

Nükleer Enerji ile .. Elektrik Üretimi

Osman K. Kadiroğlu
C. Niyazi Sökmen
H.Ü. Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

GÜNÜMÜZDE gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin en önemli gereksinimi enerjidir. Her ne kadar tam bir ölçüt olmasa da ülkelerin gelişmişlik düzeyleri, üretip tükettikleri enerji ile ölçülür. Bazı ülkeler ürettikleri enerjiyi çok verimli bir şekilde kullandırlarken, bazıları bu konuda o denli başarılı olamazlar. Bazı ülkeler de kendileri kullanmadıkları halde çok miktarda enerji hammaddesi üretirler. Enerji üretim ve tüketiminin çok farklı yöntemleri olsa da, tüm ülkelerin ucuz, bol ve temiz enerji kaynaklarına gereksinimleri vardır.

Endüstrileşme ile başgösteren buhar gücü gereksinimi dolayısıyla, kömür kullanımı büyük bir hızla artmıştır. Daha sonraları elektrik enerjisinin kullanılmasına başlaması ve içten

yanmalı motorların kullanım alanının genişlemesi ile elektrik üretiminde kömür ve petrol, çok büyük bir hızla artmıştır. Sonunda endüstri ve çağdaş yaşam için en önemli hammadde, fosil yakıtlar olmuştur.

Fosil yakıtların kullanımı, çözümü çok zor sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunların ilki, tükenen hammadde kaynaklarıdır. Fosil yakıtlar milyonlarca yılda oluşmuş, doğanın bizlere, daha doğrusu bizden sonraki nesillere bir armağanıdır ve sentetik olarak yapılanmaları son derece zordur. Çok sayıdaki petrokimya ürünleri spektrumunu inceleyerek petrol ve bazen de kömürün ne denli vazgeçilemez birer doğa harikası olduklarını rahatlıkla algılayabiliriz. Kömür petrol kadar bir kimyasal değere sahip değildir. Kalitesiz kömürlerin yakılmasının neden olacağı sorunlar ortadadır.

Fosil yakıtların içerdiği maddelerin büyük bir yüzdesini karbon ve hidrojen oluşturur. İçlerinde az da olsa kükürt, yanmayan maddeler ve radyoaktif maddeler de bulunur. Petrol, kömüre kıyasla daha az kirliliğe yol açar. Fosil

yakıtlar yakıldığında ortaya doğal olarak CO₂ ve SO₂ gazlarının yanı sıra, radyoaktif maddeler ve kül çıkar. Ortaya çıkan CO₂ gazı sera etkisine, SO₂ gazı ise asit yağmurlarına neden olur. Sera etkisinin neden olduğu atmosfer sıcaklığı artışı yıllardır gözlenmektedir. Asit yağmurları bitki örtüsüne ve canlılara zarar verir. İngiltere'de yakılan kömür yüzünden Finlandiya'nın göllerindeki balıklar asit yağmuru nedeni ile ölmektedirler. Radyoaktif maddeler, linyit kömüründe bulunurlar ve linyit yatakları ikincil uranyum madenleri olarak kabul edilir.

Geçtiğimiz günlerde Yatağan'da baş gösteren radyasyon alarmının nedenlerini kömürün içerdiği radyoaktif maddelerde aramak gerekir. Yakılan kömürün beş veya onda birlik kısmı, kullanım alanları çok sınırlı olan ve çevreyi kirleten kül olarak atılır. Bu küller, Elbistan linyitlerinde olduğu gibi çok uçucu olabilirler. Yanma sıcaklığına bağlı olarak kullanılan havanın içinde bulunan azot gazının yanması ile oluşan NO_x gazı, atmosferde ozon ile etkileşime girip ozon miktarını azaltır. İçten yanmalı motorlar ve doğal gaz santalleri, ozon tabakasının delinmesine istemeden katkıda bulunmaktadır.

Kömür dışındaki fosil yakıtların, stratejik önemleri de vardır. Son petrol ambargolarının dünya ekonomisine yaptığı yıkıcı etki ve doğal gaz boru hattının geçtiği ülkelerin politik şantajları, bilinen birer gerçektir.

Nükleer Yakıttan Elektrik

Nükleer enerjinin hammaddesi olan uranyumun hiç bir endüstriyel kullanım alanı yoktur. Uranyum doğada bol miktarda bulunmaktadır. Son maden aramaları sonucu Avustralya ve Kanada'da büyük uranyum yatakları olduğu ortaya çıkmıştır. Uranyumun fiyatı bu nedenler dolayısıyla zaman içinde sürekli azalmıştır. İkinci bir nükleer hammadde ise toryumdur ve Türkiye, dünyanın en zengin toryum yatakla-

CANDU yakıt demeti ve demeti oluşturan yakıt tüpleri ve yakıt lokmaları. Doğal uranyum oksitten yapılan lokmalar zirkonyum alaşımından yapılmış yakıt tüplerine konur ve tüp kapakları kaynakla kapatılır.

Bir yakıt lokması. Uranyum oksitten preslenip fırında pişirilerek yapılan bu seramik yakıt lokması yaklaşık 5 gm ağırlığında olup, reaktör içinde üç yıl kalmakta ve 4000 kw/ saat enejî üretmektedir.



rına sahiptir. Nükleer hammadde nin stoklanabilir olması, onun petrol gibi ekonomik silah olarak kullanılmasını imkansız kılar.

UO₂'den (uranyum pası) yapılan 1 cm çap ve yüksekliğindeki seramik yakıt lokmaları, üst üste 3,5-4 m uzunluğundaki ince bir metal zarf içine yerleştirilirler. Elde edilen yakıt çubukları, hafif veya ağır su içeren dik veya yatık basınç tankları içine yerleştirilir. Belirli geometrik düzende ve belirli miktarda bir araya gelen yakıt nötronların yardımı ile fisyon sonucu enerji üretmeye başlar.

Ortaya çıkan bu çekirdek enerjisi yakıt çubuklarını ısıtır. Yakıt çubuklarının su veya ağır su ile soğutulması ile yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar elde edilir. Buharın bir türbinde genişletilmesi ile tıpkı diğer fosil yakıtlı santrallerde olduğu gibi, ısı enerjisi mekanik enerjiye,

türbinin çevirdiği jeneratör ile de, mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür.

Nükleer enerjinin kullanılmaya başlamasından bugüne dek geçen yaklaşık elli yıl içinde bir çok nükleer reaktör tipi tasarlanmış, imal edilmiş ve çalıştırılmıştır; ancak günümüzde ticari olan nükleer santral tipleri çok az sayıdadır. Hafif su teknolojisi adını verdiğimiz ve bildiğimiz normal su ile soğutulan reaktörleri kapsayan teknoloji, ağır su teknolojisi adını verdiğimiz hidrojenin bir izotopu olan deteryumdan yapılan ağır su ile soğutulan reaktörleri kapsayan teknoloji, günümüzde ticari olarak kullanıma sunulmaktadır.

Ayrıca yüksek sıcaklıkta çalışan gaz soğutmalı reaktörler ve sıvı metal soğutmalı hızlı üretken reaktörler, gelecekte kullanıma girmeye adaydırlar.

Temiz ve Ucuz Elektrik

Nükleer santraller, normal çalışma düzenlerinde çevreyi kirletecek hiç bir etki yaratmazlar. Fosil yakıtlı santrallerin aksine, çevreye zararlı olan CO₂, SO₂ ve NO_x gazlarını salmazlar ve kül bırakmazlar. Fosil yakıtlı santral yerine bir nükleer santral yapılması durumunda, fosil yakıtlı santralin çevreye atacağı zararlı maddelerin sözkonusu olmaması nedeni ile nükleer santrallerin çevreyi temizlediği de söylenebilir. 1000 MWe gücündeki bir hafif-su soğutmalı nükleer reaktörden yılda yaklaşık 27 ton (7 m³) kullanılmış yakıt çıkar. Bu miktar, aynı kapasitedeki bir kömür santralinin atık

miktarına göre ağırlık olarak 250-300 bin kere, hacim olarak 70-80 milyon kere daha azdır. Hemen belirtelim ki nükleer santrallerin gündelik atıkları fosil-yakıtlı santrallerin atıklarına kıyasla yok denecek kadar azdır ve normal çalışmaları sırasında çevreye yaydıkları radyasyon, nükleer santral civarında yaşayan bir kişinin doğal kaynaklardan almakta olduğu radyasyonun 100 ile 200'de biri kadardır. Nükleer enerjinin elektrik üretiminde kullanılmaya başlamasından bu yana ticari nükleer reaktörlerin işlemesi sonucu ortaya çıkan atıklar, şimdilik santrallerde saklanmakta ve ileriki bir tarihte gömülmeyi beklemektedir. Nükleer atıkların tehlikesi, kurşun, cıva veya arsenik gibi zehirli atıklara kıyasla da-

ha azdır. Nükleer atıkların radyoaktivitesi, zamanla durduğu yerde azalırken, zehirli atıklar çevreye atıldıkları ilk günkü gibi kalırlar.

Normal işletme sırasında çevreyi hemen hiç kirletmeyen nükleer santrallerin en korkulan yönü, bir kaza sonrasında çevreyi temizlenemez şekilde kirletme olasılıklarıdır. Nükleer teknolojinin elli yıla yakın

Nükleer Atıklar

Okan Zabunoğlu
H.Ü. Nükleer En. Müh. Bim.

Hiçbir yakıt enerji üretmek üzere yakıldığında yok olmaz; ancak "atık" adını verdiği başka formlara dönüşür. Bu kömür için de böyledir; uranyum için de. 1000 MWe gücündeki bir hafif-su soğutmalı nükleer reaktörden çıkan kullanılmış yakıt, yaklaşık olarak %95.5 uranyumdioksit, %3.5 fisyon ürünleri (atom ağırlıkları farklı izotoplar), %0.9 plutonyum ve %0.1 uranyum-ötesi elementler (neptünyum, amerisyum, kuryum) içerir. Yani orijinal yakıtın yalnızca %4.5'i eksilmiştir; bu eksilen kısmın yerini reaktörde çeşitli nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan fisyon ürünleri, plutonyum ve uranyum-ötesi elementler almıştır. Kullanılmış nükleer yakıtları işleyerek (reprocessing) uranyum ve plutonyumu geri kazanmak olasıdır. Bu durumda geriye fisyon ürünleri ve uranyum-ötesi elementlerden oluşan bir karışım kalır; işte bu karışıma, Yüksek Aktiviteli Nükleer Atık adı verilir. Eğer kullanılmış nükleer yakıtların yeniden işlenmesi yolu benimsenmezse - bu ispatlanmış bir teknoloji olmasına rağmen oldukça külfetli ve ekonomik açıdan tartışmalı bir işlemdir - o zaman kullanılmış yakıtın kendisi Yüksek Aktiviteli Nükleer Atık (içerdiği yüksek radyoaktivite nedeniyle) olarak nitelendirilir.

Kimyasal ayırım süreci içinde önce uranyum ve plutonyum son derece aktif fisyon ürünlerinden; daha sonra da bir dizi darbeli kolon aracılığıyla birbirlerinden ayrılırlar.

Yüksek Aktiviteli Nükleer Atıkların, insana ve çevreye zarar vermeyecek şekilde tasfiyesi önemli bir konudur. Bilimsel çevreler, nükleer atık tasfiyesini yeni bir teknoloji gerektiren teknik bir problem olarak görmedikleri halde, kamuoyu, nükleer atıkları diğer endüstriyel atıklara kıyasla yaşamı ve çevreyi daha fazla tehdit eden bir unsur olarak algılamaktadır. Bu durum nükleer teknolojiye sahip gelişmiş ülkelerde, yüksek aktiviteli nükleer atıkların tasfiyesi konusunda alınması gereken politik kararları geciktirmiş ve sorunun "çözülmemiş bir problem" olarak da algılanmasına neden olmuştur. Örneğin Amerika'da kömür yakmaktan kaynaklanan hava kirliliğinin her yıl 10000 ölüme yol açtığı ve bu durumun nisbeten "çözülmüş bir sorun" olarak görüldüğü düşünülürse, nükleer atıkların tasfiyesini "çözülmemiş bir problem" olarak ele almak da pek doğru değildir.

Yüksek Aktiviteli Nükleer Atıkların yer yüzünün 500 ile 1200 m altında özel olarak seçilmiş jeolojik oluşumlarda inşa edilecek büyük bir maden işletmesini andıran depolara (repository) gömülmesi planlanmakta ve bu konudaki çalışmalar sürmektedir. Yer se-

çiminde jeolojik ve çevresel faktörler (yeraltı suyu hareketleri, kaya yapısı, erozyon, sel, deprem ve volkanik hareketler, doğal kaynaklar, nüfus yoğunluğu, vb.) dikkate alınır. Yeraltına gömülü nükleer atıkların biyosfere ulaşmasını sağlayabilecek tek mekanizma, yeraltı suyu hareketleri olduğundan, jeolojik oluşumun yeraltı suyundan özellikle uzak olması istenir. Jeolojik ortam olarak granit, bazalt, tuz ve tuf yeterli özelliklere sahip bulunmuştur. Kullanılmış nükleer yakıtlar, son derece radyoaktif olmalarının yanı sıra, soğutmaya gerektirecek ölçüde ısı da üretirler ve bu nedenle de reaktörden alındıktan sonra havuzlarda su ile soğutulmuş muhafaza edilirler. Tasfiye öncesi kullanılmış yakıtlar, önce paslanmaz çelik (veya titanyum) silindirlere konur, sonra bu silindirlere metal muhafazalara konur ve yeraltındaki tüneller-



kullanım süresi içinde iki önemli reaktör kazası olmuştur. Bu iki kaza birbirinin çok benzeri olmasına rağmen sonuçları ve çevreye etkileri birbirinden son derece farklıdır. Güvenlik felsefesi önemsenen ülkelerin tasarımlarından biri olan Three Mile Island reaktöründe, tahmin edilen en büyük kaza gerçekleşmiş; fakat reaktör çalışanları dahil hiç kimse, öngörülen miktarlardan fazla radyoaktiviteye maruz kalmamıştır. Çok pahalı bir deney olarak kabul edilebilecek bu kaza sonunda nükleer reaktör güvenliği sınavdan geçmiş ve başarılı olmuştur. Diğer taraftan nükleer güvenlik felsefesine önem vermeyen, iyi tasarlanmamış bir nükleer reaktörün iyi işletilmesinin sonuçlarının ne denli acı olduğunun kanıtı da Çernobil kazası-

İsveç'in batısında bulunan Ringhals nükleer santralleri. Bir kilometre karelik bir alan içinde toplam 3510 MW gücünde üç basınçlı su ve bir kaynar su reaktörü görülmektedir.



dır. Bu kaza, nükleer teknoloji den kaçan ülkelerin bile, istemedikleri halde nükleer kazaların zararlarına katlanmak zorunda olduklarının da bir göstergesidir. Nükleer reaktörlerin maliyetinin yüksek olması, bazı ülkelerin nükleer enerjiden uzak kalmalarının başka bir nedenidir.

Bir güç santralinden elde edilen elektriğin maliyeti, temel olarak o santralin inşaatı ve elektrik üretir, hale gelmesi için, yapılması gereken yatırım maliyetini, ömrü boyunca santralin verimli çalışmasını sağlamaya yönelik işletme ve bakım giderlerini ve elektriğin üretiminde kullanılan yakıtın temini için gerekli yakıt maliyetini içerir. Bir santralin ekonomik olması için üretilen elektriğin satılması sonucu elde edilen gelirin, en azından maliyetini karşılaması ve ayrıca diğer elektrik üretimi seçeneklerine göre daha ucuz olması gerekir.

Elektrik maliyetine etki eden harcamalar değişik zaman dilimlerinde yapılmakta; oysa elektrik üretimi santralin ömrü boyunca gerçekleşmektedir. Enflasyonun olmadığı sabit bir para birimi ile, bir santralin tüm ömrü boyunca yapılan harcamaların bugünkü değerinin o santralde üretilen elektriğin bugünkü değerine oranı, bize ortalama bir elektrik maliyeti verecektir. Elektrik üreticisi, ürettiği elektriğin fiyatını bu ortalama maliyete eşit olarak seçerse, yaptığı tüm harcamaları, paranın bugünkü değeri gözönüne alınarak karşılayabilecektir. Bu maliyet, yaklaşık olarak aynı koşullarda çalışan sistemlerin karşılaştırılmasını da olası kılar.

Nükleer santraller genel olarak, ilk yatırım maliyetleri yüksek, yakıt ve işletme giderleri düşük santrallerdir. Yatırım maliyetleri ise, elektrik maliyetinin yarısından fazlasına denk gelmektedir.

Bir santral inşaatının başlangıcı ile devreye girmesi arasında tipik olarak altı ila sekiz yıl civarında bir süre geçmesi gerekmektedir. Nükleer santrallerden elde edilen elektriğin mali-

de (veya odalarda) açılmış deliklere yerleştirilirler. Deliklerin üstüne bir tıkaç konur ve dolgu malzemesi (muhtemelen kil) ile kapatılır. Yeraltı deposu dolunca tüneller de doldurulur ve depo kapatılır; böylece de ek bir koruma sağlanmış olur.

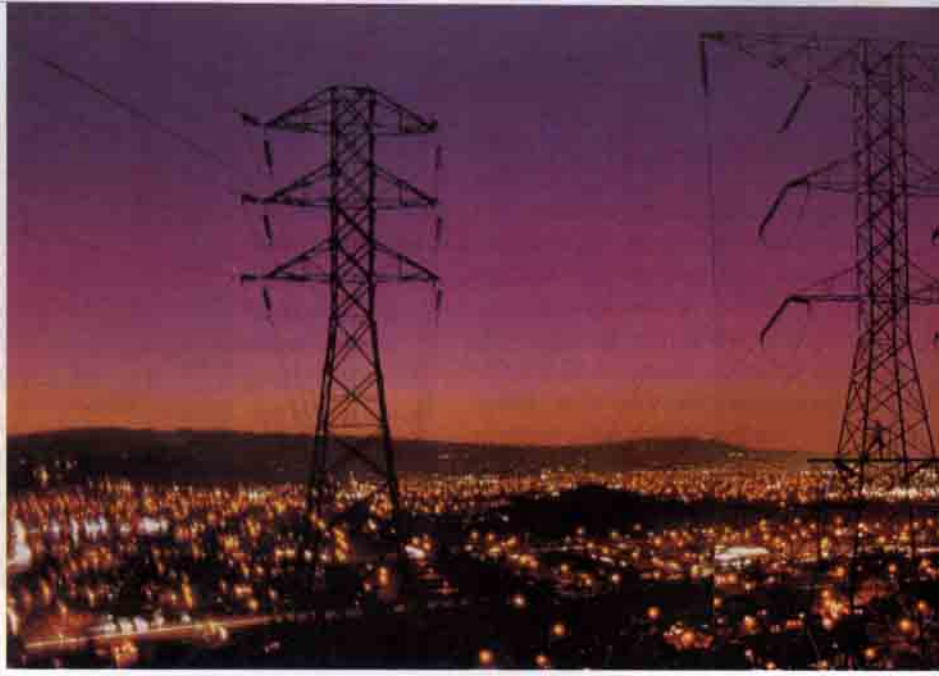
Kullanılmış yakıtlar, içerdikleri uranyum ve plutonyumu geri kazanmak üzere işleme tabi tutulurlarsa, fisyon ürünleri ve uranyum ötesi elementlerden oluşan bir sulu atık çözeltisi elde edilir. Bu çözelti kuruya kadar buharlaştırıldıktan sonra yüksek sıcaklıkta cam eriyiği ile karıştırılıp metal silindirlere içine boşaltılır ve soğuduğunda katılaşır camsı bir yapı (camlaştırılmış atık) oluşturur. Cam, suda kolay çözünmeyen, uygun mekanik özelliklere sahip, binlerce yıl kararlı olarak kalabilen, nisbeten ucuz ve işlenmesi kolay bir malzeme olduğu için günümüzde nükleer atık formu olarak tercih edilmektedir. Camlaştırılmış nükleer atık ile dolu silindirlere, bir metal muhafaza içine konup yeraltı deposundaki deliklere yerleştirilirler. Yukarıdaki plan yeni bir teknoloji gerektirmemektedir ve bu planın uygulanmasında teknik ve ekonomik zorluklardan çok, politik kararlar ve bu kararların hayata geçirilmesinde karşılaşılan güçlükler etkili olmaktadır.

Nükleer atıkların derin jeolojik oluşumlara gömülmesi konusunda en sık sorulan sorulardan bir tanesi şudur: "Acaba radyoaktivite bir yolunu bulur da tekrar yeryüzüne döner mi?" Bunun tek yolu, yeraltı suyunun yeraltı deposuna ulaşmasıdır. Je-

olojik oluşumu seçerken en fazla dikkat edilen noktanın, yeraltı suyu olan uzaklık olduğunu hatırlatalım; en azından bin yıl boyunca bu oluşumlara yeraltı suyunun ulaşmayacağından emin olabiliriz. Yine de diyelim ki yeraltı suyu jeolojik oluşuma ulaştı; önce yeraltı deposunu çevreleyen jeolojik ortamı ve sonra muhafazalar etrafındaki dolgu malzemesini (dolgu malzemesi kil olduğundan, ıslanmışta şişerek suyun geçişini iyice zorlaştırır) geçmesi gerekir. Daha sonra metal muhafazayı ve metal silindiri aşmalı ve suda zor çözünür olması dikkate alınarak seçilmiş camı çözmelidir. Böylece nükleer atıklar yeraltı suyuyla buluşurlar. Nükleer atıkların yeraltı suyu da aynı yollardan tekrar geçerek (bu sırada jeolojik ortamın ve dolgu malzemesinin bir filtre rolü oynayacağı da unutulmamalıdır) biyosfere ulaşmalıdır. Son olarak yeraltı suyunun son derece yavaş (ortalama 30 cm/gün) hareket ettiğini ve yerin 1 km altından yeryüzüne çıkabilmek için kaya tabakaları arasında yaklaşık 80-100 km yol katettiğini (günde 30 cm'den 80 km gitmek 730 yıl alır) belirtelim. Tüm bunlara rağmen, atıklar, tehlikeli seviyede radyoaktivite içerdikleri süre içinde yeryüzüne ulaşmanın bir yolunu bulabilir mi? Belki de bulabilirler. Ancak diğer enerji üretim sistemlerinin atıklarının ve endüstriyel atıklarının yarattığı riskler gözönüne alındığında, burada söz konusu olan risk, yüzlerce kere, örneğin kömür yakmakla karşılaştırıldığında yaklaşık 1400 kez daha azdır.

yetinin azaltılmasında en önemli iki etmen, inşaat süresinin gerekli standartlara uyularak azaltılması ve ilk yatırım maliyetinin düşürülmesidir.

Yakıt giderleri reaktör tipine göre değişmektedir. Bazı reaktörler zenginleştirilmiş yakıt kullanmakta; bazıları ise doğal uranyuma dayalı yakıtlar kullanmaktadır. Zenginleştirme, yakıt maliyetini artırır. Ayrıca kullanılmış yakıtların ne şekilde depolanaacağı ve bunun tahmin edilen maliyeti de, yakıt maliyetini etkileyecektir. Fakat genel olarak yakıt giderlerinin toplam maliyet içerisindeki payı az olduğu için, bu etki o kadar büyük değildir. Yakıt giderlerinin toplam maliyet içerisindeki payının düşük olması nedeniyle gelecekte uranyum fiyatlarında veya zenginleştirme fiyatlarında olabilecek değişikliklerden üretilen elektriğin maliyeti pek etkilenmeyecektir. Yani bir nükleer santral bir kez kurulduktan sonra ürettiği elektriğin maliyeti yaklaşık olarak sabit kalabilir. Toplam yakıt gideri ise reaktörde üretilen toplam enerji ile orantılı olacaktır. İşletme ve bakım giderleri doğal olarak reaktörden reaktöre değişmektedir, ayrıca reaktörün işletildiği ülkenin koşulları da etkili olmaktadır. Elektriğin maliyeti, toplam harcamaların bugünkü değeri-



nin üretilen enerjinin bugünkü değerine oranıdır. Bir nükleer santralde işletme ve yakıt giderleri düşük olduğu için, o santral ne kadar çok çalışırsa üretilen enerjinin maliyeti de o kadar düşecektir. Bir santralin yük faktörü, belirli bir zamanda ürettiği enerjinin aynı zaman diliminde, tam kapasitede çalışarak üreteceği enerjiye oranıdır. Dolayısıyla nükleer santraller, büyük yük faktörleri ile çalıştıklarında daha ucuz elektrik üreteceklerdir.

Santralin ekonomik ömrü tamamlandıktan sonra sökülmesi için gerekli yatırım, genel olarak ilk yatırım maliyetlerinin içerisinde pay ayrılarak

gözönüne alınır. Sökülme için gerekli maliyetin toplam elektrik maliyeti içerisindeki payı %1 civarındadır. 1000 MWe gücünde bir nükleer santralin ekonomik ömrünün sonunda sökülmesi için yaklaşık 100 milyon dolar civarında bir kaynak gerekmektedir. Bu kaynak, miktar olarak çok büyük olmasına karşın, bir nükleer santralin bir yılda ürettiği elektriği satarak elde edeceği gelirden daha azdır.

Şu ana kadar söz ettiğimiz maliyetler, belirli bir reaktör tipi ve çalışma koşulları gözönüne alındığında doğrudan tahmin edilebilen maliyetlerdir. Aslında bunlara ek olarak, gerek maliyetin niteliği gerekse de veri yokluğundan dolayı tahmin edilmesi oldukça zor olan maliyet bileşenleri vardır. Büyük bir kazanın maliyeti bunlara bir örnektir. Gerçekleşme olasılığı her yüz bin reaktör yılı işleyişte bir olan bir kazanın etkilerinin getirdiği maliyet, 200 milyar dolar civarında ise, reaktör başına bu maliyet yılda 2 milyon dolar civarındadır. Yani düşük olasılığa sahip böyle bir kazanın getirdiği bir yıllık mali risk, elektrik maliyetinin %1'i kadar olmaktadır. Three Mile Island kazasının yola çıktığı dış etkilerin maliyetinin 26 milyon dolar, Chernobyl kazasının toplam maliyetinin ise 14 milyar dolar dolayında olduğu tahmin edilmektedir.

CANDU 600 nükleer güç santralinin kontrol odası. Nükleer santralin tüm idaresi bu odada yapılmakta ve operatör bilgisayar aracılığı ile reaktör ve diğer sistemleri kontrol etmektedir. Bir kaza sırasında bilgisayar, reaktörü güvenli bir şekilde kontrol altında tutarak kapatmakta ve operatörlerin düşünülmesi için yarım saat tanımaktadır. Bilgisayarın onaylamadığı hiç bir değişiklik reaktöre iletilmemektedir.

Kaynaklar
Broad Economic Impact of Nuclear Power, OECD 1992.
Cohen B.L., "Before It's Too Late", New York, 1983.
Cohen B.L., "The Nuclear Energy Option", New York, 1990.
Electricity and the Environment, IAEA-TECDOC-624, September 1991.
Kadıroğlu O.K., Bilim ve Teknik Sayı:317, Nisan 1994
Makina Müh. Odası, Uluslararası Teknoloji Kurultayı Yayın No: 168, 1993
National Academy of Sciences, "The Effects on Population of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation", 1980.
Ott Karl O. and Spinard Bernard L., "Nuclear Energy", New York, 1985.
Senior Expert Symposium on Electricity and Environment, IAEA, 1991



Enerji ve Çevre

Öner Çolak
H.Ü. Nük. En. Müh. Böl.

Enerji üretiminin çevre etkileri değişik biçimlerde değerlendirilebilir. Bu değerlendirmeler,

her bir kaynak için birim enerji üretimine karşılık gelen kirlenici madde tip ve miktarları, bunların çevre ve atmosfer içerisinde dağılımları, çalışanların ve halkın sağlığı üzerine etkileri, atığın miktarı ve zehirliliği, uzun dönemde çevre ve ekolojik sistemler üzerindeki etkileri açıklanarak yapılabilir.

Dünya elektrik üretim rakamları incelendiğinde % 60 ile en büyük payı fosil yakıtlar almaktadır. Fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz), hemen hemen bütün ülkelerde temel enerji üretim kaynağı olarak karşımıza çıkarlar. Fosil yakıtların çevre etkileri gözönüne alındığında karşımıza sera etkisi, asit yağmurları ve hava kirliliği çıkar. Bu tür yakıtlardan yanma sonucu enerji elde edildiğinde yanma ürünleri (CO_2 , NO_x ve SO_2 gibi gazlar), baca gazı olarak atmosfer içinde dağılırlar. Baca gazları ayrıca uçucu kül ve hidrokarbonları içerirler. Nikel, kadmiyum, kurşun, arsenik gibi zehirli metaller de, fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere atılan diğer maddelerdir. CO_2 sera etkisi oluşumunda etkin rol oynamaktadır. Dünyadaki endüstriyel gelişme öncesi atmosferdeki CO_2 konsantrasyonu 280 ppm (milyonda bir) dolaylarında idi. Bu konsantrasyon, 1958'de 315 ppm ve 1986'da 350 ppm düzeyine kadar yükselmiştir. Artan CO_2 miktarı, yerkürenin sıcaklığının artmasına neden olmakta, bu da iklim dengelerinin bozulmasına yol açmaktadır. SO_2 ve NO_x ise esas olarak asit yağmurlarına yol açmaktadır. Atmosferdeki su buharı ile birleşen SO_2 ve NO_x , sülfürik ve nitrik asit oluşturmakta ve bu da dünyanın ekolojik dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bütün fosil yakıt atıklarının kış aylarında pek çok şehrimizi etkisi altına alan hava kirliliğine yol açtığı da unutmamalıyız. Fosil yakıtların çevre etkileri bunlarla da sınırlı değildir. Örneğin kömür madenciliği hem çalışanlara sağlık riski getirmekte, hem de ülkemiz için pek yabancı ol-

mayan metan gazı patlamaları nedeni ile ölümlere yol açabilmektedir. Diğer bir sorunla da fosil yakıt taşımacılığında karşılaşmaktadır. Petrol taşıyan tankerlerin neden olduğu kazalar yüz binlerce ton petrolün denize yayılmasına neden olmuştur. Bunun canlı bir örneğini geçtiğimiz aylarda İstanbul Boğazı'nda yaşadık.

Hidroelektrik santraller ile elektrik üretimi, dünyada toplam elektrik üretimine yaklaşık %23 oranında katkıda bulunmaktadır. Hidroelektrik santraller ile enerji üretimi için uygun coğrafi koşulların sağlanması gerekmektedir. Günümüz koşullarında kullanılabilir hidroelektrik kapasitenin büyük bir bölümü halihazırda kullanılmaktadır. Hidroelektrik santrallerin çevre ile etkileşimlerine gelince, büyük su rezervuarlarının oluşması nedeni ile ortaya çıkan toprak kaybı sonucu doğal ve jeolojik dengenin bozulabilmesi olasıdır. Bu rezervuarlarda oluşan bataklıklar da, metan gazı oluşumu için uygun bir ortam teşkil ederler. Yakın geçmişte barajların yıkılması sonucu meydana gelen kazalar, pek çok kişinin ölümüne neden olmuştur.

Dünya elektrik üretimi içinde %17 gibi önemli bir pay, nükleer reaktörler tarafından sağlanmaktadır. Bu oran gelişmiş ülkelerde çok daha yüksek rakamlara ulaşmaktadır. Örneğin fosil yatakları kısıtlı olan Fransa, elektriğinin %70'ini nükleer enerji ile sağlamaktadır. Nükleer enerjinin çevreye etkisi fisyon ürünü radyoaktif izotopların yayılması durumunda sözkonusu olur. Bunun kötü bir örneğini 1986'da Çernobil reaktöründeki kaza ile yaşadık. Bu kazanın nedeni türbin kontrolü sırasında reaktör güvenlik sistemlerinin devre dışı bırakılmış olmasıdır. Çevreye yüksek miktarda radyoaktivitenin salınması ise, reaktörün koruma kabının olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu reaktörün yetersiz tasarımı, günümüzde çalışan 400'ün üzerindeki reaktör için genellemek doğru değildir. Bu reaktörler uzun süredir güvenli olarak çalışmaktadırlar. Bütün mühendislik sistemleri gibi nükleer reaktörler de kaza riski taşımakta, ancak alınan önlemler ile bu risk milyonda bir gibi çok düşük bir olasılığa indirilmektedir. Öncelikle şunu söylemek gerekir ki nükleer reaktörler fosil yakıtlar gibi atmosferik kirlenmeye yol açan atık üretmezler. Normal günlük yaşamımızda karşılaştığımız radyoaktivitenin ancak çok küçük bir kısmı nükleer reaktörlerden kaynaklanmaktadır. Bunu kişiler tarafından alınan radyasyon dozu için kullanılan "rem" ile ifade ettiğimizde ilginç sonuçlar ile karşılaşabiliriz.

Dünyada doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplar nedeni ile kişi başına düşen ortalama doz yaklaşık 26 miliremdir. Kozmik ışınlar nedeni ile alınan doz ise, 28 milirem düzeyindedir. Bunlardan korunmanın hiç bir yolu yoktur ve herkes yaşadığı yöreye bağlı olarak az ya da çok bu dozu alır. Doğal radyasyon dışında insanların maruz kaldığı en büyük radyoaktivite kaynağı ise tıbbi amaçlı röntgen ya da radyoterapidir. Göğüs ya da diş için uygulanan x-ışınları, yaklaşık 10 miliremlik doza karşılık gelir. Diğer organlar için bu daha da yüksektir. Nükleer silah denemelerinden kaynaklanan doz ise yıllık 4 ile 5 milirem düzeyindedir. Nükleer enerjiden kaynaklanan doz ise yılda 1 milirem civarındadır. Bu, reaktörlerin çalışması sırasında çevreye verilen radyasyonun yanında uranyum madenciliği, yakıt fabrikasyonu ve kullanılmış yakıt işleme tesislerinin yaydığı radyasyonu da kapsamaktadır. Yapı malzemelerinden yılda yaklaşık 7 milirem düzeyinde doz almaktayız. Uçak ile yerden yaklaşık 12 km yükseklikte yolculuk yapmak, kozmik ışınlar nedeni ile saatte yaklaşık 0.5 milirem doz alınmasına neden olur. Günde birbuçuk paket sigara içen kişinin alacağı yıllık doz, yaklaşık 8000 miliremdir. Termik santraller de küller ile birlikte doğaya radyoaktivite salırlar. Bunun bir örneğini Yatağan'da yaşadık. Çernobil kazası sonucu alınan radyasyon dozu ise, yere bağlı olarak değişim göstermektedir. Örneğin reaktör çevresinde, 3 kilometre yarıçapında bir alan içerisinde alınan ortalama doz 3300 miliremdir. . Alınan bu yüksek doz, insanların kansere yakalanma toplam riskini yaklaşık %4 oranında artırır; %20'den %24'e çıkarmıştır. Kazanın diğer ülke insanları üzerindeki etkisi ise değişiktir. Örneğin kaza sonrası bir yıl boyunca Türkiye'de alınan en yüksek doz 59 milirem ve ortalama doz ise 15 miliremdir. Bu rakamların değerlendirilmesi için uluslararası kabul edilen standartlar ile karşılaştırılmaları gerekebilir. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) 1977 standartlarına göre, nükleer reaktör çalışanlarının yılda en çok 5000 milirem doz almasına izin verilebilir. Daha sonra yapılan değişiklik ile bu sınır son beş yılın ortalaması için yıllık 2000 milirem olarak önerilmiştir. Nükleer reaktörlerin normal durumunda bu dozların yaklaşık onda birini sağlayacak çalışma koşulları sağlanmaktadır. Genel halk içinse, çalışanlara uygulanan ve ICRP tarafından belirlenen doz sınırlarının onda biri sınır olarak uygulanmaktadır.