

Nükleer Enerji ve Hayatımızdaki Yeri

Selin Özden¹

Serpil Aközcan²

Özet

Radyoaktivite yaşamımızın bir parçasıdır ve her zaman ve her yerde bulunur. Doğal olarak oluşan radyonüklidler yer kabuğunda, evlerimizde, okullarımızda, ofislerimizde ve hatta yediğimiz ve içtiğimiz yiyeceklerde mevcuttur. Ayrıca vücudumuz, kaslarımız, kemiklerimiz ve dokularımız da doğal olarak oluşan radyonüklidler içermektedir. Enerji, sürdürülebilir ekonomik büyüme ve insan refahının artması için vazgeçilmez bir unsurdur. Nükleer enerji, atom çekirdeğini oluşturan proton ve nötronlardan açığa çıkan bir enerji biçimidir. Nükleer enerji dünya enerjisinin önemli bir parçasıdır. Temiz, güvenilir ve uygun maliyetli enerjiye erişim sağlayarak iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmaktadır. Günümüzde 32 ülkede bulunan 400'den fazla reaktör dünya elektriğinin yaklaşık yüzde 10-15'ini sağlamaktadır. Bu çalışma nükleer enerjinin hayatımızdaki yerine odaklanmakta ve şu konuları ele almaktadır: radyasyon ve radyasyon kaynakları, radyasyondan korunma, nükleer enerji, nükleer reaktörler.

1. Giriş

İnsanoğlu varoluşundan bu yana sürekli olarak radyasyonla iç içe yaşamaktadır. Çünkü yaşadığımız dünyanın oluşumuyla birlikte yeryüzünde milyarlarca yıl yarıömürlü radyonüklidler hayatımızın kaçınılmaz bir parçası olmuşlardır. Her ne kadar bu radyonüklidler doğal kaynaklı olsa da yaşamımızdaki tek radyasyon türü değildir. Ayrıca nükleer silah ve bomba denemeleri, bazı teknolojik ürünlerin kullanımı, endüstriyel işlemler ve tıbbi tedavi ve uygulamalar ile yapay radyasyon da yaşamımızda ver almaktadır.

Enerji tüketimimizin jeopolitik ve çevresel sonuçları, yaşam kalitemizi artık tehlikeye atmayan bir enerji politikasına geçişi zorunlu kılmakta ve çeşitli senaryolarda nükleer enerji bunun sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Nükleer enerjinin elektrik üretiminde, tıpta, sanayide ve tarımda olmak üzere birçok önemli duruma katkısı vardır. Ne zaman ve nerede kullanılırsa kullanılsın, radyoaktif maddenin güvenli bir şekilde hazırlanmasını, kullanılmasını ve bertaraf edilmesini sağlamak nitelikli kişilerin ve sorumlu kuruluşların görevidir. Enerji ihtiyacında dışa bağımlılığın önüne geçmek için en iyi

alternatif çözüm yine nükleer enerjidir. Ülkemizde bu yönde adımlar atılmış olup, hali hazırda biri inşa edilmekte ve yakın zamanda tamamlanacak ve biri proje aşamasında olan iki nükleer enerji santrali projesi bulunmaktadır.

2. Radyasyon

Atom, proton ve nötrondan oluşan bir çekirdek ve çekirdeğin etrafında yörüngelerde bulunan elektron bulutundan oluşmaktadır. Bazı atomların çekirdeğinde proton ve nötron sayıları dengesizdir. Kararsız durumda olan bu atomların çekirdekleri kararlı duruma geçebilmek için ortama enerji yayarlar. Yayılan bu enerjiye radyasyon (ışınım) denilmektedir. Radyasyon kısaca enerjidir. Kararsız çekirdekler kararlı hale gelebilmek için ışıma yaptıklarından radyoaktif çekirdek de denilmektedir. Radyoaktif bozunma özelliği göstermeyen, diğer bir deyişle kararlı durumda olan 255 farklı çekirdek bulunmaktadır.

2.1. Radyasyon Türleri

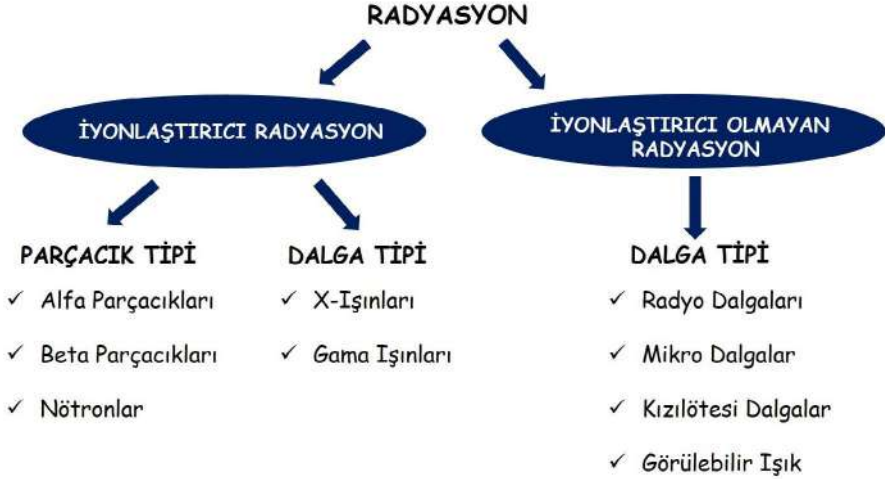
Radyasyon madde ile etkileşmesine göre iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1).

İyonlaştırıcı radyasyon, adından da anlaşılacağı üzere çok yüksek enerjiye sahip olmasından dolayı karşılaştığı atomu ya da molekülü iyonlaştırabilme özelliğine sahiptir. İyonlaştırıcı radyasyon 1016 Hz ile 1026 Hz aralığındadır (Syaza vd. 2017). İyonlaştırıcı radyasyon kendi içinde parçacık ve dalga tipi olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Parçacık tipi olanlar nötronlar, alfa (α) ve beta (β) parçacıklarıdır. Dalga tipi olanlar ise γ -ışınları ve x-ışınlarıdır. β -radyasyonu cilde birkaç santimetre nüfuz edebilirken, γ -radyasyonu deriden geçerek insan vücuduna nüfuz edebilmektedir (Wolbarst vd. 2010).

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise daha düşük enerjiye sahip olduğu için karşılaştığı atom ve molekülde iyonlaşmaya neden olmayan ancak farklı enerji seviyesine uyarılmasına neden olan bir radyasyon türüdür. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, 3 PHz (3×10^{15} Hz)'den daha düşük frekanslara ve 100 nm'den daha uzun dalga boylarına karşılık gelen, 10 eV'dan daha düşük foton enerjisine sahip elektromanyetik radyasyon olarak ifade edilmektedir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon 0 Hz ile 1015 Hz aralığındadır (Syaza vd. 2017). Frekans veya dalga boylarına göre ultraviyole (UV) radyasyon (dalga boyları 100–400 nm), görünür ışık (dalga boyları 400–780 nm), kızılötesi radyasyon (dalga boyları 780 nm–1 mm), radyofrekans elektromanyetik alanlar (frekanslar 100 kHz–300 GHz), düşük frekans (frekanslar 1 Hz–100 kHz) ve statik elektrik ve manyetik alanlar (0 Hz) olarak sınıflandırılmak-

tadır (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection 2020).

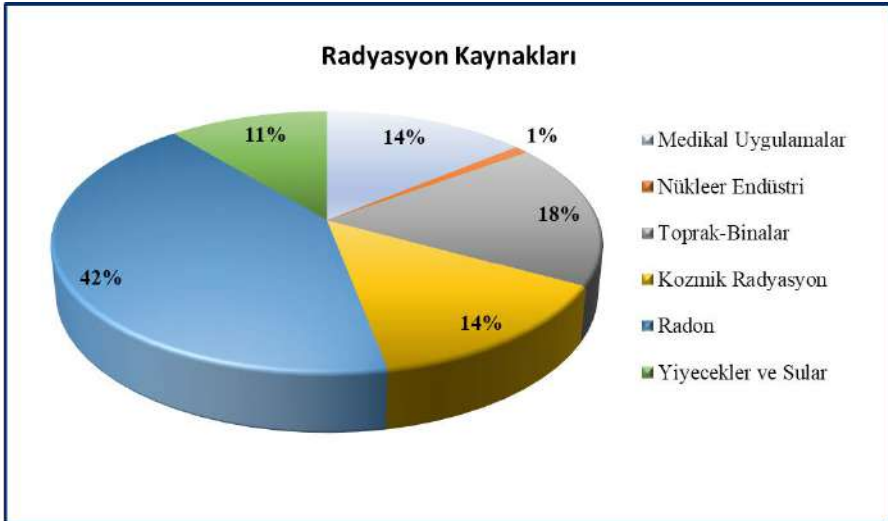
Şekil 1. Radyasyon çeşitleri.



2.2. Radyasyon Kaynakları

Radyasyon kaynakları, doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 2).

Şekil 2. Radyasyon kaynakları.



Doğal radyasyon kaynakları doğada kendiliğinden var olan radyasyon kaynaklarıdır. Kozmik ışınlar, Radon, gama ışınları ve vücut içi ışınlanma doğal radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadır (Şekil 3). Tüm canlılar sürekli olarak doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Alınan dozun yaklaşık %85'i hem kozmik hem de karasal radyasyondan kaynaklanmaktadır (Dołhańczuk-Śródka 2012). Radon, canlılar üzerinde zararlı etkileri olan en önemli doğal radyasyon kaynağıdır (Janik ve Tokonami 2009). Radonun gaz halindeki radyoizotopları (^{220}Rn ve ^{222}Rn) ve doğal bozunma serisi ürünleri, popülasyonun doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarından aldığı toplam dozun yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Mansir vd. 2023). Radon gazı; kayalarda, topraklarda ve bina içlerinde bulunmaktadır. Buna ek olarak, doğal bozunma serisine ait radyonüklidler, dünyadaki iyonlaştırıcı radyasyonun en önemli kaynağını temsil etmektedir. Uzun ömürlü uranyum radyoizotopları (^{235}U ve ^{238}U), toryum (^{232}Th) bozunma serisi ürünleri ile uzun ömürlü ^{40}K doğada bulunan en önemli radyonüklidlerdir (Murty ve Karunaka 2008). Kozmik ışınlar; güneş, yıldızlar ve uzaydan gelen parçacıklar ve elektromanyetik ışınlardan oluşmaktadır. Vücut içi ışınlanma, yiyecek ve sulardan alınan, insanların vücudunda doğal olarak bulunan Potasyum-40 ve Karbon-14 gibi izotoplardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 3. Doğal radyasyon ve hayatımızdaki yeri.



Nükleer silah denemeleri, nükleer reaktörler, kullanıcı ürünleri (endüstri, tarım, hayvancılık vb. alanlarda kullanılan ürünler) ve tıbbi uygulamalar ise yapay radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadır. Nükleer silah denemeleri, nükleer reaktörlerdeki kazalar ve nükleer tesislerden radyoaktif atıkların boşaltılması, çevredeki yapay (antropojenik) radyonüklidlerin ana kaynaklarıdır. Özellikle ^{137}Cs yapay radyonüklidi nükleer silah denemeleri ve reaktör kazaları sonucunda çevreye yayılarak bitki kökleri vasıtasıyla besin zincirine katılır ve canlılara zarar verir (Changizi vd. 2013).

2.3. Radyasyon Kullanım Alanları

Radyasyon; tıp, endüstri, tarım, haberleşme vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tıp alanında kullanımı önemli bir yere sahiptir. Radyasyon, röntgen, ultrason, bilgisayarlı tomografi gibi cihazlarda tanı amaçlı olarak kullanılmaktadır. Radyasyona en duyarlı hücreler sürekli bölünen hücrelerdir. Bu nedenle kanserli tümörleri yok etmek için radyasyondan yararlanılmaktadır. Böbrek ve beyin gibi organların işlevlerini gözlemlemek için ışın etkin maddeler kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak; medikal aletlerin sterilizasyonu ve yeni üretilen ilaçların onaylanması aşamalarında da nükleer radyasyondan yararlanılmaktadır.

Endüstride radyografi tekniği kullanılarak makine ekipmanlarında hata tespiti yapılabilmektedir. X ve gama ışınları ile röntgen filmleri çekilerek endüstriyel ürünlerde hata tespit edilebilmektedir. Karayollarında zeminin nem ve yoğunluk ölçümlerinde radyasyon kaynaklarından faydalanılmaktadır.

Güvenlik amaçlı havaalanı, kargo, alışveriş merkezleri vb. alanlarda çanta, paket, bagaj kontrollerinde X-ışınları kullanılmaktadır. Duman dedektörleri, fosforlu saatler, optik mercekler, porselen dişler de az miktarda radyoaktif madde içermektedir.

Gıdaların ömürlerinin uzatılması, tarım ürünlerinin böceklenmesinin önlenmesi, besinlerdeki çimlenmenin önlenmesi, tarımda bitkilerdeki üretim artışının sağlanması, hayvanların üremelerinin artırılması için de radyasyondan faydalanılmaktadır. Ayrıca; haberleşmenin bazı alanlarında uzun ömürlü olduğu için nükleer piller tercih edilmektedir.

2.4. Radyasyondan Korunma Yolları

Radyoaktif bozunma sonucunda yayılan parçacıklar ve elektromanyetik radyasyona radyoaktif radyasyon denilmektedir. Radyoaktif radyasyon, herhangi bir ortamdan geçtiğinde iyonlaşmaya neden olma özelliği ile karakterize edilmektedir. Nötr bir atom elektron kaybederse çekirdek pozitif iyon

dönüştür ve serbest elektron negatif iyonla dönüşür. Bu iyon çifti oluşumuna iyonizasyon denilmektedir. İyonlaşma, radyasyonun enerji kaybettiği ve aynı zamanda radyoaktif radyasyonun neden olduğu hasardan sorumlu bir süreçtir.

Radyasyon hasarının derecesi; toplam radyasyon dozu, ışınlanan vücut oranı, ışınlanan dokuların hacmi ve alınan radyasyon dozunun zaman aralığı ile ilişkilidir (Cox ve Ang 2009). İyonlaştırıcı radyasyon, insan vücuduna zarar veren iyi bilinen bir radyasyon türüdür. Hücreyi bir saniyede iyonize edebilme özelliğine sahiptir. Vücudumuz radyoaktif radyasyona maruz kaldığında iyonizasyon meydana gelir. Atomlardan oluşan doku hücreleri bir elektron kaybederek serbest bir elektron ve bir iyon ortaya çıkar. Böyle bir durumda vücuttaki dokular, elektronlar ve iyonlar arasında kimyasal süreçler oluşur. Sonuçta yüksek dozlarda radyoaktif radyasyona maruz kalındığında doku tahribatı meydana gelir ve vücut hücreleri yok olmaya başlar. Bu nedenle, doku tahribatının önüne geçmek ve vücut hücrelerinin hasar görmesini engellemek için radyoaktif radyasyonun vücuda nüfuzunun önlenmesi gerekmektedir.

Diğer yandan, iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun insan vücuduna zarar verebilmesi için uzun süre bu radyasyon türüne maruz kalınması gerekmektedir. Bunun nedeni, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türünün insan vücudundaki bir atomu veya molekülü iyonize edecek yeterli enerjiye sahip olmamasıdır (Syaza vd. 2017).

İnsanların radyasyondan korunmalarına yönelik Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), Uluslararası Radyoloji Korunma Komisyonu (ICRP), Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümü Komitesi (ICRU) ve Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkilerini Araştırma Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından radyasyonun sağlık etkileri, doz sınırı değerleri, güvenliği sağlamak amacıyla prosedürler yayınlanmıştır. Buna ek olarak; Ülkemizde 1982 yılında yürürlüğe giren 2690 sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Kanunu çerçevesinde; radyasyondan korunma ve radyasyon güvenliği konularında çalışmalar yürütülmektedir. 25 Nisan 2023 tarihli ve 32171 sayılı “Radyoloji Hizmetleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik” kapsamında yıllık doz sınırları ile ilgili hususlarda Nükleer Denetleme Kurulu tarafından yapılan düzenlemeler esas alındığı, radyasyondan korunmanın ve radyasyon güvenliğinin teminine ilişkin Nükleer Denetleme Kurulu tarafından yayımlanan mevzuat kapsamında radyasyon uygulamaları yürütüleceği, Nükleer Denetleme Kurulu tarafından uygun bulunan radyasyondan korunma programının uygulanması sağlanacağı belirtilmiştir. Nükleer Denetleme Kurumu tarafından radyasyondan korunma, atıkların

taşınması, nükleer güç santrallerinde güvenlik ve emniyete ilişkin çeşitli kılavuzlar ve yönetmelikler yayınlanmaktadır (URL-1). 2690 sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Kanunu'nun 4.maddesinin (d) bendine dayanılarak radyasyon güvenliği yönetmeliği hazırlanmıştır. Bu yönetmeliğe göre; yıllık doz sınırları radyasyon görevlileri için etkin doz ardışık beş yılın ortalaması 20 mSv'i, herhangi bir yılda ise 50 mSv'i geçemez. El ve ayak veya cilt için yıllık eşdeğer doz sınırı 500 mSv ve göz merceği için ise 150 mSv'dir. Cilt için en yüksek radyasyon dozuna maruz kalan 1 cm²lik alanın eşdeğer dozu, diğer alanların aldığı doza bakılmaksızın ortalama cilt eşdeğer dozu olarak kabul edilmektedir. Toplum üyesi kişiler için ise etkin doz yılda 1 mSv'i geçemez. Özel durumlarda; ardışık beş yılın ortalaması 1 mSv olmak üzere yılda 5 mSv'e kadar izin verilir. Cilt için yıllık eşdeğer doz sınırı 50 mSv, göz merceği için 15 mSv'dir (Hanifi ve Bülbül 2023).

Bir günde alınan radyasyon seviyelerinin insan sağlığına etkisi incelendiğinde 150-300 Röntgen aralığında ölümle sonuçlanabileceği, 300-600 Röntgen aralığında % 50'den fazla ölüm durumunun oluşabileceği, 700 Röntgen ve üzerinde alınan dozun ise ölümcül olduğu belirtilmektedir (Uşaklı 2004).

Radyasyondan korunabilmek için radyasyon kaynağından olabildiğince uzakta durulması ve maruz kalınan sürenin minimumda tutulması gerekmektedir. Radyasyondan korunmak için paravanlar, kurşun camlar, gonadal koruyucular, kurşun önlük, eldiven, gözlük ve boyunluk kullanılması gerekmektedir (Erdoğan 2017).

Radyoaktif maddelerle çalışılan ortamların radyoaktif madde kullanım izni bulunmalı ve bu ortamlarda sadece radyasyon ile çalışmak için yetkili personellerin çalışmasına izin verilmelidir. Radyoaktif maddelerle çalışan personeller yazılı olarak tarih, malzeme türü, aktivite ve aksi durumlarda gerçekleşen olayları kayıt altına alması gerekmektedir. Radyoaktif maddelerle çalışan personeller tek kullanımlık eldivenler kullanmalı ve eldivenlerini sık sık değiştirmelidir. Sıvı ve katı radyoaktif atıklar için uygun kaplar tedarik edilmelidir. Laboratuvarlarda P-32, Rb-86, Na-22 ve diğer yüksek enerjili beta ve gama yayınlı radyoaktif izotoplar için uygun koruyucu zırhlar kullanılmalıdır. Radyoaktif maddelerle çalışırken personeller, taşınabilir radyasyon detektörleri bulundurulmalıdır. Taşınabilir cihazlar tarafından tespit edilemeyen beta radyasyonu yayınlayan radyoaktif izotopların (Ca-45, S-35, C-14, H-3 vb.) kullanımında personellerin tıbbi tetkikleri sıklıkla yapılmalıdır.

Nükleer güç santrallerindeki sistemlerin uygun olarak zırhlınması, bakım süreçlerinde personellerin korunması, gerekli prosedürlere uyulması personellerin radyasyondan korunması için önemli kriterlerdir (URL-2).

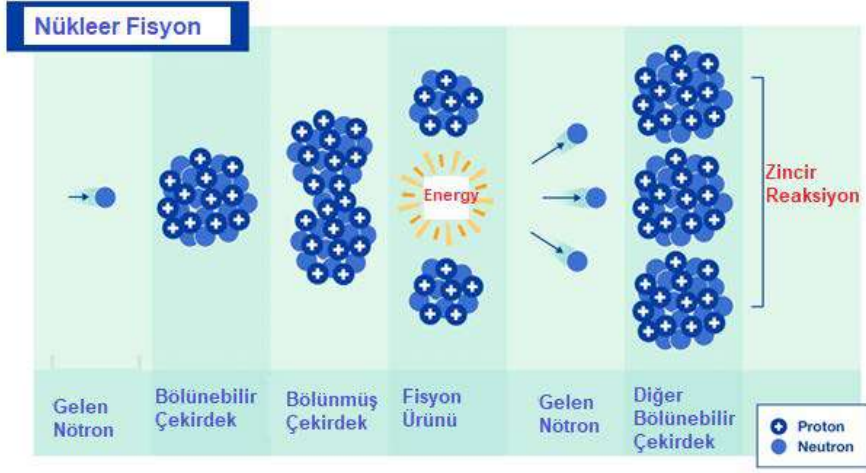
Doğal radyasyon kaynağı olan radon gazı, bina içlerine çatlaklardan ve boşluklardan girerek havalandırılmayan ortamlarda birikebilmektedir. Radon gazının solunması özellikle akciğer hücrelerine zarar vermektedir ve sigaradan sonra ikinci akciğer kanser nedenidir (Özden ve Aközcan 2022). Buna ek olarak, uranyum madenciliğinde çalışan personeller solunumu durumunda akciğer için tehlike arz eden uranyum ve ürünlerinin tozlarına maruz kalabilirler. Bu nedenle, bu tür radyoaktif gaz ve tozların zararlı etkilerinden korunmak için ortamlar sıklıkla havalandırılmalıdır (Özden ve Aközcan 2022, URL-2).

3. Nükleer Enerji Nedir ve Nasıl Elde Edilir?

Nükleer enerji; atomik enerji ve çekirdek enerjisi anlamlarına gelmektedir. Nükleer enerji, atom reaktörleri veya nükleer santrallerde atom çekirdeklerinin parçalanması (filyon) veya birleştirilmesi (füzyon) yöntemleri ile elde edilir.

Nükleer enerji, ısı ve elektrik üretim aşamaları herhangi bir sera gazı emisyonuna neden olmayan bir enerji türüdür (Lenzen 2008). Nükleer enerji 1930'lu yıllarda ilk kez fark edildiğinde çok az malzeme ile çok büyük miktarda enerji açığa çıkarılabilmesi bilim adamlarını heyecandırmıştır. Filyon çok umut verici bir potansiyel enerji kaynağı olarak görülüyordu. İkinci Dünya Savaşında atom bombasının teknolojik başarısının ardından nükleer enerjinin ticari olarak da pratikte kullanılabilceği düşünölmeye başlandı (Bodansky 2007).

Şekil 4. Filyon olayı.



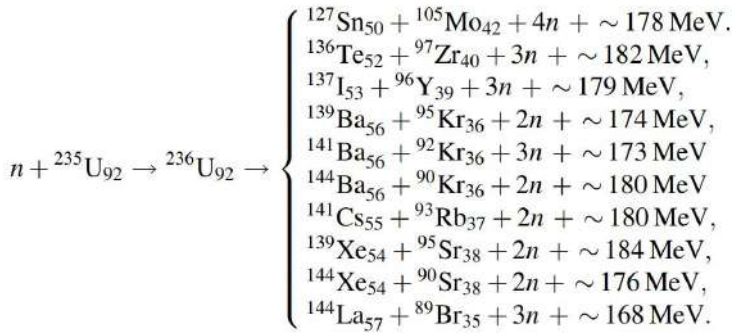
Filyon, 1939'da Alman fizikçiler Otto Hahn ve Fritz Strassmann tarafından keşfedilmiştir. Nükleer filyon, ağır bir elementin çekirdeğinin daha hafif parçalara ayrılmasıdır. Bu reaksiyonda, belirli sayıda serbest nötron ve büyük miktarda enerji açığa çıkar (Şekil 4). Filyon ürünleri sırayla çevreleyen atomlarla hızla çarpışır ve birkaç ila birkaç on mikron aralığında, tüm kinetik özelliklerini kaybeder. Nükleer filyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji, kimyasal tepkimeler sonucunda açığa çıkan enerjiden 10 milyon kat daha büyüktür. Yüksek enerji açığa çıkmasından dolayı nükleer filyon müt-hiş bir enerji kaynağıdır. Bir filyon reaksiyonunda, ağır çekirdekler nötron bakımından zengin olduğundan serbest nötronların emisyonu meydana gelir (De Sanctis vd. 2016). Şekil 5'te ^{235}U çekirdeğinin çeşitli filyon reaksiyonları listelenmiştir.

Filyon, bazı ağır çekirdeklerde kendiliğinden gerçekleşebilmektedir. Bazı ağır çekirdeklerde ise nötronlar, gama ışınları veya ağır iyonlarda bombardıman edilerek oluşturulur. Çeşitli filyon yapabilen çekirdekler ($_{90}\text{Th}$, $_{92}\text{U}$, $_{95}\text{Am}$ vb.) arasında ^{235}U , ^{233}U ve ^{239}Pu izotoplarının yarı ömürleri ve tesir kesitlerinin yüksek olması nedeniyle diğerlerine kıyasla daha önemli filyon çekirdekleridir (Dinçer 1987).

Güçlü nükleer bağlanma nedeniyle, filyon sırasında açığa çıkan enerji diğer enerji üretim kaynaklarına kıyasla çok büyük bir enerjidir. Bu enerji, tipik olarak filyon olayı başına yaklaşık olarak 200 MeV mertebesindedir. Bu enerjinin çoğu filyon parçalarının kinetik enerjisi iken, yaklaşık %10-20'si uyarma enerjisidir. Tipik bir filyon reaksiyonunda nötron ve gama emisyonu gözlenir (Schunck ve Robledo 2016).

Fisyon olayında enerjileri yaklaşık 2 MeV olan 2-3 nötron oluşur. Oluşan nötronlar yeni fisyon reaksiyonları meydana getirebilir. Bu olaya zincirleme çekirdek reaksiyonu (tepkimesi) denilmektedir. Nükleer santrallerde kullanılan tepkimeler ve atom bombası fisyon olayına örnek olarak verilebilir.

Şekil 5. $^{235}\text{U}_{92}$ çekirdeğinin çeşitli fisyon reaksiyonları ve açığa çıkan enerjiler (De Sanctis vd. 2016).



Etrafımızdaki füzyon olayına yıldızlar ve güneş örnek olarak verilebilir. Uranyum gibi ağır çekirdeklerin parçalandığı nükleer fisyonun aksine, füzyonda hafif elementler bir araya gelerek daha ağır elementler oluşur (Kikuchi vd. 2012). Oluşan daha ağır elementler, füzyonda kaynaşan hafif elementlerden daha az kütleyle sahiptir. Bu kütle farkı enerjinin açığa çıkmasına neden olur. Örneğin; kütle numaraları sırasıyla 2 ve 3 olan döteryum ve trityum çekirdekleri bir araya geldiğinde birleşerek bir helyum çekirdeği ve nötron oluşturur. Bu olayda kütle farkı 17.6 MeV enerji olarak salınır. Füzyonun gerçekleşebilmesi için protonların ve daha ağır çekirdeklerin (pozitif yüklü ve doğal olarak itici) elektrostatik itici kuvvet ile nükleonları bir arada tutan nükleer güçlü kuvvetin üstesinden gelecek kadar mesafeleri az olmalıdır. Bu durum, çekirdekler çok yüksek termonükleer sıcaklığa ısıtıldığında mümkündür. Füzyon reaksiyonları; Döteryum-Döteryum (D-D) veya Döteryum-Trityum (D-T) çekirdek tepkimeleri olmak üzere iki şekilde gerçekleşebilmektedir. Döteryum ve Trityum çekirdeklerinin füzyon olayına katılabilmeleri için gereken termonükleer sıcaklık yaklaşık olarak 100 milyon °C'dir. Bir füzyon reaksiyonuyla salınan enerji, kimyasal reaksiyonlarda salınan enerjiden çok daha büyüktür. Bunun nedeni, çekirdekte nükleonları bir arada tutan bağlanma enerjisi atom ve molekülleri bir arada tutan bağ enerjisinden çok daha büyük olmasıdır. Örneğin, hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi 13.6 eV'tur. Bu enerji, Döteryum ve Trityum çekirdeklerinin füzyon olayında salınan enerjinin milyonda birinden daha azdır (Kikuchi vd. 2012).

4. Nükleer Reaktörler

Nükleer enerji dünya elektrik arzında önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde dünya çapında toplam 389.5 GW (e) kapasiteye sahip çalışır durumda olan 437 adet nükleer reaktör bulunmaktadır (IAEA 2022).

Nükleer reaktörler, nükleer enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yapılarıdır. Günümüz teknolojisinde nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonuna dayalı nükleer enerji üretilmektedir. Nükleer reaktörlerde zincirleme çekirdek reaksiyonları kontrollü olarak gerçekleştirilerek enerji üretimi yapılmaktadır. Füzyon reaksiyonlarından yararlanarak enerji elde etmeye yönelik çalışmalar bulursa da ticari boyuta henüz ulaşamamıştır.

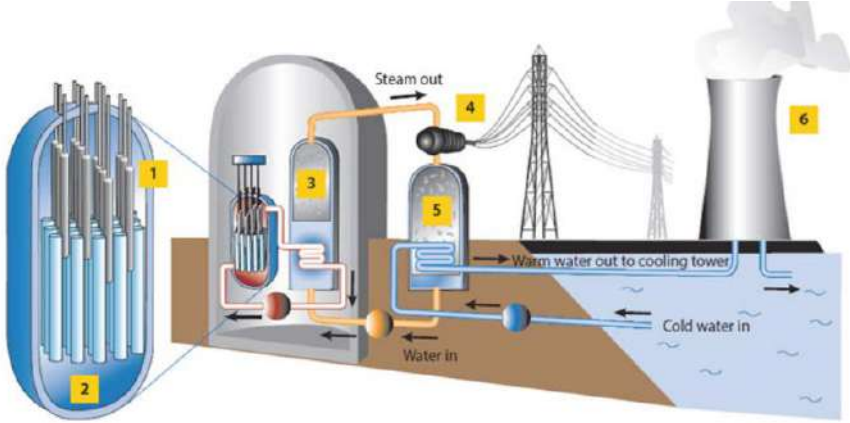
Nükleer santraller yapısı itibarıyla termik santrallere benzer özellikler bulundurmaktadır. Aralarındaki temel fark buharın elde edilmiş şeklidir (Eral 2015). Nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonu sonucunda oluşan enerji ısı enerjisine, ısı enerjisi de elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Nükleer reaktörler temel olarak yakıt, yavaşlatıcı (moderatör), soğutucu, kontrol çubukları, reflektör, reaktör kalbi ve koruyucu zırh kısımlarından oluşmaktadır. Şekil 6'da basınçlı su reaktörünün temel bileşenleri örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 6'da numaralandırılan bileşenlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir:

1. Reaktör: Yakıt çubukları şekilde açık mavi renkli çubuklardır. Yakıt çubukları basınçlı suyu ısıtır. Kontrol çubukları gri renkli çubuklardır. Kontrol çubukları, fisyon sürecini kontrol etmek veya durdurmak için nötronları soğurur.
2. Soğutucu ve yavaşlatıcı: Yakıt ve kontrol çubukları, soğutucu ve moderatör görevi gören suyla (birincil devre) çevrilidir.
3. Buhar jeneratörü: Nükleer reaktör tarafından ısıtılan su, yüksek basınçlı buhar oluşturmak için termal enerjiyi binlerce boru aracılığıyla ikincil bir su devresine aktarır.
4. Turbo jeneratör seti: Buhar, tıpkı bir fosil yakıt fabrikasında olduğu gibi elektrik üretmek için jeneratörü döndüren türbini çalıştırır.
5. Kondensör: Buharı tekrar buhar üreticine pompalanan suya dönüştürmek için ısıyı uzaklaştırır.
6. Soğutma kulesi: Kondensörde dolaşan soğutma suyundaki ısıyı, ortam sıcaklığına yakın kaynağa geri döndürmeden önce uzaklaştırır. Termodinamik kanunları nedeniyle mekanik enerjiye dönüştürüle-

meyen fazla termal enerjiyi boşaltmak için bazı tesisler tarafından soğutma kulelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 6. Bir nükleer güç reaktörünün temel bileşenleri
(De Sanctis vd. 2016).



Nükleer reaktörlerde en önemli bileşen yakıt malzemesidir. Nükleer yakıt olarak başlıca ^{235}U , ^{239}Pu ve ^{233}U izotopları kullanılmaktadır. Bu izotoplardan yalnızca ^{235}U doğada bulunmaktadır ve çalışan reaktörlerin çoğunda temel yakıttır. Doğada bulunan uranyumun %0,72'si fisil ^{235}U izotopudur (Grenthe vd. 2006). Nükleer reaktörlerde yakıt olarak uranyumun kullanılması için işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bunun için; doğal uranyum içeriğindeki ^{235}U oranını arttırmak için zenginleştirme işlemi uygulanır. Çoğu reaktör bir uranyum dioksit karışımı ve plütonyum dioksit karışımı olan MOX yakıt kullanmaktadır (De Sanctis vd. 2016). Toryum temelli nükleer yakıtların kullanıldığı reaktör tasarımları 1990'lı yıllarda tasarlanmaya başlanmıştır (Nguyen vd. 2022). Ancak; Toryum fisil özellik göstermediği için tek başına nükleer yakıt olarak kullanımı olası değildir. ^{232}Th izotopunun ^{239}Pu veya ^{233}U izotopları ile birlikte kullanılması gerekmektedir (Aslan 2022).

Fisyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan hızlı nötronların yavaşlamasını ve tekrar yakıt çekirdeği tarafından yakalanmasını sağlamak için yavaşlatıcı (moderatör) kullanılmaktadır. Fisyon reaksiyonu sonucunda serbest kalan ısı enerjisi reaktör kabını ısıtır. Reaktör kabının soğutulması ve açığa çıkan ısı enerjisinin reaktör dışına aktarılmasını sağlamak amacıyla soğutucu bulunmaktadır. Ayrıca; nötron sayılarının kontrolünü ve zincirleme reaksiyonun kontrol altında tutulmasını sağlamak için kontrol elemanları mevcuttur. Nükleer Reaktörün çalışması nedeniyle oluşan radyasyondan personelleri korumak amacıyla çelik ve ağır beton gibi maddelerden yapılmış bir zırh bulunmaktadır.

Günümüze kadar çeşitli nükleer reaktör tipleri geliştirilmiştir. Nükleer reaktörler, yakıtlarına, soğutucularına, yavaşlatıcılarına, nötron enerjilerine göre sınıflandırılabilir. Dünya geneline bakıldığında kullanılan reaktör tipleri İleri Kaynar Sulu Reaktör (Advanced Boiling Water Reactor-ABWR), İleri Gaz Soğutmalı Reaktör (Advanced Gas Cooled Reactor-AGR), Kaynar Sulu Reaktör (Boiling Water Reactor-BWR), Hızlı Üretken Reaktör (Fast Breeder Reactor-FBR), Gaz Soğutmalı Reaktör (Gas Cooled Reactor-GCR), Hafif Su Soğutmalı Grafit Yavaşlatıcılı Reaktör (Light Water Cooled Graphite Moderator Reactor-LWGR), Basınçlı Ağır Sulu Reaktör (Pressurized Heavy Water Reactor-PHWR), Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor-PWR) ve Su Soğutmalı Su Yavaşlatıcılı Güç Reaktörü (Water Cooled Water Moderator Power Reactor-WWER)'dir.

Ayrıca, bu nükleer reaktörler nesillerine göre de sınıflandırılmaktadır. 1950-1960'lı yıllarda ilk olarak geliştirilen nükleer reaktörler Nesil-I reaktörleri olarak isimlendirilmiştir. Shippingport / Dresden, Magnox ve VK-50, BiNPP reaktörleri Nesil-I reaktörlerine örnek olarak verilebilir. 1970'lerde geliştirilen reaktörler Nesil-II reaktörleridir. LWR (BWR ve PWR), CANDU (CANada DeuteriumUranium reactor), AGR Nesil-II reaktörleri, Nesil-II reaktörlerine örnek olarak verilebilir. 1990'lı yıllarda geliştirilenler Nesil-III reaktörleridir. LWR, ABWR ve System 80+ reaktörleri bu sınıfta yer alan reaktörlerdir. 2010 yılından itibaren ise Nesil-III+ reaktörleri kullanılmaya başlanmıştır (Gu 2018). Günümüzde ise dünya genelinde kullanılan çoğu nükleer reaktör Nesil-II seviyesindeki reaktörlerdir (Goldberg ve Rosner 2011). Nesil-IV reaktörleri ise araştırma ve geliştirme aşamasında olup, bu reaktörlerin 2030-2050 yıllarında önemli bir enerji kaynağı haline geleceği düşünülmektedir (Locatelli vd. 2013).

Türkiye'de Nükleer Santral kurulumuna yönelik planlamalar 1962 yılında görüşülmeye başlanmış ve 12 Mayıs 2010 tarihinde "Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Arasında Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma" imzalanmıştır (URL-3). Akkuyu Nükleer Güç Santralinin yılda 40 Milyar kWh elektrik enerjisi üreteceği düşünülmektedir. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nde AES 2006 tasarımı toplam 4800 MW kapasiteli ve dört üniteden oluşan VVER-1200 tipi reaktör kullanılacaktır (Akyüz 2017).

Kaynaklar

- Akyüz, E. (2017). Advantages and disadvantages of nuclear energy in Turkey: Public perception.” *Eurasian Journal of Environmental Research*, 1(1), 1-11.
- Aslan N. (2022). *Nükleer Kimya*. İksad yayınevi.
- Bodansky, D. (2007). *Nuclear energy: principles, practices, and prospects*. Springer Science & Business Media.
- Changizi, V., Shafiei, E., & Zareh, M. R. (2013). Measurement of ²²⁶Ra, ²³²Th, ¹³⁷Cs and ⁴⁰K activities of wheat and corn products in Ilam province–Iran and Resultant annual ingestion radiation dose. *Iranian journal of public health*, 42(8), 903.
- Cox, J. D., & Ang, K. K. (2009). *Radiation Oncology E-Book: Rationale, Technique, Results*. Elsevier Health Sciences.
- De Sanctis, E., Monti, S., & Ripani, M. (2016). *Energy from nuclear fission*. Undergraduate Lecture, © Springer International Publishing Switzerland.
- Diñçer S. (1987). *Nükleer Fisyon*. Journal of the Faculties of Engineering of Uludağ University 2(1), 7-16
- Dołhańczuk-Śródka, A. (2012). Estimation of external gamma radiation dose in the area of Bory Stobrowskie forests (PL). *Environmental monitoring and assessment*, 184, 5773-5779.
- Eral, M. (2015). *Nükleer güç santralleri ve ülkemiz*. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer Teknoloji Anabilim Dalı, İzmir, 9, 2017.
- Erdoğan, M. (2017). İyonlaştırıcı radyasyon ve korunma yöntemleri. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 43(2), 139-147.
- Goldberg, S., & Rosner, R. (2011). *Nuclear reactors: Generation to generation*. Cambridge: American academy of arts and sciences.
- Grenthe, I., Drożdżynski, J., Fujino, T., Buck, E. C., Albrecht-Schmitt, T. E., & Wolf, S. F. (2006). *Uranium. The chemistry of the actinide and transactinide elements*, 253-698.
- Gu, Z. (2018). History review of nuclear reactor safety. *Annals of Nuclear Energy*, 120, 682-690.
- Hanifi, Ç. A. M., & Bülbül, M. (2023). Akdeniz Bölgesinde Kozmik Eş Radyasyon Doz Değerlerinin Expacs Programı ile Belirlenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 208-219.
- IAEA Nuclear Power Reactors In The World 2022 Edition <https://www.iaea.org/publications/15211/nuclear-power-reactors-in-the-world>
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2020). Principles for non-ionizing radiation protection. *Health physics*, 118(5), 477-482.

- Janik, M., & Tokonami, S. (2009). Natural and artificial sources of radioactivity in Poland. *Japanese Journal of Health Physics*, 44(1), 116-121.
- Kikuchi, M., Lackner, K., & Tran, M. Q. (2012). Fusion physics.
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy conversion and management*, 49(8), 2178-2199.
- Locatelli, G., Mancini, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects.” *Energy Policy*, 61, 1503-1520.
- Mansir, I. B., Jaoji, A. A., AlArjani, A. S., & Jonah, S. A. (2023). Recent review of natural and artificial background radiation dosimetry studies in Saudi Arabia. *Radiation and environmental biophysics*, 1-11.
- Murty, V. R. K., & Karunakara, N. (2008). Natural radioactivity in the soil samples of Botswana. *Radiation Measurements*, 43(9-10), 1541-1545.
- Nguyen, T., Wang, X., & Bromley, B. (2022) Review of Methods and Results for Reactor Physics Analysis of Thorium-Based Fuels From Irradiation Experiments Conducted in NRU. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*.
- Özden, S., & Aközcan, S. (2022). Indoor radon levels in dwellings of Kırklareli, Turkey. *Sakarya University Journal of Science*, 26(1), 224-231.
- Schunck, N., & Robledo, L. M. (2016). Microscopic theory of nuclear fission: a review. *Reports on Progress in Physics*, 79(11), 116301.
- Syaza, S. K. F., Umar, R., Hazmin, S. N., Kamarudin, M. K. A., Hassan, A., & Juahir, H. (2017). Non-ionizing radiation as threat in daily life. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(2S), 308-316.
- URL-1, <https://www.ndk.org.tr/mevzuat> Erişim: 23.05.2023
- URL-2, <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/834-bolum-06-radyasyondan-korunma.html> Erişim: 22.05.2023
- URL-3, <http://www.akkunpp.com/> Erişim:28.05.2023
- Uşaklı, A. B. (2004). Nükleer radyasyon ve etkileri. *Türk Silahlı Kuvvetleri Dergisi*, 379, 118-126.
- Wolbarst, A. B., Wiley Jr, A. L., Nemhauser, J. B., Christensen, D. M., & Hendee, W. R. (2010). Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practitioners. *Radiology*, 254(3), 660-677.