

## RADYOAKTİF YAĞIŞLAR

Doç. Dr. CEMİL ŞENVAR  
Ankara Üniversitesi, Fiziko-Kimya Kürsüsü

Radyoaktif yağış (veya Fallout) nükleer silahların patlaması sebebiyle meydana gelip, ya hemen veya uzun müddet sonra dünya üzerine düşen bomba artıklarına verilen isimdir. Bilindiği gibi nükleer silahların başlıca iki çeşidi vardır. Bunlar atom bombası ve hidrojen bombasıdır.

Atom bombası, uranyumun nötronlarla dövülerek bölünmesi ve bu olayın bir zincir reaksiyonu halinde gelişmesi ile elde edilir. Uranyum çekirdeği bölününce toplam kütlelerinden hemen hemen uranyumunkine eşit olan iki yeni çekirdek ve ayrıca 2-3 nötron meydana gelir. Meydana gelen iki yeni çekirdeğin atom ağırlıkları daha ziyade 95 ve 140 civarında, yani uranyumun bölünmesinden meydana gelen yeni iki elementten birinin atom ağırlığı büyük bir ihtimalle 95, diğerininki ise 140 civarında olmaktadır. Yeni elementler meselâ Ca, Sr, Ba, I olabilir. Bunların hepsi de radyoaktif olup,  $\beta$  ve  $\gamma$  ışınları yayınlırlar; ( $Sr^{90}$  ile  $Cs^{137}$  hariç) hepsinin yarı ömrü çok kısadır.

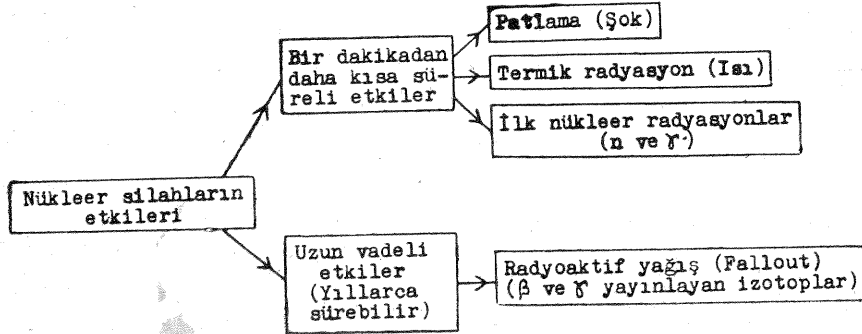
Hidrojen bombasına gelince: Bu, atom bombasına nazaran çok daha kudretli olup, esas itibariyle hidrojen ve döteryum atomlarının birleşerek helyum vermesi olayına dayanır. Şüphesiz bu olay (yani H ve D atomlarının kaynaşması) pek yüksek enerji ister ve tahmin edildiğine göre bu yüksek enerji bir atom bombası sayesinde temin edilmektedir. H bombası da radyoaktif elementler meydana getirir. Böylece hangi tip bomba patlarsa patlasın daima bol miktarda radyoaktif madde hasıl olmakta ve bu tehlikeli maddeler bilinen mantar şeklindeki toz-duman bulutu ile beraber çok yükseklere kadar çıkmakta, sonra da yavaş yavaş arz üzerine yağmaktadır.

Atom bombalarına kiloton mertebesinde bombalar denir. Zira bunlar en çok birkaç bin ton TNT (trinitrotoluen) eşdeğerinde bir patlama gücüne sahiptirler. Meselâ İkinci Dünya Savaşı sonunda Japonya üzerine atılan ilk iki bomba birer atom bombası olup, herbiri 20 kiloton (20 000 ton TNT) gücünde idi.

Hidrojen bombası ise megaton mertebesindedir; zira hidrojen bombası atom bombasından çok daha güçlü olup birkaç milyon ton TNT ye eşdeğerdir. Meselâ Amerika Birleşik Devletleri'nin 1954 de Bikini adasında denediği H bombası 15 megaton (15 milyon ton TNT) gücünde ve Rusların 1961 Ekim ayında denedikleri en büyük H bombası ise 57 megaton (57 milyon ton TNT) gücünde idi.

Atom bombası gibi nisbeten küçük bir bombanın külleri 10-15 km. yüksekliğe kadar çıkabilir ve sonra kendi kendine veya yağmur, kar ile beraber arz üzerine düşer ki buna troposfer yağışı denir. Hidrojen bombası gibi büyük bir bombanın külleri ise 15-30 km. yüksekliğe kadar çıkabilir ve bu küllerin arz üzerine yağması uzun zaman (bazan 10 yıl) sürebilir ki buna da stratosfer yağışı denir.

Her iki tip bombanın tahripkâr etkileri ve etkilerin yaklaşık süreleri aşağıda şematik olarak gösterilmiştir:



## NÜKLEER SİLÂHLARLA KLASİK SİLÂHLARIN MUKAYESESİ:

Japonyada iki şehir üzerine atılan 20 KT büyüklüğündeki iki atom bombasının tahribatı aşağıda gösterilmiştir:

Hiroshima'da mevcut ev sayısı	:	75 000
Tamamen tahrib edilen ev sayısı	:	7 000
Tamamen yanan ev sayısı	:	55 000
Tamamen veya kısmen zarar gören evler	:	% 90
Her iki şehirde (Hiroshima ve Nagasaki) ölü sayısı:		100 000

Hiroshima ve Nagasaki'de atom bombasının zararları (USAEC 1950, KUSANO 1953) :

	Hiroshima (20 KT)	Nagasaki (20 KT)	9 Mart 1945 Tokyo hava akını (1700 Ton normal bomba)
Ölü	78150	23753	} 83 000
Kayıp	13983	1924	
Yaralı	37424	23345	102 000
Başka türlü zarar görenler	235656	89025	
	365213	138047	185 000

İkinci Dünya Savaşında kullanılan toplam patlayıcı madde miktarı 5 milyon ton, yine aynı savaşta yalnız Almanyaya atılan patlayıcı madde miktarı 1 milyon ton, ölü sayısı yarım milyondur. İkinci Dünya Savaşında atılan patlayıcı madde miktarı, ondan önce bütün dünya tarihinde (Birinci Dünya Savaşı dahil) kullanılan patlayıcı madde miktardan fazladır. Atom bombası bunun yanında küçük kalır ama hidrojen bombası ile karşılaştırılırsa şunu söyleyebiliriz ki: 1954 de denenen 15 MT luk ve 1961 de denenen 30 ve 57 MT luk H bombalarının her biri, dünya kuruldu kurulalı kullanılan patlayıcı maddelerin toplamından daha fazladır.

Şimdiye kadar bütün dünyada patlatılan nükleer bombaların kronolojisi

Deneme tarihi	Harp ve deneme maksadiyle kullanan memleket			
	Amerika Birleşik Devletleri	Sovyetler Birliği	İngiltere	Fransa
Ağustos 1945	A bombası (20 KT)	—	—	—
Ağustos 1949	—	A bombası (KT)	—	—
Ekim 1952	—	—	A bombası (KT)	—
Kasım 1952	H bombası 5 MT	—	—	—
Ağustos 1953	—	H bombası 1 MT	—	—
Mart 1954	H bombası 15 MT	—	—	—
Kasım 1955	—	H bombası 10 MT	—	—
Mayıs 1956	H bombası 15 MT	—	—	—
Mayıs 1957	—	—	H bombası 5 MT	—
1957 ortaları, 1958 ortaları arası	Muhtelif devletler ve Fransa tarafından yapılan denemeler : H ~ 40 — 50 MT			
1960	Muhtelif devletler ve Fransa : H ~ 3 MT			
1962	Sovyetler Birliği : A ve H ~ 100 MT			

Yukardaki cetvelden görüldüğü gibi İkinci Dünya Savaşı sonundanberi bütün dünyada patlatılan nükleer silâhların toplamı yaklaşık 200 MT kadardır. Bu kadar çok miktarda nükleer patlamadan hasil olan radyoaktif yağış da şüphesiz ihmal edilemeyecek miktarlara yükselecektir.

## RADYOAKTİF YAĞIŞ TIPLERİ VE DAĞILIŞ

Bir nükleer bombanın patlaması ile üç türlü yağış meydana gelir. Bunlar sırasıyla şunlardır:

1. Mevziî yağış.
2. Troposfer yağışı.
3. Stratosfer yağışı.

Sulh zamanında yapılmakta olan nükleer denemelerde en tehlikeli yağış olup bombanın patladığı yerin hemen civarına ve kısa zamanda düşen mevziî yağışa karşı her türlü tedbir alınmaktadır. Bilindiği gibi bu denemeler Nevada, Büyük Sahra gibi çöllerde veya Sibiryaya, Bikini, Novaya Zemlya gibi ıssız yerlerde yapılmaktadır. Buna rağmen bu denemelerde hasıl olan troposfer ve stratosfer yağışlarına mani olunamamaktadır. Mevziî yağışın takip edeceği yol ve tehlike derecesi bir takım faktörlere bağlıdır. Bunlardan bazıları :

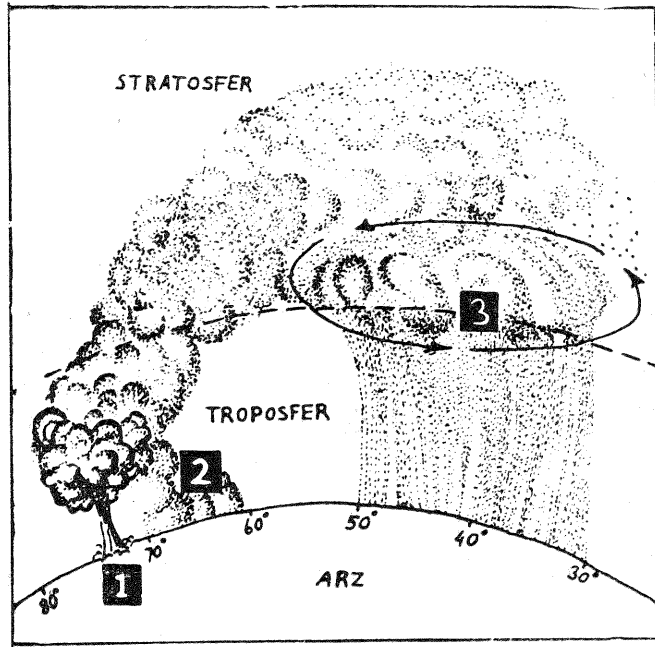
- a) Bombanın bulutu içindeki tozların büyüklüğü,
- b) Patlama anındaki meteorolojik şartlardır.

Parçacıkların büyüklüğü alev küresinin yer ile temas şekline ve yerin jeolojik durumuna bağlıdır. Meselâ deniz üstünde patlayan bir bombanın doğuracağı mevziî yağış, toprak üzerinde patlayana nazaran çok daha az olacaktır. Toprağın cinsi de önemlidir, zira yağış maddelerinin suda çözünüp çözünmeyeceği buna bağlıdır. Meselâ Amerikanın Nevada çölünde toprak seviyesinde veya çelik kuleler üzerinde yapılan denemelerden hasıl olan mevziî yağışlar, küre şeklinde ergimiş kum ve metal oksidi parçalarından ibarettir. Bu yağış maddelerinin % 30 u suda çözünür. Buna karşılık Marshall adalarındaki denemelerde ise atollerin kalsiyumundan gelmek üzere yağış başlıca  $CaCO_3$  dan ibarettir ve bu maddelerin % 50 si suda çözünür. Suda çözünme derecesi ise bitkilerin asimilasyonu yönünden ve hayvanların derisindeki diffüzyon bakımından önem taşır.

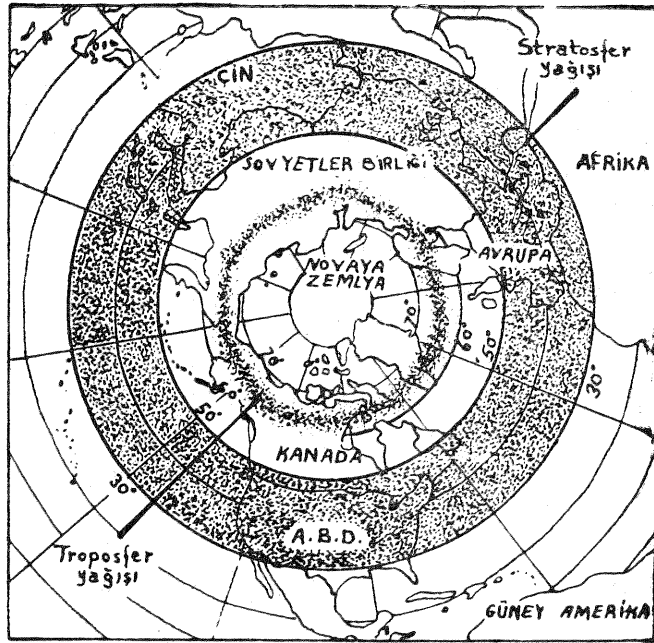
Bugün kesin olarak biliniyor ki şimdiye kadar yapılan nükleer denemelerden hasıl olan radyoaktif yağış, bütün dünyaya eşit olarak dağılmıyor, aksine daha ziyade kuzey yarımküresinde ( $30^\circ-60^\circ$  civarında) dünyayı saran bir halka halinde birikiyor.

Mevziî yağış maddeleri en çok birkaç hafta zarfında patlama yerinin yakınlarına düşer. Troposferik yağış ise biraz daha uzaklara birkaç hafta veya bir kaç ay zarfında düşer. Nihayet stratosferik yağış ortalama 10 yıl müddetle devam eder ve daha ziyade 30°-60° arz dereceleri arasındaki bölgeye düşer.

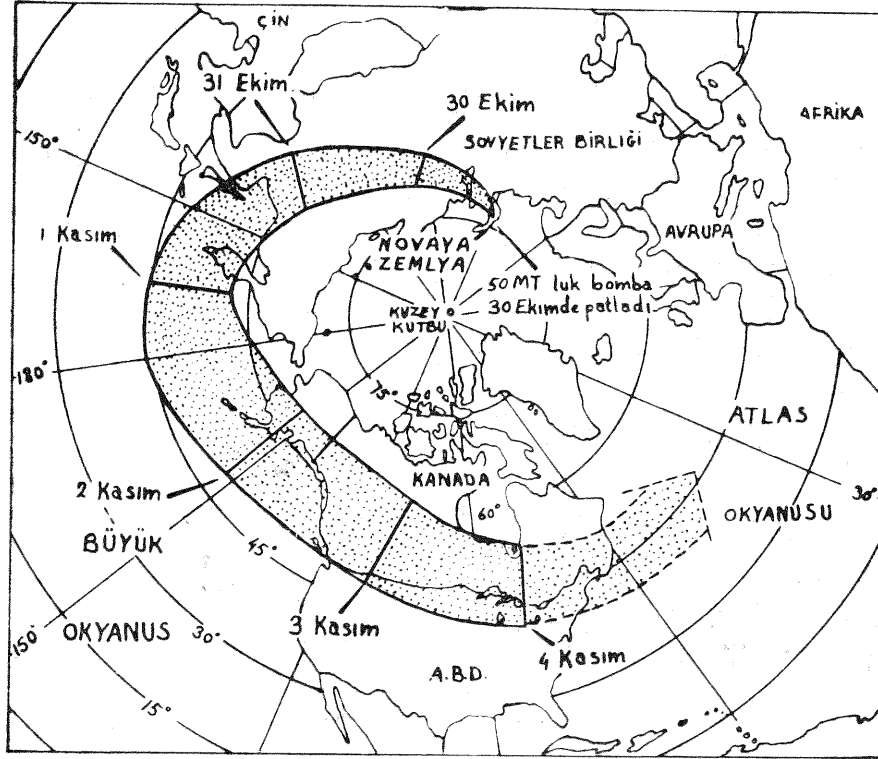
Aşağıdaki şekiller radyoaktif yağışların dünya üzerindeki dağılışını ve 1961 Ekiminde Sovyetler tarafından patlatılan 57 Megatonluk en büyük bombanın artıklarının batı rüzgârını takip ederek muhtelif memleketlere hangi hızla ulaştığını göstermektedir.



Şekil 1: Radyoaktif yağışın meydana gelişi.  
(FİNNEY: The New York Times. 29 Ekim 1961).



Şekil 2 : Radyoaktif yağışın dünya üzerinde yayılışı.  
(FİNNEY: The New York Times. 29 Ekim 1961).



Şekil 3 : Rüzgâra bağlı olarak hareket eden troposferik yağış.  
(FİNNEY: The New York Times. 5 Kasım 1961).

## RADYOAKTİF YAĞIŞLARIN MEYDANA GELİŞ MEKANİZMASI

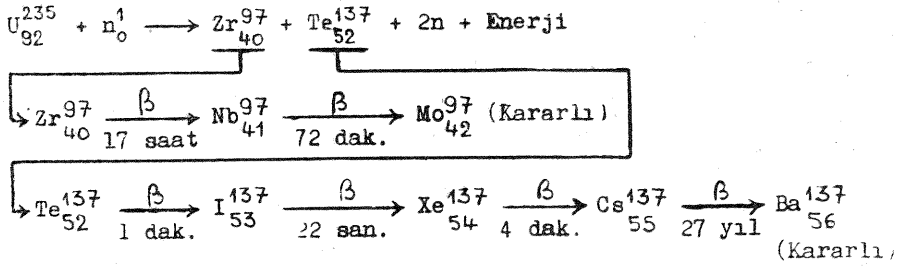
Atom bombasında meydana gelen olay uranyum veya plutonyum çekirdeklerinin bölünmesi ve neticede her bölünmeden iki ayrı yeni çekirdek ile 2-3 nötron hasil olmasıdır. Bölünme ürünleri arasında 34 elementin 200 den fazla izotopu hasil olur, bunların hepsi mevziî yağış halinde zararlıdır, zira henüz aktiftirler,  $\beta$  ve  $\gamma$  ışınları yayınlamaya anorganik ve organik sistemlere türlü etkiler yapabilirler. Troposfer veya stratosfer yağışlarında ise bütün izotoplar değil, bunların ancak birkaç tanesi tehlikelidir ki bunlar uzun ömürlü olanlardır.

Büyük bir kısmının yarı ömrü az olup, yer yüzüne yağmadan önce geçen aylar ve yıllar zarfında parçalanıp zararsız hale gelirler. Bir bölünme ürünü canlılar bakımından zararlı olmak için aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

- Bölünme ile meydana gelme verimi yüksek olmalı,
- Yarı ömrü kâfi derecede uzun olmalı (birkaç yıl ilâ birkaç çeyrek asır).
- Canlıların vücuduna girme ihtimali fazla olmalı.
- Vücuttaki metabolizması öyle olmalı ki bu element absorbe olsun, vücudun belli yerlerinde yığılsın ve uzun müddet orada kalsın (Meselâ  $Sr^{90}$  elementi aynen Ca gibi kemiklerde birikir).

Yukarda sayılan şartlara uyan radyoaktif elementlerin sayısı çok şükür pek fazla değildir ve yalnız  $Sr^{90}$  bu şartlara uyar. Dolayısıyla radyoaktif yağış denince ilk akla gelen odur. Her nükleer bombanın patlamasıyla çok miktarda  $Sr^{90}$  meydana gelir ve toprak veya su yolu ile bitkilere, oradan hayvanlara ve nihayet süt, et, peynir ile insanlara geçerek kemiklerde depo edilir. Şu halde çocuklarda en çok olmak üzere halen her insanın kemiklerinde nükleer silâhların bir işareti olan  $Sr^{90}$  vardır.

Uranyumun bölünmesiyle meydana gelen ürünleri aşağıdaki şema göstermektedir:





Bölünme ürünleri arasında radyoaktif yağış yönünden en önemli bazı elementler aşağıdaki cetvelde verilmiştir:

Atom bombası artıkları arasında en tehlikeli olanlar

Radyoaktif element	Verdiği ışınların enerjisi (Mev)		Yarı ömür (Tr)	Teşekkül verimi (%)
	Gama	Beta		
Sr <sup>89</sup>	—	1,46	53 gün	4,8
Sr <sup>90</sup>	—	0,61	28 yıl	5,8
I <sup>131</sup>	0,36	0,61	8,1 gün	3,1
	0,28	0,34		
Cs <sup>137</sup>	0,66	0,52	27 yıl	5,9
Ce <sup>144</sup>	0,13	0,30	282 gün	6
	0,10	0,17		

Yukardaki cetvele göre Cs<sup>137</sup> gerek verim gerekse yarı ömür bakımından stronsiyuma pek benzemekte ise de, bu element gerçekte Sr<sup>90</sup> kadar tehlikeli değildir zira Te ile gösterilen ve

$$1/Te = 1/Tr + 1/Tb$$

bağıntısı ile tarif edilen etkin yarı ömürleri karşılaştırılırsa Sr<sup>90</sup> için Te = 7,4 yıl, halbuki Cs<sup>137</sup> için Te = 120 gün bulunur. Radyoaktifliğin iç organlara etkisi konusunda etkin yarı ömür (Te) çok önemlidir. Tb = Biyolojik yarı ömür olup o elementin vücuttan ne kadar süratle atıldığını gösterir. Radyoaktif yağış maddeleri arasında en tehlikeli olduğunu yukarda söylediğimiz Sr<sup>90</sup> izotopunun bu önemi üç faktörden geliyor: 1) Teşekkül verimi % 6 kadar yani çok büyüktür ve bu yüzden nükleer bombanın küllerinde bol miktarda bulunur. 2) Radyoaktif yarı ömrü (Tr) 28 yıl yani çok uzundur ve bu yüzden girdiği organizmaya uzun müddet zarar verir. 3) Etkin yarı ömrü (Te) uzundur.

Uranyum bölünme ürünlerinin  $\gamma$  ve  $\beta$  aktifliğinin genel olarak aşağıdaki bağıntılara uyduğu bilinmektedir (Lit. 3):

$$\gamma \text{ aktifliği} = 1,6 \times t^{-1,2}$$

$$\beta \text{ aktifliği} = 3,2 \times t^{-1,2}$$

Burada  $t$  patlamadan sonra geçen zaman (saniye) ve aktiflikler ise her bölünme ve her saniye başına  $\gamma$  fotonu veya  $\beta$  parçacığı sayısı olarak verilmiştir.

1962 yılının ilk yarısında Ankaradaki "Radyoaktif Yağış Laboratuvarı" mızda yaptığımız bir araştırmada (ŞENVAR ve YÜCELİK) bomba artıklarının toplam  $\beta$  aktivitesinin

$$I = 5,50 \times t^{-1,16}$$

bağıntısına uyduğu tesbit edilmiştir. Bu son bağıntıda  $I$  pikoküri/lt cinsinden ölçülen aktivite<sup>1)</sup> ve  $t$  (gün cinsinden) bombanın patlamasından itibaren geçen zamandır.

#### RADYASYON DOZ BİRİMLERİ

Biyolojik dokulara iyonlaştırıcı radyasyonların etkisini ifade etmek için genel olarak dokunun birim kütleinde meydana gelen iyonlaşmaların sayısı (veya iyon çifti sayısı) göz önüne alınır. Bu arada çok kullanılan bir doz birimi "Röntgen" olup  $r$  ile gösterilir.  $\gamma$  veya X ışınları ile bombardıman edilen maddede gram başına 1 röntgenlik doz  $1,6 \times 10^{12}$  iyon çifti hasil eder. Röntgen'in tarifinde, dozu alan maddenin toplam kütle ile ilgili bir hüküm olmadığına dikkat edilmelidir. Röntgen birimi öyle tarif edilmiştir ki, meselâ bir insanın parmağı veya bütün vücudu  $\gamma$  veya X radyasyonuna maruz kalabilir; önemli olan husus radyasyona maruz kalan bölgedeki dokuların her gramı başına  $1,6 \times 10^{12}$  iyon çifti hasil olmasıdır. Röntgen'in daha kolay anlaşılır bir tarifi de şöyledir: 1 gram yumuşak doku tarafından absorbe edilince o dokuda 97 erglik enerji husule getiren  $\gamma$  veya X radyasyonu miktarına 1 r denir. Röntgenin binde biri 1 miliröntgen (mr) dir.

1) Radyoaktivite birimi küri (Curie) olup saniyede  $3,7 \times 10^{10}$  parçalanma yapan radyoaktif madde miktarını gösterir. Miliküri (mc) =  $10^{-3}$  küri; mikroküri ( $\mu c$ ) =  $10^{-6}$  küri ve pikoküri (pc) =  $10^{-12}$  küridir.

Doz birimleri arasında en önemli başka bir birim de "Rad" dir. 1 rad, 1 gram doku tarafından 100 erglik enerji absorbe edilmesine tekbül eden dozdur. Aşağıdaki misaller röntgen birimi hakkında daha iyi fikir verecektir:

- a) 0,5 mm. kalınlıkta bir platin mahfaza içinde bulunan 1 gram radyum, d metre uzaklıkta, saatte  $1/d^2$  röntgenlik doz verir. Yani 1 gram radyum kaynağı 1 metre uzaklıkta saatte 1 r verir.
- b) Fosforesan bir kol saatinin ihtiva ettiği yaklaşık 1  $\mu$ c aktiflik, 30 cm. uzaklıkta, yılda  $\sim 40$  miliröntgen verir.
- c) Göğüs röntgeni almakta kullanılan normal bir röntgen makinesi bir muayenede 0,3 r kadar doz verebilir.
- d) Normal bir insan, ömrü boyunca yerde, havada ve suda bulunan çok az miktardaki radyoaktif maddelerle kozmik ışınlardan 10 r alabilir.

Röntgen, yalnız  $\gamma$  ve X ışınları için tarif edilmiştir. Rad, Rem ve Rep ise her türlü radyasyon için kullanılır. "Rem" (Röntgen-Equivalent-Man) biyolojik bir radyasyon doz birimidir. Herhangi bir radyasyonun (X,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ , p, n) verdiği 1 Rem'lik doz memeli hayvan dokusunda 1 Rad'lık X veya  $\gamma$  ışınının meydana getirdiği zarara eşit zarar verir.

"Rep" (Röntgen-Equivalent-Physical) ise Rad birimine hemen hemen eşit bir doz birimidir. "Milletlerarası Radyasyondan Korunma Komitesi" nin kabul ettiği şu yaklaşık kaide sayesinde Rem, Rep, Rad ve Röntgen birimleri birbirine çevrilebilir:

X ve  $\gamma$  ışınları için 1 Rem = 1 Röntgen

$\beta$  ışınları için 1 Rem = 1 Rad

nötron ve  $\alpha$  parçacıkları için 1 Rem = 1/10 Rad

#### TOPRAKTA RADYOAKTİVİTE MİKTARI VE TEHLİKE FAKTÖRÜ

Topraktaki kalsiyum yüzdesi dünya üzerinde çok değişiktir. Toprakta mevcut olan toplam Ca miktarı yerine biz burada daha ziyade "kullanılabilir" kalsiyum miktarı üzerinde duracağız; çünkü mühim olan şey, bitkiler tarafından topraktan alınabilen kalsiyum miktarıdır.  $Sr^{90}$  toprağın ilk 5-7,5 cm. kalınlıktaki tabakası tarafından tutulur.

Toprağın ilk 5-7,5 cm. derinliğinde mevcut olan "kullanılabilir" kalsiyum miktarı ortalama m<sup>2</sup> başına 200 gr kadardır. Yani dünya üzerinde bir nükleer bombadan dolayı, km<sup>2</sup> başına 4 miliküri Sr<sup>90</sup> düşse ve bu aktif elementin hepsi araziye eşit bir şekilde dağılsa, bütün aktiflik toprağın ilk 5 cm.lik tabakasında bulunduğuna göre, yerdeki aktiflik mevcut kalsiyumun kilogramı başına 0,02 mikroküri olacaktır. Bir insanın vücudunda yaklaşık 1 kg Ca bulunur ve bunun %99 u kemiklerle dışlardedir. Vücut kalsiyumunun temel kaynağı topraktır. Toprakten gıda yolu ile vücuda girer. "Milletlerarası Radyolojik Korunma Komisyonu" tarafından 1954 de kabul edilen maksimum limit yani bütün bir ömür boyunca vücutta kalıp bir zarar vermeyecek olan Sr<sup>90</sup> miktarı 0,1 mikroküridir. Bu limit ise yukardaki 0,02 mikroküri değerine pek yakındır ve 0,02 µc aktiflik megaton büyüklüğünde birkaç bomba tarafından temin edilebilir. Mamafih bu arada bir de "Tehlike faktörü" vardır ki bu H ile gösterilir ve gerçek aktivite değerinin maksimum limite oranı olarak tarif edilir. Sr<sup>90</sup> için maksimum limit 0,1 µc olduğundan yukardaki misalimizde  $H = 0,02/0,1 = 1/5$  olur. H birden ne kadar küçükse emniyet o kadar büyük demektir. H = 100 olursa durum çok ciddi sayılabilir. Megaton mertebesinde büyük nükleer bombalardan 5 tanesi patlarsa H = 1 olacak şekilde radyoaktivite yığılabilir ve bu durum o bölgede canlılar için tehlike işareti sayılır.

#### RADYOAKTİF YAĞIŞ (FALLOUT) BİRİMİ

Radyoaktif yağışlar incelenirken neticede ekseriya Sr<sup>90</sup> miktarı tayin edilir ve fallout derecesini göstermek üzere "Strontium Unit" veya "Sunshine Unit" (S.U.) denen stronsyum birimi ile ifade edilir. 1 gram Ca başına bir mikroküri Sr<sup>90</sup> ihtiva eden bir nümunedeki 1 stronsyum birimlik aktivite vardır denir. Fallout maddelerinin büyük bir kısmı stratosfere kadar yükseldiğine ve meteorolojik şartlar icabı ortalama 10 yıl zarfında arz üzerine yağdığına göre yapılan hesaplar göstermiştir ki 1961 yılı sonlarına kadar yapılan bütün denemeler sebebiyle dünyanın radyoaktif yağış durumu yaklaşık olarak aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi olacaktır.

1961 yılı sonuna kadar patlayan bütün nükleer bombalar yüzünden gelecek yıllarda dünyamıza yağacak  $Sr^{90}$  miktarları (yaklaşık olarak)

Yıl	1957	1960	1965	1970	1975	1980	2000
mc/km <sup>2</sup>	12,5	20	25	27,5	30	27,5	20

Bu cetvelde görüleceği gibi radyoaktif yağış durumu 1975-1980 ci-varında bir maksimumdan geçerek 2000 yılına doğru tekrar azalacaktır. Eğer nükleer denemeler devam ederse şüphesiz yukardaki rakamlar daha büyüyecek ve maksimum fallout ise daha ileriye (meselâ 1990 yılına doğru) kayacaktır.

#### RADYOAKTİF YAĞIŞLARIN CANLILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Radyoaktif artıkların türlü yollarla canlılara geçişi ve zararlı etkilerini daha iyi anlamak için evvelâ radyoaktif maddelerin yayınladıkları ışınların canlılar üzerindeki etkilerini görelim.

Bu etkiler genel olarak ikiye ayrılır :

- 1) İç radyasyonların etkileri (Internal hazards).
- 2) Dış radyasyonların etkileri (External hazards).

İç radyasyonlar, radyoaktif maddelerin gıda, solunum veya yaralar ve çatlaklar yolu ile vücuda girmesi yüzünden olur. Böylece vücade girmiş olan aktif maddeler yayınladıkları  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  ışınlarıyla vücudun çeşitli kısımlarını devamlı olarak döverler.

Dış radyasyonlar ise vücudu dıştan döverler. Vücut dışında (meselâ bir laboratuvarıda) bulunan radyoaktif kaynaklar yayınladıkları  $\gamma$  ışınlarıyla rastladıkları vücut kısımlarını dıştan döverler. Dış radyasyonlar halinde  $\alpha$  ve  $\beta$  ışınları nisbeten ehemmiyetsiz olup asıl tehlike  $\gamma$  ışınlarından gelir. Eğer uranyumun bölünme ürünleri (yani radyoaktif izotoplar) deri veya elbiselere bulaşmış ise bunların verdiği  $\beta$  ışınları vücuda ancak 1 cm kadar girerler.  $\beta$  ışınları vücudun kan yapan veya diğer hassas kısımlarına varamıyacakları için (çok şiddetli kaynaklar hariç) dış radyasyonlar ciddi tehlike teşkil etmezler. Mamafih radyasyon şiddeti çok fazla olursa (2000 Rad. ve daha fazla), saçlar veya kıllar dö-

külür ve ciddî (3 üncü derece) yanıklar hasil olur.  $\alpha$  aşınlarının vücut içinde gittikleri uzaklık o kadar azdır ki vücuda dıştan rastlayan  $\alpha$  ışınları pek az zarar meydana getirirler.

Radyasyonların canlı hücrelere etkisinin nasıl olduğu henüz tamamen aydınlatılmış değildir. Bu konu halen ilim alemini en çok meşgul eden ve insan zekâsına meydan okuyan bir problem olarak durmaktadır. Evvelâ çok karışık bir fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar serisi sonunda hücreyi teşkil eden moleküller iyonlaşır. Böylece iyonlaşmanın sonucu olarak ekseriya moleküller parçalanır. Burada belirtilmesi icap eden önemli bir nokta şudur ki: radyasyonlar yüzünden pek az molekül iyonlaşsa bile genel olarak o radyasyonlara maruz kalan bir hücre ölür.

Meselâ tipik bir hücrenin boyu 5 mikron<sup>2</sup>), çapı 1 mikron ve kütlesi birkaç mikro-mikrogram olsun. Bu hücrenin % 70 kadarı su, % 27 si tuz ve molekül ağırlığı 1000 den az olan maddeler ve geriye kalan % 3 kadarı da (molekül ağırlığı 100 000 civarında olan) bir milyon kadar protein molekülü ile (molekül ağırlığı 10 milyon civarında olan) birkaç yüz nükleik asit molekülünden ibarettir. Böyle bir hücreye 1000 r lik bir doz gönderilirse yaklaşık 10 000 iyon çifti meydana gelir. Bu iyon çiftlerinin sayısı (molekül ağırlığı gözönüne alınır) iyonize olan nükleik asit moleküllerinin % 1 ini veya protein moleküllerinin % 0,01 ini teşkil eder. Daha küçük molekül ağırlıklı maddelerle mukayese edilirse bu iyon çiftleri ihmal edilebilecek kadar az sayılırlar. İyonlaşmaya uğrayan molekül kesrinin bu kadar küçük olmasına rağmen 1000 r lik bir doz karşısında hücrelerin çoğu büyük zarar görür. Bu durum şüphesiz canlı hücre içindeki karışık yapının ve fevkalâde iyi hesaplanmış dengenin neticesidir. Verilen doz çok büyük değilse (1000 r den az hücre hemen ölmez, fakat bölünme zamanına kadar yaşamağa devam eder (hücre bölünmesi bir hücrenin canlılığı için iyi bir imtihandır). Hücre bölününce ya ölür veya çoğalma özeliği olmayan yeni hücrelere bölünür. İşte bu sebeple bölünen hücrelerden yapılmış olan dokular (meselâ kemik iliği), bölünme yapmayan hücrelerden yapılmış olan do-

2) 1 mikron (1  $\mu$ ) = 1/1000 mm.

kulara (meselâ beyine) nazaran radyasyonlara çok daha hassastırlar. En hassas olanlar kan yapan dokularla tohum dokuları, en az hassas olanlar ise beyin ve kas dokularıdır. Dış radyasyonlar için "Müsaade Edilen Maksimum Doz" (MEMD) haftada 0,3 r dir. Yani bir insan haftada 0,3 r lik bir dozu uzun zaman alabilir ve ömrü boyunca bundan bir zarar görmez, bundan fazlası zararlı olmağa başlar. İç radyasyonlar için ise değişik izotoplar için değişik sınırlar vardır. "Müsaade Edilen Maksimum Miktar" (MEMM) her radyoaktif izotop için farklı olup bazılarında gram başına miligram mertebesinde iken tehlikeli olan diğer bazı izotoplarda gram başına mikro-mikrogram mertebindedir. Bu değer, izotopun yayınladığı ışınların cinsine, ışınların enerjilerine, izotopun yarı ömrüne, biyolojik yarı ömrüne ve daha başka bazı tali faktörlere bağlıdır. "Müsaade edilen maksimum miktar" için mikroküri ( $\mu\text{c}$ ) birimi kullanılır (1 mikroküri =  $3,7 \times 10^4$  parçalanma/saniye). Halen yüzden fazla radyoizotop için MEMM değerleri bilinmektedir. Tritiyum ( $\text{H}^3$ ) elementinin verdiği  $\beta$  ışınlarının enerjisi 0,018 Mev olduğu halde ( $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$ ) in  $\beta$  ışınları 2,8 Mev enerjiye sahiptirler. Bazı elementler vücuda girince her tarafa eşit bir şekilde dağıldığı halde bazıları vücudun çeşitli bölgelerinde yığılırlar. Meselâ vücudun hertarafına eşit dağılan  $\text{Cl}^{36}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  ve trityum için MEMM'lar sırasıyla 230, 98 ve 10 000 mikroküridir. Buna mukabil kemiklerde depolanan ve orada uzun zaman kalarak büyük zararlar veren radyum ve  $\text{Sr}^{90}$  için MEMM lar çok küçük olup sırasıyla 0,1 ve 1 mikroküridir. Yani insan vücudunda 0,1 mikroküri Ra veya 1 mikroküri  $\text{Sr}^{90}$  yığılırsa bu miktar ömrü boyunca o insana zarar vermez. Bu miktarlardan fazlası vücutta yığılırsa insan için tehlike başlar.

Hayat için en önemli iki madde olan su ve hava için de "Müsaade Edilen Maksimum Konsantrasyon" (MEMK) tarif edilmiştir. İnsanların yaşadığı yerlerde teneffüs ettikleri havada ve içtikleri suda MEMK dan fazla radyoaktiflik varsa zararlı demektir. Aşağıdaki cetvelde bazıları radyoaktif yağışlarda bilhassa çok bulunan önemli radyoizotoplar için MEMM ve MEMK değerleri verilmiştir:

Radyoaktif element	Kritik organ	MEMM (mikroküri)	MEMK	
			Havada $\mu\text{c}/\text{cm}^3$	Suda $\mu\text{c}/\text{cm}^3$
H <sup>3</sup> ( $\beta$ )	Bütün vücut	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	0,2
C <sup>14</sup> ( $\beta$ )	Yağlar	260	10 <sup>-5</sup>	3 × 10 <sup>-3</sup>
Na <sup>24</sup> ( $\beta, \gamma$ )	Bütün vücut	15	2 × 10 <sup>-6</sup>	8 × 10 <sup>-3</sup>
P <sup>32</sup> ( $\beta$ )	Kemik	10	10 <sup>-7</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>
Fe <sup>59</sup> ( $\beta, \gamma$ )	Kan	13	2 × 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>
Sr <sup>89</sup> ( $\beta$ )	Kemik	2	2 × 10 <sup>-8</sup>	7 × 10 <sup>-5</sup>
Sr <sup>90</sup> ( $\beta$ )	Kemik	1	2 × 10 <sup>-10</sup>	8 × 10 <sup>-7</sup>
I <sup>131</sup> ( $\beta, \gamma$ )	Tiroid	0.6	6 × 10 <sup>-9</sup>	6 × 10 <sup>-5</sup>
Cs <sup>137</sup> ( $\beta, \gamma$ )	Kas	98	2 × 10 <sup>-7</sup>	2 × 10 <sup>-3</sup>
Ra <sup>226</sup> ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	Kemik	0.1	8 × 10 <sup>-12</sup>	4 × 10 <sup>-8</sup>
Uranyum bölünme ürünleri (yani A bombası artıkları)	( $\beta, \gamma$ )	—	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup>

### TOPRAKTA KALSİYUM VE Sr<sup>90</sup> KONSANTRASYONU

Toprakta mevcut kalsiyum miktarı çok değişik olmakla (m<sup>2</sup> de 5-500 gr) beraber ortalama olarak m<sup>2</sup> başına 200 gr Ca değeri kabul edilebilir. Dünya üzerine yağın Sr<sup>90</sup> miktarını mc/km<sup>2</sup> cinsinden olmak üzere a ile gösterelim. Toprağın ilk 5 cm. kalınlığındaki tabakasında mevcut olan "kullanılabilir" Ca miktarını da kiloton/km<sup>2</sup> cinsinden olmak üzere b ile gösterelim. O halde topraktaki Sr<sup>90</sup> konsantrasyonu daha evvelce gördüğümüz S.U. birimi cinsinden g<sub>t</sub> ile gösterilirse:

$$g_t = \frac{a}{b} \left( \text{S.U. veya } \frac{\text{pc Sr}^{90}}{\text{gr Ca}} \right)$$

yazılabilir. Normal topraklar için b değeri çok değişiktir (değişme faktörü 100 kadar). a için yukarıda gördüğümüz bir cetveldeki maksimum olan 30 mc/km<sup>2</sup> değeri kabul edilirse, b de 0,0056 ile 0,56 KT/km<sup>2</sup> arasında değiştiğine göre g değeri 50 ile 5000 S.U. arasında değişecek demektir. Demekki topraktaki Sr<sup>90</sup> konsantrasyonu 1975 yılına doğru: her gram Ca başına 50 ile 5000 pc arasında olacaktır. Şimdi topraktaki bu aktivite yüzünden bitkilerdeki aktivitenin ne olacağını görelim.



Genel olarak biliniyor ki canlı organizmalardaki biyokimyasal ve biyolojik olayların çoğu özel bir karakter gösterirler ve ekseriya birbirine benzeyen elementler arasında bir seçme veya ayırma (discrimination) yaparlar. Fakat henüz bilinmeyen sebeplerden dolayı bitkiler Sr ile Ca arasında bir ayırma yapmamaktadırlar. Bu iki element birbirine çok benzeyen (kimyaca aynı grupta olan) iki element oldukları halde bitkiler topraktan her ikisini de aynı oranda almakta ve topraktaki S.U. miktarı ile bitkilerdeki S.U. aynı bulunmaktadır. Yani S.U. cinsinden bitkideki Sr<sup>90</sup> miktarını S<sub>b</sub> ile gösterirsek S<sub>b</sub> hemen hemen g<sub>t</sub> ye eşittir diyebiliriz. Burada bir noktaya dikkat etmek lâzımdır ki o da g<sub>t</sub> nin genel olarak yer yüzündeki Sr<sup>90</sup> konsantrasyonunu gösterdiği dir. Muayyen bir bitkinin içinde yaşadığı toprağın Sr<sup>90</sup> konsantrasyonu ise S<sub>t</sub> ile gösterilir. S<sub>t</sub> ile g<sub>t</sub> birbirinden farklıdırlar ve bu fark bitkinin cinsine, toprağın cinsine, köklerin ne kadar derinliğe indiğine ve başka bazı faktörlere bağlıdır. Mamafih kolaylık olsun diye genel olarak S<sub>t</sub> = g<sub>t</sub> olduğu kabul edilebilir. Bitkinin topraktan Sr<sup>90</sup> ile Ca miktarları pek farklı olmadığı cihetle, S<sub>t</sub>/S<sub>b</sub> oranı ile gösterilen k<sub>1</sub> sabiti 1 veya birden biraz büyük olur. Eğer durumu basitleştirerek

$$S_b = g_t = a/b$$

dersek, belli bir Sr<sup>90</sup> yağışı için S<sub>b</sub> ile b birbirleriyle ters orantılıdırlar. Yani belli bir Sr<sup>90</sup> yağışı için bitkideki Sr<sup>90</sup> konsantrasyonu ile topraktaki Ca konsantrasyonu birbiriyle ters orantılıdır. Demekki toprakta ne kadar çok Ca varsa, o toprakta yetişen bitki o kadar az Sr<sup>90</sup> alır. Ayrıca ilk 5-7,5 cm. kalınlıkta m<sup>2</sup> başına 200 gr Ca ihtiva eden bir toprak için S<sub>b</sub> = 5 a olur<sup>3)</sup>, yani bitkideki Sr<sup>90</sup> miktarı mc/km<sup>2</sup> olarak ifade edilen Sr<sup>90</sup> yağışının hemen hemen 5 katına eşit olur. Yukardaki bilgilerden anlaşıldığına göre km<sup>2</sup> sinde 200 gr Ca olan normal toprağa Sr<sup>90</sup> yağışı a mc/km<sup>2</sup> ise, bitkilerdeki Sr<sup>90</sup> miktarı 5 a olmaktadır. Eğer toprak kalsiyumca zengin ise bitkilere geçen Sr<sup>90</sup> azalmakta, toprak kalsiyumca fakir ise Sr<sup>90</sup> 5a dan fazla olmaktadır. O halde muhtelif topraklarda biriken Sr<sup>90</sup> konsantrasyonu 5 a ile 500 a S.U. arasında olacak ve eğer a = 30 mc/km<sup>2</sup> ise (yani 1980 yıllarında) muhtelif bitkilerdeki

3) b = 200 gr Ca/m<sup>2</sup> olduğundan bu 0,2 kT/km<sup>2</sup> demektir ve S<sub>b</sub> = a/b = a/0,2 = 5 a olur.

$Sr^{90}$  konsantrasyonu 150 ile 15000 S.U. arasında olacaktır. Normal topraklarda yetişen bitkilerde  $Sr^{90}$  konsantrasyonu çimendekinden az, fakat süttekinden birkaç kat fazladır. Bilhassa patates ve havuç gibi depolu sebzelerde ve lahanada ile marul gibi geniş yapraklı sebzelerde de  $Sr^{90}$  nisbeten yüksektir.

#### SÜTTE $Sr^{90}$ KONSANTRASYONU

Hayvanlar, bitkilerin aksine Sr ile Ca arasında bir ayırma yapmaktadırlar. Bu ayırma sebebiyle, 1 gr başına sütteki  $Sr^{90}$  aktivitesi, hayvana yedirilen gıdanın  $Sr^{90}$  aktivitesinden çok daha azdır. Yani hayvan, yediği yem içindeki Sr ile Ca elementlerini aynı oranda almıyor, Ca elementini daha çok tercih ediyor. Bu durum çok önemlidir, zira süt insanlar için çok önemli bir gıda olmaktan başka en başta gelen bir Ca kaynağımızdır. Bitkiden süte geçerken yapılan bu ayırmayı göstermek üzere kullanılan  $k_b, s$  sabitine ayırma sabiti denir.  $k$  sabiti, hayvanın yemindeki  $Sr^{90}$  aktivitesinin sütteki aktiviteye oranı olarak tarif edilir (aktiviteler S.U. cinsinden alınacaktır). Şimdiye kadar yapılan araştırmalara göre  $k$  sabiti inekler için 7, keçiler için 10 dan fazladır. Hayvanların bu şekilde bir ayırma yapmaları ve adeta Sr için bir nevi baraj kurmalarının biyolojik mekanizması henüz bilinmemektedir.

1954 yılındanberi sütlerdeki  $Sr^{90}$  seviyesi mütemadiyen artmış ve 1956 da İngiltere ile Amerika Birleşik Devletlerindeki sütlerde 4 S.U. değeri bulunmuştur ki bu yaklaşık olarak  $km^2$  başına 10 mc yağışa tekabül eder. Bu değer Ca bakımından normal topraklardaki hayvanların sütlerine ait olup, Ca bakımından fakir topraklarda  $Sr^{90}$  seviyesi çok daha fazladır. Meselâ İngilterenin Cardigan bölgesinde 1957 de sütte 33 S.U. bulunmuştur (BRYANT ve arkadaşları 1958). 1960 ve 1961 de ise dünyadaki sütlerde ortalama olarak 6-10 S.U. bulunmuştur.

#### GIDALARIMIZDA $Sr^{90}$ SEVİYESİ

İngilterede 1957 de yapılan araştırmalara göre muhtelif gıda maddelerindeki  $Sr^{90}$  seviyesi S.U. cinsinden şöyledir: Süt ve süt mamulleri 5,45, un ve ekmek 2, patates 23, havuç 11, lahanada 11, meyvalar 15, hububat 10, et 15, yumurta 2, balık 1.

Sütün litresinde takriben 1 gr Ca olduğundan sütte S.U. cinsinden ifade edilen aktivite pc/lt birimine eşit olur. Yani süt için: 1 SU = 1 pc/lt.

#### İNSAN VÜCUDUNUN Sr<sup>90</sup> İÇİN YAPTIĞI AYIRMA

İnsan vücudu da Sr ve Ca arasında bir tercih yapar ve daha ziyade Ca elementini alır. Sr elementini hem az alır, hem de fazla itrah eder. Gıdalarımızdaki Sr elementine karşı ortalama ayırma sabiti  $k_0 = 4$  dir. Ana rahminde bulunan bir bebek için bu ayırma faktörü 2 kat fazla olup 8 dir, yani rahimde bulunan bebek anneden gıda alırken Sr elementine karşı bir ayırma yapar ve bunun sabiti 2 dir. Ayrıca anne sütü ile bebek arasında da  $k = 2$  olan bir ayırma vardır.

Yukarda verilen bilgilerden anlaşılacağı gibi insan vücudunda biriken Sr<sup>90</sup> seviyesi yenilen gıdalara da çok bağlıdır. Kalsiyumca zengin olan gıda maddelerini (meselâ süt) çok kullanan insanlara Sr<sup>90</sup> ın geçişi daha az olacaktır.

Aşağıdaki cetvel topraktaki kalsiyum miktarını, süt içen ve sebze yiyen insanlardaki Sr<sup>90</sup> seviyesine bağlamaktadır. Bu cetvelde b toprağın m<sup>2</sup> başına ihtiva ettiği Ca (gr) miktarı, z insanların aldıkları toplam Ca un süte düşen % sidir. K ise sebzeler ile insan kemiği arasındaki ayırma faktörüdür.

S.U. cinsinden insanların ihtiva edebileceği Sr<sup>90</sup> seviyeleri

b (gr Ca/m <sup>2</sup> )	K = 28 z = %100	K = 13 z = % 80	K = 5 z = % 20	K = 4 z = % 0
2	190	420	1120	1350
200	1.9	4.2	11.2	13.5
500	0.8	1.7	4.5	5.4

Yukardaki cetvele göre meselâ m<sup>2</sup> başına 200 gr Ca ihtiva eden (b = 200) ve evvelce "normal" olarak aldığımız bir toprakta yaşayan insan kalsiyumun % 20 sini süttten alıyorsa (K = 5), bu insanın kemiklerinde 11,2 S.U. seviyesinde Sr<sup>90</sup> birikecektir. Bu seviye ise müsaade edilen maksimum konsantrasyonun (100 S.U.) onda biri kadardır.

Öte yandan Ca bakımından çok fakir ( $b = 2$ ) bir toprakta yaşıyorsa ve kalsiyumun hepsini sebzelerden alıyorsa ( $K = 4$ ), yani hiç süt içmiyorsa kemiklerinde  $\sim 1400$  S.U. olacaktır ki bu tehlike sınırının üstündedir.

1958 yılına kadar yapılan ölçülere göre halen dünya üzerindeki insanların herbirinde takriben 10 S.U. kadar  $Sr^{90}$  vardır. Son Sovyet bombaları yüzünden bu değerin daha artmış olduğu muhakkaktır.

#### $Sr^{90}$ IN BİYOLOJİK ZARARLARI

İnsanların kemiklerinde mevcut olan  $Sr^{90}$  seviyesi 10 S.U. civarında olduğuna göre bu aktivitenin kemiklere yılda 30 mr veya bütün ömür boyunca 2 r verdiği hesaplanmıştır. Bu doz miktarı ise tabiatın insana verdiği dozun dörtte biri kadardır.

$Sr^{90}$  izotopunun biyolojik etkileri başlıca 4 kısımda toplanabilir. Bunlar: Lösemi, kemik tümörü, hayatın kısalması ve genetik etkiler'dir.

$Sr^{90}$  ve diğer radyoaktif yağış maddelerinin insan vücuduna bu dört yolda etki ettiği bir gerçek olup, yukarda kabul edilen 10 S.U. değeri, doğrudan doğruya değilse de genetik etki dolayısıyla uzun vadeli zararlar meydana getirmeye yeter.  $Sr^{90}$  elementinin yayınladığı  $\beta$  ışınları organizmaları içerden dövrerek tahrib eder ve yalnız  $Sr^{90}$  elementini taşıyan insana etki ederse de, bir de bunun uzun vadeli genetik zararı vardır ki o da bazan kendini birkaç nesil sonra bile gösterebilir.

#### L İ T E R A T Ü R

1. BRYANT, F.J., CHAMBERLAIN, A.C., SPICER, G.S. and WEBB, M.S.W. :Strontium in diet. - Brit.Med.J. **1**, 1958: 1371-1375. 1958.
2. KUSANO, N. : Atomic energy injuries. Tokyo, 1953.
3. Nuclear explosions and their effects. Delhi.
4. ŞENVAR, C. ve YÜCELİK, U. : Atom Enerjisi Komisyonuna sunulan rapor (Basılmakta).
5. USAEC : The effects of atomic weapons. 1950.