

**T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SOSYAL ÇEVRE BİLİMLERİ ANABİLİM DALI**

**ÇEVRESEL RADYASYONUN
CANLILIĞIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNE ETKİLERİ**

Doktora Tezi

İsmail Hakkı ARIKAN

Ankara - 2007

**T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SOSYAL ÇEVRE BİLİMLERİ ANABİLİM DALI**

**ÇEVRESEL RADYASYONUN
CANLILIĞIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNE ETKİLERİ**

Doktora Tezi

İsmail Hakkı ARIKAN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Berna ALPAGUT**

Ankara - 2007

T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SOSYAL ÇEVRE BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

**ÇEVRESEL RADYASYONUN
CANLILIĞIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNE ETKİLERİ**

Doktora Tezi

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Berna ALPAGUT

Tez Jürisi Üyeleri

Adı ve Soyadı

İmzası

Prof. Dr. Berna ALPAGUT

.....

Prof. Dr. Coşkun ÖZGÜNEL

.....

Doç. Dr. Nesrin ÇOBANOĞLU

.....

Doç. Dr. Ergin DUYGU

.....

Prof. Dr. Hakan YİĞİTBAŞOĞLU

.....

Tez Sınavı Tarihi : 06.11.2007

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ	X

1. GİRİŞ	1
-----------------------	----------

2. DOĞAL RADYASYON KAYNAKLARI	6
--	----------

2.1. KOZMİK RADYASYON	6
------------------------------------	----------

2.1.1. KOZMİK RADYASYON IŞINLAMASI	7
--	---

2.1.2. KOZMOJENİK RADYONÜKLİDLER	9
--	---

2.2. KARASAL RADYASYON	10
-------------------------------------	-----------

2.2.1. DIŞ IŞINLANMA	13
----------------------------	----

2.2.2. İÇ IŞINLANMA	14
---------------------------	----

2.2.3. ENDÜSTRİYEL AKTİVİTELER SONUCU ARTIRILAN DOĞAL IŞINLAMA	23
--	----

2.3. DOĞAL ÇEVRESEL KAYNAKLARDAN KÜRESEL IŞINLANMA	24
---	-----------

3. YAPAY RADYASYON KAYNAKLARI	26
--	-----------

3.1. NÜKLEER SİLAH ÜRETİMİ VE DENEMELERİ	26
---	-----------

3.2. NÜKLEER GÜÇ ÜRETİMİ	32
---------------------------------------	-----------

3.3. NÜKLEER YAKIT ÇEVİRİMİ	35
--	-----------

3.4. NÜKLEER KAZALAR	38
-----------------------------------	-----------

3.4.1. ÖNEMLİ NÜKLEER REAKTÖR KAZALARI	40
--	----

3.4.2. ÖNEMLİ RADYOLOJİK KAZALAR	43
--	----

3.5. RADYOİZOTOP ÜRETİMİ VE KULLANIMI	45
--	-----------

3.6. RADYOAKTİF ATIKLAR	46
--------------------------------------	-----------

3.6.1. DÜŞÜK VE ORTA SEVİYELİ ATIKLAR	47
---	----

3.6.2. YÜKSEK SEVİYELİ ATIKLAR	48
--------------------------------------	----

3.7. YAPAY ÇEVRESEL KAYNAKLARDAN KÜRESEL İŞINLANMA49

4. ÇEVRESEL RADYASYON VE CANLILIK51

4.1. RADYONÜKLİDLERİN EKOSFERDE DAVRANIŞI52

4.2. BİYOTANIN MARUZ KALDIĞI RADYASYON.....55

4.2.1. BİYOLOJİK BİRİKİM57

4.2.2. KAZALARDA BİYOTANIN DURUMU58

4.3. BİYOTANIN TAŞIMA KAPASİTESİ.....61

4.3.1. FLORA64

4.3.2. FAUNA65

5. RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ68

5.1. RADYASYONUN ORGANİZMA İLE ETKİLEŞİMİ70

5.2. RADYASYON HASARINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER73

5.3. RADYASYONUN ORGAN/SİSTEMLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....75

5.3.1. DETERMİNİSTİK ETKİLER.....78

5.3.2. STOKASTİK ETKİLER.....81

5.4. ÇEVRESEL RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİSİ.....88

6. RADYASYONDAN KORUNMA SİSTEMİ92

6.1. RADYASYONDAN KORUNMA SİSTEMİNİN GELİŞİM SÜRECİ92

6.2. RADYASYONDAN KORUNMA İLE İLGİLİ AKTÖRLER98

6.2.1. BİRLEŞMİŞ MİLLETLER ATOMİK RADYASYONUN ETKİLERİ BİLİMSEL KOMİTESİ
(UNSCEAR)98

6.2.2. ULUSLARARASI RADYASYONDAN KORUNMA KOMİSYONU (ICRP)98

6.2.3. ULUSLARARASI RADYASYON BİRİMLERİ VE ÖLÇÜLERİ KOMİSYONU (ICRU) 98

6.2.4. ULUSLARARASI ATOM ENERJİSİ AJANSI (IAEA)99

6.2.5. NÜKLEER ENERJİ AJANSI (NEA)99

6.2.6. AVRUPA KOMİSYONU (EC)99

6.2.7. ULUSLARARASI RADYASYONDAN KORUNMA BİRLİĞİ (IRPA)100

6.3. TEMEL GÜVENLİK STANDARTLARI	100
6.4. ÇEVRENİN RADYASYONDAN KORUNMASI	103
<u>7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME</u>	<u>108</u>
KAYNAKLAR DİZİNİ	119
ÖZET	128
ABSTRACT	130
EK-1. RADYASYONLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....	132
EK-2. BİRİMLER VE TANIMLAR.....	138
EK-3. BİRİM SİSTEMİNDE KULLANILAN ÖN EKLER	143

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AGR	Advanced Gas-Cooled Reactor
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BSS	International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and Safety of Radiation Sources
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EC	European Commission
EURATOM	European Atomic Energy Community
FAO	Food and Agriculture Organization
FMO	Fizik Mühendisleri Odası
GCR	Gas-Cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
ILO	International Labour Organization
IRPA	International Radiation Protection Association
LD	Lethal Dose
LWR	Light Water Reactor
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PAHO	Pan American Health Organization
PRIS	Power Reactors Information System
PWR	Pressurised Water Reactor
SSCB	Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TÇV	Türkiye Çevre Vakfı

TMI	Three Miles Island
TNT	Trinitrotoluen
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WHO	World Health Organization
YD	Yield Dose

Simgeler

A	aktivite
D	soğurulmuş doz
e	elektron
E	etkin doz
H	eşdeğer doz
m	kütle
n	nötron
p	proton
Q	elektrik yükü
S	kolektif doz
$T_{1/2}$	yarılanma süresi
W	ağırlık faktörü
X	ışınlama
α	alfa parçacığı
β	beta parçacığı
γ	gama ışınları
λ	radyoaktif bozunma sabiti

İndisler

T	doku
R	radasyon
e	elektrik

Birimler

Bq	Becquerel (aktivite birimi)
C	Coulomb (elektrik yükü birimi)
cal	kalori (enerji-ısı birimi)
Ci	Curie (aktivite birimi)
eV	elektron volt (enerji birimi)
g	gram (kütle birimi)
Gy	Gray (soğurulmuş doz birimi)
ha	hektar (alan birimi)
l	litre (hacim birimi)
J	Joule (enerji-iş birimi)
m	metre (uzunluk birimi)
R	Roentgen (ışınlama birimi)
rad	radiation absorbed dose (soğurulmuş doz birimi)
rem	roentgen equivalent man (eşdeğer doz birimi)
s	saniye (zaman birimi)
Sv	Sievert (eşdeğer doz birimi)
t	ton (kütle birimi)
W	Watt (güç birimi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Radon-222 ve Radon-220'nin bozunma zinciri.....	19
Şekil 2.2. Doğal radyasyon sebepli yıllık etkin dozun dünya nüfusuna oransal dağılımı.....	25
Şekil 3.1. Atmosferde ve yeraltında gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri.....	28
Şekil 3.2. Dünyada çalışan reaktörlerin ülkelere göre dağılımı.....	33
Şekil 3.3. Nükleer enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı.....	33
Şekil 4.1. Radyonüklidlerin atmosferik salımı, dağılımı ve ışınlama yolları....	52
Şekil 4.2. Radyonüklidlerin yüzey sularında dağılımı ve ışınlama yolları.....	54
Şekil 4.3. Değişik taksonomik gruplarda akut ölümcül doz oranları.....	62
Şekil 5.1. Radyasyonun hücreye doğrudan ve dolaylı etkisi.....	71
Şekil 5.2. Doz-etki grafikleri.....	77
Şekil 6.1. Radyasyondan korunma standartlarının oluşumu	102
Şekil 7.1. Doğal radyasyon kaynaklarının ortalama toplam doza oransal katkıları.....	109
Şekil 7.2. Radyasyon etkilerinin şematik akış diyagramı.....	114

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Kozmik radyasyon doz hızlarının enleme göre değişimi.....	8
Çizelge 2.2.	Nüfus ağırlıklı ortalama kozmik radyasyon doz hızları.....	9
Çizelge 2.3.	Kozmojenik radyonüklidlerin üretim hızları ve konsantrasyonları.....	10
Çizelge 2.4.	Karasal radyonüklidler.....	11
Çizelge 2.5.	Toprakta bulunan önemli doğal radyonüklidler ve ortalama özgül aktiviteleri.....	12
Çizelge 2.6.	Deniz yüzey sularında bulunan önemli doğal radyonüklidler ve aktivite konsantrasyonları.....	12
Çizelge 2.7.	Gıdalarda ve içme suyunda uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin ortalama aktivite seviyeleri.....	15
Çizelge 2.8.	Uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin sindirim yoluyla alınması sonucu yıllık etkin dozlar.....	16
Çizelge 2.9.	Uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin solunum yoluyla alınması sonucu yıllık etkin dozlar.....	17
Çizelge 2.10.	Bazı sanayi tesislerinden salınan doğal radyonüklidlerin sebep olduğu maksimum yıllık etkin dozlar.....	23
Çizelge 2.11.	Nükleer olmayan enerji kaynaklarından birim enerji üretimi başına kolektif etkin dozlar.....	24
Çizelge 2.12.	Doğal radyasyon kaynaklarından tüm dünya ortalama yıllık radyasyon dozları.....	25
Çizelge 3.1.	Günümüze kadar gerçekleştirilmiş nükleer silah denemeleri....	27
Çizelge 3.2.	Atmosferik nükleer denemelerden ortaya çıkan ve küresel olarak dağılan radyonüklidler.....	30
Çizelge 3.3.	Atmosferik nükleer denemelerle çevreye verilen radyonüklidlerin sebep olduğu toplam etkin doz.....	31
Çizelge 3.4.	Reaktörler ve yeniden işleme tesislerinden küresel olarak yayılan radyonüklidlerin aktiviteleri.....	37

Çizelge 3.5.	Nükleer yakıt çevriminden çevreye salınan radyonüklidler sebebiyle alınan yıllık dozlar.....	37
Çizelge 3.6.	Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği.....	39
Çizelge 3.7.	Çernobil kazası sırasında açığa çıkan radyoaktif maddeler ve aktiviteleri.....	42
Çizelge 3.8.	Tıp, eğitim ve endüstri uygulamalarında kullanılan açık radyoaktif kaynaklar ve dozlar.....	45
Çizelge 3.9.	Radyonüklid salımlarından kaynaklanan kolektif etkin dozlar...	49
Çizelge 3.10.	Yapay çevresel radyasyon kaynaklarından tüm dünya ortalama yıllık radyasyon dozları.....	50
Çizelge 4.1.	Doğal fon radyasyonundan ağaçların maruz kaldığı soğurulmuş doz hızları.....	56
Çizelge 4.2.	Sucul organizmalar için değişik kaynaklardan alınan maksimum toplam soğurulmuş doz hızları.....	56
Çizelge 4.3.	Kyshtym kazasında akut periyot boyunca biyotanın maruz kaldığı maksimum soğurulmuş dozlar.....	59
Çizelge 4.4.	Çernobil bölgesinde Borshchovka Köyünde biyotanın aldığı dozlar.....	61
Çizelge 4.5.	Flora ve fauna için deterministik etki beklenmeyen sınır doz hızı değerleri.....	63
Çizelge 4.6.	Akut ışınlamalar için bitki topluluklarında hasar oluşturacak doz seviyeleri.....	64
Çizelge 4.7.	Organogenesis devresinde gözlenebilir malformasyon oluşturan soğurulmuş dozlar.....	66
Çizelge 5.1.	Radyasyonun olası biyolojik etkileri.....	76
Çizelge 5.2.	Akut ışınlamalar için deterministik etkiler ve eşik doz düzeyleri.....	78
Çizelge 5.3.	Akut bütün vücut ışınlaması sonucu doza bağlı klinik belirtiler ve biyolojik etkiler.....	79
Çizelge 5.4.	Tüm nüfus için stokastik etkiler olasılık katsayıları.....	82

Çizelge 5.5.	Düşük dozlar ile ışınlama sonrası tüm nüfus için kanser sebebiyle ölüm olasılığı.....	85
Çizelge 5.6.	Düşük doz radyasyon ışınlaması (gama) için memeli hücrelerinde DNA hasarı.....	90
Çizelge 6.1.	ICRP tarafından önerilen tüm vücut etkin doz limitlerinin evrimi.....	97
Çizelge 6.2.	Kyshtym ve Çernobil Kazalarında, kazadan bir yıl sonra biyota/insan soğurulmuş doz oranları.....	106
Çizelge 6.3.	Flora ve faunayı iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerinden korumak için önerilen doz limitleri.....	107

1. GİRİŞ

Uygarlık tarihinin son yarım yüzyılı içerisinde, süratli ve yaygın teknolojik gelişmelere koşut olarak dünyanın her yanında çevre kirlenmesi çeşitli boyutlarıyla gündemimizi meşgul etmeye başlamıştır.

Son 50 yıl içerisinde nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar sonucu çevre radyoaktivite seviyesinde küresel düzeyde artış meydana gelmiş, insanların yanı sıra flora ve fauna da artan radyoaktivite sebebiyle ışınlanmaya maruz kalmıştır. Bazı bölgelerde çevre radyoaktivite seviyesindeki yerel artış ekosisteme zarar verecek boyutlara ulaşmıştır.

Dış uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar, bu ışınların oluşturduğu kozmojenik radyonüklidler, yerkabuğunda bulunan radyoizotoplar ve bunların bozunma ürünlerinden oluşan doğal radyasyon kaynakları ile nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar sonucu meydana gelen radyoaktif serpintiler, nükleer yakıt çevrimi ve nükleer güç üretiminden çevreye salınan radyonüklidler gibi yapay radyasyon kaynakları çevresel radyoaktiviteyi oluşturmaktadır. Yaşayan tüm organizmalar bu radyasyon kaynaklarından kaçınılmaz ve sürekli olarak ışınlanmaktadır.

Çevremizde var olan radyoizotoplar başlıca üç kaynağa dayanmaktadır. Birinci kaynak yerkürenin kendisidir. Dünyanın oluşumu sırasında bildiğimiz çok sayıda kararlı elementin yanında radyoaktif elementler de oluşmuştur. Bunların arasından kısa ömürlüler insanlık onları tanıyamadan tükenip gitmişlerdir. Ömürleri, dünyanın milyar yıllar ölçülen yaş mertebesinde olanlar, miktarca azalarak günümüze kadar gelmişlerdir. Uranyum-238, uranyum-235, toryum-232 ve potasyum-40 bu radyoizotoplardandır. Söz konusu kaynaklardan; uranyum-238, uranyum-235 ve toryum-232 çok uzun ömürlü radyoaktif maddeler olup milyarlarca yıldan beri sürüp gelen radyoaktif bozunumları ile başka radyoizotoplar üreten zayıf

fakat tükenmez birer kaynaktırlar. Çevresel radyoizotopların ikinci kaynağı; atmosferin üst tabakalarında kozmik radyasyonun sebep olduğu nükleer dönüşüm olayıdır. Örnek olarak uzaydan gelen yüksek enerjili nötronlar, çarptıkları azot atomlarını karbon-14 radyoaktif izotopuna¹, lityum atomlarını ise trityum radyoaktif izotopuna² dönüştürürler. Bu üretim, çok küçük bir verimle fakat kesintisiz süregelmıştır (Özden, 1983: 404-405). Çevresel radyoizotopları oluşturan üçüncü kaynak ise insan faaliyetleridir. İyot-131, iyot-129, stronsiyum-90, sezyum-137, sezyum-134, plütonyum-239 gibi radyoizotoplar; nükleer silah denemeleri, nükleer kazalar, nükleer yakıt çevrimi ve nükleer güç üretimi sonucunda çevreye verilmişlerdir.

Bu çalışmada, canlıların doğal ve yapay radyasyon kaynakları dolayısıyla maruz kaldıkları çevresel radyasyonun ekosistemde ve biyotada oluşturduğu ve oluşturabileceği etkileri radyobiyolojik ve radyogenetik açıdan irdelemek ve çevrenin radyasyondan korunmasının unsurlarını, bu konuda karşılaşılan problemleri, yaklaşım ve stratejileri sorgulayarak, biyomerkezli öneriler geliştirmek amaçlanmıştır.

Çalışmanın kapsamı doğal ve yapay çevre radyoaktivitesi ve bundan kaynaklanan çevresel radyasyon ile sınırlandırılmıştır. Bu çerçevede iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar çalışma kapsamı dışında tutulduğu gibi insanların doğal ve yapay kaynaklardan ışınlama sonucu maruz kaldıkları ortalama toplam dozun yaklaşık %14'ünü³ oluşturan tıbbi ışınlamalar ile mesleki ışınlamalar da kapsam dışında tutulmuştur. Tıbbi ışınlamalar ve

¹ Reaksiyon: $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$

² Reaksiyon: $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$

³ İnsanlar; yaşam standartları, yaşadıkları ortamların fiziksel özellikleri ve coğrafi şartlara bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte yaklaşık 2,8 mSv yıllık radyasyon dozuna maruz kalmaktadırlar. Toplum dozunun yaklaşık %85'i doğal kaynaklardan, %14'ü tıbbi uygulamalardan, geri kalan kısmı ise mesleki ışınlamalar ve diğer yapay kaynaklardan meydana gelmektedir (IAEA, 2004: 14).

mesleki ışınlamalar, insan-merkezli bir bakış açısında önem arzeden, insanlık tarihinin son yüzyılında ortaya çıkan, insanlara özgü olan ancak, insanların da genelini kapsamayan ışınlamalardır. Bu çalışmada, tüm canlıları aynı şekilde etkileyebilecek çevre radyoaktivitesi mümkün olduğu kadar biyo-merkezli bir bakış açısı ile incelenmiştir.

Çalışmaya yol veren araştırma soruları ve varsayımlar şunlardır:

1. Tüm canlılar doğal ve kaçınılmaz olarak çevresel radyasyona maruz kalmaktadır.
2. Çevre radyoaktivitesi insan aktiviteleri sonucu sürekli artmaktadır.
3. Radyasyonun en küçük dozu dahi bir canlıda biyolojik ve/veya genetik değişiklik yapma riski taşımaktadır.
4. Çevresel radyasyon evrimsel süreçte büyük rol oynamıştır.
5. Radyasyon kontrol edilmediği takdirde genetik kirlenmeye ve gen havuzunda bozulmalara sebep olabilecektir.
6. Çevresel radyasyondaki artış yerel ve bölgesel olarak ekosisteme zarar verecek boyutlara ulaşmaktadır.
7. İnsan dışındaki diğer canlı türleri pek çok durumda insanlardan daha fazla radyasyona maruz kalmaktadır.
8. Mevcut radyasyon korunması politikaları çevresel radyasyonu kapsam dışı bırakmaktadır.
9. Uluslararası kabul görmüş mevcut radyasyon korunması sistemi insan-merkezli bir yaklaşımla ele alınmış olup, insanı korumanın çevreyi korumak için yeterli olduğu kabullenilmiştir.
10. Çevrenin radyasyondan korunması için mevcut politikalar gözden geçirilmelidir.

Bu çerçevede yapılan çalışmanın ikinci bölümünde doğal radyasyon kaynakları ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Canlıların maruz kaldığı çevresel radyasyonun üç kaynağından ilk ikisini oluşturan kozmik radyasyon ve karasal radyasyon bu bölümde incelenmiş ve bu radyasyon sebebiyle

insanların maruz kaldığı dozlar ağırlıklı ortalama şeklinde verilmiştir. Kozmik ışınlar, kozmojenik radyonüklidler ve karasal radyonüklidlerden dış ışınlama ile bu radyonüklidlerin solunum ve sindirim yoluyla vücuda alınması sonucunda iç ışınlama sebebiyle ortaya çıkan radyasyon dozları ayrıntısı ile verilmiştir. Maruz kalınan radyasyonun büyük bir kısmını oluşturan radon özel olarak incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan veriler için literatür özenle taranmış ve temel veriler Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesinin⁴ yayımlamış olduğu raporlardan alınmıştır. Bu raporlar son derece kapsamlı araştırmalar sonucunda hazırlanmakta, en doğru ve güncel verileri içermektedir.

Üçüncü bölümde; çevresel radyasyonun üçüncü kaynağını oluşturan, insan aktiviteleri sonucunda çevreye verilen radyasyon kaynakları incelenmiştir. Bu radyonüklidleri ortaya çıkaran faaliyetler ve bunlardan kaynaklanan radyasyon dozları ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Çevre radyoaktivite seviyesinde artışa sebep olan en önemli insan aktivitesi atmosferde gerçekleştirilen nükleer silah denemeleridir. Çevre radyoaktivite seviyesini artıran ikinci önemli kaynak ise nükleer kazalardır. Önemli nükleer kazalar ve çevreye salınan radyoaktif maddelere ilişkin bilgiler bu bölümde verilmiştir. Çevreye radyoaktif madde salımının diğer bir kaynağı ise nükleer yakıt çevriminin hemen her aşamasındaki faaliyetler ile nükleer güç üretim tesisleridir. Bunlardan kaynaklanan salım görece küçük boyutta kalmaktadır. Nükleer faaliyetler sonucunda ortaya çıkan ancak çevreye verilmesi mümkün olmayıp muhafaza edilmesi gereken radyoaktif atıklara da bu bölüm içerisinde değinilmiştir.

Dördüncü bölümde; çevresel radyasyon ve canlılık başlığı altında radyonüklidlerin ekosferdeki davranışı, canlıların ışınlama yolları, bitki ve hayvanların maruz kaldıkları dozlar ve biyotanın taşıma kapasitesi incelenmiştir. Bu bölümdeki veriler laboratuvar ortamında yapılan bitki ve

⁴ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)

hayvan deneyleri ile büyük nükleer kazalar sonucunda radyoaktivite bulaşmış alanlarda yaşayan canlılar üzerinde yapılan çalışmaların sonuçlarına dayanmaktadır. Canlı türlerinin fazlalığı ve "in vivo" çalışmanın zorlukları bu konuda kesin ve eksiksiz verilere ulaşmayı imkansız kılmaktadır. Ayrıca, düşük doz ve düşük doz hızlarında radyasyonun canlılar üzerindeki etkilerinin stokastik olması çalışmaları zorlaştırmaktadır.

Beşinci bölümde; radyasyonun biyolojik etkileri ele alınmış, somatik ve genetik etkiler ile etki oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Akut deterministik etkiler için doz limitleri ile stokastik etkilere ilişkin risk katsayıları da bu bölümde verilmiştir. Risk katsayıları için Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonunun⁵ en son raporundaki veriler kullanılmıştır. Bu bölümde radyasyon sebepli mutasyonlar ve kalıtsal materyaldeki değişimin canlılığa etkileri irdelenmiştir. Bu çerçevede, çevresel radyasyonun canlıların gelişimi sürecinde oynadığı rol tartışılarak, olasılıklar üzerinde durulmuştur.

Altıncı bölümde; uluslararası radyasyondan korunma sisteminin gelişimi ve felsefesi, bu sistem içerisinde çevre ve biyotanın yeri sorgulanarak, tüm dünyada kabul görmüş temel güvenlik standartları biyo-merkezli bakış açısında değerlendirilmiştir. Uluslararası radyasyondan korunma sisteminin ana aktörleri de bu bölümde tanıtılmıştır. Ayrıca, mevcut radyasyondan korunma sistemi ve felsefesinin, çevrenin radyasyondan korunması konusuna yaklaşımı tartışılmıştır.

Geleceğin radyasyondan korunma standartlarının yalnızca insanların korunmasını değil, çevrenin korunmasını da garanti altına alması gerektiğinin vurgulandığı yedinci bölüm, sonuç ve değerlendirme bölümüdür.

Ayrıca, çalışma içerisinde geçen birimler ve tanımlar ile radyasyona ilişkin temel kavramlar, çalışmanın eki olarak verilmiştir.

⁵ International Commission on Radiological Protection (ICRP)

2. DOĞAL RADYASYON KAYNAKLARI

Canlıların doğal kaynaklardan meydana gelen iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaları kaçınılmaz bir süreç olup, canlılığın ortaya çıkmasıyla birlikte başlamıştır. Doğal radyasyon ışınlamasının iki önemli kaynağı bulunmaktadır. Bunlar; dünya atmosferine giren yüksek enerjili kozmik ışınlar ve parçacıklar ile yerkabuğu orijinli, çevremizde her yerde hatta insan vücudunda bile bulunan radyoaktif maddelerdir.

2.1. KOZMİK RADYASYON

Dünya sürekli olarak dış uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklarla bombardıman edilmektedir. Atmosferin üst tabakalarına ulaşan galaktik kozmik ışınların %85'ini protonlar, %12'sini helyum iyonları, %2'sini elektronlar, geri kalanını ise ağır parçacıklar oluşturmaktadır (EC, 2004: 7).

Atmosferin üst tabakalarına ulaşan kozmik radyasyonun yoğunluğu dünyanın manyetik alanının etkisiyle azalmaktadır. Böylece en fazla ışın yoğunluğu ve doz hızı jeomanyetik kutuplarda, en düşük ışın yoğunluğu ve doz hızı ise ekvator bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle, dünyanın manyetik alanı kozmik radyasyona karşı kısmen bir kalkan görevi yapmaktadır.

Atmosferdeki yüksek enerjili parçacıklar, havayı oluşturan atom ve moleküller ile etkileşerek proton, nötron, pion, müon ve düşük atom numaralı çekirdekler olmak üzere yüklü ve yüksüz ikincil parçacıkların meydana gelmesine sebep olurlar. Atmosferdeki ikincil kozmik ışınların oluşturduğu doz hızının deniz seviyesindeki en önemli bileşenini müonlar, uçakların uçuş yüksekliğinde nötronlar, elektronlar, fotonlar, pozitronlar ve protonlar, daha yükseklerde ise ağır çekirdekler oluşturmaktadır.

2.1.1. Kozmik Radyasyon Işınlaması

Deniz seviyesinde kozmik radyasyon sebepli doz eşdeğerinin %70'i müonlar, %15'i elektron ve fotonlar, %10'u nötronlar ve %1-2'si proton ve yüklü pionlardan kaynaklanmaktadır (Thorne, 2003).

Deniz seviyesinde kozmik radyasyonun doğrudan iyonlaştırıcı bileşeninin neden olduğu ortalama doz 32 nSv/saat'dir. Jeomanyetik enlem etkisi %10 civarında olup, 30⁰'nin altındaki enlemlerde ortalama doz yaklaşık olarak 30 nSv/saat'dir. Dünya nüfusunun büyük bir kısmının 30⁰ enleminin altında yaşadığı gözönüne alındığında⁶ kozmik radyasyonun doğrudan iyonlaştırıcı bileşenleri ile fotonlardan kaynaklanan nüfus ağırlıklı ortalama etkin doz hızı 31 nSv/saat olup buna karşı gelen yıllık doz 270   Sv/yıl'dır.

Kozmik ışın n  tronlarından kaynaklanan dünya ortalama etkin doz hızı ise deniz seviyesinde 5,5 nSv/saat olup buna karşı gelen yıllık doz ise 48   Sv/yıl'dır. Deniz seviyesinde açık alanda kozmik radyasyon doz hızlarının enleme göre değişimi   izelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1'de verilen, kozmik radyasyon nedeniyle maruz kalınan radyasyon doz değerleri deniz seviyesinden y  kseklіğe bağlı olarak artmakta ve yüksek bölgelerde yaşayanlar daha fazla radyasyona maruz kalmaktadır. Kozmik radyasyon sebepli doz hızları, deniz seviyesinde 0,03   Sv/saat, 2000 m'de 0,1   Sv/saat, 6700 m'de 1   Sv/saat, 10.000 m'de 5   Sv/saat ve 15.000 m'de ise 10   Sv/saat civarındadır (IAEA, 2004: 30). Deniz seviyesinden y  kseklіğe bağlı yerleşkelere göre nüfus ağırlıklı ortalama doz nötronlar için 2,5 kat, doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon ve fotonlar için 1,25 kat değişmektedir. Rakım ağırlıklı dünya ortalama etkin doz hızı doğrudan

⁶ Dünya nüfusunun; kuzey yarımkürede %50'si, güney yarımkürede %85'i ve tüm dünyada ise %54'   30⁰'nin altındaki enlemlerde yaşamaktadır.

iyonlaştırıcı radyasyon ve fotonlar için 340 $\mu\text{Sv/yıl}$ ($270 \mu\text{Sv/yıl} \times 1,25$) ve nötronlar için 120 $\mu\text{Sv/yıl}$ ($48 \mu\text{Sv/yıl} \times 2,5$)'dir.

Çizelge 2.1. Kozmik radyasyon doz hızlarının enleme göre değişimi (deniz seviyesi, açık alan) (UNSCEAR, 2000a: 113).

Enlem (derece)	Enlem aralığındaki nüfus (%)		Etkin doz hızı (nSv/saat)	
	Kuzey Yarımküre	Güney Yarımküre	Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon ve fotonlar	Nötronlar
80-90	0	0	32	11
70-80	0	0	32	11
60-70	0,4	0	32	10,9
50-60	13,7	0,5	32	10
40-50	15,5	0,9	32	7,8
30-40	20,4	13,0	32	5,3
20-30	32,7	14,9	30	4
10-20	11,0	16,7	30	3,7
0-10	6,3	54,0	30	3,6
Nüfus ağırlıklı ortalama				
Kuzey Yarımküre			31,0	5,6
Güney Yarımküre			30,3	4,0
Dünya ⁷			30,9	5,5

İnsanların zamanlarının %80'ini kapalı mekanlarda geçirdiği ve kapalı mekanların dış ışınlamaya karşı %20 oranında koruma sağladığı kabullenilirse etkin doz hızı doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon ve fotonlar için **280 $\mu\text{Sv/yıl}$** ve nötronlar için **100 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir. Toplamda tüm dünya nüfusu için kozmik radyasyon sebepli yıllık ortalama etkin doz hızı ise **380 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir. Nüfus ağırlıklı ortalama kozmik radyasyon doz hızları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

⁷ Nüfusun oransal dağılımı; kuzey yarımküre 0,89, güney yarımküre 0,11 alınmıştır.

Çizelge 2.2. Nüfus ağırlıklı ortalama kozmik radyasyon doz hızları
(UNSCEAR, 2000a: 113)

	Etkin doz hızı (μSv/yıl)		
	Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon ve fotonlar	Nötronlar	Toplam
Açık alan, deniz seviyesi	270	48	320
Açık alan, rakım düzeltmeli ⁸	340	120	460
Kapalı alan, rakım düzeltmeli ⁹	280	100	380

Kozmik radyasyon sebepli yıllık kolektif etkin dozun küresel değeri 2×10^6 kişi-Sv olup, bu dozun yarısını 0,5 km rakımdan daha düşük seviyede yaşayan dünya nüfusunun 2/3'ü, %10'unu ise 3 km rakımdan yüksekte yaşayan %2'si almaktadır (UNSCEAR, 2000a: 87).

2.1.2. Kozmojenik Radyonüklidler

Kozmik radyasyon, atmosferi oluşturan bileşenlerin çekirdekleri ile etkileşime girmekte, bu etkileşim sonucunda kozmojenik radyonüklidler olarak bilinen radyoaktif çekirdekleri ortaya çıkarmaktadır. Bunların en önemlileri karbon-14, sodyum-22, hidrojen-3, berilyum-7 olmak üzere, berilyum-10, alüminyum-26, klor-36, kripton-81, silisyum-32, argon-39, kükürt-35, argon-37, fosfor-33, fosfor-32 gibi diğer radyoizotoplardır. Çizelge 2.3'te kozmojenik radyonüklidlerin üretim hızları ve toplam aktiviteleri verilmiştir. Bu etkileşim daha çok üst stratosferde meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra bazı yüksek enerjili nötronlar ve protonlar atmosferin alt tabakalarına kadar inerek etkileşime sebep olmaktadır. Kozmojenik radyonüklidlerin sebep olduğu yıllık etkin doz karbon-14 için 12 μSv/yıl, sodyum-22 için 0,15 μSv/yıl, hidrojen-3 için 0,01 μSv/yıl ve berilyum-7 için

⁸ Rakım ağırlık faktörleri; doğrudan iyonlaştırıcı bileşen için 1,25, nötron bileşeni için 2,5 alınmıştır.

⁹ Mekanların zırhlama faktörü 0,8, meşguliyet faktörü 0,8 olarak alınmıştır.

0,03 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dir (UNSCEAR, 1993: 62). Kozmojenik radyoizotoplar yoluyla maruz kalınan toplam yıllık ortalama etkin doz hızı ise yaklaşık **12 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir.

Çizelge 2.3. Kozmojenik radyonüklidlerin üretim hızları ve konsantrasyonları (UNSCEAR, 2000a: 115)

Radyonüklid	İzotop	Yarı ömür	Üretim hızı		Küresel aktivite (PBq)
			atom/m ² s	PBq/yıl	
Hidrojen	³ H	12,33 yıl	2500	72	1275
Berilyum	⁷ Be	53,29 gün	810	1960	413
	¹⁰ Be	1,51x10 ⁶ yıl	450	6,4x10 ⁻⁵	230
Karbon	¹⁴ C	5730 yıl	25000	1,54	12750
Sodyum	²² Na	2,602 yıl	0,86	0,12	0,44
Alüminyum	²⁶ Al	7,4x10 ⁵ yıl	1,4	0,1x10 ⁻⁵	0,71
Silisyum	³² Si	172 yıl	1,6	8,7x10 ⁻⁴	0,82
Fosfor	³² P	14,26 gün	8,1	73	4,1
	³³ P	25,34 gün	6,8	35	3,5
Kükürt	³⁵ S	87,51 gün	14	21	7,1
Klor	³⁶ Cl	3,01x10 ⁵ yıl	11	1,3x10 ⁻⁵	5,6
Argon	³⁷ Ar	35,04 gün	8,3	31	4,2
	³⁹ Ar	269 yıl	56	0,074	28,6
Kripton	⁸¹ Kr	2,29x10 ⁵ yıl	0,01	1,7x10 ⁻⁸	0,005

2.2. KARASAL RADYASYON

Yerkabuğunda bulunan radyonüklidler ve bunların bozunma ürünleri karasal radyasyonun temel kaynaklarıdır. Canlıların dış ışınlanmaya maruz kalması en çok uranyum-238 ve toryum-232 serisi radyonüklidler ile potasyum-40'tan kaynaklanmaktadır. Bu radyonüklidler ve bunların bozunma ürünleri toprak, kayalar, gıda maddeleri, su ve hava gibi çevresel ortamlarda bulunmakta ve alfa, beta ve gama radyasyonları ile organizmaları ışınlamaktadır. Karasal radyonüklidler çevresel ortamlarda homojen bir dağılım göstermediği gibi, bu kaynaklardan iç ve dış ışınlanmalar sonucu alınan dozlar da insan faaliyetine ve alışkanlıklarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Çizelge 2.4'te karasal radyonüklidler ve yarı ömürleri verilmektedir. Çizelge 2.5'te toprakta bulunan önemli doğal radyonüklidler ve

ortalama özgül aktiviteleri ile Çizelge 2.6'da ise deniz sularında bulunan önemli doğal radyonüklidler ve aktivite konsantrasyonları verilmektedir.

Çizelge 2.4. Karasal radyonüklidler (UNSCEAR, 2000a: 114)

Element	İzotop	Yarı Ömür
Potasyum	⁴⁰ K	1,28x10 ⁹ yıl
Rubidyum	⁸⁷ Rb	4,75x10 ¹⁰ yıl
Lantan	¹³⁸ La	1,05x10 ¹¹ yıl
Samaryum	¹⁴⁷ Sm	1,06x10 ¹¹ yıl
Lutesyum	¹⁷⁶ Lu	3,73x10 ¹⁰ yıl
²³⁸U serisi		
Uranyum	²³⁸ U	4,47x10 ⁹ yıl
Toryum	²³⁴ Th	24,1 gün
Protaktinyum	^{234m} Pa	1,17 dakika
Uranyum	²³⁴ U	2,45x10 ⁵ yıl
Toryum	²³⁰ Th	7,54x10 ⁴ yıl
Radyum	²²⁶ Ra	1600 yıl
Radon	²²² Rn	3,824 gün
Polonyum	²¹⁸ Po	3,05 dakika
Kurşun	²¹⁴ Pb	26,8 dakika
Bizmut	²¹⁴ Bi	19,9 dakika
Polonyum	²¹⁴ Po	164 µs
Kurşun	²¹⁰ Pb	22,3 yıl
Bizmut	²¹⁰ Bi	5,013 gün
Polonyum	²¹⁰ Po	138,4 gün
Kurşun	²⁰⁶ Pb	kararlı
²³²Th serisi		
Toryum	²³² Th	1,405x10 ¹⁰ yıl
Radyum	²²⁸ Ra	5,75 yıl
Aktinyum	²²⁸ Ac	6,15 saat
Toryum	²²⁸ Th	1,912 yıl
Radyum	²²⁴ Ra	3,66 dakika
Radon	²²⁰ Rn	55,6 s
Polonyum	²¹⁶ Po	0,145 s
Kurşun	²¹² Pb	10,64 saat
Bizmut	²¹² Bi	60,55 dakika
Polonyum	²¹² Po	0,299 µs
Talyum	²⁰⁸ Tl	3,053 dakika
Kurşun	²⁰⁸ Pb	kararlı

²³⁵U serisi		
Uranyum	²³⁵ U	7,038x10 ⁸ yıl
Toryum	²³¹ Th	25,52 saat
Protaktinyum	²³¹ Pa	32760 yıl
Aktinyum	²²⁷ Ac	21,77 yıl
Toryum	²²⁷ Th	18,72 gün
Fransiyum	²²³ Fr	21,8 dakika
Radyum	²²³ Ra	11,44 d gün
Radon	²¹⁹ Rn	3,96 s
Polonyum	²¹⁵ Po	1,781 ms
Kurşun	²¹¹ Pb	36,1 dakika
Bizmut	²¹¹ Bi	2,14 dakika
Talyum	²⁰⁷ Tl	4,77 dakika
Kurşun	²⁰⁷ Pb	kararlı

Çizelge 2.5. Toprakta bulunan önemli doğal radyonüklidler ve ortalama özgül aktiviteleri (UNSCEAR, 2000a: 116)

Radyonüklid	Aktivite (Bq/kg)	
	Nüfus ağırlıklı ortalama	Dağılım
Uranyum-238	33	16-100
Toryum-232	45	11-64
Potasyum-40	420	140-850
Radyum-226	32	17-60

Çizelge 2.6. Deniz yüzey sularında bulunan önemli doğal radyonüklidler ve aktivite konsantrasyonları (IAEA, 1988: 14)

Radyonüklid	Aktivite (mBq/l)
Hidrojen-3	22 - 110
Karbon-14	5,9 - 6,7
Potasyum-40	1,8x10 ⁴
Rubidyum-87	107
Uranyum-238	44
Uranyum-234	48
Toryum-230	(0,2 - 5,2)x10 ⁻²
Radyum-226	1,3 - 3,1
Radon-222	0,7
Kurşun-210	0,4 - 5,0
Polonyum-210	0,19 - 3,7
Toryum-232	(0,4 - 20)x10 ³
Radyum-228	(0,4 - 37)x10 ⁻¹
Toryum-228	(0,7 - 12)x10 ⁻²
Uranyum-235	1,9

2.2.1. Dış Işınlanma

Açık alandaki dış ışınlama, yerkabuğunda bulunan radyonüklidlerden kaynaklanmaktadır. Radyasyon seviyesi toprağı oluşturan ana kayanın çeşidine bağlıdır. Granit gibi volkanik kayalar ve çökelti kayalarının alt tabakalarında yüksek radyasyon ve radyoaktivite seviyelerine rastlanmaktadır. Bazı fosfat kayalarında da yüksek radyoaktivite seviyelerine rastlamak mümkündür. Çizelge 2.5'de verildiğı gibi, dünya üzerinde ölçülen değerlerin nüfus ağırlıklı ortalaması; potasyum-40 için 420 Bq/kg, uranyum-238 için 33 Bq/kg ve toryum-232 için 45 Bq/kg'dır. Açık alanda yerkabuğundan kaynaklanan gama radyasyonu sebebiyle nüfus ağırlıklı ortalama soğurulmuş doz hızı 60 nGy/saat'dir¹⁰. Havada ölçülen soğurulmuş doz hızları ise 10-200 nGy/saat arasında değişmektedir (UNSCEAR, 2000a: 116).

Ancak, belirli bir bölgede dahi havadaki gama doz hızı her zaman sabit kalmamaktadır. Kar, nem veya yağmur yüzünden radon bozunma ürünlerinin havadan yere inmesiyle radyasyon doz hızı değişebilmektedir. Herbir santimetre kar, doğal radyasyon seviyesini %1 oranında azaltmaktadır.

Dünya üzerinde bazı bölgelerde yüksek doğal fon radyasyonuna rastlanır. Bunlar yüksek oranda toryum içeren monazit kumlarına sahip Guarapari (Brezilya), Yangjiang (Çin), Kerala ve Madras (Hindistan), Nil deltası (Mısır), volkanik topraklara sahip Minas Gerais (Brezilya), Niue Adası (Pasifik) ve İtalya'nın bazı bölgeleridir. İran'daki Ramsar ve Mahallat kaplıca suları ise yüksek oranda radyum içermektedir.

Kapalı alanlarda ise gama ışınlarıyla ışınlama en çok yapı malzemelerinden kaynaklanmaktadır ve açık alanlara kıyasla daha fazladır.

İnsanların kapalı alanlarda kalma zamanının fazlalığı da gözönüne alındığında, kapalı alanlarda ışınlama daha önemli hale gelmektedir. Kapalı alanlarda soğurulmuş doz hızı 20-200 nGy/saat arasında değişmekte olup, bu değerin nüfus ağırlıklı ortalaması 84 nGy/saat'dir (UNSCEAR, 2000a: 92).

Yetişkinler için havadaki soğurulmuş doz/etkin doz çevrim faktörü 0,7 Sv/Gy ve meşguliyet faktörü 0,8 olmak üzere yıllık etkin dozlar şu şekilde hesaplanabilir:

Kapalı alanlar için;

$$84 \text{ nGy/saat} \times 8760 \text{ saat} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} = 0,41 \text{ mSv}$$

Açık alanlar için;

$$59 \text{ nGy/saat} \times 8760 \text{ saat} \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} = 0,07 \text{ mSv}$$

Dış ışınlama için tüm dünyada yıllık etkin doz 0,3-0,6 mSv arasında değişmekte olup, ortalama yıllık etkin doz **480 µSv/yıl**'dır. Çocuklar ve bebekler için bu değer %10 - %30 daha yüksektir (UNSCEAR, 2000a: 93).

2.2.2. İç Işınlama

Radyonüklidlerin solunması veya sindirim yoluyla vücuda alınması ile iç ışınlama oluşur. Solunum yoluyla iç ışınlama uranyum-238 ve toryum-232 bozunma ürünlerinin toz parçacıkları ile havadan teneffüs edilmesi sonucu ortaya çıkar. Solunum yoluyla ışınlamanın en önemli bileşenini radon ve radonun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleri oluşturur. Sindirim

¹⁰ Doz dönüşüm faktörleri; potasyum-40 için 0,0417, uranyum-238 için 0,462 ve toryum-232 için 0,604 (nGy/saat)/(Bq/kg) alınmıştır.

yoluyla oluşan ışınlama ise potasyum-40, uranyum-238 ve toryum-232 serisi radyonüklidlerin gıdalar ve su ile vücuda alınması ile ortaya çıkar.

2.2.2.1. Sindirim

Doğal radyonüklidlerin sindirim yoluyla vücuda alınma miktarı gıdaların ve suyun tüketim oranlarına ve içerdikleri radyonüklid konsantrasyonlarına bağlıdır. Gıdalardaki doğal radyonüklid konsantrasyonu seviyesi, topraktaki radyoaktivite miktarı, tarım yöntemleri ve iklime bağlı olarak oldukça geniş bir aralıkta değişiklik gösterebilmektedir. Gıdalarda ve içme suyundaki uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin dünya ortalama aktivite seviyeleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Gıdalarda ve içme suyunda uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin ortalama aktivite seviyeleri (UNSCEAR, 2000a: 124-125)

	Aktivite (mBq/kg)								
	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁵ U
Süt ürünleri	1	0,5	5	15	15	0,3	5	0,3	0,05
Et ürünleri	2	2	15	80	60	1	10	1	0,05
Tahıllar	20	10	80	50	60	3	60	3	1
Yapraklı sebze	20	20	50	80	100	15	40	15	1
Köklü sebze	3	0,5	30	30	40	0,5	20	0,5	0,1
Balık	30	10	100	200	2000	10		100	
İçme suyu	1	0,1	0,5	10	5	0,05	0,5	0,05	0,04

Çizelge 2.8'de verildiği şekilde uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin sindirim yoluyla alınması sonucu yıllık yüklenen etkin doz bebekler için 260 µSv, çocuklar için 200 µSv ve yetişkinler için 110 µSv olup, yaş ağırlıklı toplam yıllık etkin doz değeri **140 µSv/yıl**'dir.

Sindirim yoluyla meydana gelen radyasyon ışınlamasının büyük bir kısmı potasyum elementinin radyoaktif izotopu olan potasyum-40'tan kaynaklanmaktadır. Gıdaların alınmasından sonra insan vücudunda potasyum yaklaşık olarak düzgün bir dağılım göstermektedir. Dokularda

potasyum-40 sebepli yıllık eşdeğer doz yetişkinler için 165 $\mu\text{Sv/yıl}$ ve çocuklar için 185 $\mu\text{Sv/yıl}$ olup yaş ağırlıklı ortalama doz **170 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir. Aynı değerler, potasyumun vücutta dağılımının aşağı yukarı düzgün olması sebebiyle etkin doz olarak da kabul edilebilir (UNSCEAR, 2000a :94).

Çizelge 2.8. Uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin sindirim yoluyla alınması sonucu yıllık etkin dozlar (UNSCEAR, 2000a: 127).

Radyonüklid	Alınan aktivite ¹¹ (Bq)			Yüklenen etkin doz ¹² (μSv)			
	Bebek	Çocuk	Yetişkin	Bebek	Çocuk	Yetişkin	Yaş Ağırlıklı ¹³
Uranyum-238	1,9	3,8	5,7	0,23	0,26	0,25	0,25
Uranyum-234	1,9	3,8	5,7	0,25	0,28	0,28	0,28
Toryum-230	1	2	3	0,42	0,48	0,64	0,58
Radyum-226	7,8	15	22	7,5	12	6,3	8
Kurşun-210	11	21	30	40	40	21	28
Polonyum-210	21	39	58	180	100	70	85
Toryum-232	0,6	1,1	1,7	0,26	0,32	0,38	0,36
Radyum-228	5,5	10	15	31	40	11	21
Toryum-228	1	2	3	0,38	0,3	0,22	0,25
Uranyum-235	0,1	0,2	0,2	0,011	0,012	0,012	0,011
Toplam				260	200	110	140

2.2.2.2. Solunum (radon hariç)

Radon dışındaki diğer doğal radyonüklidlerin solunumla alınmasının neden olduğu doz oldukça düşüktür. Havada uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin ortalama aktivite konsantrasyonu 1-2 $\mu\text{Bq/m}^3$ 'dür (UNSCEAR, 2000a :93).

¹¹ Gıda tüketim oranları ICRP'nin 66 sayılı raporundan (ICRP, 1994b) alınmıştır.

¹² Doz dönüşüm faktörleri ICRP'nin 67 ve 72 sayılı raporlarından (ICRP, 1994a) (ICRP, 1996) alınmıştır.

¹³ Nüfusun yaş gruplarına göre dağılımı; bebekler için 0,05, çocuklar için 0,3, yetişkinler için 0,65 alınmıştır. ICRP 'nin 101 sayılı raporunda (ICRP, 2006) bebekler 0-5 yaş, çocuklar 6-15 yaş, yetişkinler 16-70 yaş olarak standartlaştırılmıştır.

Çizelge 2.9'da verildiği şekilde, havadaki uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin solunum yoluyla vücuda alınması sonucu toplam yıllık etkin doz; bebekler için 5,0 μSv , çocuklar için 6,0 μSv ve yetişkinler için ise 5,8 μSv olup, yaş ağırlıklı toplam yıllık etkin doz **5,8 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir.

Çizelge 2.9. Uranyum ve toryum serisi radyonüklidlerin solunum yoluyla alınması sonucu yıllık etkin dozlar (UNSCEAR, 2000a: 127)

Radyonüklid	Havadaki konsantrasyon ($\mu\text{Bq/m}^3$)	Yüklenen etkin doz ^{14, 15, 16} (μSv)			
		Bebekler	Çocuklar	Yetişkinler	Yaş Ağırlıklı
Uranyum-238	1	0,018	0,022	0,021	0,021
Uranyum-234	1	0,021	0,027	0,026	0,026
Toryum-230	0,5	0,033	0,045	0,051	0,048
Radyum-226	1	0,021	0,027	0,026	0,026
Kurşun-210	500	3,5	4,2	4	4
Polonyum-210	50	1	1,3	1,2	1,2
Toryum-232	0,5	0,048	0,073	0,091	0,084
Radyum-228	1	0,019	0,026	0,019	0,021
Toryum-228	1	0,25	0,31	0,29	0,29
Uranyum-235	0,05	0,001	0,001	0,001	0,001
Toplam		5,0	6,0	5,8	5,8

2.2.2.3. Radon ve bozunma ürünleri

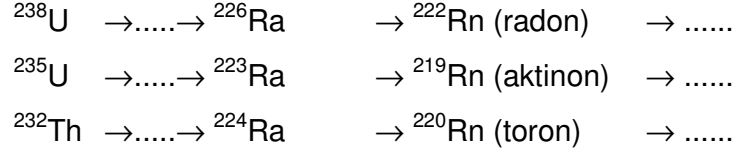
Doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni, radon gazı ve radonun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir. Radon; uranyumun ve toryumun mevcut olduğu tüm kayalardan, topraktan gelmekte ve gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek, atmosfere kaçma

¹⁴ Soluma hızları; bebekler için 1900 $\text{m}^3/\text{yıl}$, çocuklar için 5600 $\text{m}^3/\text{yıl}$ ve yetişkinler için 7300 $\text{m}^3/\text{yıl}$ alınmıştır.

¹⁵ Nüfusun yaş gruplarına göre dağılımı; bebekler için 0,05, çocuklar için 0,3, yetişkinler için 0,65 alınmıştır.

¹⁶ Doz dönüşüm faktörleri ICRP'nin 71 sayılı raporundan (ICRP, 1995) alınmıştır.

eğilimi göstermektedir. Sıcaklık, basınç farklılıkları, nem gibi faktörler bu kaçıışı etkileyen önemli faktörlerdir. Renksiz, kokusuz, tatsız bir radyoaktif gaz olan radon; kaya, toprak ve sudaki doğal uranyum ve toryumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşmaktadır. Bozunma şeması aşağıdaki gibidir.

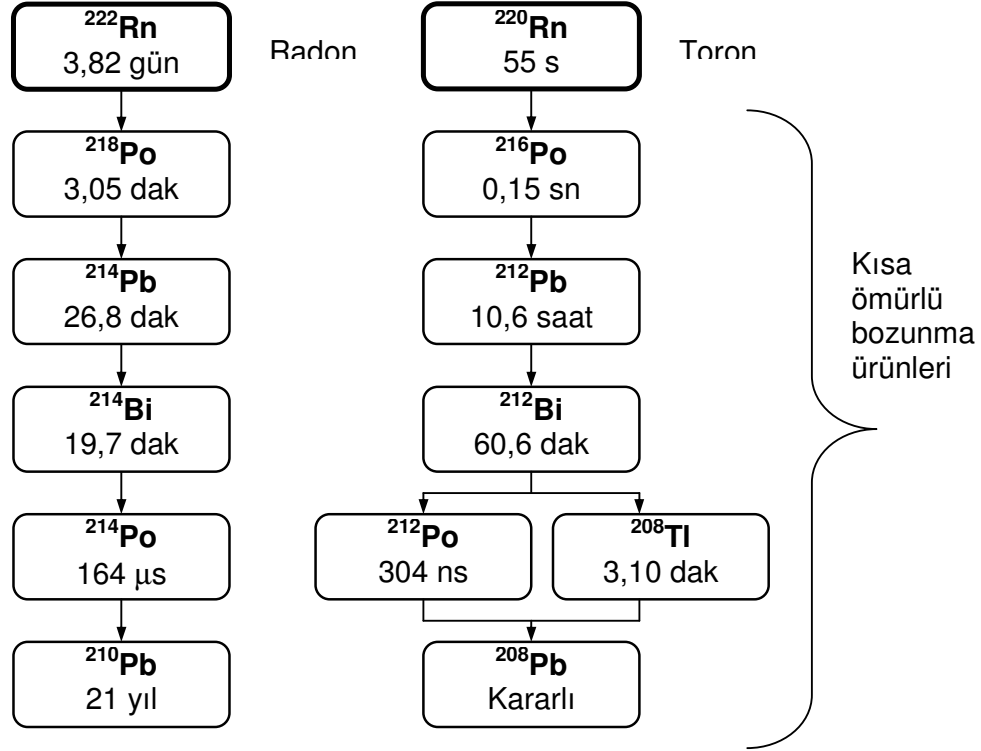


Radonun yarılanma ömrü 3,8 gün, toronun yarılanma ömrü ise 55 saniyedir. Aktinonun ise yarı ömrü 3,9 saniyedir. Aktinonun yarı ömrünün çok kısa ve doğal uranyumdaki ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ oranının 0,00725 gibi çok düşük seviyelerde olması sebebiyle aktinonun toplam doza etkisi ihmal edilebilir düzeydedir (ICRP, 1986: 1).

Radon, topraktan moleküler difüzyon veya konveksiyonla sızarak yerden havaya doğru hareket etmekte ve atmosfere ulaşmaktadır. Ancak bir kısmı yüzey altında kalıp, suda çözünerek yeraltı sularına karışmaktadır. Havadaki radonun dağılımı meteorolojik şartlara bağlı olmakla birlikte radon konsantrasyonu yükseklikle azalmaktadır.

Radon bir seri bozunma ile yine radyoaktif olan kısa ömürlü bozunma ürünleri üretir. Bu radyoaktif maddeler polonyum, bizmut ve kurşun elementlerinin radyoizotoplarıdır. Şekil 2.1.'de radonun ve toronun bozunma zinciri verilmiştir. Bozunma ürünlerinin radondan farkı gaz halinde olmamalarıdır. Bu izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğerlere alınabilmektedir. Radon ve bozunma ürünlerinin solunması önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır. Solunum sisteminde ortaya çıkan bozunma sonucunda, bronşal epiteldeki radyasyon dozu artmakta, bozunma ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam etmekte ve bu sürecin her aşamasında radyasyona maruz kalınmaktadır. Bu ise, akciğer dokusunda hasara,

dolayısıyla, zaman içerisinde kansere sebep olabilmektedir. Solunum sistemindeki radyasyon dozu; solunmuş havadaki radon ve bozunma ürünleri konsantrasyonuna, toz içerisindeki parçacıkların büyüklüğüne ve fizyolojik parametrelere bağlıdır.



Şekil 2.1. Radon-222 ve Radon-220'nin bozunma zinciri (ICRP, 1986: 2)

Solunum sisteminde radon bozunma ürünlerinin alfa bozunması ile alınan radyasyon dozu, yalnızca radonun bozunmasıyla meydana gelen dozdan 100 kat daha fazladır. Aynı şekilde, solunmuş toron bozunma ürünlerinden kaynaklanan doz, yalnızca toron bozunumundan kaynaklanan dozun 500 katıdır (Yücel ve Arıkan, 2001).

Kapalı alanlardaki radonun ana kaynağı ise, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında basınç oluşturmakta ve özellikle zemindeki çatlaklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası

boşluklarından bina içerisine sızmaktadır. Ayrıca, yapı malzemelerinde, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gazda ve musluk sularında bulunan radon da bina içi radon konsantrasyonunu artırmaktadır. Topraktaki ve yapı malzemelerindeki radyum miktarı, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, toprakla temasta olan yapının yüzey alanı, izolasyon niteliği, bina zemini, binadaki havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklığı ve basınç farkları binalardaki radon konsantrasyonunu etkileyen temel unsurlardır.

Ortalama radon konsantrasyon değerleri; dış hava için 10 Bq/m^3 ve kapalı alanlar için 40 Bq/m^3 civarındadır. Toprak ve yerküre orijinli pek çok yapı malzemesi atmosferdekinden yaklaşık 10^3 - 10^4 kat daha fazla radon gazı konsantrasyonuna sahiptir. Yeraltı suyunda erimiş halde bulunan radon miktarı $4 - 1.000.000 \text{ Bq/l}$ arasında değişmektedir. Tipik olarak, musluktan akan su içindeki radonun 10.000 'de biri havaya yayılmaktadır. Radonun bir binaya giriş hızı, yaklaşık olarak yapı malzemeleri ve topraktan 60 kBq/gün , dış ortam havasından 10 kBq/gün , sudan 4 kBq/gün ve doğal gazdan 3 kBq/gün 'dür (Yücel ve Arıkan, 2001).

Radon ve atmosferdeki kısa yarı ömürlü bozunma ürünleri doğal kaynaklardan insanların maruz kaldığı radyasyonun en önemli bileşenidir. Radon sebepli yıllık etkin doz; ortalama radon konsantrasyonu kapalı alanlar için 40 Bq/m^3 ve açık alanlar için 10 Bq/m^3 , denge faktörü kapalı alanlar için $0,4$ ve açık alanlar için $0,6$, yıllık meşguliyet kapalı alanlar için 7000 saat ve açık alanlar için 1760 saat, doz dönüşüm faktörü $9 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3})$ olmak üzere;

kapalı alan için;

$$40 \text{ Bq/m}^3 \times 0,4 \times 7000 \text{ saat} \times 9 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 1,0 \text{ mSv}$$

açık alan için;

$10 \text{ Bq/m}^3 \times 0,6 \times 1760 \text{ saat} \times 9 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,095 \text{ mSv}$ olmak üzere toplam 1,1 mSv'dir.

Toron bozunma ürünlerinden kaynaklanan ortalama yıllık etkin doz; toron eşdeğer denge konsantrasyonu kapalı alanlar için $0,3 \text{ Bq/m}^3$ ve açık alanlar için $0,1 \text{ Bq/m}^3$, yıllık meşguliyet kapalı alanlar için 7000 saat ve açık alanlar için 1760 saat, doz dönüşüm faktörü $40 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3})$ olmak üzere;

kapalı alan için;

$$0,3 \text{ Bq/m}^3 \times 7000 \text{ saat} \times 40 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,084 \text{ mSv}$$

açık alan için;

$0,1 \text{ Bq/m}^3 \times 1760 \text{ saat} \times 40 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,007 \text{ mSv}$ olmak üzere toplam 0,09 mSv'dir.

Radon ve toron gazının solunumundan sonra kanda çözünmesi ile alınan doz; ortalama radon konsantrasyonu kapalı alanlar için 40 Bq/m^3 ve açık alanlar için 10 Bq/m^3 , ortalama toron konsantrasyonu 10 Bq/m^3 , yıllık meşguliyet kapalı alanlar için 7000 saat ve açık alanlar için 1760 saat, doz dönüşüm faktörü radon için $0,17 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3})$ ve toron için $0,11 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3})$ olmak üzere;

radon için kapalı ortam;

$$40 \text{ Bq/m}^3 \times 7000 \text{ saat} \times 0,17 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,048 \text{ mSv}$$

radon için açık ortam;

$10 \text{ Bq/m}^3 \times 1760 \text{ saat} \times 0,17 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,003 \text{ mSv}$ olmak üzere toplam 0,05 mSv'dir.

toron için kapalı ortam;

$10 \text{ Bq/m}^3 \times 7000 \text{ saat} \times 0,11 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,008 \text{ mSv}$

toron için açık ortam;

$10 \text{ Bq/m}^3 \times 1760 \text{ saat} \times 0,11 \text{ nSv/(Bqsaatm}^{-3}) = 0,002 \text{ mSv}$ olmak üzere toplam 0,01 mSv'dir.

Musluk suyundaki radonun sindirim yoluyla vücuda alınması sonucu alınan doza gelince; sudaki konsantrasyon 10 kBq/m^3 ve nüfus ağırlıklı musluk suyu tüketim oranı 60 l/yıl olmak üzere sudaki radon dolayısıyla sindirim yoluyla maruz kalınan ışınlama;

$10 \text{ kBq/m}^3 \times 60 \text{ l/yıl} \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{l} \times 3,5 \text{ nSv/Bq} = 0,002 \text{ mSv}$ 'dir.

Radon sebebi toplam yıllık etkin doz; havadaki radon ve bozunma ürünlerinin solunması ile 1,1 mSv, radon gazının kanda çözünmesi sonucu 0,05 mSv ve musluk suyunun tüketimi sonucu 0,002 mSv olmak üzere toplam **1,15 mSv/yıl**'dir. Toron sebebi toplam yıllık etkin doz ise; toron ve bozunma ürünlerinin solunumu ile 0,09 mSv, kanda toron gazının çözünmesi ile 0,01 mSv olmak üzere toplam **0,10 mSv/yıl**'dir (UNSCEAR, 2000a: 107-108).

2.2.3. Endüstriyel Aktiviteler Sonucu Artırılan Doğal Işınlama

Doğal karasal radyonüklidleri içeren maddelerin yeraltından çıkarılması, işlenmesi, taşınması, kullanılması ve atıkların bertarafı süreçlerinde radyasyon ışınlaması oluşmaktadır. Bu insan etkinlikleri sonucu doğal radyoaktif malzemelerin kompozisyonu, konsantrasyonu, mevcudiyeti ve canlılara yakınlığı değiştirilmekte ve sonuçta fazladan radyasyon ışınlaması ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak; fosfat ve metal cevheri işleme, uranyum madenciliği, petrol ve gaz çıkarılması, yapı malzemeleri üretimi, toryum bileşimli maddelerin kullanımı, mineral çıkarma, jeotermal kaynaklar, hurda metal endüstrisi, çimento endüstrisi, demir-çelik endüstrisi, fosil yakıt kullanımı, yer altı suyu çıkarılması gibi faaliyetlerden ve bu faaliyetler sonucunda ortaya çıkan gaz, sıvı ve katı atıklardan dış ve iç ışınlama meydana gelmektedir (IAEA, 2003).

Çizelge 2.10. Bazı sanayi tesislerinden salınan doğal radyonüklidlerin sebep olduğu maksimum yıllık etkin dozlar (UNSCEAR, 2000a: 138)

Endüstri	Maksimum yıllık etkin doz ($\mu\text{Sv/yıl}$)		
	Dış ışınlama	Havaya dağılma yoluyla dış ve iç ışınlama	Suya dağılma yoluyla dış ve iç ışınlama
Fosfor üretimi	130	2	<0,4
Fosforik asit üretimi	8	2000	2
Gübre üretimi	20	<0,4	15
Demir ve çelik üretimi	8	<0,4	3
Asfalt üretimi	4	<0,4	
Kok kömürü üretimi	4	<0,4	
Termik santral (kömür)	12	<0,4	4
Termik santral (gaz)	<0,4	<0,4	---
Petrol ve gaz çıkarılması	2	<0,4	
Çimento üretimi	5	<0,4	
Seramik endüstrisi	<0,4	<0,4	
Mineral kumları	60	<0,4	320
Titanyum boya üretimi	<0,4	<0,4	1

Bazı sanayi tesislerinden salınan doğal radyonüklidlerin sebep olduğu maksimum yıllık etkin dozlar Çizelge 2.10'da verilmiştir. Bu dozlar tesislerin yakınlarında 100 $\mu\text{Sv/yıl}$ değerlerine ulaşırken genelde **1-10 $\mu\text{Sv/yıl}$** değerlerindedir (UNSCEAR, 2000a: 111). Nükleer olmayan enerji üretim tesislerinden birim enerji başına kolektif etkin dozlar ise Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Nükleer olmayan enerji kaynaklarından birim enerji üretimi başına kolektif etkin dozlar (UNSCEAR, 1993: 73)

Işınlama kaynağı	Üretilen birim enerji başına yüklenen kolektif etkin doz (kişi-Sv/GW-yıl)
Kömür	20
Petrol	0,5
Doğal Gaz	0,03
Jeotermal	2

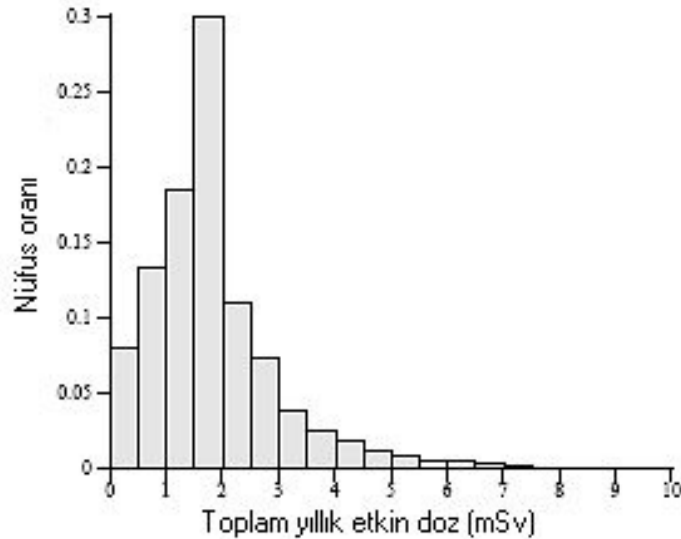
2.3. DOĞAL ÇEVRESEL KAYNAKLARDAN KÜRESEL IŞINLANMA

Radyasyon ışınlaması çevredeki radyonüklidlerin konsantrasyonuna, enleme, deniz seviyesinden yüksekliğe, yaşanılan yere, tüketim alışkanlıklarına göre değişiklik göstermekle birlikte, Çizelge 2.12'de gösterildiği gibi tüm dünyada doğal radyasyon sebepli toplam yıllık doz 1-10 mSv arasında değişmekte olup, ağırlıklı yıllık etkin doz ortalaması **2,4 mSv/yıl**'dır.

Dünya nüfusunun %65'i 1-3 mSv, %25'i 1 mSv'den düşük ve %10'u 3 mSv'den düşük doza maruz kalmaktadır. Doğal radyasyon sebepli yıllık etkin dozun dünya nüfusuna oransal dağılımı Şekil 2.2'de grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 2.12. Doğal radyasyon kaynaklarından tüm dünya ortalama yıllık radyasyon dozları

İşinlama kaynağı	Yıllık etkin doz (mSv)	
	Ortalama	Tipik dağılım
Kozmik radyasyon		
<i>Doğrudan iyonlaştırıcı ve foton bileşeni</i>	0,28	
<i>Nötron bileşeni</i>	0,10	
Kozmojenik radyonüklidler	0,01	
Toplam	0,39	0,3-1,0
Karasal radyonüklidlerden dış işinlanma		
<i>Açık alan</i>	0,07	
<i>Kapalı alan</i>	0,41	
Toplam	0,48	0,3-0,6
Solunum yoluyla iç işinlanma		
<i>Uranyum ve toryum serisi</i>	0,006	
<i>Radon</i>	1,15	
<i>Toron</i>	0,10	
Toplam	1,26	0,2-10
Sindirim yoluyla iç işinlanma		
<i>Potasyum</i>	0,17	
<i>Uranyum ve Toryum serisi</i>	0,14	
Toplam	0,31	0,2-0,8
Toplam işinlanma	2,4	1-10



Şekil 2.2. Doğal radyasyon sebepli yıllık etkin dozun dünya nüfusuna oransal dağılımı (UNSCEAR, 2000a: 111)

3. YAPAY RADYASYON KAYNAKLARI

Atmosferde ve yeraltında yapılan nükleer silah denemeleri, nükleer silah üretimi, nükleer güç üretimi, nükleer yakıt çevrimi, radyoizotop üretimi ve kullanımı ile nükleer kazalardan çevreye verilen radyonüklidler çevre radyoaktivite seviyesinde artışa neden olan yapay radyasyon kaynaklarıdır. Ancak, küresel radyoaktif kirlenmenin en önemli kaynağı, 1945-1980 yılları arasında atmosferde gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri sonucu meydana gelen radyoaktif serpintilerdir.

3.1. NÜKLEER SİLAH ÜRETİMİ VE DENEMELERİ

Atom bombası ilk kez 1945 yılında kullanılmış, İkinci Dünya Savaşı'nı izleyen soğuk savaş yıllarında ise, başta ABD ve SSCB ve daha sonra da İngiltere, Çin ve Fransa tarafından pek çok nükleer deneme gerçekleştirmiştir. Bu denemeler atmosferde yapıldığı için patlayan bombalardan çıkan stronsiyum ve sezyum gibi radyoaktif maddeler atmosfere yayılmış, bombanın patlama gücüyle, çıkan radyoaktif zerreciklerin büyük kısmı stratosfere taşınmıştır. 1950'li yıllarda denemelerden ortaya çıkan radyoaktivitenin yeryüzünü pek etkilemeyeceği, çünkü stratosfere giden bu zerreciklerin orada zararsız hale gelinceye kadar kalacağı varsayılmıştır. Ancak, nükleer denemeler Nevada çöllerinde yapıldığı halde, ABD'nin her köşesinde radyoaktif serpinti izlerine rastlanılmaya başlanmıştır. Kısa zamanda, radyoaktif serpentinin, sadece ABD'yi değil, dünyanın her tarafını etkilediği anlaşılmıştır. Nükleer denemeler sonucu ortaya çıkan radyoaktif serpinti, tüm dünyanın ekosistem sağlığını tehdit etmeğe başlamıştır. Bilim adamlarının baskısı ve kamuoyundaki tartışmalar sonucu, 1963 yılında ABD, SSCB ve daha sonra İngiltere, atmosferde yapılan nükleer denemelere son vermek için bir anlaşma imzalamışlar ve denemeler bu tarihten sonra yeraltında sürdürülmüştür. Yeraltında yapılan denemelerden ortaya çıkan

radioaktif maddeler atmosfere yayılmadığı için, bu anlaşma ile insan ve ekosfer sağlığına olan tehlike büyük ölçüde önlenmiş, anlaşmayı takip eden yıllarda, radioaktif serpinti miktarı azalmaya başlamıştır (Kışlalıoğlu ve Berkes, 1994: 153-155). ABD ve SSCB'nin birbiriyle yarışırmasına atmosferde nükleer denemeler yaptıkları yıllarda çevresel radyasyon %25 oranında yükselmiş, 1963 yılında iki süper devlet atmosferde nükleer deneme yapmamak konusunda anlaşdıktan bir yıl sonra atmosferde radyasyon doz hızı doğal seviyesine inmiş, fakat patlamaların izleri gıda maddeleri zincirinde yıllarca algılanabilmiştir (Özden, 1983: 109).

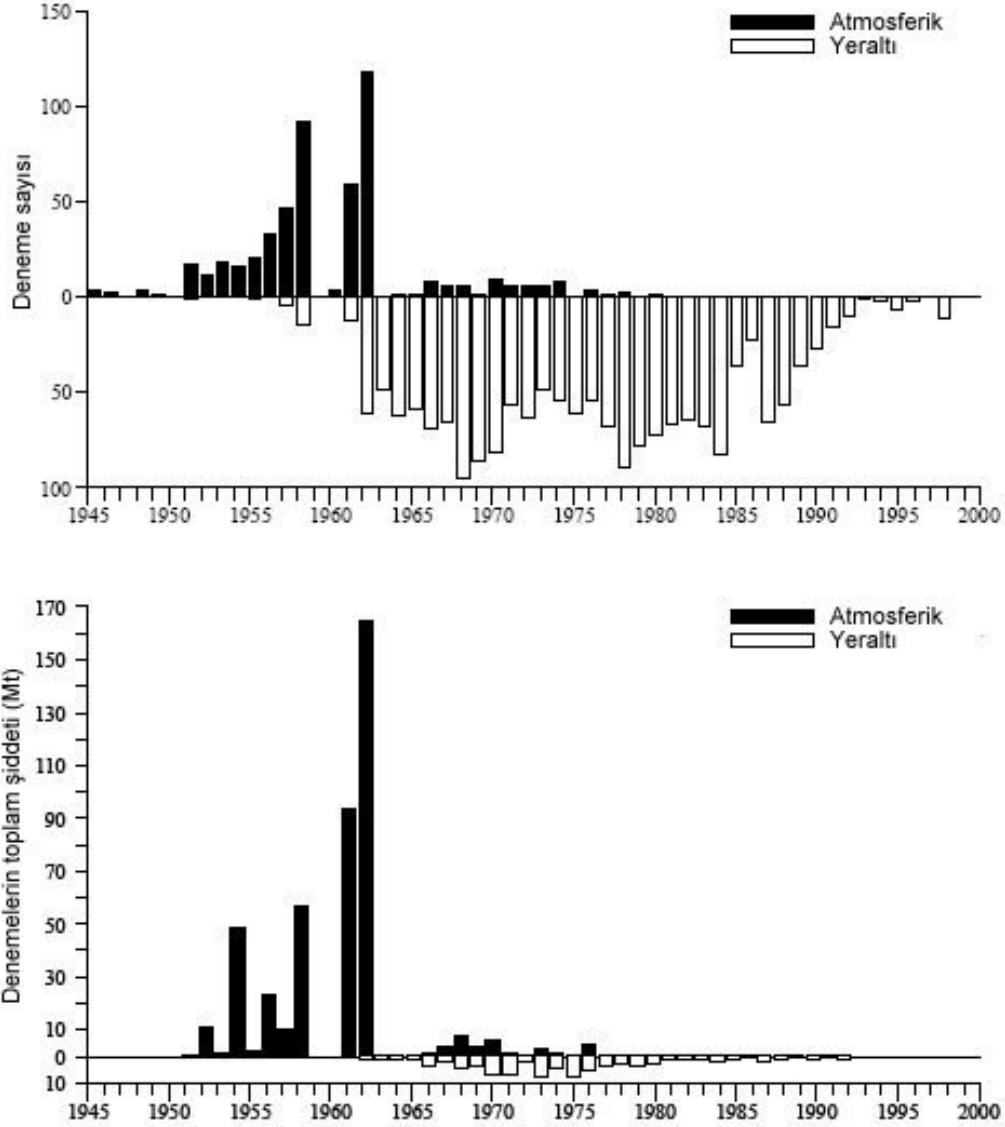
Günümüze kadar toplam 189 Mt'u fisyon, 251 Mt'u füzyon olmak üzere toplam 440 Mt'luk, 543 atmosferik nükleer deneme gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sonucunda, troposfere ve stratosfere 160,5 Mt, patlama bölgelerine ise 29 Mt fisyon ürünü salınmıştır (UNSCEAR, 2000a: 207).

Nükleer silahların yer altı denemeleri ise 1951 yılında ABD ve 1961 yılında SSCB tarafından başlatılmıştır. Bu güne kadar toplam 90 Mt'luk 1876 deneme yeraltında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Günümüze kadar gerçekleştirilmiş nükleer silah denemeleri (UNSCEAR, 2000a: 233)

Ülke	Nükleer deneme sayısı			Güç (Mt)		
	Atmosferik	Yeraltı	Toplam	Atmosferik	Yeraltı	Toplam
Çin	22	22	44	20,7	1	22
Fransa	50	160	210	10,2	3	13
Hindistan	-	6	6			
Pakistan	-	6	6			
İngiltere	33	24	57	8,1	2	10
ABD	219	908	1127	154	46	200
SSCB	219	750	969	247	38	285
Toplam	543	1876	2419	440	90	530

Çizelge 3.1.'de verildiği üzere bu güne dek toplam 530 Mt gücünde 2419 nükleer silah denemesi gerçekleştirilmiştir¹⁷. Bu denemelerin yıllara göre dağılımı Şekil 3.1.'de verildiği gibidir.



Şekil 3.1. Atmosferde ve yeraltında gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri
(UNSCEAR, 2000a: 160)

¹⁷ 1945 yılında ABD tarafından Japonya'ya atılan 2 adet nükleer bomba dahildir.

1 Mt bombanın patlamasından 10^{12} Kcal ısı açığa çıkmaktadır. Bu ise yaklaşık olarak 1 milyon ton TNT'nin patlamasının veya 0,1 milyon ton petrolün yanmasının yarattığı enerjiye eşdeğerdir. Böylesine büyük bir ısının bir anda serbest kalması havada bir ateş topu oluşturmakta, ateş topunun merkezinde sıcaklık milyon derecelerin çok üstüne çıkmaktadır. Dolayısıyla bombanın patladığı noktada ve yakın çevresinde cinsi ne olursa olsun her türlü madde birden buharlaşarak, doğal konveksiyonun yarattığı baca etkisi ile yükselerek 10 km'yi aşan bir sütun haline dönüşmekte, daha sonra sütun, sanki bir tavana ulaşmışcasına, üstten yanlara doğru genişleyerek devasa bir mantar şeklini almaktadır. Nükleer patlamanın özellikle canlılar için en büyük tehlikelerinden birini radyoaktif serpinti oluşturmaktadır. Uranyumun veya plütonyumun fisyonundan değişik oranlarda 80 çeşit radyoaktif madde doğmakta, zaman içinde bunların da radyoaktif bozunumlarıyla 200'ü aşkın radyoaktif madde ortaya çıkmaktadır (Özden, 1983: 105-109).

Nükleer patlamanın radyoaktivite tehlikesini büyük ölçüde artıran olay fisyonndan doğan hızlı nötronların çevredeki maddeleri ışınlamaları ve onları radyoaktif hale getirmeleridir. Yükseklerde gerçekleştirilen patlamalarda ancak havada askıda duran tozlar ve havanın kendisi aktiflenirken alçalarda veya yer seviyesinde gerçekleştirilen patlamalarda yerdeki maddeler de aktiflenmektedir. Patlamanın etkisiyle aktiflenen maddeler çok yükseklerle, hatta stratosfere kadar çıkmakta, stratosfere yükselen ince tozlar burada uzun seneler tutunabilmektedir. Bu sırada kısa ömürlü radyonüklidler sönmölenmekte, fakat yarıömürleri yıllar mertebesinde olan stronsiyum-90 ve sezyum-137 gibi radyoizotoplar zamanla yağmur veya karla yeryüzüne inmekte ve aktivitelerini yerde sürdürmektedir .

Çizelge 3.2'de atmosferik nükleer silah denemelerinden küresel olarak dağılan radyonüklidler ve toplam aktiviteleri verilmektedir. Dünya yüzeyinde ve atmosferde değişik yüksekliklerde gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri sonucunda patlamanın yerine göre yerel, bölgesel ve küresel

evre etkilenmiştir. Yeruştünde yapılan testlerde radyoaktif serpinti test bölgesinde ve ruzgar yönünde birkaç bin kilometreye kadar dağılmıştır. Bu oran meteorolojik şartlara, patlamanın yerden yüksekliğine, çevredeki malzemenin ve yüzeyin yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Atmosferik nükleer denemelerin birçoğu kuzey yarımkürede yapıldığından buradaki birikim güney yarımküreye göre daha fazladır.

Çizelge 3.2. Atmosferik nükleer denemelerden ortaya çıkan ve küresel olarak dağılan radyonüklidler (UNSCEAR, 2000a: 213)

Radyonüklid	Yarı mr	Aktivite (PBq)
Hidrojen-3	12,33 yıl	186000
Karbon-14	5730 yıl	213
Mangan-54	312,3 gün	3980
Demir-55	2,73 yıl	1530
Stronsiyum-89	50,53 gün	117000
Stronsiyum-90	28,78 yıl	622
İtriyum-91	58,51 gün	120000
Zirkonyum-95	64,02 gün	148000
Rutenyum-103	39,26 gün	247000
Rutenyum-106	373,6 gün	12200
Antimon-125	2,76 yıl	741
İyot-131	8,02 gün	675000
Baryum-140	12,75 gün	759000
Seryum-141	32,50 gün	263000
Seryum-144	284,9 gün	30700
Sezyum-137	30,07 yıl	948
Plütonyum-239	24110 yıl	6,52
Plütonyum-240	6563 yıl	4,35
Plütonyum-241	14.35 yıl	142

Nükleer silah denemeleri ile çevreye verilen radyoaktif maddeler yoluyla alınan maksimum doz 1963 yılında 0,14 mSv/yıl olmuştur. Toplam doz miktarı 1979'a kadar yaklaşık 10 kat azalmış, 1990'larda 0,006 mSv mertebelerine gerilemiştir. Bu güne kadar gerçekleştirilmiş nükleer silah denemeleri sonucunda meydana gelen radyoaktif serpintilerden küresel olarak maruz kalınan yıllık ortalama doz **0,005 mSv/yıl**'dır (UNSCEAR, 2000a: 172). Atmosferik nükleer denemelerden ortaya çıkan radyonüklidler dolayısıyla 1945-1999 yılları arasında tüm dünyada; 353 μ Sv'i dış ışınlanma, 492 μ Sv'i sindirim ve 149 μ Sv'i solunum yoluyla olmak üzere toplam 994 μ Sv

etkin doza maruz kalınmıştır. Çizelge 3.3'te verildiği gibi bu radyonüklidlerin çevrede bulunacakları süre boyunca sebep olacağı toplam doz ise 3490 μSv olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.3. Atmosferik nükleer denemelerle çevreye verilen radyonüklidlerin sebep olduğu toplam etkin doz (μSv) (UNSCEAR, 2000a: 229-230)

	Dış ışınlanma	Sindirim yoluyla iç ışınlanma	Solunum yoluyla iç ışınlanma	Toplam
Kuzey yarımküre				
1945-1999	382	531	164	1076
2000-2099	124	141	-	264
2100-2199	12	51	-	63
2200-∞	1,4	2180	-	2181
Toplam (1945-∞)	520	2900	164	3580
Güney yarımküre				
1945-1999	115	178	35	328
2000-2099	31	126	-	157
2100-2199	3,1	50	-	53
2200-∞	0,3	2180	-	2180
Toplam (1945-∞)	149	2530	35	2720
Dünya¹⁸				
1945-1999	353	492	149	994
2000-2099	114	139	-	253
2100-2199	11	51	-	62
2200-∞	1,3	2180	-	2181
Toplam (1945-∞)	479	2860	149	3490

Nükleer silah denemelerine ilave olarak, nükleer malzemenin üretildiği ve nükleer silahların yapıldığı tesisler de çevreye bir miktar radyonüklid salımına sebep olmaktadır. Bu tesislerin bulunduğu çevredeki bulaşma yerel ve bölgesel boyuttadır.

¹⁸ Nüfusun oransal dağılımı; kuzey yarımküre 0,89, güney yarımküre 0,11 alınmıştır.

3.2. NÜKLEER GÜÇ ÜRETİMİ

Atom çekirdeğinin parçalanması, yirminci yüzyılın en önemli bilimsel olaylarından biri olarak kabul edilmiş, parçalanma sonucu ortaya çıkan büyük enerji ne yazık ki, ilk olarak atom bombası olarak kullanılmış, daha sonra elektrik enerjisi üretiminde bu enerjiden faydalanılması düşüncesi, nükleer güç reaktörlerini gündeme getirmiştir.

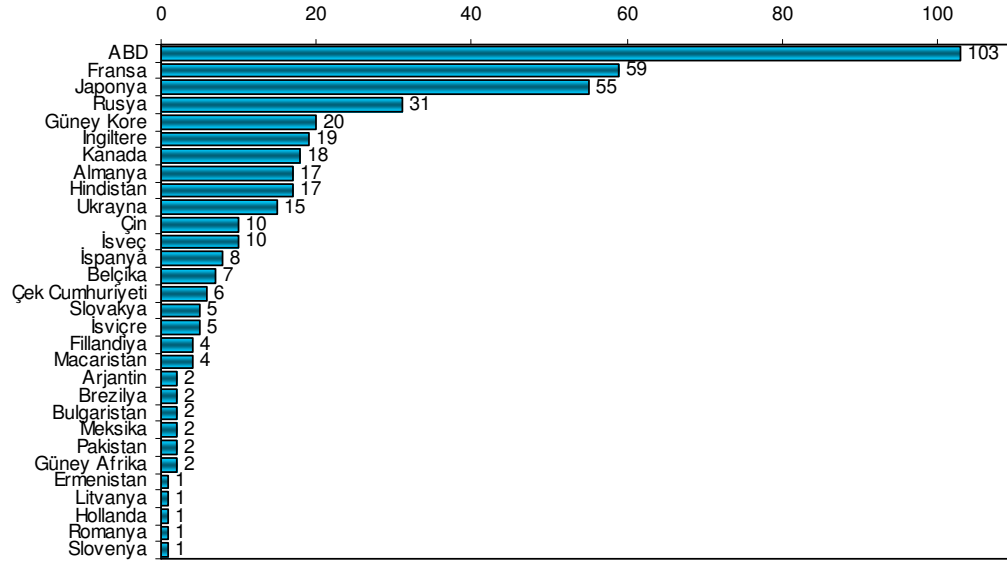
Dünyamızda halen enerji üretiminde ticari olarak kullanılan teknoloji fisyon teknolojisidir. Ağır kütleli çekirdekler belirli şartlar gerçekleştirildiğinde bölünerek daha kararlı çekirdeklere dönüşürler. Bu olaya nükleer fisyon denir. İçerisinde fisyon reaksiyonunun sürekli¹⁹ ve kontrollu²⁰ olarak gelişmesine imkan verecek şekilde düzenlenmiş olan sisteme nükleer reaktör denir. Nükleer reaktörde fisyon reaksiyonu sonucu oluşan ısı vasıtasıyla su buharı elde edilir ve turbojeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisi üretilir. Nükleer reaktörler kullanılış amaçlarına, yakıt cinsine, yavaşlatıcı ve soğutucu maddelerine ve nötronların enerjilerine göre sınıflandırılırlar.

İlk nükleer reaktör 1942 yılında Fermi tarafından Şikago'da yapılmıştır. Nükleer kaynaklı elektrik üretimi 1956 yılından sonra hız kazanmış 1970-

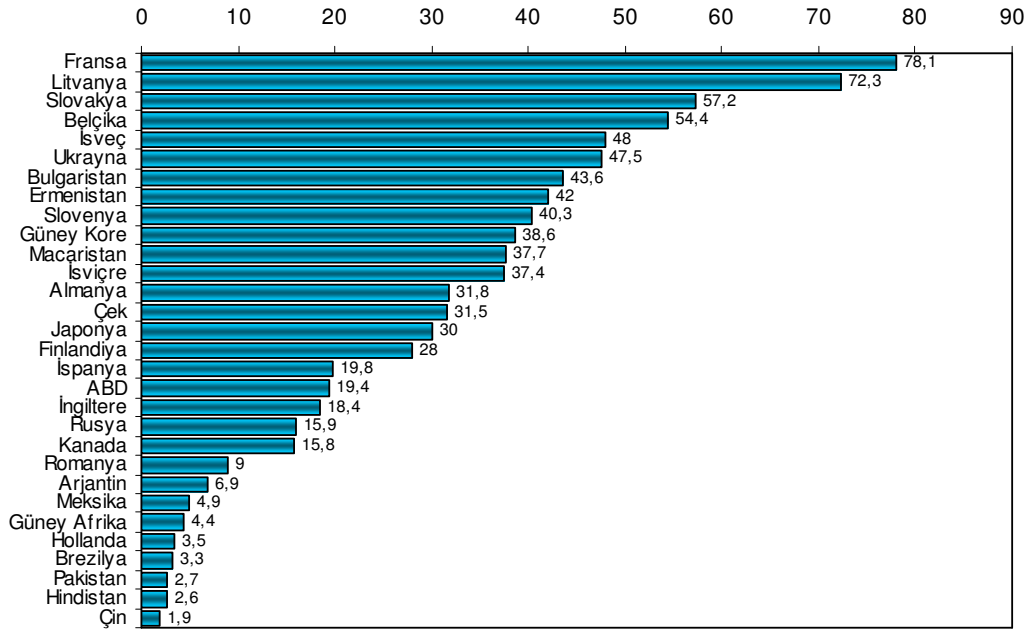
¹⁹ Nükleer reaktörün yakıtını oluşturan uranyum-235 atomlarının çekirdeğinde 92 adet proton ve 143 adet nötron vardır. Nükleer enerji, çekirdekteki bu 235 taneciği bir arada tutan bağ enerjisinin bir bölümünün açığa çıkmasıyla oluşmaktadır. Uranyum-235 çekirdeği üzerine çarpan yavaşlatılmış bir nötron bu çekirdekteki bağ kuvvetlerinin dengesini bozarak çekirdeği birkaç parçaya böler (fisyon olayı) ve bu arada da 2 ve bazen de 3 nötron ortaya çıkar. Bu nötronlar civarlarındaki diğer uranyum-235 çekirdeklerini parçalarlar. Bunlardan çıkan yeni nötronlar da başka uranyum-235 çekirdeklerini parçalar ve bu süreç bir zincirleme reaksiyon mekanizması oluşturur.

²⁰ Nükleer reaktörlerde zincirleme reaksiyon mekanizması tümüyle kontrol altındadır. Yani reaktörü işleten operatörler bu zincirleme reaksiyonu başlatabilir, istedikleri süre kadar ve istedikleri enerji düzeyi çıkışına ayarlayarak devam ettirebilir ve istedikleri anda söndürüp durdurabilirler.

1985 yılları arasında hızlı bir gelişme göstermiştir. Nükleer güç santralleri, günümüzdeki küresel elektrik üretiminin %17'sini sağlamaktadır.



Şekil 3.2. Dünyada çalışan reaktörlerin ülkelere göre dağılımı (Nisan 2007)



Şekil 3.3. Nükleer enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı (%) (2006 yılı)

Halen dünyada 30 ülke nükleer reaktöre sahip olup, toplam 436 nükleer reaktör çalışır durumdadır ve toplam net kurulu güç 368.858 MW_e'tir. Ayrıca toplam gücü 24.109 MW_e olacak 31 nükleer reaktör de inşa halindedir²¹. Dünyada çalışan reaktörlerin ülkelere göre dağılımı Şekil.3.2'de verilmiştir. Şekil 3.3'te ise nükleer enerjinin toplam elektrik üretimindeki oranının ülkelere göre dağılımı verilmektedir (PRIS, 2007).

Nükleer santraller işletilirken çevreye gaz ve sıvı formda bir miktar radyoaktif atık bırakırlar. Nükleer reaktörde oluşan fisyon ürünlerinin %10 kadarı gazdır. Radyoaktif gazların bir kısmı yakıtı çevreleyen zarfta bulunan delik ve çatlaklardan dışarı sızarak reaktör suyuna ve havasına karışırlar. Bunlardan ayrıştırılabilen asal gazlar reaktörün yüksek bacasından kontrollü biçimde atmosfere atılırlar. Asal gazlar dışında kalan gazların, kimyasal reaksiyonlarla veya suda eriyerek canlı besin çevrimine katılmaları mümkün olduğundan, bu gazlar filtrelerle tutulur ve sonradan sıvılaştırılarak uzun süre muhafaza edilirler. Çok düşük seviyedeki radyoaktif sıvı artıklar da şimdiye kadar kontrollü biçimde denizlere, göllere ve akarsulara verilegelmiştir. Ancak, çevreye verilecek radyoaktiviteye belirli bir sınır konmuştur. Radyoaktif artıkların, kontrollü ve sınırlı bir şekilde de olsa doğaya verilmeleri günümüzde tartışma konusudur. Doğanın korunmasına titizlik gösteren çevreler bu uygulamaya bütünüyle son verilmesini isterlerken, nükleer çevreler bu uygulamadan zarar görülmediğini, reaktör deşarjlarında radyoaktiviteyi sıfıra indirmeye kalkışmanın düşünülemeyecek kadar pahalıya malolacağını ileri sürmektedirler (Özden, 1983: 363).

Katı radyoaktif atıklar ise radyoaktivite seviyelerine göre sınıflandırılıp özel işleme tabi tutulurlar ve çevreye bırakılmazlar. Nükleer santral sahibi ülkeler mevzuat gereği, denetim ve ölçümlerle nükleer santrallerin işletilmesi sırasında çevreye gaz ve sıvı atıklarla bırakılan radyoaktiviteyi sınırlamakta

²¹ Rusya Federasyonu 7, Hindistan 6, Çin 5, Bulgaristan 2, Ukrayna 2, Tayvan 2, Arjantin 1, Finlandiya 1, İran 1, Japonya 1, Güney Kore 1, Pakistan 1, Romanya 1 (PRIS, 2007).

ve kontrol etmektedirler.

Tüm reaktörler için reaktör işletimi süresince oluşan radyoaktif madde salımı nedeniyle ortaya çıkan toplam kolektif etkin doz, her bir reaktör tipinin enerji üretimine göre ağırlıklı ortalama alınmış şekliyle 0,43 kişi-Sv/GW-yıl'dır (UNSCEAR, 2000a: 187).

Dünyada işletilmekte olan tüm reaktörlerden çıkan ve tüm dünyaya yayılan radyoaktivite nedeni ile bir kişinin maruz kalacağı ortalama etkin doz **0,2 μ Sv/yıl**'dan daha azdır. Reaktör bölgelerindeki bireysel etkin dozlar ise 1-500 μ Sv aralığında değişmektedir (UNSCEAR, 2000a: 188).

3.3. NÜKLEER YAKIT ÇEVİRİMİ

Nükleer yakıt çevrimi; uranyum arama, çıkarma, arıtma, gerekiyorsa zenginleştirme, yakıt fabrikasyonu, kullanılmış yakıtın depolanması, atık olarak işlem görmesi veya yeniden işlenmesi ve oluşan atıkların işleme tabi tutularak depolanmasına kadar tüm adımları kapsar.

Dünyadaki nükleer güç üretim programları paralelinde, nükleer hammadde potansiyeli ve yakıt çevrimi konusundaki çalışmalar ve araştırmalar birçok ülkede sürdürülmektedir. Nükleer gücün uzun süreli enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi, yakıt olarak kullanılan uranyumun yeterince sağlanabilmesine bağlıdır.

Günümüzde uranyum madenciliğinin %90'ı 9 ülkede²² gerçekleştirilmektedir. Uranyum madenciliğinde işlenen cevherden kazanılan uranyumun yaklaşık 525 katı atık olarak elde kalır (Özden, 1983: 351). Cevher atığı nükleer yakıt çevriminin ilk atığıdır. Cevher atığı içinde bulunan radyoaktif maddelerin başında uranyum kalıntısı gelir. Maden

²² Avustralya, Kanada, Kazakistan, Namibya, Nijer, Rusya Federasyonu, Güney Afrika, ABD ve Özbekistan.

cevherinde bulunan uranyumun %5'i kalıntıya karışır. Ayrıca uranyumun uzun bozunum zincirinin herbiri radyoaktif olan bozunma ürünleri de atık içinde kalır. Bunlardan çevre sağlığı açısından en büyük tehlike yaratan ikisi radyum-226 ile radon-222'dir. Katı bir madde olan radyum rüzgar ve su erozyonu ile çevreye taşınır. Fakat gaz olan radon bu gibi dış etkenlere hiç gerek kalmadan kendiliğinden havaya karışır (Özden, 1983: 360). Yer altı madenciliğinde radon salımı; uranyum oksit (U_3O_8) üretiminin ağırlıklı ortalamasına göre 300 GBq/t'dur. 1 GW-yıl elektrik üretebilmek için 250 t uranyum oksit gerekirken olup bu ise yaklaşık 75 TBq/GW-yıl radon salımına sebep olmaktadır. Normal topraktan radon emisyon hızı 0,02 Bq/s.m² iken, işletilen uranyum madenlerinde bu oran 35 Bq/s.m², kapanmış madenlerde ise 1 Bq/s.m² mertebelerindedir (UNSCEAR, 2000a: 181).

Yavaşlatıcı ve soğutucu olarak hafif su kullanan reaktörler (LWR) ve ileri gaz soğutmalı grafit moderatörlü reaktörlerin (AGR) uranyum yakıtı, uranyum-235 açısından %2-%5 arasında zenginleştirilmiş olmalıdır²³. Yakıt zenginleştirme işlemlerinde genellikle uranyum serisi izotopların çevreye salımı söz konusudur. Bu işlemlerden kaynaklanan kolektif etkin doz 0,003 kişi-Sv/GW-yıl'dır. Yakıt çevriminin diğer salımları ile karşılaştırıldığında zenginleştirme tesislerinin salımları oldukça düşüktür. Nükleer yakıt çevriminin radyoaktif atık ve çevre kirliliği yönünden en büyük sorun yaratan aşaması ise kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesidir. Reaktörden çıkan yakıt tekrar işlenip değerlendirilmek üzere doğrandığında ve asit içinde çözüldüğünde o ana kadar içinde hapsolmuş bulunan bütün fisyon ürünleri serbest kalır. Bir taraftan aşırı radyoaktif fisyon ürünleri, diğer taraftan işlemler sırasında onların bulaştığı çeşitli malzemeler büyük bir radyoaktif atık sorununu ortaya çıkarır. Yeniden işleme kapalı bir sistem içinde yapılır. Böylece radyoaktif gazların rasgele atmosfere dağılmaları önlenir. Bunlar filtrelerden geçirilerek tutulurlar. Gazların beraberlerinde sürükledikleri

²³ Doğal uranyumun içindeki uranyum izotoplarının yüzdeleri; uranyum-234 %0,0056, uranyum-235 %0,71 ve uranyum-238 %99,2846'dır.

radioaktif sıvılar da filtrelerde, elektrostatik tutucularda veya soğurucularda yakalanıp alınırlar (Özden, 1983: 355).

Nükleer güç üretiminden ve yeniden işleme tesislerinden küresel olarak yayılan radyonüklidlerin aktiviteleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Küresel radyoaktif kirliliğe sebep olan bu uzun ömürlü radyoaktif izotoplardan karbon-14 sebebiyle yüklenen etkin doz 0,16 $\mu\text{Sv/yıl}$, kripton-85 için 0,1 $\mu\text{Sv/yıl}$ ve hidrojen-3 ve iyot-129 için 0,005 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır (UNSCEAR, 2000a: 189).

Çizelge 3.4. Reaktörler ve yeniden işleme tesislerinden küresel olarak yayılan radyonüklidlerin aktiviteleri (UNSCEAR, 2000a: 283)

Yıllar	Salım (TBq)				
	Hidrojen-3	$^3\text{H}(\text{denize})$	Karbon-14	Kripton-85	İyot-129
..-1970	2146	919	38	32060	0,11
1970-1974	6543	2809	116	97970	0,32
1975-1979	24200	8858	364	308900	1,01
1980-1984	44330	13640	523	424400	1,53
1985-1989	77960	23660	672	454000	1,79
1990-1994	98900	35390	650	823700	3,87
1995-1997	42830	40770	442	1102000	6,14
Toplam	296900	126000	2805	3243000	14,8

Nükleer yakıt çevriminin tüm değişik aşamalarında salınan radyonüklidlerden halkın alacağı kolektif etkin doz 0,9 kişi-Sv/GW-yıl'dır (UNSCEAR, 2000a: 190). Nükleer yakıt çevriminden yayılan radyonüklidler sebebiyle halkın aldığı etkin doz miktarları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Nükleer yakıt çevriminden çevreye salınan radyonüklidler sebebiyle alınan yıllık dozlar (IAEA, 2004: 48)

Salımın cinsi		En fazla ışınlanan kişiler (mSv)	Kolektif etkin doz (kişi-Sv)
Yakıt imalatı	Uçucu	0,01	350
	Sıvı	0,01	
Reaktör işletme	Uçucu	0,001	380
	Sıvı	0,004	
Yakıt yeniden işleme	Uçucu	0,05	4500
	Sıvı	0,14	

3.4. NÜKLEER KAZALAR

Nükleer güç reaktörleri gerek normal çalışma şartlarında ve gerekse kaza anında çevreye zarar vermeyecek şekilde tasarlanırlar. Ancak tasarıma esas olan kazaların dışında, meydana gelme olasılığı çok düşük olan ciddi kazalarda insan ve çevreye zararlı düzeyde radyoaktivite salımı olabilir. Kaza anında dış koruma binasından ve bacadan salınan aktivitenin yayılması o yerdeki iklim şartlarına ve topografik duruma bağlıdır. Bu kazalar yerel boyutta kalabileceği gibi, geniş bir çevreyi de etkileyebilmektedir (Arıkan, 1999).

Nükleer reaktörler tasarım özellikleri nedeniyle nükleer bomba gibi patlamazlar. Reaktör kazasında meydana gelen patlamalar, buhar basıncı ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan patlamalardır. Reaktörün soğutulamaması sonucu hasar görmüş yakıt elemanları içindeki fisyon ürünleri, bu gibi patlamalar sonucu çevreye yayılabilirler.

Teorik hesaplara göre nükleer kaza ihtimali uzak olmasına karşın, uygulamada nükleer güç, tarihi boyunca ciddi kazalar geçirmiştir (Ponting, 2000: 330). Nükleer tehlike durumları, uluslararası düzeyde Çizelge 3.6'da verildiği şekilde gruplandırılmıştır. Çizelgenin incelenmesinden de anlaşılacağı üzere; tehlike durumları olay ve kaza adı altında sınıflandırılmış, kazalar da kendi içerisinde 4 ayrı seviyeye ayrılmıştır. 5, 6 ve 7 seviyesindeki kazalarda çevre için risk sözkonusudur. Bu seviyelerde, bu güne kadar 3 büyük nükleer reaktör kazası ve bir nükleer tesis kazası meydana gelmiştir. Nükleer reaktör kazalarından birincisi 1957 yılında İngiltere'de "Windscale" reaktöründe, ikincisi 1979 yılında ABD'de "Three Mile Island" reaktöründe, üçüncüsü ise 1986 yılında Sovyetler Birliği'ndeki "Chernobyl" nükleer reaktöründe meydana gelen kazalardır. Nükleer tesis kazası ise, 1957 yılında Sovyetler Birliği'ndeki "Kyshtym" nükleer tesisinde meydana gelmiştir.

Çizelge 3.6. Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği (IAEA, 2001: 4)

SEVİYE	OLAYLARIN ÖZELLİKLERİ	ÖRNEK
7 BÜYÜK KAZA	Büyük bir tesisteki radyoaktif maddelerin büyük bir oranının çevreye salımı. Bu salım tipik olarak kısa ve uzun yarı ömürlü radyoaktif fisyon ürünleri karışımını içerir (radyolojik olarak on binlerce TBq'den fazla iyot-131 salınmasına eşdeğer). Böyle bir salım akut sağlık etkileri ihtimaline, muhtemelen birden fazla ülkede geniş alanlarda gecikmiş sağlık etkilerine ve uzun dönemli çevresel sorunlara yol açar.	Çernobil Nükleer Güç Reaktörü, 1986, Ukrayna
6 CİDDİ KAZA	Radyoaktif maddelerin çevreye salımı (radyolojik olarak binlerce TBq'den on binlerce TBq'e kadar iyot-131 salınmasına eşdeğer). Böyle bir salım muhtemelen, ciddi sağlık etkilerini sınırlandırmak için, yerel tehlike durum planlarındaki önlemlerin tamamen uygulanmasını gerektirir.	Kyshtym Yeniden İşleme Tesisi, 1957, Rusya Federasyonu
5 ÇEVRE İÇİN RİSK TAŞIYAN KAZA	Radyoaktif maddelerin çevreye salımı (radyolojik olarak yüzlerce TBq'den binlerce TBq'e kadar iyot-131 salımına eşdeğer). Böyle bir salım muhtemelen, sağlık etkileri olasılığını azaltmak için, tehlike durumu planlarındaki önlemlerin kısmen uygulanmasını gerektirir. Böyle kazalar, tesis içinde büyük miktarlarda radyoaktivite salımına yol açan bir güç reaktörünün korunum büyük bir oranının ciddi şekilde hasar görmesini, büyük bir kritiklik kazasını veya büyük bir yangın veya patlamayı kapsayabilir.	Windscale Nükleer Reaktörü, 1957, İngiltere Three Mile Island Nükleer Güç Reaktörü, 1979, ABD
4 ÇEVRE İÇİN RİSK TAŞIMAYAN KAZA	Kritik grubun birkaç mSv (bütün vücut dozu) seviyesinde doz almasıyla sonuçlanacak miktarda radyoaktif maddenin çevreye salımı, tesiste önemli hasar, çalışanlardan birinin veya daha fazlasının, erken ölüm vakaları olasılığının yüksek olduğu doz seviyeleriyle sonuçlanacak derecede radyasyona maruz kalması. Böyle bir kaza bir güç reaktöründe kısmi kor erimesi ve diğer tesislerdeki benzer olaylar gibi saha-içi büyük olaylara yol açan hasarları içerebilir ve büyük ihtimalle yerel gıda kontrolünden başka bir saha-dışı koruyucu önlem gerektirmez.	Windscale Yeniden İşleme Tesisi, 1973, İngiltere Saint Laurent Nükleer Güç Reaktörü, 1980, Fransa
3 CİDDİ OLAY	Kritik grubun mSv'in onda biri seviyelerinde doz almasıyla sonuçlanacak miktarda radyoaktif maddenin çevreye salımı, çalışanlarda akut sağlık etkilerine yol açan saha-içi olaylar ve/veya ciddi bir bulaşmaya yol açan bir olay, güvenlik sistemlerindeki hatanın ilerlemesinin bir kaza koşullarına yol açabileceği olaylar.	Vandellós Nükleer Güç Reaktörü, 1989, İspanya
2 OLAY	Güvenlik provizyonlarında önemli arızaların olduğu, fakat ilave arızalarla başa çıkabilmeye yeterli derinliğine savunma önlemlerinin bulunduğu olaylar, bir çalışanın yasal yıllık doz sınırlarının üstünde doz almasına yol açan bir olay ve/veya tesiste radyoaktivite bulunması, tasarımda beklenmeyen alanlarda önemli miktarlarda radyoaktivite bulunmasına yol açan ve düzeltici müdahale gerektiren bir olay.	
1 ANOMALİ	İzin verilen rejimin ötesinde fakat önemli derecede derinliğine savunma önlemlerinin mevcut olduğu anomaliler. Bunlar bir ekipman arızası, insan hatası veya prosedürel aksaklıklar nedeniyle santral işletmesi, radyoaktif madde taşınması, yakıt işlemleri ve atık depolama gibi alanlardan meydana gelebilir.	

3.4.1. Önemli Nükleer Reaktör Kazaları

İlk önemli nükleer reaktör kazası; 1957 yılında İskoçya'da meydana gelen, gaz soğutmalı (GCR), plütonyum üretimine dönük bir reaktör olan Windscale Nükleer Reaktörü kazasıdır. Kazada kalbin büyük bir kısmı eriyerek çevreye 0,74 PBq iyot-131, 0,022 PBq sezyum-137, 0,003 PBq rutenyum-106, 1,2 PBq ksenon-133 ve 0,0088 PBq polonyum-210 salınmıştır (Bennett, 2000). Radyoaktif bulut Danimarka'ya kadar uzanmış, Windscale'den 500 km uzakta olan Londra'da, radyoaktivite seviyesi normalin yaklaşık 20 katına çıkmıştır. Windscale reaktörü ticari ve elektrik üreten bir reaktör olmayıp, İngiltere'nin nükleer silah üretimi planı çerçevesinde çalıştırılan askeri amaçlı bir reaktördür (FMO, 2006: 143).

İkinci büyük nükleer reaktör kazası 1979 yılında ABD'de Chicago yakınlarında kurulu, basınçlı hafif su reaktörü (PWR) olan Three Miles Island (TMI) Nükleer Reaktörü kazasıdır. Bu kaza, basınç rahatlatma vanasının arızalanması ve yakıtın bir bölümünün soğutulamaması sonucu meydana gelmiş ciddi bir kazadır. Soğutma yetersizliği sonucu reaktör kalbinin neredeyse yarısı erimiştir. Serbest kalan radyoaktif malzeme, korunak binası içinde tutulmuş, çevreye kontrollü olarak (370 PBq asal gazlar, 550 GBq iyot-131) radyasyon salınmıştır. TMI santralının 80 km civarındaki kişisel dozun ortalama 15 μ Sv, halkın aldığı en fazla dış gama dozunun 850 μ Sv, 80 km'lik alan içinde radyoaktif salımdan kaynaklanan kolektif etkin dozun ise 20 kişi-Sv olduğu tahmin edilmektedir (FMO, 2006: 142).

Tarihin en büyük nükleer reaktör kazası ise 26 Nisan 1986 günü Ukrayna'da Kiev Kenti'nin 130 km uzağındaki Çernobil Nükleer Güç Santralının²⁴ 4. ünitesinde meydana gelen kazadır.

²⁴ Çernobil Nükleer Reaktörü hafif su soğutmalı, grafit moderatörlü bir reaktördür ve koruma kabı binası bulunmamaktadır.

Kaza, reaktörün programlanmış olan durdurulmasından önce yapılan bir test sırasında meydana gelmiştir. Kazadan sonra yapılan soruşturmalar, kazanın, reaktör tasarımındaki hatalar ile güvenlik sistemlerinin devreden çıkarılması, işletme kurallarının hiçe sayılması ve reaktörün kararsız bir duruma getirilmesi gibi bir dizi insan hatası sonucu meydana geldiğini göstermiştir. Reaktörde hızlı bir güç yükselmesini izleyen buhar patlaması, reaktörü ve reaktör binasını tahrip etmiş ve reaktörün üst kapağını yerinden fırlatmıştır. Birkaç saniye sonra meydana gelen ikinci bir patlama ile üstü açık kalan reaktörün kızgın parçaları büyük bir hızla dışarı fırlamıştır. Patlamalar sonucu reaktördeki grafitler tutuşmuş ve reaktör binasının birkaç yerinde birden yangın çıkmıştır. Bu yangınlar, komşu kasabalardan gelen itfaiye ekipleri tarafından 3,5 saat sonra söndürülmüş ise de reaktörden büyük miktarda fisyon ürünleri çevreye salınmıştır. Atmosfere radyoaktif maddelerin salımı 10 gün boyunca devam etmiştir. Reaktör kalbi envanterindeki radyoaktif asal gazların %100'ünün, diğer radyoaktif maddelerin ise %3-4 kadarının (yaklaşık 2×10^{18} Bq) atmosfere salındığı tahmin edilmektedir. Atmosfere salınan bu radyoaktif gaz ve maddeler, yüksek sıcaklıkları nedeniyle hızla yükselerek 1000-1500 metre yüksekliğe ulaşmış ve radyoaktif bulutlar oluşturmuştur. Bu radyoaktif bulutlar, meteorolojik koşullara göre hareket ederek Avrupa üzerinde yayılmaya başlamış ve sadece Avrupa'yı değil, hemen hemen, tüm kuzey yarımküreyi etkilemiştir. Kazaya uğrayan Çernobil reaktöründen havaya salınan radyonüklidler içinde en önemlileri iyot-131, sezyum-134 ve sezyum-137 ise de radyoaktif buluttan etkilenen ülkelerde hava partiküllerinde veya radyoaktif yağışlarda daha birçok radyonüklid tespit edilmiş olup, bunlar arasında oldukça yüksek miktarlarda bulunan rutenyum-103, rutenyum-106, lantan-140, baryum-140, tellür-132, niyobyum-95, zirkonyum-95, seryum-141 ve seryum-144 radyonüklidleri sayılabilir (TAEK, 1988: 1). Çernobil kazası sırasında açığa çıkan radyoaktif maddeler ve aktiviteleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Çernobil kazası sırasında açığa çıkan radyoaktif maddeler ve aktiviteleri (OECD, 2002: 35)

Çekirdek	Yarı ömür	Kalp envanteri 26.4.1986 (PBq)	Kaza sırasında toplam salım	
			Envanter yüzdesi	Aktivite (PBq)
Ksenon-133	5,3 gün	6500	100	6500
İyot-131	8 gün	3200	50-60	~1760
Sezyum-134	2 yıl	180	20-40	~54
Sezyum-137	30 yıl	280	20-40	~85
Tellür-132	78 saat	2700	25-60	~1150
Stronsiyum-89	52 gün	2300	4-6	~115
Stronsiyum-90	28 yıl	200	4-6	~10
Baryum-140	12,8 gün	4800	4-6	~240
Zirkonyum-95	65 gün	5600	3,5	196
Molibden-99	67 saat	4800	>3,5	>168
Rutenyum-103	39.6 gün	4800	>3,5	>168
Rutenyum-106	1 yıl	2100	>3,5	>73
Seryum-141	33 gün	5600	3,5	196
Seryum-144	285 gün	3300	3,5	~116
Neptünyum-239	2,4 gün	27000	3,5	~95
Plütonyum-238	86 yıl	1	3,5	0,035
Plütonyum-239	24400 yıl	0,85	3,5	0,03
Plütonyum-240	6580 yıl	1,2	3,5	0,042
Plütonyum-241	13,2 yıl	170	3,5	~6
Küriyum-242	163 gün	26	3,5	~0,9

Çernobil kazası insanların bir ticari güç santralında radyasyon nedeniyle öldükleri ilk kazadır. Kaza sırasında reaktörde radyasyona maruz kalan 237 kişinin 134'ünde akut radyasyon hastalığı tespit edilmiştir. Bunlardan 28'i kaza sonrasındaki ilk üç ayda, diğer 14'ü de takip eden yıllarda hayatlarını kaybetmişlerdir. Santralin temizlenmesinde çalışan 200.000 kişi 100 mSv mertebesinde ortalama tüm vücut dozu almışlardır. Çernobil Nükleer Reaktörü kazasında çevredeki halk için ortalama tüm vücut dozu 15 mSv olmuştur. Kaza bölgesinden 30 km'lik bir yarıçap içerisinde yaklaşık 135.000 kişi kazadan sonraki birkaç hafta içerisinde bölgeden tahliye edilmişlerdir. Bu kişilerin yaklaşık %10'u 50 mSv, %5'i ise 100 mSv'den fazla doz almışlardır (FMO, 2000: 83-85).

Patlamadan doğrudan etkilenen alanda 220 köy terk edilmek zorunda kalmış, 600 kasaba ve köy temizlenmiş, 10.000 km²'den büyük bir alanın insan yerleşimleri açısından son derece tehlikeli olduğu açıklanmıştır. Sovyetler Birliği'ndeki en az 100.000 insanın sağlığı bu felaketten ciddi biçimde etkilenmiştir (Ponting, 2000: 330).

Çernobil kazası nedeni ile ölen veya gelecekte ölmesi beklenen insan sayısının abartılmış yaklaşım ve rakamlar ile 4000 civarında olacağı tahmin edilmektedir (TAEK, 2006: 49).

3.4.2. Önemli Radyolojik Kazalar

Nükleer teknoloji ve teknikler ile radyasyon uygulamalarının 100 yıllık geçmişi boyunca pek çok radyolojik kaza ve olay meydana gelmiştir. Bu kaza ve olaylarda genellikle yerel düzeyde etkilenme söz konusu olmuş ve etkilenen insan sayısı da o yer ile sınırlı kalmıştır. Tıpta ve endüstride kullanılan radyoaktif kaynakların sebep olduğu kazalarda kolektif dozlar yüksek olmamasına karşın bazen kişiler ölümcül olabilecek kadar yüksek dozlar almışlardır. Bu tür kazalar içerisinde en önemlisi 1987 yılında Goiania-Brezilya'da meydana gelen kazadır. Kazada terkedilmiş bir radyoterapi merkezinde unutulmuş sezyum kaynağı, meraklı bazı kişiler tarafından parçalanarak tüm yerleşim bölgesine radyoaktivite bulaştırılmıştır.

Küresel/bölgesel düzeyde kirliliğe yol açan önemli bazı kazalar ise aşağıda özetlenmiştir.

- 29 Eylül 1957 tarihinde, Sovyetler Birliğinde güneydoğu Urallarda, Kyshtym kasabası yakınlarında Mayak nükleer malzeme üretim tesislerinde büyük bir kaza meydana gelmiştir. Tesisten çıkan yüksek aktiviteli nükleer atıkların depolama tankının soğutma sistemindeki bir arıza sonucunda kimyasal bir patlama olmuş ve radyoaktif bulaşma yaklaşık 23.000 km²'lik alanda yaşayan

270.000 kişiyi etkilemiştir. Tahliye edilen 10.000 kişinin almış olduğu kolektif doz 1300 kişi-Sv'dir. Görece daha az kirlenmiş bölgede kalan ve tahliye edilmeyen 260.000 kişinin almış olduğu kolektif doz ise 1200 kişi-Sv'dir (UNSCEAR, 1993: 116). Kazada çevreye 49 PBq seryum-144, 19 PBq zirkonyum-95 ve niyobyum-95, 4 PBq stronsiyum-90, 2,7 PBq rutenyum-106 ve 0,027 PBq sezyum-137 salınmıştır (Bennett, 2000).

- 1964 yılında güç kaynağı olarak, plütonyum-238 radyonüklidi içeren radyotermal jeneratör kullanan SNAP-9A uydusu atmosfere girerek yanmış, yaklaşık 600 TBq radyonüklid stratosfere karışmıştır. Olay güney yarımkürede gerçekleşmiştir. Alınan dozlar güney yarımkürede 1,2 nSv, kuzey yarımkürede 0,3 nSv ve tüm dünya için nüfus ağırlıklı doz 0,4 nSv'dir²⁵. Benzer olaylar devam etmiş 1968 yılında Kaliforniya kıyılarına, 1970 yılında Pasifik Okyanusuna plütonyum ihtiva eden uydular düşmüştür. 1978 yılında Cosmos-954 isimli uydu atmosfere girmiş, kısmen yanmış ve parçalanarak Kanada'nın kuzeybatısına düşmüştür. Uydu, yakıt olarak 20 kg zenginleştirilmiş uranyum ihtiva etmektedir. Bu kazada çevreye salınan radyonüklidlerin %75'i atmosferde, %25'i ise karada dağılmıştır (UNSCEAR, 1993: 116).
- 1966 yılında Palomares-İspanya'da ve 1968 yılında Thule-Grönland'da nükleer silah yüklü iki uçak düşmüştür. Her iki kazada da yerel çevre, plütonyum-239 ve plütonyum-240 radyoizotopları ile bulaşmıştır (Bennett, 2000).

²⁵ Dünya nüfusunun %89'u kuzey yarımkürede yaşamaktadır.

3.5. RADYOİZOTOP ÜRETİMİ VE KULLANIMI

Radyoizotoplar endüstri, tıp, tarım, arkeoloji ve araştırmada yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu radyonüklidlerin üretiminde, kullanımında ve bertarafında çevreye radyoaktif madde salımı söz konusudur. Ancak, askeri tesisler dışında bu salımlar küresel kolektif doza çok az katkı yapmaktadır.

Radyoizotop üretimi ve kullanımı sonucu çevreye salınan hidrojen-3, karbon-14, iyot-125, iyot-131 ve ksenon-133 gibi radyonüklidler sebebiyle alınan yıllık kolektif etkin doz yaklaşık 100 kişi-Sv'dir. Tıp, eğitim ve endüstri uygulamalarında kullanılan açık radyoaktif kaynakların yıllık üretim miktarları ve sebep oldukları dozlar Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Tıp, eğitim ve endüstri uygulamalarında kullanılan açık radyoaktif kaynaklar ve dozlar (UNSCEAR, 1993: 201)

Radyonüklid	Yıllık normalize üretim (GBq/10⁶ kişi)	Yıllık küresel salım (PBq)	Yıllık kolektif etkin doz (kişi-Sv)
Hidrojen-3	80	0,13	1,4
Karbon-14	30	0,05	86
Kripton-85	10	0,02	0,004
İyot-123	400	0,7	0,01
İyot-125	40	0,06	7
İyot-131	200	0,3	9
Ksenon-133	1600	2,6	0,4
Toplam			100

Çevreye verilen yapay radyonüklidler sebepli maksimum yıllık etkin doz 0,14 mSv/yıl ve küresel nüfus üzerinden ortalama yıllık etkin doz ise **0,001 mSv/yıl**'dır (IAEA, 2004: 50).

3.6. RADYOAKTİF ATIKLAR

Tekrar kullanılması düşünülmeyen radyoaktif maddeler ile kullanılmış radyoaktif maddelerden yan ürün olarak çıkan ve yeniden kullanma olanağı bulunmayan eşya, araç ve diğer maddeler radyoaktif atık olarak adlandırılır.

Radyoaktif atıklar, fiziksel özelliklerine göre; katı, sıvı veya gaz atıklar olarak sınıflandırılır. Bundan başka içerdiği konsantrasyona göre; düşük, orta ve yüksek seviyeli atıklar olarak da gruplanmaktadır. Diğer bir sınıflandırma, yarı ömürlerine göre yapılmaktadır. Buna göre; radyoaktif atıklar, uzun veya kısa ömürlü atıklar olarak ikiye ayrılır. Bu atıklar, yaydıkları radyasyon tipine göre de; alfa, beta, gama veya nötron yayıcı atık olarak sınıflandırılmaktadır. Radyoaktif atık yönetimi, bu çeşit atıkların işlenmesi, taşınması, depolanması ve gömülmesinde kullanılan teknik ve idari işlemlerin tamamını kapsamaktadır (TÇV, 2001: 296).

Radyoaktif atık yönetiminde genel prensip; radyoaktif atıkların insanlığa ve doğaya zarar vermeyecek şekilde işlenmesi, taşınması, depolanması ve zararsız hale getirilmesidir.

Radyoaktif atıklardan kaynaklanan risk, kısa ömürlü düşük seviyeli atıklar için çok düşük olmakla birlikte, yüksek seviyeli atıklar için çok yüksek olabilir. Her yıl, nükleer güç üretimi, yaklaşık 200.000 m³ düşük ve orta seviyeli ve 10.000 m³ yüksek seviyeli, kullanılmış nükleer yakıt ve yakıt atığı ortaya çıkarmaktadır. Yeni nükleer güç santralleri devreye girer ve bazıları kapatılırken, radyoaktif atıkların miktarı artmaya devam etmektedir. Radyoaktif maddelerin tıpta, sanayide ve araştırma çalışmalarında kullanılması sonucu da az miktarda atık ortaya çıkmaktadır. Bu, her ülkede yılda bir kaç metreküp veya daha az seviyede olmaktadır (Keating, 1993: 88).

3.6.1. Düşük ve Orta Seviyeli Atıklar

Düşük seviyeli atık, ısı yoğunluğu 2 kW/m^3 'ün altında olan, zırlama gerektirmeyen ve genellikle yüzeye yakın (yerin birkaç metre altında) depolama yapılan atıklardır. Bu tip atıklar nükleer tesislerde ve radyoizotopların tıp, endüstri ve araştırma alanlarında kullanılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Düşük seviyeli atıklar, kısa yarı ömürlü ve genellikle kağıt, filtre, bulaşmış giysi gibi atıklardır. Dünyadaki radyoaktif atıkların hacim olarak %90'ı, radyoaktivite olarak da %1'i bu tip atıklardan kaynaklanmaktadır (FMO, 2006: 147).

Orta seviyeli atık, ısı yoğunluğu 2 kW/m^3 'ün altında olan, zırlama gerektiren ve genellikle yüzeye yakın depolama yapılan atıklardır. Bu tip atıklar büyük oranda nükleer enerji üretim tesislerinin işletimi sırasında ortaya çıkmaktadır ve genellikle, reçine, kimyasallar, reaktör bileşenleri gibi malzemelerdir ve işlenerek güvenli bir şekilde kontrol altında depolanırlar. Dünyadaki toplam radyoaktif atıkların yaklaşık %7'si, toplam radyoaktivitenin ise %4'ü bu tip atıklardan kaynaklanmaktadır (FMO, 2006: 147).

Düşük ve orta seviyeli atıklar katı, sıvı ya da gaz formunda bulunabilirler. Gaz atıkların tutulması için filtreler, soğurucu maddeler (genellikle odun kömürü) kullanılır. Sıvı atıklar ise filtreleme, iyon değişimi, buharlaştırma, kimyasal çöktürme gibi yöntemler kullanılarak radyoaktif madde konsantrasyonu fazla ancak hacmi daha az hale getirilir. Hacmi azaltılmış olan radyoaktif atıklar variller içinde çimento veya asfaltla karıştırılıp sabitleştirilir ve bu şekilde depolanır. Katı atıklar için de çeşitli hacim azaltma yöntemleri mevcuttur. Atığın içinde organik maddeler yoksa yakılarak hacmi azaltılır. Bir diğer hacim azaltma yolu, katı atıkların sıkıştırılarak balyalanmasıdır. Hacmi azalan atık, çimentoyla veya asfaltla karıştırılarak sabit hale getirilir ve daha sonra, korozyona karşı dirençli, taşınması kolay, radyoaktif bulaşma riski düşük olan paketler içinde

depolanır. Depolama yeraltında, yerüstünde, havalandırılmalı veya zırlı tesislerde gerektiğinde atığın başka bir yere taşınabilmesine imkan verecek şekilde gerçekleştirilir (FMO, 2006: 147).

3.6.2. Yüksek Seviyeli Atıklar

Yüksek seviyeli atık, ısı yoğunluğu 2 kW/m^3 'ün üzerinde olan, taşınması, bekletilmesi, depolanması süreçlerinde radyasyon zırlaması gerektiren atıklardır. Bu tip atıklar kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi sürecinde uranyumun ve plütonyumun kazanılmasından sonra geriye kalan atıklardan ve tekrar kullanılması düşünülmeyen kullanılmış yakıtlardan oluşmaktadır. Dünyadaki toplam atık hacminin %3'ü, aktivitenin ise %95'i yüksek seviyeli atıklara aittir (FMO, 2006: 148).

Yüksek seviyeli sıvı atıklar, buharlaştırma/kavurma gibi işlemlerle hacmi azaltıldıktan sonra bor asiti ve silis asiti gibi katkı maddeleriyle eritilerek camlaştırılır. Elde edilen bor silikat camı ısıya, kimyasal reaksiyonlara, aşınmaya, radyasyona, mekanik gerilmelere dayanıklı sağlam bir maddedir. Camlaştırılmış yüksek seviyeli sıvı atıklar korozyona dayanıklı 4-5 m yüksekliğindeki, özel kaplar içinde su havuzlarında veya havalandırılmalı depolarda sürekli kontrol altında depolanır. Uygun atık işleme teknikleri ile işlenerek güvenliği sağlanan katı ve sıvı yüksek seviyeli radyoaktif atıkların son depolanma süreci sonsuz kabul edilebilecek bir süre gerektirdiğinden bu konu ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir. Bunlar içinde uygun ve mümkün görülen son depolama şekli; yerkabuğunun derinliklerinde (500-1500 m) tuz oluşumları içinde açılmış galeriler, kristal kayalar, sediment kayalar içine gömme işlemleridir (FMO, 2006: 149).

3.7. YAPAY ÇEVRESEL KAYNAKLARDAN KÜRESEL IŞINLANMA

Atmosferde ve yeraltında gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri, nükleer silah üretimi, nükleer güç üretimi, nükleer yakıt çevrimi, radyoizotop üretimi ve kullanımı ile nükleer ve radyolojik kazalar gibi insan aktiviteleri sonucunda çevreye salınan radyonüklidler sebebiyle alınan küresel kolektif etkin dozun kaynaklara göre dağılımı Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Radyonüklid salımlarından kaynaklanan kolektif etkin dozlar (Bennett, 2000)

Kaynak	Ana radyonüklidler	Kolektif etkin doz (kişi-Sv)
Atmosferik nükleer denemeler	^{14}C , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{95}Zr	30.000.000
Çernobil kazası	^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I	600.000
Nükleer güç üretimi	^{14}C , ^{222}Rn	400.000
Radyoizotop üretimi, kullanımı	^{14}C	80.000
Nükleer silah üretimi	^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{95}Zr	60.000
Kyshtym kazası	^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{90}Sr	2500
Uydu düşmesi	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{137}Cs	2100
Windscale kazası	^{131}I , ^{210}Po , ^{137}Cs	2000
Diğer kazalar	^{137}Cs , ^{133}Xe , ^{60}Co , ^{192}Ir	300
Yeraltı nükleer denemeleri	^{131}I	200

Işınlanma, yaşanan bölgenin nükleer tesislere veya nükleer uygulama alanlarına uzaklığı ile değişiklik göstermekte, çevreye salınan radyonüklidlerden kaynaklanan yapay radyasyon sebepli yıllık doz yerel ve bölgesel olarak çok yüksek değerlere çıkabilmektedir. Bununla birlikte, Çizelge 3.10'da gösterildiği gibi tüm dünyada küresel ortalama yıllık etkin doz yaklaşık **7 $\mu\text{Sv/yıl}$** 'dir.

Çizelge 3.10. Yapay çevresel radyasyon kaynaklarından tüm dünya ortalama yıllık radyasyon dozları (UNSCEAR, 2000a:8).

Işınlama kaynağı	Kişi başına yıllık etkin doz (mSv/yıl)	
	Ortalama	Tipik Dağılım
Nükleer denemeler	0,005	1963 yılındaki en yüksek 0,15 mSv/yıl değerinden azalmaktadır. Kuzey yarımkürede yüksek, güney yarımkürede daha düşüktür.
Çernobil kazası	0,002	1986 yılındaki kuzey yarımküre ortalaması olan en yüksek 0,04 mSv/yıl değerinden azalmaktadır. Kaza mahalline yaklaştıkça doz artmaktadır.
Nükleer güç üretimi	0,0002	Nükleer programın genişlemesiyle artmaktadır.
Toplam ışıınlanma	0,007	

4. ÇEVRESEL RADYASYON VE CANLILIK

Doğal ve yapay radyonüklidler, atmosferik, karasal ve sucul ortamlardaki radyasyonun kaynağını oluşturmakta ve bu çevresel ortamlardaki radyoaktivite konsantrasyonları da insan faaliyetleri sonucunda yerel ve bölgesel olarak hızla artmaktadır.

Doğal olarak çevremizde bulunan veya insan aktiviteleri sonucu çevreye verilen radyonüklidler hava, su ve toprakta hareket halindedir. Radyonüklidler rüzgarlarla bir bölgeden başka bir bölgeye hareket edebilmekte, kuru serpinti veya yağmurla toprağa ve suya karışabilmektedir. Akarsularla göllere, denizlere taşınabilmekte, sulama ile tekrar toprağa karışmakta, yeraltı suları ile aküfere inebilmekte, su ve topraktan canlılara geçerek biyobirikime sebep olabilmektedir.

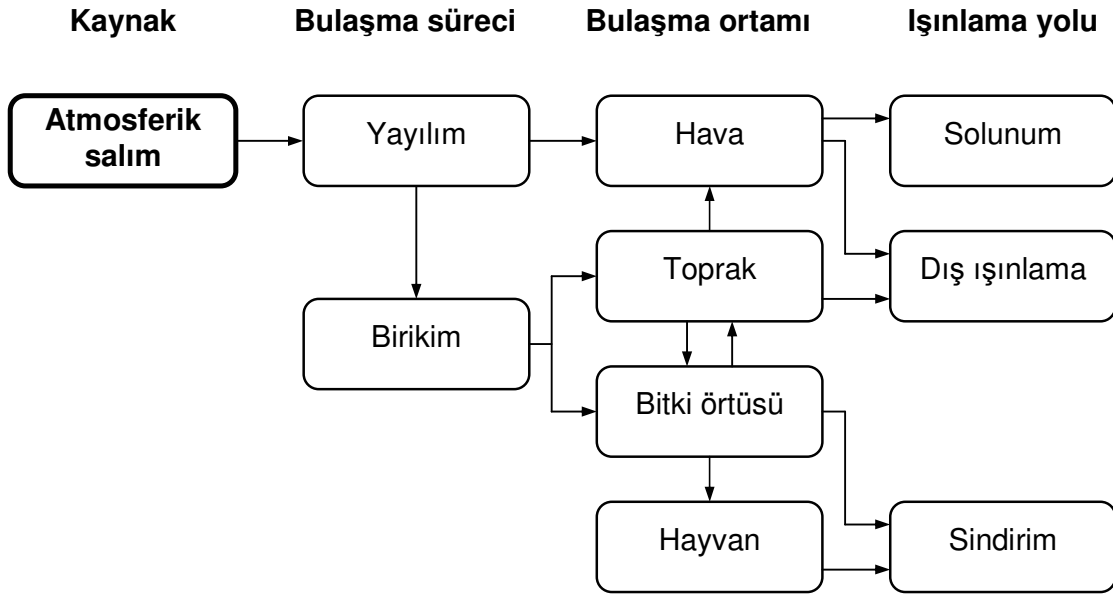
Canlıların, ekosferde çeşitli şekilde dağılan radyonüklidlerden radyasyona maruz kalma yolları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Till and Meyer, 1983);

- Atmosferdeki gaz ve aerosol haldeki radyonüklidlerden dış ışınlama,
- Radyonüklidlerin solunum yoluyla vücuda alınması sonucu iç ışınlama,
- Toprakta var olan radyonüklidlerden ve kuru serpinti veya yağış yoluyla yerde biriken radyonüklidlerden dış ışınlama,
- Topraktaki radyonüklidlerin havaya karışması sonucu dış ışınlama ve solunum yoluyla vücuda alınması sonucu iç ışınlama,
- Gıda maddeleri ve su ile vücuda alınmış radyonüklidlerden iç ışınlama,
- Vücut üzerinde biriken radyonüklidlerden dış ışınlama,
- Sudaki ve sedimentteki radyonüklidlerden dış ışınlama.

4.1. RADYONÜKLİDLERİN EKOSFERDE DAVRANIŞI

Radyonüklidlerin salındığı çevresel ortamdaki davranışını iki sınıfta incelemek mümkündür. Bunlar; atmosferik ve sucul ortamlardır.

Atmosfere gerek kontrollü ve gerekse kontrolsüz olarak salınan radyonüklidler atmosferde dağılmakta, seyrelmekte ve toprağa, bitkilere, hayvanlara ve insana kadar ulaşabilmektedir. Atmosfere salınan radyonüklidlerin yayılımı, birikimi ve canlıları ışınlama algoritması Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. Radyonüklidlerin atmosferik salımı, dağılımı ve ışınlama yolları
(IAEA, 1982: 4)

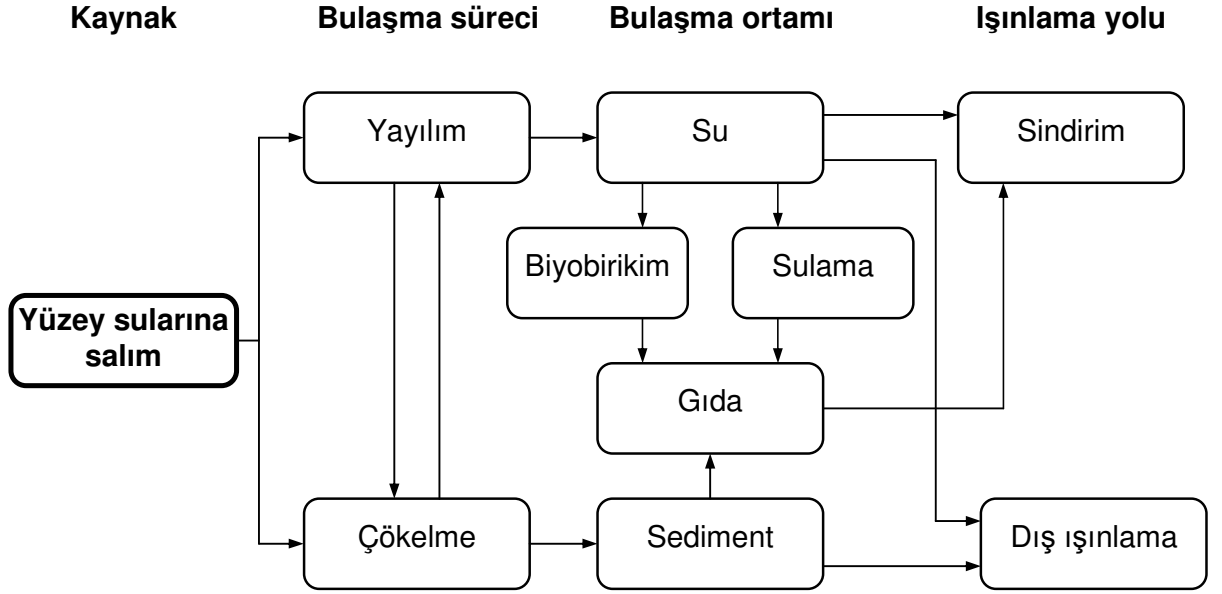
Şekilde görüldüğü üzere birikime uğrayan radyonüklidler ya bitkilerin dış yüzeyinde tutunmakta ya da doğrudan toprağa geçmektedir. Meteorolojik şartlara göre kuru veya yaş serpinti ile bitkilerin yapraklarına tutunan radyonüklidlerin bir kısmı soğurularak bitkinin içinde depolanmaktadır. Soğurulan radyonüklidlerin bir kısmının, bitkinin köküne kadar indiği saptanmıştır. Ayrıca, toprakta biriken radyonüklidler de bitkinin kökleri

vasıtasıyla topraktan alınabilmektedir. Radyonüklidin türü ve kimyasal formu, meteorolojik şartlar, toprağın kimyasal özellikleri ve bitkinin türü gibi parametreler bu transferlerde rol oynamaktadır.

Radyonüklidler hayvanların vücutlarına sindirim ve solunum yolu ile girmektedir. Hayvanlarda sindirim yolu ile ışınlamanın solunum yoluna göre çok daha fazla olduğu bilinmektedir. Radyonüklidin hayvanlara geçişinin bir diğer yolu da, otlama sırasında istemiyerek de olsa toprağın da yenmesidir. Yapılan araştırmalarda istenmeden tüketilen toprak miktarının sığırlar için %4 ve koyunlar için ise %20 olduğu saptanmıştır.

Çevreye salınan yapay radyonüklidler toprak kirlenmesinin de kaynaklarından birisini oluşturmaktadır. Bu radyonüklidlerden; stronsiyum-90, toprakta kalsiyuma benzer şekilde davranışlar göstermektedir. Bu radyoaktif madde atmosferden toprağa çözünebilir formlarda ulaşmakta ve toprak tarafından soğurularak, kalsiyum gibi, bitkiler tarafından alınabilir durumda bulunmaktadır. Sezyum-137 ise kimyasal bakımdan potasyuma benzemekte olup, birçok toprak çeşidinde, toprakta sabitlenip daha az alınabilir durumda olmaya eğilimlidir. Dolayısıyla sezyum-137'nin bitkilerce topraktan alınışı oldukça kısıtlıdır (Haktanır ve Arcak, 1998: 272).

Radyoaktif maddeler yüzey sularına; suya salımın yanında, kuru ve yaş serpinti şeklinde havadan da gelmekte, ayrıca akarsular yoluyla da denizlere taşınmaktadır. Diğer taraftan Çernobil kazasında olduğu gibi, denizlerin kirlenmesinde radyoaktif maddelerle bulaşmış toprakların erozyonla taşınmasının da etkili olduğu bilinmektedir. Radyonüklidlerin yüzey sularında dağılımı ve ışınlama yolları Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Radyonüklidlerin yüzey sularında dağılımı ve işinlama yolları
(IAEA, 1982: 6)

Radyonüklidler, su ortamında eriyik veya asılı olarak kalmakta, daha sonra ise dibe çökelmekte veya organizmalar tarafından alınmaktadır. Akıntılar, çalkantılar, biyolojik taşıma gibi faktörler suya girmiş olan radyonüklidlerin yayılımına neden olurken, diğer faktörler onların organizmalarda birikimine ya da çökerek sediment parçacıklarında konsantre olmalarını sağlamaktadır.

Deniz ortamında, biyojenik veya litojenik orijinli suda asılı partiküler materyaller radyonüklidleri dibe çöktürürler. Ancak, diğer radyonüklidlerden farklılık gösteren sezyum-137 ve stronsiyum-90 radyonüklidleri deniz ortamında çökelmekten çok, en fazla suda bulunurlar. Bu nedenle, bu radyonüklidleri uzun yıllar boyunca deniz suyunda tayin etmek olasıdır (Topçuoğlu, 2005).

Transuranik elementler denizde son derece toksik etkileri nedeniyle önemli kirleticilerden sayılmaktadır. Deniz ortamına giren transuranik

radyonüklidler hem suda asılı olarak kalabilmekte ve hem de biyota ve sedimentte birikebilmektedirler. Organizmaların dokularında da bulunabilen bu radyonüklidler daha çok sedimentasyona uğrayan biyolojik orijinli materyaller ile deniz dibine çökelmektedirler. İngiltere'nin, Sellafield yakıt yeniden işleme tesislerinin etkilediği deniz ortamından tutulan dil balıklarının etinde 0,007 Bq/g plütonyum-239 ve 0,015 Bq/g amerikyum-241 bulunmuştur (Topçuoğlu, 2005).

4.2. BİYOTANIN MARUZ KALDIĞI RADYASYON

Çevre radyoaktivitesinin organizma toplulukları üzerindeki etkileri, radyoekolojik açıdan bireyler üzerindeki etkilerinden daha önemlidir. Radyasyonun oluşturacağı etkinin olumsuz çevresel şartlarla birleşmesi popülasyon üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Eğer radyasyonun etkisi ışınlanan popülasyonun bireylerinde somatik değişikliklere neden olursa ve popülasyonda bu somatik değişikliğe uğrayan birey sayısı çoksa, popülasyon anlamlı olarak küçülür. Sonuç olarak, genetik etkide popülasyonun neslinin ortadan kalkması, somatik etkide popülasyonun küçülmesi söz konusudur (Topçuoğlu, 2005).

Normal doğal radyasyon alanlarında; karasal bitkilerin maruz kaldığı soğurulmuş doz miktarı 0,07-0,8 µGy/saat (0,6-7 mGy/yıl)'dir. Kaynaklarına göre toplam dozun dağılımı Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu doz en çok bitkilerin topraktan almış oldukları su içerisindeki çözünmüş radon gazından kaynaklanmaktadır.

Karasal hayvanlar içerisinde en yüksek radyasyona maruz kalanlar yeraltında yuva yapan, çukurlarda/oyuklarda yaşayan hayvanlar olup maruz kaldıkları radon sebepli akciğer dozu 0,25 µGy/saat ve radon bozunma ürünleri sebepli doz ise 0,09 µGy/saat'tir. Uranyum ve toryum minerallerinin

bol bulunduğu yerlerde maruz kalınan radyasyon değeri, bu değerin 1000 katına kadar çıkabilmektedir (UNSCEAR, 1996: 19).

Çizelge 4.1. Doğal fon radyasyonundan ağaçların maruz kaldığı soğurulmuş doz hızları (UNSCEAR, 1996: 60)

Kaynak	Soğurulmuş doz hızı (μGy/saat)		
	α	β, γ	Toplam
Dış ışınlama			
Kozmik radyasyon	0,0004	0,032	0,032
Karasal gama radyasyonu	-	0,01-0,18	0,01-0,18
İç ışınlama			
³ H	-	0,000001	0,000001
¹⁴ C	-	0,0016	0,0016
⁴⁰ K	-	0,001-0,006	0,001-0,006
²³⁸ U, ²²⁶ Ra, ²³² Th, ²²⁴ Ra	0,0001-0,001	-	0,0001-0,001
²²² Rn (havada)	-	0,007-0,035	0,007-0,035
²²² Rn (yer altı suyu)	0,005-0,54	-	0,005-0,54
²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po	0,013-0,025	-	0,013-0,025
Toplam	0,02-0,57	0,05-0,26	0,07-0,8

Çizelge 4.2. Sucul organizmalar için değişik kaynaklardan alınan maksimum toplam soğurulmuş doz hızları (UNSCEAR, 1996: 61)

Kaynak	Doz hızı (μGy/saat)					
	Tatlı su			Deniz		
	Fitoplankton	Balık	Benthos	Fitoplankton	Balık	Benthos
Doğal radyasyon kaynakları						
Kozmik radyasyon	0,027	0,022	0,022	0,027	0,022	0,022
Dahili radyonüklidler	-	0,049	-	0,073	0,047	0,15
Sudaki radyonüklidler	0,062	0,007	0,0035	0,0043	0,001	0,0005
Sedimentteki r.nüklidler	-	-	0,16	-	-	0,16
Toplam	0,089	0,078	0,19	0,1	0,07	0,33
Küresel serpintiler						
Dahili radyonüklidler	-	0,26	0,0015	0,25	0,018	0,08
Sudaki radyonüklidler	0,0053	0,0026	0,0013	0,00016	0,00007	0,00003
Sedimentteki r.nüklidler	-	-	0,058	-	-	-
Toplam	0,0053	0,26	0,061	0,25	0,018	0,08

Sucul ortamda ise, hayvanların maruz kaldığı dozun en önemli kaynağı polonyum-210 radyoizotopudur. Bazı sucul organizmalar için değişik kaynaklardan alınan maksimum toplam soğurulmuş doz hızları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bazı deniz hayvanlarının soğurulmuş gonad dozu birkaç μGy/saat değerini bulabilmektedir.

4.2.1. Biyolojik Birikim

Bazı kirleticilerin hava, su ve toprakta düşük miktarlarda bulunmalarına karşın, besin zincirlerinin birbirini izleyen halkalarındaki tüketicilerde giderek artan yoğunluklarda bulunmasına biyolojik birikim denilmektedir.

Organizmalar içinde yaşadıkları ortamdan radyonüklidleri sudan, besinden veya hem su ve hem de besinden biriktirebilmektedirler. Bazı sucul organizmalar radyonüklidleri sudaki konsantrasyonuna göre 10, 100, 1000, 10.000 kere daha fazla biriktirebilmektedir. Örneğin, nükleer santral artıklarıyla göl suyuna karışan stronsiyum-90'ın, bu göldeki birkaç halkalı bir besin zincirinin en üst halkasındaki etobur balığın kemiklerinde 3000 kata ulaştığı görülmektedir (Kışlalıoğlu ve Berkes, 1994: 168).

Biyobirikim olayı; radyonüklidin fiziksel ve kimyasal formu, organizmanın büyüklüğü, fizyolojisi, yeme alışkanlığı gibi birçok çevresel ve biyolojik faktör tarafından kontrol edilmektedir. Biyobirikimi saptanan radyonüklidler bazı tüketicilerde onları ciddi bir biçimde etkileyecek konsantrasyona erişebilmektedir.

Organizmalarda biyolojik birikimi gözlenen stronsiyum-90, sezyum-137, iyot-131 gibi radyoaktif maddeler dokular tarafından seçici olarak alınıp biriktirilmektedir. Örneğin, sezyum-137 kas ve bazı iç organlarda, stronsiyum-90 kemiklerde, iyot-131 ise tiroitte biriktirilmektedir.

4.2.2. Kazalarda Biyotanın Durumu

Radyonüklidlerin çevreye salımından sonra flora ve faunanın ışınlaması, akut ışınlama dönemi ve uzun süreli ışınlama dönemi olmak üzere iki ayrı başlıkta incelenebilir. Akut dönemde; radyasyon hasarı oluşurken, uzun süreli ışınlama döneminde kısa yarı ömürlü radyonüklidlerin azalması ile radyasyon seviyesi düşmekte ve onarım mekanizması devreye girmektedir. Akut dönemde alınan dozun en önemli bileşeni dış ışınlamadan alınan dozdur. Bitkilerde radyasyon sebepli hasar, beta aktif radyonüklidlerin bitkinin yerin üzerindeki kısmını ışınlamasından kaynaklanmaktadır (Alexakhin et al., 2005).

Doğal komünitelerdeki radyasyon hasarı mevsimlere bağlıdır. İlkbahar ve erken yaz dönemlerinde meydana gelen serpintiler sonbahar-kış dönemine göre daha çok hasara sebep olmaktadır. Çünkü bu dönemde flora ve fauna aktif metabolik bir dönemde bulunmaktadır.

Eski Sovyetler Birliğindeki iki büyük kaza, radyasyonun hayvan ve bitkiler üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde inceleme imkanı vermiştir. Bu kazalar Kyshtym ve Çernobil Kazalarıdır.

1957 yılında meydana gelen Kyshtym kazasında çevreye salınan radyonüklidlerin sebep olduğu hasar bitki türleri içerisinde en fazla orman ekosistemi içerisindeki ağaçlarda meydana gelmiştir. Kazadan sonra ormandaki ağaçların aldıkları ortalama doz 40 Gy civarındadır. İlkbahardan sonra çam ağaçlarının büyük kısmı ölmüştür. 5 Gy'in üzerinde doz alan ağaçlarda takibeden 2 yıl içerisinde morfolojik anomaliler (kuruma, diken kaybı, yeni sürgün vermeme, kozalak boyutlarında küçülme) gözlenmiştir. Orman kazadan 10 yıl sonra normale dönmeye başlamıştır. 100 MBq/m²'den daha az radyoaktif bulaşma olan alanlarda normale dönüş gerçekleşmiş ancak radyoaktif bulaşmanın 1 GBq/m²'den fazla olduğu alanlarda kalan ağaçlarda

üreme tamamen durmuştur. Ormandaki yeni sürgünlerde halen radyoaktif bulaşma tespit edilebilmektedir (Robeau, 1996).

Kaza sonrası çevreye salınan radyoaktif maddelerle bulaşmış bölgelerden 44 MBq/m² aktiviteli stronsiyum-90 radyoizotopu ile bulaşmış olan mahalde yaşayan kemirgenlerde 40 jenerasyon incelenmiştir. Bu hayvanların kemiklerinde biriken stronsiyum-90 sebepli almış oldukları yıllık soğurulmuş doz 1962 yılında 3 Gy, 1980 yılında 0,2 Gy'dir. Bu zaman zarfında kırmızı kemik iliği hücrelerinde azalma ve üremede azalma gözlenmiştir. Kaza sırasında, stronsiyum-90 radyoizotopu bulaşmış 1 GBq/m² aktiviteli alanda açıkta otlayan büyükbaş hayvanların, sindirim sistemleri yaklaşık 50 Gy, iskeletleri 2 Gy doz almıştır. Bu hayvanların büyük bir kısmı kazadan on gün sonra ölmüştür (Robeau, 1996). Kaza bölgesinde, akut periyot (1957 Sonbahar-1958 İlkbahar) boyunca flora ve faunanın almış olduğu maksimum dozlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kyshtym kazasında akut periyot boyunca biyotanın maruz kaldığı maksimum soğurulmuş dozlar (Alexakhin et al., 2005)

Biyota Türü	Doz (Gy)
Çam ağaçları	20-800
Huş ağaçları	10-800
Otsu bitkiler	20-800
Toprak omurgasızları	2-200
Memeliler	10-200
Kuşlar	5-100
Benthos	20-80
Balıklar	10-40

1986 yılında meydana gelen Çernobil kazasında da çevreye salınan radyonüklidlerin sebep olduğu hasar, bitki türleri içerisinde en fazla orman ekosistemi içerisindeki ağaçlarda oluşmuştur. Çernobil reaktörünü çevreleyen 500-600 hektarlık birinci bölgede bulunan ormandaki ağaçlar 80-100 Gy ışınlanmaya maruz kalmıştır. İkinci bölgedeki (300 ha) ağaçlar 8-10 Gy, üçüncü bölgedeki (12.000 ha) ağaçlar ise yaklaşık 3 Gy doza maruz kalmıştır. Birinci bölgedeki ağaçların büyük bir kısmı ölmüştür. Toprakta

sezyum-137 ve stronsiyum-90 bulaşması hemen hemen aynı olmasına karşın ağaçlarda sezyumdan 10 kat fazla stronsiyum tespit edilmiştir. Tespit edilen maksimum aktivite 150 kBq/kg'dır (Robeau, 1996).

Kazadan sonra yayılan radyonüklidlerden ışınlanma sonucunda yüksek kirlenmenin olduğu, reaktöre 20-30 kilometreye kadar olan bölgede bulunan bitki ve hayvanlarda çok sayıda akut etki görülmüştür. Tahliye bölgesi içinde; iğne yapraklı bitkilerde, toprakta yaşayan omurgasızlarda ve memelilerde ölümlerin arttığı, bitki ve hayvanlarda üretkenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Kazadan sonraki ilk birkaç yıl içerisinde, tahliye bölgesindeki bitki ve hayvanların vücut ve üreme hücrelerinde radyasyonun etkileri gözlenmiş olup daha sonra çeşitli genetik anomaliler de bildirilmiştir (TAEK, 2006: 57).

Çernobil bölgesinde Borshchovka Köyünde biyotanın aldığı dozlar ve deterministik etkilerin görülmeye başladığı kritik doz değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Kazanın ilk yılında karasal flora ve faunanın aldığı dozlar kritik dozların üzerindedir. Bazı türlerde dozlar ölümcül dozların üzerine çıkmıştır. Aynı bölgede yaşayan bir insanın aldığı doz değeri 1 kabul edilirse, biyotanın aldığı bağıl doza göre sıralaması şu şekildedir: İnsan (1) < Fitoplanktonlar (1,2) < Zooplanktonlar (3,6) < Balıklar (8) < Fare türü kemirgenler (12) < Zoobenthos (16) < Büyükbaş hayvanlar (32) < Çam ağaçları (62) < Zirai bitkiler (120) < Toprak omurgasızları (158) < Otsu bitkiler (200). Sıralamadan görüleceği üzere kazanın ilk yılında en düşük dozu insanlar ve en yüksek dozu da otsu bitkiler almışlardır.

Kazadan 5 yıl sonra alınan dozlar azalmış, insanlar ve diğer türler arasındaki bağıl dozlar şu şekilde değişmiştir: Fitoplanktonlar (0,007) < Zooplanktonlar (0,014) < Zirai bitkiler (0,3) < Çam ağaçları (0,4) < Otsu bitkiler (0,4) < Fare türü kemirgenler (0,7) = Büyükbaş hayvanlar (0,7) < İnsanlar (1) < Balıklar (1,1) < Toprak omurgasızları (1,3) < Zoobenthos (1,7). Kazanın erken döneminde ekosistem bileşenlerinin maruz kaldığı ışınlanmanın en büyük bileşeni havadan dış ışınlanmadır. Uzun dönemde ise

radyonüklidlerin toprakta ve sedimentte birikimi sebebiyle radyonüklid dağılımı, dolayısıyla ışınlama yolları ve biyotanın aldığı doza göre sıralaması da değişmiştir (Alexakhin et al., 2005).

Çizelge 4.4. Çernobil bölgesinde Borshchovka Köyünde biyotanın aldığı dozlar (Alexakhin et al., 2005)

Tür	Kritik doz (Gy/yıl)	1986 yılı (Gy/yıl)	1991 yılı (Gy/yıl)
<i>Karasal Ekosistem</i>			
Çam ağaçları	0,4	3,1	0,02
Otsu bitkiler (çayır, mera)	3,0	10	0,02
Zirai bitkiler (tahıllar)	3,0	6	0,014
Fare türü kemirgenler	0,4	0,6	0,03
Büyükbaş hayvanlar (inek)	0,6	1,6	0,03
Toprak omurgasızları	0,9	7,9	0,06
<i>Sucul Ekosistem</i>			
Fitoplanktonlar	3,0	0,06	0,00034
Zooplanktonlar	2,5	0,18	0,00063
Zoobenthos	0,9	0,8	0,08
Balıklar	1,0	0,4	0,05

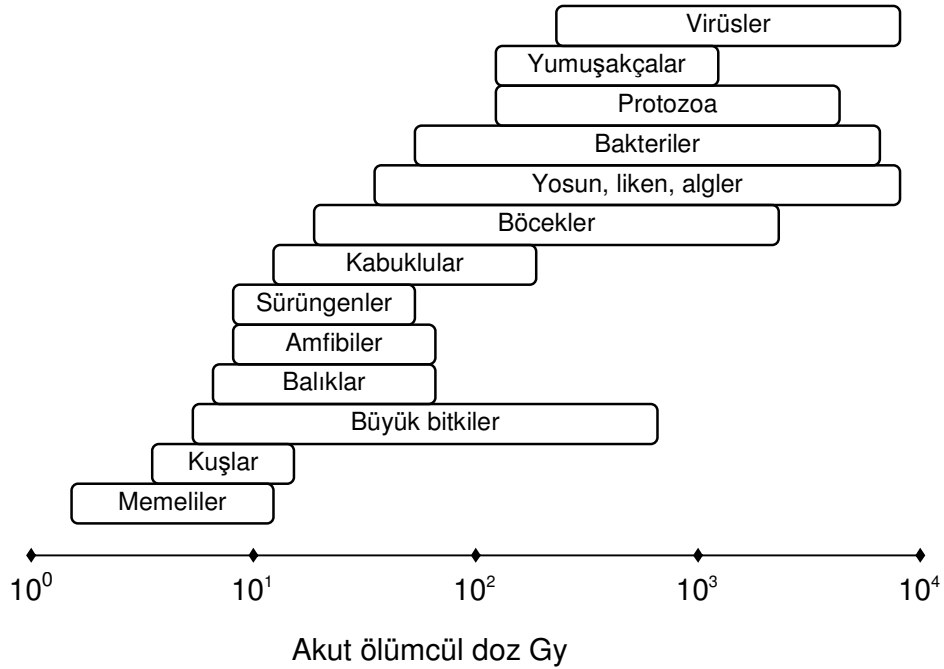
4.3. BİYOTANIN TAŞIMA KAPASİTESİ

Bitki ve hayvanların radyasyona karşı duyarlılığı, maruz kalındığında popülasyonun yüzde 50'sini öldürecek doz (LD_{50})²⁶ cinsinden ölçülmektedir. Ancak, yalnız öldürücü etkinin ölçülmesi, bu yaklaşımın ekolojik anlamını çok azaltmaktadır. Çünkü pek çok zararlı maddenin etkisi, ancak uzun sürede belli olmaktadır. Pek çok kanserojen (kanser yapıcı), mutajen (kromozom hasarı ve mutasyon yapıcı), teratojen (embriyonik gelişme bozukluğu yapıcı) maddeler bu sınıfa girmektedir. Örneğin; radyonüklidlerin sebep olacağı düşük seviyeli radyasyonun etkisinin 20-30 yıldan sonra ortaya çıkması, yalnızca öldürücü etkilerin incelenmesini, hatta daha uzun süreli ve kronik etkilerin incelendiği toksikoloji testlerini bile ekolojik yönden yetersiz hale getirmektedir. Öte yandan kesin sonuçlara ulaşmadaki sorunlardan birisi de,

²⁶ $LD_{50/30}$: Maruz kalan türün popülasyonunun yüzde 50'sini 30 gün içerisinde öldürecek doz.

bazı kimyasal maddelerin, bir arada bulundukları zamanki toplu etkilerinin, bu maddelerin tek tek etkilerinin toplamından hem nicelik, hem de nitelik olarak farklı olmasıdır. Örnek olarak; yapılan bir araştırmada, sudaki deterjan mevcudiyetinin kaya balığındaki çinko-65 konsantrasyonunu anlamlı olarak artırdığı gözlenmiştir. Çünkü deterjan, balıkların regülasyon metabolizmasını bozmakta ve biyobirikimi artırmaktadır. Bu bulgu da, deniz ortamının kimyasal kirliliğinin radyoaktivite etkisini de artırdığını ortaya koymaktadır (Topçuoğlu, 2005).

Organizmaların radyasyona karşı gösterdiği reaksiyon, içinde bulunduğu gelişme devresine göre değişmektedir. Yaşlı organizmalar genç olanlara göre daha fazla dayanıklıdır. Gelişme devreleri içerisinde radyasyona karşı en duyarlı devre, gamet ve henüz döllenmemiş yumurta devresidir.



Şekil 4.3. Değişik taksonomik gruplarda akut ölümcül doz oranları (UNSCEAR, 1996: 76)

Radyasyonun, değişik türleri değişik ölçülerde etkilediği bilinmektedir. Genellikle, böcekler gibi küçük cüsseli, kısa zamanda hızla üreme potansiyeline sahip türler, radyasyona karşı kuşlar ve memelilerden daha fazla dayanıklıdır. Yapılan deneylere göre radyasyona karşı en duyarlı organizmaların memeliler olduğu ve bunu sırası ile kuşların, sürüngenlerin ve böceklerin takip ettiği anlaşılmıştır. Radyasyona karşı en dayanıklı olan türler ise yosunlar, likenler, algler, bakteri ve virüs gibi mikroorganizmalardır. Değişik taksonomik gruplarda akut ölümcül doz oranları Şekil 4.3'te verilmektedir.

Akut ışınlamalarda 0,1 Gy'in altındaki dozlarda karasal bitki ve hayvan popülasyonlarında ölçülebilir bir değişiklik tespit edilmemiştir (IAEA, 1992: 18). Ekosistemde 10 Gy ve daha fazla dozlarda ise felaketler söz konusudur (Topçuoğlu, 2005). Biyota için deterministik etki beklenmeyen doz hızı değerleri ise Çizelge 4.5'te verilmektedir.

Çizelge 4.5. Flora ve fauna için deterministik etki beklenmeyen sınır doz hızı değerleri (Zinger-Gize, 2003)

Etkilenen organizma sınıfı	Rehber doz limiti (µGy/saat)
Karasal hayvanlar ²⁷	40
Deniz memelileri	40
Karasal bitkiler ²⁸	400
Tatlısu ve denizsuyu organizmaları	400
Derin okyanus organizmaları	1000

²⁷ Yaşamlarının %50' sinden fazlasını karada geçirenler dahildir.

²⁸ Bakteriler, likenler ve mantarlar bu gruba dahil edilmiştir.

4.3.1. Flora

Bitkilerde radyasyon etkisi kendisini, fiziksel şeklin değişmesi, büyümenin veya mahsulün azalması, üreme kapasitesinin kaybı, çiçeklerin solması ve yüksek dozlarda ise ölüm olarak gösterir. Bitki türlerinde LD₅₀ dozu 10-1000 Gy arasında değişmekte olup büyük bitkiler küçük bitkilerden daha duyarlıdır (Robeau, 1996).

Bitkiler arasında radyasyona en dayanıklı bitki türleri yosun, liken, algler ile yere yakın büyüyen otsu bitkilerdir. Radyasyona karşı en duyarlı bitkiler ise ağaç türleri olup, bu türler için LD₅₀ değeri 1-200 Gy arasında değişmektedir. Bazı bitki topluluklarında hasar oluşturacak doz seviyeleri Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. Akut ışınlamalar için bitki topluluklarında hasar oluşturacak doz seviyeleri (UNSCEAR, 1996: 66)

Bitki topluluğu	Etki oluşturacak doz aralığı (Gy)		
	Önemsiz etki	Orta düzeyde etki	Ciddi etki
İğne yapraklı ağaç	1-10	10-20	>20
Yaprak döken ağaç	10-100	50-350	>100
Çalılık	10-50	50-200	>200
Tropik yağmur ormanı	40-100	100-400	>400
Otlak	80-100	100-1000	>1000
Liken	100-1000	500-5000	>2000

Özellikle reçineli ağaç türleri diğer ağaçlardan daha duyarlıdır. Çam ağacı için LD₅₀ doz değeri 10 Gy'dir. Ağaçlarda öldürücü dozun %50-60'ında büyüme durmakta, %40-50'sinde çiçeklenme durmakta, %25-35'inde tohum vermede yetersizlik görülmektedir. Öldürücü dozun %10'unun altında ise etki gözlenmemektedir. 2,4 Gy/gün doz hızının üzerinde ağaç yapraklarında küçülme, asimetri, şekil bozukluğu, doku ve kalınlık değişimi gibi morfolojik değişiklikler de gözlenmiştir (UNSCEAR, 1996: 21).

Ekinlerin ve kültür bitkilerinin radyasyona karşı duyarlılığı ise mahsulü %50 düşüren doz (YD₅₀) cinsinden ölçülmektedir. YD₅₀ değeri pirinç hariç tahıllar için 4-16 Gy, pirinç için 75 Gy, yapraklı sebzeler için 2-60 Gy (örneğin; marul için 50 Gy), köklü sebzeler için 5-100 Gy (örneğin; soğan için 14 Gy, turp için 90 Gy)'dir. Radyasyona karşı direncin artan sırasına göre; ananas, çilek, balkabağı, domates gibi diğer sebze ve meyveler için YD₅₀ değeri 45-120 Gy arasındadır. Yağlı çekirdekli ekinler için mahsulü yarıya indiren doz 120-160 Gy, ot ve çimen gibi otsu bitkiler içinse 150-200 Gy'dir (IAEA, 1992; Robeau, 1996; UNSCEAR, 1996).

Rutubet radyasyona karşı duyarlılığı 4 kat artırmaktadır. Ağaçların duyarlılığı sonbaharda artmakta, 1 mGy/saat'lik kronik ışınlama sonucunda yıllar içerisinde morfolojik anomaliler oluşabilmektedir. 1-10 mGy/saat doz hızlarında otlarda metabolik modifikasyonlar (hassas türlerin yok olması, küçülme) gözlenmiştir. Aynı türde modifikasyonlar 1 Gy/saat doz hızında likenlerde de gözlenmiştir (Robeau, 1996).

Kronik ışınlamalarda **400 µGy/saat (10 mGy/gün)**'in altındaki doz hızlarında, karasal bitki popülasyonunda gözlenebilir değişiklikler tespit edilmemiştir (UNSCEAR, 1996: 27).

4.3.2. Fauna

Hayvanlarda LD₅₀ değeri; küçük memeliler için 6-16 Gy, kuşlar için 10 Gy mertebelerindedir. Yavru kuşlarda bu değer yarıya bile büyümeyi yavaşlatmaktadır. LD₅₀ değeri sürüngenler için 2-22 Gy, omurgasızlar için 600 Gy, omurgasızların yavruları için 100 Gy, balıklar için 10-100 Gy, balık yavru ve larvaları için 10 Gy olarak tespit edilmiştir (Robeau, 1996).

Memeliler, tüm canlılar içerisinde radyasyona karşı en duyarlı organizmalardır. LD₅₀ dozu fare için 7 Gy, maymun için 5,25 Gy, köpek için 3,7 Gy, insan için 4 Gy'dir (Hall, 1988: 371). Faunanın radyasyona karşı en

duyarlı özelliği üreme kabiliyetidir. Öldürücü dozun %10'u bile üreme hızını düşürmektedir. Kuşların radyasyona karşı davranışları küçük memelilerle benzer özellikler göstermekte, sürüngenler ve omurgasızlar ise radyasyona karşı daha az duyarlılık göstermektedirler. Omurgasızlar arasında böcekler radyasyona karşı en dayanıklı türler olup, ölümcül doz diğer omurgasızlardan 100 kat fazladır (Johanson, 1997). Radyasyona karşı duyarlılık yavrularda ve yumurtalarda daha fazladır. Bazı hayvanlar için organogenesis devresinde gözlenebilir malformasyon oluşturan soğurulmuş dozlar Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Organogenesis devresinde gözlenebilir malformasyon oluşturan soğurulmuş dozlar (UNSCEAR, 1996: 66)

Organ/sistem	Hayvan türü	Etki oluşturan doz (Gy)
Merkezi sinir sistemi	Fare	1,0-2,0
	Sıçan	1,0-2,0
Göz	Fare	1,0-2,0
	Sıçan	1,0-2,0
	Hamster	>1,0
	Tavşan	>1,0
Kafa	Fare	1,0-2,0
	Sıçan	1,5-2,5
	Hamster	>2,0
	Tavşan	>4,0
	Maymun	>2,5
Gövde	Fare	>0,25
	Koyun	>1,0
	İnek	>1,0
Kollar/bacaklar	Fare	>1,5
	Sıçan	>2,0
	Hamster	>2,0
	Köpek	>1,3

Kronik ışınlanmalarda **40 µGy/saat (1 mGy/gün)**'in altındaki doz hızlarında karasal hayvan popülasyonunda gözlenebilir değişiklikler tespit edilmemiştir (UNSCEAR, 1996: 39).

Sucul ortamlarda ise radyasyona karşı en duyarlı organizmalar balıklardır. Sucul ortam organizmalarının da radyasyona karşı en duyarlı

özellikleri üreme kabiliyetleridir. Kronik ışınlamalarda **400 μ Gy/saat (10 mGy/gün)**'in altındaki doz hızlarında, sucul hayvan popülasyonunda gözlenebilir değişiklikler tespit edilmemiştir (UNSCEAR, 1996: 43).

Radyasyonun fauna üzerindeki deterministik etkilerindeki önemli bir husus da, hiç etkinin görülmediği eşik doz ile %100 etkinin görüldüğü doz arasındaki aralığın çok küçük olmasıdır. Örnek olarak balık yumurtalarında düşük doz hızları ile yapılan çalışmalarda 1000 μ Gy/saat değerinde yumurtalarda hiçbir hasar gözlenmezken, 7400 μ Gy/saat doz hızında 20 hafta içerisinde yumurtaların tamamının kaybedildiği gözlenmiştir (Salomaa, 2005).

5. RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

Canlı organizmaların temel yapısını hücreler oluşturmaktadır. Bu hücrelerin çapları 3 mikrondan 100 mikrona kadar değişse de tipik bir hücrenin 10 mikron çaplı olduğu kabul edilmektedir (Yülek, 1994: 23). Ortalama bir hücre 10^{14} kadar atom ihtiva etmektedir. Yetişkin bir insan vücudunda yaklaşık 4×10^{13} hücre bulunmaktadır. Hücre, 10^{-6} cm kalınlığında bir zarla çevrilmiş olup bir çekirdek ve çekirdeğin etrafında çekirdeğe göre daha az yoğun bir sıvı olan sitoplazmadan oluşmuştur (Bayvas, 1989: 72-74). Sitoplazma; pek çok parçacık ve metabolizmada kullanılan enzimler ihtiva eder ve hücrenin enerji üreten kısmıdır. Çekirdek ise, karakteristik sayıda kromozom ihtiva eder. Hücre çekirdeğinde bulunan 23 çift kromozomdan her birinin üzerinde binlerce gen bulunmaktadır. Hemen hemen bütün organizmaların kromozomu deoksiribonükleik asit (DNA) ve proteinlerden ibarettir. DNA genetik bilgileri taşıyan materyal olup polimerik bir komplekstir. DNA bütün canlılarda sarmal tarzında birbiri etrafında dolanmış iki polinükleotid zincirinden oluşmuştur (çift sarmal). Çift sarmal birbirine hidrojen bağları ile bağlanmıştır. Hücrenin bölünmesini sağlayan kısmı çekirdek olarak kabul edilir. Çekirdek sitoplazmadan yine bir zarla ayrılmıştır. Hücre ve çekirdek zarlarının geçirgenlik özelliği bulunmaktadır.

Üreme hücreleri vücut hücrelerinde mevcut kromozom sayısının yarısına sahiptir. Bu hücrelere gamet (sperm veya ovum) adı verilir. Üreme hücrelerine haploid (n-kromozomlu), somatik hücrelere diploid (2 n-kromozomlu) hücreler denir.

İyonlaştırıcı radyasyonun bir canlıda biyolojik bir etki yapabilmesi için radyasyon enerjisinin canlıyı oluşturan hücreler ve dokular tarafından soğurulması gerekir. Radyasyon, organizma üzerindeki zararlı etkisini, hücre, doku, organ, sistem ve tüm vücut üzerinde gösterir. Doku ve organların temel yapısı hücreye dayandığından, radyasyonun organizma üzerindeki zararlı

etkisinin temelini hücre üzerindeki etkisi teşkil eder. Radyasyon, hücre üzerindeki etkisini, hücre zarına, sitoplazmaya ve çekirdeğe etki ederek gösterir.

- **Radyasyonun Hücre Zarına Etkisi:** Radyasyon; normalde "seçici geçirgen" özellik gösteren hücre zarının fonksiyonunu bozar. Böylece; gereksiz ve zararlı maddeleri hücre içine sokmama çabası gösteren hücre zarı, geçirilmemesi gereken maddelerin geçişine de izin verir hale gelir. Neticede; moleküllerin hücre zarından geçişlerinde rol oynayan ozmos ve aktif transport gibi olaylar üzerinde, hücre zarı fonksiyonunu gösteremez.
- **Radyasyonun Sitoplazmaya Etkisi:** Radyasyon sebebiyle sitoplazmanın organik temel bileşikleri (karbonhidratlar, lipidler, proteinler ve lipoidler) üzerinde kimyasal değişiklikler olabileceği gibi, sitoplazma içinde bulunan organellerin fonksiyonları da bozulabilir. Örneğin; bu organellerden, ribozomlar üzerine radyasyonun etkisi sonucu, hücre protein üretemez. Lizozomların etkilenmesiyle, nükleik asit, protein ve lipidlerin parçalanmasında kullanılan enzimler yapılamaz. Mitokondrilerin tahrip olmasıyla, hücre solunumu ve oksidasyonu gibi olaylarda rol alan 70'den fazla enzimin üretimi durmaktadır.
- **Radyasyonun Hücre Çekirdeğine Etkisi:** Radyasyonun hücre çekirdeğini etkilemesi durumunda; hücre en büyük zarara uğramış olur. Hücre çekirdeği radyasyona karşı sitoplazmaya göre 100 kat daha duyarlıdır. Çekirdeğin tahribatı sonucu, protein, enzim ve nükleik asitlerin sentezi yapılamaz. Nükleik asitler ise, hücrenin canlılığının temelini teşkil ederler. Radyasyona maruz kalma sonucunda DNA'da başlıca 3 tip hasar söz konusudur:

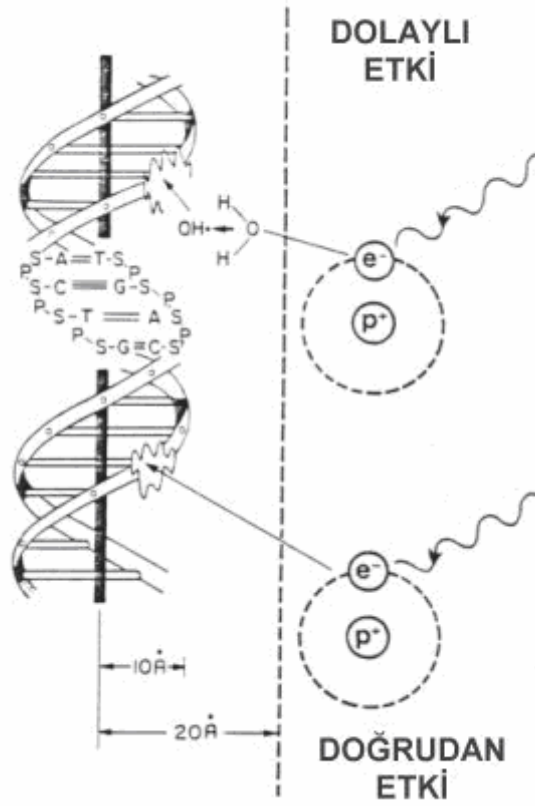
- **Baz Hasarı:** En sık görülen hasar tipidir. Hızla tamir edilebilir. Eğer tamir edilmeden kalırsa, fonksiyonu bozulmasına rağmen, hücre canlılığını sürdürebilir ve bölünebilir.
- **Tek Sarmal Kırıkları:** Serbest hidroksil radikali ile kolaylıkla oluşur ve çok çabuk tamir edilebilir. Bu hasar tipi diğer ikisine göre daha önemsizdir.
- **Çift Sarmal Kırıkları:** En ciddi hasar tipidir. Tek bir olayla olabileceği gibi iki ayrı olayla da oluşabilir.

Radyasyonun hücre çekirdeğindeki kalıtsal materyaller üzerinde meydana getirdiği değişiklikler ya gen seviyesindedir ya da kromozom aberasyonları (fragmanlar, ringler, disentrik, inversiyonlar vb.) şeklinde kendisini belli eder. Disentrik kromozom radyasyona özgü bir aberasyondur (Öztürk, 2003).

5.1. RADYASYONUN ORGANİZMA İLE ETKİLEŞİMİ

İyonlaştırıcı radyasyon bir hücre içinden geçecek olursa, bu radyasyon hücreyi meydana getiren atom ve moleküllerle etkileşerek bir takım zincirleme olayları başlatır. Radyasyonun çarptığı moleküller; DNA gibi çok önemli ve karmaşık molekül yapılarında bileşenler olabileceği gibi, az sayıda atom ihtiva eden (su molekülleri gibi) görece basit hücre bileşenleri de olabilir. Radyasyonun biyolojik moleküllerle reaksiyona girerek enerjisini doğrudan transfer etmesine **doğrudan etki**, radyasyon enerjisinin biyolojik moleküllere aktarılmasının radikaller aracılığıyla gerçekleşmesine **dolaylı etki** denir. Doğrudan ve dolaylı etki mekanizması Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu radikaller ikincil elektronların hücre içindeki suyu iyonize etmesi ile ortaya çıkarlar. Suyun iyonizasyonu sonucu ortaya çıkan hidroksil radikalleri ve

peroksitler radyasyon hasarının %70-80'inden sorumludur. Geriye kalan %20-30 arasındaki hasar doğrudan etki ile oluşmaktadır (Hanman, 1992).



Şekil 5.1. Radyasyonun hücreye doğrudan ve dolaylı etkisi (Hall, 1988: 11)

Hücrede, radyasyona maruz kalma sonucu başlayan biyolojik değişiklikler, saniye mertebesinde, 20-30 yıla kadar uzanan bir zaman aralığında gelişerek biyolojik bir rahatsızlık olarak ortaya çıkabilir. Bu biyolojik etki radyasyonun hücre içinde verdiği zarara ve hücrenin önemine göre çok az veya öldürücü olabilir.

Radyasyon enerjisinin soğurulması ile biyolojik etkinin ortaya çıkması arasındaki sürede birbirini izleyen olaylar zinciri 4 kademe sıralanabilir (Bayvas, 1989: 76-78):

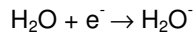
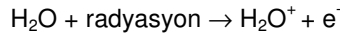
1. Fiziksel Kademe: Radyasyon canlı hücrelerine çarptığı zaman, hücrenin atomları ile μs -ps mertebelerinde kısa bir süre içerisinde elektriksel

etkileşme yaparak yolu üzerinde çarptığı atomları iyonlaştırır. Yani atomların elektron yörüngelerinden elektron sökerek geride pozitif yüklü atomlar bırakır. Sökülen elektronların bir kısmı yeni olaylar meydana getirirken bir kısmı da diğer atomlarla birleşebilir²⁹.

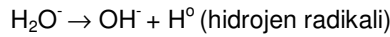
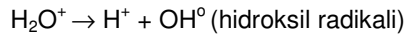
2. Fiziko Kimyasal Kademe: Radyasyonun elektriksel olarak etkileşmesi sonucu meydana gelen pozitif ve negatif iyonlar oldukça kararsızdırlar. Bu iyonlar ms-ns mertebelerinde kısa bir süre içerisinde birbirleri ile veya çevre moleküller ile karmaşık etkileşimler dizisini geliştirir ve yeni moleküllerle, radikaller meydana getirirler³⁰.

3. Kimyasal Kademe: Hücre içerisinde meydana gelen radikaller kendi kendileri ve diğer moleküller ile etkileşerek bir dizi reaksiyon sonucunda, saniyeden saate kadar değişen bir süre içinde, biyomoleküler bozukluklara ve hücre fonksiyonları için önemli değişikliklere sebep olurlar³¹.

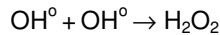
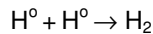
²⁹ Canlı madde %70-90 oranında su içerdiğinden, hücre radyasyona maruz kaldığında büyük olasılıkla radyasyon enerjisi su molekülleri tarafından soğurulacaktır. Böylece pozitif yüklü su iyonu ile hızlı bir serbest elektron oluşur. Bu serbest elektron su içinde başka bir su molekülü tarafından yakalanabilir, böylece negatif yüklü su molekülü ortaya çıkar.



³⁰ Hücrede meydana gelen H_2O^+ ve H_2O^- kararlı olmayıp herbiri parçalanarak bir iyon ve bir serbest radikal oluştururlar.



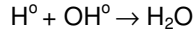
³¹ Serbest radikaller; dış yörüngelerinde eşlenmemiş bir elektrona sahip, elektriksel açıdan yüksüz, son derece reaktif atom veya moleküllerdir. Normalde hücreler bir kısım serbest radikalleri yok edebilecek yetenektedirler. Ancak oluşan serbest radikal sayısı hücrenin kapasitesini aştığı takdirde biyolojik etkiler oluşur. Ömürleri 10^{-5} s olan bu radikaller kendi aralarında reaksiyona girerler.



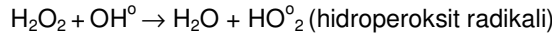
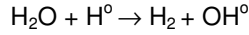
4. Biyolojik Kademe: Saatler, yıllar mertebesinde bir zaman içerisinde biyolojik bozukluklar, hücre tahribi ve organizma tahribi meydana gelebilmektedir.

5.2. RADYASYON HASARINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

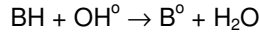
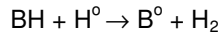
Radyasyonun organizma üzerinde göstereceği biyolojik hasara; radyasyona maruz kalma süresi, doz hızı, radyasyon enerjisi ve tipi, ortamdaki oksijen konsantrasyonu, bir kısım radyoprotektörlerin varlığı, hücrenin metabolik durumu, kişinin yaşı ve sağlık durumu gibi parametreler etki etmektedir.



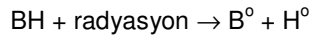
Radikaller aynı zamanda diğer su molekülleri ile veya kendi reaksiyonlarından ortaya çıkan ürünlerle de reaksiyona girebilir.



Bu şekilde çeşitli reaksiyonlar sonunda ortaya çıkan radikaller biyolojik moleküllerdeki hidrojen (BH) atomları ile reaksiyona girerek organik biyolojik molekülleri de radikal haline dönüştürebilirler.



İlk reaksiyonlar sonunda oluşan radikaller (H° , HO°_2 ve OH° gibi) veya ikincil reaksiyonlar sonunda oluşan radikaller (B°), biyolojik açıdan önemli hedef moleküllerle reaksiyonlara girerek biyolojik hasarlara yol açarlar. Bu olaylarda, radyasyon enerjisinin biyolojik moleküllere aktarılması radikaller aracılığı ile olmuştur. Radyasyon enerjisi biyolojik molekül tarafından doğrudan soğurulmadığından biyolojik molekül bu olaydan dolaylı olarak etkilenmiştir. Bu nedenle bu etkiye radyasyonun dolaylı etkisi denir. Radyasyonun doğrudan doğruya biyolojik hedef molekülleri ile reaksiyona girmesi enerjisini doğrudan organik biyolojik moleküle (DNA veya enzim molekülü gibi) transferi ile serbest radikal oluşturmaya ise radyasyonun doğrudan etkisi olarak adlandırılır.



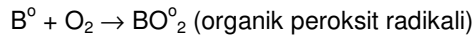
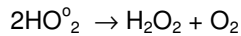
Organizmanın radyasyona maruz kalma süresi arttıkça, radyasyonun organizma üzerindeki etkisi de doğru orantılı olarak artar. Ancak; organizmanın, belirli miktardaki bir radyasyon dozunu aynı anda almasıyla, aynı miktardaki radyasyon dozunu belirli aralıklarla, belirli bir zaman süresinde almasının yaratacağı etkiler farklı olacaktır. Yavaş yavaş veya belirli aralıklarla alınan radyasyonun yapacağı yıkım karşısında, vücut dokuları kendini yenileme imkanı bulabilmekte ancak; kısa sürede alınan yüksek radyasyon karşısında, bu yenilenme olanağı mümkün olmayabilmektedir. Genel olarak; radyasyona maruz kalma süresi arttıkça, radyasyonun zararlı etkisi de artmaktadır.

Vücut sıcaklığı, metabolizma faaliyetleri ve oksijen miktarı radyasyona karşı duyarlılığı artıran faktörler olarak bulunmuştur. Vücut sıcaklığının yükseldiği durumlarda (ateşli hastalıklar vb.), organizmada metabolizma faaliyetlerinin attığı durumlarda ve ortamdaki oksijen konsantrasyonunun arttığı durumlarda radyasyona karşı duyarlılık da artmaktadır³².

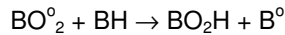
Bazı kimyasal maddeler radyasyona karşı duyarlılığı artırmakta (aktinomisin-D gibi), bazı kimyasal maddeler ise duyarlılığı azaltmaktadır (aminothiol gibi).

Organizmanın bazı kısımlarının radyasyona karşı çok duyarlı, bazı kısımlarının ise dayanıklı olduğu bilinmektedir. Genel olarak; genç hücreler ile bölünme ve çoğalma yeteneği yüksek hücreler üzerine radyasyonun etkisi daha fazladır. Örneğin; radyasyonun, çocuklar üzerindeki zararlı etkisi,

³² Ortamda oksijenin mevcudiyeti radyasyonun biyolojik etkisini arttırmaktadır. Çünkü oksijen, hidrojenperoksit ve diğer organik peroksitlerin meydana gelişini artırır.



BO_2° radikali diğer organik biyolojik moleküllerle pek çok zincirleme reaksiyon yapabilir.



büyüklerden fazladır. Üreme hücreleri, ince bağırsak mukozası, göz, deri, lökositler (akyuvarlar), kemik iliği ve dalak gibi bazı vücut kısımları, radyasyona karşı duyarlılık gösterirken; kas, sinir ve olgun kemik hücreleri ise radyasyona karşı dayanıklılık özelliği gösterirler. Organizmada, aynı doku veya organın radyasyondan etkilenme derecesi de farklılıklar gösterebilir. Örnek olarak, midenin fundus bölgesi, diğer kısımlarına göre radyasyona karşı daha duyarlıdır. Bağırsaklarda lenf bezleri ve pyer plaklarının bulunduğu bölgeler, radyasyona karşı bağırsağın diğer kısımlarına oranla daha duyarlıdır (Kumaş, 1993: 168-169).

Vücudun çeşitli doku ve hücrelerini radyasyona karşı gittikçe azalan duyarlılık ve artan dayanıklılığına göre aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (Bayvas, 1989: 79).

- Lenf dokusu, özellikle lenfositler,
- Kemik iliğindeki gelişmekte olan kan hücreleri,
- Mide-bağırsak hücreleri,
- Gonad hücreleri,
- Saçlı deri,
- Damar dokusu hücreleri, kan hücreleri ve karın-zarı hücreleri,
- Adrenal ve karaciğer dış dokusu hücreleri,
- Diğer dokular; kemik, kas ve sinir dokuları.

5.3. RADYASYONUN ORGAN/SİSTEMLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Radyasyonun biyolojik etkilerini, deterministik etkiler ve stokastik etkiler olmak üzere iki sınıfta incelemek mümkündür. Işınlanan bireylerde belirli bir eşik doz değerinden sonra kesinlikle gözlenen, vücudun herhangi bir doku veya organında fonksiyon kaybına neden olacak sayıda hücrenin ölümü ve üremesinin durması sonucunda ortaya çıkan etkilere **deterministik etkiler** denir. Belirli bir eşik doz değerine bağlı olmaksızın, radyasyona

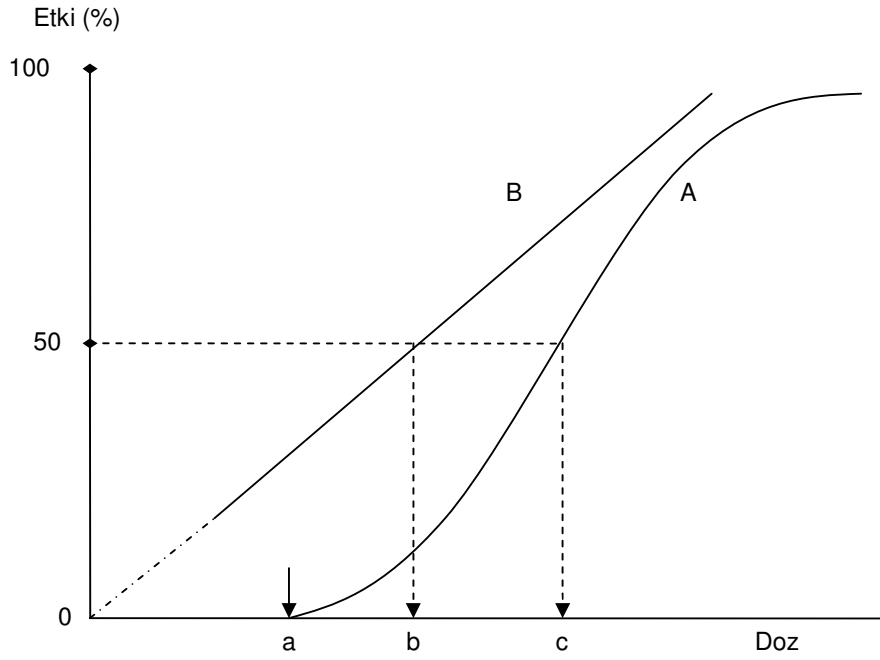
maruz kalma sonucunda hücrede meydana gelen sabit değişikliklerin hücre bölünmesi ile yeni hücrelere geçmesi sonucunda kişinin kendisinde veya bu olayın üreme hücrelerinde meydana gelmesi halinde gelecek kuşaklarda ortaya çıkması olası etkilere ise **stokastik etkiler** denir. Çizelge 5.1'de verildiği şekilde biyolojik etkileri sınıflandırmak mümkündür.

Çizelge 5.1. Radyasyonun olası biyolojik etkileri

Moleküler etki	Hüresel etki	Hücre tipine bağlı etki	Etki özelliği
DNA çift sarmal kırığı	Mutasyon	Genetik bozukluklar	- Geç ortaya çıkar - Stokastik - Tek hücre orijinli
		Kanser	- Eşiksiz - Olasılık doz ile artar - Doz-cevap eğrisi doğrusal
	Hücre ölümü	Üreme hücrelerinde kısırlık	- Erken ortaya çıkar - Deterministik - Çok hücre orijinli
		Somatik hücrelerde organ bozuklukları	- Eşikli - Etkinin şiddeti doz ile artar - Doz-cevap eğrisi sigmoid

Alınan radyasyon dozuna bağlı olarak biyolojik etkinin olma ihtimali doz-etki bağıntısı ile açıklanmaktadır. Genel kabul görmüş iki değişik doz-etki bağıntısı sözkonusudur. Bunlar sigmoid ve doğrusal bağıntıdır. Eşikli doz-etki bağıntısının sigmoid, eşiksiz doz-etki bağıntısının ise doğrusal olduğu kabul edilir.

Eşikli doz-etki bağıntısında etki, artan doz ile önce yavaş, daha sonra hızlı yükselerek doyuma erişir. Bu doz-etki bağıntısını veren eğrinin bir eşik dozu vardır. Bu durum, radyasyon dozunun belirli bir miktardan (eşik) az olması halinde biyolojik etkinin meydana gelmeyeceğini ifade etmektedir. Ölüm oranı yüzde yüze yaklaştığında ise eğri düzleşmiştir. Şekil 5.2'de verilen A grafiği eşikli doz-etki bağıntısını gösteren sigmoid model olup, radyasyonun deterministik etkileri bu bağıntı ile açıklanmaktadır.



Şekil 5.2. Doz-etki grafikleri. A grafiği eşikli sigmoid model olup deterministik etkileri gösterir. B grafiği eşiksiz doğrusal model olup stokastik etkileri gösterir. a noktası eşik doz değerini, b noktası stokastik etkiler için %50 doz değerini, c noktası ise deterministik etkiler için %50 doz değerini göstermektedir (Cember, 1983: 178).

Şekil 5.2'de verilen B grafiği eşiksiz doz-etki bağıntısını gösteren doğrusal model olup, radyasyonun stokastik etkileri bu bağıntı ile açıklanmaktadır. Dozun sıfır olduğu noktada ışıınlanma olmadan bile doğal radyasyonlar sebebiyle pozitif bir etki görüldüğü kabul edilir. İyonlaştırıcı radyasyonun enerjisinin depolanması rastgele bir süreçtir. Bundan dolayı, çok küçük dozlarda dahi hücre içerisinde kritik bir hacime modifikasyonlarla sonuçlanabilecek yeterli enerjinin yüklenmesi olasıdır (Martignoni and Kaul, 1997). Eşiksiz doğrusal doz-etki bağıntısında, ister büyük isterse küçük olsun her hangi bir doz, kansere veya genetik etkilere sebep olma riski taşır ve bu risk, doz ile doğru orantılıdır.

5.3.1. Deterministik Etkiler

Belirli bir eşik doz değerinden sonra kesinlikle gözlenen etkilerdir. Bu tür etkiler vücudun herhangi bir doku veya organında fonksiyon kaybına neden olacak sayıda hücrenin ölümü ve üremesinin durması sonucunda ortaya çıkar³³. Vücudun organ ve dokularında devamlı olarak hücrelerin kaybı ve yenilenmesi mekanizması vardır. Radyasyona maruz kalma sonucu hücre kaybındaki artış, hücre yenilenmesi hızının artışıyla karşılanabilir. Böylece herhangi bir hasar oluşmaz. Radyasyon dozu arttıkça hücre kaybı karşılanamaz duruma gelir. Hücre kaybının yüksek olduğu durumlarda klinik olarak gözlenebilen patolojik bozukluklar meydana gelir. Nihayet hasar gören dokunun hayati önemi varsa ve hasar büyükse sonuç organizmanın ölümü ile bitebilir. Akut ışınlamalar için deterministik etkiler ve eşik doz düzeyleri Çizelge 5.2'de, akut bütün vücut ışınlaması sonucu doza bağlı klinik belirtiler ve biyolojik etkiler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Akut ışınlamalar için deterministik etkiler ve eşik doz düzeyleri
(IAEA, 1994: 36)

Organ veya doku	Soğurulmuş doz ³⁴ (Gy) (2 gün)	Deterministik etkiler	
		Etki	Gözlenme zamanı
Tüm vücut (kemik iliği)	1 ³⁵	Ölüm	1-2 ay
Akciğer	6	Ölüm	2-12 ay
Deri	3	Eritema	1-3 hafta
Tiroit	5	Hipotiroit	İlk yıl-birkaç yıl
Göz merceği	2	Katarakt	6 ay-birkaç yıl
Gonad	3	Kalıcı kısırlık	Haftalar
Fetus	0,1	Teratogenesis	-

³³ Katarakt oluşumu, geçici ve sürekli kısırlık, tükürük bezi veya tiroit salgılarında azalma, bazı nörolojik etkiler ve vasküler değişiklikler gibi.

³⁴ Bu doz düzeyleri tipik yaş ve cinsiyet dağılımı gösteren nüfus grubu içindir ve normal olarak bu dozların altında deterministik etki gözlenmez.

³⁵ Radyasyona duyarlı kişilerde, 0,5 Gy üzerinde ilk gün kusma görülebilir.

Çizelge 5.3. Akut bütün vücut ışınlaması sonucu doza bağlı klinik belirtiler ve biyolojik etkiler (Yülek, 1992: 132)

Doz (Sv)	Klinik belirtiler
0 - 0,25	Gözlenebilir klinik etki yok.
0,25 - 0,50	Kan tablosundaki küçük değişiklikler dışında etki yok. Sağlıklı bir kişide hasar olasılığı çok az.
0,50 - 1,00	Mide bulantısı ve kusma, kan tablosunda daha sonra iyileşen değişiklikler. Normal yaşam süresinde kısalma olasılığı.
1,00 - 2,00	24 saat içinde bulantı ve kusma, bir hafta sonra saç dökülmesi, ishal, kan tablosunda orta derecede değişiklikler, kan yapan organlar dışında birkaç haftada iyileşmek mümkün.
2,00 - 4,00	1 - 2 saat içerisinde mide bulantısı ve kusma, iç kanama, ağız ve boğazda enfeksiyon, kan tablosunda önemli değişiklikler, saç dökülmesi, ishal ve hızlı kilo kaybı, 2 - 6 hafta içinde bazı ölümler, ışınlananların %50'sinde ölüm olasılığı
4,00 - 6,00	1 saat içinde bulantı ve kusma, 1 hafta sonunda ishal, ağız ve boğazda enfeksiyon, ateş, iç kanama, saç dökülmesi, kan tablosunda ciddi değişiklikler, hızlı kilo kaybı, 2 ay içinde %80 ve fazlası ölüm.

Radyasyonun önemli doku ve organlardaki deterministik etkileri aşağıda kısaca verilmiştir (Yülek, 1992: 134-137).

Kan ve Kan Yapıcı Organlar: Radyasyona en duyarlı kan hücreleri lenfositlerdir. Lenfositlerin ömürleri kısadır (3 gün) ve lenfosit yapıcı doku ve organlar vücudun her yerine dağılmıştır. Vücudun ışınlaması halinde ilk önce lenfosit sayısında azalma görülür. Bu arada granülosit sayısı da azalır.

Trombositler radyasyona karşı tek başlarına dayanıklı olmalarına karşın bütün bir vücudun şiddetli ışınlamasını izleyen bir hafta içinde sayılarında bir azalma olur. Çünkü hem trombositleri yapan hücreler, hem de trombositler hasara uğramıştır. 2 hafta sonunda kemik iliği içinde trombosit yapımı aksadığından trombosit minimum seviyededir. Trombositlerin hasara uğraması kanın pıhtılaşmasını önler.

Kan hücrelerinin ışınlanması sonucunda lökositlerin azalması vücudun direncini kırarak bakterilere karşı savunmasız bırakır. Radyasyona karşı en dayanıklı kan hücreleri olan eritrositlerin sayısı da yüksek ışınlama sonrasında azalır ve bu azalma anemiye sebep olur. Plazma ise radyasyonun doğrudan etkisine oldukça dayanıklıdır.

Kemik iliği; kronik ışınlamanın uzun süreli etkisine karşı duyarlıdır. Sürekli hasar ancak müsaade edilen seviyenin üzerindeki dozlarda görülür. Kan yapıcı organlardan dalak ve lenf düğümleri radyasyona karşı duyarlı olan organlardır.

Deri, Saç ve Tırnak: Çok küçük dozlarda bile deride klinik belirtiler görülür ve kılların büyümesi durabilir. 1 Gy'lik bir dozdan sonra geçici bir süre için, yüksek dozlarda ise, geri çıkmamak üzere kıllar dökülür, derideki kızarmalar ileri safhada deri kanserine dönüşebilir. Radyasyonla uzun süre çalışma sonunda tırnaklarda boyuna pantolon ütüsü şeklinde keskin kıvrımlar oluşur.

Akciğerler: Radyasyondan doğrudan ve dolaylı olarak hasar gören organdır. Doğrudan etki, hava keseciklerinin veya bunları besleyen hücrelerin tahrip olmasıdır. Bu etki dış radyasyonlar ile meydana gelir. Ancak en tehlikeli olanı solunum yoluyla alınan radyoaktif toz ve buharlardan meydana gelendir. Küçük miktarlarda toplanan radyonüklidler dahi büyük hasarlara sebep olabilirler. Çözünmeyen radyoaktif parçacıklar akciğer tümörleri oluştururlar, çözünebilenler ise hava keseciklerinin zarından geçerek kana karışır ve vücudun başka organlarında hasar yaparlar. Ayrıca, vücudun başka bir yerinde radyasyon etkisiyle oluşan toksik yan ürünler kan dolaşımıyla akciğerlere ulaşır ve dolaylı şekilde hasara yol açabilirler.

Sindirim Sistemi: Radyasyon etkisiyle salgılama azalır ve hücre yenilenmesi durur. Yüksek dozlarda mide ve bağırsak mukozası yaralanır ve ülser görülür.

Göz: Göz merceği ve retina radyasyona karşı duyarlıdır. Gecikmiş radyasyon etkisi olarak katarakt meydana gelir.

İdrar Yolları: Radyasyon mesane hücrelerini tahrip eder. İdrar yollarının hasarı, idrar yapma zorluğuna sebep olur, böbrek fonksiyonları bozulur.

Kemik Dokusu: Kemik dokusu radyasyona karşı görece dayanıklıdır. İç ve dış ışınlanmalar sonunda kemik lezyonları oluşur. Küçük dozlarda çocuklarda kemik büyümesi geçici olarak bozulur, orta dereceli dozlarda ise iskeletin gelişmesi durabilir. 10 Gy'den fazla dozlarda ise nekroz görülür. Kemikte toplanan bazı radyoizotoplar ise tümör oluşmasına sebep olurlar.

Üreme Organları: Radyasyona en duyarlı olan organlar üreme organlarıdır. Testislerin 0,3 Gy, yumurtalıkların 3 Gy'lik bir tek radyasyon dozuna maruz kalması ile dölleme geçici değişiklikler görülebilir. Kısırlaştırma dozu kadınlarda erkeklerden daha fazladır. Küçük dozlara maruz kalma halinde kadınlarda geçici olarak yumurtlama ve reglin durduğu veya düzensiz olduğu görülür. Radyasyonun embriyo ve fetus üzerindeki etkileri ise hamileliğin çeşitli dönemlerinde farklı olabilir. Gebeliğin ilk döneminde embriyoyu meydana getiren hücre sayısı çok az olduğu için etkilenme tam olur ve hemen daima embriyonun ölümü ile sonuçlanır. Organogenesis periyodunda ışınlanmanın meydana geldiği döneme bağlı olarak organ kusurları ortaya çıkabilir. Bunun hayvan deneylerinden tahmin edilen eşik değeri 0,1 Gy'dir.

5.3.2. Stokastik Etkiler

Belirli bir eşik doz değerine bağlı olmaksızın, radyasyona maruz kalma sonucunda hücrede meydana gelen sabit değişikliklerin, hücre bölünmesi ile yeni hücrelere geçmesi sonucunda, biyolojik hasarların ortaya çıkmasına sebep olan etkilerdir. Radyasyonun bu etkileri ışınlanan herhangi bir özel

bireyle ilişkilendirilemez. Bu etki ancak geniş bir toplulukta yapılan epidemiyolojik çalışmalarla anlaşılabilir.

Radyasyon, vücudumuzun her hücresinde bulunan DNA'yı etkiler. Bu etkileşim sonucunda, somatik hücrelerde ya da üreme hücrelerinde bulunan DNA'nın alt birimlerinin (bazların) dizilimi ya da bileşimi değişebilir. Böylece mutasyonlar ortaya çıkar. Bu mutasyonlar; vücutta kanser oluşumuna veya gelecek nesillerde anomalilere neden olabilir. Kromozom veya gen bozukluklarına uğramış hücrenin hızlı mitozunun ürünü olan kanser, bir somatik mutasyon örneğidir. Üreme hücrelerinde meydana gelen ve gelecek nesillerde farklı özellikleri ortaya çıkarabilecek mutasyonlar ise genetik mutasyonlardır.

Tüm nüfus için stokastik etkiler olasılık katsayıları Çizelge 5.4'te verilmiştir. Radyasyonun bu tür etkileri radyasyona maruz kaldıktan hemen sonra meydana gelmediklerinden, radyasyonun gecikmiş etkileri olarak da isimlendirilir.

Çizelge 5.4. Tüm nüfus için stokastik etkiler olasılık katsayıları (ICRP, 1991: 22)

Hasar	(10⁻² Sv⁻¹)
Ölümcül kanser	5,0
Ölümcül olmayan kanser	1,0
Ciddi genetik etkiler	1,3
Toplam	7,3

5.3.2.1. Kanser

Bugün dünyada radyasyona maruz kalıp da, bir kuluçka devresinden sonra kanser oluşumunun gözlenebildiği üç bilgi kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; II. Dünya Savaşı sırasında Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan atom bombalarından kurtulan insanlar üzerinde yapılan incelemelerdir. Atom bombasından sonra sağ kalanlar izlendiğinde, ortalama yedi yıl sonra bu kişilerde lösemi oranının belirgin bir biçimde yükseldiği görülmüştür. Atom

bombasından kurtulanlar arasındaki kanserden ölüm hızının, bomba etkisinde olmayan bölgelerde yaşayan Japon toplumundaki kanserden ölüm hızına nazaran yaklaşık %10 daha büyük olduğu görülmüştür. Yıllar sonra bile, ağır radyasyona maruz kalan bu kişiler için lösemi, tiroit, meme, kolon, akciğer ve diğer kanserlere bağlı ölüm oranları, kontrol popülasyonlarındaki düzeyin üzerindedir (Kumar et al., 2002 : 201).

İkinci bilgi kaynağı mesleki ışınlanmalardır. Bu grupta ilk sırayı 1920 yılında New Jersey’de bir saat fabrikasında fosforlu saat minelerini radyumlu boya ile boyayan işçi kızlar almaktadır. Bu işçi kızlar radyum içeren boya içine fırçalarını batırarak bir saat rakamını boyadıktan sonra fırçayı dudakları ile sivrilterek tekrar boyaya batırdıklarından, her defasında bir miktar radyumu vücutlarına almışlar ve çalışma sürelerine bağlı olarak kemik kanserinden ölmüşlerdir (Yülek, 1992 : 121-122). Bu grupta ikinci sırayı; tıpta radyografiyi ilk uygulayan doktorlar almaktadır. Bu doktorlar, fazla radyasyona maruz kalma sonucu hayatlarını kaybetmişlerdir. Üçüncü sırada da; uranyum maden ocaklarında çalışan işçiler olup, buradaki işçilerde akciğer kanserlerinin görülme sıklığı, radon konsantrasyonu yüksek olan yerlerde çalıştıklarından dolayı normal popülasyona göre 10 kat yüksektir.

Üçüncü bilgi kaynağı kanser dışındaki hastalıklar için radyoterapi uygulanan hastalar üzerinde yapılan çalışmalardır. Bebeklik ya da çocukluk döneminde baş boyun bölgesine radyasyon uygulanan kişilerin yaklaşık %9’unda tiroit kanserleri gelişmiştir.

Sonuç olarak radyasyonun güçlü bir biçimde onkojenik olduğu çok açıktır. Radyasyon enerjisi kromozom kırılmasına, translokasyonlara ve nokta mutasyonlara neden olur. İyonlaştırıcı radyasyonun da kimyasal karsinojenler gibi onkojenleri aktive edip, tümör baskılayıcı geni inaktive ettiği bilinmektedir (Kumar et al., 2002 : 201).

Radyasyonlar başlıca üç yoldan kansere neden olurlar, bunlar;

- Doğrudan etki,
- Kansere yardımcı olmak,
- Uzak etkidir.

Radyasyona maruz kalmış bir doku veya organda kanser oluşması radyasyonun doğrudan etkisidir. Çok az bir radyasyona maruz kalmış bir organ veya dokuda kanserin görülmesi durumunda ise bu organ veya dokuda zaten kanser yapıcı faktörlerin mevcut olduğu ancak radyasyonun bu faktörlere yardımcı olduğu kabul edilir. Vücudun bir kısmının ışınlanmasından sonra başka bir kısmında kanser ortaya çıkması, ışınlanmış dokuda meydana gelmiş özel hücreler ve kimyasal maddelerin kan dolaşımı yolu ile vücuda yayılmasından ileri gelir ki bu da radyasyonun uzak etkisidir. Radyasyon sebepli kanser en fazla; kan, cilt, akciğer, kemik ve kemik iliğinde meydana gelmektedir (Yülek, 1992: 134).

Kanser, radyasyona maruz kaldıktan bir süre sonra ortaya çıkmaktadır. Bu süre, katı tümörler için 20 - 40 yıl arasında olup, en kısa süre lösemi için 5 yıldır (Hall, 1988: 407). Bir kişi kansere yakalandıktan sonra bunun nedeninin ne olduğunu anlamak bugün için imkansızdır. Radyasyonun sebep olduğu kanseri, başka bir etkenin sebep olduğu kanserden ayırt etmek mümkün değildir. Radyasyona bağlı kanserlerin latent dönemleri çok uzun olduğundan kanserin yalnızca, başlangıçta hasar gören hücrelerin torunlarında muhtemelen başka çevresel faktörlerin de uyardığı ek mutasyonların birikmesiyle ortaya çıktığı izlenimi edinilmektedir.

Yüksek dozlardaki kanser riski, maruz kalınan doz ile orantılıdır. Ayrıca, maruz kalınan doz zaman içinde alınırsa oluşacak risk, bir defada alınan doza nazaran daha az olacaktır. Tüm vücudun radyasyona maruz kalmasıyla oluşacak risk, vücudun kısmen radyasyona maruz kalmasına nazaran daha yüksektir.

Düşük radyasyon dozlarının meydana getirdiği etkileri gözleme olanağımız bulunmamaktadır. Ancak yüksek radyasyon dozlarına maruz kalındığında oluşan etkileri kullanarak düşük dozlar için risk tahmini yapılabilir. Hayvanlar üzerinde yapılan deneyler, tümör oluşumuna dair anlamlı bir etki gözlenen en düşük doz seviyesinin, 100-200 mGy aralığında değiştiğini göstermektedir (UNSCEAR, 2000b: 107). Bununla beraber, maruz kalınan radyasyon dozu ne kadar küçük olursa olsun her dozun bir etkisi vardır. Düşük dozlar ile ışınlama sonrası ölümcül kanser olasılığı Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Düşük dozlar ile ışınlama sonrası tüm nüfus için kanser sebepli ölüm olasılığı (ICRP, 1991: 24)

	Ölümcül kanser olasılığı (10⁻² Sv⁻¹)
Mesane	0,30
Kemik iliği	0,50
Kemik yüzeyi	0,05
Meme	0,20
Kolon	0,85
Karaciğer	0,15
Akciğer	0,85
Yemek borusu	0,30
Over	0,10
Deri	0,02
Mide	1,10
Tiroit	0,08
Diğerleri	0,50
Toplam	5,00

1 mSv'lik radyasyon dozuna maruz kalan bir kişinin (erkek veya kadın) kanserden ölüm riski Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu'nun son önerilerine göre 1/20.000'dir. Yani 1 mSv'lik radyasyon alan 20.000 kişiden birinin kanserden ölme olasılığı bulunmaktadır.

Kanser oluşumu stokastik bir etkidir. Bu nedenle kanser oluşumu birey için önceden belirlenemez, sadece ışınlanmış popülasyonda artmış kanser

sayısı olarak belirtilebilir. Bireysel seviyede, sadece artan doz ile artmış risk söz konusudur.

5.3.2.2. Genetik Bozukluklar

1927 yılında H.J. Muller'in yaptığı çalışmalar, iyonlaştırıcı radyasyonun kalıtsal etkiler meydana getirebileceğini ortaya koymuştur. Muller'e göre X-ışınlarına maruz kalan sirketineklerinin genlerinde mutasyon oranı yükselmektedir. Muller, Teksas'ta bu gözlemi yaparken, Stadler de Missouri'de arpa üzerinde aynı gözlemleri yapmış ve X-ışınlarının mutasyon miktarını artırdığını tespit etmiştir. Böylece X-ışınlarının hem bitkilerde hem de hayvanlarda mutasyon meydana getirdiği bulunmuştur. Daha sonra birçok araştırmacı değişik organizmaları radyasyona maruz bırakarak ortaya çıkan mutasyonların özelliklerini incelemiştir (Demirsoy, 2000: 585).

İnsanın oluşumu ve karakteri babadan gelen sperm ve annenin ovum hücresindeki kromozomlarda bulunan genlerde ve sıralanışında şifrelenmiştir. Aralarında radyasyonun da bulunduğu bir etkenle, bu genlerin yapısı değişerek “genetik mutasyon” meydana gelebilir. Böylece oluşacak bir değişiklik, hücrenin yaşadığı süre içinde hücre bölünmesi yoluyla yavru hücrelere geçerek, bütün yeni kuşaklar bu değişikliğin bir kopyası olabilecektir. Radyasyonun bu tür etkileri insanlarda tespit edilmemiş olmakla birlikte hayvanlar üzerindeki deneysel çalışmalarda, önemsiz etkilerden önemli malformasyonlara kadar bir takım etkiler tespit edilmiştir.

Deney hayvanları üzerinde yapılan araştırmalardan radyasyon dozu ile meydana gelen değişiklikler arasında doğrusal bir bağıntı olduğu tespit edilmiştir. Yani verilen radyasyon dozu arttıkça meydana gelen mutasyon sayısı da artmaktadır. Fare ve diğer hayvan deneylerinden elde edilen genetik hasara ilişkin sonuçlar aşağıdaki kabullenmeler ile insanlar için de genelleştirilmiştir (UNSCEAR, 1988: 376):

- Aynı radyasyon aynı şartlarda deney hayvanlarında gösterdiği etkiyi insanlarda da gösterir,
- Düşük dozlarda ve düşük doz hızlarında doz ve genetik etki frekansı doğrusal bir bağıntı gösterir,
- Hasarın büyüklüğüne etki eden pek çok biyolojik ve fiziksel faktör vardır.

Radyasyonun meydana getirdiği mutasyon sayısı radyasyonun doz hızına da bağlıdır. Doz hızı düştükçe meydana gelecek değişiklik de azalmaktadır. Yüksek doz hızında verilen radyasyonun daha fazla mutasyon meydana getirmesinde en büyük etken, hücrenin tamir için yeterli zaman bulamamasıdır. Toplam doz aynı kalmak üzere, bir memeli hayvanın, yüksek doz hızı ile ışınlaması ile meydana gelen mutasyon sayısı, düşük doz hızı ile ışınlaması halinde meydana gelecek mutasyonun, 2 veya 3 katı kadar fazla olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ancak, az miktarda radyasyona maruz kalan çok sayıdaki organizmanın gen havuzunda meydana gelen mutasyon miktarı, yüksek dozda radyasyona maruz kalan az sayıdaki organizmanın gen havuzunda meydana gelen mutasyon miktarından çok daha fazladır (Demirsoy, 2000: 588).

Mutasyonlar genel olarak zararlıdır. Genler tarafından taşınan bilgilerin çok karmaşık olması nedeni ile esasen böyle bir sonuç beklenmektedir. Mutasyona uğrama belirli bir amaca yönelik olmayıp, tamamen bir rastlantı sonucu ortaya çıkar. Genlerdeki moleküllerde meydana gelecek raslantısal değişikliklerin bunları daha gelişmiş bir mesaj taşıyacak şekilde değiştirmesi ihtimali son derece küçüktür.

Kural olarak her genin mutasyona uğrama olasılığı vardır. Bir bakteride 10.000, bir insanda ise büyük bir olasılıkla 6 milyar bazın oluşturduğu 1.000.000 gen vardır. Bakterilerde ortaya çıkacak bir mutasyonun o bireyde kendini göstermesi kolaydır; çünkü haploiddir (her bir özellik tek bir genle ortaya çıkarılır); yani her özellik fenotipte kendini

gösterme yeteneğine sahiptir. Fakat diploid organizmalarda (bir özelliğten iki gen sorumludur), ana ve babadan gelen homolog kromozomların yan yana gelmesi söz konusudur. Bunlarda yeni bir özelliğin ortaya çıkması; homolog kromozomun aynı bölgesine hatta aynı baz çiftine, aynı zamanda benzer mutasyonun isabet etmesi ile mümkündür. Bu da çok düşük bir olasılıktır (Demirsoy, 1991: 246).

İnsan lenfosit hücrelerinde düşük doz radyasyonla yapılan çalışmalarda en düşük 20 mGy dozda kararsız kromozom aberasyonu, 250 mGy dozda kararlı kromozom aberasyonu, farelerle yapılan çalışmalarda ise 10 mGy dozda pembe göz mutasyonu tespit edilmiştir (UNSCEAR, 2000b: 92).

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu'nun son önerilerine göre düşük dozlarda tüm jenerasyonlar için ciddi genetik etki olasılığı 1×10^{-2} Sv⁻¹'dir. Yani 1 mSv'lik radyasyon dozuna maruz kalan kişilerden doğacak çocuklarda genetik kusurun meydana gelme ihtimali yüzbinde birdir. Yani 1 mSv'lik bir radyasyon dozuna maruz kalan yüzbin kişiden 50 yılda doğacak genetik kusurlu çocuk sayısı ortalama bir kişi olacaktır (ICRP, 1991: 24).

5.4. ÇEVRESEL RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİSİ

Çevresel radyasyon, vücudumuzun her hücresinde bulunan kalıtsal materyal DNA'yı kaçınılmaz olarak etkiler. Her bireyin farklı bir kromozomunda, farklı bir geninde meydana gelecek nokta mutasyonlar, daha öncekilere eklenerek, o türün gen havuzunu oluşturur. Çevre radyasyonunun canlıların binlerce yıl içerisinde oluşturduğu gen havuzunun yapısını bozma yetisinde olup olmadığına ilişkin farklı düşünceler bulunmaktadır. Bazı bilim adamlarına göre çevre radyasyonu herhangi bir kalıtsal öneme sahip değildir. Bazılarına göre ise meydana gelecek küçük değişiklikler ileride gen

havuzunun bozulmasına ve döllerde büyük değişikliklerin ortaya çıkmasına neden olacaktır.

Bu konudaki en önemli sorun, çok düşük düzeylerdeki radyasyonun ne ölçüde etkili olduğudur. Çevresel radyasyonun yüksek olduğu bölgelerde yapılan çalışmalarda düşük doz radyasyona maruz kalanların daha az kansere yakalandığı gibi bir takım olumlu sonuçlar da bulunmuştur. Japonya'da atom bombası sonrası, 500 mSv ve üzerinde doz alanlarda lösemi oranlarında artış görülürken, 100 mSv altındaki dozlarda karsinogenesis oranının artmadığı saptanmıştır. Öte yandan genel kabul; stokastik etkilerin doğrusal-eşiksiz bağıntı özelliği gösterdiği ve mutasyon miktarının, alınan radyasyon dozu ile doğru orantılı olduğudur.

Çok düşük dozlarda radyasyonun farelerde oluşturduğu mutasyonlar, doğrusal bir bağıntıda beklenenin ancak 1/3-1/4'ü kadar tespit edilmiştir. Daha sonra moleküler genetikçiler bazı genlerin onarıldığını ve bu nedenle mutasyon sayısının az görüldüğünü bulmuştur. Radyasyonun miktarı az ise, onarım mekanizmasının birçok mutasyonda işlev gördüğü ve mutasyonları düzelttiği saptanmıştır. Ancak, mutasyonların tümünün onarımı sözkonusu değildir (Demirsoy, 2000: 588).

İnsanda kendi kendine oluşan mutasyonların %1 - %6'sı çevresel radyasyondan kaynaklanmaktadır (Hall, 1988: 425). Ayrıca, çevresel radyasyonun tüm kanserlerin %5'inin ve tüm ölümlerin %1,26'sının sebebi olduğu değerlendirilmektedir (IAEA, 2002: 5). Düşük doz radyasyon ışınlaması için memeli hücrelerinde, hücre ve birim doz başına DNA hasar çeşitleri ve sayıları Çizelge 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5.6. Düşük doz radyasyon ışınlaması (gama) için memeli hücrelerinde DNA hasarı (UNSCEAR, 2000b: 4)

Hasar türü	Kusur sayısı/hücre-Gy
Tek sarmal kırığı	1000
Baz hasarı	500
Çift sarmal kırığı	40

Yapılan araştırmalar; dünyanın yaklaşık 4,5 milyar yaşında olduğunu, yeryüzünde ilk yaşam belirtilerinin yaklaşık 4 milyar yıl önce küllürt bakterileri ile başladığını, 1,5 milyar yıl önce ilk bitkilerin, 670 milyon yıl önce ilk hayvanların, 216 milyon yıl önce ilk memelilerin, 2 milyon yıl önce homo habilis'in, 1,8 milyon yıl önce homo erectus'un 700 bin yıl önce de homo sapiens'in ortaya çıktığını göstermektedir (Gürel, 2001: 23-30).

Yıllık ortalama etkin doz seviyesi 2,4 mSv ve bir jenerasyon süresi 30 yıl³⁶ alınırsa 2 milyon yıl önce ortaya çıkan homo habilis'in 66.600 jenerasyon ve toplamda 4800 Sv yüklenen etkin doza maruz kaldığı kolaylıkla hesaplanabilir. Bu miktarda doz ise hücre başına yaklaşık 192.000 çift sarmal kırığına, 2.400.000 baz hasarına ve 4.800.000 tek sarmal kırığına karşılık gelmektedir. Aynı şekilde 700.000 yıl önce ortaya çıkan homo sapiens'in 23.300 jenerasyon ve toplamda 1680 Sv yüklenen etkin doza ve hücre başına yaklaşık 67.200 çift sarmal kırığına, 840.000 baz hasarına ve 1.680.000 tek sarmal kırığına maruz kaldığı söylenebilir.

Kaldı ki, ilk küllürt bakterilerinin ortaya çıktığı 4 milyar yıl önce dünyada hayat başlarken dünya üzerinde iyonlaştırıcı radyasyon seviyesi şimdikinden 3-5 kat daha fazladır. İç ışınlamanın en önemli kaynağı olan ve ortalama bir insan vücudunda 30 mg bulunan potasyum-40 radyoizotopunun şu andaki aktivitesi orijinal aktivitesinin sadece %8'i, uranyum-238 radyoizotopunun aktivitesi ise orijinal aktivitesinin yarısıdır. Ayrıca, bazı jeolojik ve tektonik olaylar sırasında karasal radyoaktivitenin, güneş patlamaları sırasında ve manyetik kutup değişimleri sırasında ise kozmik

radyasyon ile bundan kaynaklanan kozmojenik radyonüklidlerin miktarı artmaktadır. Bunun anlamı şudur; doğal olarak mevcut olan radyasyon dozuna ilave edilen en küçük radyasyon dozu, doğal mutasyon frekansında artışlara neden olacaktır.

Tüm bunların sonucunda şu yargıya varılmıştır: Evrendeki ve dünyadaki koşullar, canlıların kalıtsal yapısını belirli bir hızla değiştirmektedir. Bu hız canlının, ne kısa bir zamanda ortadan kalkmasını sağlayacak kadar fazla, ne de değişmeden kalmasını sağlayacak kadar yavaştır. Dünyanın yaşanabilir ve canlılık açısından çeşitlenebilir olmasının nedeni de bu dengede yatmaktadır. Doğal koşulların belirli ölçüler içinde dalgalanması ya da değişmesi, canlıların yapısal ve işlevsel değişikliklere uğramasına neden olur. Son zamanlarda, çevresel radyoaktivite miktarında artış ve buna bağlı olarak canlı organizmaların aldıkları radyasyon dozunun artması, bu dengeyi bir ölçüde bozarak tahribata neden olmaktadır. Oluşacak mutasyonların gelecekte ne gibi olumsuz değişikliklere neden olacağını da bugünden hiç kimse açık olarak söyleyememektedir (Demirsoy, 1991: 247).

³⁶ Bir insanın çocuk meydana getirme yaşı ortalama otuz olarak kabul edilir.

6. RADYASYONDAN KORUNMA SİSTEMİ

Uluslararası radyasyondan korunma sistemi, gittikçe artmakta olan nükleer ve radyolojik uygulamalarda, radyasyon risklerinin kontrolü ve önlenmesi için kendine özgü teknik ve prensipler ile kapsamlı bir kavramlar sistemi olarak geliştirilmiştir. Uluslararası radyasyondan korunma standartları, radyasyon görevlilerinin, toplum üyelerinin, teşhis ve tedavi gören hastaların, iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerinden korunmasıyla ilgilenmektedir.

6.1. RADYASYONDAN KORUNMA SİSTEMİNİN GELİŞİM SÜRECİ

1895 yılında Alman bilim adamı Wilhelm Roentgen'in X-ışınlarını keşfetmesinden hemen sonra 1896 yılında, Grubbe, X-ışını araştırmacılarının ellerinde ve parmaklarında X-ışını sebebiyle meydana gelen yanıkları tanımlamıştır. Bu tanımlama, radyasyon hasarlarına ilişkin yapılmış ilk tespittir.

12 Aralık 1896'da "Western Electrician" isimli Amerikan dergisinde Wolfram Fuchs tarafından ilk radyasyondan korunma önlemlerini tavsiye eden bir makale yayımlanmıştır. Bu önlemler;

- ışınlamayı mümkün olduğunca kısa tut
- X-ışınları tüpüne 12 cm'den daha fazla yaklaşma
- derini vazelin ile kapla ve çok ışınlanan alan üzerine extra bir tabaka daha sür

şeklindedir (Clarke, 2002).

Yine 1896 yılında Fransız bilim adamı Becquerel tarafından radyoaktivitenin tarifi, 1898 yılında Marie ve Pierre Curie çifti tarafından polonyum ve radyumun keşfinden sonra tıpta X-ışınlarının yanı sıra radyoaktif

maddeler de kullanılmaya başlanmıştır. Sonraki 10 yılda radyasyon sebepli doku hasarına ilişkin birkaç yüz makale yayımlanmıştır.

1913 yılında "Deutsche Roentgen Gesellschaft" ilk radyolojik korunma tavsiyelerini yayımlamıştır. 1915 yılında "British Roentgen Society" X-ışınlarının zararlarına dikkat çeken bir uyarıda bulunmuştur. Ancak, 1925 yılında birincisi gerçekleştirilen Uluslararası Radyoloji Kongresine³⁷ kadar radyasyondan korunmaya ilişkin standartlar henüz tespit edilememiştir.

Kongrenin ilk tavsiyeleri deterministik etkileri önlemek üzerine odaklanmıştır ve nitelikselidir. Ancak, niceliksel korunma sağlamak amacıyla, doz limitlerinin belirlenmesi gündeme gelmiş ve iyonlaştırıcı radyasyonun nicel ölçümlerini sağlayacak metotlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçüleri Komisyonu³⁸ kurularak çalışmalarına başlamıştır.

Ölçüm birimi olarak, önceleri "Eritema Dozu" olarak bilinen biyolojik göstergeler kullanılmıştır. Eritema dozu, deride gözle görülebilen kızarmaları oluşturacak miktardaki radyasyon dozu olarak tariflenmiş olduğundan kişisel farklılıklar sebebiyle kesin bir birim olamamıştır.

1928'de Stokholm'de yapılan II. Uluslararası Radyoloji Kongresinde ışınlama dozu olarak "Roentgen" tarif edilmiş ve aynı zamanda bu toplantıda Uluslararası X-ışınları ve Radyumdan Korunma Komitesi³⁹ kurulmuştur. Daha sonraki yıllarda bu komisyon gelişerek, bugünkü Uluslararası

³⁷ International Congress of Radiology

³⁸ International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)

³⁹ International X-ray and Radium Protection Committee

Radyasyondan Korunma Komisyonu'nu⁴⁰ oluşturacaktır. Bu Komisyonun görevi, radyasyondan korunma ile ilgili tavsiyeleri ve temel prensipleri hazırlamaktır. Bu tavsiyelerin diğer ülkelerce uygulanıp uygulanmaması ya da değiştirilerek uygulanması ulusal otoritelere bağlıdır.

Uluslararası X-ışınları ve Radyumdan Korunma Komitesi 1934 yılında yayımladığı tavsiyelerinde "normal bir insan uygun çalışma şartlarında günde yaklaşık 0,2 R'e kadar X-ışınını tolere edebilir" kararı ile ilk eşik değerini açıklamıştır. Bu değer bugünkü yıllık doz limitlerinin yaklaşık on katına karşılık gelmektedir. Tolerans kavramı, sonraki 20 yıl boyunca da devam etmiş ve 1951 yılında yayımlanan ICRP tavsiyeleri ile eşik doz 0,3 rem/hafta değerine indirilmiştir (Clarke, 2002).

1950'lerin ortalarında yeni biyolojik bilgilerin ortaya çıkması, radyasyondan korunma felsefesinde değişikliğe yol açmıştır. Önceleri sadece deterministik etkiler bilinmekteydi ve etkinin şiddeti dozun büyüklüğü ile orantılıydı. Ayrıca, belli bir eşikten sonra etki hemen hemen kesinlikle gözleniyordu. Ancak, yeni araştırma sonuçları dozun büyüklüğü ile orantılı stokastik etki olasılığını ortaya çıkarmaktaydı. Epidemiyolojik metotların kullanılması ve tanımlanmış topluluklar üzerindeki etki yüzdesinin araştırılabileceği düşüncesi ile ilk çalışma 1944 yılında March tarafından yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ABD'de radyologların lösemi olma ihtimallerinin diğer doktorlara oranla 10 kat fazla olduğu saptanmış ve bu çalışma epidemiyolojik araştırmalar için bir başlangıç olmuştur. Daha sonra Hiroşima ve Nagazaki'deki radyoepidemiyolojik bulgular, düşük seviyeli radyasyonlara maruz kalmanın tahmin edilenden çok daha riskli olduğunu ortaya koymuştur.

1955 yılında ICRP yeni tavsiyelerini yayımlayarak; doğal seviyenin üzerinde hiçbir radyasyon dozunun mutlak güvenli olmadığını duyurmuştur.

⁴⁰ International Commission on Radiological Protection (ICRP)

Böylece; "Bir kişi tarafından alınmasına izin verilen en büyük radyasyon dozu, bu kişinin ömrü boyunca gözlenebilir bir etkiye sebep olmayacaktır" esası, "Bir kişi tarafından alınmasına izin verilen en büyük radyasyon dozu, bu kişide somatik etkiler meydana getirmeyecek ve meydana gelebilecek genetik hasarlar da mümkün olan en düşük düzeyde olacaktır" şeklinde değiştirilmiştir. Bunun için "iyonlaştırıcı radyasyonun tüm türlerinden kaynaklanan ışınlamaların **mümkün olan en düşük** seviyeye düşürülmesi" tavsiye edilmiştir.

ICRP bu tavsiyesini zamanla geliştirerek; 1959 yılında "mümkün olan en düşük"⁴¹ ifadesini, "uygulanabilir en düşük"⁴² ifadesine, 1966 yılında ise "kolaylıkla ulaşılabilecek en düşük"⁴³ ifadesine, 1973 yılında ise "makul olan en düşük"⁴⁴ ifadesine dönüştürmüştür (Clarke, 2002).

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonunun 1977 yılında yayınladığı 26 numaralı raporundaki tavsiyeler, pek çok ülkenin, Avrupa Birliğinin ve ülkemizin bu konudaki mevzuatına esas teşkil etmiştir. Raporda radyasyondan korunmanın 3 temel prensibine yer verilmiştir. Bunlar;

- Pozitif net fayda sağlamayan hiç bir uygulamaya izin verilmemelidir,
- Ekonomik ve sosyal faktörler dikkate alınarak tüm ışınlamalar makul olan en düşük seviyede tutulmalıdır,
- Bireysel dozlar, Komisyonun tavsiye ettiği doz limitlerini geçmemelidir,

şeklindedir.

⁴¹ "lowest possible level"

⁴² "as low as practicable"

⁴³ "as low as readily achievable"

⁴⁴ "as low as reasonably achievable (ALARA)"

1980'lerin sonuna doğru, radyasyon kaynaklarının güvenliğini ve iyonlaştırıcı radyasyonlara karşı korunmayı sağlayan standartlara yeni bir bakış getirmek için çok miktarda yeni bilgi toplanmış bulunmaktaydı. Hiroşima ve Nagazaki'de atılan atom bombaları sonucu, sağ kalanlar üzerinde yapılan çalışma sonuçlarının radyoepidemiolojik olarak değerlendirilmesi, radyasyonun etkileri konusunda yeni bilgiler kazanılmasını sağlamıştır. Ayrıca, 1979 yılındaki Three Miles Island nükleer kazası ve 1986 yılındaki Çernobil nükleer kazası ve bu kazanın daha önce örneği görülmemiş şekilde sebep olduğu sınır ötesi radyoaktif bulaşma, toplumun radyasyondan kaynaklanabilecek muhtemel tehlikeyi algılayış şeklini oldukça etkilemiştir. Bu çerçevede ICRP, 1990 yılında mevcut bilimsel bulgular ve korunma sistemindeki felsefenin değişimi nedeniyle risk katsayıları da dahil olmak üzere tavsiyelerini tekrar gözden geçirmiş ve düzeltmelerle 60 numaralı raporunu 1991 yılında yayımlamıştır.

ICRP'nin 60 numaralı raporunda radyasyondan korunma sisteminin üç temel prensibi bulunmaktadır. Radyasyondan korunma sistemi, iyonlaştırıcı radyasyonlarla yapılan her türlü ışınlamanın yararlı ve gerekli olduğundan emin olunması, her gerekli ışınlamada mümkün olan en düşük dozun alınması ve alınan doz eşdeğerinin müsaade edilen sınırları geçmemesinin sağlanması esasına dayanmaktadır.

Bu sistem şu şekilde tavsiye edilmektedir:

- **Uygulamanın Gerekliliği:** Pozitif net bir yarar sağlamadıkça hiçbir ışınlamaya izin verilmemelidir.
- **Optimizasyon:** Gerekçelendirilmiş uygulamalarda, ekonomik ve sosyal faktörler gözönünde bulundurularak bütün radyasyon ışınlamalarında makul ve mümkün olan en düşük dozun alınması sağlanmalıdır.

- **Doz Sınırlandırmaları:** Bireylerin maruz kalacağı radyasyon dozu komisyon tarafından tavsiye edilen doz sınırlarını aşmamalıdır.

ICRP tarafından kuruluşundan bugüne kadar geçen süre içerisinde, tavsiye edilen doz limitleri pek çok kez limiti daima azaltacak yönde değiştirilmiş olup, radyasyon görevlileri ve halk için önerilen doz limitlerinin yıllara göre değişimi Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. ICRP tarafından önerilen tüm vücut etkin doz limitlerinin evrimi (Cigna, 1993)

Yıl	Orjinal birim		mSv/yıl	
	Radyasyon görevlisi	Halk	Radyasyon görevlisi	Halk
1934	0,2 R/gün		500	
1950	0,3 rem/hafta		150	
1956	0,1 rem/hafta		50	
1959		0,01 rem/hafta		5
1977	50 mSv/yıl	5 mSv/yıl	50	5
1985		1 mSv/yıl		1
1990	20 mSv/yıl	1 mSv/yıl	20	1

ICRP'nin 60 numaralı raporunda, doğal kaynaklardan alınan kaçınılmaz doza ilave olarak alınmasına izin verilebilir doz sınırları; radyasyon görevlileri ile halk için farklı olarak belirlenmiştir. Radyasyon görevlileri için etkin doz sınırı; birbirini takip eden 5 yılın toplamı 100 mSv (5 yılın ortalaması 20 mSv/yıl) ve bu 5 yıllık süre içinde bir yılda 50 mSv'i geçmeyecektir. Doz eşdeğerinin yıllık limitleri; göz merceği için 150 mSv, eller, ayaklar ve cilt için 500 mSv'dir. Halktan bir kişinin etkin doz limiti; yılda 1 mSv'dir. Bununla beraber özel durumlarda birbirini takip eden 5 yılın ortalaması yılda 1 mSv'i geçmemek şartı ile, bu periyot içindeki herhangi bir yılın etkin doz sınırı daha yüksek olabilir. Yıllık eşdeğer doz limiti, göz merceği için 15 mSv, eller, ayaklar ve cilt için 50 mSv'dir.

6.2. RADYASYONDAN KORUNMA İLE İLGİLİ AKTÖRLER

6.2.1. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR)

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi⁴⁵, çeşitli kaynaklardan yayılan radyasyon seviyeleri ile radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri hakkında bilgi toplamak, değerlendirmek ve yaymakla görevlidir. Birleşmiş Milletler Genel Kurulunca 1955 yılında kurulmuştur. Temel güvenlik standartlarının dayandırıldığı teknik bilgileri sağlamakta olup 21 ülkeden temsilcileri ile bu görevi sürdürmektedir.

6.2.2. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP)

1928 yılında II.Uluslararası Radyoloji Kongresinde, o günkü adıyla " X-Işınları ve Radyumdan Korunma Komitesi" olarak kurulmuş, aynı yıl ilk raporu yayınlanmıştır. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu⁴⁶ bugünkü adını 1950 yılında almıştır. Bağımsız ve bilimsel bir organizasyon olan ICRP, iyonlaştırıcı radyasyondan korunma konusunda tavsiyeler ve kılavuzlar yayımlamakta olup herhangi bir resmi yaptırım gücü bulunmamaktadır.

6.2.3. Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçüleri Komisyonu (ICRU)

Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçüleri Komisyonu⁴⁷, 1925 yılında I. Uluslararası Radyoloji Kongresinde kurulmuştur. Ana görevi

⁴⁵ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)

⁴⁶ International Commission on Radiological Protection (ICRP)

⁴⁷ International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)

radasyon ve radyoaktivite ile ilgili miktarlar ve birimler hakkında kabul edilebilir uluslararası tavsiyeler üretmek, bu miktarların uygulanabilirliğinin ölçülmesine ilişkin prosedürler geliştirmek.

6.2.4. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA)

1956 yılında kurulan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı⁴⁸, Birleşmiş Milletler'e bağlı, bağımsız, hükümetlerarası, bilim ve teknoloji tabanlı bir kuruluştur. Görevleri; barışçıl amaçlarla nükleer teknolojiyi kullanan ve kullanmayı planlayan üye ülkelere yardımcı olmak, nükleer alanda bilimsel ve teknik işbirliği sağlamak, sivil nükleer programların uygunluğu ve uluslararası nükleer maddelerin fiziksel korunması denetimlerini gerçekleştirmek. Nükleer güvenlik ve radyasyondan korunmaya yönelik standartların kabul edilmesi ve yayılması görevini üstlenen yetkili otoritedir.

6.2.5. Nükleer Enerji Ajansı (NEA)

Nükleer Enerji Ajansı⁴⁹, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatına⁵⁰ bağlı, 27 ülkenin katıldığı, hükümetlerarası bir organizasyondur. Üye ülkelere ekonomik, çevre dostu, güvenli, barışçıl amaçlı nükleer enerji kullanımı konusunda bilimsel ve teknolojik geliştirme yardımı yapmaktadır.

6.2.6. Avrupa Komisyonu (EC)

Avrupa Komisyonu⁵¹, Avrupa birliğinin yürütme organıdır. Nükleer güvenlik ve radyasyondan korunma konusunda birçok düzenleme, tavsiye ve

⁴⁸ International Atomic Energy Agency (IAEA)

⁴⁹ Nuclear Energy Agency (NEA)

⁵⁰ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

⁵¹ European Commission (EC)

kararları bulunmaktadır. AB ortak mevzuatını oluşturmakta ve bu mevzuat üye ülkelerin milli mevzuatlarına uyarlanarak uygulanmaktadır.

6.2.7. Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği (IRPA)

Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği⁵² bağımsız bir organizasyondur. Amacı radyasyondan korunma konusu ile uğraşanların iletişim kuracağı bir ortam sağlamaktır. Radyasyondan korunma konusunda bir tartışma platformu oluşturmak için 1966 yılından bu yana her 4 yılda bir uluslararası kongre gerçekleştirmektedir. Tüm dünyada kabul görecektir radyasyondan korunma standartlarının oluşturulması ve devamlılığı için çalışmaktadır.

6.3. TEMEL GÜVENLİK STANDARTLARI

Günlük hayatımızda faydalı birçok faaliyet alanında insanlar radyasyona maruz kalmaktadır. Daha önceden planlanmış olan bu faaliyetler, insanların almakta oldukları çevresel radyasyon dozunda bir artışa sebep olurlar. Bu faaliyetlere "*uygulamalar*" adı verilir. Diğer taraftan, fiili olarak maruz kalınan radyasyon ışınlamalarını azaltmak için yapılan faaliyetlere ise "*müdahaleler*" denir.

Radyasyonun sağlık üzerindeki etkilerinden dolayı, uygulama ve müdahaleler, ışınlanan insanları korumak için belirli radyasyon güvenliği standartlarına tabi olmalıdırlar. Uygulama ve müdahalelerde, gereksiz radyasyon ışınlamalarından korunmak için temel olarak yapılması gerekenleri uluslararası kapsamda harmonize etmek ve standartları belirlemek üzere en son çalışma, ICRP'nin 60 numaralı raporu (1991) esas alınarak FAO, IAEA,

⁵² International Radiation Protection Association (IRPA)

ILO, NEA/OECD, PAHO ve WHO tarafından gerçekleştirilmiş ve 1996 yılında Temel Güvenlik Standartları⁵³ (BSS) yayımlanmıştır (IAEA, 1996).

Avrupa Komisyonu tarafından ise yine aynı yıl 96/29/Euratom numaralı Temel Güvenlik Standartları Direktifi yayımlanmıştır (EURATOM, 1996).

Bu standartlar, 10 yıllık bir süre içerisinde hemen hemen tüm ülkelerin ulusal standartlarına uyarlanmıştır. Radyasyondan korunma standartlarının oluşumuna ilişkin akış diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.

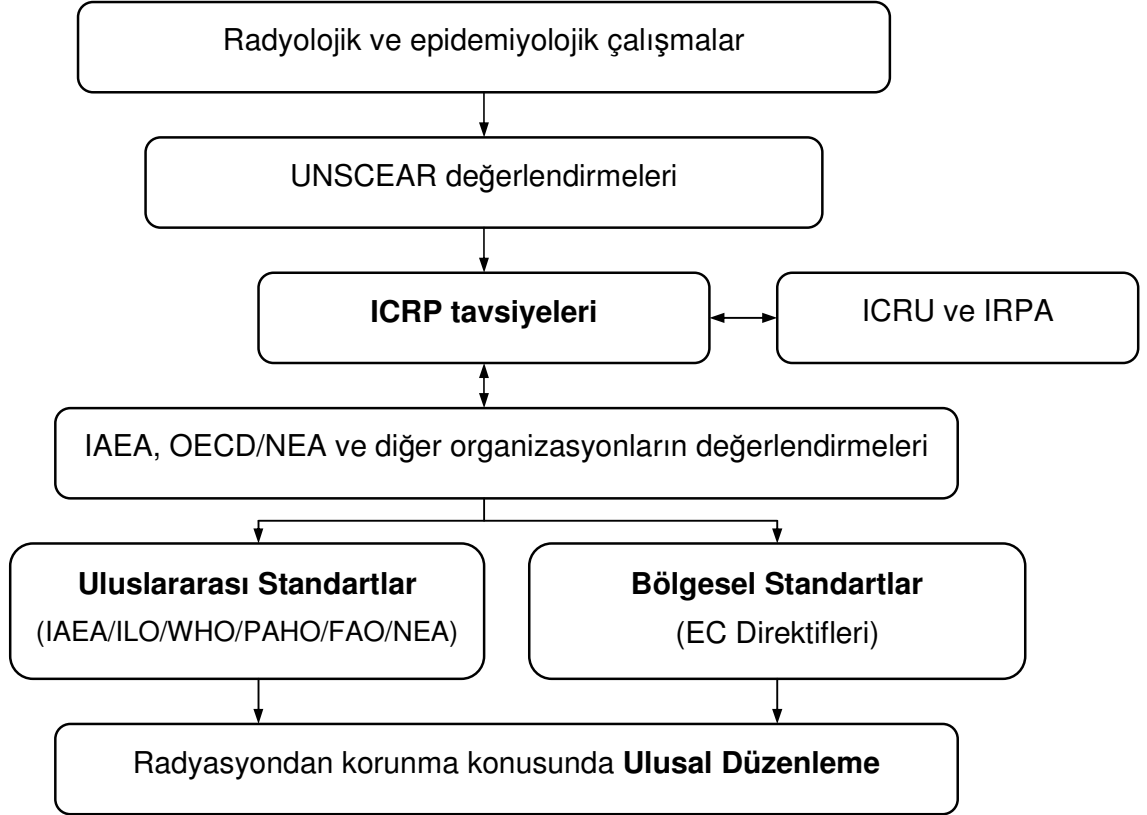
BSS'nin temel hedefi, radyasyonun deterministik etkilerinin meydana gelmesini önlemek ve stokastik etkilerinin meydana gelme olasılığını sınırlandırmaktır. Bu hedef; gerekliliği onaylanmış herhangi bir uygulama ve müdahale için, bireylerin radyasyondan korunması ve radyasyon kaynağının güvenliğinin sağlanması için gerekli şartların yerine getirilmesiyle sağlanır.

BSS'nin kapsadığı uygulamalar, kaynaklar, müdahaleler ve işlemler şunlardır:

BSS'nin Kapsamındaki Uygulamalar:

- Radyasyon veya radyoaktif maddelerin tıp, endüstri, tarım, eğitim ve araştırma amaçlarıyla kullanımı,
- Nükleer güç ile elektrik üretimi, nükleer yakıt çevriminde radyasyon veya radyoaktif madde içerebilecek bütün faaliyetler.

⁵³ International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and Safety of Radiation Sources (BSS)



Şekil 6.1. Radyasyondan korunma standartlarının oluşumu (ICRP, 2003: 219)

BSS'nin Kapsamındaki Kaynaklar:

- Radyoaktif kaynak içeren veya radyasyon üreten cihaz ve maddeler, tüketici ürünleri, kapalı kaynaklar, açık kaynaklar ve radyasyon jeneratörleri gibi,
- Işınlama tesisleri, radyoaktif cevherin işlendiği madenler, radyoaktif maddelerin işlendiği tesisler, nükleer tesisler ve radyoaktif atık işleme tesisleri.

BSS'nin Kapsamındaki Müdahaleler:

- Koruyucu önlemlerin alınmasını gerektiren kaza durumları veya müdahale ile ışınlamanın azaltılabileceği acil durumlar,
- Müdahale ile ışınlamanın azaltılabileceği doğal radyasyon kaynaklarından (evlerdeki radon) veya radyoaktif çevre bulaşmasından kaynaklanan kronik ışınlamalar.

BSS'nin Kapsamındaki Işınlamalar:

- Normal ışınlamalar (gerçekleşmesi kesinlikle beklenen ışınlamalar),
- Potansiyel ışınlamalar (gerçekleşmesi muhtemel ışınlamalar),
- Mesleki ışınlamalar (radyasyon görevlilerinin ışınlamaları),
- Tıbbi ışınlamalar (hastaların ışınlamaları),

BSS'nin Kapsamı Dışında Kalanlar:

İnsan vücudundaki normal bileşenlerden olan doğal radyoaktif potasyumdan kaynaklanan ışınlamalar, kozmik radyasyondan kaynaklanan ışınlamalar, işlenmemiş malzemelerde bulunan radyoaktiviteden kaynaklanan ışınlamalar gibi BSS'nin kurallarıyla kontrol edilemeyen ışınlamalar kapsam dışında tutulur.

6.4. ÇEVRENİN RADYASYONDAN KORUNMASI

Çevrenin ve biyotanın radyasyondan korunması için oluşturulacak bir sisteme dayanak teşkil eden ana felsefe üç ayrı yaklaşım altında sınıflandırılabilir. Bu yaklaşımlar ve temel varsayımları aşağıda özetlenmiştir:

1. Abiyotik Çevre Yaklaşımı: Eğer abiyotik çevre korunursa ekosistem ve ekosistem içerisindeki biyota da korunur savına dayanmaktadır. Bu yaklaşım biyotanın çevresel radyasyona uyum sağlayabileceğini kabullenir. Radyonüklidlerin normal konsantrasyonu zaman içerisinde değiştiğinden, normal seviye üzerine eklenecek küçük bir miktar radyoaktif bulaşma, ekosistem tarafından tolere edilebilir varsayımı ileri sürülmektedir.

2. İndikatör Tür Olarak İnsan Yaklaşımı: İyonlaştırıcı radyasyondan insanın korunması, çevrenin ve diğer türlerin de korunmasını sağlar savına dayanmaktadır.

3. Mutlak Koruma Yaklaşımı: Ekolojik sistemi korumak için tüm türlere ait popülasyonun bireyleri seviyesinde radyobiyojik değerlendirmeler yapılmalıdır savı ileri sürülmektedir. Eğer bu mümkün olamazsa kritik tür ve habitatlar üzerinde, benzer türleri de temsil eden organizmalar değerlendirmelidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; hayvanlar ve bitkiler üzerinde deterministik etkiler için eşik doz değeri yaklaşık 0,4 Gy/yıl olmasına rağmen, korunma prensibi gereği doz limitinin, 1-100 mGy/yıl gibi düşük bir düzeyde belirlenmesi gerekliliğidir.

Temel Güvenlik Standartları ile belirlenen mevcut radyasyondan korunma sistemi; doz sınırları, gerekçelendirme ve optimizasyon kuralları çerçevesinde ekonomik ve sosyal faktörleri gözönüne alarak insanın korunmasına odaklanmıştır. BSS'nin kapsamı insanlar ve iyonlaştırıcı radyasyonlar ile sınırlandırılmış, insanların korunmasını sağlayacak bu standartların, çevrenin ve diğer türlerin korunması için de yeterli olduğu (indikatör tür olarak insan yaklaşımı) öne sürülmüştür. Bu çerçevede, çevresel radyoaktivitenin kontrolü yalnızca insanlara vereceği zararın riski ile sınırlandırılmıştır.

ICRP, 26 numaralı raporunda (1977) bu sistemi şu şekilde ifade etmiştir:

“Although the principal objective of radiation protection is the achievement and maintenance of appropriately safe conditions for activities involving human exposure, the level of safety required for the protection of all human individuals is thought likely to be adequate to protect other species, although not necessarily individual members of these species. The Commission therefore believes that if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently protected.”

Zaman içerisinde ICRP bu ifadeyi değiştirerek 60 numaralı raporunda (1991) şu şekilde vermiştir:

“The Commission believes that the standard of environmental control needed to protect man to the degree currently thought desirable will ensure that other species are not put at risk. Occasionally, individual members of non-human species might be harmed, but not to the extent of endangering whole species or creating imbalance between species.”

Bu politikanın sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- ICRP'nin radyasyondan korunma sistemi insanın korunmasını sağlamak için oluşturulmuş bir sistemdir,
- Sistem, insan dışı türlerin bireylerinin zarar görmesi veya ölümünü kabul edilebilir bulmakta, ancak popülasyonu uygun şekilde korumak gerektiğini tavsiye etmektedir,
- Sistemin, bir türün tamamına zarar vermeyeceği veya türler arasında dengesizlik oluşturmayacağı düşünülmektedir (ICRP, 2003: 215-216).

Pek çok ülkede radyasyondan korunma için ICRP'nin bu yaklaşımı benimsenmiştir. Ancak, bazı durumlarda sadece insanın korunması çevrenin korunması için yeterli olmamaktadır. Bu insan-merkezli yaklaşım çevrede

radioaktif bir bulaşma olması durumunda geçerliliğini yitirmektedir. Pek çok radyolojik durumda biyotanın maruz kalacağı ışınlama insanlardan fazladır. Örnek olarak Kyshtym ve Çernobil kazalarından sonra insanların ve biyotanın aldığı dozların oranı Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Kyshtym ve Çernobil Kazalarında, kazadan bir yıl sonra biyota/insan soğurulmuş doz oranları (Alexakhin, 2000)

Ekosistem	Güney Urallar	Çernobil Kazası
Dikenli ağaç ormanı	7-27	47-116
Yapraklı ağaç ormanı	14-57	40-100
Çayır ve otlaklar	17-77	45-95
Kemirgenler	1.4-28	30
Su canlıları	0.02-2.6	-

İnsan ve biyota dozları arasındaki bu farklılık beta ve alfa radyasyonundan kaynaklanmaktadır. İnsanların aldığı dozlara kıyasla insandışı türler alfa ve beta radyasyonu sebebiyle 10-100 kat fazla doza maruz kalabilmektedirler (Johanson, 1997). Bu tür radyasyonlar bitki ve hayvanlarda yüksek seviyeli ışınlamaya ve doz alınmasına sebep olurken, alfa ve beta parçacıklarının elbiseler tarafından tutulması ile insanlar radyasyona maruz kalmamaktadır. Ayrıca, kaza ve bulaşma durumlarında mevcut korunma sistemi insanları korumak üzere uygulamalar (sığınma, tahliye, iyot tabletleri kullanılması, su ve gıdaların kontrolü, giriş-çıkış kontrolü gibi önlemler) yaparken diğer türler için bu uygulamalar öngörülmediğinden bölgedeki insan dışındaki türler insanların maruz kaldığı dozlardan çok daha fazlasına maruz kalabilmektedir.

Son zamanlarda bitkilerin ve hayvanların kronik ışınlamalarında bireysel dozlara dayanan yeni korunma kriterleri geliştirilmeğe çalışılmakta, ancak çevrenin ve biyotanın korunması için uygulanacak yöntem, seviyeler, sınırlamalar ile ilgili konsensus sağlanamamaktadır. Artan çevresel ışınlamanın oluşturacağı risklere karşı insan dışındaki diğer organizmaları korumak üzere uygulanacak niceliksel kriterlere ihtiyaç vardır. Çizelge 6.3'te flora ve faunayı iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerinden korumak için

bazı uluslararası organizasyonlar ile bazı ülkelerin düzenleyici kuruluşları tarafından tartışmaya açılan/önerilen doz limitleri verilmektedir.

Çizelge 6.3. Flora ve faunayı iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerinden korumak için önerilen doz limitleri (Brechignac and Barescut, 2003)

	Biyota sınıfı	Doz limiti (mGy/gün)
UNSCEAR, ABD, İngiltere	Karasal bitkiler	10
	Sucul hayvanlar	10
	Karasal hayvanlar	1
Kanada	Bitkiler, omurgasızlar	2,5
	Benthik omurgasızlar	1,6
	Küçük memeliler	1
	Balıklar	0,5
	Amfibiler	0,2
Rusya	Bitkiler, omurgasızlar	1
	Poikilotherm hayvanlar	0,3
	Hemamotherm hayvanlar (yaşam süresi < 5 yıl)	0,14
	Hemamotherm hayvanlar (yaşam süresi > 5 yıl)	0,07
ICRP	İnsan	0,0027

Bir memeli türü olan homo sapiens için ICRP'nin belirlediği doz limiti 0,0027 mGy/gün (1 mSv/yıl)'dür. Bu doz değeri yaklaşık olarak doğal radyasyon sebebiyle maruz kalınan doz seviyesi ile aynı mertebelerdedir. Oysa insan dışı diğer memelilerde önerilen değer 1 mGy/gün değeridir ki bu değer doğal radyasyon seviyesinin yaklaşık 100 katı mertebelerindedir. Aynı aileden farklı türler için 100 kat mertebelerde fazla bir değer önermek gerek etik ve gerekse bilimsel açıdan açıklanabilir olmaktan uzaktır.

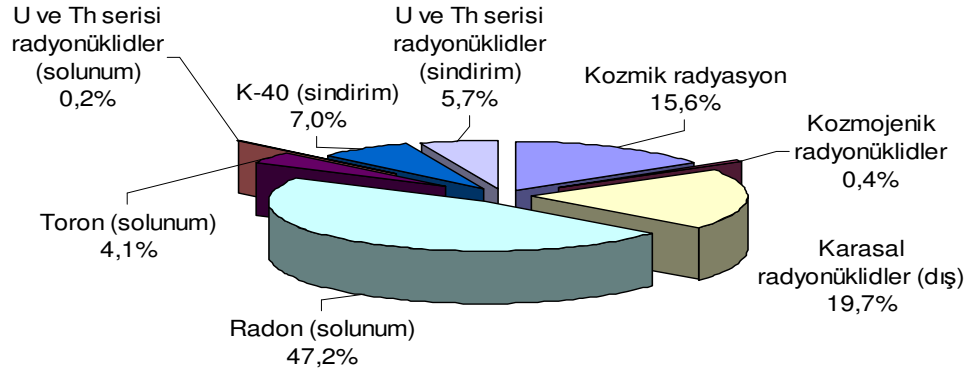
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çevre sorunları, günümüzde hızla artan ve içerisinde yaşayan tüm canlılarla birlikte dünyamızı tehdit eden en büyük tehlikelerin başında gelmektedir. Bu sorunlar, insanoğlunun daha çok refah uğruna ölçsüz ve sınırsız bir üretim-tüketim arzusu sonucu çağımızda kriz noktasına ulaşmıştır. İnsan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirleticilerin cins ve miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu kirleticiler, çevrenin doğal yapısını ve ekolojik dengeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde, bugün insan etkinliklerinin rol oynadığı ekolojik kriz, yakın bir gelecekte tüm insanlığı tehdit edebilecek; küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, ormanların hızla yok olması, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesi, çölleşme, biyo-çeşitliliğin azalması, asit yağmurları gibi sorunların yanında çevrenin radyoaktif kirliliği ve radyasyon da canlılığı tehdit eden bir faktör olarak ortaya çıkabilecektir.

Radyasyon yaşadığımız evrenin ayrılmaz bir parçasıdır ve dünyadaki yaşam, radyasyonun varlığı ile ortaya çıkmıştır. Canlı ile radyasyon ilişkisi biyosferde ilk canlı organizmanın oluşumuyla başlamıştır.

Tüm canlılar, sürekli olarak ekosferde bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyonlar ile güneşten ve dış uzaydan kaynaklanan kozmik ışınların etkisi altında kalarak yaşamlarını sürdürmektedir. Yeryüzündeki doğal radyasyon düzeyleri birçok faktöre bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. En önemli faktör olan, yerkabuğunda bulunan radyoaktivite konsantrasyonları, ortamın jeolojik ve kimyasal oluşumuna bağlı olarak çok geniş bir aralıkta değişiklik gösterebilmektedir. Öte yandan, deniz seviyesinden yükseklerle çıkıldıkça ve ekvatorlardan kutuplara doğru gidildikçe kozmik ışınlarla bağlı radyasyon şiddeti artmaktadır.

Doğal radyasyon ışınlaması; çevredeki radyonüklidlerin konsantrasyonuna, enleme, deniz seviyesinden yüksekliğe, yaşanan yere, tüketim alışkanlıklarına göre değişiklik göstermekle birlikte, tüm dünyada doğal radyasyon sebepli toplam yıllık doz 1-10 mSv arasında değişmekte olup, nüfus ağırlıklı yıllık etkin doz ortalaması 2,4 mSv/yıl'dır. Bu dozun kaynaklarına göre oransal dağılımı Şekil 7.1'de verilmektedir.



Şekil 7.1. Doğal radyasyon kaynaklarının ortalama toplam doza oransal katkıları

Yirminci yüzyılın başlarına kadar canlılar, sadece doğal radyasyon kaynaklarının etkisinde kalmışlardır. Ancak, radyoaktivitenin keşfi ve radyoaktif kaynakların tıp, endüstri, tarım ve araştırma alanlarında kullanılması, nükleer teknoloji uygulamaları, nükleer yakıt çevrimi, nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar yoluyla çevreye salınan radyoaktivite sebebiyle, yapay radyasyonlar da canlıları etkilemeye başlamıştır. Son 50 yıl içerisinde bazı bölgelerde çevredeki yapay radyoaktivite seviyesindeki artış sebebi kronik ışınlama ekosisteme zarar verecek boyutlara ulaşmıştır.

Çevremizdeki yapay radyonüklidlerin ana kaynakları; atmosferde gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri ve büyük nükleer kazalardır. Atmosferik nükleer silah denemeleri sonucunda, Çernobil nükleer reaktör kazasından kaynaklanan radyoaktif salımdan 100 kat daha fazla radyoaktif

aerosol, 10.000 kat daha fazla trityum, 3 kat daha fazla kripton-85 atmosfere salınmıştır. Çernobil kazasında ise, dünyadaki tüm nükleer tesislerden kaynaklanan radyoaktif salımdan 10 kat daha fazla radyoaktif gaz, 30 kat daha fazla radyoaktif aerosol ve sıvı çevreye salınmıştır (Robeau, 1996). Böylece küresel bir kirliliğin yanı sıra, dünyanın çeşitli bölgelerinde antropojenik radyoaktif bulaşma bölgeleri ortaya çıkmıştır. Çevreye salınan radyonüklidlerden kaynaklanan yapay radyasyon sebepli yıllık doz; yaşanan bölgenin nükleer tesislere veya radyoaktif bulaşma bölgelerine uzaklığı ile değişiklik göstermekte, yerel ve bölgesel olarak ise çok yüksek değerlere çıkabilmektedir. Yapay çevresel radyoaktivite sebepli küresel ortalama yıllık etkin doz yaklaşık 7 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır.

Çevresel radyasyon, canlı organizmaların her hücresinde bulunan kalıtsal materyal DNA'yı kaçınılmaz olarak etkilemektedir. Bu etkileşim sonucunda, somatik hücrelerde ya da üreme hücrelerinde bulunan DNA'nın alt birimlerinin dizilimi ya da bileşimi değişebilmekte ve böylece mutasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu mutasyonlar; organizmada kanser oluşumuna veya gelecek nesillerde anomalilere neden olabilmektedir. Kromozom veya gen bozukluklarına uğramış hücrenin hızlı mitozunun ürünü olan kanser, bir somatik mutasyon örneğidir. Üreme hücrelerinde meydana gelen ve gelecek nesillerde farklı özellikleri ortaya çıkarabilecek mutasyonlar ise genetik mutasyonlardır.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP), 1977 ve 1991 yıllarında yayımladığı tavsiye raporlarında, radyasyonun stokastik etkileri (kanser oluşumu ve genetik etkiler) için bir eşik doz değerinin bulunmadığını belirtmiş, doz ve etki arasında doğrusal bir bağıntı olduğu kabul edilerek, müsaade edilen doz sınırları çok düşük düzeylere indirilmiş ve gereksiz olarak hiçbir radyasyon dozuna maruz kalınmaması önerilmiştir. İnsanların özellikle büyük toplum gruplarının, küçük olsa dahi sürekli olarak radyasyona maruz kalmasının toplum sağlığını olumsuz yönde etkileyeceği görüşü, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi

(UNSCEAR) tarafından yayınlanan raporlarla da desteklenmiştir. Yapılan epidemiyolojik ve istatistik çalışmalardan, toplumda görülen kanser vakalarının belirli bir oranının iyonlaştırıcı radyasyonlardan meydana gelebileceği ileri sürülmüştür. Özellikle akciğer kanser vakalarının %20 kadarı havadaki radyoaktif radon gazı ve bunun bozunma ürünlerinin solunumu sonucu akciğer bronşlarının aldığı doza bağlanmaktadır. Ayrıca, evresel radyasyonun tüm kanserlerin %5'inin ve tüm ölümlerin %1,26'sının sebebi olduğu değerlendirilmektedir (IAEA, 2002: 5).

Düşük doz ve düşük doz hızlarında radyasyondan korunma araştırmalarının mevcut sonuçları şunlardır (OECD, 1998: 7-10):

- Düşük dozlarda iyonlaştırıcı radyasyonun somatik etkilerinin başında kanser gelmektedir. 500 mGy'den yüksek dozlarda deterministik etkiler ortaya çıkmaktadır.
- Popülasyonda doğal olarak oluşan kanserlerin oranı yüksektir. Radyojenik kanserlerin oranı ise düşük olup, iyonlaştırıcı radyasyon, radyasyondan korunma için belirlenen doz seviyelerinde zayıf karsinojendir.
- Kanser oluşumu stokastik bir etkidir. Bu nedenle kanser oluşumu birey için önceden belirlenemez, sadece ışınlanmış popülasyonda artmış kanser sayısı olarak belirtilebilir. Bireysel seviyede, sadece artan doz ile artmış risk söz konusudur.
- Radyasyon etkisiyle oluşan kanserleri diğer kanserlerden ayırt edici bir özellik olmadığından, herhangi bir bireyde oluşmuş kanserin nedenini kesin olarak belirlemek mümkün değildir.
- İnsanların akut iyonlaştırıcı radyasyon ışınlanmalarına olumlu tepkisi gözlenmemiştir.

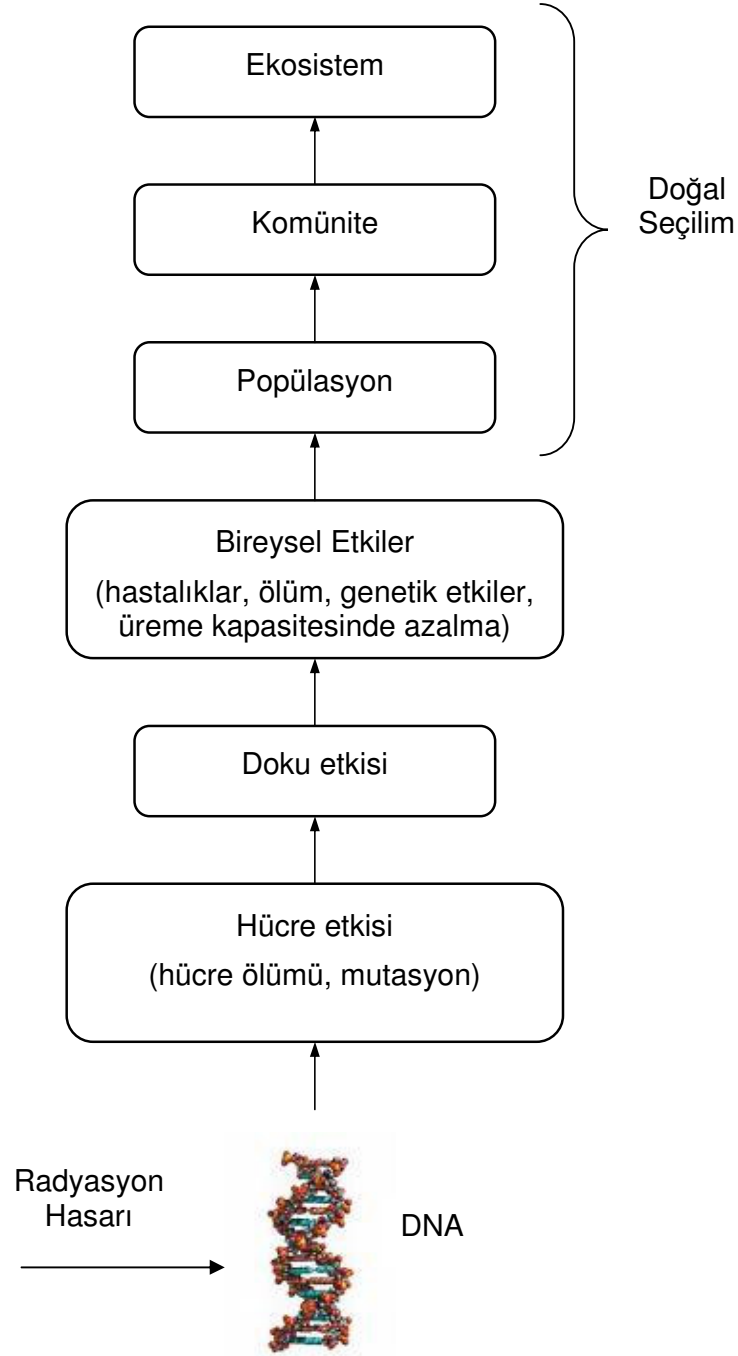
- İnsanlarda radyasyonun kalıtsal etkileri istatistiksel olarak anlamlı epidemiyolojik çalışma sonuçları ile tespit edilmemiştir.
- Düşük doz ve düşük doz hızı sebepli karsinogenik etkilerin varlığı veya yokluğu tek başına epidemiyolojik çalışmalarla kesin olarak belirlenemez. Ancak, düşük doz ve düşük doz hızında radyasyon etkilerine dair epidemiyolojik verilerin eksikliği bu etkilerin olmadığına ispatı değildir.
- Radyasyonun biyolojik etkileri, birçok kişisel faktör (yaş, cinsiyet, genetik yapı) ile çevresel faktörlere (sigara içimi, enfeksiyon ajanları) bağlı olarak değişebilmektedir. Embriyo/fetus, iyonlaştırıcı radyasyona karşı çocuklardan ve yetişkinlerden daha hassastır. Radyasyona karşı bireysel duyarlılığı ölçecek bir metot henüz geliştirilmemiştir.
- Düşük dozlarda, doz etki bağıntısının şekli tam olarak bilinmemektedir. Ancak yüksek radyasyon dozlarına maruz kalındığında oluşan etkileri kullanarak düşük dozlar için risk tahmini yapılabilmektedir.

Hayvanlar üzerinde yapılan deneyler, tümör oluşumuna dair anlamlı bir etki gözlenen en düşük doz seviyesinin, 100-200 mGy aralığında değiştiğini göstermektedir (UNSCEAR, 2000b: 107). Bununla beraber, maruz kalınan radyasyon dozu ne kadar küçük olursa olsun her dozun bir etkisi vardır. Ayrıca, az miktarda radyasyona maruz kalan çok sayıdaki organizmanın gen havuzunda meydana gelen mutasyon miktarı, yüksek dozda radyasyona maruz kalan az sayıdaki organizmanın gen havuzunda meydana gelen mutasyon miktarından çok daha fazladır (Demirsoy, 2000: 588).

Öte yandan, çevre radyoaktivitesinin organizma toplulukları üzerindeki oluşturacağı etkinin olumsuz çevresel şartlarla birleşmesi popülasyon üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Eğer radyasyonun etkisi ışınlanan popülasyonun bireylerinde somatik değişikliklere neden olursa ve popülasyonda bu somatik değişikliğe uğrayan birey sayısı çoksa, popülasyon anlamlı olarak küçülecektir.

İnsanda kendi kendine oluşan mutasyonların %1 - %6'sı çevresel radyasyondan kaynaklanmaktadır (Hall, 1988: 425). Çevre radyasyonu, mutasyon oluşturabilme yetisi ile geçmişte evrimsel sürece katkı yapmış ve canlılığın gelişmesi için çok önemli bir rol üstlenmiş olmasına karşın kontrol edilmediği takdirde gelecekte canlılık için tehlike oluşturabilecektir. Son zamanlarda, çevresel radyoaktivite miktarında artış ve buna bağlı olarak canlı organizmaların aldıkları radyasyon dozunun artması, canlıların binlerce yıl içerisinde oluşturduğu gen havuzunun yapısının bozulmasına neden olacak doğal mutasyon frekansını artıracaktır. Oluşacak mutasyonların gelecekte ne gibi olumsuz değişikliklere neden olacağını da bugünden hiç kimse açık olarak söyleyememektedir (Demirsoy, 1991: 247).

Radyasyonun etkileri geri dönülemez olmaları açısından son derece dramatiktir (Tuna, 2001: 75). İlk DNA hasarından başlayarak tüm ekosisteme kadar devam eden radyasyonun etkilerinin zincir reaksiyonu şematik olarak Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Radyasyon etkilerinin şematik akış diyagramı (ICRP, 2003: 236)

Dünyada mevcut radyasyondan korunma sistem ve politikaları; doz sınırlandırması, gerekçelendirme ve optimizasyon kuralları çerçevesinde ekonomik ve sosyal faktörleri gözönüne alarak insanın korunmasına

odaklanmıştır. Bu kapsamda oluşturulan Temel Güvenlik Standartları, çevre radyasyonunu doz sınırlama sistemi dışında bırakmış ve insanı korumanın çevreyi ve diğer türleri korumak için yeterli olduğu savına dayandırılmıştır. Bu çerçevede, radyasyon uygulamalarının gerekçelendirilmesi fayda-maliyet analizine, optimizasyonu ise ekonomik ve sosyal faktörlere dayandırılmakta ve çevreye hiçbir atıf yapılmamaktadır (Pentreath, 1999).

Bu yaklaşım pek çok ülkede radyasyondan korunma standardı olarak kabul edilmektedir. Öte yandan bazı durumlarda sadece insanın korunması çevrenin korunması için yeterli olmamaktadır. Mevcut radyasyondan korunma sistemi insanları korumak üzere uygulamalar yaparken, diğer türler insanların maruz kaldığı dozlardan çok daha fazlasına maruz kalabilmektedir. Radyoaktif bir bulaşma olması durumunda insandışı türler, alfa ve beta radyasyonuna karşı korumasız olmaları ve insanları korumak üzere yapılan uygulamalar sebebiyle insanların aldığı dozlara kıyasla 10-100 kat daha fazla doza maruz kalabilmektedirler (Johanson, 1997).

Prensip olarak insanlarda ve diğer türlerde radyasyon etkisinin hücre seviyesindeki etkileri arasında bir fark bulunmamaktadır. Ancak, korunma felsefesinde farklılıklar bulunmaktadır (Johansson, 1995). Son zamanlarda bitkilerin ve hayvanların kronik ışınlanmalarında bireysel dozlara dayanan yeni korunma kriterleri geliştirilmeğe çalışılmakta, ancak çevrenin ve biyotanın korunması için uygulanacak yöntem ve sınırlamalarla ilgili konsensus sağlanamamaktadır. Artan çevresel radyasyon ışınlamasının oluşturacağı risklere karşı insan dışındaki diğer organizmaları korumak üzere uygulanacak niceliksel kriterlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) bu konuda bazı taslak metinler oluşturmuşlardır. Ancak bu çalışmalar yine insan-merkezli bir etik anlayış içerisinde yapılmaktadır. Bir memeli türü olan homo sapiens için ICRP'nin belirlediği doz limiti 0,0027 mGy/gün (1 mSv/yıl) iken, insan dışı diğer

memelilerde önerilen doz limiti 1 mGy/gün değeridir ki bu değer doğal radyasyon seviyesinin yaklaşık 100 katı mertebelerindedir. Aynı aileden farklı türler için 350 kat fazla bir değer önermek gerek etik ve gerekse bilimsel açıdan açıklanabilir olmaktan uzaktır. IAEA standartlarında da insan dışındaki türler için deterministik etkiler eşik dozları üzerine sistem kurulmaya çalışılmakta ancak türlerin stokastik etkileri tamamen değerlendirme dışı tutulmakta, türlerin gen havuzunun sağlığı düşünülmemektedir. Bu tam bir çifte standarttır (Frechette and Persson, 2001: 26-28).

Konunun biyo-merkezli bakış açısı içerisinde çok yönlü incelenmesine ihtiyaç vardır. Bu çerçevede;

1. Karasal ve sucul organizmalar yaşamsal ve morfolojik açıdan birbirinden farklı binlerce türden oluşmaktadır. Bu organizmalar için kritik doz seviyelerinin tespiti, maruz kaldıkları dozların tespiti ve radyasyondan korunma için doz limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir.
2. Biyota içerisinde, insan dışındaki türlerin maruz kaldığı çevresel radyasyon araştırmaları yetersizdir. Bu araştırmalar sistematik olarak tamamlanmalıdır. Özellikle düşük doz ve doz hızlarında, biyotada radyasyon etkileri ve özellikle genetik etkiler detaylı olarak incelenmelidir.
3. Şu an için tüm flora ve faunada radyasyonun biyolojik etkilerine yönelik çalışmalar tamamlanmadığından ve doz hesaplamalarında kullanılan ampirik değerler flora ve faunadaki tüm türler için tespit edilmediğinden, limitler belirlenirken doz seviyeleri yerine pratik olması bakımından çevredeki bulaşmaya yönelik türetilmiş değerler kullanılmalıdır.

4. İnsan ve diğer türlerin radyasyondan korunmasındaki kriterler farklılık arz etmektedir. Örnek olarak, bir kaza durumunda çevrenin dekontaminasyonu biyota için faydadan çok zarar oluşturabilmektedir. Fiziksel dekontaminasyon çevreyi fiziksel olarak değiştirecek, kimyasal dekontaminasyon ise çevreyi tamamıyla yaşanamaz bir konuma getirebilecektir. Ayrıca, hayvanların ve bitkilerin radyasyondan kendilerini korumaları mümkün olmamakta, özellikle bulaşma mahallerinde ve tahliye bölgelerinde insan giriş-çıkışı yasaklanırken, hayvan ve bitkiler bu bölgelerde yaşamını sürdürmeye devam etmektedir. Bu çerçevede, radyasyondan korunmada optimizasyon ve gerekçelendirme prensipleri gözden geçirilmelidir.
5. Değişik türlerin ve habitatların maruz kaldıkları çevresel radyasyon, insanın maruz kaldığı çevresel radyasyona göre çok büyük farklılıklar göstermektedir. Biyota için bu aralık çok geniştir. Örnek olarak; derin denizlerdeki bir balık, kozmik radyasyon ve karasal radyasyondan uzak, kalın bir su tabakası ile zırhlı bir biçimde yaşamını sürdürürken, yeraltında yaşayan bir hayvan, aktivite konsantrasyonu yüzbinlerce kat daha yüksek, radonca zengin bir bölgede yaşıyor olabilir. Ekosistemdeki tüm türlerde radyasyonun etkilerini değerlendirmek mümkün olamayacağından referans organizmalar için ve sahaya özel değerlendirmeler yapılmalıdır.
6. Radyasyonun stokastik etkilerinden olan kanser, flora için söz konusu değildir. Kanserin, gecikmiş etki olması, daha çok ileri yaşlarda ortaya çıkması ve hayvanların nadiren çok ileri yaşlara kadar yaşaması sebebiyle, hayvanların ölüm sebepleri arasında kanser çok az yer almaktadır. Öte yandan genetik etkilerin eşiksiz özelliklerinden dolayı bu etkilerden tamamen korunmak mümkün değildir. Bu sebeple biyota, radyasyonun deterministik etkilerinden

korunmalı, stokastik etkilerin sınırlandırılması için türlere özgü ileri değerlendirmeler neticesinde doz ve doz hızına ilave kısıtlamalar getirilmelidir.

7. İyonlaştırıcı radyasyonun etkilerinden çevreyi korumak için kriter ve yaklaşımlar diğer çevresel kirleticilerde uygulanan yaklaşımlar da gözönüne alınarak biyo-merkezli bir bakış açısı ile geliştirilmelidir.

Canlılığın ortaya çıkışında etken olan doğal çevrenin, biyolojik evrime olan etkisi ve katkısı bugüne gelmemizi sağlamıştır. Tükenen türler hep doğal çevrelerin değişimi sonucunda ortadan kalkmışlar ve yerlerini yenilerine terketmişlerdir (Alpagut, 1997).

Geleceğin radyasyondan korunma standartları yalnızca insanların korunmasını değil, çevrenin korunmasını da garanti altına almalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Alexakhin, R. M., Fesenko, S. V., Geraskin, S. A., Sanzharova, N. I., Spirin, Y. V., Spiridonov, S. I., Gontarenko, I. A., Strand, P., (2005), Effects of Radiation in Contaminated Areas, **Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienna, 399-409.

Alexakhin, R. M., (2000), **Radiation Protection of Humans and Biota in the Environment**, 10th International Congress of the International Radiation Protection Association, Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem, IRPA-10, 14-19 May 2000, Hiroshima, Japan.

Alpagut, B., (1997), Doğal Çevre ve İnsanın Evrimi, **İnsan-Çevre-Toplum**, İmge Kitabevi, Ankara, 113-119.

Arıkan, İ. H., (1999), **Nükleer Kazalarda Alınabilecek Tedbirler, Yapılabilecek İşlemler**, MSB ARGE 99 NBC Semineri, 27 Mayıs 1999, Ankara.

Bayvas, F., (1989), **Radyoaktivite, Radyasyon ve Nükleer Enerji**, Ankara.

Bennett, B. G., (2000), Worldwide Panorama of Radioactive Residues in the Environment, **Restoration of Environments with Radioactive Residues**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienna, 11-24.

Brechignac, F., Barescut, J. C., (2003), From human to environmental radioprotection: Some crucial issues worth considering, **Protection of the Environment from Ionising Radiation: The Development and Application of a System of Radiation Protection for the Environment**, International Atomic Energy Agency, Vienna, 119-128.

Cember, H., (1983), **Introduction to Health Physics**, McGraw-Hill, Inc., New York.

Cigna, A. A., (1993), **Consideration on the Environmental Aspects of Radiation Protection**, Workshop on Radiation Protection Toward the Turn of the Century, 11-13 January 1993, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Clarke, R. H., (2002), The Role of Ethics and Principles, **Better Integration of Radiation Protection in Modern Society**, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 229-236.

Demirsoy, A., (2000), **Kalıtım ve Evrim**, Meteksan AŞ., Ankara.

Demirsoy, A., (1991), **Evrenin Çocukları "Yaratılışın Öyküsü"**, Meteksan AŞ., Ankara.

EC, (2004), **Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew**, Radiation Protection 140, European Communities, Belgium.

EURATOM, (1996), **Laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation**, Council Directive 96/29/EURATOM, 13 May 1996.

FMO, (2006), **Nükleer Enerji Raporu**, TMMOB Fizik Mühendisleri Odası, Ankara.

FMO, (2000), **Nükleer Enerji 2000**, TMMOB Fizik Mühendisleri Odası, Ankara.

Frechette, K. S., Persson, L., (2001), **Ethical Problems in Radiation Protection**, SSI Report, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm.

Gürel, A. O., (2001), **Doğa Bilimleri Tarihi**, İmge Kitabevi, Ankara.

Haktanır, K., Arcak, S., (1998), **Çevre Kirliliği**, A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları No:1503, Ankara.

Hall, E. J., (1988), **Radiobiology for the Radiologist**, Lippincott Company, Philadelphia.

Hanman, I. W. F., (1992), Radyasyon Tedavisi, **Klinik Onkoloji**, Türk Kanser Araştırma ve Savaş Kurumu, Ankara, 112-114.

IAEA, (2004), **Radiation, People and the Environment**, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, (2003), **Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation**, International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No. 419, Vienna.

IAEA, (2002), **Natural and induced radioactivity in food**, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1287, Vienna.

IAEA, (2001), **The International Nuclear Event Scale (INES) User's Manual**, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, (1996), **International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**, International Atomic Energy Agency, Safety Series No.115, Vienna.

IAEA, (1994), **Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency**, International Atomic Energy Agency, Safety Series No.109, Vienna.

IAEA, (1992), **Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards**, International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No.332, Vienna.

IAEA, (1988), **Assessing the Impact of Deep Sea Disposal of Low Level Radioactive Waste on Living Marine Resources**, International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No.288, Vienna.

IAEA, (1982), **Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases**, International Atomic Energy Agency, Safety Series No.57, Vienna.

ICRP, (2006), **Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 101, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (2003), **A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 91, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1996), **Age-dependent doses to members of public from intake of radionuclides**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 72, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1995), **Age-dependent doses to members of public from intake of radionuclides**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 71, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1994a), **Age-dependent doses to members of public from intake of radionuclides**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 67, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1994b), **Human respiratory tract model for radiological protection**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 66, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1991), **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1986), **Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 50, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, (1977), **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford.

Johanson, K. J., (1997), Impact of radiation on the Environment, **Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienna, 63-69.

Johansson, G., (1995), Protection of the Natural Environment and the Need to Formulate Criteria, **Environmental Impact of Radioactive Releases**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienna, 569-572.

Keating, M., (1993), **Yeryüzü Zirvesinde Değişimin Gündemi**, Gündem 21 ve Diğer Rio Anlaşmalarının Popüler Metinleri, UNEP Türkiye Komitesi Yayını, Ankara.

Kışlalıoğlu, M., Berkes, F., (1994), **Ekoloji ve Çevre Bilimleri**, Remzi Kitabevi, İstanbul.

Kumar, V., Cotran, R. S., Robbins, S. L., (2002), **Basic Pathology**, W.B. Saunders Company, Philadelphia.

Kumaş, A., (1993), **Radyoloji**, Tamer Ofset, Ankara.

Martignoni, K., Kaul, A., (1997), Assessment of Radiation Health Effects, **Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienna, 45-59.

OECD, (2002), **Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts**, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

OECD, (1998), **Developments in Radiation Health Science and Their Impact on Radiation Protection**, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Özden, N., (1983), **Nükleer Çağın İlk 40 Yılı**, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Öztürk, E., (2003), Radyasyonun Biyolojik Etkileri, **Ulusal Tıbbi NBC Savunması Sempozyum Kitabı**, TSK Sağlık Komutanlığı Gülhane Askeri Tıp Akademisi, Ankara, 11-19.

Pentreath, R. J., (1999), **A system for radiological protection of the environment: some initial thoughts and ideas**, J. Radiol. Prot., Vol.19, No.2, 117-128.

Ponting, C., (2000), **Dünyanın Yeşil Tarihi: Çevre ve Uygarlıkların Çöküşü**, Sabancı Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.

PRIS, (2007), **Power Reactors Information System data base**; International Atomic Energy Agency, IAEA/PRIS, <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>.

Robeau, D., (1996), Impact of Radiation on the Environment, **Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk**, Volume 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 41-47.

Salomaa, S., (2005), Contributed Papers on Biological Effects and Population and Ecosystem Studies, **Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation**, International Atomic Energy Agency, Proceedings Series, Vienne, 325-335.

TAEK, (2006), **Çernobil Kazasının Diğer Ülkeler Üzerindeki Etkileri**, 20. Yılında Çernobil, Çernobil Serisi No.5, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara.

TAEK, (1988), **Türkiye'de Çernobil Sonrası Radyasyon ve Radyoaktivite Ölçümleri**, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara.

TÇV, (2001), **Ansiklopedik Çevre Sözlüğü**, Türkiye Çevre Vakfı Yayını No:142, Ankara.

Thorne, M. C., (2003), **Background radiation: natural and man-made**, Journal of Radiological Protection, Institute of Physics Publishing, 23, 29-42.

Till, J. E., Meyer, H. R., (1983), **Radiological Assessment: A Textbook on Environmental Dose Analysis**, NUREG/CR-3332, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.

Topçuoğlu, S., (2005), Denizlerin Radyoaktif Kirliliği, **Deniz Kirliliği**, Tüdev Yayınları No.21, İstanbul, 313-354.

Tuna, G., (2001), **Yeni Güvenlik: Küresel Ekonomik, Ekolojik ve Sosyal Tehditler**, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti, Ankara.

UNSCEAR, (2000a), **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I: Sources, United Nations, New York.

UNSCEAR, (2000b), **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume II: Effects, United Nations, New York.

UNSCEAR, (1996), **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.

UNSCEAR, (1993), **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.

UNSCEAR, (1988), **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.

Yücel, B., Arıkan, İ. H., (2001), **Binalarda Radon ve Sağlık Etkileri**, TMMOB Fizik Mühendisleri Odası Bülteni, 16-19.

Yülek, G. G., (1994), **Nükleer Enerji ve Çevre**, Sek Yayınları, Ankara.

Yülek, G. G., (1992), **Radyasyon Fiziği ve Radyasyondan Korunma**, Sek Yayınları, Ankara.

Zinger-Gize, I., Copplestone, D., Williams, C., (2003), Regulatory guidance in England and wales to protect wildlife from ionizing radiation, **Protection of the Environment from Ionising Radiation: The Development and Application of a System of Radiation Protection for the Environment**, International Atomic Energy Agency, Vienna, 196-202.

ÖZET

Son 50 yıl içerisinde nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar sonucu çevre radyoaktivite seviyesinde küresel düzeyde artış meydana gelmiş, bazı bölgelerde çevre radyoaktivite seviyesindeki artış ekosisteme önemli derecede zarar verecek düzeylere erişmiştir.

Çevreye giderek artan radyoaktif madde salımı, canlı organizmaların yerel, bölgesel ve hatta küresel düzeyde fazladan ışınlanmalarına neden olmuştur. Böylece, çevresel radyoaktivite kaynaklı ışınlamanın, küresel çevre sorunlarından biri olduğunun farkına varılmıştır.

Yıllar boyunca geliştirilmiş olan mevcut uluslararası radyasyondan korunma sistemi net olarak belirlenmiş ilke ve standart metotları içermektedir. Bu sistem, insanı bireysel bir tür olarak merkeze yerleştirmiştir. Başka bir deyişle, radyasyondan korunma sistemi insanın korunması temeline dayandırılmıştır.

Çevrenin korunması, genellikle, bu insan merkezli bakış açısı kapsamında bir alt öge olarak değerlendirilmektedir. İnsanlar tarafından alınan doz ile ortamdaki diğer organizmalar tarafından alınan doz her zaman birbirinden farklı olacağından, bu değerlendirmenin yanlış olduğu açıkça görülmektedir.

Genom yapısı ve işlevlerine ilişkin mevcut bilgilerin yanı sıra modern moleküler biyoloji yöntemleri, radyasyonun biyota üzerindeki etkileri konusundaki anlayışa yeni boyutlar getirilmesini sağlamaktadır. Radyasyonun muhtemel etkileri açısından prensipte insan hücresi ile diğer türlerin hücreleri arasında, özellikle memelilerde, bir fark bulunmamakla birlikte, radyasyondan korunma felsefesi bu türler arasında farklılık gözetmektedir.

Bu çalışmada, evre radyasyonunun biyota üzerindeki etkileri ve çevrenin iyonlaştırıcı radyasyondan korunmasındaki problemlere ilişkin önemli hususlar detaylı olarak tartışılmıştır. Mevcut insan-merkezli radyasyondan korunma sistemi ve felsefesi biyo-merkezli bakış açısıyla incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: evresel radyoaktivite, iyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri, radyasyondan korunma sistemi, çevrenin korunması, biyotanın korunması

ABSTRACT

During the last 50 years the radiation background level has been changed on a global scale by fallout from nuclear weapons testing and by accidents in nuclear installations. In some areas the increase of the environmental radioactivity level has been significant enough to damage ecosystems.

The overgrowing release of radioactive substances to the environment has resulted in local, regional and also global extra irradiation of all living organism in the environment. Moreover, exposure from environmental radioactivity has been recognised one of the global environmental problems.

The current international system of radiological protection, which has been developed over many years, contains clearly defined principles and standard methods. This system places man, as an individual species, at its centre. In other words, radiological protection system has always been based on protection of man.

Environmental protection is often regarded as if it were a subset of this anthropocentric framework. Clearly, this should not be the case. In any situation, the doses received by man will always be different than those received by other organisms in the environment.

Current knowledge on the structure and function of genome, as well as modern molecular biological methods could well provide new dimensions to our understanding of the effects of radiation on biota. In principle, there is no difference on a cellular level between the possible effects of radiation on humans and that on other species especially on mammals. Nevertheless, there is a difference in the protection philosophy between the species.

In this study; some of the most important aspects of the impact of environmental radiation on the biota and problems of the environmental protection against ionising radiation were discussed in details. The current anthropocentric system and philosophy of radiological protection were examined in biocentric point of view.

Key words: environmental radioactivity, biological effects of ionising radiation, radiological protection system, protection of environment, protection of biota

EK-1. RADYASYONLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

1. TEMEL KAVRAMLAR

Atom; elementlerin özelliklerini taşıyan en küçük parçasıdır ve kendi kütlelerinin hemen hemen tamamını oluşturan pozitif yüklü bir çekirdekle, bu çekirdek etrafındaki belirli yörüngelerde bulunan negatif yüklü **elektron**lardan oluşmaktadır⁵⁴. Atomların özelliklerini, çekirdeklerinin yapısı ile yörünge elektronlarının sayısı ve dizilişi belirler.

Çekirdek pozitif yüklü **proton**lar ve yüksüz **nötron**lardan oluşur. Proton ve nötronun herbirine **nükleon** denir. Nötr atomda elektron sayısı çekirdeğindeki proton sayısına eşittir⁵⁵.

Bir atom ya da çekirdek A_ZX sembolü ile gösterilir. Burada X; atomun kimyasal sembolü, Z; çekirdekteki proton sayısını gösteren **atom numarası**, A; çekirdekteki proton ve nötron sayıları toplamıyla tanımlanan **kütle numarası**dır. Proton sayıları aynı, nötron sayıları farklı atomlara **izotop**⁵⁶; nötron sayıları aynı, proton sayıları farklı atomlara **izoton**⁵⁷; nükleon sayıları

⁵⁴ Çekirdek çevresindeki elektronların bulunduğu ya da elektron bulutunun en yoğun olduğu yerler olarak adlandırılan yörüngelerin yarıçapları $\approx 10^{-10}$ m olmasına karşın, çekirdeğin yarıçapı $\approx 10^{-15}$ m civarındadır.

⁵⁵ Protonun yükü $1,6 \times 10^{-19}$ C, elektronun yükü ise $-1,6 \times 10^{-19}$ C olduğundan eşit sayıda proton ve elektronun bulunduğu atomun elektrik yükü olmayacaktır.

⁵⁶ Örnek olarak; ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$ sırasıyla hidrojen, döteryum ve trityum olup hidrojenin izotoplarıdır.

⁵⁷ Örnek olarak; ${}^{18}_9\text{F}$, ${}^{19}_{10}\text{Ne}$

aynı, proton sayıları farklı atomlara ise **izobar**⁵⁸ adı verilmektedir. Bir elementin bütün izotopları aynı kimyasal özellikleri göstermesine rağmen fiziksel özellikleri farklıdır.

Bir atomun çekirdeğindeki nötronun protona oranı kafi derecede büyükse, bu durum çekirdeğin kararsız hale gelmesine yol açar. Kararsız haldeki çekirdek, yapısını değiştirerek (bozunarak, enerjik parçacıklar salarak) kararlı hale gelir. Sonuçta başlangıçtaki atomdan tamamen farklı bir atoma dönüşür. Bu yeni atoma **bozunma ürünü**, çekirdekten yayılan enerjik parçacıklara ve ışınlara **radasyon**, bu fiziksel olaya **radyoaktivlik** ve bu özellikteki elementlere de **radyoizotop** veya **radyoelement** denilmektedir⁵⁹. Radyoaktivite kontrol edilemeyen bir olaydır.

2. RADYASYON TÜRLERİ

Bir atomun elektronlarından bir veya bir kaçının yörüngelerinden koparılaraq serbest hale gelmesi veya atomun elektron kazanması sonucu atomun elektriksel olarak yüklenmesi olayına **iyonizasyon**, iyonizasyon sonucu oluşan atoma **iyon** denir. **İyonlaştırıcı radyasyon**; madde içerisinden geçerken ortama enerji aktarmak sureti ile ortamdaki atomları doğrudan veya dolaylı yollarla iyonlaştıran radyasyondur.

Radyoaktif bozunma sonucu, atomun çekirdeğinden ortaya çıkan iyonlaştırıcı radyasyonlar alfa parçacıkları, beta parçacıkları ve gama ışınlarıdır. Bu radyasyonlar ile, atomun elektron seviyelerinden ortaya çıkan ve yapay olarak da üretilen X-ışınlarının özellikleri aşağıda verilmiştir.

⁵⁸ Örnek olarak; $^{14}\text{C}_6$, $^{14}\text{N}_7$

⁵⁹ Periyodik cetvelde bizmattan daha ağır elementler radyoaktiftir.

2.1. Alfa (α) Parçacıkları

- Alfa parçacığı; iki proton ve iki nötrondan oluşmuş bir helyum atomu olup +2 yüklüdür.
- Çekirdeğin, alfa çıkararak parçalanması olayına genellikle doğal radyoaktif izotoplarda olmak üzere atom numarası büyük izotoplarda rastlanır.
- Alfa parçacıkları pozitif yüklü olduklarından, elektrik ve manyetik alanlarda negatif kutba doğru saparlar.
- Alfa parçacıklarının iyonizasyon yeteneği çok fazladır. 3 MeV'lik alfa parçacıkları havadaki gidiş istikametlerinde saniyede 40.000 iyon çifti meydana getirme yeteneğine sahiptirler.
- Alfa parçacıklarının giricilik yetenekleri zayıftır. Giricilikleri; havada en az 2,7 cm, en çok 9,96 cm, suda 0,06 cm kadardır. Bir gaz içinde alfa ışınlarının ulaşabileceği uzaklık, o gazın yoğunluğuyla ters orantılıdır. 6 mikron kalınlığındaki alüminyum veya 2,5 mikron kalınlığındaki bakır levha ile tam olarak soğurulurlar. İnce bir kağıt yaprak bile alfa parçacıklarını tutmaya yeterlidir.
- Alfa parçacıklarının en enerjik olanları 9 MeV kadarlık bir enerjiye sahiptir. Hızları, salındıkları kaynağa göre değişir. Örneğin: radyumdan çıkan alfa parçacıklarının hızları 14.000 km/s ile 25.000 km/s arasındadır.
- Normal olarak dış ışınlanma tehlikesi yaratmazlar. Vücudun alfa parçacıklarına maruz kalması halinde deri tarafından tutulurlar. Solunum ve sindirim yoluyla vücuda alındıklarında, iç ışınlama yoluyla etkileri çok daha fazla olur.

2.2. Beta (β) Parçacıkları

- Beta parçacıkları, pozitif veya negatif yüklü elektronlardır.
- Bu parçacıkların salınması, çekirdek içindeki nötron fazlalığından dolayı ise salınan parçacıklar negatif yüklüdürler ve negatron adı verilerek β^- ile gösterilirler. Eğer beta yayınlanması çekirdekteki proton fazlalığından ileri geliyorsa yayınlanan parçacıklar pozitif yüklüdür ve pozitron adı verilerek β^+ ile gösterilir.
- Beta parçacıklarının maksimum enerjisi kendilerini yayınlayan radyoizotopun bir karakteristiği olduğundan bu izotopun tanımlanmasında referans olarak kullanılır.
- Aynı kaynaktan çıkan beta parçacıklarının hepsi aynı hızda değildir. Bu ışınların hızları 60.000 km/s ile 290.000 km/s arasında değişir.
- Beta parçacıkları, alfa parçacıklarından ~7350 defa daha hafiftirler. Hafif olduklarından, önlerine çıkan gaz moleküllerine çarpmakla, hızları ve yönleri değişir. Bu nedenle; gidiş istikametleri alfa parçacıkları gibi düz değil, zikzaklıdır. Ancak; çok hızlı beta parçacıklarının gidiş istikametlerinin düz olduğu bilinmektedir.
- Beta parçacıklarının iyonizasyon özellikleri, alfa parçacıklarından daha zayıftır. Yavaş beta parçacıkları, hızlı olanlara göre daha çok iyonizasyon özelliği gösterir. 3 MeV'lik alfa parçacıkları, havada saniyede 40.000 iyon çifti meydana getirme yeteneğine sahipken, aynı enerjide beta parçacıkları saniyede ancak 30-40 iyon çifti meydana getirebilirler.
- Beta parçacıklarının giricilik yetenekleri alfa parçacıklarının giricilik yeteneğinden yüksektir. Kinetik enerjisi 3 MeV olan bir beta parçacığı havada 1000 cm'lik bir yol alabildiği halde, aynı enerjiye sahip bir alfa parçacığı - aynı koşullarda - sadece 2,8 cm'lik bir yol katedebilir.
- Beta parçacıklarının tam olarak soğurulabilmesi için 0,5 mm platin veya 1 mm kurşun gereklidir.

2.3. Gama (γ) Işınları

- Elektromanyetik tayfta, kozmik ışınlarla X-ışınları arasında yer alan, yüksek enerjili fotonlardan meydana gelen elektromanyetik dalgalarıdır.
- Dalga boyları 10^{-13} - 10^{-11} m arasındadır.
- Bu ışınlar atom çekirdeğinin enerji seviyelerindeki farklılıklardan meydana gelir. Çekirdek bir alfa veya bir beta parçacığı çıkarttıktan sonra genellikle kararlı duruma geçemez. Fazla çekirdek enerjisi gama radyasyonu halinde yayınlanır.
- Yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler.
- Gama ışınlarının iyonizasyon yetenekleri alfa ve beta parçacıklarına göre çok daha zayıftır. Havada kendi doğrultusunda, her santimetrede ancak birkaç iyon çifti oluşturabilirler.
- İyonizasyon yeteneklerinin zayıf olmasına karşın, giricilik yetenekleri ise çok fazladır. Gama ışınları, 20 cm kalınlıktaki kurşunu bile geçebilirler. Madde içerisinden geçerken eksponansiyel bir şiddet azalmasına uğrarlar. Gama ışınlarının tümü tam anlamıyla soğurulamazlar.
- Gama ışınları; monoenerjitik, homojen ışınlardır. En yüksek enerjili gama ışınları, 2,8 MeV enerji ile uranyum-232'den ve 2,754 MeV enerjiyle de sodyum-24 tarafından salınırlar.
- Enerjileriyle dalga boyları, dalga boylarıyla giricilik yetenekleri ters orantılıdır.
- Hızları, havada 300.000 km/s olup, ışık hızına eşittir. Dalga hızları, frekanslarıyla dalga boylarının çarpımına eşittir.

2.4. X-Işınları

- Röntgen ışınları da denilen X-ışınları; elektromanyetik tayfta gamma ışınları ile ultraviyole ışınları arasında yer alan elektromanyetik dalgalardır.
- Bir atoma dışarıdan gelen veya gönderilen yüksek enerjili elektronlar o atomun ilk halkalarından elektron koparırlar. Atomdan kopan bu elektronun yerine daha yüksek seviyelerden (üst halkalardan) elektronlar atlayarak kopan elektronun yerindeki boşluğu doldururlar. Bu sırada ortaya çıkan enerji fazlalığı X-ışını şeklinde dışarı salınır. X-ışınının bir başka meydana geliş şeklinde ise; çekirdek içerisinde bulunan protonlardan bir tanesi hareketi esnasında atomun ilk halkalarındaki elektronu yakalar ve nötrleşir. Yakalanan bu elektronun halkasındaki boşalan yere diğer bir halkadan bir elektron atlamasıyla X-ışını meydana gelebilir.
- Bir X-ışını demetini oluşturan ışınlar, atomun değişik yörüngelerinden meydana geldiğinden, bu ışın demeti homojen değil, heterojendir. Yani; X-ışını demeti, birbirinden farklı dalga boylarına sahip ışıklardan oluşur.
- Enerjileriyle dalga boyları, dalga boylarıyla giricilik yetenekleri ters orantılıdır.
- Giricilik ve iyonizasyon özellikleri dalga boyu ve etkileşimde bulundukları maddenin yapısına göre değişir.
- X-ışınlarının giricilik yetenekleri fazla olup; görünen ışığın geçemediği yerlerden geçerler.
- X-ışınları, yüksüz olduklarından, elektrik ve manyetik alanda sapmazlar. Normal koşullarda kırılmaz ve yansımazlar. Ancak; bazı özel koşullar altında ve özel kristallerde kırılabilirler.
- X-ışınları, düz bir istikamette yayılırlar. Hızları, havada 300.000 km/s olup, ışık hızına eşittir. Dalga hızları, frekanslarıyla dalga boylarının çarpımına eşittir.

EK-2. BİRİMLER VE TANIMLAR

Aktivite

Radyoaktif bozunma ya da aktivite; bir radyonüklidin birim zamanda radyoaktif bozunmaya uğrayan çekirdek sayısıdır. İstatistiksel bir olay olup, ne zaman ve hangi atomun bozunmaya uğrayacağını kestirmek imkanı yoktur. Radyoaktif bozunma;

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, A_0 ; başlangıçtaki aktivite, A ; bir t anında mevcut aktivite ve λ ; radyoaktif bozunma sabitidir.

Özel birimi;	Curie (Ci)	1 Ci = 3.7×10^{10} parçalanma/saniye
SI birimi;	Becquerel (Bq)	1 Bq = 1 parçalanma/saniye

Eşdeğer Doz

Bir doku ya da organ üzerinden, söz konusu radyasyonun ağırlık faktörü de uygulanmış olarak ortalaması alınan soğurulmuş dozdur ve H_T ile sembolize edilmiştir. Dokuda eşdeğer doz;

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $D_{T,R}$; R radyasyonundan kaynaklanan ve T dokusu üzerinden ortalaması alınmış soğurulmuş doz, W_R ise radyasyon ağırlık faktörüdür.

Özel birimi;	rem	1 rem = 10^{-2} J/kg
SI birimi;	Sievert (Sv)	1 Sv = 100 rem

Radyasyon Ağırlık Faktörü (W_R):

Radyasyon Cinsi	Enerji Aralığı	Radyasyon Ağırlık Faktörü
Fotonlar	Tüm enerjilerde	1
Elektronlar ve müonlar	Tüm enerjilerde	1
Nötronlar	< 10 keV	5
	10 keV- 100 keV	10
	> 100 keV - 2 MeV	20
	> 2 MeV- 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonlar	> 2 MeV	5
Alfa parçacıkları, fisyon ürünleri, ağır çekirdekler		20

Etkin Doz

Vücudun tüm ışınlanmalarında, çeşitli organ ve dokuların aldığı radyasyonun farklı dağılımlarının birleştirilmesiyle bulunan toplam sağlığa zararlılık ifadesidir. Etkin doz;

$$E = \sum W_T H_T$$

şeklinde ifade edilir. Burada, T ; herhangi bir doku, H_T ; T dokusu içindeki ortalama eşdeğer doz, W_T ise doku ağırlık faktörüdür. Bu faktör T organının aldığı eşdeğer dozdan dolayı tüm vücutta yüklenilecek riski belirtir.

Doku Ağırlık Faktörü (W_T):

Doku veya organ	Doku Ağırlık Faktörü
Üreme organları	0,20
Kırmızı kemik iliği	0,12
Kolon	0,12
Akciğer	0,12
Mide	0,12
Mesane	0,05
Meme	0,05
Karaciğer	0,05
Yemek borusu	0,05
Tiroit	0,05
Cilt	0,01
Kemik yüzeyi	0,01
Diğerleri	0,05

Işınlama

Havanın birim kütlesinde fotonların oluşturdıkları toplam iyon yükünün mutlak değeridir. Işınlama;

$$X = dQ/dm$$

şeklinde ifade edilir.

Özel birimi; **Roentgen** (R); normal hava şartlarında (0°C, 1 Atm) havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb'luk elektrik yükü değerinde iyon oluşturan X veya γ radyasyonu miktarıdır. (1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg)

SI birimi; **Coulomb/kg**

Kolektif Etkin Doz

Bir kaynaktan yayılan radyasyon dozunun toplam etkisi, ışınlanmaya maruz kalan kişilerin sayısına ve onların aldıkları toplam doza bağlıdır. Kolektif etkin doz, ışınlanmaya maruz kalan çeşitli grupların ortalama dozları ile bu gruptaki kişi sayısının çarpımlarının toplamıdır. E_i , bir popülasyonun alt grubundaki ortalama etkin doz ve N_i ise bu alt gruptaki kişi sayısı olmak üzere kolektif etkin doz;

$$S = \sum E_i N_i$$

şeklinde ifade edilir. Kolektif dozun birimi **kişi-Sv**'tir.

Radyasyon Enerjisi

Bir elektronun bir voltluk bir potansiyel farkı içerisinde kazandığı kinetik enerji olarak tanımlanır.

SI birimi; **elektronvolt** (eV) 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J

Soğurulmuş Doz

Işınlanan maddenin birim kütlesi başına iyonlaştırıcı radyasyon tarafından verilen enerjidir. Soğurulmuş doz;

$$D = dE/dm$$

şeklinde ifade edilir.

Özel birimi;	rad	$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$
SI birimi;	Gray (Gy)	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$

Yarılanma Süresi

Radyoaktif maddelerin aktiviteleri sabit olmayıp, zamanla exponansiyel bir azalma gösterir. Bir radyoaktif maddenin aktivitesinin yarıya inmesi için geçen süre “yarılanma süresi” olarak adlandırılır ve “ $T_{1/2}$ ” ile gösterilir. Her radyoizotopun kendine özgü bir yarılanma süresi vardır.

Fiziksel Yarı Ömür: Belirli bir zamanda sahip olunan aktivite veya bozunan atomların sayısının yarıya düşmesi için geçen zamana fiziksel yarı ömür denir. Bilinen elementlerin yarılanma süreleri 10^{10} yıl ile 10^{-9} saniye gibi çok geniş sınırlar arasındadır. Fiziksel yarı ömür;

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \text{ (}\lambda\text{; bozunma sabiti)}$$

şeklinde ifade edilir.

Biyolojik Yarı Ömür: Bir maddenin, miktar itibarıyla organizma içerisinde yarıya inmesi için geçen zamana biyolojik yarı ömür denir. Fiziksel yarılanma radyoaktif elementi karakterize ettiği gibi, biyolojik yarılanma da maddenin ilgili olduğu organı ve çalışmasını karakterize eder. Biyolojik yarılanma; bireye, organa ve zamana bağlı olarak değişmektedir.

Etkin Yarı Ömür: Vücuda alınmış olan radyoaktif madde miktarının yarısının vücuttan atılması için geçen süredir. Fiziksel ve biyolojik yarılanmayı bir arada yorumlamak amacıyla etkin yarı ömür kavramı geliştirilmiştir. Etkin yarı ömür;

$$1/T_{1/2(\text{etkin})} = 1/T_{1/2(\text{fiziksel})} + 1/T_{1/2(\text{biyolojik})}$$

şeklinde ifade edilir.

Yüklenen Eşdeğer Doz

Radyonüklidin vücutta kaldığı sürede vermiş olduğu toplam dozdur ve dozun alınma hızının zamana göre integralinin hesaplanmasıyla bulunur. Birimi **Sievert**'tir. Yüklenen eşdeğer doz;

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede, t_0 ; radyoaktif maddenin alım zamanı, $H_T(t)$; t zamanında T dokusu veya organının eşdeğer doz hızı, τ ; radyoaktif madde alımından sonra alınan dozun hesaplanması için istenen süredir. Bu süre özellikle belirtilmedikçe yetişkinler için 50 yıl, çocuklar için 70 yıl olarak alınır.

Yüklenen Etkin Doz

Vücudun çeşitli organ ve dokularının τ zaman integralinde aldığı radyasyonun farklı dağılımlarının birleştirilmesiyle bulunan toplam sağlığa zararlılık ifadesidir. Birimi **Sievert**'tir. Yüklenen etkin doz;

$$E(\tau) = \sum W_T H_T(\tau)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $H_T(\tau)$; T dokusu veya organı için τ zaman integralinde yüklenen eşdeğer doz, W_T ; doku ağırlık faktörüdür. τ belirtilmediği durumlarda, yetişkinler için 50 yıl, çocuklar için 70 yıl olarak alınır.

EK-3. BİRİM SİSTEMİNDE KULLANILAN ÖN EKLER

Sembol	Ön Ek	Faktör
E	eksa	10^{18}
P	peta	10^{15}
T	tera	10^{12}
G	giga	10^9
M	mega	10^6
k	kilo	10^3
h	hekto	10^2
da	deka	10^1
d	desi	10^{-1}
c	santi	10^{-2}
m	mili	10^{-3}
μ	mikro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	piko	10^{-12}
f	femto	10^{-15}
a	atto	10^{-18}