



Nükleer Güç Santrallerinin Türkiye’de ve Dünyada Çevresel Etkileri

Esmagül HAKKIOĞLU TÜYLÜOĞLU^{1*}, Nureddin TÜRKAN²

¹Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Programı, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul/ Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 05.07.2022

Kabul: 04.04.2023

Yayın: 30.04.2023

Derleme Makalesi

Öz- Nükleer santrallerin projelendirilmesi, tasarlanması, kurulması, işletilmesi ve sökülmesi esnasında çok ciddi güvenlik önlemlerine gereksinim duyulur. Bunun ana nedeni santrallerden kaynaklanacak zararlı etkilerin insan sağlığına ve çevreye olumsuz etkileri önlemektir. Santrallerin işleme girmesinden itibaren çıkan radyoaktif atıklar, gerekli güvenlik önlemleri alınmak suretiyle suya ve toprağa karışmalarının önü alınarak insan-çevre sağlığına tehditler ortadan kaldırılmaktadır. Bu oluşan radyoaktif atıklar radyoaktivite seviyelerine göre; yüksek seviyeli atık, orta seviyeli atık ve düşük seviyeli atık olarak sınıflandırılırken, fiziksel hallerine göre ise; katı atıklar, sıvı atıklar ve gaz atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Atıkların radyoaktivite düzeylerine göre sınıflandırıldıklarında, yüksek seviyeli radyoaktif atık ile düşük seviyeli radyoaktif atıklarda alınması gereken önlemlerde de farklılık olması gerektiği anlaşılmaktadır. Fiziksel hallerine göre sınıflandırmadaki bertaraf yöntemlerinde katı atıklarda presleme yöntemi kullanılırken, sıvı atıklarda santrifüj yöntemi öncelikli olarak kullanılır. Bunun yanında sıvı atıkların katı hale dönüştürülebilmesi için de uygun yöntemler mevcuttur. Nüfusu hızla artan dünyamızda enerjiye daha çok ihtiyaç duyulması ile birlikte Nükleer enerjinin kullanımına yönelim artmıştır. Bu artan yönelimle birlikte nükleer atıkların bertaraf edilme yöntemleri de önem kazanarak daha farklı yollar düşünülmektedir. Bu durum, ülkemizde de faaliyete geçirilmek üzere çalışmaları devam eden nükleer güç santrallerinin (NGS) çevresel etkilerinin ele alınması açısından toplumumuza da ilgilendirmektedir. Bu çalışmada, nükleer güç santrallerinde oluşan radyoaktif atıklar, atıkların bertaraf ve depolama yöntemleri, nükleer santrallerin kurulacağı alanın hangi kriterlere sahip olması gerektiği konuları, literatürde yer alan çalışmalarla birlikte derlenerek sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Çevresel etki, nükleer enerji, Nükleer Güç Santrali (NGS), radyasyon, radyoaktif atık

Environmental Impacts of Nuclear Power Plants in Türkiye and in the World

Esmagül HAKKIOĞLU TÜYLÜOĞLU^{1*}, Nureddin TÜRKAN²

¹Department of Property Protection and Safety, Occupational Health and Safety Program, University of Health Sciences, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul/ Türkiye

Article History

Received: 05.07.2022

Accepted: 04.04.2023

Published: 30.04.2023

Review Article

Abstract – Very serious safety measures are required during the design, design, installation, operation and dismantling of nuclear power plants. The main reason for this is to prevent the negative effects of the harmful effects to be caused by the power plants on human health and the environment. Radioactive wastes released from the commissioning of the power plants are eliminated by preventing their mixing into water and soil by taking the necessary safety precautions and threats to human and environmental health are eliminated. According to the radioactivity levels of these formed radioactive wastes; while high-level waste is classified as medium-level waste and low-level waste, according to their physical state; solid waste is classified as liquid waste and gas waste. When wastes are classified according to their radioactivity levels, it is understood that there should also be a difference in the precautions that should be taken for high-level radioactive waste and low-level radioactive waste. In the disposal methods classified according to their physical state, the pressing method is used for solid wastes, while the centrifugal method is primarily used for liquid wastes. In addition, there are also suitable methods for converting liquid waste into solid. In our world, where the population is growing rapidly, the orientation to the use of nuclear energy has increased with the need for energy more. With this increasing orientation, the methods of disposal of nuclear waste are gaining importance and different ways are being considered. This situation also concerns our society in terms of addressing the environmental impacts of nuclear power plants (NPPs), which are continuing to be put into operation in our country. In this study, radioactive wastes generated at nuclear power plants, waste disposal and storage methods, what criteria the area where nuclear power plants will be built should have, were compiled and presented together with the studies in the literature.

Keywords – Environmental impact, nuclear energy, Nuclear Power Plant (NPP), radiation, radioactive waste

¹esmahakkioglu@gmail.com Orcid id: 0000-0002-5104-3145

²nturkan@hotmail.com Orcid id: 0000-0002-0452-9484

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: esmahakkioglu@gmail.com, S.B.Ü. Hamidiye Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Programı, İstanbul/ Türkiye

Atf Bilgisi: Hakkıoğlu Tüylüoğlu, E. & Türkan, N. (). Nükleer Güç Santrallerinin Çevresel Etkileri . OHS ACADEMY , 6 (1) , 50-58 . DOI: 10.38213/ohsacademy.1140898

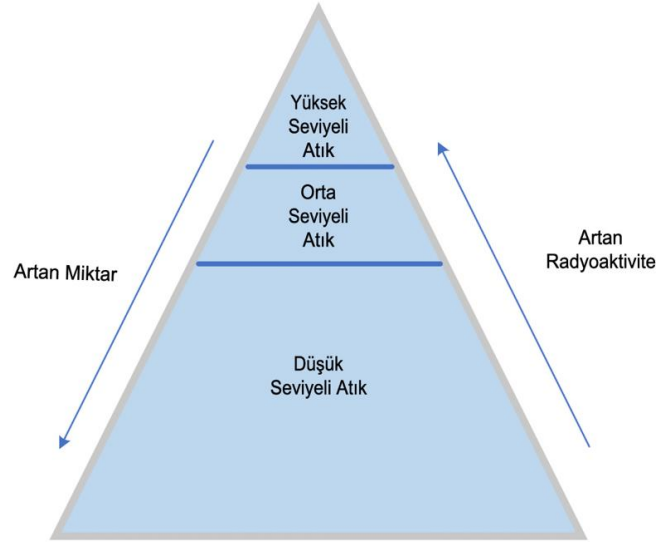
1. Giriş

Atom çekirdeğinin bölünmesi (filyon) sonucu açığa çıkan ısı enerjisi mekanik enerjiye ve daha sonrasında ise elektrik enerjisine nükleer santraller yardımıyla çevrilir. Belirli bir ömürleri olduğundan dolayı nükleer santrallerin projelendirilmesi, tasarlanması, kurulması, işletilmesi ve en sonunda da sökülmesi ile birlikte oldukça ciddi güvenlik önlemleri alınmaktadır. Buradaki temel amaç, bu süreçlerden kaynaklanabilecek zararlı etkilerin insan sağlığına ve çevreye olumsuz etkilerinin önüne geçmektir. Böylece nükleer güç santrallerinin (NGS) işleme girmesinden itibaren çıkan radyoaktif atıklar, gerekli güvenlik önlemleri alınmak suretiyle suya ve toprağa karışmalarının önü alınarak insan-çevre sağlığına tehditler ortadan kaldırılmaktadır. Bu oluşan radyoaktif atıklar radyoaktivite seviyelerine göre; yüksek seviyeli atık, orta seviyeli atık ve düşük seviyeli atık olarak sınıflandırılırken, fiziksel hallerine göre ise; katı atıklar, sıvı atıklar ve gaz atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Atıkların radyoaktivite düzeylerine göre sınıflandırıldıklarında, yüksek seviyeli radyoaktif atık ile düşük seviyeli radyoaktif atıklarda alınması gereken önlemlerde de farklılık olması gerektiği anlaşılmaktadır.

Geçmişten günümüze insanoğlunun enerjiye olan bağımlılığı, özellikle günümüzde yaşanan kentleşme, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte nüfusun hızla artması sonucunda vazgeçilmez hale gelmiştir (Koç & Şenel, 2013). Pandemi sonrası ve Ukrayna-Rusya savaşının başlaması ile meydana gelen gelişmeler dünyada zaten var olan enerji krizini daha da tırmandırmıştır. Bu durum, var olan bu enerji ihtiyacını karşılamak üzere nükleer enerjiye yönelimi hızlandırmıştır. Nükleer enerji üreten NGS'ler, diğer kaynaklara göre uzun vadede ucuz bir enerji türü olup aynı zamanda karbon salınımının sıfır olduğu yüksek verimde bir enerji türüdür. Her yıl enerji açığı nedeni ile on milyarlarca dolar ödenerek ülkemize ithal edilen petrol ve doğal gaz alternatif olarak, son yıllarda faaliyete geçirilmesi düşünülen AKKUYU nükleer güç santrali ile birlikte ülkemizde de nükleer enerji üretimine yönelik ilk adımlar atılmıştır. Güvenli kullanıldığı takdirde çevresel etkilerinin oldukça olumlu olduğu NGS'lerin sayısının ülkemizde daha da artması için çalışmalar sürmektedir. Çalışma koşullarında çevreyi kirletecek hiçbir etki oluşturmadığından dolayı, bu santrallerin kullanıldığı bir ülke olan Fransa'daki 58 reaktörün 14 tanesi dünya kültür mirası listesinde yer alan LOIRE nehri üzerinde olup yaklaşık 1000 km boyunca dizili haldedir. Bu nehir boyunca uzanan bu bölgelerde rahatlıkla balık avlanabilmekte ve tarlalarda sulamalı tarım yapılmaktadır. Yine Fransa'daki bu NGS'lerden biri olan Nogent santrali, başkent Paris'e 70 km uzaklıkta bulunmaktadır. Bütün bu gerçekler, özellikle gelişmiş ülkelerde, küresel ısınma için bir risk kaynağı olmaması nedeni ile nükleer enerjiye yönelim sürecinin hızlanarak devam ettiğini ortaya koymaktadır. Dünyada ve ülkemizde, diğer enerji kaynakları ile kıyaslandığında, nükleer enerji kullanımının daha cazip olduğu düşünülmektedir (Kaya İ. , 2012). Nükleer teknoloji sağlık hizmetleri, tarım sektörü, adli tıp, silah sanayii, ulaşım ve mekân ısıtma gibi sektörlerde, ayrıca arkeolojik buluntuların yaşlarının tayini (Güler, 2006) gibi enerji üretimi dışındaki çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır. Nükleer enerji elde edilirken radyasyon, sıcaklık (termonükleer üniteyi çalıştırır), uranyum bileşikler (sonradan işlenebilir), uranyum olmayan çeşitli reaktör maddeleri ve parçalanma ürünleri gibi çeşitli radyoaktif atıklar oluşmaktadır (Temurçin & Aliagaoglu, 2003).

2. Radyoaktif Atıklar

Radyoaktif atık; yapılarında radyonüklid (radyoaktif çekirdek) bulunan ya da bu çekirdekli atomların bulaşmış olduğu maddeler ile, radyoaktiflik seviyeleri kabul edilebilir düzeyin üzerinde olan maddeler olarak tanımlanmaktadır (Uşaklı, 1997). Bu atıklar; tıpta, endüstride, tarım da ve çeşitli alanlarda radyoaktif maddelerin kullanılması sonucunda ya da nükleer santrallerde enerji üretilirken yakıtların işlenmesi esnasında oluşurlar. Katı, sıvı veya gaz halinde bulunabilen radyoaktif atıklar, radyoaktiflik seviyelerine ve sahip oldukları tehlike potansiyeline göre düşük, orta ve yüksek seviyeli atıklar olarak sınıflandırılmaktadırlar.



Şekil 1: Yüksek Seviyeli, Orta Seviyeli ve Düşük Seviyeli Atıklar için oluşan miktarları ve radyoaktiviteleri

Nükleer santrallerde radyoaktif atık oluşumu, uranyum atomunun parçalanması esnasında gerçekleşir. Oluşan radyoaktif maddeler, hiçbir işlemde geçirilmeden direkt olarak çevreye verildiği takdirde tehlike kaynağıdır. İnsan vücudunda tahribata neden olabilen bu atıklar, belirli işlemlerden geçirilerek daha zararsız hale getirilmek suretiyle depolanabilir ya da alıcı suya verilerek kontrol altına alınabilir. Bu santrallerin işletimindeki yakıt çevrimi esnasında ortaya çıkan ve %95'i sıvı olan atık yakıtın %99'u daha sonra katı atık haline dönüştürülür (Kaya İ. , 2012). Küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine neden olan fosil kaynaklı enerji üretim sistemlerine karşın, nükleer enerjinin kullanıldığı sistemlerde bu şekilde bir sera gazı emisyonuna rastlanmamaktadır. Bunun yanı sıra nükleer enerjinin kullanımında, asit yağmurlarının oluşumuna neden olan azot oksitler ve sülfür oksitler çevreye salınmazlar (Kaya M. , 2007-1). Bütün bu yönleri ile nükleer enerjinin kullanımı, karbondioksit oluşumunu azaltılması ciheti ile de diğer enerji kaynaklarına göre daha cazip hale gelmektedir.

2.1. Düşük ve Orta Seviyeli Radyoaktif Atıklar

Düşük seviyeli radyoaktif atıklar, taşıma esnasında korunmak için ek bir zırhlama kullanılmasını gerektirmeyecek kadar az miktarda radyoaktiviteye sahiptirler. Bunların denetimli bir şekilde çevreye verilmesinde bir sakınca yoktur. Bu atıklar, hacimsel olarak radyoaktif atıkların tamamının %90'ını meydana getirirler. Toplam oran olarak atık radyoaktivitesinin ise %1 'ini oluştururlar (Bulucu, 2018). Orta seviyeli radyoaktif atıkların taşınması ve işlenmesinde ise daha kapsamlı koruma tedbirleri tercih edilmelidir. Bu orta seviyeli atıklardaki koruma için zırhlama yöntemi veya uzaktan kumanda kullanılır. Bunlar, hacimsel olarak radyoaktif atıkların %7'sini, radyoaktivite seviyesi olarak ise tüm atıkların %4'ünü meydana getirir (Bulucu, 2018). Düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar, sanayide kullanılan atıklar, santralde kullanılan eldivenler, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz katı atıklar, plastikler, kullanılmış olan reçineler, kullanılmış süzgeçler, organik maddeler, buharlaştırıcı kalıntıları, yağlar, çamurlar, nükleer yakıt kullanımında oluşan ilk cevher atıkları vb. ile tıpta kullanılan radyoaktif maddelerden oluşur (Varınca, 2006). Bu düşük ve orta seviyeli atıklar depolanmadan önce katı hale getirilmelidirler. Bu katı haldeki atıklar, yarı ömür nedeniyle aktivitesinin düşmesi için bir süre bekletilir ve daha sonra ise sıkıştırma işlemi ile hacimleri küçültülür. Sıvı haldeki atıklar ise, kimyasal yollarla ayrıştırıldıktan sonra çimentolama yöntemi ile katı hale dönüştürülüp depolanır. Düşük ve orta seviyeli atıklar, yüksek kalite standartları ve iyi kalite yönetim programları kullanılarak koşullandırılmaktadırlar.

2.2. Yüksek Seviyeli Radyoaktif Atıklar

Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar, nükleer güç santrallerindeki (NGS) reaktörde oluşan kullanılmış nükleer yakıtlardır. Yüksek seviyeli radyoaktif atıkların bertaraf edilmesinde güçlü güvenlik önlemlerine sahip kalite yönetim programları kullanılmalıdır ve bunları koşullandırma işlemi yapılırken ciddi güvenlik önlemleri alınmalıdır. Bu türdeki radyoaktif atıklar, kısa yarı ömürlü radyoizotoplara sahip olduğundan oldukça tehlikelidir. Yeterli güvenlik önlemleri alınmadığı takdirde insan sağlığı ve çevre için çok ciddi tehlike kaynağıdır. Yüksek seviyeli atıklar hacimsel olarak tüm atıkların %3'ünü, radyoaktivite seviyesi açısından ise tüm atıkların %95'ni oluştururlar (Bulucu, 2018). Kullanılmış yakıtlar, reaktör bina içerisindeki havuzlarda radyoaktivitesi başlangıçtaki %1'ine ininceye kadar bekletilmelidir. Yaklaşık 10-40 yıl kadar havuzda bekletilen kullanılmış

yakıtlar, radyoaktivitelerini %99 oranında yitirir ve kullanılmış yakıt bu güvenli hali ile yeniden işleme gönderilir. Bu işleme tabii tutulmadan yakıtın tekrar geri kazanıma gönderilmesi çok ciddi sonuçlar doğurabilir. Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar yüksek ısıya sahiptirler. Havuzda bekletme işleminde; su bu atıkların soğumasını ve radyasyondan korunması için kullanılır. Yüksek seviyeli atıklar, nükleer atık yönetiminde en çok dikkat edilmesi gereken türdeki atıklardır.

2.3. Katı Atıklar

Nükleer tesislerin çalışma prensiplerine göre ve türlerine göre, ıslak ve kuru olmak üzere katı atıklar oluşmaktadır. Sıvı atıkların arıtımında oluşan iyon değiştirici reçineler ile süzme ve buharlaşma kalıntıları ıslak katı atıklar olarak bilinir. Kuru katı atıklar ise; havalandırma sisteminde kullanılan filtreler, radyoaktivite bulaşmış giysiler, zeminde bulunan yer döşemeleri gibi radyoaktivite bulaşmış atıklardır. Düşük ve orta seviyeli atıklar, birçok ülkede ulusal atık yönetim kuruluşları kurulana kadar nükleer santral içerisinde özel kaplar içinde saklanarak muhafaza edilir. Bu atıklar radyoaktivite seviyelerine göre özel kaplar içerisinde saklanır. Saklama kapları olarak paslanmaz çelik kaplı tank veya beton kaplı tank kullanılmaktadır. Cam filtreler, plastik ve kâğıt gibi kuru atıklar özel kaplar içerisine presleme yöntemi ile sıkıştırılarak yerleştirilir. Radyoaktivite bulaşmış, kirlenmiş metal aletler parçalara bölünerek kaplara konulur. Katı atıklardan parçalara bölünmeleri mümkün olmayanlar metal atıklar ise tahta kutulara konularak üzerlerine beton dökülerek muhafaza edilir. Katı atıkların depolanmasında 100-200 litrelik kaplar kullanılır. Buharlaştırmayan sıvı atıklar ise katı hale getirilir. Sıvı atıkların katı hale dönüştürülmesinde çimento kullanılır (Uşaklı, 1997). Laboratuvar ortamında az miktarda açığa çıkan sıvı atıklar ise 25 litrelik plastik şişelerde beton korumalı kaplarda muhafaza edilir. Reaktörde meydana gelen katı atıklar ve işlenip paketlenen katı atıklar bir süreliğine santralde depolandıktan sonra, santral dışında güvenli depolama tesislerine götürülür.

2.4. Sıvı Atıklar

Nükleer santrallerde sıvı atıklardaki ana kirletici Sezyum-134 ve Sezyum-137 izotoplarıdır. Sezyum-137'nin yarılanma ömrü 30 yıl, Sezyum-134'ün ise yarılanma ömrü 2 yıldır. Nükleer yakıtın içinde parçalanma ürünleri oluşur ve bu parçalanma ürünleri yakıt çubuklarında kalırlar. Soğutma suyuna parçalanma ürünlerinin karışması, yakıt çubuklarda meydana gelebilecek arızalardan kaynaklı olur. Soğutma suyuna karışan parçalanma ürünleri ise radyoaktivite temizleme filtrelerine tutulur. Santral soğutma suyuna karışan yüksek seviyeli radyoaktif maddeler, ayrıştırma yöntemi kullanılarak ayrıştırılır. Ayrıştırma işlemi sonrasında katılaştıran radyoaktif atık özel kaplar içerisine konur ve güvenli olan yeraltında depolama yerlerinde depolanır. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP), çevreye bırakılan atıkların radyoaktivite miktarlarına sınır koymuştur. (Arıkan, 2007) Bu sınırlar tavan değer olarak kabul edilerek nükleer santrale sahip ülkeler bu belirlenen sınırların altında çevreye radyoaktivite madde bırakmaktadırlar. Düşük ve orta seviyeli sıvı atıkların arıtılması işleminde; kimyasal çökeltme, santrifüj, filtre, hidrosiklon kullanarak katı sıvı ayrımı ve iyon değişimi sıkça kullanılan yöntemlerdendir. Yüksek seviyeli sıvı atıklar depolanırken öncelikle buharlaştırma işlemi yapılır. Buharlaşma işlemi yapılarak su ortamdan uzaklaştırılır ve içindeki parçalanma ürünleri konsantrasyonları yükseltilir. Sonuçta ortaya çıkan atık kireç kullanılarak, çamurlaştırma ve seramik içine gömülür. Gömülen atıklar özel olarak tasarlanmış çift duvarlı depolama tanklarında güvenli bir şekilde depolanır. Santrifüj veya damıtma yöntemleri kullanılarak yüksek seviyeli sıvı atıklar, sıvı faz ve katı faz olarak birbirlerinden ayrılır ve konsantre edilir. Fazlara ayrılan atıklar kimyasal maddelerle işleminden geçirilir ve içerisinde cam parçaları ile karıştırılarak camlaştırma işlemi uygulanır.

2.5. Gaz Atıklar

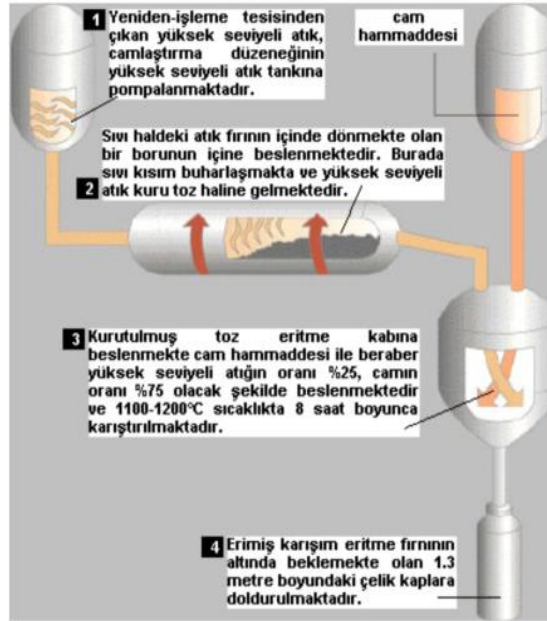
Yakıt çubuklarının içinde parçalanma ürünleri olarak gaz atıklar da bulunur. Ksenon, Kripton ve İyot gibi gaz atıklardır. Soğutma suyu sisteminden alınan gaz atıklar, işlemeyen sonra çeşitli filtrelerden geçirilir. Gaz atıklar radyoaktivitelerini kaybedene kadar tanklarda bir süre bekletilir ve sonrasında atmosfere salınır. Radyoaktivite değerlerinin uluslararası kuruluşlarca belirlenen sınır değerinin altında olması durumunda gaz atıklar güvenli bir şekilde bacadan dışarıya bırakılır. Nükleer santral tesislerinden normalde zehirli gaz yayılmaması hemen hemen yoktur. Bir nükleer santral tesisine yakın yaşayan halkta, radyasyon sınır değeri yılda 0,01 mSv'den daha az doz aldıkları belirtilmektedir. İleri teknolojiye sahip ve güvenli bir şekilde çalışan nükleer santral, hava kirliliğine neden olmaz.

3. Radyoaktif Atıkların Bertaraf Edilme Yöntemleri

3.1. Camlaştırma İşlemi

Nükleer santrallerden çıkan kullanılmış yakıtlar, kapalı yakıt çevrimi kullanan Rusya gibi ülkelerde, yeniden işleme tesislerine götürülerek, kullanılmış yakıtın içindeki Uranyum ve Plütonyum ayrıştırılmaktadır. Geride kalan sıvı yüksek seviyeli atık olarak nitelendirilmektedir. Yeniden işleme tesislerinden sıvı olarak çıkan bu yüksek seviyeli atıklar camlaştırılmak üzere camlaştırma düzeneğine getirilmektedir (Şekil 2). Böylelikle yüksek seviyeli radyoaktif atık zararsız hale getirilmektedir. Yüksek seviyeli radyoaktif atık, camlaştırma işlemi kullanılarak katı halde olan cam bloklara dönüştürülür ve hacimce küçültülmüş olan yüksek seviyeli radyoaktif atık uzun süreli olarak depolanabilir (Taner, 2011). Yapılan araştırmalara göre, cam çok uzun süreler özelliğini kaybetmeyen ve kararlı bir yapı oluşturmaktadır. Dünyamızda 2000 yıl önceden kalmış ve orijinalliğini hiç kaybetmemiş cam malzemeler bulunmuştur. Cam radyoaktif ışınım ve ısıya karşı büyük ölçüde dirençli bir maddedir. Bu özellikler camı yüksek seviyeli radyoaktif ışınımı tutabilmek için seçilebilecek maddelerden biri yapmaktadır. Camlaştırma esnasında aşağıdaki işlem aşamaları izlenmektedir;

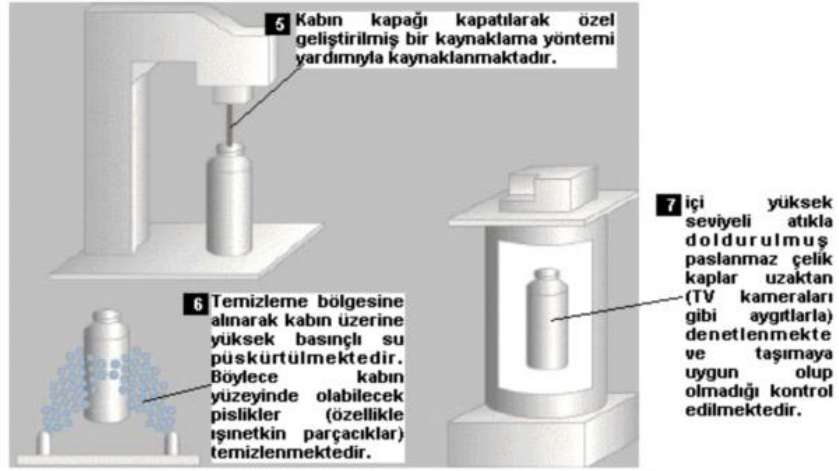
- 1.Yeniden-işleme tesisinden çıkan yüksek seviyeli atık, camlaştırma düzeneğinin yüksek seviyeli atık tankına pompalanır.
- 2.Sıvı haldeki atık fırının içinde dönmekte olan bir borunun içinde beslenmektedir. Burada sıvı kısım buharlaşmakta ve yüksek seviyeli atık kuru toz haline gelmektedir.
- 3.Kurutulmuş toz eritme kabına cam hammaddesi ile yüksek seviyeli atığın oranı %25, camın oranı %75 olacak şekilde beslenmektedir ve 1100-1200°C sıcaklıkta 8 saat boyunca karıştırılır.
- 4.Erimiş karışım eritme fırının altında beklemekte olan 1,3 m boyundaki çelik kaplara doldurulur.
- 5.Kabın kapağı kapatılarak özel geliştirilmiş bir kaynaklama yöntemi ile kaynaklanır.
- 6.Temizleme bölgesine alınarak kabın üstüne yüksek basınçlı su püskürtülür. Böylece kabın üstünde olabilecek istenmeyen maddeler temizlenir.
- 7.İç yüksek seviyeli atık ile doldurulmuş paslanmaz çelik kaplar uzaktan (TV kameraları gibi aygıtlarla) denetlenmekte ve taşınmaya uygun olup olmadığı denetlenmektedir.



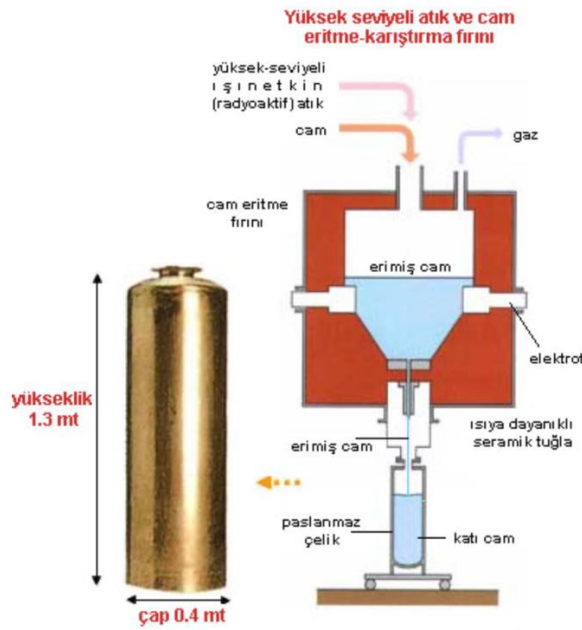
Şekil 2: Camlaştırma İşlemi Aşamaları-1
(Yüksek Seviyeli Atık Camlaştırma İşlemleri, Erişim Tarihi: 01.06.2022)

Çelik kaplar içinde soğuyan cam katı hale geldiğinde nükleer atık cam içine hapsolmakta ve hareketsiz hale gelmektedir. Konsantrasyonu artırılan radyoaktif ürünler camlaştırma işleminden sonra suda çözümleri önlenir. Camlaştırılmış parçalar çelik variller içinde çimento ile karıştırılır ve betonlaştırılır (Şekil 3). Camlaştırılmış atığın doldurulduğu kaplar 1,3 m yüksekliğinde ve 40 cm çapındadır. Bu kapların doldurulduktan sonraki ağırlığı yaklaşık 300 kg civarındadır ve yaklaşık 110 Lt camlaştırılmış yüksek seviyeli atık içermektedir. Yüksek seviyeli atıklar nedeniyle bu kapların içinde 1.5 kW dan az ısı enerjisi oluşmaktadır.1300 MW gücündeki bir nükleer santralden yılda yaklaşık 25 ton kullanılmış yakıt çıkarılmaktadır.1 ton kullanılmış nükleer yakıtın yeniden işleme

tesisinde işlenmesi sonucunda sadece 1 metreküp yüksek seviyeli atık oluşmaktadır. Bu da 1,3 m yüksekliğinde 0,4 m çapındaki küçük bir kabın içine sığmaktadır (Şekil 4).



Şekil 3: Camlaştırma İşlemi Aşamaları-2
(Yüksek Seviyeli Atık Camlaştırma İşlemleri, Erişim Tarihi: 01.06.2022)



Şekil 4: Camlaştırılmış Atığın Stoklandığı Kaplar (Yüksek Seviyeli Atık Camlaştırma İşlemleri, Erişim Tarihi: 01.06.2022)

3.2. Atıkların Yer Altında Depolanması

Üzerinde en fazla tartışılan radyoaktif atıklar, nükleer yakıt çevriminde en fazla radyoaktivite üreten yüksek seviyeli atıklardır. Bu atıkların tehlike arz etmeyen şekilde depolanması ve bertaraf edilmesi için ileri teknoloji geliştirilmektedir. Atıkların yer altında depolanması tüm ülkeler için en cazip çözümdür. Yer altında depolamadan önce atıklar çeşitli koruma tabakaları ile kaplanır. Yer altında depolama yapılan atıklar uzun süre kararlılığını korur. Bu yüzden atıkların, jeologlar tarafından belirlenen jeolojik formasyonlar içine gömülmesi caziptir. Düşük aktiviteye sahip radyoaktif atıklar yüksek aktiviteye sahip radyoaktif atıklara göre daha az derin formasyonlarda ve yüzeyde bertaraf edilebilir. Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar ise yeraltında giderimi oldukça derin formasyonlarda sağlanır. Radyonüklitlerin taşınmasında su hareketleri etkilidir. Bu sebeple yer altı su hareketinin olmadığı yer altı yapılarında depolama yapılmalıdır (Altın & Kaptan, 2013).

4. Nükleer Güç Santral Kazalarının Yol Açtığı Çevresel Etkiler

Bütün dünyada 31 ülkede 440 civarı NGS bulunmakta olup bu santrallerin farklı türleri mevcuttur. Dünyada belirli sayıda NGS'ye sahip belli başlı ülkelerden bazıları şunlardır; ABD'de 99, Fransa'da 58, Rusya'da 34, Çin'de 31, İngiltere'de 16, Almanya'da 9 adet aktif NGS vardır. Toplamda 51 adet NGS'nin inşası ise yine bu ülkelerde devam etmektedir. Günümüze kadar 3 büyük NGS kazası olmuş olup bunlar; 1979 ABD Three Mile Island NGS kazası (insan hatası), 1986 SSCB Çernobil NGS kazası (insan hatası) ve 2011 Japonya Fukushima NGS kazası (öngörülemez doğal felaket) şeklindedir. NGS'ler son derece ileri teknolojiler kullanılarak enerji üretilen tesisler olup kaza ve tehlike ihtimali son derece az olan tesislerdir (Özey, 2004). Burada üretilen ve yüksek düzeyde radyoaktivite içeren ürünlerin direkt olarak çevreye doğrudan verilmesi söz konusu değildir. Bunun yanı sıra yüksek teknolojide tasarlanmış güvenlik tedbirleri ile reaktör çalışanlarının, yöre halkının ve doğal çevrenin NGS'lerden kaynaklanan muhtemel tehlikeli radyasyonun etkilerinden korunması mümkün olmaktadır. Uluslararası standartların sunduğu verilere göre, NGS'lerin çevreye yaydığı radyasyon nedeni ile civarda yaşayan halkın maruz kaldığı yıllık doz 0,01 mSv civarındadır. Halk için kabul edilen en yüksek yıllık doz sınırı 0.05 mSv olup, NGS'lerin civarında yaşayan halk için belirlenen yukarıdaki yıllık doz miktarı görüldüğü gibi sınır değerinde oldukça altındadır (Başkanlığı, 2022). Bir NGS için kabul edilen en büyük risk, bir kaza anında radyoaktif maddelerin çevreye saçılarak insan sağlığına ve doğal hayata zarar vermesi olduğundan dolayı, bu riskin bertaraf edilmesi amacıyla reaktör çevresinde korumalı alan bırakılır ve NGS proje alanı bölgesinde yerleşim yerine izin verilmez. NGS'lerin inşası esnasında projenin buna benzer yönleri ile ortaya konduğu her safhası için merkezi Viyana'da bulunan, uluslararası atom enerjisi kurumu (IAEA) tarafından sıkı denetim gerçekleştirilmekte ve inşa edildikleri esnada herhangi bir tehlikenin varlığı durumunda lisans verilmemektedir (Nükleer Enerji Alanında Üçüncü Şahıslara Karşı Hukuki Sorumluluğa İlişkin Paris Sözleşmesi" (kısaca Paris Sözleşmesi) ve "Nükleer Zararlar Hakkında Hukuki Sorumluluğa İlişkin Viyana Sözleşmesi"dir (kısaca Viyana Sözleşmesi)). Çünkü bu yükümlülükler yerine getirildiğinde nükleer santral tesislerinin güvenli bir şekilde işletilmesi mümkün olmaktadır.

5. Nükleer Güç Santrallerinin Deprem-Çevre İlişkisi

Dünya'da çeşitli bölgelerde, deprem bölgesinde inşa edilmesine rağmen depreme dayanıklılığı ispatlanmış NGS tesisleri mevcuttur. NGS'lerin depreme dayanıklı tasarlanması durumunda, deprem bölgesinde inşa edilmelerine rağmen kaza riskleri oldukça azalmaktadır. Ancak yine de bu tesisler inşa edilirken, depreme dayanıklı bir santralin inşa edilmesi daha maliyetli olduğundan, deprem riskinin az olduğu bölgeler tercih edilmektedir. Bütün bunların yanı sıra NGS tesislerinin kurulduğunda ve işletilmesinde "Derin ve Detaylı Güvenlik" son derece hayati öneme sahip olduğundan çok yönlü fiziki ve yönetsel unsurlar devreye sokulur. Deprem gibi ani doğal felaketler esnasında da oluşabilecek radyoaktif madde salınımının kontrol altına alınması için yüksek güvenlik standartları ile birlikte tesisin zarar görmemesinin ve çevresel zararların önü alınmaktadır (Başoğlu & Bulut, 2017).

NGS'lerin plan ve kuruluşu esnasında dikkat edilmesi gereken temel kurallar şöyle sıralanır;

- Tesisin kurulacağı zeminin etüdü yapılarak tesisi taşıyabilecek dayanıklılık ve kapasiteye sahip olması gerekir. Nükleer santrallerin kurulacağı alanlar belirlenirken, bölgenin deprem bölgesi olup olmaması dış kaynak risklerinden biri olarak düşünülmeli, zeminin yer sarsıntılara karşı dirençli olarak tasarlanması ve buraya kurulması esas alınmalıdır (Erdoğan, 2016).
- Deprem riskinin az olduğu bölgelere kurulması tercih edilmelidir.
- Soğutma suyu kullanıldığından, doğal soğutma suyu olarak kullanılmak üzere deniz kenarları tercih edilmelidir.
- Enerji üretim merkezlerine yakın olmalıdır.

6. Nükleer Güç Santrallerinin Sökümü

Her tesiste olduğu gibi Nükleer Güç Santrallerinin (NGS)' de belli bir ekonomik ömrü vardır. Ekonomik ömrünü tamamlayan santrallerin işletimine son verilerek santral sökülür. Eski nesil reaktörlerin ömrü 30-40 yıl iken; günümüzde uygun yönetim programları ve ileri teknoloji sayesinde NGS'lerin ömürleri 60 yıla kadar uzatılabilmektedir. Nükleer santrallerin sökülmesi 2 şekilde yapılmaktadır;

- (i) Nükleer santralin işletimine son verilir ve santral tamamıyla sökülerek santralin bulunduğu saha kullanıma açılır.
- (ii) Yakıt bir depolama tesisine alınarak NGS'nin radyoaktif olmayan kısımları sökülür ve radyoaktif olan kısımlar, sökülmeden 30-50 yıl kadar, santralin bulunduğu alanda bekletilir.

Burada belirtilen bu iki yöntemin her ikisinde de radyoaktif maddeler için "atık yönetim" tekniğinin kuralları güvenli bir şekilde uygulanarak tesisin sökülmesi tamamlanır. NGS tesisinin sökülme işlemi çok maliyetli bir işlem olmayıp, santralde üretilmiş olan elektrik enerjisinin maliyetinin %1'lik kısmı gerçekleştirilebilir (Varınca, 2006).

7. Sonuç

Enerji maliyetlerinin zirve yaptığı günümüzde Nükleer Güç Santrallerinden (NGS) elektrik elde edilmesi ve bu yolla enerji üretimi vazgeçilemez bir gerçektir. Dünyadaki bu teknolojiyi yakalamak ve ülkemizde her yıl on milyarlarca dolar bütçe açığı ile enerji ithaline ödenen yüksek meblağlar nazara alındığında, nükleer enerji gerekli bir alternatif olarak gözükmektedir. Bütün bunların yanı sıra NGS'lerden elde edilen enerji üretimi ile birlikte bunun çevreye etkileri ve alınması gerekli güvenlik önlemleri açısından çıkarılacak sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Nükleer enerji üreten Nükleer Güç Santralleri (NGS'ler) bugün halen birer tartışma konusudur. Çevreciler, bu konuda nükleer enerjinin bir felaket olduğunu vurgularken bunun aksine ekonomistler ve atom enerjisi ile uğraşan bilim insanları, nükleer enerjinin diğer enerji kaynaklarına kıyasla en zararsız ve en verimli bir enerji kaynağı olduğunu öne sürmektedirler. Bu çalışmada verilen örnekler nazara alındığında nükleer enerjinin oldukça verimli ve zararsız olduğu düşüncesi ağır basmaktadır.
- NGS'lerin ürettiği yan radyoaktif atık ürünler, radyoaktivitelerini kaybetmek üzere bir süreliğine bekletilmesi sonrasında uygun yöntemlerle muhafaza edilmektedir. Var olan muhafaza yöntemlerine ek olarak daha güvenli yöntemler araştırılmalıdır.
- Nükleer santrallerin kuruldukları alanda çevreye çeşitli zararların olabileceği düşünüldüğünden ve kaza sırasında olumsuz sonuçlar ve hasarlar çevreyi de etkileyeceğinden, bir nükleer santralin yapımı komşu ülkeler tarafından da takip edilmelidir.
- Nükleer santraller kurulurken soğutma suyu olarak kullanılacak olan bir yapay tesis kurulmasındansa deniz kenarlarında ve yerleşimin olmadığı alanlara kurularak soğutma suyunun temini daha ekonomik gözükmektedir. Ancak deniz kenarları turistik ve yerleşim için daha çok tercih edilen bölgelerdir. Bu alanları belirlerken yerleşim alanı olmaması ve yerleşim alanına uzak olması özellikle dikkat edilmesi gereken hususlardandır.
- Nükleer santral işletilecek olan kuruluşların proje aşamasından başlayarak, tasarım, inşaat ve işletme aşamalarında "Detaylı ve Derin Güvenlik" kavramı temel tasarım prensiplerini esas alarak bu yüksek standartlar doğrultusunda çalışması gerekmektedir.

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen genel bakış açısı ve görüşler şu şekilde özetlenebilir; Bütün diğer enerji türlerinde olduğu gibi nükleer enerjinin de riskleri olmakla beraber, ülkemizde ve dünyada yaşanan enerji krizi ve ekonomik buhran göz önüne alındığında, nükleer enerjinin günümüz ve gelecek itibarıyla yaşamımızda oldukça önemli bir yere sahip olacağı açıktır. Bunun yanı sıra yakın gelecekte de fayda tarafının ağır basacağı bir enerji türü olacağı düşünülmektedir. Bütün bunlar nazara alındığında, ülkemizin bu enerji türüne sahip olması ile ilgili politikaların başarılı ve doğru olduğu, toplumumuz ve ülkemiz açısından hayati önem taşıdığı görüşüne varılmıştır.

Kaynakça

Özey, R. (2004). *Günümüz Dünya Sorunları*. Aktif Yayınevi.

Altın, S., & Kaptan, H. (2013). *RADYOAKTİF ATIKLARIN OLUŞUMU, ETKİLERİ VE YÖNETİMİ*.

Arıkan, İ. (2007). *Çevresel Radyasyonun Canlılığın Sürdürülebilirliğine Etkileri* Doktora Tezi. Ankara.

Başkanlığı, A. v. (2022, 06 01). *Radyasyon dozları ve etkileri*. afad.gov.tr: <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-dozlari-ve-etkileri> adresinden alındı

Baçoğlu, B., & Bulut, M. (2017). Güncel Nükleer Enerji Santral Projelerinden Alınan Dersler. 23. *Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı* (s. 14-20). İstanbul: ICCI 2017 - Bildiriler Kitabı / Proceedings Book.

Bulucu, M. (2018). Nükleer Atıklar Nasıl Yönetiliyor. *Trend Analizi*.

Erdoğan, S. (2016). Enerji Arz Güvenliği Bağlamında Türkiye’de Nükleer Enerji.

Güler, T. (2006). NÜKLEER ENERJİ ÜRETİM SÜRECİNDE KAZALAR, NÜKLEER ATIKLAR VE ÇEVRE SORUNLARI. Ankara.

Kaya, M. (2007-1). TÜRKİYE’DE NÜKLEER SANTRAL KURULUMU. *SOMA MYO. Teknik Bilimler Dergisi*.

Kaya, İ. (2012). Nükleer Enerji Dünyasında Çevre ve İnsan. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 71-90.

Koç, E., & Şenel, M. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 32-44.

Newmark, P. (1991). *About translation*. Multilingual Matters.

R.Brown, L. (1991). *1991 Dünyanın Durumu* .

RADYOAKTİF ATIKLARIN OLUŞUMU, ETKİLERİ VE YÖNETİMİ. (tarih yok).

Taner, A. C. (2011). *NÜKLEER ATIKLARIN İDARESİ VEYA YÖNETİMİ*. fmo.org.tr: <https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2011/07/Nükleer-Atıkların-İdareesi-Veya-Yönetimi.pdf> adresinden alındı

Temurçin, K., & Aliğaoğlu, A. (2003). NÜKLEER ENERJİ ve TARTIŞMALAR IŞIĞINDA TÜRKİYE’DE NÜKLEER ENERJİ GERÇEĞİ. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 25-36.

Uşaklı, A. B. (1997). NÜKLEER RADYASYON VE ETKİLERİ. *K.H.O.Bilim Dergisi*.

Varınca, P. D. (2006). ENERJİ ÜRETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ. *TASAM*.

Venuti, L. (2000). *The Translation Studies Reader*. New York: Roudledge.

Yüksek Seviyeli Atık Camlaştırma İşlemleri. (Erişim Tarihi: 01.06.2022). Nükleer Enerji Dünyası: http://www.nukleer.web.tr/yakit_cevrimi/camlastirma.html adresinden alındı

Araştırmacıların Katılım Oranları

Bu çalışmadaki sorumlu yazar HAKKIOĞLU TÜYLÜOĞLU E. çalışmanın ana fikrini oluşturarak literatür taraması yapmış ve metin yazılarını kaleme almıştır, katkı oranı %75’dir. Çalışmadaki ikinci yazar TÜRKAN N. ise çalışmanın tasarım ve dizayn edilmesi ile analiz ve sonuç kısımlarını üstlenmiştir, katkı oranı %25’dir.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.