

NÜKLEER SANTRALLER ÇALIŞIRLARKEN ÇEVRENİN RADYOAKTİF BACA GAZLARIYLA KİRLENMESİ ve HALKIN ETKİLENMESİ NASIL ÖNLENEBİLİR?

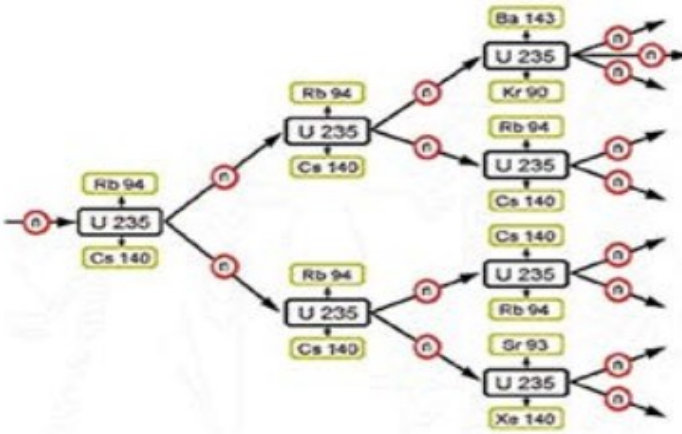
Almanya deneyimlerinden Akkuyu nükleer reaktörleri için çıkarılabilecek dersler..

Yüksel Atakan (xx), Radyasyon Fizikçisi, Dr. Almanya, ybatakan4@gmail.com

Bir nükleer reaktör çalışırken bacasından saatte yaklaşık olarak 200.000 m³ hava atıyor. Bu havanın içinde çok az miktarda da olsa çeşitli radyoaktif maddeler de bulunuyor. Çevrenin radyoaktif maddelerle zamanla kirlenmemesi, toprak ve bitkilerde bunların birikip canlıları etkilememesi için, nükleer santrallerin ilgili standartlarına göre çeşitli önlemlerin yerine getirilmesi gerek. Bu önlemler özetle, radyoaktif maddeli atık hava, reaktörün bacasına ulaşmadan çok önce ilgili sistemlerde bunlardan örneğin filtrelerle olduğunca kadar fazla temizlenmesi ve belirli sınır (limit) değerleri aşmamasının ön ölçümlerle sağlanmasıdır. Eğer reaktör ve yardımcı binalarındaki atık havadaki radyoaktivite miktarı sınır değerleri aşıyorsa, atık havanın bacaya ulaşmaması ve ilgili temizleme sistemlerinde tekrar temizlenmesinin sağlanması gerekiyor. Tüm bunlar için ise gerek reaktör binalarındaki sistemlerde (örneğin atık gaz sistemi, atık hava sistemi) gerekse bacada yüksek duyarlılıkta (hassas) radyasyon ölçüm aletleri (radyasyon monitorları) bulunuyor. Bunların ön alarmlarıyla radyoaktivitesi yüksek gaz ya da hava bacaya ulaşmadan önce ilgili arıtma sistemlerine tekrarı tekrar yönlendiriliyor ve temizleniyor. Bu ölçüm aletleri Akkuyu Nükleer reaktörlerinde hangi sistemlerde, kaç adet ve ne duyarlılıkta var açıklanmadığından bilmiyoruz ama bu yazımız yetkililerce okunursa Almanya deneyimleri örnek alınabilir ve ilgili IAEA standartları da temel alınarak geliştirilir umuyoruz /1-6/.

Nükleer Güç Santrallerinde (NGS) atık havadaki radyoaktif maddeler nereden kaynaklanıyor?

Zenginleştirilmiş uranyum 235 izotopunun kullanıldığı reaktörlerde, yavaş nötronlarla bombardımanla bölünme (fisyon) sonucu olarak ortaya, biri daha ağır (sezyum 137, iyot 131 gibi) diğeri daha hafif (Rb 94, Br 87 gibi) bir dizi radyoizotoptan (**bölünme ürünleri**) girici iyonlaştırıcı ışınlar yayınlanıyor. Sayıları 200'e varan yüksek aktivitedeki 'bölünme ürünleri' 35 kadar elementin radyoizotopları (farklı nötron sayılı atom çekirdekleri) olarak ortaya çıkıyor. Bölünen U235 atom çekirdeğinden, bölünme başına 2-3 adet nötron ortaya çıkıyor ve bunlardan 1 adedinin başka bir U235 çekirdeğini bölecek şekilde zincirleme tepkimenin sürmesi sağlanarak NGS'da bu gerçekleştireiliyor.



Şekil 1. Uranyum 235 atom çekirdeklerinin bölünme zinciri ve oluşan radyoaktif maddeler. Bir nükleer reaktörde bu reaksiyon 1 nötronla sürdürülerek reaktörün kritik üstüne çıkması önleniyor.

Bir nükleer santralde (NGS), 'normal işletme' sırasında, ortaya çıkan çok çeşitli radyoaktif maddelerin (radyoizotopların) neredeyse tümü, yakıt elemanlarında, reaktörde ve bunları içine alan kalın çelik duvarlı silindirde ('Reaktör kabında') kalıyor. Reaktörü soğutan suya difüzyon ve sızıntıyla (ya da hava / gaz kaçaklarıyla) çok az miktarda geçen radyoizotoplar, bu suyla, ana ve yardımcı sistemlerdeki pompa, boru, vana ve depolara dağılıyorlar ve bunların içinde bulunduğu yapıların iç yüzeylerine ve havasına sızabiliyorlar.

Doğal uranyumda U 235 radyoizotopunun oranı çok az olduğundan (% 0,7), NGS'nda gerekli enerjinin elde edilebilmesi için %3-7 arasında zenginleştirilmiş U 235 kullanılıyor. Reaktörlerdeki uranyumun arta kalanı ise nötronlarla bölünmeyen U238'den oluşuyor. Reaktörde kullanıldıktan sonra, çok yüksek radyoaktivitesinin bozunmayla kendiliğinden azalması için uzun bir süre nükleer santraldaki 'dinlenme havuzlarında' bekletilen yakıt elemanları çubuklarındaki 'yanmış uranyum'da ise, kabaca % 95 U 238, % 0,8 U 235, % 0,9 Pu, %3,2 bölünme ürünleri ve % 0,1 kadar da reaktörde oluşan aktinidler (Çekirdeklerindeki proton sayıları 89 ile 109 arasında olan 'yapay elementler') bulunuyor. 200 kadar 'bölünme ürünleri'nin % 20'si ise asal gaz.

Öte yandan reaktörde U 235 atom çekirdeğinin bölünmesi (fisyon) sırasında yayınlanan nötronların, yakınlarındaki metal malzeme içinde çok az miktarda bulunan kobalt, nikel ve mangan gibi iz (eser) elementleri bombardıman etmesi sonucu, bunların atom çekirdeklerinde tepkimelerle (aktivasyonla) başka radyoizotoplar ortaya çıkıyor. Ayrıca çelik boruların iç çeperlerinden zamanla aşınma sonucu soğutma suyuna karışan çok az miktardaki bu iz elementler, suyun reaktörde dolaşımı sırasında yine nötronların bombardımanıyla radyoizotoplara (radyoaktif maddelere) dönüşüyorlar. 'Aktivasyon ya da korozyon ürünleri' denilen bu çeşit radyoizotoplara örnekler: kobalt 60, nikel 59 ve mangan 54. Reaktörün yakınındaki havada bulunan bazı elementlerden de yine nötron bombardımanıyla (aktivasyonla) argon 41 gibi radyoizotoplar da oluşuyor.

Korozyon ürünleri de, bölünme ürünleri gibi, sızıntılarla çeşitli sistemlere ve santral içindeki havaya az da olsa bir miktar karışıyor. Bunlar da bölünme ürünleri gibi yoğun radyasyon kaynakları. Özellikle vana, armatür ve boru dirseklerinde biriken korozyon ürünleri içindeki radyoaktif maddelerin saldırdığı girici gama ışınlarından, buralarda bakım ve onarım çalışmaları yapan personelde oluşacak radyasyon dozlarının yüksek olması sonucu, santralin yıllık bakım ve onarım çalışmalarında, personelin çalışma sürelerinin kısaltılması, ek zırhlama yapılması ya da uzaktan kontrollü robotların kullanılması gerekebiliyor.

Reaktör kabını (kazanını), soğutma suyu ana pompalarını, buhar üreteçlerini güvenlik sistemleriyle birlikte içine alan beton ve çelik kılıfı 'Güvenlik Küresindeki' havanın basıncı, normal hava basıncının biraz altında tutularak, hava akımı dışarıdan içeriye doğru yönlendiriliyor ve böylelikle herhangi bir sızıntının dışarıya ulaşması önleniyor.

U 238 nötronlarla bombardıman edildiğinde bölünmüyor, ancak bundan bir miktar U 239 oluşuyor. Beta salan U 239 ise önce Np 239'a sonra o da beta salarak Pu 239'a dönüşüyor. Pu239 ise U 235 gibi nötronların bombardımanıyla bölünebiliyor.

Reaktörlerdeki çok çeşitli teknik ve yönetsel önlemlerle, çalışanların etkilenebileceği radyasyon dozları azaltılarak sınırlanıyor (zırhlama, reaktör çalışırken reaktör binası başta olmak üzere bazı yerlere girmeme, radyasyondan korunma yol ve yöntemlerine kesinlikle uyulması gibi).

Reaktör binasındaki ve yardımcı binalardaki kullanılmış hava ve sistemlerdeki sular, önce ilgili a yğıtlarla radyoaktif maddelerden büyük oranda arındırılarak, ancak ölçümler yapıldıktan sonra kontrollü bir şekilde izin verilen sınır değerlerin çok altında kalınarak baca ve atık su borusundan çevreye salınıyor. **Böylece çevrede yaşayan halkın etkilenebileceği radyasyon dozu azaltılarak iyice düşürülüyor.**

Almanya'da NGS'lerden etkilenebilecek halk için uygulanan doz sınır değeri 1 mSievert (1mSv) olup, bunun aşılması için baca gazları yoluyla 0,3 mSv, atık sular yoluyla 0,3 mSv ve doğrudan/ direkt ışınlanma yoluyla da 0,3 mSv tüm vücut için etkin doz sınır değerleri olarak belirlenmiştir. Tiroit dozu sınır değeri ise 0,9 mSv'tir (Bkz Sievert birimi: x).

Sınır değeri nasıl belirleniyor?

Nükleer bir santralden işletme sırasında çevreye yıl boyunca, arındırılarak, kontrollü ölçümler yapıldıktan sonra salınan baca gazları ve atık sular içindeki son derece az radyoaktif maddelerin, çevredeki toprak ve sulara ulaşan miktarları, santral çevresinde etkin rüzgar yönünde bir nokta seçilerek, ayrı ayrı önce hesaplanıyor. Sonra bu çok az miktardaki radyoaktif maddelerin topraktan ve havadan ne oranda, çevrede yetişen besinlere geçtiği, yenilip içilmesi ve havanın solunması yollarıyla, insan vücuduna ne oranda girdiği ve bunlardan insanda ne büyüklükte dozlar oluştuğu hesaplarla belirleniyor. Almanya'daki ilgili KTA standartlarına göre baca gazları (KTA 1503) ve atık su yolundan (KTA 1504) her biri için, santral çevresinde yaşadığı varsayılan bir kişinin vücudunda oluşabilecek radyasyon dozunun 0,3 mSv'lik sınır değerinin altında kalınması gerekiyor . Ya da başka bir deyimle: Santralden çevreye verilecek atık hava ve sulardaki radyoaktivite derişimi ve toplam miktarı, yapılan ölçüm ve hesaplamalara göre öyle olmalıdır ki, çevredeki bir insanın santralden etkilenebileceği yıllık doz değeri bu sınır değerinin altında kalsın.

Almanya'daki Otomatik Ölçüm Sistemleri ve Çevre Halkı'nda Oluşan Dozlar

Akkuyu nükleer güç santralinden ileride çevreye salınacak radyoaktivitenin sınırlanabilmesi ve halkta oluşabilecek dozların en aza indirilebilmesi amacıyla yapılabilecek çalışmalara aşağıda açıklanan Almanya'daki yol, yöntem ve alet sistemleri örnek olabilir.

Almanya'daki 1300 MW 'lık (basıncılı sulu) bir nükleer santral örneğiyle, santraldeki havalandırma ve gaz sistemlerinden bacaya bağlanan ana kanallarındakiyle, santral bacasındaki radyoaktivite ölçüm sistemleri aşağıda ayrıntılarıyla veriliyor. Bunlardan başka, atık suyla ilgili ölçümler ve önlemler de ana hatlarıyla açıklanıyor. Öte yandan Almanya'da son 30-40 yıldır çalışan ve bu süre boyunca yeni tekniklerle sürekli geliştirilen yüksek düzeydeki güvenlik sistemleri ve aygıtlarıyla, alınan çeşitli önlemler sonucu hiçbir önemli kaza geçirmemiş 20 kadar nükleer santralin, çevreye saldıkları radyoaktivite miktarları 2006 yılı örneğiyle açıklanmıştır.

Santral dışına ulaşacak radyoaktivitenin sınırlanması

Nükleer santral içindeki çeşitli sistem devrelerinde ve binaların havasındaki radyoizotoplar, bir dizi aktif karbon filtreleriyle, arındırma ve yıkama teknikleriyle tutulup santralin yardımcı binalarındaki ilgili sistemlerin içinde depolanıyor. Ayrıca bir dizi 'U-borulu geciktirme sistemiyle', özellikle kısa yarılanma süreli asal gazların bu sistemde bir süre bekletildikten sonra kendiliğinden radyoaktivitelerini yitirmeleri sağlanıyor. Atık hava, santralin yüksek bacasından (100-150 m) havaya, atık sular da atık su deposu borusundan yakındaki ırmağa, ancak içindeki radyoaktif madde düzeyi arındırma sistemleriyle iyice düşürüldükten sonra, radyoaktivite ölçüm sistemleriyle sürekli kontrol edilerek salınıyor. Üst sınır değerlere ulaşılmadan önce olabilecek radyoaktivite artışları monitörlerin ön alarm uyarılarıyla belirlendiğinde, santral dışına verilen hava ya da su otomatikman

kesiliyor. Bunlar santral içindeki arıtma ya da bekletme sistemlerinden tekrar geçirildikten, radyoaktiviteleri düşürüldükten sonra dışarıya kontrollü olarak veriliyor.

Santral dışına bacadan ulaşan radyoaktif maddeler aşağıdaki gruplar altında toplanıp ölçümlerle belirleniyorlar:

- 1 .Radyoaktif asal gazlar (Kr 85 ve Xe 133; trityum(H 3), karbon-14 (C14)
- 2.Radyoaktif aerosollar (havadaki çok küçük taneciklere tutunan örneğin: Co60, Mn54 (korozyon ürünleri)
3. Radyoaktif iyot (I 131)

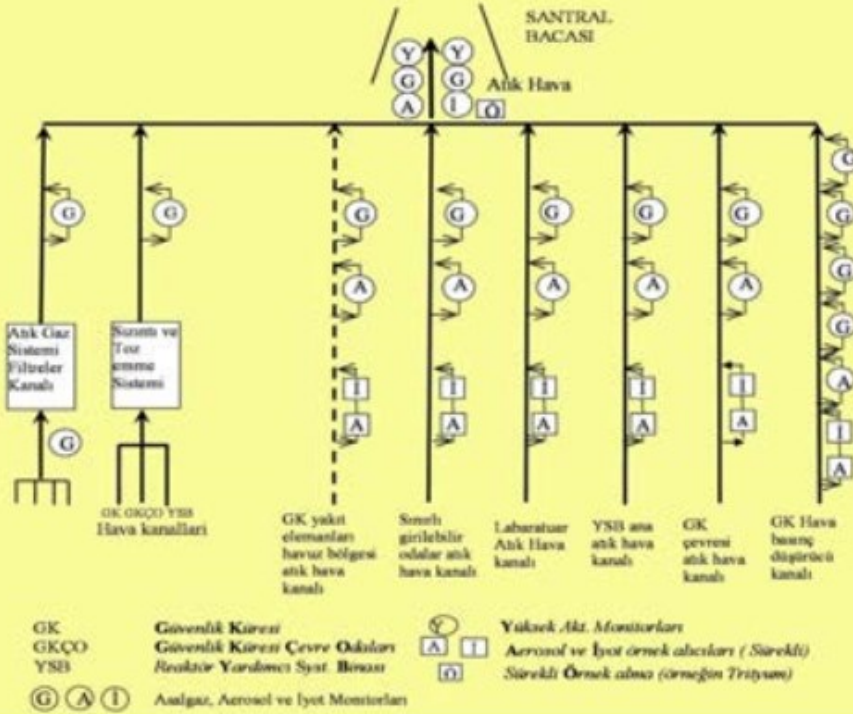
Santralin yüksek bacasından (Her santralde olan bu atık hava bacası, örneğin Almanya'daki yüksek su soğutma bacalarıyla karıştırılmamalı) kontrollü olarak salınan 'atık hava'daki bu çeşit radyoizotoplar çevredeki havaya karışıp, hava akımlarıyla seyreliyor. Bunların toprağa ne miktarda dağılıp serpillecekleri; bacadan atılan miktara, bacanın yüksekliğine, santralden uzaklığa, hava koşullarına ve serpentinin kuru ya da yaş olma durumuna göre değişebiliyor. Toprakta en çok biriken miktar, etkin rüzgar yönünde santralden 1-2 km uzaklıkta olup radyoizotopların insanda oluşturabilecekleri radyasyon dozunun da buralarda en çok olacağı hesaplanıyor. Ancak en kötümser varsayımlarla seçilen ve genellikle kimsenin yaşamadığı buralardaki radyasyon dozunun bile, ilgili yönetmeliğe göre izin verilen sınır değer (0,3 mSv) altında kalması ger ekiyor. Almanya'da 1970'lerden bu yana yapılan ölçümlere ve değerlendirmelere göre sınır değerlerin çok altında kalındığı bilimsel ölçümlerle belirlendi.

Atık Gaz ve Atık Hava Kanallarındaki Radyoaktivite Ölçümleri

Şekil 2'de gösterilen bacaya giden atık gaz borusu ve atık hava kanallarındaki ölçüm sistemleriyle (monitorlarla) bunlardaki radyoaktivite düzeyi sürekli kontrol edilerek bacadan çevreye salınacak radyoaktif madde miktarı önceden izlenerek bacaya ulaşması sınırlandırılıyor. Böylelikle, belirli bir sistemde zaman zaman olabilecek bir miktar yüksek radyoaktivitenin ilgili sistem devrelerinde filtreleme ve başka tekniklerle tekrar temizlenmesi ya da bir süre depolarda bekletilmesi sağlanıyor. Örneğin: sistem devrelerinde ve depolarında bekletme, geciktirme yoluyla kısa yarılanma süreli radyoizotopların azaltılması, özel yıkama sistemiyle radyoizotopların gazdan suya geçmesi gibi teknikler bunlar. Radyoaktivite ancak iyi ce azaltıldıktan sonra vanalar açılıp bacaya atık gaz ve atık havanın akışına izin veriliyor. Şekil 2, reaktör binaları içindeki gaz devrelerinden ve havalandırma kanallarından bacaya ulaşan boru sistemlerindeki, her biri uygun (saatlik, günlük ve hafalık gibi) ön alarm değerine ayarlanmış radyasyon ölçüm aletleri de (monitorları) gösteriliyor.

Her bir boru ya da kanaldaki radyoaktiviteyi sürekli ölçen genellikle asal gaz, aerosol ve iyot monitorları bulunuyor. Ayrıca bu kanallarda sürekli hava örneği toplayan 'örnek alıcılar' da bulunuyor. Bunlardan sağlanan örnekler laboratuvarında ölçülüp değerlendiriliyor.

1300 MWe'lık bir nükleer santralin atık hava ve gaz kanallarıyla bacasındaki radyoaktivite ölçüm ve alarm sistemleriyle çevrenin korunması (basitleştirilmiş) /6/



Santral Bacasından Salınan Atık Havadaki Radyoaktivite Ölçümleri

Santralin bacasından salınan havadaki radyoaktivite, iki adet asal gaz monitörüyle, birer adet de aerosol ve iyot monitörleriyle sürekli kontrol ediliyor (Bkz.Şekil 2, bacadaki monitörler). Bunlardan başka, kaza durumları için planlanmış, aşırı yüksek düzeydeki radyoaktiviteyi ölçüp uyarı veren iki monitör de bacada bulunuyor. Radyoaktivite bu monitörlerin önceden ayarlanmış uygun (saatlik, günlük ve hafalık gibi) 'alarm değerlerine' ulaştığında bacadan çevreye salınma otomatikman kesiliyor.

Bacadaki bu ölçüm sistemlerinin işlevleri, santral bacasından çevreye yıl boyunca salınan radyoizotop miktarlarının toplamını hesaplamak olmayıp, atık havadaki radyoaktif maddelerin anlık değişimlerini ve artımlarını 'ön alarmlarla' izleyerek gerekli önlemleri zamanında almak ve böylece kısa süre için de olsa çevreye bir miktar fazla radyoaktivite salınmasını önlemek. Yıl boyunca bacadan çevreye radyoizotopların cinslerine göre, toplam ne miktarda radyoaktivite salındığı (bilançosu) ise, Şekil 3'de gösterilen bacadaki 'sürekli örnek alıcıdan' sağlanan örneklerin laboratuvarında analizleriyle, ilgili radyoizotopların ayrıntılı ölçümleriyle ve ayrıca bacadan her saatte salınan hava hacmiyle (m^3/h) birlikte değerlendirilip hesaplanıyor.

Bacaya yerleştirilen çatal şeklindeki emme borulu incelikli bir düzeneikle ve boru devreleriyle ('by-pass sistemiyle') atık hava, monitörlere ve örnek alma noktalarına pompayla sürekli iletili-

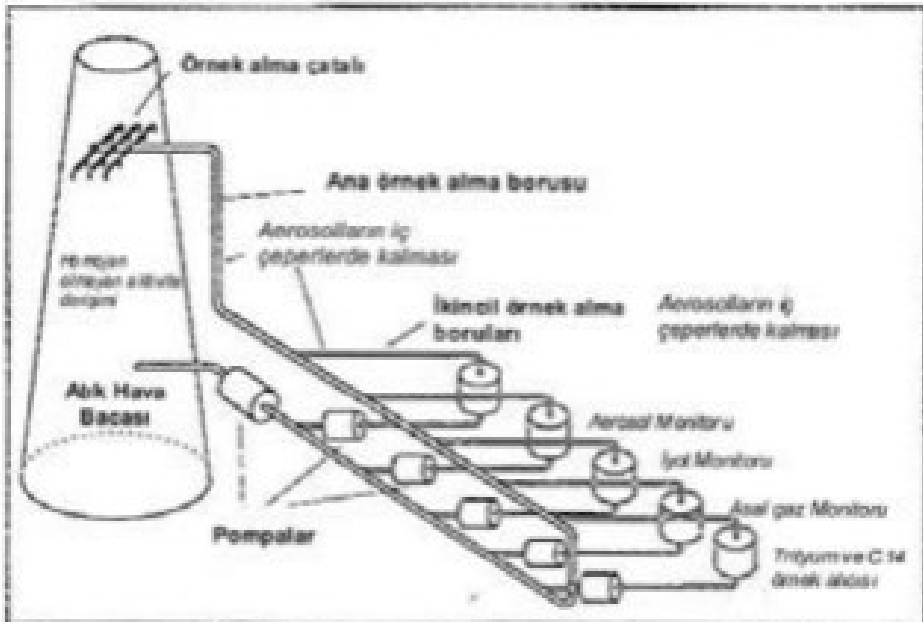
yor (Buna isokinetik örnek alma deniyor ki bu, bacadan atılan gazlardaki radyoaktivitenin gerçeğe yakın bir örneğini yansıtıyor). Radyoizotopların bir miktarı boruların ve ölçüm aletlerinin iç çeperlerinde kaldığından ölçüm sonuçları 'boru katsayısı' denilen en çok 3'le çarpılıp borulardaki ve aletlerdeki kayıplar da hesaba katılıyor.

Santraldan Yakınındaki Irmağa Salınan Atık Sulardaki Ölçümler

Daha önce, radyoizotoplardan büyük ölçüde arındırılmış atık sular, büyük su depolarında toplanıyor, çevredeki sulara verilmeden önce toplam radyoaktivite miktarı ve her bir radyoizotopun radyoaktivitesi ölçümlerle belirleniyor. Buna 'karar verme ölçümü' deniyor. Atık sular çevredeki sulara salınırken radyoaktivite aletleriyle ayrıca sürekli olarak ölçülüp, kontrol edildikleri gibi belirli zaman aralıklarıyla da laboratuvarda radyoizotopları ölçmek için örnekler de alınıyor. Örneklerin laboratuvarda ölçülen radyoaktiviteleriyle, santral yakınındaki ırmağa salınan su miktarları yıl boyunca göz önüne alınarak, ırmağa hangi radyoizotoptan toplam ne miktar verildiği hesaplanıyor.

Not: Almanya'da reaktörler ırmak kıyılarına yapılmış olduklarından, atık sular denize değil, ırmaklara veriliyordu. Ancak yukarıda açıkladığımız Almanya'daki bu yol ve yöntemler denize atık suların verildiği Akkuyu gibi reaktörler için de uygulanabilir.

Şekil 3: Modern bir nükleer santralin baca gazlarındaki radyoaktif maddelerin isokinetik ölçümü ve örnek almak için bacaya yerleştirilen çatal düzenek. Ancak böylelikle atılan havanın örneğindeki homojenlik ya da doğru örnek alma sağlanabiliyor .



Santraldan Yakınındaki Irmağa Salınan Atık Sulardaki Ölçümler

Daha önce, radyoizotoplardan büyük ölçüde arındırılmış atık sular, büyük su depolarında toplanıyor, çevredeki sulara verilmeden önce toplam radyoaktivite miktarı ve her bir radyoizotopun radyoaktivitesi ölçümlerle belirleniyor. Buna 'karar verme ölçümü' deniyor. Atık sular çevredeki sulara salınırken radyoaktivite aletleriyle ayrıca sürekli olarak ölçülüp, kontrol edildikleri gibi belirli zaman aralıklarıyla da laboratuvarlarda radyoizotopları ölçmek için örnekler de alınıyor. Örneklerin laboratuvarlarda ölçülen radyoaktiviteleriyle, santral yakınındaki ırmağa salınan su miktarları yıl boyunca göz önüne alınarak, ırmağa hangi radyoizotoptan toplam ne miktar verildiği hesaplanıyor.

Not: Almanya'da reaktörler ırmak kıyılarına yapılmış olduklarından, atık sular denize değil, ırmaklara veriliyordu. Ancak yukarıda açıkladığımız Almanya'daki bu yol ve yöntemler denize atık suların verildiği Akkuyu gibi reaktörler için de uygulanabilir.



Şekil 4: Akkuyu nükleer santralindeki 4 reaktörün maket resmi

(Reaktörler henüz yapım halinde, 2023)

Akkuyu nükleer reaktörleri için, Almanya deneyimlerinden çıkarılabilecek dersler

1. Reaktör ve yardımcı binalarındakilerle birlikte reaktör bacasındaki radyasyon otomatik ölçüm sistemleri (radyasyon monitörleri) sayı ve duyarlılıkta, ilgili IAEA standartlarına göre, Almanya örneğindeki gibi kurulu olmalı /4,5.6/
2. Radyasyon aletlerinin ön alarm değerleri bacaya verilebilecek şekilde ayarlanıp, sınırlanmalı
3. Radyasyon ölçüm aletlerinin yanı sıra atık gaz ve atık hava sistemleri atık borularından ve baca gazlarından Şekil 2 ve 3 benzeri düzeneklerle temsil edici (representativ) gaz/hava örnekleri alınmalı
4. Akkuyu çevresinde etkin rüzgar yönüne göre halkın etkilenebileceği bir yer seçilmeli ve özellikle buradan belirli sürelerde toprak, bitki ve gıda örnekleri alınıp radyoaktivite ölçümleri yapılmalı.

Ancak böylelikle, aletlerin duyarlı olmaması ve ön alarmların verilmeden baca gazlarının yeterince hassas ölçülmeden çevreye atılması durumuna karşın, halkın zamanla azar azar radyoaktiviteden farkedilmeden etkilenmesi önlenabilir.

(x) Sievert : Gama ışınları için (= 1 Gray = 1 Joule/kg) doz soğurumuna eşdeğer
Birkaç Sievert birimlik dozlar hücreler için büyük dozlar olduğundan, daha çok görülen düşük dozlar için **mSv** ve **µSv birimleri** kullanılıyor.

(xx) Yazar Almanya ve ABD’de 25 yıl nükleer reaktör yapımında ve nükleer yakıt maddesi üretiminde çalışmış olup, kendisinin dergimizde de çeşitli yazıları bulunmaktadır/2/.

Kaynakça

/1/ Ülkemizde kurulacak nükleer santrallerin radyasyon güvenliğiyle ilgili öneriler Y.Atakan Teknik Rapor, Fizik Müh. Odası Ankara

/2/ <https://bilimvegelecek.com.tr/?s=y%C3%BCKsel+atakan+nukleer+reakt%C3%B6rler>

/3/ www.radyasyonyatakan.com

/4/ https://regelwerk.grs.de/sites/default/files/DS524%20-%20Step11-Draft%20incorporating%20SSCs%20comments-clean%20copy_30.05.2023.pdf

/5/ https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216_web.pdf

/6/ https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1427_web.pdf