut soğutmalı BREST hızlı reaktör teknolojisine karşılık geliyor. Fakat, IV. Nesil araştırma forumunun (GIF) bu teknoloji önerisi asıl, ABD'nin kurşun soğutmalı STAR ve Japonya'nın kurşun-bizmut soğutmalı LSPR deneysel tasarımlarından kaynaklandı. Sistem; şebeke gücü üretmenin yanında, hidrojen ve deniz suyundan içme suyu eldesine yönelik olarak tasarlandı. Yakıt ve diğer malzeme, paslanma kontrolü konularında ar-ge çalışmalarına gereksinimi var. 2025'de devreye girebilir.



SFR Sodyum soğutmalı Hızlı Reaktör

Sodyum soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR): Hızlı nötron spektrumuna ve doğurgan uranyum çevrimi ile aktinid yönetimini verimli bir şekilde yapabilecek olan kapalı bir yakıt çevrimine sahip. Sekiz ülkenin geçen yarım asırda edinmiş olduğu 300 'reaktör-yıl'lık deneyimine dayalı olan bu tasarım, yakıt olarak fakirleşmiş uranyum kullanıyor. Tam döngülü aktinid çevrimi için iki seçenek var: Uranyum, plutonyum, zirkonyum ve diğer aktinidlerin, imalatı pirometalürjik süreçler gerektiren metal bir yakıt katıldığı 150-500 MWe'lik bir tip ve konvansiyonel sulu işleme tesislerinde yeniden işleme tabi tutulan konvansiyonel MOX yakıtlı 500-1500 MWe'lik bir diğer tip. Her ikisi için de, soğutucu çıkış sıcaklığı 550°C. Birincil sodyum devresi atmosfer basıncında çalışırken, ikincil bir sodyum devresi elektrik üretimini mümkün kılıyor. Ana araştırma konuları, yakıt çevrimi teknolojisi, sistem ekonomisi, pasif güvenlik garantisi. Oksit yakıt alanındaki mevcut deneyimler sayesinde, 2015'te devreye girebilir.

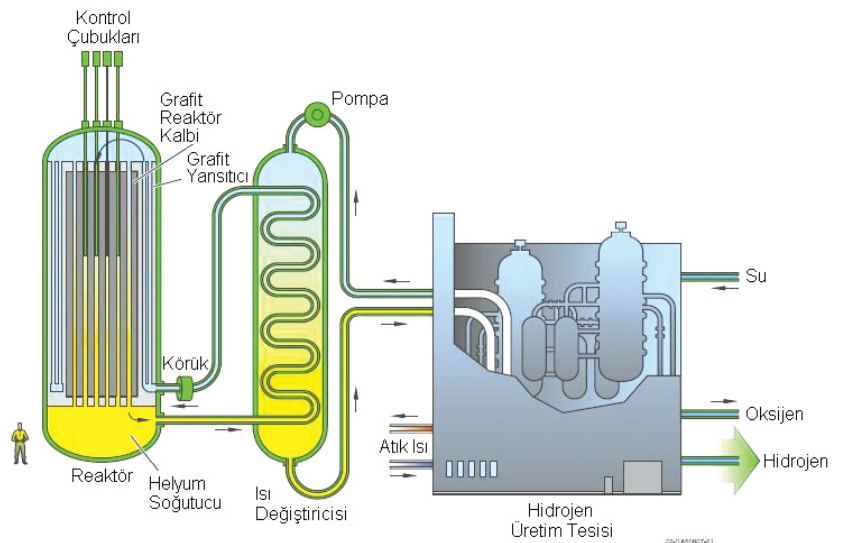
Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör (VHTR): Kayda değer deneyim birikimi bulunan grafit yavaşlatıcılı ve helyum soğutmalı reaktörlere dayalı olan bu tasarım, termal nötron spektrumuna ve tek geçişli uranyum yakıt çevrimine sahip. Esas olarak, örneğin kömürün gazlaştırılması ve termokimyasal hidrojen üretimi gibi elektrik dışı uygulamalarda, yüksek sıcaklıklı ısı süreçlerinin hızlı uygulanabilmesi için tasarım-

lanmış. Ancak, sistem, elektrik jeneratörü birimlerinin ilavesiyle, kojenerasyona yönlenebilir yapıda. Referans reaktörü 600MWe kapasiteli ve modüler. Helyum soğutmalı olup, kalp için iki seçenek sunuyor. Birincisi; Japonya'nın HTTR, General Atomics'in geliştirmekte olduğu Gaz Türbinli-Modüler Helyum Reaktörü (GT-MHR) veya Rusya'da geliştirilen diğer tasarımlarda olduğu gibi; prizma şeklindeki bloklardan oluşuyor. İkinci seçenek ise; Çin'in HTR-10 ve Güney Afrika'nın uluslararası ortaklarıyla beraber geliştirmekte olduğu PMBR tasarımlarındaki gibi; çakıl yatağı şeklinde. 1000°C çıkış sıcaklığındaki soğutucu gaz; ya doğrudan, Brayton döngüsüne dayalı

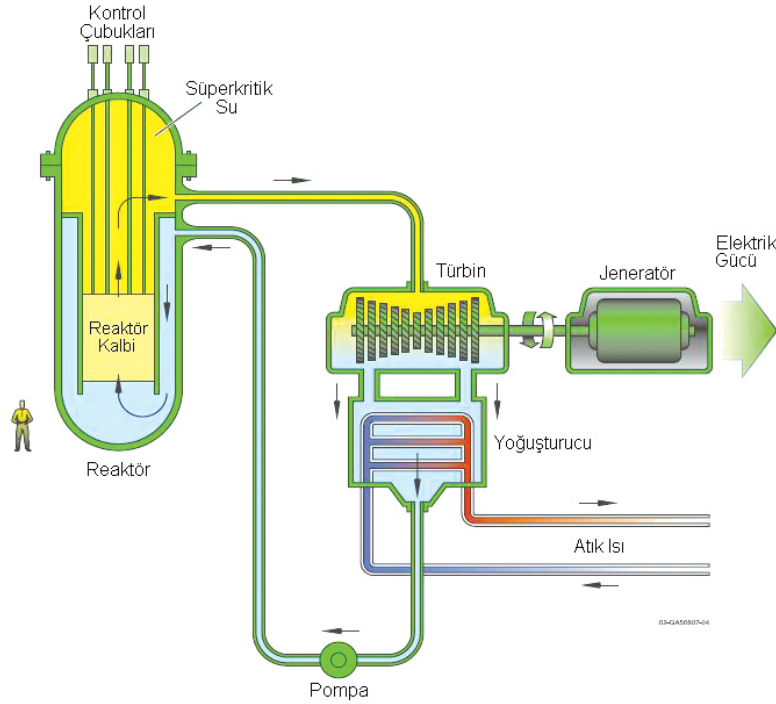
bir gaz türbinini yüksek verimle dön-dürüyor veya bir 'ara ısı değiştiricisi-buhar üretici' yardımıyla, elektriğin kojenerasyonu ile birlikte termokimyasal hidrojen üretimine imkan tanıyor. Yakıt açısından, U/Pu yakıt döngüsüne uyum sağlayabilmek gibi bazı esnekliklere sahip olmakla birlikte, çevrimi açık. Yüksek verimle hidrojen üretebilme yeteneği nedeniyle, ekonomik, yapısal güvenlik özellikleri nedeniyle de güvenlik ve güvenilirlik açısından olumlu değerlendiriliyor. Yakıt performansında iyileştirme, yüksek sıcaklık alaşımları, elyaf takviyeli seramikler ve kompozit malzemeler, zirkonyum-karbid yakıt zarfı konularında araştırma-geliştirme gereksinimi var. Hidrojen üretimi için ufukta görünen en yakın sistem bu. 2020'de devreye girebilir.

SüperKritik Su Reaktörü (SCWR):

Bilinen hafif su reaktörlerine dayalı olup, onların üçte bir katı daha yüksek, %44'e varan ısı verim sağlamak üzere; suyun termodinamik kritik noktasının üzerinde çalışan, çok yüksek basınçlı suyla soğutulan bir tasarım. 250 atmosfer (25 MPa) ve 510-550°C'deki süperkritik su, türbini; ikincil bir buhar sistemi olmaksızın, doğrudan çeviriyor. Basit kaynar sulu reaktörlerinkine benzer, pasif güvenlik özellikleri var. Hem de soğutucu faz değiştirmeden, yapısı görece basit. Yakıt olarak; açık yakıt döngüsü tercihiyle, zenginleştirilmiş uranyum oksit kullanıyor. Fakat, aktinidlerin tümünün konvansiyonel yeniden işleme



VHTR Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör



SCWR SüperKritik Su Reaktörü

sürecine dayalı olarak tekrar döngüye sokulabildiği bir hızlı reaktör olarak da inşa edilebilir nitelikte. Bu ikinci tip üzerindeki araştırmaların çoğu Japonya'da yapılmış ve başarısı, hızlı nötron spektrumuna dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine bağlı. 2025'te devreye girebilir.

Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR): Epitermal veya termal nötron spektrumuna, plutonyum ve diğer aktinidlerin ve

rimli kullanımına göre tasarlanmış, kapalı bir yakıt çevrimine sahip. Sodyum, zirkonyum ve uranyum floridlerinin karışımından oluşan sıvı yakıt; grafit kalp kanallarında dolaşarak, termal bir nötron spektrumu vücut veriyor. Ergimiş tuzda üretilen ısı, ara ısı değiştiricisinde ikincil soğutucuya, buradan da bir diğer ısı değiştiricisiyle güç üretim sistemine aktarılıyor. Yakıt elemanı imaline gerek yok. Fizyon ürünleri sürekli olarak ayıklanıp, aktinidlerin tü-

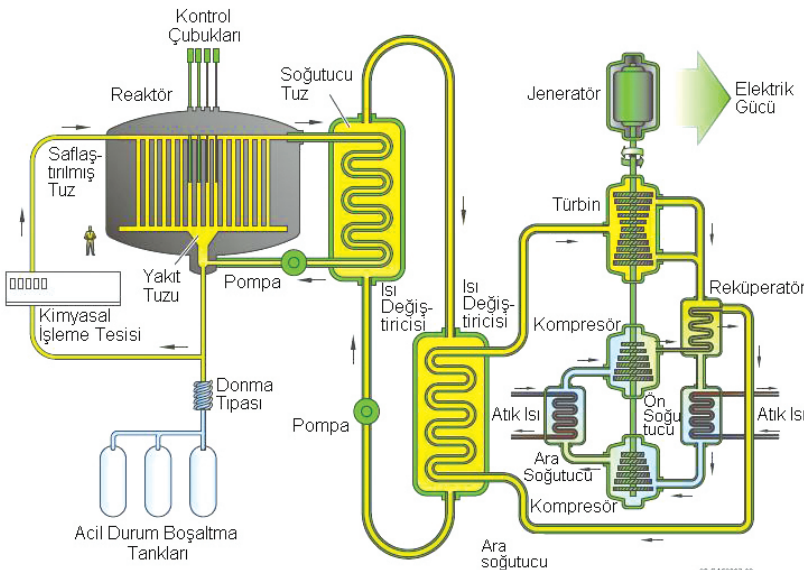
mü tekrar döngüye sokulurken, yakıt plutonyum ve U-238'le beraber diğer aktinidler ilave edilebiliyor. MSR yakıt döngüsünün çekici özellikleri arasında; üst düzey radyoaktif atıkların sadece fizyon ürünlerini içermeleri nedeniyle daha kısa yarılanma ömürlü olmaları; oluşan plutonyumdaki baskın izotopun Pu-242 olması nedeniyle, bomba yapımına uygun fisil malzeme miktarının azlığı ve pasif soğutmanın tüm kapasite büyüklükleri için mümkün olması nedeniyle, görece yüksek kalp güvenliği sayılabilir. Tasarımın bir diğer üstünlüğü, örneğin Fransız üretken reaktörü için 'milyar kWh' başına 50 kg toryum ve 50 kg U-238 olarak verilen, az yakıt kullanımı.

Ergimiş tuz reaktörü 1960'larda ABD tarafından, konvansiyonel hızlı üretken reaktöre ana seçenek olarak geliştirilmiş ve bir prototipi işletilmişti. Fakat yakın zamanlardaki çalışmalar, içinde toryum ve U-233 yakıtı çözülmüş olan lityum ve berilyum florid soğutucu üzerinde yoğunlaştı. GIF'in referans sistemi 1000MWe güç düzeyinde olup, 5 atmosferin (0,5 MPa) altında, görece çok düşük basınçlarda çalışıyor. Soğutucunun 700°C olan çıkış sıcaklığı yüksek verim sağlamakta ve bunun, termokimyasal hidrojen üretimi amacıyla 800°C'ye çıkartılması düşünülüyor. Alt sistemlerinin sayıca fazla olması nedeniyle, ekonomikliği kuşku. 2025'te devreye girebilir.

Sonuç

Böylesine büyük bir araştırma girişiminde güçlü bir uluslararası işbirliğine, hem geniş yer, hem de gereksinim var. Bu işbirliğinin esnek de olması gerekiyor. Katılımcı ülkelerin uzmanlaşmış araştırmaya ilgileri yanında, bu araştırmaların gerçekleştirme maliyetlerinin yüksek olması nedenleriyle, bazı tasarımlar kantılanma aşamasına ulaşamayabilir. Ulaşanlar, güvenli bir enerji geleceğinin vazgeçilemez temel bileşenlerinden bazılarını oluşturacak.

Prof.Dr. Vural Altın



MSR Ergimiş Tuz Reaktörü

Kaynaklar:
A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, December 2002, Issued by the U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum.
Pitcher, E., Chadwick, M., Esch, E., Haight, B., Hill, T., Rundberg, B., Talou, P., Kawano, T., Ullmann, J., Wender, S., Nuclear Cross Section Measurements within the Advanced Fuel Cycle Initiative, Los Alamos National Laboratory.

TARİHÇE

Nükleer enerjinin sivil kullanımı, ABD Başkanı Dwight D. Eisenhower'ın 1953 yılında BM'de yaptığı 'Barış için Atom' konuşmasının ardından başladı. İlk reaktörler 1950'li yılların ortalarında, ABD, Rusya ve İngiltere'de yapıldı. Tasarıma göre proje ömürleri, fosil yakıt santrallerinde olduğu gibi 40 yıl kadardı. Birim maliyetler yaklaşık %80 oranında ilk yatırım, %20 oranında da yakıt giderlerinden oluşmaktaydı. Halbuki, fosil yakıt santralleri için bu oranlar, hemen hemen tersineydi. Dolayısıyla, nükleer santral bir kez kurulup, amortisman bedelleri ilk 5-10 yılda ödendikten sonra; proje ömrünün kalan kısmı boyunca üretim, düşük işletme ve yakıt harcamalarıyla yapılacaktı. Bu, birim 'yaşam döngüsü maliyetleri'nin, alternatiflerine göre çok daha düşük olacağı anlamına geliyordu. Ancak, fosil yakıt santralleri 1-2 yıl içinde kurulabilirken, bir nükleer santralin inşaatı 4-5 yıl gibi uzun bir süre gerektirmekteydi. Yatırımın geri dönüşünü geciktiren bu kısıt, bileşenlerin gecelik maliyetlerindeki belirsizliği artırdığı gibi, finans maliyetini de yükseltiyordu. Westinghouse ve GE firmaları rekabete girip, 60'lı yıllarda sabit fiyatla anahtar teslimi proje önermeye başlayınca, bu riskler azaldı. Gerçi, adı geçen temin edici firmalar bu operasyonlarından büyük zarar edeceklardı. Fakat, nükleer santralleri fosil yakıt emsalleri gibi işletilebileceğini sanan küçük yerel güç üretim şirketleri bile, reaktör siparişi vermeye başladılar. Teknoloji 1970'lerin başlarına kadar, başta ABD olmak üzere, Batılı ülkelerde hızla yayıldı. Bu gelişmede, kamunun sağladığı araştırma geliştirme desteği ve teşvikleri de önemli rol oynadı.

Sektördeki büyümeyle birlikte artan yakıt talebinin, doğal uranyum fiyatlarını yükselteceği beklentisi vardı. Kısmen de bu yüzden, yakıt döngüsü başlangıçta; kullanılmış yakıtın 'yeniden işlenmesi'ni ve içeriğindeki uranyumla plutonyumun ayrıştırılıp, 'hızlı üretken reaktörler'de tekrar kullanılmasını öngören 'kapalı yakıt çevrimi' şeklinde tasarlanılmıştı. Böylelikle, hem doğal uranyumun enerji potansiyeli daha verimli kullanılacak, hem de sonuçtaki radyoaktif atıkların hacmi azaltılmış olacaktı. Yakıtın yeniden işlenmesi ayrıca, uzun yarı ömürlü çekirdekleri uzaklaştırıp yaktığından, atığın saklama süresini, aksi haldeki birkaç bin yıldan birkaç yüzyıla indirmekteydi. Atık miktarı ve saklama süresinin kısılması, yönetimini kolaylaştıran hususlardı. Nihai depolamanın, milyonlarca yıl süreyle değişmeden kalabilen jeoloji katmanlarında yapılması tasarlandı. ABD'de bu amaçla, Nevada eyaletindeki Yucca Dağı yer olarak seçildi.

1973 petrol krizinin varil fiyatını 2\$'dan alıp 8\$'a oturtmasından sonra, genel enerji fiyatlarında, bileşik kaplar ilkesi gereği artışlar yaşandı. Fakat, izleyen yıllarda geliştirilen tasarruf önlemleri sayesinde, Batılı ülkelerde



Silindirik şeklindeki koruma binalarının içinde iki nükleer reaktör ünitesi ve arkada soğutma kuleleri.

elektriğe talep azaldı. Ayrıca, krizin Dünya çapında tetiklediği enflasyon ABD'de çift basamaklara ulaşınca, nükleer santrallerin ilk yatırım giderlerinin finans maliyeti artmıştı. Öte yandan, üretim şirketleri uzmanlık alanlarının dışında olan bu tesisleri yönetmekte zorlandılar ve sektörün ortalama kapasite kullanım faktörü düşük düzeylerde, örneğin ABD'de %50'ler civarında kaldı. Kar marjları düşerken, yeni siparişler azaldı. Halbuki, kaynakları yetersiz olan Fransa, fosil yakıtlar açısından dışa bağımlılığını azaltma kararıyla, Westinghouse firmasından lisansladığı reaktör teknolojisini standartlaştırmaya yönelmişti.

1974 yılında Hindistan'ın 'Gülümseyen Bud'a' adını verdiği ilk nükleer denemesini başarıyla gerçekleştirmesinden sonra, ABD yönetiminde, yakıtın yeniden işlenmesi konusunda tereddütler belirdi. 1977 yılında, süreç sırasında ayrıştırılan plutonyumun, nükleer silah yapımını kolaylaştıracağı endişesiyle, yakıtın yeniden işlenmesi yasaklandı. Bu durumda, kullanılmış yakıtın tümünün atık olarak depolanması gerekmektedir. Bunun için, Nevada eyaletindeki Yucca Dağı'nın altında bir galeriler sisteminin inşasına karar verildi. İsveç ve İsviçre benzeri birer karar aldılar. Fransa, İngiltere, Almanya ve Japonya ise, yeniden işleme seçeneğini tercih etti.

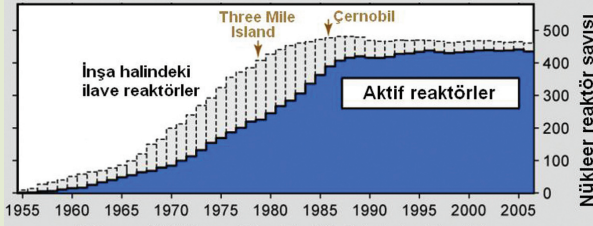
Mart 1979'da, ABD'nin *Three Mile Island* nükleer santralindeki reaktörlerden birinin kalbi, daha önce yine ABD'deki askeri bir reaktörde (SL-1) yer almış olana benzer şekilde, operatör hatasından kaynaklanan ve olası en kötü senaryoyu oluşturan 'soğutucu kaybı kazası' sonucunda eridi. Gerçi basınç tankı erimemiş ve kazanın sonuçları koruma kabının dışına taşmamıştı. Kaza sırasında can kaybı olmadığı gibi, çevreye aşırı miktarda radyasyon salınmadı. Fakat, bilindiği kadarıyla ilk kez, sivil halka yönelik bir 'yapay radyasyon' riski yaşanmıştı. Batılı ülkelerin genelinde, bu arada Güney Kore'de de, nükleer teknoloji uygulamaları ve güvenlik denetimlerinde kapsamlı yeni düzenlemelere gidildi. Güvenlik sistemlerinde şart koşulan iyileştirmeler, süregiden inşaatları yavaşlatıp, yenileri için öngörülen lisanslama ve inşaat sürelerini uzattı. Bunlar nükleer enerjinin rekabet gücünü azaltan gelişmelerdi.

İran'da aynı yıl gerçekleşen devrim ve ardından Irak'la 1980 yılında başlayan savaş, ikinci bir petrol krizine yol açtı. Varili 12\$'dan

24\$'a tırmanan petrolün fiyatındaki mutlak değer artışı, 1973'tekinin iki misli kadardı. Nükleer enerji için yeni bir şansın doğduğu sanıldı. Daralan petrolün tüketiminin yerini alabilirdi. Ama karşısına güçlü bir rakip çıktı. Pompalama ve soğutma tekniklerinde o zamana kadar kaydedilen gelişmeler, doğal gazın uzun mesafelere naklini ekonomik hale getirmişti. Bu yenden keşfedilen eski yakıtın, boru hatlarıyla dağıtımı ve başta elektrik üretimi olmak üzere kullanımı, tüm dünyada hızla yayıldı. Doğal gazın birim enerji içeriği başına fiyatı, eşdeğer düzeyde kullanışlı ve daha temiz olmasına karşın, petrole göre daha düşüktü. Dünya ekonomisi ikinci petrol şokunu biraz da bu sayede, görece kolay emebildi.

1986 yılında Sovyetler Birliği'nin Çernobil nükleer santralindeki reaktörlerden birinde, kalp eriyip de basınç tankını patlatınca, bu seferki kazanın sonuçları, reaktörün bütünlük taşıyan bir koruma binasına da sahip olmaması yüzünden, kontrol altında tutulamadı. Oluşan radyasyon bulutu haftalarca, Türkiye dahil Avrupa üzerinde dolaşarak, yağışlarla birlikte besin zincirine ulaştı. Çernobil civarındaki en fazla kirlenen bölgelerde yaşayan 135.000'den fazla insan boşaltılıp, yeniden yerleşime tabi tutuldu ve reaktör merkezli 30 km yarıçapındaki bir alan yasak bölge ilan edildi. Kaza, ciddi operatör kusurlarının yanında, buradaki RBMK tipi reaktörlerin, düşük güç düzeylerinde kararsızlığa yol açabilen pozitif boşluk katsayısına sahip olan yapısından ve kontrol çubuklarındaki tasarım hatasından kaynaklanmıştı. Kazadan sonra Sovyetler Birliği ile Batı arasında, sivil nükleer güvenlik alanındaki işbirliği geliştirildi. Çernobil'deki üniteler kapatıldı ve RBMK tipi diğer reaktörlerde, Batı'nın asgari güvenlik standartlarını sağlayacak değişiklikler yapıldı. Kazanın çevre etkileri izlemeye alındı.

Bu iki kazadan dolayı, nükleer endüstrinin güvenlik performansı ağır bir yara almıştı. Dikkatler üzerinde toplandı. Geçmişte, Batılı ülkelerdekiler de dahil olmak üzere, dünyanın çeşitli yerlerindeki yüzlerce nükleer santralde, çoğu önemsiz olmakla birlikte, onlarca radyasyon sızıntısı olmuştu. Bu sızıntılardan bazılarının zamanında gizlenmeye çalışılmış olduğu ortaya çıkınca, sektöre karşı güven iyice sarsıldı. Geniş kamuoyu kesimlerinin nezdinde, nükleer reaktörler atom bombalarıyla özdeşleştirilmeye ve radyasyon riski, biraz da görünmez bir tehdit oluşturması nedeniyle, abartılı bir şekilde algılanmaya başlandı. Nükleer enerji teknik bir konu olmaktan uzaklaşıp, büyük oranda siyasallaştı. Batılı ülkelerdeki gösteri, direniş ve davalar, başlanmış olan santral inşaatlarının devamını zorlaştırdı. Bu projelerin sahibi olan üreticiler, ağır finans yüküyle karşı karşıya kaldılar. ABD'de 1988 yılında, 1929'deki Büyük Kriz'den beri ilk kez bir kamu güç üreticisi iflas etmişti. Küçük ölçekli nükleer üreticiler, santrallerini uygun fiyatla, büyük şirketlere satmaya başladılar. Bu arada enerji piyasalarına getirilen serbestleştirme dalgalanmalarına yol



Dünya Nükleer Güç Endüstrisinin Tarihi

açınca, bir de fiyat belirsizliğiyle karşılaşan yatırımcılar sektörden uzaklaştı. Yeni siparişler tümüyle dururken, eskilerin çoğu iptal edildi. İtalya, Almanya ve İsveç, nükleer üretimden çekilme kararı aldılar.

Sektördeki duraksama, doğal uranyum fiyatlarının beklendiği gibi artmayıp, tersine düşmesine yol açtı. Bu durumda, yakıtı daha verimli kullanan kapalı çevrime yönelmek ve hızlı reaktör teknolojisini geliştirmek, ekonomik olmaktan uzaklaştı. Yakıtın yeniden işlenmesi yerine, hafif sulu reaktörlerde bir kez kullanıldıktan sonra atık sayılmasını öngören 'tek geçişli yakıt döngüsü' yaygınlaştı. 'Hızlı üretken' reaktör programı, karşılaşılan bazı teknik sorunların da etkisiyle askıya alındı. Öte yandan ABD'de, kullanılmış yakıtın nihai depolanması için Yucca Dağı'nda yapımı planlanan tesisin inşası, kamuoyundaki tartışmalar devam ettiğinden ertelendi. Nihai depolamaya geçilemeyince, kullanılmış yakıtlar reaktörlerin bekletme havuzlarında birikti. Bu havuzların kapasitesi, yeniden işleme düşüncesiyle geçici depolama için tasarlanmış olduklarından, düşük tutulmuştu. Bazıları dolmaya başlayınca, soruna çözüm bulunması gerekti. En eski yakıtların ürettiği bozunma ısı, aktiviteyi artık azalmış olduğundan, havanın doğal taşınımıyla soğutulabilecek düzeylere inmişti. Havuzlardan çıkarılıp beton bloklara gömüldükten sonra santral alanlarında kuleler halinde dikilerek saklanmalarına başlandı. Kimyasal tepkimelerin milyon katı düzeyinde yoğun enerji üreten ve temelde bu nedenle dikkatli yönetilmesi gereken nükleer teknoloji, hızlı büyüme dönemindeki tökezlemesinin ardından gelen duraksama döneminde sorunlarını halle yöneldi. Bu süreçte, fosil yakıtlar cephesinde yaşanan gelişmeler de yardımcı oldu...

Doğal gaz ticareti ağırlıklı olarak, boru hatlarıyla birbirine bağlanabilen yakın coğrafyalar arasında yapılabildiğinden, petrolünki gibi dinamik ve bütünlük bir Dünya piyasasına sahip olamadı. Uzun vadeli anlaşmalarla belirlenen fiyatı, petrolü hep geriden izlemekle beraber, ona endeksli olarak arttı. ABD'de, marjinal üretime karşılık gelen 'zirve yük talebi' artık bu yakıtla karşılanmaktaydı. Dolayısıyla, doğal gaz sektörün fiyat belirleyicisi haline geldi ve pahalılaştıkça, elektrik fiyatları yükseldi. Halbuki, nükleer santrallerin amortisman bedelleri artık ödenmiş, üretimin birim maliyetleri 1,7 c/kWs'e kadar inmişti. Bu durum dev üretim birimlerini, %200'e varan marjlarla çalışan kar makineleri haline getirdi. İşahları kabaaran, ancak yeni santral da kuramayan büyük nükleer elektrik üreticileri 1990'ların başların-

da; güvenlik önlemlerini arttırmak ve işletme yöntemlerini geliştirmek suretiyle, ellerindeki reaktörlerle daha fazla üretim yapmaya yöneldiler. Karlılıklarına sırt verip, ölçeklerinin ekonomisinden de yararlanarak, bunu başardılar. Bakım, onarım ve yakıt değiştirme süreleri kısaltıldı. Üretimde gereksiz kesintilere yol açan olağan dışı durumların sayısı azaltıldı. Bu sayede, 1990-2003 yılları arasında, ortalama kapasite faktörü %66'dan %91'e çıkarken, üretim artışı 23.000 MWe güç eşdeğerine ulaştı.¹ Bu durum, 103 reaktörlük filonun 98.000 MWe'lik üretim kapasitesini, 1000'er MWe gücünde 23 reaktör ilave edilmişçesine genişletmiş oldu. Sonuç olarak, kWs başına işletme maliyetleri aynı dönemde %44 azaldı. Benzeri gelişmeler diğer Batılı ülkelerde ve Güney Kore'de de yaşandı. Bu nedendir ki, 1990'lardan sonra; Dünya'daki kurulu nükleer güç, çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerdeki ilavelerle, yılda sadece %1 oranında artarken, nükleer elektrik üretimi yılda %2-3 artarak, Dünya toplam elektrik üretimindeki %16 payını koruyabildi. Bu süreç, III. Nesil tasarımların evrimine yol açtı.

Bu arada, yine 1990'lı yıllarda başlayan, fosil yakıt kaynaklı sera gazlarının küresel ısınmaya yol açtığı yönündeki endişeler, bilimsel kanıtlardaki artışla birlikte yoğunlaştı. Batılı ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneldiler. Rüzgar gücü ekonomik hale gelip, düşük bir tabandan başlamış olmakla birlikte, hızla büyüdü. İklim değişikliğiyle ilgili uluslararası anlaşmanın temelini oluşturan Kyoto Protokolü, Rusya'nın da imzalamasının ardından, Şubat 2004'te işlerlik kazandı. Anlaşmanın başarılı olup olmayacağı bilinmiyor. Ancak başarılı olabilmesi için, nükleer enerjiye gereksinim var...

Kyoto Protokolü'nü imzalamış olan Batılı ülkeler, yükümlülüklerini yerine getirebilmek ve gerçekleştiği takdirde emisyon ticaretinden zarar görmemek için, fosil yakıt bağımlılıklarını azaltmakta kararlı. Bu yöneliş zorlayan bir başka etken, fosil yakıtların Dünya'nın istikrarlı coğrafyalarındaki ülkelerin elinde olması. Bu durum, temin güvenliği açısından risk olarak algılanıyor. Halbuki uranyum kaynaklarının çoğu, Kanada ve Avusturalya gibi istikrarlı ülkelerde.

Öte yandan, bu ülkelerin II. Dünya Savaşı'ndan beridir yaşadıkları refah artışını omuzlamış olan eski güç santralleri, ömürlerini doldurmak üzere. Hakim olan yaşam biçimlerinin ayakta tutulabilmesi için, yenilenmeleri lazım. Ayrıca, kentlerdeki hava kirliliği ve gürültünün azaltılmasına yönelik olarak geliştirilen elektrikli hibrid taşıma araçlarının yaygınlaşması halinde, talebin artması kaçınılmaz. Bu gereksinimlerin, en azından görünür gelecekte, sadece yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması mümkün görünmüyor. Dolayısıyla, Batılı ülkeler bu kaynakları geliştirmeye devam eder-

ken, bir yandan da kesintisiz ve sıfır emisyonlu bir güç kaynağı oluşturan nükleer enerjiyle desteklemek zorunda.

Nitekim, Finlandiya, Olkiluoto santral alanında 5. reaktörünü kuruyor. İnşaat, gecikmelere ve maliyet artışlarına karşın devam etmekte. ABD, Kyoto Protokolü'nü imzalamamış olmasına rağmen, yeni nükleer santraller kurma kararı aldı. Üreticilerin gelecek yıl, 12 ünitenin yapımı için lisans başvurusunda bulunması bekleniyor. Bu arada, ABD ve Almanya'da, 25-30 yıl olarak tasarlanmış olan bazı nükleer santrallerin proje ömürleri 30-40 yıla uzatıldı. Almanya ve İsveç, nükleer üretimden çekilme kararlarını gözden geçirme sürecinde.

Ancak, alınan kararların başarıyla uygulanabilmesi için, kamuoylarının nükleer teknolojinin sunduğu risklerin kabullenilebilir düzeyde olduğuna kanaat getirmesi lazım. Özellikle de, Çernobil benzeri bir kazanın bir daha asla yer almayacağına... Çünkü, IAEA ve Dünya Sağlık Örgütü'nün başını çektiği 'Chernobil Forumu' tarafından 2005 yılında açıklanan kapsamlı bir inceleme raporuna göre², kazanın maddi faturası 100 milyar doları aşmış durumda. Yine de, insan sağlığı açısından sonuçları, ilk elde korulduğu kadar büyük olmadı. Kaza ile doğrudan bağlantılı ölümlerin sayısı, 2005 yılı ortası itibarıyla, 47'si ilk müdahaleyi yapanların arasından olmak üzere, 56. Uzun vadede; yenden yerleşime tabi tutulan nüfustaki ömür boyu kanser vakalarının %3 oranında artması ve en fazla radyasyona maruz kalmış olan 6,6 milyon kişiden 4.000 kadarının, radyasyon kökenli kanser ölümüyle karşılaşması bekleniyor. Bu sayı Çin'de halen, resmi istatistiklere göre kömür madenlerinde bir yılda ölenlerin sayısından az. Öte yandan, kontrol grubunun dörtte biri zaten, Çernobil kökenli radyasyondan kaynaklanmayan, 'kendiliğinden oluşan kanser'ler nedeniyle öldüğünden, gelecekteki kanser vakaları arasında kazaya bağlı olanları belirlemenin zor olacağı düşünülüyor.

Gerçi, Batı tipi bir nükleer santralde reaktör kalbinin erimesi dahi, kazanın sonuçları 'koruma binası'na hapsolmuş olacağından, sivil yaşam için ciddi tehdit oluşturmaz. Fakat böyle bir kaza, örneğin 1000 MWe'lik bir santral ünitesinin maliyeti 2-2,5 milyar dolar düzeyinde olduğundan, ağır maddi zarara yol açar. Üreticiler de bunun farkındalar. Dolayısıyla, reaktör sistemlerinin 'kendiliğinden güvenli' hale getirilmesine çalışılıyor. Halen Batı'da uygulanan nükleer güvenlik (NRC) kurallarına göre, reaktör tasarımları, kalbin erime veya hasar görme olasılığının "10.000 çalışma yılında 1'den az" olmasını sağlamak zorunda. Fakat çoğu nükleer santral işleticisi şimdiden, "100.000 çalışma yılında 1'den az" kısıtını kullanıyor. Şimdiki önde gelen tasarımlar "1 milyon çalışma yılında 1'den az" kısıtını sağlamakta. Üzerinde çalışılan IV. Nesil tasarımlar ise, "10 milyon yılda 1'i hedefliyor.

¹EIA, <http://www.eia.doe.gov/ceat/nuclear/page/analysis/nuclearpower.html>

²In Focus. Chernobyl, IAEA Raporu, 2006.