

**T.C.
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEZYUM-137’NİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN TOKSİKOLOJİK AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ecz. Ebru ERDAĞ

**Farmasötik Toksikoloji Programı
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ANKARA

2022

**T.C.
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEZYUM-137’NİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN TOKSİKOLOJİK AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ecz. Ebru ERDAĞ

**Farmasötik Toksikoloji Programı
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Aylin GÜRBAY**

ANKARA

2022

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SEZYUM-137’NİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
TOKSİKOLOJİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Öğrenci: Ecz. Ebru Erdağ

Danışman: Prof. Dr. Aylin Gürbay

Bu tez çalışması 26 Ocak 2022 tarihinde jürimiz tarafından “Farmasötik Toksikoloji Programı”nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Terken Baydar
(*Hacettepe Üniversitesi*)

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aylin Gürbay
(*Hacettepe Üniversitesi*)

Üye: Prof. Dr. Pınar Erkekoğlu
(*Hacettepe Üniversitesi*)

Üye: Prof. Dr. Sevtap Aydın Dilsiz
(*Hacettepe Üniversitesi*)

Üye: Prof. Dr. Hande Gürer Orhan
(*Ege Üniversitesi*)

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri tarafından uygun bulunmuştur.

24 Şubat 2022

Prof. Dr. Müge YEMİŞCİ ÖZKAN
Enstitü Müdürü

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

25 / 02 / 2022

(İmza)

Ebru ERDAĞ

i

ⁱ “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir *. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir

* Tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.**

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında zgn olduğunu, Prof. Dr. Aylin GÜRBAY danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

Ecz. Ebru ERDAĞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Aylin GÜRBAY'a,

Eğitimim boyunca bana katkı sağlayan hocalarıma,

Tezimin her aşamasında bana yardım eden ve desteğini hiç esirgemeyen Ecz. Azranur DAL'a,

Her zaman yanımda olan, beni her adımda destekleyen, hayatıma güzellik katan ve yüksek lisans sürecini en kolay şekilde tamamlamam için özveride bulunan annem ve babama,

Çok teşekkür ederim.

ÖZET

Erdağ, E., Sezyum-137'nin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkilerinin Toksikolojik Açıdan Değerlendirilmesi, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Toksikoloji Programı Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2022. Sezyumun radyoaktif bir izotopu olan sezyum-137, beta ve gama ışınları yapan, yarılanma ömrü 30 yıl olan bir elementtir. Özellikle nükleer silah denemeleri ve nükleer enerji santrallerde meydana gelen sızıntılar veya kazalar sonrasında çevreye yayılarak besin zincirine katılması söz konusu olan bu elementin insan sağlığı üzerine etkilerinin saptanması önem taşımaktadır. Ancak literatür verileri, sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkileri konusundaki bilgilerin yeterli düzeyde olmadığını göstermekte, dünyada söz sahibi yetkili kurumların da bu elemente maruziyetin riskleri konusunda çelişkili açıklamalar yaptığı anlaşılmaktadır. Türkiye'ye yakın ülkelerde bulunan nükleer enerji santrallerinin eski teknolojiye dayalı özellikler taşıması ve ülkemizde kurulma çalışmaları başlatılan bir nükleer enerji santralının bulunması, sezyum-137'ye maruziyet riski konusunda daha fazla bilgi sahibi olunması gerektiğini düşündürmektedir. Diğer taraftan sezyum-137'ye daha farklı maruziyet kaynakları da bulunmaktadır. Konu hakkındaki bilgi açıkları dikkate alındığında, bu tez çalışması kapsamında, sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin, mevcut bilimsel çalışmaların incelenmesi ile toksikolojik açıdan değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ulusal ve uluslararası güncel kaynakların kapsamlı olarak değerlendirilmesi sonucunda hazırlanan bu çalışma ile söz konusu radyoaktif elementin insan sağlığı üzerindeki etkileri, tedavi yaklaşımları ve korunma yolları konusunda kapsamlı bir başvuru kaynağının oluşturulması düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon, sezyum-137, toksik etki, insan sağlığı, tedavi

ABSTRACT

Erdag, E., Toxicological Evaluation of the Effects of Cesium-137 on Human Health, Hacettepe University Graduate School Health Sciences, Pharmacy Department of Toxicology Master of Science Thesis, Ankara, 2022. Cesium-137, a radioactive isotope of cesium, is an element that emits beta and gamma radiation and has a half-life of 30 years. It is important to determine the effects of this element on human health, especially after nuclear weapons tests and leaks or accidents in nuclear power plants, which spreads to the environment and participates in the food chain. However, the literature data shows that the information on the effects of cesium-137 on human health is not sufficient, and it is understood that the authorized institutions in the world also make contradictory statements about the risks of exposure to this element. The fact that the nuclear power plants located in countries close to Turkey are based on old technology and that there is a nuclear power plant in our country, which has started to be established, makes us think that more information should be known about the risk of exposure to cesium-137. On the other hand, there are different sources of exposure to cesium-137. Considering the knowledge gaps on the subject, within the scope of this thesis, it is aimed to evaluate the effects of cesium-137 on human health in terms of toxicology by examining existing scientific studies. With this study, which is prepared as a result of a comprehensive evaluation of national and international current sources, it is thought to create a comprehensive reference source on the effects of the said radioactive element on human health, treatment approaches and ways of protection.

Key Words: Radiation, cesium-137, toxic effect, human health, treatment

İÇİNDEKİLER

ONAY SAYFASI	iii
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	iv
ETİK BEYAN	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
ŞEKİLLER	xii
TABLolar	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Radyasyon ve Radyoaktivite	5
2.1.1. Radyasyon ve Radyoaktivite Nedir?	5
2.1.2. Radyasyonun Tarihçesi	7
2.1.3. Radyasyonun Kullanım Alanları	8
2.1.4. Radyasyon Türleri	9
2.1.5. Radyasyon Ölçüm Birimleri ve Tanımları	12
2.1.6. Radyasyona Maruziyet	13
2.1.7. İyonize Radyasyonun Etkileri	16
2.1.8. Radyasyona Maruziyet Sonrası Tedavi Yaklaşımları	21
2.2. Sezyum	23
2.2.1. Sezyum ve Tarihçesi	23
2.2.2. Sezyumun Fizikokimyasal Özellikleri	23
2.2.3. Sezyumun Kullanım Alanları	24
3. YÖNTEM	25
4. BULGULAR	27

4.1. SEZYUM-137	27
4.1.1. Sezyum-137'nin Tarihçesi	27
4.1.2. Sezyum-137'nin Fizikokimyasal Özellikleri	28
4.1.3. Sezyum-137'nin Kullanım Alanları	28
4.1.4. Sezyum-137'nin Radyoaktivitesi	28
4.1.5. Sezyum-137'nin Toksikokinetik Özellikleri	29
4.1.6. Sezyum-137'nin Toksisitesi	36
4.1.7. Sezyum-137'nin Akut ve Kronik Toksisitesi	39
4.1.8. Sezyum-137'nin Sistemik Toksisitesi	41
4.1.9. Epidemiyolojik Çalışmalar	48
4.1.10. Tedavi Yaklaşımları ve Antidot Kullanımı	54
4.1.11. Sezyum-137'nin Çevreye Yayılımı ve Çevreden Arındırılması	59
4.1.12. Nükleer Enerjinin Tarihçesi	62
5. TARTIŞMA	73
6. SONUÇ	77
7. KAYNAKLAR	78
8. EKLER	
EK-1: Tez Çalışması Orijinallik Raporu	
9. ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR

8-OhdG	8-hidroksi-2'-deoksiguanozin
Bq	Bekerel
BPA	Bisfenol A
BT	Bilgisayarlı Tomografi
CNT	Karbon Nano Tüpçükler
Cs	Sezyum
DNA	Deoksiribonükleik Asit
EPA	Amerikan Çevre Koruma Kurumu (<i>United States Environmental Protection Agency</i>)
FDA	Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (<i>The United States Food and Drug Administration</i>)
INES	Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (<i>International Nuclear and Radiological Event Scale</i>)
IP6	İnositol Hekzafosfat
K⁺	Potasyum
LDH	Laktat Dehidrogenaz
LD₅₀	Letal Doz
M-IP6	İnositol Hekzafosfatın metal ile bileşiği
mtDNA	Mitokondriyal DNA
Na⁺⁺	Sodyum
nDNA	Nükleer DNA
PM	Prusya mavisi
RAT	Reaktif Azot Türleri
ROT	Reaktif Oksijen Türleri
SI	Uluslararası Birimler Sistemi (<i>International System of Units</i>)
TNT	Trinitrotoluen
UNSCEAR	Atomik Radyasyonun Etkileri Hakkında Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi (<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>)

ŞEKİLLER

Şekil		Sayfa
2.1.	Elektromanyetik spektrum.	10
4.1	Uranyum elementinin bozunması.	29
4.2.	Sezyum-137'nin vücutta dağılımı.	31
4.3.	Diyete eklenen potasyumun sezyum atılımına etkisi.	32
4.4.	Sezyum-137'nin feçes ve idrar ile atılım oranları	34
4.5.	Sezyum-137'nin hamilelikteki yarılanma ömrü.	36

TABLolar

Tablo		Sayfa
2.1	Radyasyon kaynaklarının dağılımı ve dağılımların yüzde oranları.	13
2.2.	Radyasyona maruziyet sonrası ortaya çıkan erken ve gecikmiş etkiler.	18
2.3.	Tüm vücudun radyasyona akut maruziyeti sonucunda gözlenen etkiler.	20
2.4.	Vücudun bölgesel olarak radyasyona akut maruziyeti sonucunda gözlenen etkiler.	21
4.1.	Sezyum-137 enjeksiyonundan 48 saat sonra inositol hekzafosfat bileşikleri ve Prusya mavisi ile tedavi edilmiş grupta radyoaktivitenin biyolojik dağılımı.	58
4.2.	Sezyum-137'nin oral yolla uygulanmasından 24 saat sonra inositol hekzafosfat bileşikleri ve Prusya mavisi ile tedavi edilmiş grupta radyoaktivitenin biyolojik dağılımı.	58
4.3.	Radyasyon yayılımına neden olan kaza örnekleri.	63

1. GİRİŞ

Yeryüzünde yaşayan bütün organizmalar sürekli olarak doğal iyonize radyasyona maruz kalmaktadır (1, 2). İyonize radyasyona maruziyet ayrıca, kanser tedavisi ve teşhis amaçlı radyolojik işlemler için uygun radyoaktif elementlerin yaygın olarak kullanımının yanı sıra endüstriyel ve askeri alanlar ile çeşitli çevresel kaynaklar yoluyla da gerçekleşir (1-4).

Atom bombasının 1945 yılında iki ayrı kez Japonya'ya atılması ve izleyen yıllarda nükleer silahların deneme amaçlı da olsa, uzun yıllar boyunca kullanımı sonucunda meydana gelen fisyon sonrası ve dünya çapında nükleer santrallerin kullanıma girmesi ile meydana gelen sızıntılar veya kazalar nedeniyle; çok farklı türde radyoaktif izotop meydana gelir (5). Meydana gelen radyoaktif izotoplar arasında sezyum-137 de bulunmaktadır (5-7).

Fisyon ürünü sezyum-137'nin 1950 yıllarında çevrede ve insan organizmasında artan düzeylerde bulunduğu saptanmasının ardından bu elementin biyolojik etkilerinin araştırılması konusuna ilgi de artmıştır (6). Diğer taraftan, Çernobil veya Fukuşima'da meydana geldiği gibi, bir nükleer enerji santrali kazasının ardından çevreye salınan en önemli radyoaktif kirleticilerden bir tanesinin de sezyum-137 olduğu bilinmektedir (7-10).

Japonya'da 2011 yılında gerçekleşen Fukuşima Kazası'ndan sonra okyanusa salınan ve günümüzde de salınımı devam eden sezyum-137 gibi radyoaktif elementlerin konsantrasyonunun, okyanusun çok yüksek kapasitedeki seyreltici etkisi ile azalacağı düşünülse de, bu ve benzeri elementlerin uzun yarılanma ömrüne sahip olmaları, çok uzun yıllar deniz ekosisteminde kalmalarına ve besin zinciri yolu ile insana kadar ulaşmalarına neden olmaktadır (7). Yapılan çalışmalar, toprak ve su ekosisteminde yaygın olarak dağılım gösteren en önemli radyonüklidin sezyum-137 olduğunu göstermektedir (2, 11).

İnsanların sezyum-137'ye ana maruziyet yolları, kontamine içme suyu ile et, sebze ve meyve tüketimidir (2, 12). Japonya'da bebek mamalarında sezyum-137 saptanması bu konuya verilebilecek bir diğer örnektir (5, 13).

Sezyumun radyoaktif bir izotopu olan sezyum-137, uranyum ve plütonyum gibi farklı radyoaktif elementlerin nükleer fisyonu sonucunda kendiliğinden meydana gelir (14). Sezyum, suda çözünür, potasyum ve sodyuma benzer şekilde davranır (6). Atom ağırlığı 132,9 olan sezyum-137'nin yarılanma ömrü 30 yıldır ve beta parçacıkları yayarak bozunur. Sezyum-137 ve nükleer izomeri baryum-137, gama radyasyonu yayar (14-16).

Kanser tedavisinde kobalt-60'ın yerini alan sezyum-137, tıbbi malzemeler ile et, taze sebze ve diğer besinlerin sterilizasyonunda olduğu gibi endüstriyel amaçlarla da kullanılmaktadır (9, 14). Sezyum-137'nin bir diğer kullanım alanı radyoaktif ilaçların dozlarının belirlenmesi ve petrol sanayinde boru hatlarındaki akışın saptanmasıdır (17). Sezyum-137, sıvı sintilasyon spektrometrelerinde "sızdırmaz kaynak" olarak ticari amaçla da kullanılmaktadır (14, 18).

Sezyum-137 absorpsiyonu takiben organizmada homojen olarak dağılır. Toksikitesi esas olarak radyoaktif özelliklerinin bir sonucudur (19). Radyonüklidler organizmaya giriş yaptıktan sonra, hücre ve dokular radyoaktif etkiye, yayılan radyasyon tamamen tükeninceye kadar veya radyonüklid tamamen vücuttan atılıncaya kadar maruz kalır (14, 20).

Beta ve gama ışın yapması nedeniyle sezyum-137'nin meydana getireceği toksik etkiler, organizmanın bu ışınlarla iç veya dış maruziyeti sonucunda veya hem iç hem dış maruziyeti sonucunda gerçekleşebilir. Beta ve gama radyasyon, doku hasarını indükleyebilir ve hücre işlevlerini bozar (14). Meydana gelen etkiler, maruz kalınan doz, maruziyet süresi, maruz kalınan vücut yüzey alanı, maruziyet yolu gibi birçok etmene bağlı olarak çok hafif etkilerden ölüme kadar farklı şekilde gerçekleşebilir (14, 21). Etkiler, yukarıda belirtilen nedenlere bağlı olarak ani, gecikmiş veya sonraki nesillerde görülebilecek şekilde gerçekleşebilir (14, 17, 18, 21).

İnsanlar üzerinde yapılan çalışmalar, bu elementin immün sistemi etkilediğini, konjenital malformasyonlara neden olduğunu ve nörolojik sistem üzerinde olumsuz etkiler meydana getirdiğini göstermiştir. Maruziyet dozu ve süresine bağlı olarak akut radyasyon sendromu, radyasyon yanıkları görülmesi söz konusu olabilir (14). Çocuklar sezyum-137'nin etkilerine yetişkinlerden daha duyarlıdır. Sezyum-137'nin

D vitamini, kolesterol ve steroid hormon metabolizması üzerinde de deęişiklikler meydana getirdięi bildirilmiř olup, dūřuk düzeyde meydana gelen biyolojik etkilerin ise klinikte gözlenmedięi belirtilmiřtir (18). Plasentadan fetūse geçtięi belirlenen sezyuma anne sütünde de rastlanmıřtır (22). Sezyum-137'nin insanda karsinojen olduęuna iliřkin yeterli veri yoktur (19). Ancak gama radyasyonu, insanda Grup 1 karsinojen olarak tanımlanmıřtır (23).

Prusya mavisinin (ferrik hekzasiyanoferrat), sezyum-137'ye maruziyet sonrasında bu radyoaktif elementin bağırsaklardan atılmasında yararlı etki meydana getirdiği ve bu nedenle sezyum-137 kaynaklı radyasyona maruziyette kullanılabilcek en etkin antidot olduğu bildirilmiştir (14, 24).

Bu bilgilerden hareketle bu tez kapsamında, sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin, toksikoloji bakış açısı ile değerlendirilmesi planlanmış ve inceleme, aşağıdaki plan çerçevesinde gerçekteştirilmiştir:

1- Radyoaktif özelliğe sahip sezyum-137'ye maruziyet yolları, gerek geçmişte kullanılan atom bombalarının etkileri, nükleer silah denemeleri, çeşitli kazaların meydana getirdiği etkilerin sonuçlarının değerlendirilmesi ile elde edilen veriler, gerekse günümüzde artan nükleer santral ve/veya endüstriyel kaza olasılığının yanı sıra, dünya çapında bir nükleer savaş tehdidi de dikkate alınarak incelenecektir. Bu kapsamda, sezyum-137'nin toksik etkileri, akut ve kronik toksisitesi konusunda yapılan çalışmalar ve epidemiyolojik araştırma sonuçları dikkate alınarak literatür verileri işıkında ayrıntılı olarak araştırılacaktır.

2- Yakın geçmişte yaşanan Fukuşima Nükleer Santral kazasından sonra sezyum-137 gibi radyonüklidlerin etkilerine ilgi, yeniden önemli ölçüde artmıştır. Sezyum-137 konusunda var olan bilgilerin, gerçekte birçok çelişki taşıdığı, bu konuda yurtdışındaki resmi kurumlar arasında farklı görüşler bulunduğu, halkın ise konu hakkında yeterli ve güvenilir bilgiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Özellikle bir nükleer santral kazası sonrası çevreye yayılması engellenemediği için hakkında doğru bilgilere sahip olunması büyük önem taşıyan bu element konusunda güvenilir bilgilerin derlenmesi de değer taşımaktadır. Konu, Türkiye'de kurulumu başlatılan bir nükleer santral olduğu düşünüldüğünde daha da önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında, yukarıda belirtilen konularda literatür taraması yapılarak mevcut durum hakkında Türkiye ve dünyadaki bilimsel veriler incelenerek, bilimsel araştırmalar ve resmi kurumlara ait kaynaklar kullanılarak karşılaştırmalar yapılacak ve sezyum-137'ye maruziyetin insan sağlığı üzerindeki etkileri ve tedavi yaklaşımları, toksikolojik açıdan ayrıntılı olarak değerlendirilecektir. Bu tezde yer alacak bilgilerin, sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkileri konusuna, toksikolojik bakış açısı ile katkı sağlaması beklenmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyasyon ve Radyoaktivite

2.1.1. Radyasyon ve Radyoaktivite Nedir?

Radyasyon, yapay ya da doğal bir kaynaktan parçacık akışı ya da dalga şeklinde salınan enerjidir (25-28). Radyasyon; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık, ultraviyole, alfa parçacıkları, X-ışınları ve gama ışınları gibi parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar şeklinde uzayda yayılır (25-29). Radyasyonun kaynağı, radyoaktif atomlardır.

Bir atom çekirdeğinde yer alan proton ve nötronların ağırlıkları birbirine benzerdir. Proton ve nötronlar arasında çekirdeği bir arada tutan bir bağ bulunmaktadır ve çekirdeğin kararlılığı bu bağın gücüyle ilişkilidir. Proton ve nötronlar arasındaki bağlar güçlü ise çekirdek kararlıdır. Ancak bu bağın güçlü olmadığı durumlarda (nötron sayısının proton sayısından fazla olduğu durumlarda), çekirdekte yer alan proton ve nötronlar çekirdek dışına hareket ederek serbest kalabilir. Böylece meydana gelen yüksek enerji sonrası çekirdek kararsız hale geçer (30, 31). Radyoaktif atom, çekirdekteki kararsızlık nedeniyle radyasyon yayan atomlardır (30, 32).

Proton sayısı, yani atom numarası, elemente özgüdür. Bir elementin özelliklerini atom numarası belirler. Ancak atom numarası aynı olup nötron sayısı farklı olan atomlar izotop atomlardır. Radyoaktif özelliğe sahip izotoplara radyoizotop denir (30, 33, 34).

Periyodik tabloda 6 ve 7. satırda yer alan, atom numarası 83'ten büyük olan atomlar radyoaktif atomlardır. Radyoaktif atomlar doğada eser miktarda bulunabildiği gibi, bir atoma yapay olarak da radyoaktif özellik kazandırılabilir (35). Nötron radyasyonuna maruz bırakılan bir atom kararsız hale gelerek radyoaktif hale geçer. Kararsız atom ise yeniden kararlı hale geçene kadar radyasyon yayar. Radyoaktif bir atomun kendiliğinden iyonize enerji yayarak daha kararlı bir atoma dönüşmesine radyoaktif bozunma, bu dönüşüm sürecine ise radyoaktivite denir. Bir diğer deyişle radyoaktivite, yayılan radyasyon miktarının zamanla azalmasıdır (26, 30-34).

Radyoaktivite, yavaşlatılamaz ya da durdurulamaz ve atom çekirdeği kararlı duruma ulaşana kadar devam eder (35). Her radyoaktif atom belirli ve sabit bir oranda bozunur. Başlangıçtaki radyoaktivite miktarının yarıya düşmesi için geçen süreye yarılanma ömrü adı verilir (26, 31, 32, 33, 34). Her radyoaktif atomun kendine özgü bir yarılanma ömrü vardır. Örneğin; iyot-131'in yarılanma ömrü sekiz gün iken plütonyum-239'un yarılanma ömrü 24.000 yıldır. Bir radyoaktif atomun özelliklerini yarılanma ömrü dışında yaydığı radyasyon türü ve enerjisi belirlemektedir. Bir diğer anlatımla, radyasyon türü, enerji ve yarılanma ömrü bir radyonüklidi diğerinden ayırır (33). Kısa yarılanma ömrüne sahip bir radyoizotop uzun yarı ömre sahip bir radyoizotoptan daha radyoaktiftir. Başka bir deyişle, daha kısa sürede daha fazla radyasyon yayar (26, 31, 32).

Radyasyon, doğal ya da yapay olarak meydana gelebilir. Doğal radyasyon, doğada kendiliğinden var olan radyoaktif maddenin yaydığı radyasyondur. Doğal radyasyona maruziyet; kozmik radyasyon, karasal radyasyon, yapı malzemelerinde yer alan radon ve iç radyasyon kaynaklı olabilir. Yapay radyasyon ise, laboratuvar ortamında radyoaktif hale getirilen maddenin yaydığı radyasyondur. Yapay radyasyona maruziyet; mesleki maruziyet, nükleer kazalar, radyofarmasötikler ve tıbbi X-ışınları kaynaklı olabilir. Bunun yanı sıra, artan enerji gereksinimine bağlı olarak kurulan nükleer santrallerde gerek çalışanların radyoaktif elementlere çeşitli yollarla maruziyeti, gerekse atıkların uygun şekilde bertaraf edilmemesi ve/veya kazalar sonucunda da yapay radyasyon kaynaklarına maruz kalınması söz konusu olabilir. Bu olaylar da yapay radyasyona maruziyete örnek olarak verilebilir (26, 31, 32, 35).

Fisyon; kelime anlamı olarak, ikiye bölünme demektir. Nükleer fisyon reaksiyonları, yüksek kütle ağırlığına sahip uranyum gibi atomların nötron absorpsiyonu sonrasında atom çekirdeğinin parçalanmasıdır. Bu süreç sonucunda çekirdek iki ya da üç nötron salınımı yapar. Ortaya çıkan enerji ile fisyon ürünü bir diğer atomun çekirdeğinde de aynı olay gerçekleşir. Bilim insanları, fisyon reaksiyonlarının uranyum-235, plütonyum-239 gibi atom kütleleri tek olan atomlarda gerçekleşme eğiliminde olduğunu keşfetmiştir. Bu reaksiyonun, nükleer silah kullanımını sonucu hızla gerçekleşerek radyasyonun çevreye yayılması durumunda bir şehri yok edebilecek enerji ortaya çıkarması olasıdır (30, 31, 34, 36).

Füzyon; kelime anlamı olarak, birleşme demektir. Nükleer füzyon reaksiyonları, bir atomun yüklü parçacıklarla etkileşmesi ya da nükleer bir olayın gerçekleşmesine yetecek düzeyde sıcaklık artışı sonrası düşük atom kütlelerine sahip iki atomun birleşmesidir. En bilinen füzyon reaksiyonları hidrojen atomu ile gerçekleşen reaksiyonlardır. Güneşte çok yüksek sıcaklık ve yüksek basınç hidrojen atomlarının birleşerek daha yüksek atom kütlelerine sahip helyuma dönüşmesi, füzyon olayına bir örnektir. Füzyon reaksiyonları, fisyon reaksiyonlarından daha yüksek düzeyde enerji yayar. Ancak bu enerjiyi kontrol edebilecek teknoloji ve sistem günümüz koşullarında bulunmadığı için füzyon reaksiyonları nükleer enerji üretiminde henüz kullanılabilir değildir (30, 31, 34, 36).

2.1.2. Radyasyonun Tarihçesi

Radyasyon araştırmaları 1800'lerin sonunda Wilhelm Conrad Röntgen tarafından X-ışınlarının keşfi ile başlamıştır. Röntgen, radyasyonu “görünmez ışık” olarak adlandırılmıştır (34, 37).

Henri Becquerel, Wilhelm Röntgen tarafından keşfedilen X-ışınlarının ardından, uranyum cevherinden yayılan radyasyon hakkında araştırmalar yapmaya başlamıştır (31, 38). Karanlıkta tuttuğu bir fotoğraf plakasının, uranyum sülfat kristali ile teması sonucunda, bilinmeyen ışın türlerinin yarattığı bir görüntü kaydettiğini keşfetmiştir (26, 34, 38). Ayrıca 1896'da uranyum cevherinden yayılan radyasyonun ışığa duyarlı kağıdı (kamera filmi gibi davranan kağıt) karartabileceğini keşfetmiştir (31).

1800'lerin sonlarında radyasyon hakkında araştırma yapan ilk bilim insanlarından olan Marie ve Pierre Curie uranyum dışında toryum gibi başka elementlerin de radyasyon yaydığını belirlemiştir (34, 39). 1898'de Marie ve Pierre Curie uranyum cevherinden yeni radyoaktif elementleri (polonyum ve radyum) izole etmeyi başarmış ve bu araştırma sonucunda iki Nobel ödülüne layık görülmüştür (31, 34).

James Clerk Maxwell, 1865 yılında elektromanyetik radyasyonu keşfetmiş ve radyasyonun ışık hızında hareket edebildiğini hesaplamıştır. Heinrich Hertz, 1888

yılında Maxwell'in elektromanyetik radyasyon çalışmaları sonrasında radyo dalgalarını keşfetmiştir (34).

Paul Ulrich Villard, 1900 yılında gama radyasyonunu keşfetmiştir. Keşfinden 100 yıl sonra hayatı ve başarılarının anlatıldığı eser yayımlanana kadar keşfi unutulmuştur. (34). 1900'lerin başlarında, Ernest Rutherford tarafından yapılan araştırmalar, farklı iyonlaştırıcı (iyonize) radyasyon türleri olduğunu göstermiştir. Bu türleri basitçe tanımlamak için Yunan alfabesinin ilk üç harfi kullanılmıştır: Alfa (α), beta (β) ve gama (γ) ışınları (34, 39).

Albert Einstein, 1900'lü yılların ilk çeyreğinde, enerji ve kütle arasındaki ilişkiyi keşfederek radyoaktivite ve radyoaktif bozunma sürecini açıklamıştır. Henry Moseley, alfa, beta ve gama ışınlarının dalga boyu ölçümlerini yapmıştır. Radyasyon frekansı ve dalga boyları konusunda çalışmalar gerçekleştirmiştir. Niels Bohr, enerjinin atomlar tarafından yayılabildiğini ve absorbe edilebildiğini belirtmiştir. Çekirdek etrafında yer alan bir elektronun daha düşük enerjideki bir orbitale geçmesi sonrasında açığa çıkan enerjinin radyasyon olarak yayıldığını açıklamıştır (34).

1938'de Otto Hahn ve Fritz Straßmann uranyum çekirdeklerinin bölünmesini indüklemeyi başarmıştır. Sonuç olarak edinilen bilgi ve deneyimler ışığında, nükleer fizik teknolojisi gelişmeye devam etmiştir (34, 40).

2.1.3. Radyasyonun Kullanım Alanları

Radyoaktif elementlerin, atom bombası veya nükleer silahlar gibi yıkıcı amaçlarla kullanımı mümkün olduğu gibi, insanlık için yararlı kullanım alanları da bulunmaktadır. Radyasyondan; sağlık, endüstri, enerji kaynağı elde edilmesi, bilimsel araştırmalar, tarım ve hayvancılık gibi birçok alanda yararlanılmaktadır.

Tanı amacıyla X-ışınlarının kullanımı ve pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi nükleer tıp uygulamaları, radyasyonun sağlık alanında kullanımına örnek olarak verilebilir. Bunun yanında, radyasyonun tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Kanser tedavisinde radyoterapi uygulaması ve radyofarmasötik kullanımı, radyasyonun insan sağlığı için yararlı kullanım alanları arasında yer almaktadır (33, 41).

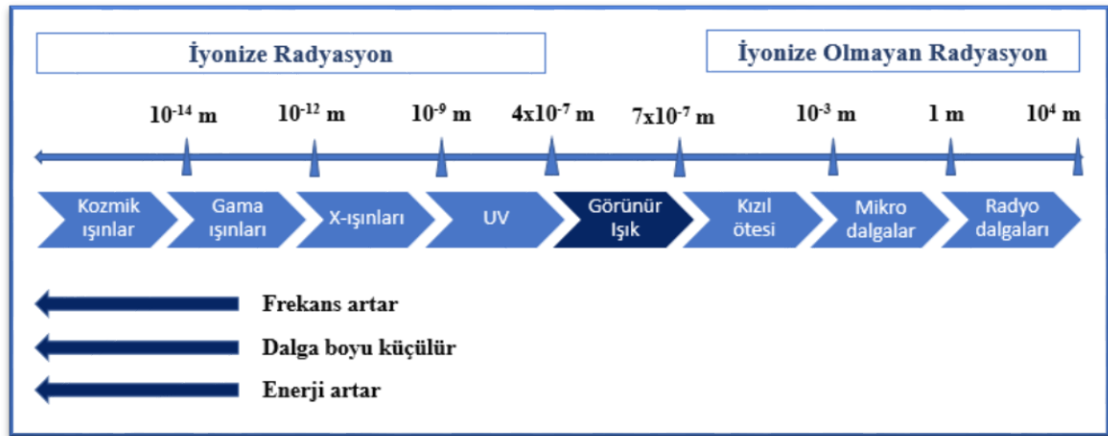
Endüstride, petrol ve maden aramaları nükleer ölçüm cihazları ile gerçekleştirilir. Otomotiv sektöründe radyonüklidler araç parçalarının aşınım testleri için gereklidir. Karbon-14 ile arkeolojik kazılar sonrası bulunan eserlerin yaş tayini yapılmaktadır (33, 41).

Tarımda toprağın su ihtiyacını belirlemek amacıyla nötron kaynakları kullanıldığı gibi, radyoaktif maddeler ile işaretlenmiş gübre kullanımı ile üretilen bitkiye uygun ve yeterli miktarda gübre ulaşımı sağlanmaktadır. Zararlı böcek türlerinde üremeyi kısıtlamak amacıyla da radyasyon kullanımı söz konusudur. Ayrıca gıdaların korunması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla da radyasyon kullanımı etkili bir yöntem olarak belirlenmiştir (33, 36, 41).

Bazı bilimsel araştırmalar ile, radyasyon ve nükleer enerji ile ilgili çalışmalarda da radyasyondan yararlanılmaktadır (41). Dünya nüfusunun artan enerji gereksinimini karşılamak amacıyla kurulan nükleer enerji santralleri de radyasyonun kullanım alanları arasında sayılabilir (33, 36, 41).

2.1.4. Radyasyon Türleri

Radyasyon, temel olarak iyonize olmayan radyasyon ve iyonize radyasyon olarak ikiye ayrılabilir (25, 26, 28, 42). En düşük frekanslarda kızılötesi dalgalar, mikrodalgalar ve radyo dalgaları oluşur. Dalga boylarına göre elektromanyetik spektrum Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Bu spektrumda dalga boyu küçüldükçe frekans ve enerji artmaktadır. Radyasyonun sınıflandırılmasında dalga boylarının frekansları belirleyici etmendir (26, 32).



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum (26, 32).

İyonize radyasyon atomlardan elektron kopmasına, böylelikle nötr bir atomun ya da molekülün elektrik yüklenmesine neden olan radyasyondur. Bu olay yüksek frekanslarda ışınım ile gerçekleşir (25, 26, 31, 32). İyonize radyasyonun kaynağı alfa partiküller, beta partiküller, gama ve X-ışınları ile nötron radyasyonudur (39, 42).

İyonize olmayan radyasyon, bir moleküldeki atomların titreşimine neden olurken, atomlardaki elektronların enerji düzeylerinde bir değişikliğe neden olmayan radyasyondur. Düşük frekanslarda oluşur. Bu tür radyasyonun örnekleri ses dalgaları, görünür ışık ve mikrodalgalarıdır (25, 26, 32, 42).

Alfa parçacıkları, +2 pozitif yüklüdür. Radyonüklid çekirdeğinden yayılır ve iki proton ile iki nötrondan oluşur. Esasen bir alfa parçacığı yüksek enerjili helyumdur (17, 43, 44). Elektrondan 7000 kat daha ağırdır. Alfa parçacıklarının yayılımı kısıtlıdır ve bir kağıt yaprağı ile durdurulabilir (30, 27, 33). Alfa parçacıkları, cildin dış tabakasına nüfuz edebilecek enerjiye sahip değildir. Ancak alfa parçacıkları inhalasyon yolu ve oral yolla veya bir kesikten vücuda girerse duyarlı canlı dokuya zarar verebilir (26, 39).

Beta parçacıkları, radyoaktif bozunma sırasında bir atomun çekirdeğinden yayılan, pozitron adı verilen parçacıklardır (17, 33, 44). Beta parçacıklarının alfa parçacıklarına göre nüfuz etme yeteneği daha güçlüdür. Beta parçacıkları havada alfa parçacıklarından daha uzağa ilerleyebilirler. Bir giysi tabakası veya ince bir alüminyum tabakası ile durdurulabilirler (30, 43). Beta parçacıkları cilde nüfuz

edebilir ve cilt yanıkları gibi hasara neden olabilir. Alfa parçacıkları gibi, beta parçacıkları da oral ya da inhalasyon yoluyla ve deride bir kesik varsa vücuda alınabilir (26, 39).

Gama ışınları, foton adı verilen ağırlıksız enerji kümeleridir. Hem enerjisi hem de kütlesi olan alfa ve beta parçacıklarının tersine, gama ışınları saf enerjidir. Alfa ve beta parçacıklarını durdurabilen cilt ve kumaş gibi engeller gama ışınları için etkili değildir. Bu ışınların nüfuz etme yeteneği oldukça güçlüdür (26, 27, 30, 31, 39, 44). Kurşun, volfram, uranyum gibi yoğun malzemeler ile çok kalın beton ve derin su, gama ışınlarını durdurabilir veya zayıflatabilir (30, 33). Gama ışınları insan vücudundan tamamen ve kolayca geçebilir. Bu geçiş sırasında doku ve DNA'ya zarar veren iyonlaşmalara neden olabilir ve tüm vücut için radyasyon tehlikesi oluşturabilir (26, 39).

X-ışınları, gama ışınları gibi saf enerjiden meydana gelmiştir, tek farkı oluşum yeridir. Gama ışınları çekirdeğin içindeki fotonlardan oluşurken, X-ışınları çekirdeğin dışına çıkan fotonlardan oluşur. X-ışınları, enerji bakımından gama radyasyonundan daha düşük enerjiye sahiptir (17, 26, 39). Gözlemlenen ve yapay olarak üretilen ilk radyasyondur ve çoğunlukla görüntüleme kaynağı olarak bilinmektedir. Özellikle tıp alanında kullanılarak üç boyutlu görüntü sağlar. X-ışınlarının durdurulması için belirli kalınlıkta kurşun giysiler veya tiroid ve gonad koruyucu zırhlayıcılar gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır (27, 33).

Nötron radyasyonu, bir uranyum veya plütonyum çekirdeğinin bölünmesi sonucunda meydana gelen radyasyondur. Radyonüklid bozunması ve fisyon reaksiyonları yaygın bir nötron kaynağıdır (45). Bir fisyon olayı sırasında yayılan nötronlar, bitişik bir atomun çekirdeğine çarpar ve zincir reaksiyonu indükleyerek başka bir fisyon olayına neden olur (17, 43). Nükleer enerjinin üretimi bu ilkeye dayanmaktadır. Nötronlar, yüksüzdür ve gericilikleri yüksektir (45). Maruziyet sonrasında organizmanın dokularına ve organlarına nüfuz edebilir. Nötronlar vücutta birikebilir ve dokuda doğal olarak bulunan bileşenlerdeki hidrojen atomu ile etkileşime girebilir (25, 26, 43). Nötron radyasyonundan korunmak için kalın beton kullanılmaktadır (45). Ayrıca parafin mumu ve plastik gibi hidrojen atomları içeren

malzemelerin de nötron ile etkileşime girerek koruma sağlayacağı düşünülebilir (26). Kurşun, nötronlardan korunmada faydasızdır (45).

2.1.5. Radyasyon Ölçüm Birimleri ve Tanımları

Radyasyon çalışmalarında güvenlik sınırları içinde kalabilmek ve doz bağımlı oluşan toksikolojik etkileri daha doğru şekilde izleyebilmek amacıyla radyasyon dozunun ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçümlerin küresel ölçekte karşılaştırılabilmesi ve anlaşılabilir hale gelmesi için tanımlar ve ortak birimler ile desteklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Uluslararası Birimler Sistemi (*International System of Units, SI*) çağdaş bir resmi ölçü sistemi olarak kullanılmaktadır. Aşağıda ölçüm birimleri ve tanımları gösterilmiştir (46).

Aktivite: Radyoaktif maddenin birim zamandaki bozunma miktarıdır (33, 44, 46, 47).

Klasik Birim: Curie (Ci)

SI Birimi: Bekerel (Becquerel, Bq).

Dönüşüm: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ve $1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$

Işınlanma Birimi: Radyasyona maruz kalma ölçüsüdür. Normal şartlarda 1 kg havada bulunan X ve gama ışınları miktarıdır (33, 44, 46, 47).

Klasik Birim: Röntgen (R)

SI Birimi: Coulomb/kg (C/kg)

Dönüşüm: $1 \text{ C/kg} = 3,876 \times 10^3 \text{ R}$ ve $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

Soğurulmuş Doz: Enerji olarak depolanan radyasyon miktarıdır. Bir birim madde kütlelerinde biriken enerjidir (33, 44, 46, 47).

Klasik Birim: rad (Absorplanan Radyasyon Dozu, *Radiation Absorbed Dose*)

SI Birimi: Gray (Gy)

Dönüşüm: 1 Gy = 100 rad ve 1 rad = 0,01 Gy

Eşdeğer Doz: Rad ya da gray olarak soğrulan dozun ağırlıklandırma faktörü ile çarpımıdır. Her bir eşdeğer doz, farklı dokuların radyasyona duyarlılığı için doku ağırlıklandırma faktörü ile çarpılır (33, 44, 46, 47).

Klasik Birim: Rem (Röntgene Eşdeğer Doz, *Röntgen Equivalent Man*)

SI Birimi: Sievert (Sv)

Dönüşüm: 1 Sv = 100 rem ve 1 rem = 0,01 Sv

2.1.6. Radyasyona Maruziyet

Radyasyon dünyanın varoluşundan bu yana, çevremizde doğal olarak var olmuştur (25, 27). Radyoaktivite, dünyayı oluşturan kayalarda ve toprakta, sularda ve okyanuslarda, bazı yapı malzemelerinde ve evlerde bulunmaktadır. Yeryüzünde doğal radyoaktivitesi olmayan hiçbir yer yoktur (49). Bu nedenle yaşam boyu radyasyona maruziyet sürekli olarak gerçekleşir. Bu maruziyetin kaynakları Tablo 2.1.'de verilmiştir (48).

Tablo 2.1. Radyasyon kaynaklarının dağılımı ve dağılımların yüzde oranları (48. kaynaktan değiştirilerek alınmıştır).

Radyasyon Kaynağı	Radyasyon Oranı
Radon	% 55
Doğal Kaynaklar	% 26
Tıbbi X-ışınları	% 11
Radyofarmasötikler ile tedavi	% 4
Tüketim Malzemeleri	% 3
Diğer	% 1

Arka plan radyasyonu, uzaydan ve dünyadaki elementlerden kaynaklanan radyasyondur (5). Üç kaynağı vardır: Dış uzay (kozmetik), toprak (karasal) ve iç radyasyon (26, 29, 39, 50).

Kozmik radyasyon, uzaydan gelen, güneşten ve yıldızlardan kaynaklanan radyasyondur (26, 29, 39, 49). Kozmik ışınlar büyük oranda protonlardan ve helyum çekirdeklerinden oluşur. Elektronlar, protonlar, X-ışınları, gama ışınları ve parçacıklar gibi birçok bileşeni vardır (49).

Karasal radyasyon, toprakta, suda ve kayalarda doğal olarak bulunan uranyum, toryum ve radyum gibi radyoaktif maddelerin varlığından kaynaklanan radyasyondur. Bu kaynaklardan gelen doz, dünyanın farklı yerlerinde değişiklik gösterir, ancak toprakta daha yüksek uranyum ve toryum konsantrasyonlarına sahip bölgelerde genellikle daha yüksek dozlara erişilir. Bu nedenle, arka plan radyasyon düzeyleri jeolojik farklılıklar nedeniyle belirli alanlarda değişiklik gösterir (29).

Radon (Rn), karasal radyasyondan sorumlu en önemli elementlerden biridir. Neredeyse tüm kayalarda ve topraklarda bulunan radyumun bozulmasından gelen renksiz, kokusuz, tatsız bir radyoaktif gazdır (5, 25, 27, 39).

Popülasyonun radona maruziyeti büyük oranda yeraltı ve yerüstü sularındaki radondan kaynaklanır. Sudaki radon, solunum ve sindirim yoluyla maruziyete ve çeşitli kanser türlerinin oluşumuna neden olmaktadır. Çeşitli kayaç ve toprağın yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla radon, zemin veya duvarlardaki çatlaklar, tesisat boruları gibi yollarla binalara sızar. Binalarda biriken radon gazı akciğerlerde birikerek akciğer kanserine neden olabilmektedir (49). Radonun, her yıl tahmini olarak akciğer kanseri kaynaklı 20.000 ölüme neden olduğu bildirilmiştir (39).

İç radyasyon, radyoaktif elementin ve/veya elementlerin vücuda alınması yoluyla vücut içerisinde meydana gelen radyasyondur. Radyoaktif element, oral yolla, inhalasyon yoluyla ya da deriden emilim ve deri üzerindeki bir yaranın veya kesikin kontaminasyonu ile vücuda girebilir (51).

Özetle, radyasyona dışarıdan ya da dahili olarak maruz kalınabilir. Dış maruziyet, tüm vücut maruziyeti ya da bölgesel maruziyet şeklinde olabileceği gibi, vücut yüzeyinin kontaminasyonu ile de gerçekleşebilir. Radyasyona iç maruziyet ise

solunum yoluyla ya da tüketilen besinlerle gerçekleşebilir. Deri bütünlüğünde meydana gelmiş bir yara yoluyla radyoaktif maddenin vücuda alınması ile de iç maruziyet gerçekleşebilmektedir (51).

Arka plan radyasyonu dışında doğal olarak maruz kaldığımız radyasyon kaynaklarından bir diğeri de insan yapımı (yapay) radyasyondur. Nükleer silah denemeleri, nükleer santrallerde kullanılan malzemelerin taşınması ve imhası sırasında ortaya çıkan radyasyon insan yapımı radyasyona örnektir. Bunun dışında bazı tıbbi işlemler, tüketici ürünleri, endüstriyel radyasyon kaynakları ve araştırma faaliyetleri gibi nedenlerle radyasyona maruziyet olasıdır (5, 50).

Günümüzde insan yapımı radyasyonun ana kullanıcıları; tıbbi tesisler, araştırma ve öğretim kurumları, nükleer reaktörler ve bunların uranyum değirmenleri ile yakıt hazırlama tesisleri gibi destek tesisleri ve nükleer silah üretimi ile ilgili tesisler olarak sıralanabilir. Bu kuruluşların çoğu radyoaktif atık üretir ve üretilen bu atıkların bazıları çevreye radyasyon yayar (5, 48).

Doğal ya da yapay radyasyon yayılımı, toplum için potansiyel bir radyasyon maruziyet kaynağıdır. İç ve dış radyasyon kaynakları, tüm vücudu veya vücudun bir bölümünü radyasyona maruz bırakabilir (26, 48).

Radyasyona tıbbi maruziyetlerin çoğu, yaralanma ve hastalıkların tanısı amacıyla röntgen ve bilgisayarlı tomografi (BT) taramalarının kullanılması ve radyofarmasötikler olarak bilinen, radyoaktif madde eklenmiş ilaç kullanımından kaynaklanır. Kanser hastalığının tedavisinde kullanılan radyoterapi uygulamaları da maruziyet kaynaklarından bir diğeri (26, 31, 39). Tıbbi nedenlerle radyasyona maruziyetten elde edilen yararın, kanser hastalığına ilişkin risklerden daha fazla olduğu düşünülmektedir (26, 39).

Araştırmalar, doğal arka plan radyasyonunun ortalama 2400 μSv düzeyinde olduğunu ve 1963 yılında yapılmış nükleer silah denemeleri sonucunda açığa çıkan insan kaynaklı radyasyon düzeyinin ise 113 μSv (doğal arka plan radyasyonunun % 0,2-0,3'ü kadar) olduğunu göstermiştir. Arka plan radyasyonuna maruziyet yaşam boyu sürer ve maruziyet engellenemez. Ancak insan kaynaklı radyasyona maruziyet kontrol edilebilir değişken olarak hayatımızda yer alır. Bu nedenle insan kaynaklı

radasyona maruziyeti azaltmak radyasyonun istenmeyen etkilerinden korunmak için önem taşımaktadır (52).

2.1.7. İyonize Radyasyonun Etkileri

Radyasyon ve radyoaktivite konusunda çalışmalara başlanmasını izleyen ilk birkaç yıl içinde konu üzerinde araştırma yapan kişilerin özellikle ellerinde cilt yanıkları ve doku nekrozu gibi etkiler gözlenmiştir. Bu kişilerde birkaç yıl sonra da çeşitli kanser oluşumları meydana gelmiştir. Ancak o yıllarda bunun nedeninin radyasyona maruziyet değil, statik elektrik ya da bireysel duyarlılık olduğu düşünülmüştür (37).

İlerleyen yıllar içerisinde radyasyonun etkileri konusunda daha fazla bilgi elde edilmeye başlanmıştır. Gama ve X-ışınları gibi iyonize radyasyon türleri, organizmadaki moleküllerden elektronları kopartmaya yetecek enerjiye sahiptir. Meydana gelen serbest elektronlar ise başta DNA molekülleri olmak üzere vücuttaki diğer moleküller üzerinde hasar yapacak yetenektedir (53). İyonize radyasyonun, hücresel işlev için gerekli olan enzimleri, yapısal proteinleri ve diğer önemli molekülleri iyonize edici etkileri bulunmaktadır. Sonuçta, hücre ve doku hasarı ile organ yetmezliği gibi etkiler meydana gelir (5).

İyonize radyasyon canlı hücrelerde atomik yapıyı doğrudan parçalayabilir ve sonuçta organizmada, kimyasal ve biyolojik değişiklikler meydana gelir. Ayrıca reaktif oksijen ve reaktif azot türleri (ROT ve RAT) gibi saldırgan kimyasal yapılar (serbest radikaller) oluşur. Bu yapılar, normal koşullardaki fizyolojik düzeyleri ile birçok hücresel işlevde kritik rol oynar. Ancak düzeyleri, organizmadaki fizyolojik düzeyin üzerine çıktığında toksik etkiler meydana gelir. Bu etkiler; lipit, protein ve nükleik asitlerde değişikliklere neden olarak biyolojik işlevlerin bozulması şeklinde olabilir. Örneğin; bu yapılar, mitokondriyal DNA'da (mtDNA) kalıcı değişikliklere neden olarak mitokondriyal işlevlerin bozulmasına neden olabilirler. Mitokondriyal işlevlerdeki kusurlar, hızlandırılmış yaşlanmaya ve çok sayıda patolojik durumun meydana gelmesine yol açar. İyonize radyasyonun ayrıca, hücreiçi su moleküllerinin radyolizi yoluyla dolaylı olarak nükleik asitler, proteinler ve lipid moleküllerinde hasar

meydana getirebilecek serbest radikallerin oluşumuna neden olması da söz konusudur (54). Radyasyonun indüklediği oksidatif hasar, ayrıca hücreler arası iletişim mekanizmaları yoluyla hedef hücrelerden hedef olmayan hücrelere de yayılabilir. Meydana gelen oksidatif stres, hücre bölünmesinin inhibisyonu, gen mutasyonları, kromozom kırılmaları ve hücre ölümü gibi hasarlara neden olabilir (50, 54).

Organizmalar, oksidatif stres ve radyasyonun toksik etkilerine karşı koymak amacıyla moleküler, hücresel ve doku düzeylerinde koruyucu mekanizmalara sahiptirler. Radyasyon dozuna bağlı olarak, bu koruyucu mekanizmalar oksidatif stresle başa çıkmak için her zaman yeterli olmayabilir. Zararlı etkiler homeostatik biyokimyasal süreçleri aştığında eşey hücrelerine de aktarılabilir (54).

Radyasyonun canlılar üzerindeki etkileri stokastik ve deterministik etkiler olmak üzere iki başlık altında incelenebileceği gibi (50, 56) somatik ve genetik etkiler olmak üzere iki ayrı sınıflandırma ile de ayrıca değerlendirilmektedir (50).

Somatik etkiler, kalıtsal olmayan ancak hücre ölümü ya da genetik hasarın mitoz bölünme ile diğer vücut hücrelerine iletilmesiyle sonuçlanan etkilerdir (5, 44). Somatik etkiler, maruziyet sonrasında hemen ortaya çıkabildiği gibi yıllar sonra da gözlenebilir. Bu nedenle somatik etkileri erken etkiler ve gecikmiş etkiler olarak sınıflandırmak olasıdır (31, 50).

Erken etkiler, genellikle yüksek dozda radyasyona kısa süreli maruziyet sonrası meydana gelir (50).

Gecikmiş etkiler, radyasyona maruziyetten aylar ya da yıllar ortaya çıkan etkiler olup, bu etkilerin gerçekleşmesi için bir *latent* periyoda gerek bulunmaktadır. Erken etkilerin gözlemlendiği bir kişide radyasyona maruziyetten kaynaklanan gecikmiş etkiler de gözlenebilir. Gecikmiş etkilere kanser, fibroz doku oluşumu ya da katarakt örnek olarak verilebilir (31, 50). Örneğin; maruziyet, nükleer bir silahın kullanılması sonucunda olduğu gibi kısa süreli olarak gerçekleşebilir ve organizmalarda erken etkiler maruziyet anında ortaya çıkabilir. Ancak bu maruziyetin gecikmiş etkileri uzun süre sonrasında meydana gelecektir (57).

Tablo 2.2.'de görüldüğü gibi, 6 ile 10 gray arası radyasyona tüm vücudun maruziyeti sonrasında baş dönmesi, halsizlik, ishal gibi erken etkiler görülür. Bu

etkileri belirgin bir iyileşme süreci izler. Ancak iyileşme sürecini izleyen sürede yüksek ateş ile birlikte birçok organ ve dokuda hemoraji gözlenir. Bu radyasyon dozuna maruziyetin gecikmiş etkisi olarak 10 gün içerisinde ölüm beklenmektedir. Böyle bir maruziyet sonrası gerçekleştirilen otopsiler, kemik iliği, lenf düğümleri ve dalak gibi doku ve organlarda ciddi hasar oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca radyasyona maruz kalan kişilerin kişiye özgü özellikleri de ortaya çıkan etkilerde değişiklik yaratabilmektedir. Örneğin; Tablo 2.2.'de belirtildiği gibi 1,5 ile 2,5 gray radyasyon dozuna maruz kalan sağlıklı bireylerde iyileşme ya da tümör oluşumu beklenirken, sağlık durumu iyi olmayan ve enfeksiyona yatkın kişilerde ölüm olguları görülebilir (57).

Tablo 2.2. Radyasyona maruziyet sonrası ortaya çıkan erken ve gecikmiş etkiler (57. kaynaktan değiştirilerek alınmıştır).

Doz	Erken Etkiler	Gecikmiş Etkiler
>10 Gy	Ani ölüm (beyin yanması)	-
6 – 10 Gy	Baş dönmesi, halsizlik ve ishali takiben soluk borusu, bronş ve akciğerlerde hemoraji, kan kusma ve idrarda kan	10 gün içinde ölüm beklenir.
2,5 – 6 Gy	Baş dönmesi, kusma, alopesi, burun kanaması, deri altı kanama, menstrüal düzensizlik, dişeti ve genital organlarda kanama	Tiroid ve adrenal bezlerde atrofi, maruziyetten sonraki 3 ile 5 haftalık sürede lökopeniye bağlı ölüm riskinde artış. Ölüm oranı % 50.
1,5 – 2,5 Gy	Baş dönmesi, kusma, olası deri yanıkları ile maruziyet hamilelik süresinde ise fötal ya da embriyonik ölüm.	Sağlıklı bireyde tümör oluşumu, sağlık durumu iyi olmayan bireylerde ölüm.

Oral veya inhalasyon yoluyla ya da deride var olan bir kesik nedeniyle iç radyasyona maruz kalındığında ise radyasyon kaynağı olan radyonüklitin yazgısı

vücudun maruz kaldığı herhangi bir kimyasalın yazgısına benzer olacaktır. Canlı organizmanın maruz kaldığı iyonlaştırıcı enerji, radyonüklidin yarılanma ömrüne, radyonüklidin kendine özgü özelliklerine, kimyasal bileşenlerine ve bağlandığı yapının özelliklerine bağlıdır. Organizmanın yanıtı da tüm bunlara bağlı olarak uzun süre sonucunda meydana gelebilir. Bu nedenle iç radyasyona maruziyet ile yanıtın oluşması aynı anda gerçekleşmez (57).

Genetik etkiler, üreme hücrelerinde genetik materyalin hasar görmesi ve gelecek nesillere aktarılabilen genetik mutasyon oluşumu ile sonuçlanan etkilerdir. Bu etkiler, radyasyona maruz kalan kişide gözlenmezken bir sonraki nesilde kendini gösterir (31). Somatik etkilere göre daha geç ortaya çıkan etkilerdir (5, 44).

Deterministik etkiler (doku reaksiyonları), belirlenebilen etkilerdir. Bu etkiler maruz kalınan radyasyon türüne, dozuna ve maruz kalma süresine bağlıdır. Hasarın klinik olarak gözlemlenebilir hale gelmesi için bir eşik doz gereklidir ve hasarın boyutu emilen doza bağlıdır. Böylece emilen doz arttıkça etkinin şiddeti artar (5, 29, 47, 50, 58). Organların ve dokuların bütünlüğünü ve işlevini bozabilen radyasyona bağlı hücre ölümünden kaynaklı etkilerdir (17).

Vücutta bazı doku ve organların radyasyona daha yüksek duyarlılık gösterdiği bilinmektedir. Kemik iliği ve lenfatik dokuların radyasyona duyarlılığı diğer dokulara göre daha yüksektir. Bu nedenle bu dokularda deterministik etkilerin görülebilmesi için gerekli olan radyasyon eşik dozu göreceli olarak daha düşüktür (51). Deterministik etkiler, somatik etkilerde olduğu gibi, erken ve geç doku reaksiyonları olarak ikiye ayrılabilir. Erken doku reaksiyonları arasında gastrointestinal semptomlar (örn., hemorajik diyare), kemik iliği yetmezliği (örn., anemi ve lökositopeni) ve cilt rahatsızlığı (örn., eritem ve alopesi) gibi semptomlar bulunur. Geç doku reaksiyonlarının arasında ise katarakt, kardiyovasküler bozukluklar ve nekroz gibi etkiler yer almaktadır (5, 29, 47, 50).

Olasılıksal (stokastik etkiler), belli bir eşik doza bağlı olmadan doğası gereği ortaya çıkan radyasyon etkileridir. Etki ve etkinin ortaya çıkma olasılığı (etkinin şiddeti değil) doz ile artar. Uzun süre boyunca düşük doz radyasyona maruz kalmanın kanser sıklığında artışa neden olması stokastik etkilere örnektir (17, 29, 47, 50). Stokastik etkiler için bireyin yaşamı boyunca maruz kaldığı tüm radyasyon miktarı

dikkate alınmalıdır. Stokastik etkilerin görülmesi için bir eşik dozun olmamasının yanı sıra, maruz kalınan tüm dozlar, etkinin ortaya çıkma olasılığı açısından bir risk oluşturur (51).

Radyasyonun etkileri dikkate alındığında, bazı durumlarda iyonize radyasyon organizmada gözlenebilir bir etki yaratmazken bazı durumlarda geçici veya kalıcı olarak hasar meydana getirebilir (17, 25). Hasarın boyutu, emilen toplam enerji miktarına, maruziyet süresine ve maruz kalan yüzey alanına bağlıdır (29, 48, 50). Bu nedenle radyasyona maruziyetin tüm vücutta ya da bölgesel olarak gerçekleşmesi sonucunda meydana çıkan etkiler farklılık göstermektedir.

Tablo 2.3'te belirtildiği gibi, 0,25 grayin üzerinde radyasyona tüm vücut maruziyetin ardından hemogramda lenfosit ve granülosit düzeylerinde düşüş ile seyreden radyasyon etkilerini görmek mümkündür. Bu doz 1 gray düzeyine ulaştığında radyasyon sendromu belirtileri görülmesi beklenir. Ayrıca 7 gray radyasyona tüm vücut maruziyetinde maruz kalan toplumda ölüm oranı yaklaşık % 100'dür (31, 50).

Tablo 2.3. Tüm vücudun radyasyona akut maruziyeti sonucunda gözlenen etkiler (50. kaynaktan değiştirilerek alınmıştır.)

Doz	Etki
0,1 Gray	Belirgin etki gözlenmemektedir
>0,1 Gray	Kromozom düzeyinde değişiklik gözlenmiştir.
>0,25 Gray	Granülosit düzeyinde azalma gözlenmiştir
>1 Gray	Baş dönmesi, kusma, diyare, radyasyon sendromu gibi semptomlar gözlenmiştir.
3 - 5 Gray	Maruz kalmış popülasyonun % 50'sinde ölüm oranlarında artış gözlenmiştir.

Bu nedenle vücudun bölgesel olarak radyasyona maruziyeti sonucunda gözlenen etkiler genellikle bölgesel olurken, tüm vücudun radyasyona maruziyetinde daha düşük dozda daha ciddi etkiler gözlenir. Tablo 2.2.'de belirtildiği gibi, 3 ile 5 gray arası radyasyona tüm vücut maruziyet sonucunda popülasyonun yarısında ölüm beklenirken, Tablo 2.4.'de belirtildiği gibi gözlerin 5 gray radyasyona maruziyeti katarakta neden olmaktadır. Benzer şekilde, tüm vücudun 7 gray radyasyona maruziyetinin, maruz kalan toplumun neredeyse tamamında ölüme neden olduğu

bilinmektedir. Ancak derinin bölgesel olarak 10 gray radyasyona maruziyeti nekroz ile sonuçlanmaktadır (31, 50).

Tablo 2.4. Vücudun bölgesel olarak radyasyona akut maruziyeti sonucunda gözlenen etkiler (50. kaynaktan değiştirilerek alınmıştır.).

Doz	Bölge	Etki
3,5 – 6 Gray	Testisler	Kalıcı kısırlık
2,5 – 6 Gray	Overler	Kalıcı kısırlık
3 Gray	Kıl Folikülleri	Geçici alopesi
5 Gray	Gözler	Katarakt
6 Gray	Deri	Eritem
10 Gray	Deri	Yanık, nekroz

Diğer taraftan hücre hasarı radyasyona hedef olan dokuların duyarlılığına göre değişmektedir. Ancak bölgesel maruziyet sonucunda vücutta birikim olması ve bu birikimin etkilerinin zamanla görülmesi de söz konusudur. Bu durumda, tüm vücut radyasyon dozunu hesaplamak, olası riskleri belirlemek için önemlidir. Bu hesaplama için her organın radyasyona farklı duyarlılığı dikkate alınarak farklı ağırlık faktörü kullanılmaktadır (17, 57, 60).

2.1.8. Radyasyona Maruziyet Sonrası Tedavi Yaklaşımları

Radyasyondan korunmanın amacı, radyasyonun neden olduğu deterministik veya stokastik zararlı etkilerin ortaya çıkmasını engellemektir. Bunun için izlenecek üç yol; zaman, mesafe, zırhlama olarak adlandırılabilir. Radyasyon kaynağından en kısa sürede, en uzak mesafeye ulaşılmaya çalışılması ve radyasyondan korunmak üzere uygun sığınaklarda beklenmesi, radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için ilk yapılması gerekenlerdendir (26).

Radyasyona maruz kalmış kişilere tedavi yaklaşımında, hızlı ve etkili müdahalede bulunmak büyük önem taşımaktadır. Söz konusu müdahale için yapılması gerekenlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir (48, 49):

- Radyasyon tedavisine özel çalışma alanı belirlenmelidir.
- Sağlık çalışanları için kişisel koruma ekipmanları bulundurulmalıdır.

- Görevliler kişisel dozimetrlere kullanmalıdır.
- Hastanın kontamine olmuş giysileri dikkatlice çıkarılmalı, tıbbi atık olarak etiketlenerek saklanmalıdır.
- Su, sabun ve fizyolojik tuzlu sıvıyla yara dekontaminasyonu yapılarak vücuda ilave radyoaktif madde alım riski azaltılmalıdır.
- Dış temizlik için kullanılan su toplanmalı ve kontamine malzeme olarak düşünülerek radyoaktif atık olarak saklanmalıdır.
- Hasta mevcut radyasyon dozu için izlenmelidir.

2.2. Sezyum

2.2.1. Sezyum ve Tarihçesi

Emisyon spektroskopisi kullanılarak keşfedilen ilk element olan sezyum (Cs), 1860 yılında Robert Bunsen ve Gustav Kirchhoff tarafından Almanya'daki mineral kaynaklarından elde edilen su örneklerinde belirlenmiştir (61-63).

Bunsen ve Kirchhoff, 1860'da büyük miktarda kaynak suyunu buharlaştırıp karışık alkali tuz kristalleri elde etmiş ve bu kristallerden sezyum klorür izole etmeyi başarmıştır. Bu yeni element, Bunsen-Kirchhoff spektroskopu adı verilen emisyon spektrumunda verdiği iki mavi çizgi nedeniyle Latince "gök mavi" anlamına gelen "*caesius*" kelimesinden türetilen "sezyum" adıyla anılmıştır (62-65).

Bunsen ve Kirchhoff'tan önce bazı bilim adamları sezyum elementini incelemiş olsa da isimlendirmekte ve yeni bir element olduğunu keşfetmekte başarısız olmuşlardır. Örneğin; 1846 yılında Carl Friedrich Plattner sezyum mineralini incelemiş ancak sezyum sülfatı sodyum ve potasyum sülfat ile karıştırmıştır. Bunsen ve Kirchhoff'un keşfinden dört sene sonra, Plattner'in çalışmalarını inceleyen Pisani, Plattner'in hatasını fark etmiştir (62, 64).

Carl Setterberg, 1881'de sezyum tuzlarının elektrolizi sonucunda saf sezyum metalini izole etmeyi başarmıştır (62, 63). Keşfedilen element, 1920'lerde radyo vakum tüplerinde oksijen temizleyicisi olarak kullanılmıştır. 1950'lerde ise elektronik alanında işlevsel, yüksek performanslı bir endüstriyel metal olarak tanınmaya başlanmıştır (16, 63).

2.2.2. Sezyumun Fizikokimyasal Özellikleri

Sezyum, periyodik cetvelin 1A grubu, 6. periyodunda yer alır. Metalin gümüşü rengi eser miktarda oksijenle teması sonrasında altın rengine dönüşür. Yumuşak ve şekillendirilebilir bir maddedir. Erime noktası 28,4°C'dir ve oda sıcaklığında sıvı olabilir (16, 44, 61, 63, 65, 66).

Sezyum metali son derece reaktiftir. Metal, hava varlığında kendiliğinden tutuşur ve su ile patlayıcı reaksiyona girer (67). Sezyumun su ile meydana getirdiği sezyum hidroksit bilinen en güçlü bazdır (63, 65, 67).

Sezyum, reaktif özelliği nedeniyle tehlikeli bir madde olarak sınıflandırılır ve ayrı olarak depolanır. Kuru mineral yağ içerisinde, inert bir atmosferde veya kapalı borosilikat cam ampullerde saklanır ve taşınır (16, 63).

Sezyumun ana kaynağı, Kanada'nın Bernic Gölü'dür. Bu cevher ocağı dünya rezervlerinin üçte ikisinden fazlasını oluşturmaktadır. Yeryüzündeki sezyumun neredeyse tamamı Kanada'nın Bernic Gölü'ndeki pegmatitlerden elde edilmiştir (63, 65, 66).

2.2.3. Sezyumun Kullanım Alanları

Sezyum, petrol arama amacıyla sondaj aşamasında kullanılan bir elementtir. Bunun dışında televizyonlar ve gece görüş ekipmanlarının yapımında da kullanılır. Sezyum saatleri, cep telefonu iletiminin zamanlamasını kontrol eden ağlarda kullanılan araçlardır. Sezyum cihazları ise internetteki bilgilerin akışını kontrol etmeye ve düzenlemeye yardımcı olur. Işıkla karşılaştığında hızla elektron kaybeden yapısı nedeniyle fotoelektrik bir madde özelliğine sahip olan sezyum, fotoelektrik hücre tiplerinde de kullanılmaktadır (16, 63, 65, 66).

Sezyumun en iyi bilinen uygulamasının, süper hassas atom sezyum saatinde kullanılması olduğu bildirilmiştir (16, 61, 63, 65, 66).

3. YÖNTEM

Hacettepe Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Farmasötik Toksikoloji Yüksek Lisans Programı kapsamında yapılan “Sezyum-137’nin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkilerinin Toksikolojik Açıdan Değerlendirilmesi” başlıklı tez çalışması için Farmasötik Toksikoloji Anabilim Dalı Akademik Kurul Kararı’nın alınmasının ardından, Hacettepe Üniversitesi Kütüphaneleri’nin erişimine açık olan veri tabanları kullanılarak gerekli kaynak taramaları yapıldı.

Öncelikli olarak kütüphanelere uzaktan erişime olanak sağlayan internet sayfasından yararlanıldı. Tezin ilk altı aylık sürecinde öncelikle “sezyum”, “sezyum-137”, “Cs-137”, “caesium”, “caesium-137”, “toksikite”, “toksik etki”, “insan sağlığı” ve “radyasyon” anahtar kelimeleri farklı kombinasyonlarla PubMed, Scopus, Web of Science gibi veri tabanlarında ve Google Akademik arama çubuğunda tarandı. Bu anahtar kelimeler ile yapılan taramalarda SCI ve SCI-Exp indeksli dergilerde ve veri tabanlarında çok sayıda araştırma ve derleme makalesi olduğu saptandı.

Anahtar kelime kombinasyonlarından “cesium toxicity” için PubMed veri tabanında 1950 ve 2022 yılları arasında 623 makaleye erişildi. Bu makalelerden 13 tanesinin klinik araştırma, 37 tanesinin epidemiyolojik çalışma, 30 tanesinin derleme ve geri kalanının araştırma makalesi ile olgu sonuçları şeklinde hazırlanmış olduğu belirlendi. Bir başka kombinasyon olarak “cesium-137 toxicity” seçildiğinde PubMed veri tabanında 1983 ve 2022 yılları arasında 60 makaleye erişildi. Bu makalelerden 3 tanesinin derleme, 2 tanesinin klinik araştırma ve geri kalanının araştırma makalesi ile olgu sonuçları olarak yayınlanmış olduğu görüldü. Söz konusu anahtar kelime kombinasyonları ile elde edilen veriler tezin amacına uygun şekilde eşleştirildi. Tezin hazırlanmasında ayrıca, ulusal ve uluslararası indeksler tarafından kabul edilen yayınevleri tarafından basılmış olan konu ile ilgili kitaplar ve kılavuzlardan da yararlanıldı.

Amerikan Çevre Koruma Kurumu (*United States Environmental Protection Agency, EPA*), Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (*International Agency for Research on Cancer, IARC*), Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (*The United States Food and Drug Administration, FDA*), Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma

Kurumu (TENMAK) gibi güvenilir kuruluşların resmi internet sitelerinde yer alan halka açık verilere başvuruldu. Tez danışmanı rehberliğinde, tezin Genel Bilgiler ve Sonuç kısmında yararlanılabilecek kaynaklar sınırlandırıldı.

Ulusal ve uluslararası makaleler ile incelenen resmi internet siteleri dahil olmak üzere 137 adet kaynaktan yararlanılmasına karar verildi.

Öğrenci- Danışman görüşmeleri yapılarak tezin son şeklinde yer alması uygun olan bilgilere ve derleme yöntemine karar verildi.

4. BULGULAR

Sezyum-137 konusunda ulusal ve uluslararası veri tabanlarında zaman sınırlaması yapılmadan, belirlenen anahtar kelimeler kullanılarak Türkçe ve yabancı kaynakların taranması sonucunda aşağıdaki veriler toplanmıştır:

4.1. Sezyum-137

Kimyasal olarak, sezyum en elektropozitif ve en alkali elementlerden bir tanesidir. Birçok organik ve inorganik anyon ile iyonik bağ oluşturur (16, 63, 66, 68).

Doğal olarak oluşan sezyum, stabil olan sezyum-133 izotopudur (16, 43, 63, 66-68). Radyoizotopları ise sezyum-116 ile sezyum-146 arasında değişmektedir. En iyi bilinen radyoizotop sezyum-137'dir (16, 44, 63, 65, 66, 69).

4.1.1 Sezyum-137'nin Tarihçesi

Glenn T. Seaborg, periyodik cetvelin 1. grubunda yer alan herhangi bir elementin uranyumun fisyon ürünü olarak oluşmadığını ancak bu gruptan uzun yarılanma ömrüne sahip bir elementin radyoizotopunun reaksiyonu sonucunda ortaya çıkmasının beklendiğini fark etmiştir. Bu keşfin ardından periyodik cetvelin 1. Grup elementlerinin radyoizotoplarını araştırmaya başlamıştır. O yıllarda doktora eğitimine başlamayı düşünen Margaret Melhase, Seaborg'un bu araştırma çalışmasına dahil olmuştur (70).

Melhase ve Seaborg, çalışmaları sonucunda sezyum-137 radyoizotopunun uranyumun fisyon reaksiyonu sonucu ortaya çıktığını keşfetmiştir. Çalışmalarında, saflaştırılmış sezyum-137'nin radyoaktivitesinin 14 haftadan uzun bir süre boyunca hiç azalmadan devam ettiğini gözlemleyerek bu radyoizotopun yarılanma ömrünün oldukça uzun olduğu sonucuna varmışlardır (70).

4.1.2. Sezyum-137'nin Fizikokimyasal Özellikleri

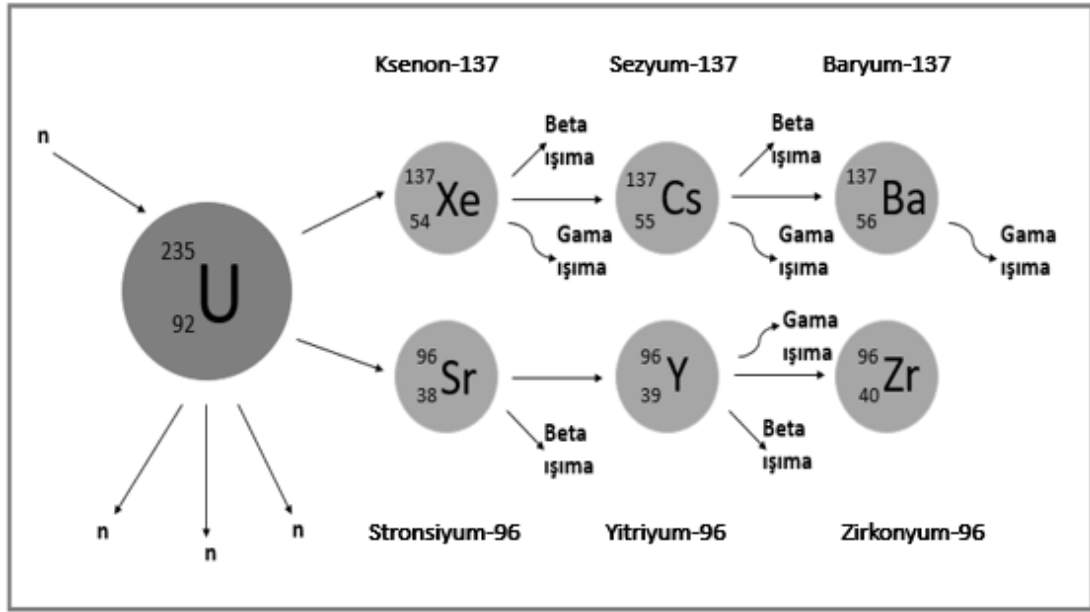
Atom numarası 55 olan sezyum elementinin radyoizotoplarından bir tanesi olan sezyum-137'nin atom kütlesi 137'dir. Uranyum ve plütonyum gibi diğer radyoaktif atomların fisyon reaksiyonlarının ürünüdür. Sezyum-137 kararsız bir radyoizotoptur ve yarılanma ömrü 30 yıldır (69). Sezyum-137'nin çoğu bileşikleri suda çözünebilir özellik taşır. Bilimsel araştırmalarda en yaygın kullanılan sezyum-137 bileşiği, sezyum klorürdür (63).

4.1.3. Sezyum-137'nin Kullanım Alanları

Sezyum-137, tarım, sanayi, inşaat, kanser tedavisi amacıyla radyoterapi, gıda sterilizasyonu, petrol arama, cerrahi ekipman sterilizasyonu uygulamalarında ve radyolojik dağılım cihazlarında kullanılmaktadır. Ayrıca "kirli bomba" yapısında da bulunmaktadır (16, 44, 63, 65, 66, 69).

4.1.4. Sezyum-137'nin Radyoaktivitesi

Sezyum-137, özellikle uranyum ve plütonyum reaktörlerinde meydana gelen ve sezyum-134 gibi kısa ömürlü öncülleri olan bir fisyon ürünüdür. Bu öncüller, yüksek fisyon verimleri ve nispeten uzun yarı ömürleri nedeniyle önemli kirleticilerdir (69).



Şekil 4.1. Uranyum elementinin bozunması (69, 59).

Nükleer reaksiyonlarda uranyumun bozunması sonucu oluşan sezyum-137'nin filyon verimi yüksektir. Oluşan sezyum-137 beta bozunmalar ile kararlı baryum-137'ye ya da meta-kararlı bir baryuma bozunmaktadır (Şekil 4.1). Meta-kararlı baryum gama ışınlar yayarak yaklaşık 2 dakikalık bir yarılanma ömrüne sahip olan daha kararlı baryuma dönüşür (59).

4.1.5. Sezyum-137'nin Toksikokinetik Özellikleri

Absorpsiyon

Sezyum, sindirim ya da solunum yoluyla vücuda alınabilir. Vücuda alındıktan sonra potasyuma benzer şekilde davranır ve vücutta eşit olarak dağılır. Genel popülasyonda biriken sezyumun ana kaynağı, kontamine gıda ve içme suyuna bağlı gastrointestinal absorpsiyondur (44, 68).

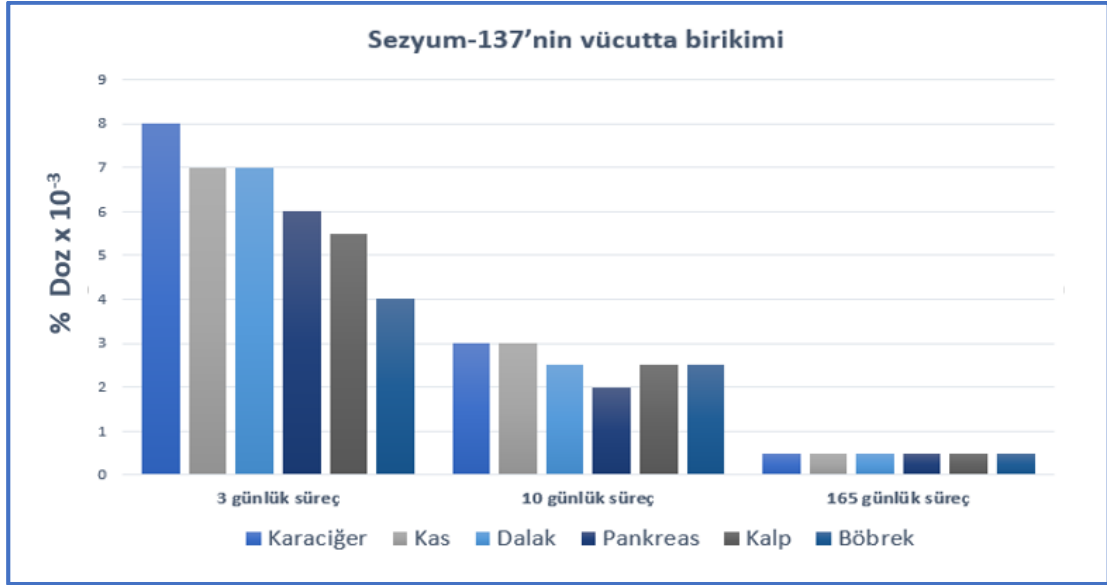
Esasen alınan tüm sezyum, bağırsaklar yoluyla kan dolaşımına geçer. Oral yol ile alınan sezyumun büyük oranda absorbe olduğu bilinmektedir (72).

Rosoff ve arkadaşları (1963) tarafından 11 hasta üzerinde sezyum-137'nin insandaki toksikokinetiğini belirlemek amacıyla bir deney gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyde, 11 hastanın 4'üne intravenöz olarak doz radyoaktif sezyum klorür ($^{137}\text{CsCl}$) uygulanmıştır. 7 hastaya ise tek doz oral sezyum-137 verilmiştir. İntravenöz uygulamanın ardından tam kan ve plazmadaki sezyum-137 konsantrasyonu ölçülmüştür. İnfüzyonun 5. dakikasında tam kan ve plazma konsantrasyonları neredeyse eşit bulunmuştur. İlk sekiz saatte konsantrasyonda benzer şekilde ve oranda düşüş gerçekleşmiştir. 24 saatin sonunda ise tam kan ve plazma değerlerinde belirgin farklar elde edilmiş ve bu değerler yaklaşık olarak 10 gün boyunca aynı düzeylerde kalmıştır. Uygulanan dozun % 2 ila % 3'ünün ilk 1 saat içinde kanda mevcut olması ve tam kanda 24 saatten daha kısa bir sürede oldukça sabit bir düzeye ulaşması, intravenöz uygulamada olduğu gibi oral yol ile uygulanan sezyum-137'nin de hızla ve tamamen absorbe olduğunu göstermiştir (60).

Dağılım

Sezyum, tercihen eritrositlerin anyonik hücre içi bileşenlerine bağlanır ve dokuları oksijenleme yeteneklerini azaltır (66). Nispeten büyük kütleleri nedeniyle kaslarda yoğunlaşma eğilimindedir (44, 61, 73).

Rosoff ve arkadaşlarının (1963) yaptıkları deneyde sezyum-137'nin birikim eğilimine sahip olduğu doku ve organlar belirlenmiştir. Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi birikimin ilk aşamada karaciğer, kas ve dalak gibi organ ve dokularda gerçekleştiği görülmüştür (67, 72). Ancak doku dağılımının zamanla azaldığı belirlenmiş ve 10. günden itibaren dokularda birikimin birbirine yakın değerlere ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Sezyum-137'nin vücutta dağılımı (72).

Metabolizma

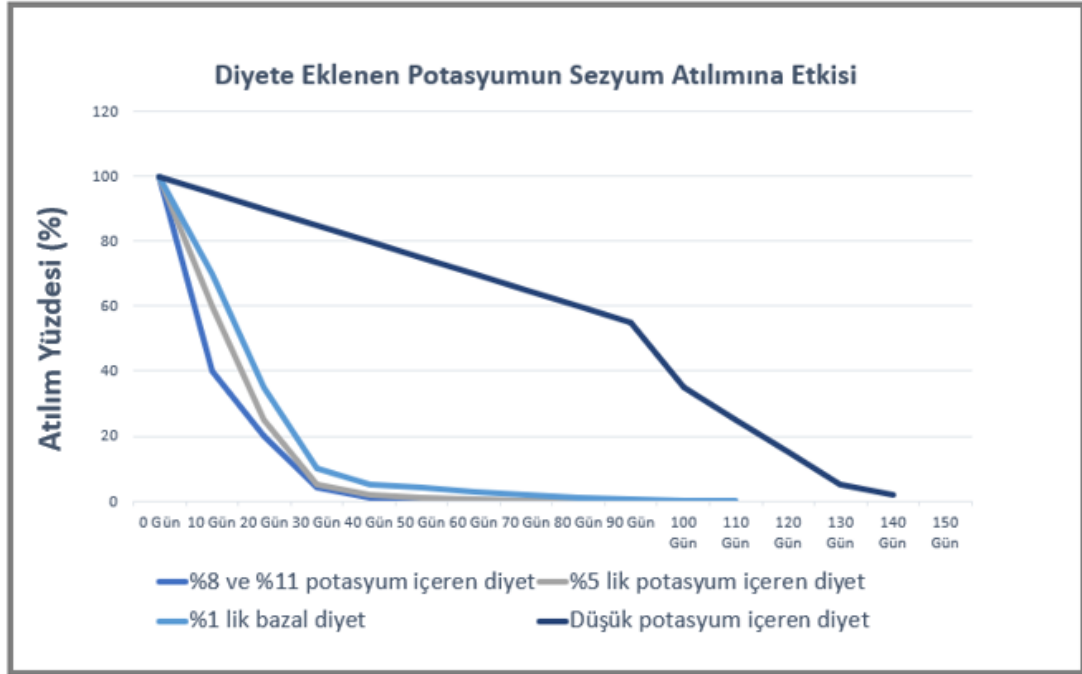
Sezyum, kimyasal açıdan potasyuma benzer bir elementtir. Vücutta potasyum ile yarışır. $\text{Na}^{++}-\text{K}^{+}$ pompasında potasyum yerine geçebilir. Hücrelerarası sıvılara aktif taşıma mekanizmasıyla taşınır. Hücre dışına pasif difüzyonla çıkar (68, 69, 74).

Potasyum ve sezyumun hücre zarları boyunca taşınmasından büyük ölçüde sorumlu olan iki tür transmembran protein kompleksi görülmüştür: Birincisi, potasyumun enerji gradyanları boyunca hareketini katalize eden potasyum kanalları adı verilen bir makromolekül sınıfıdır. İkincisi ise konsantrasyon gradyanlarına karşı K^{+} 'un hücrelere ve Na^{++} 'nın hücrelerden dışarıya aktif taşınmasından sorumlu olan sodyum pompasıdır (74). Sezyum potasyum analogu olsa da, sezyumun kanallar boyunca taşınması, potasyumun taşınmasıyla karşılaştırıldığında yavaştır (69, 74).

Atılım

Sezyum ve potasyumun kimyasal yapı olarak benzerliği ve birbiri ile yarışma özelliğinden yola çıkan Richmond ve Furchner, 1961 yılında potasyumun sezyum atılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır (75).

Deneyde, 1. grup sıçana % 1 potasyum içeren standart bazal diyet, 2. gruba % 5 potasyum içeren diyet, 3. gruba % 8 potasyum içeren diyet, 4. gruba % 11 potasyum içeren diyet ve 5. gruba potasyumdan yoksun diyet uygulanmıştır (75).



Şekil 4.3. Diyete eklenen potasyumun sezyum atılımına etkisi (75).

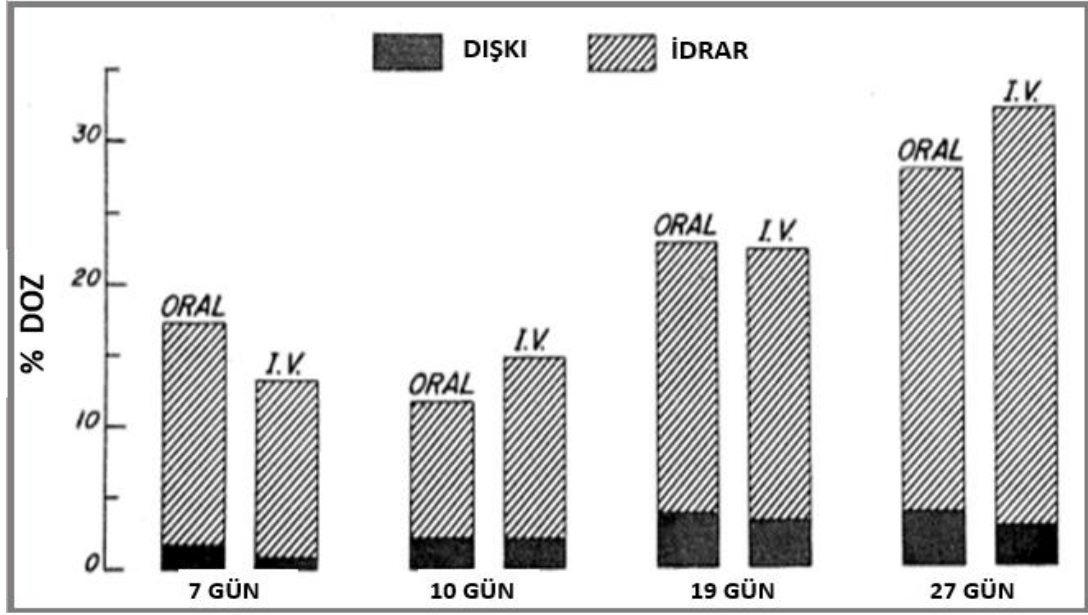
Deney sonucunda, % 5 oranında potasyum eklenmiş diyetle beslenen sıçanların vücutlarındaki sezyumun 20 gün sonunda yarıya düştüğü görülmüştür. Potasyum eklenmiş sıçanlarda sezyumun vücuttan atılımının 60 gün olduğu, ancak potasyumdan yoksun beslenmiş sıçanlarda bu değer 80 günden fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.3.). Bu bulgular ışığında beslenmeye eklenen potasyumun sezyumun alımını azalttığı ve atılımını artırdığı belirlenmiştir (75).

Potasyumun sezyum-137'nin vücuttan atılımı üzerinde etkisine benzer şekilde kalsiyumun sezyum-137'un atılımı üzerindeki etkisi ise Korolev ve arkadaşları (1996) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada Korolev ve arkadaşları (1996), diyetdeki kalsiyumun, sezyum-137'ye karşı organizmanın uyum sağlaması (adaptasyonu) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırma sıçanlar üzerinde yapılmış, çalışmada sadece sezyum-137 değil, kurşun birikimi de değerlendirilmiştir. Organizmanın uyum etkinliği, karaciğer dokusu ve eritrositlerin antioksidan aktivitesi analiz edilerek

değerlendirilmiştir (76). Araştırma sonucunda sıçanların diyetindeki düşük ve normal kalsiyum düzeylerinin, sezyum-137 maruziyetine uzun süreli uyum sağlamadığı görülmüştür. Sezyum-137 için kalsiyum ile zenginleştirilmiş diyetin bir fayda sağladığı görülmemiştir. Ancak kalsiyumca zengin diyetin kurşun gibi diğer ksenobiyotiklerin birikim ve biyotransformasyon aşamaları üzerinde önemli bir koruyucu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır (76).

İntravenöz uygulamadan sonra insanda sezyum-137 atılımının ana yolu böbreklerdir. Sezyum-137 idrar ile % 85, feçes ile % 13 ve ter ile % 2 oranında atılmaktadır. İnsandaki sezyum-137'nin biyolojik yarılanma ömrünün erkeklerde 100 günü, kadınlarda ise 75 günü aşmadığı belirlenmiştir (66).

Rosoff ve arkadaşlarının (1963) yapmış olduğu bir çalışmada, intravenöz yollar sezyum-137 uygulanmış iki hastanın feçes örnekleri incelenmiş ve elementin yarılanma ömrü 50 ve 60 gün olarak bulunmuştur. Ayrıca bu deney sonucunda, oral yoldan uygulanan sezyum-137'nin hızla ve büyük oranda emildiği görülmüştür. Radyoizotop kinetiğinin intravenöz veya oral uygulamadan sonra benzer olduğu gösterilmiştir. İnsanlarda oral yoldan verilen sezyum-137'nin tamamen emilmesi nedeniyle, bu uygulama yolundan sonra doku dağılımı ile intravenöz uygulamayı izleyen doku dağılımı benzerlik göstermiştir. İntravenöz veya oral uygulamadan sonra insanda sezyum-137'nin atılımı için ana yolun böbrekler olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.4.). İdrarla atılımın feçesle atılıma oranı yaklaşık 10:1 olarak hesaplanmıştır (72).



Şekil 4.4. Sezyumun feçes ve idrar ile atılım oranları (72).

Özetle, radyoaktif sezyuma maruz kalınması durumunda, maruziyet kaynağı ortadan kaldırılırsa, sezyumun büyük bir kısmının birkaç ay içinde normal yollardan vücuttan atılacağı anlaşılmıştır (73).

Yetişkin bir insanda sezyum-137'nin % 10'unun 2 gün içinde vücuttan atıldığı ve geri kalanının da vücudu ortalama 110 gün içinde terk ettiği belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar, sezyumun eliminasyon hızının yaşa ve cinsiyete bağlı olduğunu göstermektedir. Vücuttan uzaklaşma, çocuklar ve ergenlerde biraz daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ayrıca, eliminasyonun kadınlarda erkeklere göre daha hızlı meydana geldiği bildirilmiştir (73).

Sonuç olarak, insan vücudundaki sezyum metabolizmasının, yaş, cinsiyet, vücut ağırlığı ve potasyum içeriği gibi çeşitli parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Kinetikte meydana gelen bireysel değişiklikler ve genel sağlık durumunun da sezyum-137'nin vücuttaki yazgısını etkilediği saptanmıştır (72, 73).

Hamilelikte Toksikokinetik

İnsan vücudundaki sezyum metabolizması, yaş, cinsiyet, vücut ağırlığı ve potasyum içeriği gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel sağlık durumu ve hamilelik de sezyumun toksikokinetiğini etkiler. Aynı bireyde gebelik öncesi, gebelik sırası ve sonrasındaki biyolojik yarılanma süresine ilişkin veriler ile sezyum-137'nin anne sütüne geçişi konusunda az sayıda çalışma bulunmaktadır (22).

Thornberg ve arkadaşları (2000), hamileliğin sezyum-137 toksikokinetiği üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yaptıkları bir çalışmada, gebelik öncesinde sezyum-137'ye maruz kalmış ve ilerleyen süre içerisinde gebe kalan bir kadın üzerinde çeşitli incelemeler yapmışlardır (22). Çalışmada, 1993 yılının Eylül ayında Güney Rusya'daki Brjansk Bölgesi'ne yaptığı bir ziyarette, yemiş olduğu mantar nedeniyle sezyum-137'a maruz kalan 28 yaşındaki İsveçli bir kadına ait veriler değerlendirilmiştir. Çernobil reaktörüne yaklaşık 200 km uzaklıktaki bir orman bölgesinden toplanan mantarı tüketmesi nedeniyle İsveçli kadının vücut sezyum-137 yükünün yaklaşık 1000 kat arttığı belirlenmiştir (22). İsveç'e döndüğünde kadının vücudundaki sezyum-137 değerleri ve elementin vücuttan atılım oranları incelenmiştir. Bu maruziyetten 7 ay sonra kadın gebe kalmıştır. Hamilelik süresince ve doğumdan sonra da tüm veriler kaydedilmeye devam edilmiştir. Böylece aynı bireye ait doğum öncesi, hamilelik sırasında ve doğum sonrasında sezyum-137 ile ilgili çok sayıda veri elde edilmiştir (22).

Sonuçlar, gebeliğin başlangıcında sezyum-137'nin biyolojik yarı ömründe hızlı bir düşüş meydana geldiğini ve bebeğin doğumundan sonra elementin yarı ömründe bir artış olduğunu göstermektedir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi, sezyum-137'nin idrar ile atılımının artmasına bağlı olarak gebelik sırasında elementin biyolojik yarılanma ömrü, hamilelikten önceki yarılanma ömrünün % 54'ü olarak belirlenmiştir (22).



Şekil 4.5. Sezyum-137'nin hamilelikteki yarılanma ömrü (22).

Çalışmada, anne sütündeki sezyum-137 konsantrasyonunun tüm vücuda oranı ise, emzirmenin ilk ayında % 15 olarak belirlenmiştir. Bu konsantrasyon dikkate alındığında, anneye etkili olan sezyum-137 dozunun 0,5 mSv olduğu ve fetüs tarafından emilen dozun ise 0,06 mGy olduğu tahmin edilmiştir (22).

Araştırma sonuçları, sezyum-137'nin plasentadan geçtiğini ve fetüsü etkileyebildiğini de göstermektedir (44, 77).

4.1.6. Sezyum-137'nin Toksisitesi

Sezyum-137'ye başlıca maruziyet, oral, inhalasyon ve deri yoluyla gerçekleşebilir. Maruziyet yollarına göre toksik etkiler, olgular üzerinden değerlendirilmiştir.

Oral Maruziyete Bağlı Toksosite

Sezyum-137 gibi radyoaktif bir elemente oral maruziyetin, ancak kazara veya deneysel amaçlarla gerçekleştiği bildirilmiş olup, konu hakkında az sayıda araştırma bulunmaktadır (66). Hayvan deneyleri sezyum bileşiklerinin düşük toksisiteye sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, sezyum bileşiklerinin LD₅₀ değerlerinin

fare ve sıçanlarda 800 ile 2000 mg Cs/kg arasında değiştiğini göstermektedir. Sezyumun hidroksit bileşiğinin klorür bileşiğine göre daha toksik olduğu görülmüştür. Hayvan deneylerinde sezyum hidroksitin fareler için LD₅₀ değeri 800 mg/kg olarak hesaplanmıştır (16, 63). İnsanlar üzerinde seyum-137'ye oral maruziyet konusunda kısıtlı veri bulunmakta olup, konu ile ilişkili olguya aşağıda yer verilmiştir:

Oral maruziyet rneği

Neulieb (1984), sezyum-137'nin kanser tedavisinde kullanımını durumunda oral maruziyetin etkilerini incelemek ve insan üzerindeki yan etkilerini belirlemek amacıyla gönüllü olarak üç hafta süreyle sabah ve akşam ğnlerinden sonra oral yoldan 3 g ¹³⁷CsCl almıştır (78).

Çalışma sonucunda gönüllünün ellerinde ve ayaklarında karıncalanma, mide bulantısı, ishal, hemoroid oluşumu gibi etkiler görülmüştür. Gönüllü belirgin bir yan etki ile karşılaşmadığını ve kansere karşı etkili olduğu kanıtlanırsa, sezyum-137'nin oral yoldan kanser tedavisinde kullanılabileceğini belirtmiştir (78).

İnhalasyon Yoluyla Maruziyet

Özellikle mesleki nedenlerle sezyum-137'ye maruziyet, inhalasyon yoluyla gerçekleşir. Sezyum-137'ye kazara maruziyet sonucunda elementin vücuttaki toksikoniteği olgular üzerinden incelenmiştir (79). İlgili örneklere aşağıda yer verilmiştir.

İnhalasyon yoluyla maruziyet rnekleri

1- Prag olgusu rneği

Bu olgu örneğinde, ek Cumhuriyeti'nin Prag kentine yakın bir köy olan Rez'de bulunan bir radyoizotop deposuna kısa bir süreliğine giren bir erkek işçinin etkilenimine yer verilmiştir. İşçinin depoda bulunduğu süre içerisinde depoda bulunan sezyum-137'nin çözünebilir formunu içeren eski ampuller patlamıştır. Aynı olay farklı

aralıklarla iki kez tekrarlanmış ve işçi bu şekilde iki kez sezyum-137'ye maruz kalmıştır (79).

Olay sonrasında işçi üzerinde çeşitli incelemeler yapılmıştır. İlk kontaminasyona ilişkin inceleme, ilk olaydan 34 gün sonra ve ikinci solunma yoluyla maruziyetten yaklaşık bir saat sonra başlamıştır. Yapılan incelemelerde, sezyumun neredeyse tamamen absorbe olduğu ve tüm organizmada dağılım gösterdiği saptanmıştır (79).

İlk kontaminasyon ile maruz kalınan sezyum-137'nin yarılanma ömrü 92 gün, günlük idrarla atılan sezyum oranı % 88 olarak hesaplanmıştır. İkinci kontaminasyon ile maruz kalınan sezyum-137'nin yarılanma ömrü ise 93 gün, günlük idrarla atılan sezyum oranı da % 89 olarak hesaplanmıştır (79).

2- Amerika olgusu örneği

Bu olgu örneğinde, eski sezyum-137 sülfat ($^{137}\text{CsSO}_4$) stoklarını paketleyen 38 ve 63 yaşındaki iki erkek işçinin sezyum-137'ye inhalasyon yoluyla maruziyetine yer verilmiştir. Maruziyet sonrası iki erkek işçi, gerekli araştırmaların yapılması amacıyla Amerika Birleşik Devletleri'nin Illinois eyaletinde yer alan Argonne Ulusal Laboratuvarı Sağlık Bölümüne gönderilmiştir (80).

Miller ve ekibi tarafından kontaminasyonun 9., 52., 178. ve 285. günlerinde işçiler üzerinde çeşitli ölçümler yapılmış ve sonucunda, işçilerde sezyum-137 varlığı onaylanmıştır. Sezyum-137'nin işçilerde ölçülen yarılanma ömürleri ise 38 yaşındaki işçide 73 gün ve 63 yaşındaki işçide 84 gün olarak hesaplanmıştır (80).

Deri Yoluyla Maruziyet

Radyoaktif element içeren malzemeler ve atıkların özenle ve canlıların kazara erişemeyecekleri yerlerde saklanması ve usulüne uygun olarak bertaraf edilmesi büyük önem taşımaktadır. Yaşam ya da eğitim alanlarına yakın yerlerde bulunması sonucu sezyum-137 içeren bir maddeye temas, toksik etkilere ve ölüme neden olabilir.

Sezyum-137'ye deri yoluyla temasın neden olduğu etkilere ait bazı olgu örnekleri aşağıda anlatılmıştır:

Deri Yoluyla Maruziyet Örnekleri

1- Gürcü asker olgusu örneği

Gürcistan'da 1997 yılının Ağustos-Eylül aylarında Sovyet Sivil Savunma birliklerinden geride kaldığı düşünölen 12 adet sezyum-137 kapsülü bulunmuştur. Eski Rus askeri kampında eğitim almakta olan 11 Gürcü asker kazara sezyum-137'ye maruz kalmıştır. Kapsüllerden bir tanesi, askerlerden bir tanesinin gece nöbeti sırasında giydiği ceketin cebinde bulunmuştur. Diğer kapsüller askerlerin sıkça vakit geçirdiği yerlerde bulunmuş ve maruziyetin bu kapsüller yoluyla gerçekteştiği belirlenmiştir (81).

Askerlerin maruz kaldığı kesin radyasyon dozu bilinmemektedir. Ancak 11 askerin farklı vücut bölgelerinde sezyum-137 kaynaklı kırmızı maköler, deri lezyonları ve kütanöz radyasyon sendromu görölmüştür. Bu askerlerde aynı zamanda mide bulantısı, kusma, ishal ile belirti gösteren akut radyasyon sendromuna da rastlanmıştır (81).

4.1.7. Sezyum-137'nin Akut ve Kronik Toksisitesi

Sezyum-137'ye akut ve kronik maruziyet sonrası bu elementin toksikokinetik özelliklerini incelemek amacıyla hayvanlarda ve gönüllölerde çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Akut Maruziyet

Sezyumun fare ve sıçanlara oral uygulamasını takiben elde edilen LD₅₀ değerleri farelerde 800 mg/kg ve sıçanlarda 2000 mg/kg olarak hesaplanmıştır. LD₅₀ değerinin, sezyum-137 için ise 3,5 ile 5 Gy aralığında olduğu bildirilmiştir (63).

1- Akut maruziyet için hayvan deneyi örneği

Nikula ve arkadaşları, sezyum-137'ye maruziyette yaşın etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Bu deney için 63 Beagle cinsi köpek seçilmiş ve köpekler üç farklı yaş grubuna ayrılmıştır: Gruplar, 15 genç, 38 genç yetişkin, 10 orta yaş köpekten oluşturulmuş, 17 tane köpek de kontrol grubu olarak ayrılmıştır. Deneye alınan köpeklere 61- 162 MBq/kg doz aralığında tek doz çözünebilir sezyum-137 çözeltisi parenteral yoldan uygulanmıştır. Deney sonucunda, köpeklerin sezyuma akut maruziyeti sonucu uygulanan dozun yaklaşık % 80'inin absorbe olduğu belirlenmiştir. Vücuttan atılımın ise büyük oranda idrar ile gerçekleştiği saptanmıştır. Uygulamanın ilk üç gününde sezyum atılımının en üst düzeyde olduğu belirlenmiş, çok düşük miktarlarda da olsa atılımın 130 gün kadar devam ettiği gözlenmiştir. Sezyum-137'nin yarılanma ömrünün 36 ile 42 gün arasında değiştiği saptanmıştır (82).

Diğer taraftan, kontrol ile karşılaştırıldığında sezyum-137 uygulanan köpeklerde kan hücre sayısının daha düşük olduğu da belirlenmiştir. Köpeklerde ayrıca kemik iliği depresyonu, germinal epitelyumda hasar ve azospermi de saptanmıştır. Sezyuma maruz kalan köpeklerde çeşitli dokularda benign ve malign neoplazmalar oluşmuştur. Enjeksiyonu izleyen 52 gün içerisinde, orta yaştaki bütün köpeklerin yanı sıra toplam 23 köpeğin öldüğü bildirilmiştir (82).

Kronik Maruziyet

1- Kronik maruziyet için hayvan deneyi örneği

Çernobil ve Fukuşima kazalarının ardından Manens ve arkadaşları (83) tarafından 2016 yılında gerçekleştirilen bir deneyde sıçanlar farklı maruziyet durumlarını taklit etmek amacıyla radyoaktif elementlerle kontamine bölge halkının günlük olarak alması muhtemel 6500 Bq/l dozda sezyum-137'ye kronik olarak maruz bırakılmıştır. Deneyde, sıçan embriyosu ile yenidoğan ve yetişkin sıçanlar kullanılmıştır. Yeni doğan sıçanların sezyum-137'ye maruziyeti sonucunda kolesterol, trigliserit, fosfolipit, glikoz düzeylerinde artış meydana geldiği saptanmıştır. Sonuçlar, en ciddi toksik etkinin yenidoğan grubunda meydana geldiğini göstermiştir. Bu

çalışmada, anne karnında sezyum-137'ye maruz kalan sıçanların, yeni doğanlara oranla bu elemente daha kolay uyum sağladığı gösterilmiştir (83).

4.1.8. Sezyum-137'nin Sistemik Toksisitesi

Sezyum-137'nin sinir sistemi, dolaşım sistemi, üreme sistemi ve atılım sistemi üzerinde toksik etkileri olduğu bilinmektedir. Bu tez kapsamında, sezyum-137'nin sistemik olarak meydana getirdiği toksisitenin çeşitli deneyler ve klinik çalışmalar yoluyla araştırıldığı makaleler incelenerek bu konu ile ilgili bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Sezyum-137'nin Sinir Sistemi Üzerindeki Toksik Etkileri

İnsan beyninin radyasyona maruziyete duyarlı olduğu bilinmektedir (1, 2). Bu nedenle radyoaktif sezyum-137'ye maruziyetin nörolojik sistem üzerindeki toksik etkilerini incelemek önem taşımaktadır.

Sezyum-137'nin Sinir Sistemi Üzerindeki Toksik Etkileri

İnsanlar yaşam boyunca çeşitli çevresel toksik maddelere maruz kalmaktadır. Bisfenol A (BPA) birçok plastik ve reçine ürününün üretiminde kullanılan bir bileşiktir ve çevresel olarak maruz kalınan toksik maddelerden bir tanesidir. Son çalışmalar, BPA maruziyetinin fare embriyosunun farklı bölgelerinde anormal nörojenezini indüklediğini göstermektedir. Ayrıca, BPA'nın sinir sisteminde sinaptik yeniden şekillenmeyi indüklediği, bilişsel işlev gelişimini bozduğu belirlenmiştir. Çeşitli çalışmalar, BPA'ya maruziyetin ardından farelerde artan kaygı benzeri duygu ve korku hafızasını tanımlamıştır. Ayrıca kemirgenlerle yapılan araştırmalar, bazı toksik maddelere nörogelişim süresince maruziyetin, doğum sonrası oryantasyon, dikkat ve motor aktivite üzerinde olumsuz etkiler meydana getirdiğini göstermiştir (1, 2).

Toksik maddelerin yanı sıra iyonize radyasyona maruziyetin, nörolojik sistem üzerinde etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada Heredia ve arkadaşları, 2015 yılında 60 diş fare üzerinde bir deney gerçekleştirmiş ve bu deneyde fareler 6 gruba ayrılmıştır.

İlk grup kontrol grubu olarak belirlenmiş ve doğumu izleyen onuncu günde farelere tek doz % 0,9'luk sodyum klorür subkütan yoldan uygulanmıştır. İkinci gruba 25 µg/kg bisfenol A, üçüncü gruba 4000 Bq/kg sezyum-137, dördüncü gruba 8000 Bq/kg sezyum-137, beşinci gruba 25 µg/kg bisfenol A ile birlikte 4000 Bq/kg sezyum-137 ve son gruba 25 µg/kg bisfenol A ile birlikte 8000 Bq/kg sezyum-137 uygulanmıştır. Fareler iki aylık olduğunda, tüm fareler anksiyete, öğrenme becerisi ve hafıza gibi parametreler için davranışsal testlere tabi tutulmuştur (1).

Sonuçlar, kontrol grubuna kıyasla bisfenol A ile birlikte ya da sadece sezyum-137 uygulanmış gruplarda anksiyetenin daha belirgin olduğunu ve farelerde öğrenme güçlüğü meydana geldiğini göstermiştir. Sezyum-137'ye maruz bırakılan gruplardaki farelerde hafıza bozuklukları gözlenmiş ancak bu sonuç sadece bisfenol A ya da sezyum-137 ile birlikte bisfenol A uygulanmış gruplarda görülmemiştir (1).

Sezyum-137'nin Dolaşım Sistemi Üzerine Toksik Etkileri

Sezyum-137, kanser tedavisinde kullanımı denenmiş radyoaktif maddelerden bir tanesidir. Ancak sezyum-137'nin kanser tedavisinde etkili olmadığı saptanmış olsa da kanser tedavisinde kullanımları sonucu bu radyoaktif elementin dolaşım sistemi üzerinde toksik etkiler meydana getirdiği belirlenmiştir. Dolaşım sistemi üzerindeki toksik etkileri konusunda yayımlanan bir çalışmaya aşağıda yer verilmiştir.

Sezyum-137'nin dolaşım sistemi üzerindeki toksik etkileri hakkında olgu incelemesi

Günümüzde, sezyumun metabolizması ve toksisitesi konusundaki bilgiler yetersizdir. Brewer tarafından 1984 yılında, ağızdan sezyum klorür alımının kanser tedavisi için tamamlayıcı bir alternatif tıp yöntemi olabileceği hipotezi geliştirilmiş ve bu hipotez "yüksek pH kanser tedavisi" olarak adlandırılmıştır. Sağlık örgütleri tarafından onaylanmayan bu yöntem sezyum-137'nin alkali bir element olmasına ve kanser hücrelerinin pH'sını artırarak kanser tedavisinde etki sağlayacağı esasına dayandırılmıştır. Sezyum-137'nin sadece kanser hücreleri tarafından absorbe

edileceğini varsaymak bilimsel olarak yeterli görülmemiştir. Ancak bu hipotezin internette yayılması sonucunda, tıbbi bilgisi yeterli olmayan ve tedavi umudu peşindeki kanser hastaları tarafından bir çare olarak görüldüğü ve kullanımına başlandığı bilinmektedir (44, 66).

Melnikov ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları bir çalışmada, sezyum-137'nin bu hastalar tarafından kullanıldığı olguları değerlendirmiştir. İnceledikleri olgu sonuçlarından bir tanesi, 41 yaşında böbrek kanseri teşhisi konmuş bir hasta ile 82 yaşında akciğer kanseri teşhisi konmuş bir hastaya aittir. İki hasta da aloe vera ve sezyum klorür ($^{137}\text{CsCl}$) içeren bir çözeltiyi intravenöz yoldan uygulamıştır. 41 yaşındaki hastanın ilk intravenöz uygulamasından sonra, hastada kontrol edilemeyen titreme ve nöbet görülmüştür. Hasta, bu belirtiler için hastanedeki tedavisi tamamlandıktan sonra ikinci kez sezyum-137 içeren çözeltiyi yeniden uygulamıştır. Sonuç olarak, hastanın kalbi durmuş ve hasta hayatını kaybetmiştir. 82 yaşındaki hastanın ise, aloe vera ve sezyum klorür ($^{137}\text{CsCl}$) içeren bir çözeltiyi intravenöz olarak ilk uygulaması sonrasında hastanın yaşamını kaybettiği rapor edilmiştir (66).

Melnikov ve arkadaşlarının incelediği bir başka olgu sonucu ise, 52 yaşında ve kolon kanseri tanısı konmuş bir kadın hastaya aittir. Bu hasta, günde 3 g sezyum-137 tuzunu oral olarak uygulamıştır. Acil servise düşük tansiyon, halsizlik ve susuzluk şikayetleriyle başvurmuştur. Elektrokardiyogramda, QTc aralığında uzama ile ventriküler taşikardi bulguları görülmüştür. Ayrıca şiddetli hipokalemi ve hipomagnezi tespit edilmiştir. Hastada titreme nöbetleri de görülmüştür. Hastanın sezyum-137 kullanımını kesmesi ve hastahane de uygulanan tedavi sonrasında elektrokardiyogram ve kan testi sonuçları normale dönmüştür (66).

İncelenen olgu sonuçları, sezyum-137'nin kanser tedavisinde kullanımının teorik ve deneysel olarak doğrulanmış tümör gerilemesi sağlamadığını göstermiştir. Ayrıca, olgular, sezyum-137'nin şiddetli hipokalemi, hipomagnezemiye neden olduğunu ve özellikle kalpte QTc aralığında uzama, polimorfik ventriküler taşikardi atakları ve hatta ölüm gibi toksik etkiler meydana getirdiğini göstermiştir (66).

Sezyum-137'nin Hepatotoksik Etkileri

Karaciğer, birçok metabolik olayın gerçekleştiği organ olması nedeniyle herhangi bir maddeye maruziyette genel olarak ilk etkilenecek organların başında gelmektedir (44, 53). Sezyum-137'ye maruziyet sonucunda karaciğerde ve karaciğerin kontrol ettiği mekanizmalardaki değişimlerin incelenmesi önem taşımaktadır.

Kronik olarak sezyum-137'ye parenteral yoldan maruziyetin hepatik kolesterol metabolizması üzerindeki etkisi hakkında hayvan deneyi örneği

Racine ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları bir çalışmada, Çernobil kazası sonrası kontaminasyona neden olan sezyum-137'nin kolesterol metabolizması üzerindeki etkilerini *in vivo* ortamda incelemişlerdir. Çalışmada, anne karnından itibaren sezyum-137'ye kronik maruziyet sonucunda sıçanlardaki kolesterol metabolizması değerlendirilmiştir (84). Araştırma sırasında dişi sıçanlar, çiftleşmeden iki hafta öncesinden başlanarak, doğum sonrasında ise yavrular, süttten kesilmelerine kadar olan dönemde, 6500 Bq/L dozda sezyum-137 eklenmiş su ile kontamine edilmiştir. Daha sonra süttten kesilmiş sıçanlara 9 aylık oluncaya kadar kontamine içme suyu vermeye devam edilmiştir. Aynı sıçanların yaşamlarına son verilmesinin ardından, karaciğerde kolesterol metabolizması, gen ekspresyonu ve protein düzeyinde incelenmiştir (84).

Sonuç olarak, bu çalışmada ilk kez, sıçanlarda fötal yaşamdan itibaren düşük dozda ¹³⁷Cs maruziyetin kronik alımının etkileri değerlendirilmiştir. 10 ay süren iç maruziyetin ardından, sezyum-137'nin sıçanlarda hepatik toksisiteye neden olmadığı, hepatik kolesterol metabolizmasının organ ve vücut düzeyinde etkilenmediği görülmüştür. Meydana gelen moleküler değişikliklerin fizyolojik aralıklarda olduğu belirlenmiştir. Deney sonucunda sıçanların kalıcı kontaminasyona uyum sağladığı düşünülmektedir. Bu tür maruziyetin, hiperkolesterolemi gibi bulguları olan daha duyarlı bireyler üzerindeki etkileri bilinmemektedir (84).

Sezyum-137'nin Atılım Sistemi Üzerine Toksik Etkileri

Sezyum-137'nin vücuttan atılımında görev alan böbrekler üzerindeki toksisitesinin incelendiği bir örnek çalışmaya aşağıda yer verilmiştir.

1- Düşük doz sezyum-137'nin fareler üzerindeki nefrotoksik etkisini gösteren hayvan deneyi örneği

Deneysel ve klinik araştırmalar, böbreklerin radyasyon hasarlarına karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. İyonlaştırıcı radyasyona maruziyetin iyi bilinen akut yan etkilerinden bir tanesi de renal toksisitedir. Bu tür maruziyet sonucunda, glomerüler filtrasyon hızında bozulma ve proteinüri meydana gelebilir. Örneğin, Fukuşima nükleer afetinin ardından, kontamine bölge halkı üzerinde yapılan biyokimyasal analizlerde proteinüri olgularında bir artış olduğu belirlenmiştir (2, 85).

Bellés ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı bir çalışmada, farelerde düşük doz iç radyasyona maruziyetin böbrek üzerindeki erken etkileri araştırılmıştır. Araştırma için yetişkin erkek fareler üç gruba ayrılmıştır. İki grup, subkütan yol ile sırasıyla, 4000 ve 8000 Bq/ kg tek doz sezyum-137'ye maruz bırakılmıştır. Kontrol grubu olarak oluşturulan üçüncü gruba ise tek doz subkütan % 0,9 salin enjeksiyonu yapılmıştır. Akut ve subakut etkileri değerlendirmek için, her gruptaki farelerin yarısına maruziyetten 72 saat sonra, diğer yarısına ise 10 gün sonra ötenazi uygulanmıştır. Biyokimyasal analizler için ise idrar örnekleri toplanmıştır. Çalışmada böbrek dokusunda oksidatif DNA hasarının duyarlı bir göstergesi olan 8-hidroksi-2'-deoksiguanozin (8-OHdG) konsantrasyonları ölçülmüştür (85).

Sonuçlar, sezyum-137'ye 4000 Bq düzeyde maruz bırakılan farelerde proteinürinin 72 saatte önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Ürik asit ve laktat dehidrojenaz (LDH) düzeylerinin ise, iki farklı dozda sezyum-137'ye maruz bırakılan hayvanlarda önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. 4000 Bq sezyum-137'ye maruz kalan farelerde, maruziyetten 10 gün sonra DNA hasarı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tüm veriler, düşük iyonize radyasyon dozlarına maruziyetin ardından akut böbrek hasarı oluştuğunu göstermiştir (85).

2- Renal hücre karsinomalarındaki ekstraselüler matriks üzerindeki değişimleri gösteren hayvan deneyi örneği

Romanenko ve arkadaşları (86), kronik, düşük dozlu iyonlaştırıcı radyasyonun renal hücre karsinomlarında ekstraselüler matriks üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla ekstraselüler bileşenleri analiz etmiştir. Bu amaçla, İspanya'da Valencia Üniversite Hastanesi'nde 78 hasta üzerinde araştırma yapılmıştır. 19 hasta kontrol grubunu, Ukrayna'nın radyasyon ile kontamine olmayan bölgelerinden 18 kişi ikinci grubu ve Ukrayna'nın radyasyon ile kontamine bölgelerinden 41 kişi de üçüncü grubu oluşturmuştur. 78 kişideki renal hücre karsinomları doku mikroyarray tekniği kullanılarak incelenmiştir (86).

Deney sonucunda, kontamine bölgede yaşamış hastalardaki renal karsinomlarda laminin değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Lamininin uzak bölgelere metastaz ve kötü prognoz ile ilişkilendirildiği bilinmektedir. Benzer şekilde incelenen diğer belirteçler (fibronektin, laminin, E-kaderin /-katenin komplekslerinde değişiklikler dahil) iyonize radyasyona maruziyetin, gen mutasyonu dışındaki yollarla malign tümör ilerlemesini teşvik edebileceğini göstermiştir (86).

Sezyum-137'nin Üreme Sistemi Üzerindeki Toksik Etkileri

Sezyum-137'nin üreme sistemi üzerindeki etkileri konusundaki çalışmalara örnek olarak aşağıda, erkek sıçanlar üzerinde yapılan bir araştırmaya yer verilmiştir.

1- Sezyum-137'nin erkek üreme sistemi üzerindeki etkilerini gösterir hayvan deneyi örneği

Testisler, radyonükleitlere oldukça duyarlı organlardır. Grignard ve arkadaşları 2010 yılında anne karnında ya da doğumdan sonra sezyum-137'ye maruziyetin steroidojenez üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla sıçanlar üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Deneyde sıçanlar iki kontrol ve iki kontamine olmak üzere 4 gruba ayrılmıştır (87).

Kontamine grupta erkek ve dişi sıçanlar çiftleştirilmeden 2 hafta öncesinden başlayarak 6500 Bq/L dozda sezyum-137'ye her gün maruz bırakılmıştır. Çiftleşme sonrası gebe kalan dişi sıçanlar, hamilelik süresince ve yavrular doğumdan sonra süttten kesilinceye kadar sezyum-137'ye maruziyet bırakılmıştır. Yavru sıçanlar, anne sütünden kesildikten sonra da 9 ay boyunca sezyum-137'ye maruz bırakılmıştır (87).

Sonuçlar, sezyum-137'ye maruz bırakılan sıçanların testis ağırlıklarının, kontrol grubu ile benzer olduğunu göstermiştir. Sezyum-137'ye maruz bırakılan sıçanlarda testosteron, 17 β -estradiyol ve lüteinleştirici hormon (LH) değerlerinin de kontrol grubundan farklı olmadığı bildirilmiştir. mRNA'da steroidojenez ile ilişkili faktörler incelenmiş ve sezyum-137'ye maruz bırakılmış grupta protein düzeyinde bir değişiklik görülmesi de gen düzeyinde farklılık olduğu belirlenmiştir. Steroidojenik faktör-1'de (steroidojenezi kontrol eden faktör) *in utero* grupta düşüş gözlenmiştir. Tüm bu değişikliklerin steroid hormon metabolizmasında meydana gelen hasarın bir sonucu olup olmadığının belirlenmesi için ise daha ayrıntılı araştırmalara gerek olduğu bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çernobil felaketi sonrasında elde edilen veriler ile uyummadığı için Çernobil'deki steroidojenez ile ilgili sonuçların ana kaynağının sezyum-137 olmayabileceği, sezyum-137 dışında salınan diğer radyonüklitlerden kaynaklanabileceğini de düşündürmüştür (87).

Sezyum-137'nin Diğer Sistemler Üzerinde Toksik Etkileri

Sezyum-137'nin yukarıda sözü geçen sistemlerdeki toksik etkilerin yanı sıra mide-bağırsak sistemi, gözler gibi farklı organlar ve sistemler üzerinde de toksik etkileri olduğu bildirilmiştir.

Sezyum-137'ye oral maruziyet sonrasında kusma ve ishal gibi gastrointestinal toksik etkiler görülmüştür (63). Ayrıca bu elemente maruziyetin, gözlerde kanlanma ve yaşarma, oküler ağrıya neden olduğu da bildirilmiştir (63, 82). Atom bombası saldırısını izleyen yıllarda toplumda katarakt olgularında artış görülmüştür. Bu durumun nedeninin, doğrudan sezyum-137 olmasa da sezyum-137'nin yaydığı beta ve gama ışınlarına maruziyet ile ilişkili olduğu bilinmektedir (17, 63).

İntravenöz yolla sezyum-137'ye maruz bırakılan hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalarda, trombositler ile beyaz ve kırmızı kan hücresi sayılarında azalma, kemik iliği aplazisi ve anemi gibi hematolojik toksik etkiler gözlenmiştir (63, 82).

4.1.9. Epidemiyolojik Çalışmalar

Sezyum-137 gibi radyoaktif maddelerin toksikolojik profillerinin incelenmesi ve toksisiteleri hakkında ayrıntılı bilgi edinilebilmesi için *in vivo* ve *in vitro* çalışmalar dışında epidemiyolojik çalışmalardan da faydalanılmaktadır. Epidemiyolojik çalışmalar, bilinen veya varsayılan maruziyetle başlar, maruz kalan bireylerle maruz kalmayan bireyleri veya var olan olguları belirli bir tanıya sahip olmayan kişilerle karşılaştırarak inceler (44). Aşağıda, sezyum-137 ile ilişkili bazı epidemiyolojik çalışma örneklerine yer verilmiştir.

1- Seul'de gerçekleştirilen epidemiyolojik bir çalışma örneği

Güney Kore'nin başkenti Seul'de iki ayrı caddede 2,5 $\mu\text{Sv/h}$ düzeyinde radyoaktivite ölçülmüştür. Metro istasyonuna ulaşmak için çok sayıda insanın kullandığı, araç ve yaya trafiğine açık bu caddelerin 5-6 metre genişliğinde ve 90-200 metre uzunluğunda olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu caddelerin yakınında okulların, konutların ve ticari mülklerin yer aldığı bildirilmiştir. Dikkat çeken radyasyon düzeyinin belirlenmesinin ardından Kore Nükleer Güvenlik Enstitüsü tarafından bu caddelerdeki radyasyon düzeyleri ölçülmüş, asfalt örneklerinde bulunan kimyasallar analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sezyum-137 kaynaklı radyoaktivite konsantrasyonunun 1,82–35,4 Bq/g aralığında olduğu belirlenmiştir. Radyasyon ile kontamine olmuş caddelerin yarattığı endişe üzerine hükümet destekli epidemiyolojik bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir (88).

Bu çalışmada, tabakalı rastgele örnekleme yoluyla 12.428 haneden 1.200'ü araştırmaya dahil edilmiş, her haneden bir kişi çalışmaya kabul edilmiştir. Ayrıca çalışma bölgesindeki her okul ve kontamine caddelere yakın üç çocuk bakım kurumu araştırmada yer almıştır. Araştırmada 31.053 bölge sakininden 8.875'i ile anket

çalışması yapılmıştır. Kontamine bölge halkının araştırmaya kabul edilen bireylerinden tıbbi öykü ve psikolojik durumları hakkında bilgiler toplanmıştır. Kontamine yolların yayalar, bölge sakinleri ve işçiler tarafından kullanım sıklığı hakkında bilgi edinilerek Kore Nükleer Güvenlik Enstitüsü tarafından rapor edilen doz bilgileri ışığında her bir katılımcının kümülatif radyasyon dozu hesaplanmıştır. Her bir bireyin kontamine caddelerden geçme süresi ve sıklığı göz önüne alındığında, kontaminasyon başlangıcından itibaren sezyum-137'ye maruziyet süresi her bir birey için ortalama 4,75 yıl olarak hesaplanmıştır (88).

Bölge halkından araştırmaya katılanlar ile gerçekleştirilen epidemiyolojik çalışmada, kanser insidansını belirlemek amacıyla 2000 ve 2008 yılları arasındaki nüfus kaydı verilerine göre yaş ve cinsiyete göre standardize edilmiş kanser insidans verileri dikkate alınmıştır. Kontamine bölge halkında görülen kanser olguları standardize veriler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca katılımcılar ile bir anket çalışması yapılarak, astım, kalp hastalığı, epilepsi, diyabetes mellitus, tiroid ve kanser hastalığı gibi çeşitli hastalıkları sorgulanarak bilgi alınmıştır (88).

Tüm bulgular değerlendirildiğinde, standardize edilmiş kanser insidans verilerine göre kontamine bölgede yaşayan erkeklerde gözlenen kanser insidansının, kontamine olmayan bölgedeki erkeklerdeki kanser insidansına oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bulgular, kadınlarda kanser insidansında belirgin bir artış olmadığını göstermiştir. 6-12 yaş arasında, kontaminasyon sonrası doğan çocuklarda astım, tiroid ya da kanser gibi hastalıklarda herhangi bir artış görülmemiştir. Bu da kontaminasyonun prenatal sonuçları olmadığını düşündürmüştür. Ancak 6-12 yaş arası çocuklarda kümülatif radyasyon dozundaki artış ile orantılı olarak anksiyete düzeylerinde bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir. Sonuçlar, erkeklerde kanser insidansında artış olduğunu gösterse de kanser oluşumu için radyasyona maruziyetin üzerinden 5-10 yıl gibi uzun sürenin geçmesi gerektiği için 2000-2008 yılları arasındaki standardize verileri kullanmanın yeterli olmayabileceği bildirilmiştir (88).

2- Çernobil kazasından 30 yıl sonra sezyum-137'nin doğum anomalileri üzerindeki etkisini gösterir epidemiyolojik çalışma örneği

Çernobil felaketi ve izleyen yıllar içerisinde radyoaktif kontaminasyonun ana kaynaklarından bir tanesinin, uzun yarılanma ömrü nedeniyle sezyum-137 olduğu bilinmektedir. Kontamine bölgelerdeki sezyum-137 düzeyleri, bölgenin coğrafi özelliklerine göre değişmekle birlikte su kaynakları ve nükleer santrallere yakınlık gibi unsurlardan etkilenmektedir (89, 90).

Ukrayna Sağlık Bakanlığı tarafından 1996 yılında gerçekleştirilen Uluslararası İnsan Genetiği Kongresi'nde alınan karar üzerine nüfusa dayalı konjenital anomalilerin gözlenmesini amaçlayan bir plan oluşturulmuştur. Bu planı takiben elde edilen verilerden yola çıkılarak Wartecki ve arkadaşları (2017), Çernobil Nükleer Santral'i felaketi sonrası iyonize radyasyonun teratojenik ve mutajenik etkilerinin incelenmesi amacıyla geniş bir sulak alan olan ve Polezja olarak bilinen bölge de dahil olmak üzere Ukrayna'nın Rivne Eyaletinde görülen konjenital anomalilerin türleri ve bölgede gerçekleşen doğum sayılarına göre oranları hakkında veriler toplamayı amaçlamışlardır (90).

Polezja bölgesi, Polonya'nın doğusunda, Belarus sınırı boyunca Rusya'ya doğru, beş Ukrayna eyaletinin kuzey bölgeleri boyunca uzanan bölgeyi kapsamaktadır. Bu bölgede yaşayan halk çoğunlukla sel, şiddetli kış ve genel olarak ulaşım yetersizliği nedeniyle izole edilmiş küçük köylerde yaşayan, yabancı mantar ve meyveler toplayan ve av eti ile beslenen izole bir topluluktan oluşmaktadır. Beslenme şekilleri nedeniyle bu bölge halkının kontaminasyondan etkilenmeye oldukça açık olduğu düşünülmektedir (90).

Wartecki ve arkadaşları tarafından 2017 yılında sonuçlandırılan çalışmada 2000 ve 2014 yılları arasındaki canlı doğum sayıları ve konjenital anomali ile sonuçlanan doğumlara ait veriler toplanmıştır. Bu veriler 2000 ve 2014 yılları arasında Polezja dışındaki bölgeler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bölgeye ait araştırma süresinden önceki raporlar incelenerek Çernobil felaketi öncesi ve sonrası değerler arasında da bir karşılaştırma yapılmıştır (90).

Elde edilen sonuçlara göre, 1986 yılında gerçekleşen Çernobil felaketini takiben Ukrayna'nın Rivne eyaletinde canlı doğum oranlarının hızla düştüğü belirlenmiştir. Canlı doğum sayısının 2001 yılında en düşük sayıya ulaştığı, 1986 yılı ile kıyaslandığında canlı doğum sayılarının, Polezya bölgesinde % 51, Rivne eyaletinin tümünde ise % 46 oranında azaldığı rapor edilmiştir. 2012 yılında canlı doğum sayılarının kısmen arttığı ancak 1986 yılı ile kıyaslandığında sayıların Polezya bölgesinde % 31 ve Rivne eyaletinin tümünde % 17 oranında düşük olduğu bildirilmiştir (90).

Rivne eyalet bölgeleri ile Polezya bölgelerindeki canlı doğum ve konjenital anomali ile sonuçlanan doğumlar 2000 ve 2009 yılları arasında sayısal olarak raporlanmıştır. 2000-2009 yılları arasında Polezya Bölgesi'nde 72.376 canlı doğum gerçekleşmiştir. Bu doğumların 173 tanesinde nöral tüp defekti, 44 tanesinde mikrosefali ve 18 tanesinde mikrofitalmi sendromu kaydedilmiştir. Aynı yıllar arasında Polezya Bölgesi dışındaki Rivne eyalet bölgelerinde 73.058 canlı doğum meydana gelmiştir. Bu doğumların da 105 tanesinde nöral tüp defekti, 24 tanesinde mikrosefali ve 6 tanesinde mikrofitalmi sendromu kaydedilmiştir. Ayrıca 2001 ve 2010 yılları arasında sezyum-137'ye bağlı tüm vücut radyasyon yükünün Polezya bölgesinde yaşayan erkeklerde 2640 Bq, kadınlarda 2223 Bq olduğu ölçülmüştür. Aynı yıllarda Polezya dışı bölgelerde bu yükün erkeklerde 507 Bq, kadınlarda 435 Bq olduğu rapor edilmiştir. Elde edilen veriler, sezyum-137'ye ve iyonize radyasyona maruziyetin, ölü doğum ve konjenital anomali ile sonuçlanan doğum sayısında artışa neden olduğunu göstermiştir (90).

3- Çernobil kazası sonrası radyasyon maruziyeti ve yetişkinlerde tiroid kanseri olguları hakkında epidemiyolojik çalışma örneği

Cherenko ve arkadaşları (91), 2004 yılında yaptıkları bir çalışmada, Çernobil kazasına bağlı radyasyona maruz kalmış ve kalmamış yetişkinlerde cerrahi olarak çıkarılan tiroid tümörlerinin klinik ve patolojik bulgularını karşılaştırmışlardır. 1990'dan 2003'e kadar, geçmişlerinde radyasyon maruziyeti olduğuna ilişkin hiçbir kanıt bulunmayan 2363 yetişkin (Grup A), tiroid nodülleri nedeniyle ameliyat olmuştur. Aynı dönemde, Çernobil kazasına bağlı radyasyondan etkilenmiş 311

yetişkin de ameliyat edilmiştir (Grup B). Grup B ise, 93 tane kurtarma operasyonu alışanı (1. Kategori), Çernobil kazası sonrası kısıtlı alandan tahliye edilen 82 kişi (2. Kategori) ve kontamine alanlarda yaşayan 136 kişiden (3. Kategori) oluşturulmuştur. Tüm tiroid nodülü olguları arasında tiroid karsinomu oranı, Grup B'de % 32,8, Grup A'da ise % 27,2 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak tiroid karsinom oranı Grup B için Grup A'ya göre anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur (91).

Grup B içindeki kategoriler arasında yapılan analize göre 1. ve 2. kategorilerinde de kanser oranında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. 1. Kategoride kanser oranı % 54,8 iken 2. Kategoride % 47,8 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 1. Kategoride bölgesel metastaz % 41 iken 2. Kategoride bu oran % 19 olarak hesaplanmıştır (91).

Çalışma sonuçları, Çernobil felaketi sonrasında iyonize radyasyon ve sezyum-137'ye maruziyetin, tiroid kanseri oluşumunun nedeni olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca iyonize radyasyon ve sezyum-137'ye maruziyet dozundaki artış ile tiroid tümörlerindeki bölgesel metastaz riskinin arttığı belirlenmiştir (91).

4- Sezyum-137'nin çocuklar üzerindeki etkisini gösterir epidemiyolojik çalışma rneği

Çernobil felaketi sonrasında kontamine bölgelerde yaşayan halkın, uzun ömürlü radyonüklitler nedeniyle günümüzde de radyasyon maruziyeti devam etmektedir. Bu radyonüklitler arasında özellikle stronsiyum, sezyum (sezyum-134 ve özellikle sezyum-137) ve plütonyum gibi uranyum türevleri yer almaktadır (77, 92-94).

Çernobil Nükleer Santrali'nde meydana gelen patlama sonrasında kontamine bölgede yaşayan halkın radyasyona maruziyetlerinin önemli nedenlerinden bir tanesinin, yerel halkın sıklıkla tükettiği yabani mantarlar, meyveler ve bölgede yetiştirilen hayvanların sütü gibi gıda maddeleri olduğu düşünülmektedir. Bu tüketim ürünlerinde sezyum-137 konsantrasyonu yüksek düzeylerde lmlmştir. Bu nedenle

yukarıda sözü edilen gıdaları tüketen çocuklarda da sezyum-137'ye maruziyet, kontamine olmayan bölgelerde yaşayan çocuklara oranla daha yüksek düzeydedir (77, 92-94).

Çernobil Nükleer Santrali'nde meydana gelen patlamanın ardından bu bölgede yaşayan çocukların sağlık durumları incelendiğinde, kontamine bölgede ikamet eden çocukların kronik hastalıklara daha yatkın olduğu gözlenmiştir. Bandazhevsky ve arkadaşları (2003), kontamine bölgede 1997 yılında yaşamını kaybetmiş çocukların organlarında sezyum-137 birikimini incelemek üzerine Mart 1987 yılından sonra doğmuş çocuklar üzerinde ölçümler yapmıştır (77). Kontamine bölgede yaşamış ve 1997 yılında ölmüş çocuk ve yetişkinlerin miyokard, beyin, karaciğer, tiroid, böbrek, dalak, iskelet kası ve bağırsaklarında birikmiş sezyum-137 düzeyleri ölçülmüştür. Bu sekiz doku ve/veya organda yapılan otopsi çalışmalarına ilişkin sonuçlar, çocuklarda sezyum-137 düzeylerinin yetişkinlere oranla iki ile üç kat daha yüksek olduğunu göstermiştir (77).

Çalışma sonuçları, plasentanın annenin kan dolaşımında bulunan sezyum-137'yi absorbe edebildiğini ve bu yolla fetüsün sezyum-137'ye maruz kalabileceğine ilişkin bilgileri doğrulamıştır. Ayrıca yenidoğanların anne sütü yoluyla sezyum-137'ye maruz kalabilecekleri de bildirilmiştir (77).

5- Techa nehri maruziyeti konusunda yapılan epidemiyolojik çalışma örneği

Mayak Nükleer Tesisi'nin radyoaktif atıkları 1950'li yılların başlarında Techa Nehri'ne boşaltılmıştır. Bu olay sonrasında bölgede yaşayan bireylerde gözlenen kanser insidansını araştırmak amacıyla Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya işbirliği ile epidemiyolojik bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma, 1950 ve 1960 yılları arasında Techa Nehri kıyısında yaşayan 29.730 kişi ile gerçekleştirilmiştir ve kanser nedenli ölüm sayılarının izlenmesi amaçlanmıştır (53, 95, 96).

Techa River Kohortu, kronik, düşük doz radyasyona maruziyetin uzun vadeli etkilerinin geniş, seçili olmayan bir toplum için değerlendirilebildiği az sayıdaki çalışmadan bir tanesidir 95).

Çalışma sonucunda, bölge halkının radyasyona maruziyetinin % 55'inin tüketilen gıda ve içme suyundan kaynaklandığı ve maruziyetin öncelikle sezyum-137, stronsiyum-89 ve stronsiyum-90 kaynaklı olduğu belirlenmiştir (53). 2.303 kansere bağlı ölüm ve 50 yılı aşkın izleme süresi sonucunda elde edilen veriler, Techa Nehri kontaminasyonu nedeniyle uzun süreli tüm vücut radyasyonuna maruz kalmanın ardından kansere bağlı ölüm riskinin attığını göstermiştir. Ayrıca erkeklerde akciğer, mide ve yemek borusu kanserleri, kansere bağlı ölümlerin en sık nedeni olarak belirlenmiştir. Kadınlar için ise mide, rahim ve meme kanserlerinin, kansere bağlı ölümlerin büyük kısmını oluşturduğu bildirilmiştir (95, 96).

4.1.10. Tedavi Yaklaşımları ve Antidot Kullanımı

Radyoaktif bir elemente maruziyet sonrasında tedavi yaklaşımı, dekontaminasyon işlemlerinin yanı sıra mümkünse kontaminasyona neden olan radyoaktif elementin vücuttan eliminasyonunun sağlanması, ayrıca semptomatik ve destekleyici tedavinin uygulanması yoluyla olabilir. İyonize radyasyona maruziyet sonrası tedavide izlenebilecek adımlar, bu tezin "2.1.8. Radyasyona Maruziyet Sonrası Tedavi Yaklaşımları" başlığında anlatılmıştır.

İyonize radyasyona maruziyet sonrası tedavi için izlenecek adımlara ek olarak, maruziyet kaynağı elementin vücuttan eliminasyonunu sağlamak veya hızlandırmak amacıyla kullanılacak ajanlar hakkında araştırmalar yapılması büyük önem taşımaktadır (95, 97-99). Bu amaçla, çeşitli antidotların kullanımı olasıdır (97-99).

Her radyoaktif elemente ait bir antidot bulunmamaktadır. Ancak sezyum-137'ye maruziyet sonrası tedavide yararlanılabilecek antidotlar konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, Prusya mavisini, elma pektini ve inositol hekzafosfat bileşiklerinin kullanımı konusunda günümüzde de çalışmalar devam etmektedir. Araştırmalar sonucunda Prusya mavisinin, sezyum-137 maruziyeti sonrasında

tedavide kullanılabilecek en etkili antidot olduğu bildirilmiş ve kullanımı, 2003 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından onaylanmıştır (98).

Prusya Mavisi

Prusya mavisi (PM) olarak adlandırılan ferrik hekzasiyanoferrat ($\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$), koyu mavi bir pigmenttir. PM, sezyum-137 iyonlarını adsorbe etme ve tutma yeteneğine sahip gözenekli yapıda bir maddedir (98, 99).

Prusya mavisi, insan vücudundan radyoaktif sezyum ve talyumun atılımına yardımcı olabilecek bir antidottur. Prusya mavisi, bütün olarak yutulabilen 500 mg'lık doz içeren kapsüllerde verilir. İlaç, hamile kadınlar ve çocuklar (2-12 yaş) dahil olmak üzere çoğu yetişkin için güvenlidir. Bebekler için doz henüz belirlenmemiştir (98-100).

Radiogardase®, Prusya mavisinin piyasadaki müstahzar adıdır. Prospektüsünde, yetişkinler için önerilen doz 3×3 g/gün olup çocuklarda doz 3×1 g/gün şeklindedir. Bağırsaklarda sezyumu tutar ve vücut tarafından yeniden emilmesini önler. Radyoaktif sezyum bağırsaklardan geçer ve feçesle vücuttan atılır. Böylece vücudun radyasyona maruz kalma süresini sınırlamaya yardımcı olur (101).

Prusya mavisinin en yaygın yan etkileri mide bulantısı ve kabızlıktır. Kabızlık çok şiddetli olarak meydana gelebilir. Prusya mavisi alımı sırasında feçes mavi renkte olabilir (98, 101). Önerilen dozda kullanımı sonucunda herhangi bir risk tespit edilmemiş olsa da Prusya mavisinden pH, doz ve vücutta bekleme süresi nedeniyle salınabilecek siyanür miktarına da dikkat edilmelidir (102).

Radiogardase® prospektüsünde dikkat edilmesi gereken uyarıya göre; Prusya mavisi, radyasyona maruziyeti azaltmak amacıyla uygulanır fakat radyasyona maruziyet sonucu meydana gelen komplikasyonları tedavi etmez. Yüksek doz sezyum-137 ile kontamine olmuş hastalarda, şiddetli nötropeni ve trombositopeni ile birlikte kemik iliği baskılanması dahil olmak üzere radyasyon toksisitesi gelişebilir. Radyasyon toksisitesi semptomları için destekleyici tedavi, Prusya mavisi uygulaması

ile birlikte gerçekleştirilmelidir. Radyoaktif elementlere maruziyete bağlı acil durumlarda, asıl radyasyon kaynağı bilinmeyebilir. Bilinmeyen veya birden fazla radyoaktif elemente maruz kalmış hastalarda, Prusya mavisine ek olarak diğer ajanlarla tedavi gerekebilir (101).

Potansiyel olarak zararlı talyum veya sezyum-137 düzeylerine maruziyetin ardından FDA, yukarıda da belirtildiği gibi Prusya Mavisini'nin kullanımına onay vermiştir. Ayrıca, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ve Birleşmiş Milletler, Çernobil kazasından etkilenen bölgelerde üretilen süt ve etlerde radyoaktif sezyum kontaminasyonunu azaltmak için Prusya mavisinin kullanıldığını bildirmiştir (103). Çernobil bölgesinde, sütteki sezyum-137 konsantrasyonunu azaltmak amacıyla da Prusya mavisinin genellikle sığır yemine karıştırıldığı bildirilmiştir (97).

Prusya mavisinin etkilerini arttırmak amacıyla yeni yöntem denemeleri de yapılmaktadır. Çevresel kontaminasyonun azaltılması konusunda Qian ve arkadaşlarının (104) yaptığı bir çalışmada, sezyum iyonlarının kontamine kilden uzaklaştırılması için yeni bir tür geri dönüştürülebilir malzeme elde etmek amaçlanmıştır. Prusya mavisini analog işlevli manyetik mikrojel adsorbanları ve iyonize kitosan birleştirilerek sezyumla kirlenmiş kil için sinerjik bir iyileştirme yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Çalışma sonucunda manyetik mikrojellerin kitosan ile birleştirilmesi ile, sezyumla kirlenmiş kil % 83,7 oranında saflaştırılabilmıştir. Bu çalışma ile denenmiş yöntemin, farklı radyonüklit tipleri veya ağır metaller ile toprağın üst kısmında meydana gelen kontaminasyonun iyileştirilmesi için de kullanılabileceği düşünölmektedir (104).

Elma Pektini

Pektinler, meyve, sebze ve alglerde bulunan asidik yapıda polisakkaritlerdir. Bağırsak lümeninde bulunan elementleri tutma özellikleri vardır (97).

Gall ve arkadaşları (2006) hayvanlar üzerinde yaptıkları bir çalışmada, Prusya mavisini ile bir antidot seçeneği olarak pektini karışlaştırılmıştır. 15 sıçan üç gruba ayrılmış ve üç gruba da oral yolla sezyum-137 uygulanmıştır. Uygulamanın hemen ardından 1. gruba Prusya mavisini, 2. gruba pektin verilmiş, 3. gruba herhangi bir tedavi

uygulanmamıştır (105). Deney sonuçları, Prusya mavisinin sıçanlarda sezyum-137'nin organizmadaki miktarını azaltma konusunda başarılı olduğunu kanıtlamıştır. Ancak günlük diyetle yer alan içme suyuna eklenmiş düşük esterlenmiş elma-pektininin vücut sezyum-137 yükünde önemli bir etkinlik göstermediği görülmüştür. Bu çalışmada yalnızca bir çeşit düşük esterlenmiş pektin test edilmiş olmasına rağmen, elde edilen negatif sonuçlar, pektinin Prusya mavisine alternatif olarak kullanılamayacağını düşündürmüştür (100, 105).

Bandazhevskaya ve arkadaşları tarafından 2004 yılında yapılan çalışma, radyoaktif elementlerle kontamine Gomel bölgesinde yaşayan 900 öğrenci ile öğrencilerin 3 haftayı geçirdikleri Silver Spring'teki bir senatoryumda gerçekleştirilmiştir. Yaşları 7 ve 17 arasında değişen 94 öğrenci vücutlarında ölçülen sezyum-137 dozuna göre üç ayrı gruba ayrılmıştır. Çalışma 16 gün sürmüş ve bu süre boyunca öğrencilere günde 2 defa diyetlerindeki suya ya da süte % 16 oranında pektin karıştırılarak verilmiştir. 16 gün süren çalışmada yüksek radyasyon konsantrasyonuna maruz kalan grupta başlangıç sezyum-137 yükünde mutlak azalma olduğu görülmüş olmasına rağmen kesin bir karara varılabilmesi için 16 günlük sürenin çok kısa olduğu ve pektinin etkinliğinin daha ayrıntılı olarak çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır (97).

İnositol Hekzafosfat

İnositol fosfatlar hücre işlevleri, hücre büyümesi ve apoptozda önemli rol oynayan bileşiklerdir. İnositol-hekzafosfat (IP6), tahıl, fasulye ve yağlı tohumlarda bulunur. IP6, lantan (La) ve çinko (Zn) dahil olmak üzere metallerle çözünmeyen kompleksler oluşturabilmektedir (106).

Ogawa ve arkadaşları, 2017 yılında inositol hekzafosfatın sezyum-137'ye maruziyet sonrası tedavideki etkinliğine ilişkin *in vivo* ve *in vitro* araştırmalar yapmışlardır (106).

İnositol hekzafosfatın lantan ve çinko komplekslerinin (M-IP6) *in vivo* olarak vücuttan sezyum-137 eliminasyonunu artırma potansiyelini değerlendirmek

amacıyla, sezyum-137 enjeksiyonundan sonra kontrol grubuna % 5'lik glukoz içeren çözelti verilmiştir. Diğer gruplara ise sırasıyla % 5'lik La-IP6, % 5'lik Zn-IP6 ve % 5'lik glukoz çözeltisi içinde Prusya mavisi verilmiştir. Enjeksiyondan 48 saat sonra farelerde radyoaktivitenin biyolojik dağılımı Tablo 4.1'de gösterilmiştir (106).

Tablo 4.1. Sezyum-137 enjeksiyonundan 48 saat sonra inositol hekzafosfat bileşikleri ve Prusya mavisi ile tedavi edilmiş grupta radyoaktivitenin biyolojik dağılımı (106).

Doku - Organ	Kontrol Grubu	İnositol hekzafosfatın lantan ile kompleksi	İnositol hekzafosfatın çinko ile kompleksi	Prusya mavisi
Kan	0,31	0,33	0,31	0,16
Karaciğer	0,68	0,88	0,82	0,23
Böbrek	1,39	1,78	1,44	0,44
Kas	2,34	2,98	2,87	1,61
Dalak	1,14	1,38	1,27	0,35

İnositol hekzafosfatın lantan ve çinko komplekslerinin atılım ajanı olarak kullanılma olasılığını değerlendirmek için, sezyum-137, M-IP6'nın oral uygulamasından hemen sonra farelere oral olarak uygulanmıştır. Sezyum-137'nin oral uygulamasından 24 saat sonra radyoaktivitenin biyolojik dağılımına ilişkin veriler Tablo 4.2'de verilmiştir (106).

Tablo 4.2. Sezyum-137'nin oral yolla uygulanmasından 24 saat sonra inositol hekzafosfat bileşikleri ve Prusya mavisi ile tedavi edilmiş grupta radyoaktivitenin biyolojik dağılımı (106).

Doku - Organ	Kontrol Grubu	İnositol hekzafosfatın lantan ile kompleksi	İnositol hekzafosfatın çinko ile kompleksi	Prusya mavisi
Kan	0,39	0,45	0,36	0,01
Karaciğer	1,51	1,14	1,58	0,04
Böbrek	2,39	2,22	2,53	0,08
Kas	2,57	2,68	2,39	0,06
Dalak	2,22	2,12	2,13	0,05

Deney sonucunda, tedavi edilmeyen kontrol grubu ve M-IP6 ile tedavi edilen gruplar arasında önemli bir fark görülmemiştir. Bu nedenle, M-IP6 ile tedavinin sezyum-137'nin vücuttan atılımında etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak Ogawa ve arkadaşlarının M-IP6'nın etkinliğini *in vitro* şartlarda yaptığı çalışma

sonucunda ise, M-IP6 (M = Zn veya La) bileşiğinin, *in vitro* deneylerde Prusya mavisine kıyasla sezyum-137'ye karşı çok daha yüksek adsorpsiyon potansiyeline sahip olduğu görülmüştür (106).

Sonuç olarak, sezyum-137 ile M-IP6 arasındaki bağlanma potansiyeli, *in vivo* deneylerde düşük olarak saptanmıştır ve M-IP6'nın, sezyum-137 atılımında etkili olmadığı belirlenmiştir. Çalışma ile, inositol hekzafosfat bileşiklerinin, insan vücudunda sezyum-137'nin atılımı için uygun bir bileşik olarak kullanılamayacağı ancak çevrede sezyum-137 dekontaminasyonu için faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır (106).

4.1.11 Sezyum-137'nin Çevreye Yayılımı ve Çevreden Arındırılması

Çernobil'de 1986, Fukushima Daiichi Nükleer Santrali'nde 2011'de meydana gelen kazalar, çevreye büyük miktarlarda radyoaktif madde salınımına neden olmuştur. Özellikle, radyoaktif sezyum salınımı, sezyum-137'nin uzun yarılanma ömrü (30,2 yıl), suda çözünürlük özelliğinin yüksek olması ve potasyuma kimyasal benzerliği nedeniyle karasal ve suda yaşayan organizmalar tarafından hızlı absorbe edilmekte ve bu nedenlerle önemli bir sorun oluşturmaktadır (32, 68, 69).

Sezyum-137, besin zincirinde yoğunlaşabilmektedir. Çernobil kazasından otuz yıl geçtikten sonra da sezyum-137'nin toprakta belirlenebildiği bilinmektedir. Sonuç olarak, diğer yollarla sezyum-137 ile kontamine olmuş bölge halkı aynı zamanda sezyum-137 ile kontamine olmuş gıdalara da maruz kalmaktadır (83, 107).

Japonya'nın Fukuşima kentinde biriken radyoaktif sezyum-137'nin büyük bölümünün (> % 90) toprak yüzeyinin ilk 5 cm'lik tabakasında yer aldığı saptanmıştır. Sezyum-137'nin toprak yüzeyindeki penetrasyon derinliği, toprak kili içeriği, ayrışma hızı, hava durumu gibi çeşitli etmenlere bağlı olarak değişebilmektedir. Topraktaki sezyum-137 düzeylerinin yıkama, gömme ve radyoaktif bozunma yoluyla nispeten hızlı bir şekilde düştüğü bilinmektedir (108).

Ormanların, radyoaktif elementler için ekolojik yutak görevi gördüğü ve radyonüklitlerin genel hareketliliğini büyük ölçüde azalttığı bilinmektedir.

Kontaminasyona neden olan radyonüklitler, yapraklar tarafından yakalanmakta veya emilmekte ya da kökler aracılığıyla alım yoluyla taşınmaktadır (68, 71, 73, 108). Ormanlar kontaminasyonun yayılmasını sınırlamada etkili olsalar da, bu alanların dekontaminasyonu zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, kontamine bölgelerde ormanların varlığı bölgenin tahliyesi gibi kararların alınma süreçlerini etkileyebilmektedir. Çünkü radyonüklitler ile kontamine olmuş bir ormandaki gıda maddelerinin tüketimi ile radyasyona maruziyetin artması ve ormanda meydana gelebilecek orman yangınından kaynaklanan sezyum emisyon potansiyeli ile maruziyetin artması gibi olasılıklar da bulunmaktadır (68, 108).

Yakın zamanda meydana gelen Fukuşima kazasından sonra radyonüklidlere maruziyeti olabildiğince azaltmak ve bu radyonüklidlerin, özellikle sezyum-137'nin, olumsuz etkilerini önleyebilmek adına yeni yöntemlerin araştırılması günümüzde öncelikli hale gelmiştir (107).

Toprak kirliliğinin yanı sıra sudardaki kirlilik de insan sağlığı açısından önem taşımaktadır. Sudaki kirlilik düzeylerini etkileyen etmenler arasında yer yüzeyi kirlilik düzeyleri, akış hızı ve ilk maruziyetten sonra geçen süre yer alır (68).

Sezyum-137'nin sudan ekstraksiyonu için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu yöntemlere örnek olarak, ters ozmoz, koagülasyon-sedimentasyon, iyon değişimi, nanofiltrasyon, elektro-diyaliz ve adsorpsiyon verilebilir. Adsorpsiyon, doğru adsorbanların kullanılması koşuluyla, çok yüksek iyon seçiciliğine sahip, oldukça verimli ve uygun maliyetli bir işlemdir (32, 68, 108).

Çalışmalar sonucunda, Prusya mavisini ve analogları, sezyum-137 iyonlarının yakalanmasında çok yüksek verimlilik göstermiştir. Yapılan testler, grafen ve karbon nano tüpçük (CNT) bazlı adsorbanların sezyum-137'nin atılım etkinliğini arttırdığını göstermiştir. Sonuç olarak, PM-CNT/ grafen kombinasyonunun sezyum-137 arıtımında oldukça etkili olduğu ve bu kombinasyonun su arıtma membranlarında kullanılmasıyla sezyum-137'nin suda düşük düzeylere inmesini sağlayabileceği düşünülmektedir (99).

Ilgook Kim ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı bir çalışmada, radyoaktif atık suyun arıtılması için mikroalgler tarafından sezyum-137'nin emilim potansiyeli

değerlendirilmiştir. Bu amaçla dokuz farklı suşun sezyum-137 varlığında davranışı incelenmiştir. Dokuz suş arasında *Desmodesmus armatus* suşunun sezyum-137'yi yok etme konusunda en etkili mikroalg olduğu belirlenmiştir (107).

Çalışmada, biyoakümülyasyon için *D. armatus* suşunun kullanılması ve hücrelerin ayrılması için de polietilenimin nanomateryallerinin kullanılması sonucunda sudan sezyum-137'nin etkili bir şekilde temizlenebileceği görülmüştür. Uygulanan bu yöntemin ekonomik olduğu ve sezyum-137 ile kontamine ortamlardan bu radyoaktif elementin biyolojik olarak temizlenmesi (*biyoremediasyon*) için büyük potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir (107).

Fukuşima kazası sonrası toprakta biriken radyoaktif maddeler, özellikle radyoaktif sezyum birikiminin temizlenmesi amacıyla da çeşitli çalışmalar yapılmıştır (108).

Mallampati ve arkadaşlarının (2013) yaptığı bir çalışmada, ilk kez nano-Fe/Ca/CaO dispersiyon karışımı esas alınarak temizleme ve radyoaktif sezyumla kirlenmiş toprakların hacminde azalma sağlanmaya çalışılmıştır (109). Toprak örneklerinin ağırlıkça % 10 nano-Fe/Ca/CaO dispersiyon karışımları ile işlenmesinden sonra, manyetik olmayan topraktan yayılan radyasyon yoğunluğu 4 $\mu\text{Sv/sa'ten}$ 0,95 $\mu\text{Sv/sa'e}$ düşmüştür. İşlemden sonra ağırlıkça yaklaşık % 30 manyetik ve ağırlıkça % 70 manyetik olmayan fraksiyonlu toprak ayrılmıştır ve ayrılan bu toprak kütlelerindeki radyoaktif sezyum konsantrasyonu sırasıyla % 80 ve % 20 olarak ölçülmüştür. Bu yöntem ile sezyumla kirlenmiş toprak hacminin azaltılabileceği düşünülmektedir (94, 95). Çalışma sonucunda, nano-Fe/Ca/CaO ilavesiyle basit karıştırma yönteminin, radyoaktif sezyum ile kontamine toprağın kuru koşullarda ayrılması ve temizlenmesi için uygulanabilir bir yöntem olduğu kabul edilmektedir (109).

Elahi ve arkadaşları (2020), suda düşük konsantrasyonlarda bulunan sezyum-137'yi temizlemek için yenilikçi bir yöntemin geliştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bunu sağlamak için, *E. coli*'de membrana bağlı potasyum alım proteini ve bir lipozom keseciği halinde yeniden yapılandırılan bir proteolipozom taşıyıcı tasarlanmıştır (110).

Çalışma sonucunda, lipozomlara eklenen potasyum alım proteini taşıyıcıların esas olarak uzaklaştırma verimliliğinden sorumlu olduğunu göstermektedir. Sonuç

olarak, kontamine suya ne kadar fazla yapılandırılmış proteolipozom ve potasyum alım proteini eklenirse o kadar yüksek oranda uzaklaştırma verimliliği elde edilebilir. Proteolipozom taşıyıcılar, sezyum veya diğer metal kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir (110).

4.1.12. Nükleer Enerjinin Tarihçesi

İkinci Dünya Savaşı, radyasyon içeren silahların ilk kez kullanılması açısından bir dönüm noktası niteliği taşımaktadır. Bu tarihten sonra atom bombası kullanımı yasaklansa da gelişen teknoloji ile birlikte radyoaktif atomların enerji kaynağı ve tedavi amaçlı olarak kullanılmasını takiben radyasyona bağlı çok sayıda olay ve kaza meydana gelmiştir. Tablo 4.3'te tarih boyunca radyasyon kaynaklı meydana gelmiş olay ve kazalardan Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği'ne (*International Nuclear and Radiological Event Scale, INES*) göre kaza olarak adlandırılanlara yer verilmiştir.

Tablo 4.3 Radyasyon yayılımına neden olan kaza örnekleri.

Ülke	Kaza	Çevreye Yayılan Radyonüklidler	Yıl
Japonya	Hiroşima ve Nagazaki Atom Bombaları	Sezyum-137, Sezyum-134, Stronsiyum-90, Plütonyum-239, Uranyum-235, Uranyum-238, İyot-131, Ksenon-133	1945
İngiltere	Windscale Pile Nükleer Kazası	İyot-131, Sezyum-137, Polonyum-210, Stronsiyum-90, Ksenon-133, Zirkonyum-95, Tritiyum (Hidrojen-3)	1957
Rusya	Kyshthm Kazası	İyot-131, Sezyum-137, Stronsiyum-90, Seryum-144, Niyobyum-95	1957
Amerika	Three Miles Island Kazası	İyot-131, Sezyum-137, Ksenon-133, Kripton-85, Rubidyum-85	1979
Ukrayna	Çernobil Kazası	İyot-131, Sezyum-137, Sezyum-134, Stronsiyum-90, Plütonyum-238, Plütonyum-239, Plütonyum-238, Plütonyum-240, Ksenon-133, Seryum-144, Zirkonyum-95, Küriyum-242	1986
Brezilya	Goiania Kazası	Sezyum-137	1987
Japonya	Fukuşima Kazası	İyot-131, Sezyum-137, Sezyum-134, Sezyum-136, Teluryum-128, Ksenon-133, Stronsiyum-89, Stronsiyum-90, Plütonyum-238, Plütonyum-240, Plütonyum-241, Kripton-85, Seryum-144	2011

Hiroşima ve Nagazaki Atom Bombaları

İkinci Dünya Savaşı sırasında ABD ve İngiltere tarafından üretilmiş zenginleştirilmiş uranyum-235 kaynaklı “Little Boy” diye adlandırılan atom bombası 6 Ağustos 1945’te Enola Gay isimli bomba uçağı tarafından Japonya’nın en büyük kentlerinden biri olan Hiroşima’ya atılmıştır. Bomba şehrin üzerinde yaklaşık olarak 610 metre yükseklikte patlamış ve şehrin % 90’ını yok etmiştir. Patladığı anda, yüksek basınç, aşırı sıcaklık ve iyonize radyasyon nedeniyle 80.000 kişinin ölümüne neden olmuştur ve radyasyon maruziyeti sonucu ölümler devam etmiştir (110-112). Kayıtlara göre 90.000 ile 120.000 arasında sivilin öldüğü tahmin edilmektedir (44).

Hiroşima saldırısı sonrasında Japonya'nın teslim olmaması üzerine Amerika ve İngiltere tarafından üretilmiş plütonyum-239 kaynaklı "Fat Man" diye adlandırılan atom bombası 9 Ağustos 1945'te başka bir bomba uçağı tarafından Nagazaki'ye atılmıştır. Bomba Hiroşima'ya atılandan daha güçlü olmasına rağmen şehrin topografik konumu bombanın şiddetini azaltmıştır. Patladığı anda, yüksek basınç, aşırı sıcaklık ve iyonize radyasyon nedeniyle 45.000 kişinin ölümüne neden olmuştur ve radyasyon maruziyeti sonucu ölümler izleyen günlerde de devam etmiştir (110-112). Kayıtlara göre 60.000 ile 80.000 arasında sivilin öldüğü tahmin edilmektedir (113).

Hiroşima ve Nagazaki saldırıları nükleer silahların yıkıcı etkisini ortaya koyan ilk olay olduğu için Japon tıp insanlarında radyasyon ile mücadele konusunda yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle ilk olgularda meydana gelen yanıklar, karbonlaşma ve kelloidal yapıların radyasyon maruziyeti sonucu olduğu tahmin edilememiştir. Geçen zaman ile birlikte, radyasyon ve etkileri hakkında bilgi toplanmasıyla doktorlar karşılaştıkları olgulara atom bombası sendromu ya da atomik hastalık adını verdikleri bir tanı koymaya başlamışlardır (111).

Yaşanan olay sonrasında kayıtlar incelendiğinde bombaya maruz kalanlarda en çok hasarın kemik iliğinde ve bağırsak mukozasında meydana geldiği görülmüştür (111, 113). Atom bombalarının patlamaları sonucunda, Hiroşima ve Nagazaki'de gerçekleşen bu felaketin ardından hayatta kalan kişiler üzerinde yapılmış araştırmalarda, 1940'lı yılların sonlarında lösemi oranında büyük bir artış olduğu belirlenmiştir. Lösemi, radyasyonun uzun süreli etkisi olarak ortaya çıkmıştır (17, 111, 113). Bunun yanında meme kanseri ve tiroid kanseri olgularının maruz kalınan radyasyon dozuna bağlı olarak arttığı görülmüştür. Alınan doza bağlı olarak yaşam süresi kısalmıştır. Ayrıca kardiyovasküler hastalıklarda belirgin artış gözlenmiştir. Atom bombalarının atılmasını izleyen 3 – 4 yıllık süre içerisinde katarakt tanılarında da artışlar kaydedilmiştir (17, 113). Atom bombası sonrası bölgede karaciğer kanseri olgularında da belirgin artışlar gözlenmiştir (44, 114). Hayatta kalan kişilerde anksiyete ve travma sonrası stres bozukluğu (*Post-traumatic stress disorder, PTSD*) artmıştır. Bireylerde duygusal boşluk ve isteksizlik gibi semptomlar görülmüştür (111).

Kayıtlarda anne karnında radyasyona maruziyet sonrası yalnızca 1 tane ölüm olgusuna rastlanmıştır. Ancak çocukluk çağında radyasyona maruz kalan bireylerde ölüm oranı *in utero* olgulara göre çok daha yüksek ve doza bağımlı olarak meydana gelmiştir (113). Ayrıca *in utero* radyasyona maruziyet sonrasında doğan bebeklerin yetişkinlik dönemlerinde kansere daha yüksek oranda yatkınlık gösterdikleri ve kanser olma olasılıklarında artış olduğu gözlenmiştir (111).

Patlamanın uzun süreli etkilerinden, uzun yarılanma ömrüne sahip radyoaktif elementlerin, özellikle sezyum-137'nin sorumlu olduğu düşünülmektedir (17, 111, 113, 114).

Kyshtym Kazası

Sovyet savaş programına göre nükleer silah geliştirmek için, Ural Dağları'nın yamaçlarında, 1940'ların sonunda Kyshtym Sanayi Kompleksi'nin nükleer reaktörleri ve plütonyum işleme tesisi inşa edilmiştir. Gizli olan bu nükleer tesis Mayak olarak adlandırılmaktadır. Ancak tesis çalışanlarına gelen mektupların tesisten 90 km uzaklıktaki büyük bir şehir olan Chelyabinsk'teki posta kutusu 40'a gönderilmesi nedeniyle tesis *Chelyabinsk-40* kod adıyla bilinmektedir (42, 115-119).

Tesis yakınlarındaki göller, nükleer reaktörü soğutmak için gerekli su kaynağı sağlamak ve nükleer atıkları depo etmek amacıyla kullanılmıştır (42, 115-119).

Sıvı reaktör atığının depolandığı bir tankta meydana gelen soğutma sistemi arızası fark edilmemiş ve bir yıldan daha uzun bir süre boyunca tankın içindeki sıcaklık artmaya devam etmiştir. 29 Eylül 1957'de tank 70 ton trinitrotoluene (TNT) eşdeğer bir kuvvetle patlamıştır (118). Patlamanın kuvveti ile tankın bir metre kalınlığındaki beton kapağı havaya uçmuş ve sezyum-137 ve stronsiyum-90 da dahil olmak üzere yaklaşık 70-80 ton radyoaktif materyal havaya yayılmıştır. Kaza sonrasında Kyshtym'de herhangi bir ölüm kaydedilmemiş ancak yaklaşık 270 bin kişinin tehlikeli miktarda radyasyona maruz kaldığı belirlenmiştir (116, 118). Kazayı takiben kontamine olmuş bölgeler için tahliye emrinin geç verilmesi üzerine kazayı takip eden

aylarda bölge hastanelerinde çok sayıda radyasyon sendromu olgularına rastlanmıştır (118).

Tesisin yanındaki Karachay Gölü'nde meydana gelen kontaminasyon nedeniyle bugün bile gölde ve gölün çevresinde hiçbir canlı yaşamamaktadır. Ayrıca göl günümüzde de dünyanın en kirli göllerinden biri olarak kabul edilmektedir. Uzmanlar bu gölde bir saat yüzmenin ölümlü sonuçlanacağını belirtmektedir (117-119).

Söz konusu kaza Sovyet Hükümeti tarafından 1989 yılına kadar saklanmıştır (118, 119). Kysthym Kazası en büyük üçüncü nükleer felaket olarak kayıtlara geçmiştir (116). Bu kaza sonucunda yaklaşık 23 bin dönümlük arazi kontamine olmuş ve 10 binden fazla insan tahliye edilmiştir (119). Kazadan sonraki 3 yıllık süreçte incelenen 14 yaş altı çocuklarda radyasyona maruz kalanların enfeksiyon hastalıklarına çok daha açık olduğu gözlenmiştir. Ancak kesin veriler Sovyet hükümetinin bu kazayı yaklaşık 30 yıl boyunca saklamış olması sebebiyle elde edilememiş olup Kyshtym kazası ile ilgili ayrıntılar ancak Çernobil kazasından sonra ortaya çıkmıştır. Geçen süreçte incelenen bölge halkında kanser görülme sıklığının normale göre iki kattan fazla artmış olduğu, bunun en önemli etmenlerinden birinin de sezyum-137 olduğu saptanmıştır (116-119).

Windscale Piles Kazası

Windscale Piles Nükleer Santrali, nükleer silah üretimi konusunda politika düzenlemesi sonucu İngiltere'nin kuzeybatı kıyısında, Cumberland'de kurulmuştur. 7 Ekim 1957'de reaktördeki Wigner enerjisinin rutin olarak dengelenmesi sırasında reaktör sıcaklığı 250°C'ye ulaşmıştır. 9 Ekim 1957'de ise sıcaklık 400°C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklık reaktörün ulaştığı en yüksek sıcaklık olup takip eden iki gün boyunca sıcaklık düşürülmeye çalışılsa da başarılı olunamamıştır. Düşürülemeyen sıcaklık sonucunda reaktörde yangın çıkmıştır. Alevleri söndürmek için karbondioksit uygulanmış ancak sonuç alınamamıştır. Bunun üzerine dakikada 300 galondan 1000 galona kadar artan miktarlarda su püskürtülmüş ve 16 saatin sonunda yangın söndürülmüştür (42, 115, 120).

Yangın sonrasında radyoaktif iyotun çoğunluğunun filtreler tarafından tutulduğu düşünülmektedir (120-122). Ancak iyotun sekiz günlük yarılanma ömrü göz önünde bulundurularak, tedbir olarak, birkaç hafta boyunca süt tüketimi yasaklanmıştır (123). Windscale merkezi 1980'lere kadar kapatılmıştır. Radyoaktif iyotun yanında sezyum-134 ve sezyum-137 gibi yarılanma ömrü daha uzun olan radyonükleitlerin bölgede kontaminasyona neden olduğu belirlenmiştir (122, 123).

McNally'nin (2016) araştırmasına göre Windscale kazasının en çok etkilediği bölgeler olan Cumbria ve Lancashire'da tiroid kanseri olguları İngiltere'nin diğer bölgelerine göre artış göstermiştir (122).

Three Mile Island Kazası

Amerika'nın Pennsylvania eyaletinde bulunan Three Mile adasında yer alan iki basınçlı su reaktörü barındıran nükleer santralde 28 Mart 1979'da Ünite-2'de ikincil soğutucu sistemde meydana gelen bir hasar sonucu sıcaklık yükselmeye başlamıştır. Bu nedenle reaktör otomatik olarak kendini kapatmıştır. Reaktörün içindeki soğutma suyu tahliye vanasından çıkarken operatörler bunun reaktörde fazla su olmasından kaynaklandığını düşünmüş ve reaktöre giden soğutucu su akışını yavaşlatmışlardır (42, 124-127). Sonuç olarak reaktör gittikçe ısınmış, su buharlaşmış ve reaktör çekirdeği açığa çıkmıştır. Durum fark edildiğinde, operatörler reaktörün içine acil durum soğutucu suyu pompalamayı başarmış ve reaktör kontrolünü ele almışlardır (126, 127).

Olay sonrasında Pennsylvania Sağlık Departmanı bölgede yaşayan 30 binden fazla hastayı 1997 yılına kadar rutin kontrol altında tutmuştur. Kayıtlara ve yapılan araştırmalara göre bu kazanın sağlık üzerinde tek etkisinin psikolojik olduğu kaydedilmiştir. Bu olaydan sonra bölge halkında korku, anksiyete ve stres düzeylerinin arttığı rapor edilmiştir (126, 127).

Çernobil Nükleer Kazası

Ukrayna'nın kuzeyindeki Pripyat kentinde yer alan Çernobil Nükleer Santralinde 1986 yılında, etkileri günümüze kadar devam eden büyük bir felaket meydana gelmiştir (42, 118).

25 Nisan 1986'da Çernobil ünite 4 reaktörünün rutin bakım nedeniyle kapatılmasına karar verilmiştir. Olası bir güç kaybı durumunda türbünlerin ne kadar süre daha döndüğünü ve ne kadar süreyle daha ana sirkülasyon pompalarına güç verdiğini belirlemek amacıyla yapılacak olan test için bu kapatma zamanının kullanılması planlanmıştır (89, 92, 93, 124).

25 Nisan 1986 gecesi teste başlanmıştır. Güç kesintisi sebebiyle reaktör yarı güçte çalışmaya başlatılmıştır. Test için gerekli güç 700 MWt olarak belirlenmiştir ancak reaktör bu güce düşürülememiştir. Devam eden çabalar sonucunda reaktörün gücü düşmeye başlamıştır. Ancak güç istenen 700 düzeyi yerine 30 düzeyine düşmüştür. Güç bu düzeyde iken reaktörde ksenon üretimi devam etmekte ancak üretilen ksenon harcanmamış ve basınçta artışa neden olmuştur. Test için istenen düzeye ulaşmamış olan reaktör gücünü artırmak için operatörler kontrol çubuklarını reaktör çekirdeğinden çıkarmaya başlamıştır. Neredeyse tüm çubuklar çıktığında güç ancak 200 Mwt düzeyine kadar yükselmiştir (93, 94, 128, 129). Bu koşullarda testin durdurulması ve güç yaklaşık 24 saatte uygun düzeye ulaşana kadar beklenmesi kararı verilmesi gerekmesine rağmen ekip teste devam etmiştir. Sonuç olarak, reaktörün gücü çok hızlı bir şekilde yükselmeye başlamıştır. Ekip bir sorun olduğunu fark edip acil durum butonu denen AZ-5 butonuna basmıştır (93, 94, 129).

Acil durum butonu, bütün kontrol çubuklarını reaktör çekirdeğine geri sokarak çekirdeğin gücünü düşürmeye yarayan bir sistemi aktive etmeye yaramaktadır. Reaktörlerde bu kontrol çubuklarının borondan yapılmış olması ve nötronları absorbe etme yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Ancak Çernobil'de tamamı borondan yapılmış olması gereken kontrol çubuklarının uç kısımlarının grafitten yapılmış olduğu belirlenmiştir (89, 93, 128). Kontrol çubuklarındaki bu farklılık nedeniyle reaktör çekirdeğine ilk temas grafit ile olmaktadır. Bu durum reaktör çekirdeğinde büyük bir güç açığa çıkarmıştır. Bu güçle reaktör çekirdeği çatlamış ve kontrol

çubukları boron kısmı içeri giremeden sıkışmıştır. Ve sonunda reaktör çekirdeği üzerindeki bin tonluk kapağı fırlatacak bir güçle patlamıştır (68, 93, 94, 125, 128, 129).

Bu nükleer felaket sonrasında Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Hakkında Bilimsel Komitenin (UNSCEAR, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) 2018 yılı raporuna göre özellikle 18 yaş altındaki bireylerde 20.000 tiroid kanseri olgusu görüldüğü bildirilmiştir. Olguların özellikle radyoaktif iyot ile kontamine olmuş sütlerden kaynaklandığı belirlenmiştir (25, 89, 128). Yerel diyetteki genel iyot eksikliği daha fazla radyoaktif iyotun tiroide birikmesine neden olmuştur. Radyoaktif iyotun kısa yarılanma ömrü göz önünde bulundurulduğunda kayıtlar, kazayı izleyen birkaç ay boyunca yerel olarak sağlanan süt tüketiminin yasaklanmış olması durumunda radyasyona bağlı tiroid kanserindeki artışın daha düşük olacağını düşündürmüştür (44, 89, 93, 94, 128).

İyonlaştırıcı radyasyon bazı lösemi tiplerinin bilinen bir nedenidir. Son araştırmalar radyasyona en fazla maruz kalan Çernobil tasfiyecileri arasında lösemi sıklığının iki katına çıktığını göstermektedir (89, 93, 94, 128). 26 Nisan sabahında merkezde bulunan 600 işçiden 134 tanesinin yüksek dozda radyasyona maruz kaldığı ve bu maruziyetin akut radyasyon sendromu ile sonuçlandığı rapor edilmiştir. Bu işçilerden 28 tanesi, maruziyeti izleyen ilk üç ay içerisinde hayatını kaybetmiştir (17, 124).

Kaza sonrasında radyasyona maruz kalan ancak kurtulan kişilerde tedavi çok uzun sürmüştür. Kurtulanların çoğunda ilk birkaç yılda radyasyona bağlı katarakt gelişimi görülmüştür (89).

1986 yılından beri Belarusta konjenital malformasyon düzeylerinde artış bildirilmiştir. Bu felaketin sonucunda intihar, alkol tüketiminde artış, depresyon gibi psikolojik etkiler de rapor edilmiştir. Uluslararası yapılan çalışmalarda Çernobil kazasına maruz kalmış kişilerde kontrol grubuna göre iki kat daha fazla anksiyete semptomları görülmüştür (93, 128).

Çernobil felaketinin üzerinden geçen süreye rağmen, günümüzde bile kaza bölgesinde sezyum-137 bulunduğu belirlenmiştir (44, 89, 93, 94, 128).

Goiania Nükleer Olayı

Brezilya'nın Goiania şehrindeki özel bir radyoterapi enstitüsü 1985'in sonlarında beraberinde kobalt-60 radyoterapi ünitesi ile başka bir binaya taşınmıştır. Ancak lisans koşullarına aykırı olarak sezyum-137 kaynaklı radyoterapi ünitesi geride bırakılmış ve bu durum hakkında kimse haberdar edilmemiştir (3, 124, 130, 131). Yeni binaya taşınmanın ardından eski bina büyük oranda yıkılmış ve binadaki sezyum-137 radyoterapi ünitesi korumasız kalmıştır. 1987 yılında binadaki radyoterapi ünitesi paradeder düşüncesiyle iki adam tarafından parçalanarak hurdacıya satılmıştır. Hurdacı eline geçirdiği ürünün geceleri mavi ışık yaydığını fark edince çevredekilere haber vermiştir. Gelen ailelere pirinç büyüklüğünde ışık yayan bu kaynaktan dağıtılmış ve bu durum 5 gün boyunca bu şekilde devam etmiştir. Sonrasında aile bireylerinde mide bulantısı ve kusma gibi semptomlar görülmeye başlanmış ancak bir kişi hariç kimse bu durumdan şüphelenmemiştir. Şüphelenen kişi halk sağlığı merkezlerine sezyum kaynağı ile birlikte başvurduğunda yerel bir fizikçi konunun ciddiyetini fark ederek kendi inisiyatifiyle sezyum-137 ile kontamine olmuş iki bölgeyi boşaltıp konu hakkında gerekli kurumlara bilgi vermiştir. Bu olayda yaklaşık 250 kişi sezyum-137'ye maruz kalmıştır (3, 130).

Brandao-Mello ve arkadaşlarının (1991) yaptıkları araştırmada, Brezilya'daki Goiania felaketinden sonra hastaneye yatan, 450 ile 600 rad arası radyasyona maruz kaldıkları düşünülen 50 hastadan 21 tanesinde baş dönmesi, kusma, mide bulantısı ve diyare ile kendini gösteren akut radyasyon sendromu görülmüştür. 4 hasta ise kazadan sonraki ilk ay içinde ağır akut radyasyon sendromu, kanama ve enfeksiyon nedeniyle yaşamını kaybetmiştir. Bu kazadan yaklaşık 1 ay sonra, Goiania kazasında sezyum-137'ye maruz kalmış 9 erkek incelenmiş ve sperm sayısında azalma ya da sperm oluşumunun tamamen ortadan kalktığı görülmüştür (130).

Fukuşima Nükleer Kazası

Japonya'nın Fukushima eyaletinde altı kaynar su reaktöründen oluşan Fukuşima Nükleer Tesisi yer almaktadır. Kaza gerçekleştiğinde, tesisin sadece ilk üç

reaktörünün çalışır durumda olduğu bildirilmişti. Reaktör 4 ise geçici olarak kullanılmış yakıt çubuklarını depolamak için kullanılıyordu (132).

11 Mart 2011'de 1900'lerden beri Japonya'da görülen, kayıtlara geçmiş, en büyük deprem gözlenmiştir. 9 büyüklüğündeki deprem sonucunda meydana gelen tsunami, santrale büyük zarar vermiştir (42, 124, 132, 133).

Deprem sonrası meydana gelen güç kaybı nedeniyle soğutma sistemleri birer birer arızalanmıştır. Her reaktörün çekirdeğindeki artan ısı, reaktörlerdeki yakıt çubuklarını aşırı ısıtarak, kısmen erimelerine neden olmuştur. Erimiş malzeme, reaktör 1 ve 2 zemininde delikler açarak çekirdeklerdeki nükleer materyalin kısmen açığa çıkmasına neden olmuştur (132).

Basınçlı hidrojen gazının birikmesinden kaynaklanan patlamalar, sırasıyla 12 Mart ve 14 Mart'ta reaktör 1 ve 3'ü çevreleyen dış muhafaza binalarında meydana gelmiştir (125, 132-134). Reaktör çekirdeklerini soğutup stabilize etmek için deniz suyu ve borik asit pompalanmıştır. Şehir büyük oranda tahliye edilmiştir. Reaktör 2 binasının zemininde ikinci bir delik daha oluşmuş ve 15 Mart'ta üçüncü bir patlama meydana gelmiştir. Patlamalar ve Reaktör 4'te depolanan yakıt çubuklarında yükselen sıcaklığın oluşturduğu bir yangın sonucunda tesisten daha yüksek düzeylerde radyasyon salınımı gerçekleşmiştir (132-134).

Raporlara göre radyasyona maruz kalmış 18 yaş altı bireylerde Japonya'nın geneline oranla tiroid kanseri riski yıllık 15 kat daha fazla bulunmuş olsa da bunun kazaya bağlı olup olmadığına dair kesin bir kanıt elde edilmemiştir (135). İşçilerde akut radyasyon sendromuna rastlanmamıştır. Kaza sonucunda gebe kadınlarda düşük ya da bebeklerde anomaliye rastlanmamış olsa da nükleer kaza nedeniyle gebe kadınlarda bebeklerin sağlığı ile ilgili korku ve depresyon belirtileri artmıştır. 2011'de incelenen gebe kadınların dörtte birinde ağır depresyon görülmüştür (133, 135).

Fukuşima'da kaza sonrası intihar oranı da artmıştır. Depresyon ve beslenme düzenindeki değişim sonucunda zorunlu ya da gönüllü olarak bölgeden göç edenlerde diyabet, obezite, kolesterol gibi hastalıklarda artış gözlenmiştir (135).

Tarih boyunca nükleer kazaların akut sonuçları yanında kronik sonuçları da olduğu gözlenmiş ve bu kronik sonuçlardan yarılanma ömrü uzun radyoaktif elementlerin, özellikle sezyum-137'nin, sorumlu olduğu görülmüştür.

Türkiye'de İkitelli Kazası

Aralık 1998'de radyoaktif kaynak ithalatı yapan bir firma, kobalt-60 kaynaklarını zırhlı paketlerde bir depoda tutmuştur. Zamanla depoların el değiştirmesi üzerine yeni depo sahipleri, zırhlı paketleri hurda olarak satmıştır. Hurdacılar paketlerin içini açmış ve kobalt-60 kaynaklı radyasyona maruz kalmışlardır. Daha sonra zırhsız radyoaktif kaynaklar iki hafta depoda, iki hafta da bölgedeki hurdalıkta tutulmuştur. Hurdacılar ve maruz kalan kişilerde halsizlik, kusma, iştah eksikliği, ishal gibi belirtiler ile kendini gösteren akut radyasyon sendromu görülmüştür. Radyasyona maruz kalmış yaklaşık 404 kişi olduğu düşünülmektedir. Bunlardan 18 tanesi hastaneye kaldırılmıştır. 4 kişi birkaç gün gözlemden sonra taburcu edilmiştir. Hematolojik durumu kötü olan 7 hastaya kan ve trombosit transfüzyonu yapılmıştır. Hastaların çoğunda akyuvar düzeyleri normal düzeylere gelmişken lenfosit düzeyleri uzun bir süre düşük seyretmiştir (42, 124, 136).

Söz konusu olay nükleer santral olmamasına karşın gerçekleşen nükleer kaza olarak kayıtlara geçmiştir (136).

5. TARTIŞMA

Radyasyon, dünyanın varoluşundan bu yana canlıların maruz kaldığı bir enerji türüdür. Gerek kozmik ve karasal radyasyon gerekse besinler yoluyla maruz kaldığımız radyasyon düzeyleri, insan organizmasının normal koşullarda alışkın olduğu doğal radyasyon kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Ancak radyoaktif elementlerin keşfi ve gelişen teknolojiye bağlı olarak fisyon reaksiyonları ile elde edilen nükleer enerjinin insanlığın kullanımına sunulması, iki tür sonucun ortaya çıkmasına neden olmuştur: İnsanlık bu enerjiden sağlık ve teknoloji gibi alanlarda olumlu amaçlarla yararlanabilmekte ve bu enerji yaşamı kolaylaştırmak için de kullanılmaktadır. Ancak atom bombasının İkinci Dünya Savaşı sırasında iki kez kullanımı sonucunda yüz binlerce insanın hayatını kaybetmesi ve günümüze kadar devam eden anomalileri de kapsayan çok sayıda istenmeyen etkiye neden olması bu enerjinin kullanımı konusunda çok dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Bu tür olumsuz etkilerine rağmen bugün de nükleer silah denemelerine devam edilmesi ve kimi ülkelerde elektrik üretimi amacıyla nükleer santrallerin kurulmasına izin verilmesi düşündürücüdür (13, 25, 26, 28, 33, 44, 54).

Gerek doğal gerekse yapay olarak maruz kalınan radyasyon, dalga boyları ve frekanslarına bağlı olarak iyonize ve iyonize olmayan radyasyon şeklinde iki çeşit enerji yayabilir. İyonize radyasyon, moleküllerden elektronları koparabilecek yeterli enerjiye sahip olup maruz kalınan doz, süre ve maruz kalınan yüzey alanı gibi etmenlere bağlı olarak başta kanser olmak üzere çok sayıda sağlık sorununa ve hatta ölüme neden olmaktadır (53). İyonize radyasyonun ana kaynağı radyoaktif elementlerdir. Bu elementlere örnek olarak iyot-131, sezyum-137, stronsiyum-90, uranyum-238 verilebilir (50, 54).

Otuz yıl gibi uzun bir yarılanma ömrüne sahip olması, beta ve gama ışınması yapması nedeniyle iyonize radyasyon yayan bir element olan sezyum-137, toksikolojik açıdan değerlendirilmesi öncelikli olan radyoaktif elementlerden bir tanesidir (16, 44, 63, 65, 66, 69). Sezyum-137, kimyasal özellikleri açısından potasyuma benzerliği nedeniyle organizmalarda biyolojik ve fizikokimyasal yollara kolayca girebilir (68, 73). Ayrıca yapılan çalışmalar, sezyum-137'nin plasentadan

geçerek fetüsü etkileyebildiğini de göstermiştir (44, 77). Sezyum-137'nin karaciğer, kas ve dalak gibi organ ve dokularda birikim gösterme eğiliminde olduğu da belirlenmiştir (67, 72). Sezyum-137'nin vücuttan ana atılım yolu ise böbreklerdir (66, 73).

Sezyumun toksikolojik açıdan önem taşımasında, mesleki maruziyetlerin yanı sıra nükleer silah denemeleri, nükleer santral kazaları ve nükleer santrallerde meydana gelen sızıntıların ardından çevreye yayılarak besin zincirine katılmasının da rolü bulunmaktadır (44, 63, 65, 66, 69, 73). Örneğin; 2011 yılında meydana gelen Fukuşima Nükleer Santrali kazasının ardından sezyum-137'nin çevreye yayılımının günümüzde de devam etmesi, besin zinciri yoluyla insan dahil tüm canlılara ulaşma riski taşıdığı için büyük önem taşımaktadır (). Genel toplumda biriken sezyumun ana kaynağının, kontamine içme suyu ve gıda yoluyla alıma bağlı gastrointestinal absorpsiyon olduğu bildirilmiştir (44, 68, 73).

Sezyum-137'ye deri yoluyla maruziyet sonucunda, deri lezyonları ve kutanöz radyasyon sendromu, mide bulantısı, kusma, ishal gibi belirtiler meydana gelir (79, 81). Sezyum-137'ye akut maruziyetin ardından düşük kan hücre sayısı, kemik iliği depresyonu, germinal epitelyumda hasar, azospermia, benign ve malign neoplazm oluşumu gibi toksik etkiler görüldüğü bildirilmiştir (82). Renal toksisite de, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalman sonucu meydana gelen akut yan etkilerden bir tanesidir. Çalışma sonuçları, sezyum-137 kaynaklı düşük iyonlaşmış radyasyon dozlarına maruziyetin ardından akut böbrek hasarı oluştuğunu göstermiştir (85). Sezyum-137'ye kronik maruziyet sonucunda kolesterol, trigliserit, fosfolipit, glikoz gibi biyokimyasal değerlerde değişiklikler meydana geldiği bildirilmiştir (83).

Sezyum-137'nin yukarıda belirtilen çeşitli nedenlerle çevreye yayılması, insan sağlığı üzerinde risk oluşturmasının yanı sıra ekosistem için de büyük risk kaynağıdır. Bu durum, sezyum-137 ve benzeri radyoaktif maddelerin olumsuz etkilerini önleyebilmek amacıyla yeni yöntemlerin araştırılması konusunu gündeme getirmiştir (107). Bu amaçla, demir, kalsiyum ve kalsiyum oksit nanopartiküllerinden oluşan dispersiyon karışımı esas alınarak gerçekleştirilen temizleme yoluyla radyoaktif sezyumla kirlenmiş toprakların hacminde azalmanın sağlanmaya çalışıldığı araştırmalar konuya örnek olarak verilebilir (109). Kontamine suların arıtılması

amacıyla da mikroalglerden ve bakterilerden yararlanılan çeşitli yöntemlerin araştırıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (107, 110).

Sezyum-137'ye maruziyetin ardından zehirlenme tedavisinde kullanılabilecek etkin bir antidot olan Prusya mavisinin kullanımı, 2003 yılında FDA tarafından onaylanmıştır (98-100). Prusya mavisine alternatif olabilecek tedavi yöntemleri için de araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, pektin ve inositol hekzafosfatın bu radyoaktif elemente bağlı toksisitenin tedavisindeki rollerinin araştırılması bu çalışmalara örnek olarak verilebilir (100, 105).

Sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda yapılan çalışmalar son yıllarda önem kazanmakla birlikte, bu konuda elde edilen veriler ve bilgi birikimi oldukça kısıtlıdır. Bu duruma ek olarak, sezyum-137'nin toksik etkilerinin belirlenmesi ve risk değerlendirilmelerinin yapılması konusunda da yetersizlikler bulunması, konu hakkındaki belirsizliği arttırarak, güvenilirliği hakkında yeterli veri bulunmadan insan sağlığını etkileyecek düzeylerde çevreye ve besin zincirine giren bu radyoaktif elementin toksik etkilerinin üzerinde önemle durulması gerektiğini göstermektedir.

Ülkemizde özellikle Mersin, Akkuyu'da bir nükleer santralin kurulmasına başlanması, sezyum-137 gibi radyoaktif elementlerin insan ve çevre sağlığı üzerindeki toksik etkileri, bu elementlerin yaydığı iyonize radyasyona maruziyetten korunma yolları ve maruziyet sonrası tedavi yöntemleri gibi konularda bilgi sahibi olunmasını önemli hale getirmiştir. Bu çalışmanın, sezyum-137 konusunda ülkemizde ileride yapılacak araştırmalara katkı sağlaması beklenmektedir.

6. SONUÇ

- Dünyanın varoluşundan bu yana tüm canlılar ve çevre radyasyona maruz kalmaktadır (25, 27, 49).
- Tıbbi tesislerde tanı ve tedavi amacıyla radyasyonun kullanılması, gelişen nükleer teknoloji ile nükleer santral ve nükleer silah denemelerinin artması, insanların iyonize radyasyona maruziyet düzeyini de artırmaktadır (5, 48, 50).
- Sezyum-137, yarılanma ömrü uzun olan, beta ve gama ışınım yapan, akut ve kronik maruziyette toksik etkileri gerek hayvan çalışmaları gerek epidemiyolojik çalışmalar ile gösterilmiş önemli radyonüklitlerden bir tanesidir.
- Sezyum-137'nin toksik etkileri arasında akut radyasyon sendromu, deri lezyonları, benign ve malign neoplazmlar ile kemik iliği depresyonu gibi ciddi patolojik etkiler yer almaktadır (81, 82).
- Sezyum-137'nin insan sağlığı üzerine kısa ve uzun dönem etkilerinin toksikolojik açıdan ciddi sonuçlarının olduğu bilinmektedir. Birçok organ ve sistem üzerinde etkisi olduğu bilinen ve iyonize radyasyon yayan sezyum-137'nin toksik etkilerinin daha ayrıntılı incelenmesi gereklidir. Bu radyonüklitin farklı araştırmalar ile çevre ve halk sağlığı üzerindeki etkilerinin izlenmesi de büyük önem taşımaktadır.
- Konu hakkında Türkçe kapsamlı bir çalışmanın bulunmaması nedeniyle hazırlanan bu tez çalışmasının sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkileri konusuna, toksikolojik bakış açısı ile önemli düzeyde katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- 1- Heredia L, Bellés M, Llovet MI, Domingo JL, Linares V. Behavioral effects in mice of postnatal exposure to low-doses of 137-cesium and bisphenol A. *Toxicology*. 2016;340:10-16. doi:10.1016/j.tox.2015.12.002.
- 2- Esplugas R, Llovet MI, Bellés M, Serra N, Vallvé JC, Domingo JL, et al. Renal and hepatic effects following neonatal exposure to low doses of Bisphenol-A and 137 Cs. *Food Chem Toxicol*. 2018;114:270–77.
- 3- Sakamoto-Hojo ET. Lessons from the accident with 137Cesium in Goiania, Brazil: Contributions to biological dosimetry in case of human exposure to ionizing radiation. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*. 2018;836(Part A):72-77.
- 4- Verreet T, Verslegers M, Quintens R, Baatout S, Benotmane MA. Current evidence for developmental, structural, and functional brain defects following prenatal radiation exposure. *Neural Plast*. 2016;2016:1243527.
- 5- Yamamoto LG. Risks and management of radiation exposure. *Pediatr Emerg Care*. 2013;29(9):1016-26.
- 6- Leggett RW, Williams LR, Melo DR, Lipsztein JL. A physiologically based biokinetic model for cesium in the human body. *Sci Total Environ*. 2003;317(1-3):235-55.
- 7- Yu W, He J, Lin W, Li Y, Men W, Wang F, Huang J. Distribution and risk assessment of radionuclides released by Fukushima nuclear accident at the northwest Pacific. *J Environ Radioactiv*. 2015;142:54-61.
- 8- International Atomic Energy Agency (IAEA). Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, Technical Reports Series No. 422. Vienna: IAEA; 2004.
- 9- International Atomic Energy Agency (IAEA). Disposal Options for Discused Radioactive Sources, Technical Reports Series No. 436. Vienna: IAEA; 2004.
- 10- International Atomic Energy Agency (IAEA). Disposal Options for Discused Radioactive Sources, Technical Reports Series No. 436. Vienna: IAEA; 2005.
- 11- Yamaguchi M, Kitamura A, Oda Y, Onishi Y. Predicting the long-term (137)Cs distribution in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: a parameter sensitivity analysis. *J. Environ. Radioact*. 2014;135:135–46.
- 12- Belles M, Heredia L, Serra N, Domingo JL, Linares V. Exposure to low doses of 137cesium and nicotine during postnatal development modifies anxiety

- levels, learning, and spatial memory performance in mice. *Food Chem. Toxicol.* 2016;97:82–8.
- 13- Biddle W. *A Field Guide to Radiation*. New York, NY: Penguin Books; 2012.
- 14- National Center for Biotechnology Information, PubChem. Compound Summary for CID 5354618, Cesium [Internet]. 2004 [Erişim tarihi: 25 Ocak 2020]. Erişim adresi: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cesium>.
- 15- Calabrese E. Improving the scientific foundations for estimating health risks from the Fukushima incident. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2011;6;108(49):19447-8.
- 16- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Cesium [Internet]. 2011 [Erişim tarihi 10 Ocak 2020]. Erişim adresi: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=578&tid=107>.
- 17- Goldfrank LR, Flomenbaum NE, Lewin NA, Howland MA, Hoffman RS, Nelson LS. *Goldfrank's Toxicologic Emergencies*. 7th Ed. New York, NY: McGraw-Hill; 2002. 1519.
- 18- National Library of Medicine. Cesium, Radioactive [Internet]. 2020 [Erişim tarihi 13 Şubat 2022]. Erişim adresi: <https://webwiser.nlm.nih.gov/substance?substanceId=411&identifier=Cesium,%20Radioactive&identifierType=name&menuItem=22&catId=24>.
- 19- Souidi M, Grison S, Dublineau I, Aigueperse J, Lestaevel P. Le césium 137: un perturbateur de la fonction physiologique? *Environ. Risques et St.* 2013;12(2):151-9.
- 20- International Agency For Research On Cancer (IARC). *Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Volume 78 Ionizing Radiation, Part 2: Some Internally Deposited Radionuclides*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2001. 478.
- 21- Barile FA. *Clinical Toxicology: Principles and Mechanisms*. Florida: CRC Press; 2004.
- 22- Thornberg C, Mattsson S. Increased ¹³⁷Cs Metabolism During Pregnancy. *Health Phys.* 2000;78(5):502–6.
- 23- International Agency For Research On Cancer (IARC). *Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Volume 75 Ionizing Radiation, Part 1: X-and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2000. 299.
- 24- US Food and Drug Administration (FDA). *FDA Response to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Facility Incident* [Internet]. 2016 [Erişim tarihi 14 Ocak

- 2020]. Erişim adresi: <https://www.fda.gov/news-events/public-health-focus/fda-response-fukushima-dai-ichi-nuclear-power-facility-incident>.
- 25- Barile FA. *Clinical Toxicology: Principles and Mechanisms*. 3rd ed. Florida: CRC Press; 2019.
- 26- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). *Introduction to Radiation*. Ontario: CNSC; 2012. CC172-93/2012E-PDF.
- 27- Solmaz F, Özatamer O. Radyasyon ve Radyoaktif Madde Toksisitesi. *Turkiye Klinikleri J Anest Reanim*. 2012;10(1):28-34.
- 28- Dönmez S. Radyasyon Tespiti ve Ölçümü. *Nucl Med Semin*. 2017;3:172-7.
- 29- Zakariya NI, Kahn MTE. Benefits and biological effects of ionizing radiation. *Sch Acad J Biosci*. 2014;2(9):583-91.
- 30- Ferguson CD. *Nuclear Energy: What Everyone Needs to Know*. New York, NY: Oxford University Press; 2011.
- 31- Grupen C, Rodgers M. *Radioactivity and Radiation: What They Are, What They Do, and How to Harness Them*. Switzerland: Springer; 2016.
- 32- Borrelli RA. *Characterization of Radioactivity in the Environment* [Master of Science thesis]. Worcester, Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute; 1999.
- 33- Zimmermann R. *Nuclear medicine: radioactivity for diagnosis and therapy*. France: Editions EDP Sciences; 2019.
- 34- L'Annunziata MF. *Radioactivity: introduction and history, from the quantum to quarks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2016.
- 35- Görür Ş. *Çevresel Radyoaktivite İle Bu Çevrede Yaşayanlara Ait Diş Örneklerindeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Adana: Çukurova Üniversitesi; 2006.
- 36- Murray RL. *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 6th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann; 2009.
- 37- Wojcik A, Harms-Ringdahl M. Radiation protection biology then and now. *Int J Radiat Biol*. 2019;95(7):841–50.
- 38- Mc Laughlin JP. Some characteristics and effects of natural radiation. *Radiat Prot Dosim*. 2015;167(1-3):2-7.

- 39- US Environmental Protection Agency (EPA). Radiation: Facts, Risks and Realities. Washington, DC: EPA; 2012. EPA-402-K-10-008.
- 40- The Nobels Prize. Niels Bohr Facts [İnternet]. 2020 [Erişim tarihi: 10 Şubat 2022]. Erişim adresi: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/bohr/facts/>
- 41- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). Radyasyon Kaynakları [İnternet]. [Erişim tarihi 12 Şubat 2022]. Erişim adresi: <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>.
- 42- Doğruluk M, Doğan A, Kalkan N, Korkmaz M. Nükleer Tehlikeler ve Afet Yönetimi: Türkiye’de Durum Değerlendirmesi. Afet ve Risk Dergisi. 2018;1(2):137-53.
- 43- International Agency For Research On Cancer (IARC). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, A Review of Human Carcinogens Volume 100D Radiation. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2012.
- 44- Klaassen CD. (editor). Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2008.
- 45- Rozlaimi RFA. Neutron Radiation. Othman SA, editor. Radiation Biophysics. Malezya: Penerbit UTHM; 2019.
- 46- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). Radyasyon Ölçüm ve Dönüşümleri [İnternet]. [Erişim tarihi 10 mart 2020]. Erişim adresi: <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-olcum-birimleri-ve-donusumleri>.
- 47- Kamiya K, Ozasa K, Akiba S, Niwa O, Kodama K, Takamura N, et al. Long-term effects of radiation exposure on health. Lancet. 2015;386(9992): 469-78.
- 48- US Environmental Protection Agency (EPA). NCRP Report No: 93, Ionizing Radiation Fact Book. Washington, DC: EPA; 2007. EPA-402-F-06-061.
- 49- Shahbazi-Gahrouei D, Gholami M, Setayandeh S. A review on natural background radiation. Adv Biomed Res 2013;2:65.
- 50- Aggarwal L. Biological Effects of Ionizing Radiation. Shodh Prerak. 2014;4(1):342-8.
- 51- Ministry of Environment Government of Japan. Booklet to Provide Basic Information Regarding Health Effects of Radiation Basic Knowledge and Health Effects of Radiation. Japan: Ministry of Environment Government of Japan; 2019.

- 52- Thorne MC. Background radiation: natural and man-made. *J Radiol Prot.* 2003;23(1): 29-42.
- 53- Klaassen CD. (editor). *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons.* 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2013.
- 54- Azzam EI, Jay-Gerin JP, Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Lett.* 2012;327(1-2): 48-60.
- 55- Tsubokura M, Nomura S, Sakaiharu K, Kato S, Leppold C, Furutani T, et al. Estimated association between dwelling soil contamination and internal radiation contamination levels after the 2011 Fukushima Daiichi nuclear accident in Japan. *BMJ Open.* 2016;6(6):e010970.
- 56- Mettler FA. Medical effects and risks of exposure to ionising radiation. *J Radiol Prot.* 2012;32(1):N9-13.
- 57- Hayes AW, Kruger CL, editors. *Hayes' Principles and Methods of Toxicology.* 6th ed. Florida: CRC Press; 2014.
- 58- European Commission, Directorate-General for Health and Consumers. *Health effects of security scanners for passenger screening (based on X-ray technology).* Brussels: European Commission; 2012.
- 59- Aggarwal SK. *Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects.* 2nd ed. New Delhi: A. P. H. Publishing Corporation; 2003.
- 60- Stellman JM, editor. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety.* 4th ed. Geneva: International Labor Office; 1998.
- 61- Wexler P, editor. *Encyclopedia Of Toxicology, Four-Volume Set.* 2nd ed. Massachusetts: Academic Press; 2005.
- 62- Weeks ME. The discovery of the elements. XIII. Some spectroscopic discoveries. *J Chem Educ.* 1932;9(8):1418-24.
- 63- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological profile for Cesium.* Atlanta, GA: ATSDR; 2004.
- 64- Lamy CA. Rediscovery of the Elements. *The Hexagon.* 2008;99(3):42-8.
- 65- *Encyclopædia Britannica.* Cesium [Internet]. 2018 [Erişim Tarihi 29 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.britannica.com/science/cesium>
- 66- Melnikov P, Zanoni LZ. Clinical effects of cesium intake. *Biol Trace Elem Res.* 2010;135(1):1-9.

- 67- Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA, editors. Encyclopedia of Metalloproteins. New York: Springer; 2013.
- 68- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Cesium-137 in the environment: radioecology and approaches to assessment and management, NCRP Report No. 154. Oak Ridge, TN: NCRP; 2007.
- 69- Gupta DK, Walther C, editors. Impact of Cesium on Plants and the Environment. Switzerland: Springer International Publishing; 2017.
- 70- Patton DD. A selected history of radiology apropos of the radiologic centennial. Part 5: The discovery of cesium 137: the untold story. Acad Radiol. 1994;1(1):51-8.
- 71- Ashraf MA, Akib S, Maah MJ, Yusoff I, Balkhair KS. Cesium-137: radiochemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns. Crit Rev Environ Sci Technol. 2014;44(15):1740-93.
- 72- Rosoff B, Cohn SH, Spencer H. I. Cesium-137 Metabolism in Man. Radiat Res. 1963;19(4):643-54.
- 73- Argonne National Laboratory Environmental Science Division. Radiological and chemical fact sheets to support health risk analyses for contaminated areas. Argonne, IL:Argonne National Laboratory Environmental Science Division; 2007.
- 74- Le Gall B, Taran F, Renault D, Wilk JC, Ansoborlo E. Comparison of Prussian blue and apple-pectin efficacy on ¹³⁷Cs decorporation in rats. Biochimie. 2006;88(11):1837-41.
- 75- Richmond CR, Furchner JE. Enhancement of ¹³⁷Cesium excretion by rats fed potassium supplemented diets. Proc Soc Exp Biol Med. 1961;108:797-8.
- 76- Korolev AA, Sukhanov BP. The effect of dietary calcium on the level of body adaptation under conditions of cesium-137 and lead loading [Vliianie alimentarnogo kal'tsiia na uroven' adaptatsii organizma v usloviakh nagruzki tseziem-137 i svintsom]. Vopr Pitan. 1996;(3):34-7.
- 77- Bandazhevsky YI. Chronic Cs-137 incorporation in children's organs. Swiss Med Wkly. 2003;133(35-36):488-90.
- 78- Neulieb R. Effects of oral intake of cesium chloride: a single case report. Pharmacol Biochem Behav. 1984;21(1):15-6.
- 79- Hölgye Z, Malý M. A case of repeated accidental inhalation contamination of a male subject with ¹³⁷Cs. Health Phys. 2002;82(4):517-20.

- 80- Miller CE. Retention and distribution of ^{137}Cs after accidental inhalation. *Health Phys.* 1964;10:1065-70.
- 81- Gottlöber P, Bezold G, Weber L, Gourmelon P, Cosset JM, Bahren W, et al. The radiation accident in Georgia: clinical appearance and diagnosis of cutaneous radiation syndrome. *J Am Acad Dermatol.* 2000;42(3):453-8.
- 82- Nikula KJ, Muggenburg BA, Griffith WC, Carlton WW, Fritz TE, Boecker BB. Biological effects of $^{137}\text{CsCl}$ injected in beagle dogs of different ages. *Radiat Res.* 1996;146(5):536-47.
- 83- Manens L, Grison S, Bertho JM., Lestaevel P, Guéguen Y, Benderitter M, et al. Chronic exposure of adult, postnatal and in utero models to low-dose $^{137}\text{Cesium}$: impact on circulating biomarkers. *Radiat Res.* 2016;57(6):607–19.
- 84- Grignard E, Guéguen Y, Grison S, Dublineau I, Gourmelon P, Souidi M. Testicular steroidogenesis is not altered by $^{137}\text{cesium}$ Chernobyl fallout, following in utero or post-natal chronic exposure. *C R Biol.* 2010;333(5):416–23.
- 85- Bellés M, Gonzalo S, Serra N, Esplugas R, Arenas M, Domingo JL, et al. Environmental exposure to low-doses of ionizing radiation. Effects on early nephrotoxicity in mice. *Environ Res.* 2017;156:291-6.
- 86- Romanenko A, Morell-Quadreny L, Ramos D, Nepomnyaschiy V, Voizianov A, Llombart-Bosch A. Extracellular matrix alterations in conventional renal cell carcinomas by tissue microarray profiling influenced by the persistent, long-term, low-dose ionizing radiation exposure in humans. *Virchows Arch.* 2006;448(5):584-90.
- 87- Racine R, Grandcolas L, Blanchardon E, Gourmelon P, Veyssiere G, Souidi M. Hepatic cholesterol metabolism following a chronic ingestion of cesium-137 starting at fetal stage in rats. *J Radiat Res.* 2010;51(1):37-45.
- 88- Ha M, Ju YS, Lee WJ, Hwang SS, Yoo SC, Choi KH, et al. Cesium-137 Contaminated Roads and Health Problems in Residents: an Epidemiological Investigation in Seoul, 2011. *J Korean Med Sci.* 2018;33(9):e58.
- 89- Hasrin NI. Chernobyl Nuclear Accident. Othman SA, editor. *Radiation Biophysics.* Malezya: Penerbit UTHM; 2019.
- 90- Wartelecki W, Chambers CD, Yevtushok L, Zymak-Zakutnya N, Sosyniuk Z, Lapchenko S, et al. Chornobyl 30 years later: Radiation, pregnancies, and developmental anomalies in Rivne, Ukraine. *Eur J Med Genet.* 2017;60(1):2-11.

- 91- Cherenko SM, Larin OS, Gorobeyko MB, Sichynava RM. Clinical analysis of thyroid cancer in adult patients exposed to ionizing radiation due to the Chernobyl nuclear accident: 5-year comparative investigations based on the results of surgical treatment. *World J Surg.* 2004;28(11):1071-4.
- 92- World Nuclear Association. Chernobyl Accident 1986 [Internet]. 2021 [Erişim tarihi 10 Mayıs 2021]. Erişim adresi: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>.
- 93- World Health Organization (WHO). Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Geneva: WHO; 2006.
- 94- World Health Organization (WHO). Radiation: The Chernobyl accident [Internet]. 2011 [Erişim tarihi 14 Aralık 2019]. Erişim adresi: https://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/20110423_FAQs_Chernobyl.pdf?ua=1.
- 95- Schonfeld SJ, Krestinina LY, Epifanova S, Degteva MO, Akleyev AV, Preston DL. Solid cancer mortality in the techa river cohort (1950-2007). *Radiat Res.* 2013;179(2):183-9.
- 96- Krestinina LY, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. *Br J Cancer.* 2013;109(11):2886-93.
- 97- Bandazhevskaya GS, Nesterenko VB, Babenko VI, Yerkovich TV, Bandazhevsky YI. Relationship between caesium (137Cs) load, cardiovascular symptoms, and source of food in 'Chernobyl' children -- preliminary observations after intake of oral apple pectin. *Swiss Med Wkly.* 2004;134(49-50):725-9.
- 98- Olson KR, Anderson IB, Benowitz NL, Blanc PD, Clark RF, Kearney TE, et al, editors. *Poisoning & Drug Overdose.* 7th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2018.
- 99- Rauwel P, Rauwel E. Towards the Extraction of Radioactive Cesium-137 from Water via Graphene/CNT and Nanostructured Prussian Blue Hybrid Nanocomposites: A Review. *Nanomaterials.* 2019;9(5):682.
- 100- Aaseth J, Nurchi VM, Andersen O. Medical Therapy of Patients Contaminated with Radioactive Cesium or Iodine. *Biomolecules.* 2019;9(12):856.
- 101- Heyl Chem-pharm. Fabrik GmbH & Co. KG. Radiogardase®-Cs. Haupt Pharma Wülfing GmbH: Berlin; 2021.
- 102- Center for Disease Control and Prevention. Prussian Blue [Internet]. 2020 [Erişim tarihi 29 Kasım 2020] Erişim adresi: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/prussianblue.htm>.


- 103- Altagracia-Martinez M, Kravzov-Jinich, Martínez-Núñez, Ríos-Castañeda, López-Naranjo. Prussian blue as an antidote for radioactive thallium and cesium poisoning. *Orphan Drugs: Res Rev.* 2012;2:13-21.
- 104- Qian J, Zhou L, Yang X, Hua D, Wu N. Prussian blue analogue functionalized magnetic microgels with ionized chitosan for the cleaning of cesium-contaminated clay. *J Hazard Mater.* 2020;386:121965.
- 105- Le Gall B, Taran F, Renault D, Wilk JC, Ansoborlo E. Comparison of Prussian blue and apple-pectin efficacy on ^{137}Cs decorporation in rats. *Biochimie.* 2006;88(11):1837-41.
- 106- Ogawa K, Aoki M, Fukuda T, Kadono S, Kiwada T, Odani A. Complexes of myo-Inositol-Hexakisphosphate (IP6) with Zinc or Lanthanum for the Decorporation of Radiocesium. *Chem Pharm Bull (Tokyo).* 2017;65(3):261-7.
- 107- Kim I, Yang HM, Park CW, Yoon IH, Seo BK, Kim EK, et al. Removal of radioactive cesium from an aqueous solution via bioaccumulation by microalgae and magnetic separation. *Sci Rep.* 2019;9(1):10149.
- 108- US Environmental Protection Agency (EPA). Summary of the Transport of Cesium in the Environment. Washington, DC: EPA; 2018. EPA/600/S-18/289.
- 109- Mallampati SR, Mitoma Y, Okuda T, Sakita S, Kakeda M. (2013). Novel Approach for the Remediation of Radioactive Cesium Contaminated Soil with nano-Fe/Ca/CaO Dispersion Mixture in Dry Condition. *E3S Web Conf.* 2013;1(08003):4.
- 110- World Health Organization (WHO). Hiroshima, Nagasaki, and Subsequent Weapons Testing [Internet]. 2016 [Erişim tarihi 29 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/hiroshima,-nagasaki,-and-subsequent-weapons-testin.aspx>.
- 111- Tomonaga M. The Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki: A Summary of the Human Consequences, 1945-2018, and Lessons for Homo sapiens to End the Nuclear Weapon Age. *J Peac Nucl Disarm.* 2019;2(2):491-517.
- 112- Tibbets P, LeMay C. Bombings of Hiroshima and Nagasaki – 1945 [Internet]. 2014 [Erişim tarihi 26 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.atomicheritage.org/history/bombings-hiroshima-and-nagasaki-1945>.

- 113- Duple EB, Mabuchi K, Cullings HM, Preston DL, Kodama K, Shimizu Y, et al. Long-term radiation-related health effects in a unique human population: lessons learned from the atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki. *Disaster Med Public Health Prep.* 2011;5-1(01):S122-33.
- 114- Sadakane A, French B, Brenner AV, Preston DL, Sugiyama H, Grant EJ, et al. Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009. *Radiat Res.* 2019;192(3):299-310.
- 115- Jones S. Windscale and Kyshtym: a double anniversary. *J Environ Radioact.* 2008;99(1):1-6.
- 116- Sobhi MAA. Kyshtym Nuclear Accident. Othman SA, editor. *Radiation Biophysics.* Malezya: Penerbit UTHM; 2019.
- 117- Encyclopædia Britannica. Kyshtym Disaster [İnternet]. 2017 [Erişim tarihi 29 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.britannica.com/event/Kyshtym-disaster>.
- 118- Akleyev AV, Krestinina LY, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the 'Kyshtym Accident'). *J Radiol Prot.* 2017;37(3):R19-R42.
- 119- Monroe SD. Chelyabinsk: The Evolution of Disaster. *Post-Sov Geogr.* 1992;33(8):533-45.
- 120- Penney W, Schonland BFJ, Kay JM, Diamond J, Peirson DEH. Report on the accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957. *J Radiol Prot.* 2017;37(3):780.
- 121- Encyclopædia Britannica. Windscale Fire [İnternet]. 1998 [Erişim tarihi 29 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.britannica.com/event/Windscale-fire>.
- 122- McNally RJ, Wakeford R, James PW, Basta NO, Alston RD, Pearce MS, et al. A geographical study of thyroid cancer incidence in north-west England following the Windscale nuclear reactor fire of 1957. *J Radiol Prot.* 2016;36(4):934-52.
- 123- Jones S. Health Effects of the Windscale Pile Fire. *J Radiol Prot.* 2016;36(4):E23.
- 124- Günalp B. Dünyada ve ülkemizde nükleer ve radyolojik kazaların tarihçesi. *Nucl Med Semin.* 2017;3(3):184-8.

- 125- Sever O. Çevre ve Stratejik Bakış Açısıyla Türkiye'de Nükleer Santral Çalışmaları [Yüksek lisans tezi]. Aksaray: Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
- 126- Rahman NNA. Three Miles Island Nuclear Accident. Othman SA, editor. Radiation Biophysics. Malezya: Penerbit UTHM; 2019.
- 127- World Nuclear Association. Three Mile Island Accident [İnternet]. 2020 [Erişim tarihi 1 Aralık 2020]. Erişim adresi: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>.
- 128- World Health Organization (WHO). 1986-2016: Chernobyl at 30 [İnternet]. 2016 [Erişim tarihi 10 Mayıs 2021]. Erişim adresi: <https://www.who.int/publications/m/item/1986-2016-chernobyl-at-30>.
- 129- The Nuclear Energy Institute (NEI). Chernobyl Accident and Its Consequences [İnternet]. 2019 [Erişim tarihi 2 Aralık 2020]. Erişim adresi: <https://www.nei.org/resources/fact-sheets/chernobyl-accident-and-its-consequences>.
- 130- Brandão-Mello CE, Oliveira AR, Valverde NJ, Farina R, Cordeiro JM. Clinical and hematological aspects of ¹³⁷Cs: the Goiânia radiation accident. Health Phys. 1991;60(1):31-9.
- 131- International Atomic Energy Agency (IAEA). The Radiological Accident in Goiânia. Vienna: IAEA; 1988.
- 132- Povinec PP, Hirose K, Aoyama M. Fukushima accident: radioactivity impact on the environment. Waltham, MA: Elsevier; 2013.
- 133- Amri MNS. Fukushima Daiichi Nuclear Accident. Othman SA, editor. Radiation Biophysics. Malezya: Penerbit UTHM; 2019.
- 134- Encyclopedia Britannica. Fukushima Accident [İnternet]. 2011 [Erişim tarihi 30 Kasım 2020]. Erişim adresi: <https://www.britannica.com/event/Fukushima-accident>.
- 135- Kumagai A, Tanigawa K. Current Status of the Fukushima Health Management Survey. Radiat Prot Dosim. 2018;182(1):31-9.
- 136- Türkiye Atom ve Enerji Kurumu (TAEK). İkitelli Kazası Raporu. Ankara: TAEK; 1999.
- 137- World Nuclear Association. erişim adresi: Nuclear Power in Turkey [İnternet]. 2018 [Erişim tarihi 15 Aralık 2020]. Erişim adresi: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey.aspx>.

8. EKLER

EK-1: Tez Çalışması Orijinallik Raporu



Dijital Makbuz

Bu makbuz ödevinizin Turnitin'e ulaştığını bildirmektedir. Gönderiminize dair bilgiler şöyledir:

Gönderinizin ilk sayfası aşağıda gönderilmektedir.

Gönderen:	Ebru Erdağ
Ödev başlığı:	Sezyum 137
Gönderi Başlığı:	Sezyum 137
Dosya adı:	EBRU_ERDA_-_Y_KSEK_L_SANS_TEZ_-_bas_ma_haz_r.pdf
Dosya boyutu:	1.41M
Sayfa sayısı:	103
Kelime sayısı:	22,682
Karakter sayısı:	153,204
Gönderim Tarihi:	25-Şub-2022 10:14:00 (UTC+0300)
Gönderim Numarası:	1770549660

T.C.
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEZYUM-137'NİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN TOKSİKOLOJİK AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ

Ecz. Ebru ERDAĞ

Farmasötik Toksikoloji Programı
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA
2022

Copyright 2022 Turnitin. Tüm hakları saklıdır.

Sezyum-137'nin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin toksikolojik açıdan değerlendirilmesi

Ecz. Ebru Erdağ

Sayfa Sayısı: 103

Sezyum 137

ORJİNALLIK RAPORU

%4	%3	%1	%1
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİNCİL KAYNAKLAR

1	www.egitimkomisyonu.hacettepe.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
2	Submitted to TechKnowledge Turkey Öğrenci Ödevi	<%1
3	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
4	www.openaccess.hacettepe.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1
5	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	Submitted to Hacettepe University Öğrenci Ödevi	<%1
7	Submitted to Istanbul Medeniyet Āniversitesi Öğrenci Ödevi	<%1
8	halic.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
9	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1

9. ÖZGEÇMİŞ