

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**RADYASYON KAZALARININ TARİHSEL
ANALİZİ VE ETKİLERİ**

Ecem RAMAZANOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**RADYASYON KAZALARININ TARİHSEL
ANALİZİ VE ETKİLERİ**

Ecem RAMAZANOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADYASYON KAZALARININ TARİHSEL
ANALİZİ VE ETKİLERİ

Ecem RAMAZANOĞLU

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADYASYON KAZALARININ TARİHSEL
ANALİZİ VE ETKİLERİ

Ecem RAMAZANOĞLU

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/09/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nına TUNÇEL (Danışman)

Prof. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Dr. Öğr. Üyesi Erdi Bilgiç

ÖZET

RADYASYON KAZALARININ TARİHSEL ANALİZİ VE ETKİLERİ

Ecem RAMAZANOĞLU

Yüksek Lisans, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. NINA TUNÇEL

Eylül 2024; 75 sayfa

Radyasyonun kullanımının başlamasıyla birlikte hem yararlı hem de zararlı etkileri ortaya çıkmıştır. Radyasyon, nükleer sanayi, endüstri, tıp ve nükleer araştırma gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Tarih boyunca dünya genelinde birçok radyasyon kazası yaşanmış ve bu kazaların uzun vadeli olumsuz etkileri gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında toplanan tarihsel materyaller için radyasyon kazaları ve etkileri üzerine yazılmış ulusal ve uluslararası akademik kitaplar, kuruluşlar tarafından yayınlanan raporlar ve teknik dokümanlardan yararlanılmıştır. Ayrıca, Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi tarafından yayınlanan raporlar da incelenmiştir. Kitap ve rapor formatında dokümantasyonu bulunmayan olay ve kazalar için IAEA ve LAKA web sayfalarındaki bilgilerden yararlanılmıştır.

Tarihsel incelemede, 1957-2024 yılları arasında raporlanan radyasyon olay ve kazalarının yıllara, coğrafi bölgelere, INES seviyelerine ve farklı çalışma ortamlarına göre sınıflandırılıp istatistiksel olarak değerlendirmesi yapıldı. Verilerin analizi için "Google E-Tablolar" ve "Google Looker Studio" yazılımları kullanılmıştır. Çalışmada bulunan verilerden, ilk olarak en önemli 23 radyasyon kazası incelendi. İkinci basamakta ise 70 yılı kapsayan toplam kayda geçen 1054 radyasyon vakası bulundu ve olayların payı %98,7 iken kazaların payı %1,3 olarak tespit edildi. 1990'dan önce yetersiz veri nedeniyle INES derecelendirmesi yapılamamış, ancak bu tarihten sonra kayıt ve değerlendirme yapılabildiğinden vaka sayılarında artış izlendi. 2011 yılında Fukushima'nın 7. seviyedeki kaza niteliğinde vakasından sonra yalnız olay niteliğinde vakalar tespit edildi. En fazla radyasyon vakalarının güç reaktörü tesislerinde 600 vaka (%57oranla) bulunmasına rağmen kaza niteliğinde olan ise 6 vaka ile sınırlıdır.

Kazaların ortak nedenleri arasında insan faktörünün yanı sıra güvenlik sistemlerindeki hatalar ve teknik unsurlar da önemli etkenler olarak tespit edildi.

ANAHTAR KELİMELE: Radyasyon, Radyasyon Kazaları, Radyasyon Güvenliği, INES

JÜRİ: Doç. Dr. Nına TUNÇEL

Prof. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Dr. Öğr. Üyesi Erdi Bilgiç

ABSTRACT

HISTORICAL ANALYSIS AND EFFECTS OF RADIATION ACCIDENTS

Ecem RAMAZANOGLU

MSc Thesis in Physics

Supervisor: Doç. Dr. NINA TUNÇEL

September 2024; 75 pages

With the beginning of radiation usage, both its beneficial and harmful effects have become apparent. Radiation is widely used in fields such as nuclear industry, industry, medicine, and nuclear research. Throughout history, many radiation accidents have occurred worldwide, and the long-term negative impacts of these accidents have been observed.

In this thesis, historical materials collected, including radiation accidents and their effects, have been gathered from national and international academic books, reports published by organizations, and technical documents. Additionally, reports published by the United Nations Scientific Committee were examined. For events and accidents without documentation in book and report format, information from the IAEA and LAKA websites was utilized.

In the historical review, radiation incidents and accidents reported between 1957 and 2024 were classified and statistically analyzed according to years, geographical regions, INES levels, and different work environments. The data analysis was performed using "Google Sheets" and "Google Looker Studio" software. Based on the data collected, the 23 most significant radiation accidents were analyzed first. In the second phase, a total of 1054 radiation incidents recorded over 70 years were identified, with incidents accounting for 98.7% and accidents accounting for 1.3%. Due to insufficient data before 1990, INES scale could not be conducted; however, with the improvement of records and evaluation methods after that date, an increase in reported cases was observed. After the Fukushima accident in 2011, which was classified as a level 7 incident, only event-level cases were recorded. Although the majority of radiation incidents (600 cases, 57%) occurred in nuclear power plant facilities, only 6 of these were classified as accidents.

The common causes of accidents were identified as the human factor, as well as errors in safety systems and technical failures, which were significant contributing factors.

KEYWORDS: Radiation, Radiation Accidents, Radiation Protection, INES

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Nına TUNÇEL

Assoc. Prof. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Assistant Professor Erdi BİLĞİÇ

ÖNSÖZ

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), radyasyonla ilgili olayları inceleyerek bilgi sağlamaktadır ve radyasyon koruma ve güvenliğiyle ilgilenen kuruluşlara kaynak oluşturmaktadır. Radyasyon kazaları ve olayları ciddi sonuçlara yol açabilir; bu nedenle, bunların önlenmesi ve etkilerinin en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, tezimin başlığı "Radyasyon Kazalarının Tarihsel Analizi ve Etkileri" olup, bu konu benim için bir yol haritası niteliğindedir.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, sabırla her türlü desteği veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Nına TUNÇEL'e sonsuz saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Annem İpek RAMAZANOĞLU ve babam Rıza RAMAZANOĞLU'na sabırları ve sonsuz destekleri için teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Radyasyon.....	3
2.1.1. Radyasyon türleri.....	3
2.1.1.1. Parçacık tipi radyasyon.....	3
2.1.1.2. Dalga tipi radyasyon.....	5
2.1.2. İyonlaştırıcı radyasyonun maddeyle etkileşimi.....	6
2.1.3. Radyasyon birimleri.....	6
2.1.4. İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri.....	8
2.1.5. İyonlaştırıcı radyasyonun insan üzerine etkileri ve sınıflandırması.....	9
2.1.6. Radyasyonun organlar ve dokular üzerindeki etkileri.....	10
2.2. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES).....	11
2.2.1. INES seviyelendirmesi.....	15
2.2.2. INES seviyelendirmesini etkileyen diğer durumlar.....	17
2.2.3. Radyasyon vakalarında izlenen aksaklıkların sınıflandırılması.....	18

2.2.4. INES'in değerlendirme kriterleri.....	19
2.2.5. Olay ve kaza verilerine erişimi.....	19
3. MATERYAL VE METOD	21
3.1. Materyal	21
3.2. Metod	22
4. BULGULAR.....	23
4.1. INES'in Seviyelendirme Yöntemiyle Radyasyon Kazalarının İncelenmesi.....	23
4.1.1. Kyshtym Mayak Nükleer Tesis Kazası (29 Eylül 1957)	24
4.1.2. Three Mile Island Nükleer Santral Kazası (28 Mart 1979)	26
4.1.3. Çernobil Nükleer Santral Kazası (26 Nisan 1986)	27
4.1.4. Goiânia Radyasyon Kazası (1985-1987).....	29
4.1.5. El Salvador Işınlama Tesisi Kazası (5 Şubat 1989).....	31
4.1.6. İsrail Işınlama Tesisi Kazası (21 Haziran 1990).....	34
4.1.7. Belarus (Nesvizh) Işınlama Tesisi Kazası (26 şubat 1991).....	35
4.1.8. Sibirya Kimyasal İşletmeleri (SCE) Tesisi Kazası, TOMSK (6 Nisan 1993).....	36
4.1.9. Tammiku Radyasyon Kazası (1994).....	38
4.1.10. İran İslam Cumhuriyeti Gilan Radyasyon Kazası(24 Temmuz 1996)...	39
4.1.11. Rusya Federasyonu-Sarov Radyasyon Kazası (17 haziran 1997).....	40
4.1.12. Gürcistan Lilo Eğitim Birliği Kazası (9 Ekim 1997).....	42
4.1.13. İstanbul Radyasyon Kazası (Aralık 1998-Ocak1999).....	44
4.1.14. Yanango Radyasyon Kazası (Şubat 1999).....	45
4.1.15. Japonya Tokaimura Nükleer Yakıt İşleme Tesis Kazası (30 eylül 1999).....	46
4.1.16 Tayland Samut Prakarn Radyasyon Kazası (Ocak sonu ve Şubat 2000).	47

4.1.17. Polonya Białystok Onkoloji Merkezi Radyasyon Kazası (27 Şubat 2001).....	49
4.1.18. Lia Radyasyon Kazası (2 Aralık 2001).....	49
4.1.19. Cochabamba Bolivya Radyasyon Kazası (Nisan 2002).....	50
4.1.20. Nueva Aldea Radyasyon Kazası (14 Aralık 2005).....	51
4.1.21. Fukushima Daiichi Nükleer Santral Kazası (11 mart 2011).....	52
4.1.22. Chilca Peru Radyasyon Kazası (11 ocak 2012)	53
4.1.23. Peru, Ventanilla Radyasyon Kazası (14 şubat 2014)	55
4.2. 1957-2024 Tarihler Arası Tespit Edilen Olay ve Kazalar.....	55
4.3. Bölgesel ve Coğrafi Açıdan Olay ve Kazaların Dağılımı.....	56
4.4. INES Seviyelerine Göre Yaşanan Radyasyon Olay ve Kazaların Yıllara Göre Dağılımı.....	58
4.5. Farklı Çalışma Ortamlarında Yaşanan Olay ve Kazaların Sınıflandırılması.....	61
5. TARTIŞMA.....	63
6. SONUÇLAR	71
7. KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Radyasyon Kazalarının Tarihsel Analizi ve Etkileri” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

09/09/2024

Ecem RAMAZANOĞLU

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
cGy	: SantiGray
Gy	: Gray, SI biriminde soğurulan doz
J	: Joule, enerji birimi
km^2	: Kilometrekare
mrem	: Milirem
N	: Radyoaktif atom sayısı
Nb	: Niyobyum
PBq	: Petabecquerel
R	: Röntgen, ışınlama birimi
Rad	: Absorbe edilen dozun birimi
rem	: Eşdeğer doz
s	: Saniye
Sr	: Stronsiyum
Sv	: Sievert
TBq	: Terabecquerel
U	: Uranyum
Z	: Atom numarası

Kısaltmalar

ARS	: Akut Radyasyon Sendromu
DESCD	: Devlet Ekolojik Güvenlik ve Depolama Departmanı
EURT	: Ural Radyoaktif İz Alanı
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

IBNORCA: Bolivya Standartlar ve Kalite Enstitüsü

IBTEN: Bolivya Teknoloji ve Nükleer Enerji Enstitüsü

ICRP : Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi

INES : International Nuclear and Radiological Event Scale

IPEN : Perulu Nükleer Enerji Enstitüsü

LET : Lineer enerji transferi

MSC : Mezenkimal kök hücre

NEA : Nükleer Enerji Ajansı

NDT : Non destructive inspection; tahribatsız muayene

NRC : Nükleer Düzenleme Komisyonu

NRSS : Nükleer ve Radyasyon Güvenlik Servisi

OECD : Organisation for Economic Co-operation Development

PA : Üretim Birliği

SCE : Sibirya kimyasal işletmeleri

TMI : Three Mile Island

UNSCEAR: Birleşmiş Milletler Atomsal Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Alfa bozunumu.....	3
Şekil 2.2. Radyum çekirdeği beta bozunumu.....	4
Şekil 2.3. X-ışını yayılım mekanizması.....	5
Şekil 2.4. Plütonyum çekirdeği Gama ışıması.....	5
Şekil 2.5. Radyasyonun sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.6. Radyasyonun biyolojik sistemlerdeki doğrudan ve dolaylı etkisi	9
Şekil 2.7. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES; International Nuclear and Radiological Event Scale, IAEA 2013).....	13
Şekil 2.8. INES seviyeleri.....	17
Şekil 4.1. Doğu Urallar Radyoaktif İz Haritası (EURT): Kyshtym felaketinin kirlettiği bölge.....	24
Şekil 4.2. 30 Mart 1979'da Three Mile Island nükleer enerji santralının havadan görünüşü, merkezdeki küçük kubbe olayın meydana geldiği yer.....	27
Şekil 4.3. Goiânia'nın Rio de Janeiro'ya (1348 km) göre konumunu gösteren plan.....	30
Şekil 4.4. Goiania kazasında Cs-137 için çevresel kontaminasyon yolları.....	31
Şekil 4.5. Kaynak rafı serbest bırakmaya çalışırken A, B ve C İşçilerinin kaynak rafına göre konumlarının görünümü.....	33
Şekil 4.6. Kaynak güvenli alana çekildikten sonra kaynak rafını tıkayan karton kutular	35
Şekil 4.7. Operatörün maruziyet sırasındaki konumu (kazadan kısa bir süre sonra sağlık ekibine verilen bilgiye göre).....	36
Şekil 4.8. Kirlenmiş alanın göreceli büyüklüğü hakkında bir izlenim ile SCE sahasının konumunu gösteren plan.....	38
Şekil 4.9. Kaynağın bulunduğu depo.....	39
Şekil 4.10. İşçinin 28. günde göğüs ve sağ dirseğin termografisi.....	41
Şekil 4.11. Operatörün kaza anındaki konumu.....	42
Şekil 4.12. Yeraltı sığınacağının girişi.....	43

Şekil 4.13. 10'uncu kaynağın bulunduğu hurdalık.....	44
Şekil 4.14. Kurtarma çalışmaları yapılan hurdalık.....	45
Şekil 4.15. Kaynakçının bulduğu radyasyon çubuğu.....	47
Şekil 4.16. Kazaya neden olan durumun şeması.....	48
Şekil 4.17. Kaynak düzeneğinden silindirik parçalar.....	49
Şekil 4.18. Yıllara Göre Toplam Radyasyon Olay ve Kazaların Dağılımı.....	56
Şekil 4.19. Radyasyon olay ve kazalarının dünya genelinde yayılımını gösteren kartograf grafiği.....	57
Şekil 4.20. Radyasyon kazalarının dünya genelinde yayılımını gösteren kartograf grafiği.....	57
Şekil 4.21. INES seviyesine göre yaşanan radyasyon olay ve kazaların yıllara göre dağılımı.....	58
Şekil 4.22. Radyasyon olay ve kazaların INES seviyelerine göre dağılımı ve oranları..	59
Şekil 4.23. INES 0. Seviye yıllara göre dağılımı	59
Şekil 4.24. INES 1. Seviye yıllara göre dağılımı.....	60
Şekil 4.25. INES 2. Seviye yıllara göre dağılımı.....	60
Şekil 4.26. INES 3. Seviye yıllara göre dağılımı.....	60
Şekil 4.27. INES 4. ile 7. seviye kazaların dağılımı.....	61
Şekil 4.28. Vakaların ortamlarına göre sınıflandırılması.....	61
Şekil 4.29. 4.-7. INES seviyesinde olan kazaların ortama göre sınıflandırılması.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Radyasyon birimleri tablosu.....	8
Çizelge 3.1. Yaşanan radyasyon olay ve kazaların alındığı referans bilgileri.....	21
Çizelge 4.1. Tarihte yaşanan radyasyon kazaları.....	23



1. GİRİŞ

Radyasyonun kullanılmaya başlamasıyla birlikte zararlı etkileri de gözlemlenmeye başlanmıştır. İnsanlar radyasyondan fayda sağlarken aynı zamanda korunma yöntemlerini de öğrenmek zorunda kalmışlardır. Tarihimiz boyunca dünyayı ve çevremizi etkileyen birçok radyasyon kazası ve olayları meydana gelmiş ve bu kazaların uzun vadeli etkileri gözlemlenmiştir.

Radyasyonun yaygın olarak kullanıldığı nükleer sanayi, endüstri, tıp ve nükleer araştırma gibi alanlarda doğru kullanımının ve kontrolünün önemi vurgulanmaktadır. Radyasyonun yanlış kullanımının ve kazalarının insanlar ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği belirtilmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA; International Atomic Energy Agency), radyasyonla ilgili olayları inceleyerek bilgi sağlamak ve radyasyon koruma ve güvenliğiyle ilgilenen organizasyonlara kaynak oluşturmaktadır.

Radyasyon kaza ve olayları ciddi sonuçlara yol açabilir, insanlar ve canlıların sağlığını tehdit edebilir ve çevresel etkilerle beraber büyük maddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, radyasyon kazalarının ve olaylarının önlenmesi, kontrol altına alınması ve bunların etkilerinin en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli düzenlemeler ve önlemler bu amaçla uygulanmaktadır (IAEA 2022).

Radyolojik ve nükleer kazaların da önemine göre sıralayan bir skala oluşturulmuştur. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES; International Nuclear and Radiological Event Scale) yaşanan kaza ve olayları önemlerine göre bir sıraya koymuştur. INES, nükleer olayları ve radyolojik olayları ayrı kategorilere ayırarak olayların doğasına ve etkilerine göre sınıflandırma yapar. Bu iki kategorideki olayları da 0.'dan 7.'ye kadar sıralamıştır. 1. seviye, ciddi sonucu olmadığı anlamına gelirken, 7. seviye ise ciddi radyoaktif kirliliğe ve geniş çaplı etkilere sahip büyük bir nükleer felaketi temsil etmektedir. Olayların ciddiyetine ve etkisine dayalı olarak, INES derecelendirmesi yetkililere ve kamuoyuna olayın önemini iletmek ve önlemler almak için bir referans sağlamıştır (IAEA 2008).

Bu kapsamda INES, nükleer tesislerdeki olayların güvenlik önemini iletmek amacıyla IAEA ve OECD/NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development/Nükleer Enerji Ajansı) tarafından bir araya getirilen uluslararası uzmanlar tarafından 1990 yılında geliştirilmiştir. O zamandan beri, INES radyasyon risklerine yol açan herhangi bir olayın önemine ilişkin iletişim ihtiyacını karşılamak üzere genişletilmiştir. Kamu beklentilerini daha iyi karşılamak amacıyla, INES 1992 yılında genişletilmiş ve radyoaktif malzeme ve/veya radyasyonla ilişkili herhangi bir olaya, radyoaktif malzemenin taşınması da dahil olmak üzere, uygulanabilir hale getirilmiştir. 2001 yılında, INES'in kullanımını netleştirmek ve taşıma ve yakıt döngüsü ile ilgili olayların derecelendirilmesi için iyileştirmeler sağlamak üzere güncellenmiş bir INES Kullanıcı Kılavuzu yayımlanmıştır. Ancak, daha fazla rehberliğe ihtiyaç duyulduğu ve özellikle taşıma ile ilgili olaylarla ilgili olarak çalışmaların zaten devam ettiği kabul edilmiştir. Fransa ve İspanya'da radyasyon kaynağı ve taşıma ile ilgili olayların potansiyel ve gerçek sonuçları üzerinde daha fazla çalışma yapılmıştır. INES üyelerinin talebi üzerine, IAEA ve OECD/NEA Sekreteryası, radyasyon kaynakları ve radyoaktif malzemenin taşınmasıyla ilgili herhangi bir olayın derecelendirilmesi için ek rehberlik sağlayan bütünleşmiş bir kılavuzun hazırlanmasını koordine etmiştir (IAEA 2013).

Bu tez projesinde, INES'in sınıflandırmasına dayanarak radyasyon kaza ve olay örnekleri verilmiştir. Radyasyon kazalarının ve bunların nedenleri, meydana geliş süreçleri ve sonuçları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. IAEA veri tabanını ve yayınlarından yararlanılmıştır.

Bu kazaların insan sağlığı, çevre ve toplum üzerinde ciddi etkilerinin sınıflandırılmasında radyasyon görevlileri ve halkın radyasyon doz sınırlandırılmalarına göre etkilerin gruplandırılması yapılmıştır. Bu kapsamda, radyolojik kazaların etkilerinin radyasyon görevlileriyle sınırlı kalmadığı, genel halkı da etkileyebileceği değerlendirmeleri yer almıştır.

Değerlendirmeye alınacak örneklerde kazaların nedenleri ele alınmıştır. Bu nedenler, güvenlik kilitleme sistemlerinin çalışmaması, yetersiz eğitimli çalışanlar, kontrol aksaklıkları veya insan faktörleri gibi kategorilere ayrılarak incelenmeye çalışılmıştır. Kazaların önlenmesi ve radyasyonun etkilerinin en aza indirilmesi için sürekli olarak güvenlik önlemlerinin iyileştirilmesi ve bilimsel araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, tez çalışmamızda tarihsel olarak yaşanmış radyasyon kazalarının meydana geliş süreçleri ve etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

INES'in 2013 yayınında, 2008 yılına kadar olan IAEA değerlendirmelerine erişilebiliyorken, IAEA'nın web sayfasında sadece son yıla ait olayların verileri bulunmaktadır. Bu nedenle, tüm yıllara ait arşiv verilerini toplayan ve erişim sağlayan Hollanda merkezli ulusal nükleer enerji arşivi olan LAKA (LAndelijck Kernenergie Archief- National Nuclear Energy Archive) veri tabanındaki web sayfasından da faydalanılmıştır (<https://www.laka.org/>).

Böylece bu tez projemizde günümüze kadar güncel kazaların bilgilerini ekleyerek literatüre ve uluslararası veri tabanına katkı sunabilmesi umulmaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Radyasyon

Radyasyon bir enerji çeşidi olup bu enerjinin elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar şeklinde yayılması olayıdır. Bu enerji çeşidinin farklı türleri ve kaynakları vardır. Doğada kendiliğinden var olan doğal radyasyon kaynakları, örneğin; Kozmik ışınlar, radon gazı, doğal radyoaktif izotoplar vb. Bunun yanı sıra insan yapımı (yapay) radyasyon kaynakları da vardır. Bunlar tıbbi cihazlar, nükleer enerji santralleri, sanayi gibi birçok alanda kullanılmak için tasarlanmaktadır. Kullanım alanları genişledikçe korunmanın yollarını da geliştirmek gerekmiştir.

2.1.1. Radyasyon türleri

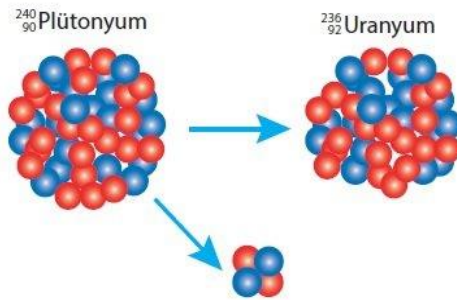
Radyasyon, yüksek hızlı atom altı parçacıklar ve boşlukta ışık hızında hareket eden enerji paketleri dalgaları şeklinde ortaya çıkar. Bir radyoaktif atom, fazla enerjisini bu dalga ve parçacıklar yoluyla yayarak atar. Parçacık türü radyasyon alfa, beta, proton ve nötron parçacıklarını içerirken, dalga türü radyasyon Gama ışınları ve X-ışınlarını kapsar. Her radyasyon türü farklı özelliklere sahiptir ve korunma yolları da birbirinden farklıdır.

2.1.1.1. Parçacık tipi radyasyon

Parçacık radyasyonu, belli bir kütle ve yüksek enerjiye sahip ışık hızıyla boşlukta hareket eden parçacıklarla meydana gelmektedir. Bu parçacıkların davranışları boyutlarına, taşıdıkları enerjiye ve sahip oldukları negatif veya pozitif elektrik yüklerine bağlıdır (Tanır 2013).

- **Alfa parçacıkları**

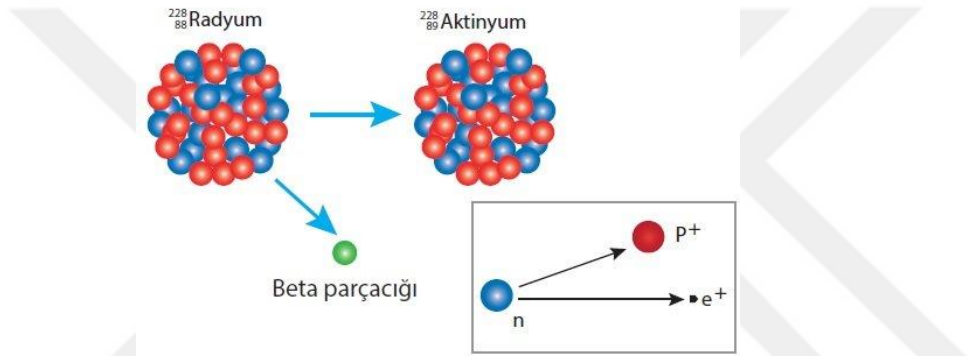
Alfa radyasyonunda, kararsız çekirdekler daha kararlı hale gelmek için ağır ve pozitif yüklü parçacıklar olan alfa parçacıklarını salar. Bu parçacıklar, iki proton ve iki nötron içerir. Alfa parçacıkları yüksek enerjili olmalarına rağmen, ağırlıkları nedeniyle enerjilerini kısa mesafelerde aktarırlar. Havada yalnızca birkaç santimetre ilerleyebilirler ve bir kâğıt parçası veya insan cildinin dış tabakası tarafından kolayca durdurulabilirler. Ancak alfa parçacıkları, yutma, soluma veya bir yara yoluyla vücuda girdiğinde tehlikeli hale gelir. İç dokulara doğrudan zarar verebilirler ve hücrelerde ciddi hasara neden olabilirler. Bu zarar, alfa parçacıklarının neden olduğu iyonlaşmaların birbirine çok yakın olmasından ve tüm enerjilerini birkaç hücreye aktarmalarından kaynaklanır. Bu, hücrelere ve DNA'ya ciddi hasar verebilir.



Şekil 2.1. Alfa bozunumu

- **Beta parçacıkları**

Beta radyasyonu, genellikle eksi yüklü elektronlardan oluşur, ancak nadiren artı yüklü pozitronlardan da oluşabilir. Elektronlar eksi bir (-1) yüke, pozitronlar ise artı bir (+1) yüke sahiptir. Kütlesi ve yükü alfa parçacıklarından daha az olduğu için, beta radyasyonu daha yüksek nüfuz etme yeteneğine sahiptir. Beta parçacıkları insan cildini geçebilir ancak önemli organlara ulaşamaz. İnce bir alüminyum plaka beta parçacıklarını durdurmak için yeterlidir. Beta parçacıkları alfa parçacıklarından daha nüfuz edici olmakla birlikte, canlı doku ve DNA'ya daha az zarar verirler çünkü iyonlaşmalar daha uzak mesafelerde oluşur. Havada daha fazla ilerlerler ancak plastik, kıyafet veya birkaç mm kalınlığında alüminyum tabakayla durdurulabilirler. Engellenmezlerse sadece birkaç metre ilerleyebilirler. Beta parçacıkları birkaç mm'ye kadar cilde nüfuz edebilir ve radyasyon yanıkları gibi hasarlara neden olabilir. Solunmaları, yutulmaları veya yaralanma yoluyla vücuda alınmaları ciddi sağlık etkilerine yol açabilir.



Şekil 2.2. Radium çekirdeği beta bozunumu

- **Protonlar**

Protonlar, atom çekirdeğinde bulunan, pozitif yüke sahip atomaltı parçacıklardır. Bir protonun kütlesi, bir nötronunkine yakındır, ancak elektronlardan çok daha ağırdır. Protonlar, atomun kimyasal özelliklerini belirleyen temel bileşenlerden biridir. Her elementin atom çekirdeğindeki proton sayısı, o elementin atom numarasını belirler ve periyodik tabloda hangi element olduğunu gösterir. Protonlar, kuark adı verilen daha küçük parçacıklardan oluşur. Üç kuarktan meydana gelen bir proton, güçlü nükleer kuvvetle bir arada tutulur.

- **Nötronlar**

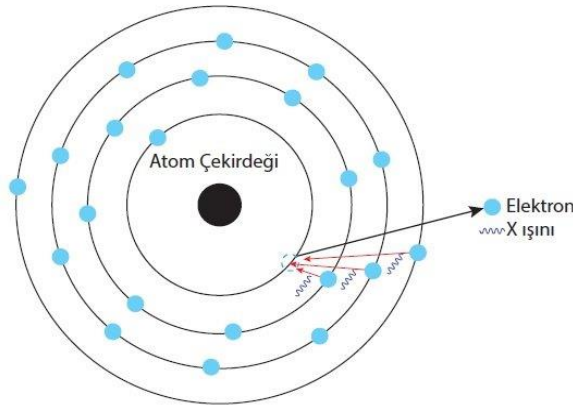
Nötronlar, çekirdeğin ana bileşenlerinden olup, yüksüz ve büyük parçacıklardır. Doğrudan iyonizasyon yapmasalar da madde ile etkileşimleri alfa, beta, Gama veya X-ışınları üreterek dolaylı iyonizasyona neden olabilir. Nötronlar yüksek nüfuz etme yeteneğine sahiptir ve sadece kalın beton, su veya parafin ile durdurulabilir. Nükleer reaktörler veya hızlandırıcılar gibi çeşitli yöntemlerle üretilirler ve dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı olarak önemli bir rol oynarlar. Nötron radyasyonu, nükleer tepkimeler sonucu çekirdekten yayılan parçacıklardır. Atom çekirdeğiyle çarpıştıklarında enerjilerini kaybederler. Bu nedenle nüfuz etme güçleri yüksektir. Nötron radyasyonunu azaltmak için su gibi nötronlarla iyi etkileşime giren malzemeler kullanılmalıdır.

2.1.1.2. Dalga tipi radyasyon

Elektromanyetik radyasyon, belirli bir enerjiye sahip ancak kütlesiz radyasyon çeşididir. Gama ışınları ve X-ışınları, elektromanyetik dalgalar olup, fotonlar şeklinde enerji paketleri olarak bulunur. Bu ışınlar maddeye nüfuz edebildikleri için nüfuz edici radyasyon olarak bilinir. X-ışınlarını ve Gama ışınlarını soğurmak için en iyi malzeme kurşundur (Tanır 2013).

- **X-ışınları**

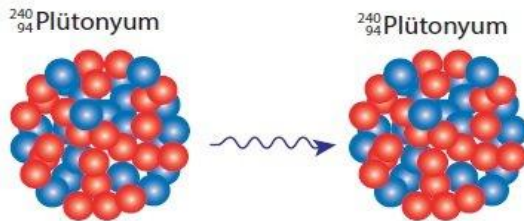
X-ışınları, bir atomun elektron enerji seviyelerinde düzensizlik oluştuğunda yayımlanan elektromanyetik radyasyondur. Bu düzensizlik, çekirdeğe yakın seviyelerden elektron kopması veya çekirdek yakınındaki seviyelerden elektron yakalanması ile meydana gelir. Elektron bulutundaki boşluklar diğer elektronlarla doldurulduğunda X-ışınları ortaya çıkar. X-ışınları enerjisini Compton saçılması ve fotoelektrik olaylar yoluyla bırakır. X-ışınları ve Gama ışınları benzer özelliklere sahiptir ancak farklı yerlerden kaynaklanır: X-ışınları çekirdek dışından, Gama ışınları ise çekirdek içinden salınır. X-ışınları elektrikle çalışan cihazlar tarafından üretilebilir ve Gama ışınları gibi sağlık üzerinde ciddi etkileri vardır.



Şekil 2.3. X-ışını yayılım mekanizması

- **Gama ışınları**

Gama ışınları, kanser tedavisi gibi çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılan elektromanyetik radyasyondur. X-ışınlarına benzerler ve bazıları vücuttan zararsız geçerken, bazıları emilip hasara neden olabilir. Gama ışınlarının zararlı etkilerini azaltmak için kalın beton veya kurşun duvarlar kullanılabilir. Bu nedenle radyoterapi odalarının duvarları çok kalındır.

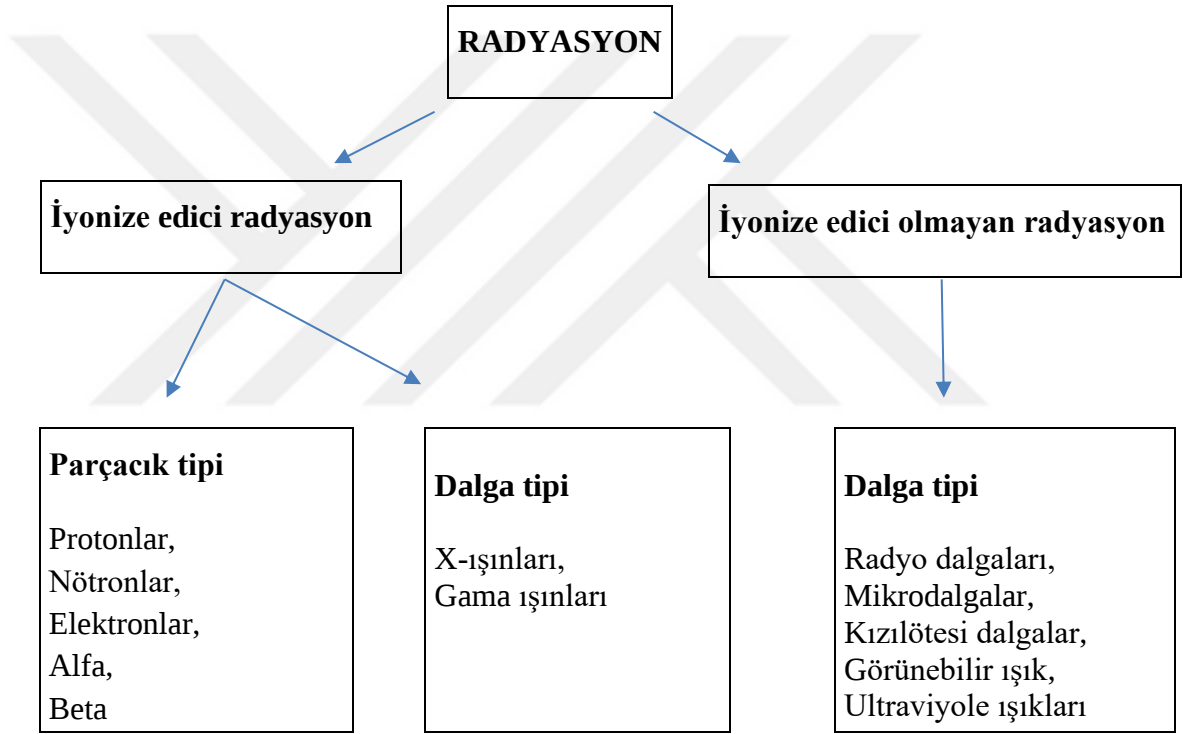


Şekil 2.4. Plütönyum çekirdeği Gama ışıması

Gama radyasyonu, radyoaktif çekirdek tarafından yayılan yüksek enerjili elektromanyetik radyasyondur. Radyoaktif çekirdek alfa veya beta bozunması yaparken enerjisi yüksek kalırsa, Gama radyasyonu yayarak enerji seviyesini düşürür. Bu süreçte çekirdeğin proton ve nötron sayısı değişmez. Gama radyasyonu, Compton saçılması, çift oluşumu ve fotoelektrik olay gibi etkileşimlerle enerjisini bırakır. Yüksek nüfuz etme gücüne sahiptir ve etkilerini azaltmak için kurşun plakalar kullanılabilir.

2.1.2. İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi

Radyasyonun maddeyle etkileşimi çeşitli şekilde gerçekleşir. Temel olarak bu enerjinin maddede iyonlaşmayı neden olması ele aldığımızda ikiye ayırabiliriz. Bu kapsamda şekil 2.1’de gösterildiği gibi iyonize edici radyasyon ve iyonize edici olmayan radyasyon olarak sınıflandırılır.



Şekil 2.5. Radyasyonun sınıflandırılması

İyonlaştırıcı radyasyon, madde ile etkileşime girdiğinde atomlardan elektron kopararak iyonlar oluşturma yeteneğine sahip yüksek enerjili bir radyasyon türüdür. Bu radyasyon, hem elektromanyetik radyasyonu (X-ışınları ve Gama ışınları gibi) hem de parçacık radyasyonunu (alfa, beta, proton ve nötron radyasyonu gibi) kapsar. Canlı hücrelerdeki atomları etkileyebilecek ve dolayısıyla DNA’ya zarar verebilecek kadar enerji taşır.

2.1.3. Radyasyon birimleri

Radyasyon birimleri, radyasyonun miktarını ve etkilerini ölçmek için kullanılır. Bu birimler, farklı radyasyon türleri ve dozları için çeşitli ölçümleri ifade eder.

Radyasyon yayıldığı zaman birçok etkileşim meydana getirir ve ortam içerisinde enerji depolanır. Bu depolanan enerji radyasyon dozu olarak tanımlanır ve bu etkileşimler canlı dokusu içinde meydana gelirse biyolojik değişiklikler ile sonuçlanır. Radyasyon dozuna maruz kalmayı belirlemek bu etkileşimleri anlamada, birimler ise etkileşimleri tanımlamada yol göstermektedir (Tanır 2013).

Radyasyon ölçülmesinde kullanılan terimler yıllar boyunca çeşitli değişikliklere uğramış, yeni birimler ortaya çıkmış ve bazıları da artık kullanılmaz olmuştur. 1973 yılında “Uluslararası Birimler Sisteminin (SI)” kurulması üzerine, Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçme Komisyonu (ICRU) yeni radyasyon birimlerini belirlemiştir. 1976 yılında yürürlüğe giren yeni radyasyon birimleri 1986 yılından bu yana kullanılmaktadır. ICRU tarafından radyasyon çalışmalarında kullanılan ışınlama dozu, aktivite, soğrulma dozu ve doz eşdeğeri birimleri Çizelge 2.1’de tanımlanmıştır (ICRU Rapor No:85 2011).

Aktivite: radyoaktif bir maddenin saniyedeki bozunum sayısıdır. Yeni birimi Becquerel ve eski birimi Curie’dir. 1 gram radyumun aktivitesi 1 Ci’dir ve 1 gram radyumun saniyede $3,7 \times 10^{10}$ bozunuma uğramasıyla $3,7 \times 10^{10}$ Bq ortaya çıkmaktadır.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunma/saniye} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

İşinlama Dozu: X veya Gama ışınlarının, normal hava koşullarında (0°C, 760 mm Hg), 1kg havada oluşturduğu iyon miktarıdır. Yeni birimi Coulomb/kg, eski birimi Röntgen’dir.

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Coulomb/kg}$$

Soğrulmuş Doz: Radyasyona maruz kalan 1 gram maddenin, 100 erg’lik enerjiyi soğurmasına 1 rad denir. SI birim sisteminde, soğurulan radyasyon dozu birimi Gray’dir. Işınlanan bir maddenin kilogram başına 1 Joule’lük enerji soğurmasına Gray denir ve Gy ile sembolize edilir.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg / g}$$

$$100 \text{ erg / g} = 10^{-2} \text{ Joule/kg}$$

$$10^{-2} \text{ Joule/kg} = 1 \text{ Gray}$$

$$1 \text{ Gray} = 100 \text{ rad}$$

Eşdeğer Doz: Radyasyon dozunun birimleri olan rad ve Gray radyasyonun canlı sistemleri üzerindeki etkisini ifade etmekte yetersizdir. Zira soğurulan dozun meydana getirdiği zararlı biyolojik etkiler hem iyonizasyon yoğunluğuna hem de radyasyonun türüne (α , β , γ vs.) göre değişiklik göstermektedir. Doz-eşdeğeri hesaplamalarında, soğurulan doz ile radyasyonun türüne bağlı "etkinlik faktörünün" çarpımından yararlanılmaktadır. Bu yorum çerçevesinde kısaca "insan için eşdeğer radyasyon" sözcüklerinin İngilizcedeki karşılığı olan “radiation equivalent for man” sözcüklerinin baş harflerinden oluşan ve “rem” olarak ifade edilen doz eşdeğeri birimi ortaya atılmıştır. Bir rem dozunun hesaplanmasında, soğurulmuş radyasyon (rad) ile radyasyonun türüne

ilişkin zarar etkinliği faktörünün çarpımıdır. Günümüzde SI Birim Sisteminde rem yerine Sievert kullanılmaktadır.

$$1\text{Sv}=100\text{ rem}$$

Çizelge 2.1 Radyasyon birimleri tablosu

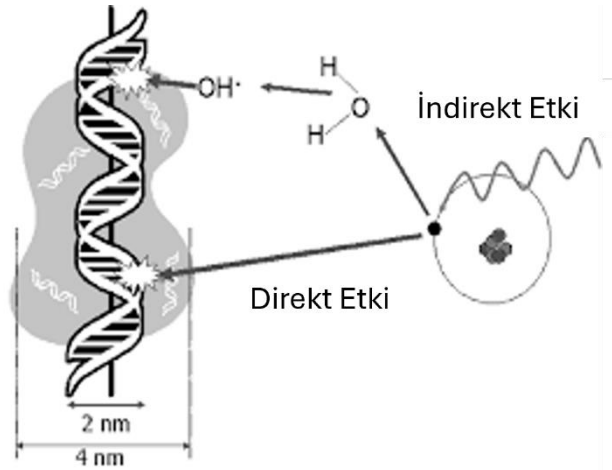
Terim	Eski Birim	Yeni Birim	Dönüşüm
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1Ci=3,7x10 ¹⁰ Bq 1Ci=37GBq
Işınlama Dozu	Roentgen (R)	Coulomb/Kilogram (C/kg)	1C/kg= 3876R 1R=2,58x10 ⁻⁴ C/kg
Soğurulma Dozu	Radiation Absorbed Dose (rad)	Gray (Gy)	1Gy=100rad 1rad=0,01Gy
Doz Eşdeğeri	Roentgen Equivelent Man (rem)	Sievert (Sv)	1Sv=100rem 1rem=0,01Sv

Çizelge 2.1’de, radyasyonun farklı yönlerini ve etkilerini ölçmek için kullanılan birimler ve semboller açıklanmıştır. Gray ve Sievert, modern birimlerde en yaygın kullanılanlardır, becquerel ise radyoaktiviteyi ölçmek için standart bir birimdir. Rad ve rem gibi eski birimler ise hala bazı alanlarda kullanılmaktadır (Tanır 2013).

2.1.4. İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri

Radyasyonun biyolojik sistemler üzerindeki etkileri, maruz kalınan radyasyon türüne ve dozuna bağlıdır. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma, madde tarafından emilen enerji miktarıyla ölçülür ve bu miktar, kilogram başına joule (J/kg) olarak Gray (Gy) biriminde ifade edilir. Ancak bu ifade radyobiyolojide yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine lineer enerji transferi (LET) kavramı daha doğru sonuç vermektedir. LET iyonize edici radyasyonun bir maddenin birim mesafesi boyunca aktardığı enerji miktarını ifade etmektedir. Bu kavram, radyasyonun biyolojik etkilerini anlamak için oldukça önemlidir (Lowe 2022).

İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi, biyolojik dokularda doğrudan ve dolaylı etkiler yaratabilir. Doğrudan etkiler, hücresel bileşenleri (örneğin, DNA’yı) doğrudan etkileyerek genetik hasara neden olabilir. Dolaylı etkiler ise radyasyonun su moleküllerini iyonize ederek serbest radikaller oluşturmaları sonucunda ortaya çıkar ve bu radikaller, hücresel yapıları ve DNA’yı dolaylı olarak hasara uğratabilir (UNSCEAR 2008, The Chernobyl Forum: 2003–2005).



Şekil 2.6. Radyasyonun biyolojik sistemlerdeki doğrudan ve dolaylı etkisi (Hall 2012)

Radyasyonun hücre üzerindeki etkisi radyasyon çeşidine, maruz kalınan süreye ve dozuna bağlıdır. Bunu da LET ile ifade ederiz. Yüksek LET, bir maddenin içinden geçerken daha fazla enerji transfer eden radyasyon türlerini ifade ederken, düşük LET, daha az enerji transfer eden radyasyon türlerini belirtir.

X-ışınları, Gama ışınları ve beta parçacıkları gibi düşük LET'e sahip radyasyonlar, madde içerisinde uzun mesafelerde yayılır ve daha az enerji transferi gerçekleştirir. Alfa parçacıkları ve ağır yüklü parçacıklar gibi yüksek LET'e sahip radyasyonlar ise daha kısa mesafede yol alır fakat yoğun miktarda enerji bırakırlar (Lowe 2022).

Biyolojik etkiler, alınan doz ve maruziyet süresine bağlı olarak akut (ani) veya kronik (uzun vadeli) olabilir. Akut etkiler, yüksek dozda radyasyona kısa süreli maruziyet sonucunda radyasyon hastalığına, doku ölümüne ve organ hasarına yol açabilir. ARS (Akut Radyasyon Sendromu), genellikle tüm vücudun ya da önemli bir kısmının etkilenmesi durumunda ortaya çıkar ve belirtileri kusma, mide bulantısı, iştahsızlık gibi klasik semptomlarla başlar. Bu semptomlar maruziyetten kısa bir süre sonra ortaya çıkabilir ve birkaç gün sürebilir. Kronik etkiler ise düşük dozlarda uzun süreli maruziyet sonucunda kanser, genetik mutasyonlar ve diğer uzun vadeli sağlık sorunlarına neden olabilir (UNSCEAR 2008, The Chernobyl Forum: 2003–2005).

2.1.5. İyonlaştırıcı radyasyonun insan üzerine etkileri ve sınıflandırması

İnsanların iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında oluşabilecek etkiler ise aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

Erken etkiler; radyasyona maruz kalınır kalınmaz oluşan etkilerdir ve deterministik (belirli) etkiler olarak adlandırılır.

Deterministik etkiyle sonuçlanan radyasyon ışınlanmasının eşik doz seviyesi, insanlar için yaklaşık 250 mSv civarındadır. Bu eşik dozun üstünde, doz miktarlarına bağlı olarak farklı biyolojik reaksiyonlar oluşmaktadır. Doz miktarı arttıkça etkilerin şiddeti de artmaktadır. Neyse ki yüksek dozda radyasyon ışınlanması olan kazalar oldukça azdır ve yüksek dozda radyasyon almış kişiler için tıbbi tedavi imkanları oldukça gelişmiştir ve gelişmeye de devam etmektedir.

Gecikmiş etkiler; etkileri yıllar sonra açığa çıkar ve stokastik (olası) etkiler olarak adlandırılır.

Stokastik etkilerin kesin olarak oluşması söz konusu değildir, fakat ışınlama miktarı arttıkça oluşum olasılığı da artmaktadır. Stokastik etkilerin en önemli çeşidi kanserdir (lösemi-kan kanseri). Teorik olarak üreme hücreleri ışınlamaya maruz kaldığında genetik bozukluklar olabilir. Ancak, Hiroşima, Nagasaki ve Çernobil’de meydana gelen olaylar sonrası hayatta kalan insanlar üzerinde yapılan çalışmalarda herhangi bir genetik bozukluk gözlenmemiştir (Kiefer 2012).

Radyasyonun etkileri, maruz kalınan doz ve süreye bağlı olarak değişir. Yüksek dozlar ölümcül olabilirken, düşük dozlar uzun vadede kanser ve kalıtsal hastalık riskini artırabilir. Gebelik döneminde radyasyondan kaçınmak hem annenin hem de fetüsün sağlığı için kritiktir. Deterministik etkiler belirli bir eşikten sonra ortaya çıkarken, stokastik etkiler dozla doğru orantılı olarak artar ve bu etkilerin kesin olarak radyasyonla ilişkili olup olmadığını belirlemek zordur (IAEA 2004).

2.1.6. Radyasyonun Organlar ve Dokular Üzerindeki Etkileri

Radyasyon hasarlarına karşı tepkiler, ışınlanan organ/dokuların radyasyon duyarlılıkları ve bu organ/dokuların vücutta gördükleri fonksiyonlara bağlıdır. Beyin dahil olmak üzere bütün sinir dokusu ve kalp dahil bütün kas dokusu genel olarak radyasyona karşı duyarlı değildirler. Bu dokulara öldürücü dozlar verilmesinden sonra ufak hemorajiler (kanamalar) dışında önemli bir etki görülmemiştir. Bir doku veya organ üzerindeki radyasyon hasarı dokunun veya organın meydana getirdiği ürünlerin (hormonlar, özel hücreler, enzimler, v.b.) artmasına veya azalmasına, dokunun veya organın büyümesinde aksaklıklara veya ölümüne sebep olabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, solunum sistemi, sinir sistemi, hematopoietik sistem, gastrointestinal sistem ve cilt üzerinde önemli biyolojik hasarlara neden olabilir (Hall 2012).

Solunum yoluyla alınan radyasyon, sistem üzerindeki ciddi etkilere neden olup alınan radyasyon miktarı, maruz kalma süresi ve radyasyon türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Olası sonuçlar arasında ARS, radyasyon pnömonisi, artan akciğer kanseri riski, solunum yolu enfeksiyonları ve uzun vadeli solunum sorunları bulunmaktadır. Kronik radyasyon maruziyetinin solunum sistemi ve bronkopulmoner hastalıklar, özellikle kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) üzerinde uzun vadeli etkileri olabilir. Semptomlar arasında kronik öksürük, nefes darlığı ve azalmış akciğer kapasitesi bulunur. Bu etkiler maruziyetten yıllar sonra bile devam edebilir ve yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir (Talapko vd. 2024).

Son yıllarda sinir sisteminin düşük radyasyon dozlarına bile yanıt verdiğine ve bu reaksiyona sıklıkla bir miktar hasarın eşlik ettiğine dair artan kanıtlar bulunmaktadır. MSS (merkezi sinir sistemi), diğer doku tiplerine göre metabolik strese karşı daha savunmasızdır ve iyonlaştırıcı radyasyon parçacıkları, doğrudan veya dolaylı DNA hasarına neden olabilecek serbest radikaller üretme fiziksel kapasitesine sahiptir. Radyasyon, vücutta oksidatif stres adı verilen bir duruma yol açar. Bu stres, beyin hücrelerini etkileyen iltihaplanma süreçlerini tetikler ve mikroglia adı verilen hücrelerin sayısını artırır. Mikroglia, beyin için zararlı etkiler yapabilen hücrelerdir. Ayrıca, radyasyon damarların iç yüzeyindeki hücrelere zarar verebilir ve bu da damarların tıkanmasına veya pıhtı oluşumuna yol açabilir. Bu tür etkiler, zamanla damar sertliği ve

küçük damar hastalıklarına neden olabilir, bu da damarların işlevini bozarak kalp krizi gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Belirtiler geçici veya kalıcı olabilir ve radyasyon hasarı akut veya gecikmiş olabilmektedir. Akut ve kronik MSS radyasyonu, DNA hasarı, oksidatif stres, hücre ölümü ve sistemik inflamasyon gibi karmaşık bir moleküler ve hücrel değişiklik ağına neden olur. Bu değişiklikler sinaptik esnekliği ve nöronal yapıyı etkileyerek davranış ve biliş etkilemektedir.

Hematopoietik sendrom, 1-8 Gy radyasyon dozu alındığında ortaya çıkan bir durumdur. Bu sendrom, kemik iliği ve lenf dokusundaki kök hücrelerin zarar görmesiyle gelişir. Düşük doz radyasyon bile kan hücrelerinin sayısında hafif bir azalmaya neden olabilir. Belirgin belirtiler arasında kan hücrelerinin, özellikle granülositlerin ve trombositlerin azalması ve bağışıklık sisteminin zayıflaması bulunur. Kemik iliğinde, kan hücrelerinin yerini yağ hücreleri almaya başlar, bu da kemiğin yapısını ve kalitesini bozar. Kemik iliği, iki tür kök hücre içerir: hematopoietik kök hücreler (HSC) ve mezenkimal kök hücreler (MSC). HSC'ler kan hücrelerini üretirken, MSC'ler diğer doku türlerini üretir. Radyasyon, bu kök hücrelerin işlevini bozarak kan hücrelerinin üretiminde sorunlara yol açar ve çeşitli kan hastalıklarına neden olabilir. Hematopoietik sendrom, bağışıklık sistemini ciddi şekilde etkiler ve anemi, bağışıklık yetersizliği gibi sorunlara yol açar. Bu sendrom, genellikle diğer radyasyon etkileriyle birlikte görülür ve tedavi edilmezse ölümlle sonuçlanabilmektedir.

Radyasyonun gastrointestinal sistem üzerindeki etkileri, büyük dozlarda (6-15 Gy) meydana gelen bağırsak disfonksiyonu ile kendini gösterir. Radyasyon sindirim sistemindeki hücreleri etkileyerek şiddetli mide bulantısı, kusma ve ishal gibi semptomlara neden olabilir. Bu semptomlar genellikle iki gün sürer, ardından gizli fazda kişiler kendilerini iyi hisseder, ancak sindirim sistemi hücreleri zarar görmeye devam eder. Sonuç olarak, kanlı ishal ve dehidratasyon geri döner. Yüksek doz radyasyon ayrıca kanama, enfeksiyon ve ölüm riskini artıran hematopoietik sendrom gelişimine yol açabilir.

Cilt radyasyon yaralanması (CRI), radyasyona maruz kalmanın ardından cilt ve deri altı dokularda oluşan lezyonları ifade eder. CRI, radyasyon dozu, türü, ışınlanmış alan ve mevcut sağlık durumuna bağlı olarak değişir. Genellikle 2 Gy üzerindeki dozlarda ortaya çıkar. Beta parçacıkları ve gama ışınları, ciltle temasa geçerek CRI'ye yol açabilir. CRI, genellikle tanısal radyografi ve kanser tedavisinden kaynaklanabilir. Yüz ve boyun gibi bölgelerde cilt hasarı görülür ve %20-25 hastada ciddi semptomlar gelişebilir. CRI'nin belirtileri, maruziyetin dozuna ve süresine göre değişir ve dört aşamada gelişir. Prodromal aşama (maruziyetten birkaç saat sonra), latent aşama (1-2 gün sonra), belirgin aşama (günler ila haftalar sonra) ve geç etkiler (haftalar ila yıllar sonra). Şiddetli vakalar cilt ülserleri ve nekroz ile sonuçlanabilir (Talapko vd. 2024).

2.2. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES)

IAEA, yaşanan radyasyon kazalarını inceleyerek bilgi sağlamakta ve radyasyon güvenliğiyle ilgilenen organizasyonlara kaynak oluşturmaktadır. Ayrıca, nükleer enerji ve radyasyon uygulamalarında güvenlik standartlarının belirlenmesi, teknik rehberlik sağlanması ve uluslararası iş birliğinin teşvik edilmesi yoluyla önemli bir rol oynamaktadır.

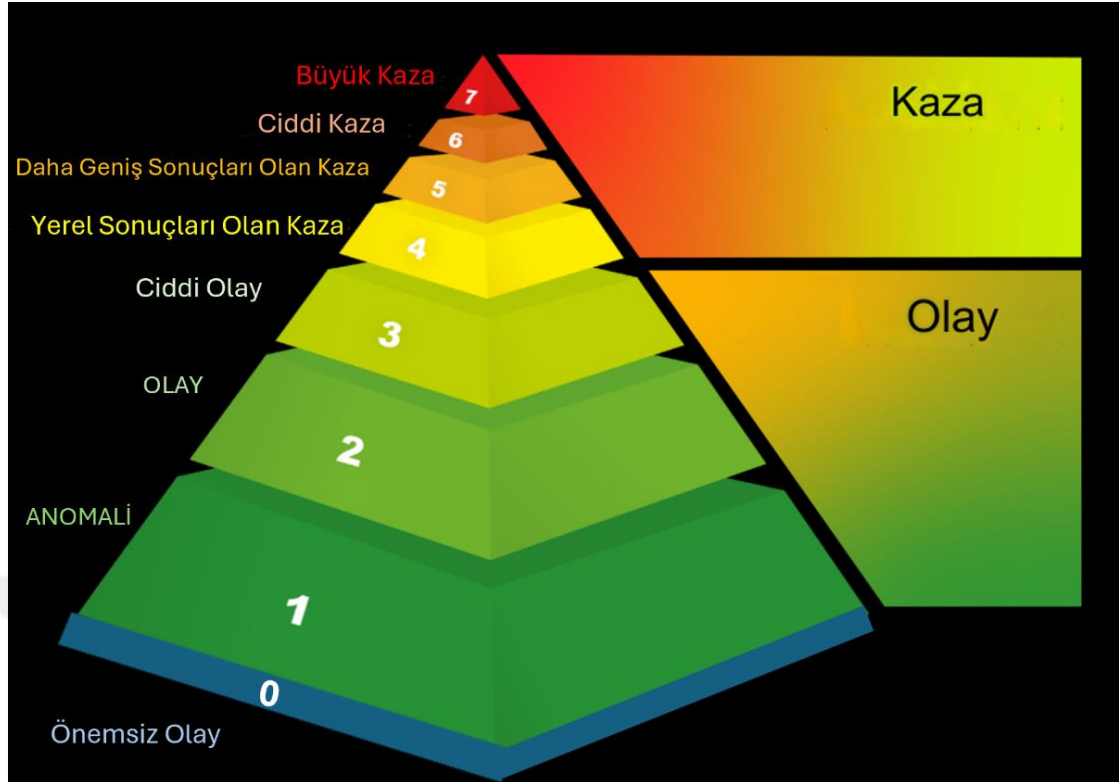
Nükleer enerji santralleri, tıbbi radyasyon kaynakları ve araştırma laboratuvarları gibi yerlerde meydana gelen kazalar, bir yandan teknolojinin yanlış kullanılmasının sonuçlarını gözler önüne sererken, diğer yandan bu kazaların neden olduğu biyolojik ve çevresel etkiler konusunda derinlemesine bilgi sahibi olunmasını sağlamaktadır.

Nükleer tesislerin işletilmesi veya radyasyon risklerine yol açan faaliyetlerin yürütülmesiyle ilgili herhangi bir olayın öneminin kolayca iletilmesi ihtiyacı, 1980'lerde uluslararası medyanın dikkatini çeken bazı nükleer tesis kazalarının ardından ortaya çıkmıştır. Buna yanıt olarak ve bazı ülkelerdeki önceki ulusal deneyimlere dayanarak, belirli bir olayla ilgili radyasyon riskleri konusunda ülkeler arasında tutarlı bir iletişim sağlanabilmesi için, diğer alanlarda (örneğin depremlerin şiddetini karşılaştıran ölçekler gibi) zaten kullanılan ölçeklere benzer uluslararası bir olay derecelendirme ölçeğinin geliştirilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

Bu kapsamda INES, nükleer tesislerdeki olayların güvenlik önemini iletmek amacıyla IAEA ve OECD/NEA tarafından bir araya getirilen uluslararası uzmanlar tarafından 1990 yılında geliştirilmiştir. O zamandan beri, INES radyasyon risklerine yol açan herhangi bir olayın önemine ilişkin iletişim ihtiyacını karşılamak üzere genişletilmiştir. Kamu beklentilerini daha iyi karşılamak amacıyla, INES 1992 yılında genişletilmiş ve radyoaktif malzeme ve/veya radyasyonla ilişkili herhangi bir olaya, radyoaktif malzemenin taşınması da dahil olmak üzere, uygulanabilir hale getirilmiştir. 2001 yılında, INES'in kullanımını netleştirmek ve taşıma ve yakıt döngüsü ile ilgili olayların derecelendirilmesi için iyileştirmeler sağlamak üzere güncellenmiş bir INES Kullanıcı Kılavuzu yayımlanmıştır. Ancak, daha fazla rehberliğe ihtiyaç duyulduğu ve özellikle taşıma ile ilgili olaylarla ilgili olarak çalışmaların zaten devam ettiği kabul edilmiştir. Fransa ve İspanya'da radyasyon kaynağı ve taşıma ile ilgili olayların potansiyel ve gerçek sonuçları üzerinde daha fazla çalışma yapılmıştır. INES üyelerinin talebi üzerine, IAEA ve OECD/NEA Sekreteryası, radyasyon kaynakları ve radyoaktif malzemenin taşınmasıyla ilgili herhangi bir olayın derecelendirilmesi için ek rehberlik sağlayan bütünleşmiş bir kılavuzun hazırlanmasını koordine etmiştir (IAEA 2013).

INES, nükleer ve radyolojik olayların ciddiyetini standart bir şekilde değerlendirmek ve kamuoyuna açık bir şekilde bildirmek için geliştirilmiştir. Ölçek, olayların sağlık, çevre ve nükleer tesis güvenliği üzerindeki etkilerini sınıflandırır. (IAEA 2008, 2022).

INES'in amacı, nükleer olayların kamu güvenliği ve çevresel etkileri açısından potansiyel ciddiyetini değerlendirmek ve bu olaylara uygun bir yanıt ve iletişim stratejisi belirlemektir. Nükleer güvenlik ve radyasyon koruması alanlarında uluslararası düzeyde bir standart sağlar.



Şekil 2.7. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES; International Nuclear and Radiological Event Scale, IAEA 2013)

İlk olarak nükleer santrallerdeki olayları sınıflandırmak için tasarlanmış olan bu ölçek, daha sonra sivil nükleer endüstriyle ilişkili tüm tesislere, radyoaktif materyal ve radyasyon kaynaklarının kullanımı, depolanması ve taşınmasıyla ilgili olaylara da uygulanacak şekilde genişletilmiş ve uyarlanmıştır.

INES yaşanan olay ve kazaları önemlerine göre Piramit gösterimiyle 0.'dan 7.'ye kadar seviyelendirmiştir. Tabandaki piramit gösteriminde olayı 0 olarak adlandırırken, güvenlik açısından önemsiz olayları olup 7 ise büyük kazaları temsil eder (Şekil 2.7).

INES bir iletişim aracıdır. Birincil amacı, radyasyonla çalışan kurum ve kuruluşlar, medya ve kamu arasında olayların güvenlik önemine ilişkin iletişimi ve anlayışı kolaylaştırmaktır. IAEA uzmanlarının görüşleri doğrultusunda INES'in bilgi havuzu, dünya tarihindeki bu trajik olaylardan çıkarılan derslerle radyasyon güvenliği konusunda bilinç oluşturur ve gelecekte benzer felaketlerin önlenmesine katkı sağlar (IAEA2013).

INES, olayların şiddetini logaritmik bir şekilde seviyelendirmektedir. Her olay, insanlar ve çevre, radyolojik bariyerler ve derin savunma gibi alanlara olan etkilerine göre değerlendirilir ve en yüksek etki seviyesi belirlenir.

- **İnsanlar ve Çevre (People and the Environment)**

Kaza durumlarında insanların maruz kaldığı dozlara dayalı bir derecelendirme yapmak her zaman yeterli olmayabilir. Örneğin, bir kaza sonrası acil tahliye tedbirleri düşük dozlara yol açabilir, ancak bu durum olayın ciddiyetini tam yansıtmaz ve olası yaygın kontaminasyonu göz ardı edebilir. Bu nedenle, INES'in kaza seviyelerinde (4-7), derecelendirme alınan doza değil, salınan radyoaktif madde miktarına dayalı olarak yapılır. Böylece, farklı radyoaktif maddeler için "radyolojik eşdeğerlik" kullanılarak, etkili doz seviyesini belirlemek mümkündür. Düşük etkili olaylarda ise derecelendirme, alınan dozlar ve maruz kalan kişi sayısına göre yapılır. INES'in kaza seviyeleri (4-7) için, alınan doza değil, yayılan radyoaktif madde miktarına dayalı kriterler geliştirilmiştir. Bu kriterler, önemli miktarda radyoaktif madde yayılma potansiyeli olan uygulamalar için geçerlidir.

- **Radyolojik bariyer ve kontroller (Radiological barriers and controls)**

Tesis içinde önemli radyolojik bariyerlerin arızalandığı bir olay olabilir, ancak bu arızaların insanlar ve çevre üzerinde ciddi bir etkisi olmaz. Örneğin, bir reaktör çekirdeğinin erimesi, radyoaktif maddenin koruma içinde kalmasıyla sonuçlanabilir. Bu durumda, dışarıdaki bireyler için doğrudan bir tehlike olmaz, ancak böyle bir olay, gelecekte bu tür etkilerin artma olasılığını artırır. Tesiste yaygın kontaminasyon veya artan radyasyon gibi olaylar meydana gelebilir, ancak bu durumlarda hâlâ insanların ve çevrenin ciddi şekilde etkilenmesini önleyecek derin savunma önlemleri mevcuttur. Yine dışarıdaki bireyler için doğrudan bir tehlike olmaz, ancak bu tür olaylar, radyolojik kontrollerin yönetiminde büyük bir başarısızlık olarak değerlendirilir. Her iki durumda da saha sınırları dışında ciddi sorunlar yaşanmaz, ancak bu tür olayların INES üzerindeki derecelendirilmesinde bu durumlar dikkate alınmalıdır. Bu kriterler, yalnızca büyük miktarda radyoaktif madde işleyen yetkili tesisler için geçerlidir. Radyasyon kaynakları ve radyoaktif madde taşımacılığı ile ilgili olaylar için, yalnızca insanlar, çevre ve derin savunma kriterleri dikkate alınmalıdır.

- **Derin Savunma (Defence in Depth)**

INES, tüm radyolojik ve nükleer güvenlik olaylarını kapsar ve bu olayların çoğu ekipman veya prosedür hatalarından kaynaklanır. Ancak, bazı olaylar diğerlerinden daha önemli güvenlik riskleri taşır. Sadece gerçek sonuçlara dayanarak derecelendirme yapılırsa, birçok olay “Ölçek Dışı/Seviye 0” olarak derecelendirilir ve ölçek olayları değerlendirmede yetersiz kalır. Bu nedenle, INES, yalnızca gerçek sonuçları değil, olayların potansiyel sonuçlarını da dikkate alır. “Derin savunma bozulması” adı verilen bir kavramla, radyoaktif maddelerin taşınması, depolanması ve kullanılması sırasında kullanılan güvenlik önlemlerinin bozulması durumunda, sonuçların ciddiyetine göre derecelendirme yapılır. Gerçek sonuçlar olmaksızın kaza olasılığını artıran olaylar için maksimum derecelendirme Seviye 3 (ciddi olay) olarak belirlenir. Daha düşük tehlike potansiyeline sahip olaylar için bu derecelendirme daha düşüktür. Ayrıca, ek faktörler (örneğin, güvenlik kültürü sorunları) dikkate alınarak derecelendirme bir seviye artırılabilir. Bu kriterler, üç farklı olay türü için (taşımacılık ve radyasyon kaynağı olayları, işletimdeki güç reaktörleri olayları ve diğer yetkili tesislerdeki olaylar) ayrı ayrı tanımlanmıştır.

2.2.1. INES Seviyelendirmesi

INES, olayları ve kazaları ciddiyetlerine göre aşağıdaki gibi seviyelendirmektedir. Bu seviyelendirme, olayın potansiyel etkilerine, radyoaktif salınımların miktarına, insan sağlığına yönelik tehlikelere ve güvenlik önlemlerinin başarısızlık derecesine dayalıdır (IAEA 2013).

- **Seviye 0:** Güvenlik açısından önemsiz olaylar.

Nükleer Güç Santralinde yaşanan küçük operasyonel olaylar bu kapsamda örnek verilmektedir Güvenliği etkilemeyen, normal çalışmadan sapmalar (**Seviye 0**) kapsar. Bu tür olaylar, ekipman arızaları veya güvenliği tehlikeye atmayan prosedür hatalarını içerir. Örneğin, reaktörde hızla düzeltilen küçük bir teknik arıza, radyoaktivite yayılımına veya halk için bir riske yol açmadan giderilebilir.

- **Seviye 1:** Anormal olaylar, güvenlik açısından önemsiz olayların yaşanması.

Nükleer Güç Santralinde yaşanan küçük operasyonel olaylar (Seviye 1): Güvenliği etkilemeyen, normal çalışmadan sapmalar bu tür olaylar, ekipman arızaları veya güvenliği tehlikeye atmayan prosedür hatalarını içerir. Örneğin, reaktörde hızla düzeltilen küçük bir teknik arıza, radyoaktivite yayılımına veya halk için bir riske yol açmadan giderilebilir.

- **Seviye 2:** Olay, önceden belirlenmiş güvenlik sınırlarının dışında, ancak halk sağlığı veya çevre için düşük bir tehdit oluşturur.

Nükleer Güç Santralinde ciddi olmayan olaylar (Seviye 2): Radyoaktif materyalin önemsiz bir şekilde yayıldığı, ancak güvenlik sınırları içinde kalan olaylar ya da işçilerin normal seviyelerin üzerinde ancak yasal sınırlar içinde kalan radyasyona maruz kaldığı durumlar. Örneğin, teknik bir sorun nedeniyle reaktörün kapatılması ve bu sorunun halkı etkilemeden güvenli bir şekilde yönetilmesi.

Radyolojik Olaylarda kontaminasyon olayları (Seviye 2): Bireylerin veya çevrenin radyoaktif materyal ile kontamine olduğu olaylardır. Bu tür olaylar, tıbbi veya endüstriyel radyoaktif kaynakların yanlış kullanımından kaynaklanabilir. Örneğin, bir hastanede radyoaktif kaynağın yanlış kullanılması sonucu personelin veya çevrenin kontamine olması gibidir.

- **Seviye 3:** Ciddi olaylar, radyoaktif madde sızıntısı ve sınırlı sayıda kişinin önemli derecede radyasyona maruz kalması gibi durumlardır.

Nükleer Güç Santralinde ciddi olaylar (Seviye 3): İşçilerin önemli derecede radyasyona maruz kaldığı veya ciddi güvenlik sınırlarının aşılmasına yaklaşan olaylardır. Örneğin, az miktarda radyoaktif materyalin yayıldığı ancak olayın sahada sınırlı kaldığı ve önemli bir dış etkiye yol açmadığı durumlar bu seviyeye dahil olur.

Radyolojik Olaylarda kontaminasyon olayları (Seviye 3): Bireylerin veya çevrenin radyoaktif materyal ile kontamine olduğu olaylardır. Bu tür olaylar, tıbbi veya endüstriyel radyoaktif kaynakların yanlış kullanımından kaynaklanabilir.

Örneğin, bir hastanede radyoaktif kaynağın yanlış kullanılması sonucu personelin veya çevrenin kontamine olması gibi durumlardır.

Radyolojik Olaylarda maruziyet olayları da (Seviye 3): İnsanların kaybolmuş, çalınmış veya yanlış şekilde ele alınmış bir radyoaktif kaynağa maruz kaldığı olaylardır. Örneğin, radyoaktif bir kaynağın sınırlı maruziyete yol açması gibi durumlardır.

- **Seviye 4:** Yerel sonuçlara sahip kazalar, halk sağlığını tehdit eden radyoaktif salınımlar.

Nükleer Güç Santrali Kazalarda yerel sonuçlara sahip kazalar (Seviye 4): Radyoaktif materyalin yayıldığı, ancak etkilerinin santral içinde veya küçük bir yerel alanda sınırlı kaldığı kazaları kapsamaktadır. Örneğin, soğutucu sızıntısının sahada sınırlı kalması, işçilerin sınırlı düzeyde maruz kalması ve dış etki olmaması izlenir.

Radyolojik Olaylarda maruziyet kazaları (Seviye 4): İnsanların kaybolmuş, çalınmış veya yanlış şekilde ele alınmış bir radyoaktif kaynağa maruz kaldığı kazaları kapsamaktadır. Örneğin, radyoaktif bir kaynağın geniş çapta maruziyete yol açması gibi durumlardır.

Radyolojik Olaylarda ciddi dış risk (Seviye 4): Bu olaylar, geniş çapta halk sağlığına etki eden ve çevreye önemli miktarda radyoaktif materyalin yayıldığı, koruyucu önlemler alınmasını gerektiren durumlardır. Örneğin, radyoaktif bir kaynağın hurda metalle karışması ve bir geri dönüşüm tesisinde kontaminasyona yol açması gibi sayılmaktadır.

- **Seviye 5:** Daha geniş sonuçlara sahip kazalar, önemli radyasyon maruziyeti ve potansiyel uzun vadeli sağlık riskleri.

Nükleer Güç Santrali Kazalarda daha geniş kapsamlı sonuçlara sahip kazalar (Seviye 5): Radyoaktif materyalin önemli miktarda yayıldığı, ancak bu yayılımın nispeten sınırlı kaldığı ve dış etkilerin orta düzeyde olduğu kazaları kapsamaktadır. Kısmi reaktör erimesi meydana gelmesi ve radyoaktif gazların yayılmasının sınırlı kalmasıdır.

Radyolojik Olaylarda ciddi dış risk (Seviye 5): Bu olaylar, geniş çapta halk sağlığına etki eden ve çevreye önemli miktarda radyoaktif materyalin yayıldığı, koruyucu önlemler alınmasını gerektiren durumlardır. Örneğin, radyoaktif bir kaynağın geniş çapta kontaminasyona yol açmasıdır.

- **Seviye 6:** Ciddi kazalar, geniş bir alanda önemli çevresel kirlilik.

Nükleer Güç Santrali Kazalarında önemli dış riski olan kazalar (Seviye 6): Radyoaktif materyalin daha geniş bir alana yayıldığı ve halk için geniş çapta koruyucu önlemlerin (tahliye gibi) gerekliliğine yol açan kazalardır. Örneğin, bir reaktörün muhafaza yapısının ihlal edilmesi ve geniş çapta kontaminasyona yol açması sayılmaktadır.

- **Seviye 7:** Büyük kazalar, geniş çaplı çevresel ve sağlık etkileri olan felaketler.

Nükleer Güç Santrali Kazalarında önemli dış riski olan kazalar (Seviye 7): Çok büyük miktarlarda radyoaktif materyalin yayıldığı, geniş çapta sağlık ve çevresel sonuçlara yol açan, uzun vadeli iyileştirme ve toparlanma çabalarını

gerektiren en ciddi kazaları kapsar. Çernobil felaketi (1986) ve Fukushima Daiichi felaketi (2011), bu tür kazaların en bilinen iki örneğidir; her iki olay da geniş çaplı tahliyelere, uzun vadeli çevre kirliliğine ve nükleer endüstri üzerinde küresel etkilere yol açmıştır.

2.2.2. INES Seviyelendirmesini Etkileyen Diğer Durumlar

- **Taşımacılık Olayları:** Radyoaktif materyallerin taşınması sırasında meydana gelen kazalar, kontaminasyon, maruziyet veya materyallerin hasar görmesi durumunda daha büyük bir kazaya yol açabilir. Örneğin, radyoaktif materyal taşıyan bir konteynerin hasar görmesi sonucu radyoaktivitenin yayılması olasıdır.



Şekil 2.8. INES seviyeleri (<https://webim.ndk.gov.tr/file/744add75-b0c2-49ea-a05d-60d57c561c1f>).

- **Güvenlikle İlgili Olaylar:** Radyoaktif materyallerin kötü niyetli eylemlerle ilişkili olduğu olaylar; örneğin, hırsızlık, sabotaj veya terörizm. Bu tür olaylar, radyoaktif kaynakların "kirli bomba" olarak kullanılmak üzere çalınmasından, nükleer tesislere yönelik sabotaj girişimlerine kadar değişiklik gösterebilir.
- **Nükleer Tesisleri Etkileyen Doğal Afetler:** Depremler, tsunamiler veya seller gibi doğal afetlerin nükleer tesisleri etkilemesi durumunda meydana gelen olaylar, potansiyel kazalara yol açabilir. Örneğin, Fukushima Daiichi felaketi, büyük bir deprem ve tsunaminin tetiklediği ciddi bir olay olarak, doğal afetlerin nükleer güvenlik üzerindeki risklerini açıkça ortaya koymaktadır.

- **Düzenleyici ve Operasyonel Hatalar:**
 - **Düzenleyici Uyumsuzluk:** Bir tesisin veya operatörün güvenlik düzenlemelerine uymadığı durumlar, bir olayın meydana gelme riskini artırabilir. Güvenlik protokollerinin ihmal edilmesi veya hatalı ekipman kullanımı, INES ölçeğinde değerlendirilecek olaylara yol açabilir.
 - **Operasyonel Hatalar:** Nükleer reaktörün yanlış yönetimi, radyolojik materyallerin yanlış kullanımı veya uygun prosedürlerin izlenmemesi gibi insan hataları, güvenlik ihlallerine neden olabilir.
- **Kamu Algısı ve İletişim:**
 - **Kamu ve Medya Tepkisi:** Bir olayın INES ölçeğindeki ciddiyeti, kamu ve medya ilgisiyle doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek seviyelerdeki olaylar, genellikle kamuoyunda büyük endişe yaratır, medya tarafından geniş kapsamlı bir şekilde ele alınır ve yetkililer üzerinde hızlı ve etkili yanıt verme baskısı oluşturur.
 - **Uluslararası Etki:** Daha yüksek seviyelerde derecelendirilen olaylar, genellikle uluslararası yankı uyandırır ve küresel nükleer politika, düzenleyici değişiklikler ve nükleer enerji konusundaki kamuoyu üzerinde etkili olur.

2.2.3. Radyasyon Vakalarında İzlenen Aksaklıkların Sınıflandırılması

Radyasyon kazalarının önlenmesi ve yönetiminde karşılaşılan aksaklıklar, genel olarak insan hataları, teknik ve mühendislik arızaları, yanlış atık yönetimi ve depolama, güvenlik ve prosedür eksiklikleri ve doğal afetler gibi faktörlere bağlı sınıflandırılır.

İnsan hataları; eğitim eksikliği, dikkatsizlik ve yorgunluk gibi insana bağlı faktörlerden doğabilir. Çalışanların yeterli eğitim almamış olmaları veya güvenlik prosedürlerine uymamaları, radyasyon kazalarının başlıca sebeplerindendir.

Teknik ve mühendislik arızaları; radyasyon kaynaklarının bulunduğu cihazların düzenli bakımlarının yapılmaması veya teknik arızalar sonucunda ortaya çıkar. Bu tür arızaların yaşanmaması için cihazların periyodik bakımları aksatılmamalıdır. Yanlış atık yönetimi ve depolama, radyoaktif maddelerin yanlış şekilde yönetilmesi ve depolanmasıyla ilişkilidir. Bu durum hem insan sağlığı hem de çevre açısından ciddi riskler taşır.

Güvenlik ve prosedür eksiklikleri; yetersiz güvenlik protokolleri ve çalışanların bu prosedürlere uygun davranmaması sonucunda kazalara yol açabilir. Güvenlik standartlarının sıkı bir şekilde uygulanması ve personelin bu standartlara göre eğitilmesi büyük önem taşır.

Doğal afetler; özellikle nükleer tesislerin bulunduğu bölgelerde ciddi radyasyon kazalarına yol açabilecek potansiyele sahiptir. Doğal afetlerin oluşturduğu risklere karşı hazırlıklı olunması ve acil durum planlarının geliştirilmesi gereklidir.

Radyasyon kazaları nükleer güvenlik konusunda daha sıkı önlemler alınması gerektiğini gösterirken, bu kazalardan çıkarılan dersler gelecekte benzer olayların önlenmesi için kritik öneme sahiptir. Güvenlik kültürünün güçlendirilmesi, uluslararası

iş birliği ve sürekli iyileştirme çalışmaları, nükleer tesislerin güvenliğini artırmaya yönelik önemli adımlar olarak öne çıkar (IAEA 2013).

2.2.4. INES'in Değerlendirme Kriterleri

INES'in değerlendirme süreci, bir olayın veya kazanın çeşitli kriterler temelinde analiz edilmesini içerir. Bu kriterler, olayın doğasını, etkilerini ve yönetimini kapsar (IAEA 2013):

- **Radyoaktif Madde Yayılımı:** Olay sırasında yayılan radyoaktif maddelerin miktarı ve yayılma şekli, olayın ciddiyetini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu yayılımın çevre ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilir.
- **Radyasyon Maruziyeti:** İnsanların radyasyona maruz kalma derecesi, olayın ciddiyetini belirlemede kritik bir rol oynar. Çalışanlar, halk ve çevredeki insanlar için maruziyet seviyeleri dikkate alınır.
- **Güvenlik Önlemleri ve Başarısızlıklar:** Güvenlik önlemlerinin yeterliliği ve bu önlemlerin başarısızlık derecesi de değerlendirmenin önemli bir parçasıdır. Olay sırasında uygulanan güvenlik prosedürleri, olayın sınıflandırılmasında belirleyici olabilir.
- **Çevresel ve Sağlık Etkileri:** Olayın kısa ve uzun vadeli çevresel ve sağlık etkileri, olayın genel ciddiyetini değerlendirmek için dikkate alınır. Bu etkiler, yerel, bölgesel veya uluslararası düzeyde olabilir.

2.2.5. Olay ve Kaza Verilerine Erişimi

Günümüzde INES, nükleer ve radyolojik olayların değerlendirilmesinde ve raporlanmasında standart bir araç olarak kullanılmakta, nükleer tesislerde, radyolojik cihazlarda ve radyoaktif maddelerin taşınmasında meydana gelen olayları değerlendirmektedir. INES, olayların şeffaf bir şekilde raporlanmasına, kamuoyunun doğru bilgilendirilmesine ve uluslararası iş birliğinin artırılmasına önemli katkılarda bulunmuştur.

IAEA tarafından yayınlanan radyasyon olayları ve kazalarıyla ilgili kitaplar ve raporlar, INES seviyelendirmelerine dair açıklamaları içermektedir ve bu bilgiler IAEA'nın web sitesinde mevcuttur. Ölçek, IAEA ve OECD/NEA iş birliğiyle 60'tan fazla ülkenin desteğiyle geliştirilmeye devam edilmektedir. Ancak, IAEA'nın web sitesindeki NEWS- The Information Channel on Nuclear and Radiological Events (Nükleer ve Radyolojik Olaylara İlişkin Bilgi Kanalı) bölümünde yalnızca son bir yıla ait olaylar kamuya açık olarak sunulmaktadır. Geriye dönük olarak ise yalnızca büyük kazaların raporları kitap halinde yayımlanmıştır (IAEA 2013).

Ayrıca, IAEA nükleer ve diğer radyoaktif malzemelerle ilgili yasa dışı kaçakçılık ve diğer yetkisiz faaliyetleri içeren Olay ve Kaçakçılık Veri tabanını (ITDB) yönetmektedir. Bu veri tabanı, INES kapsamında sınıflandırılacak olayları da içermektedir. Dünya Nükleer Birliği (WNA) ise önemli nükleer kazalar ve olaylar hakkında genel bilgi sunar ve bunların INES seviyesini belirtir. Bunun yanı sıra, birçok ülkenin kendi düzenleyici kurumları (örneğin ABD Nuclear Regulatory Commission

(NRC)) radyasyon olaylarının kayıtlarını tutar ve bu kayıtlar genellikle INES seviyelerine göre sınıflandırılır. Akademik veri tabanları (PubMed, IEEE Xplore, Google Scholar gibi) INES tarafından sınıflandırılan olaylar hakkında araştırma makaleleri ve raporlar sunabilir.

IAEA, iş birliği yaptığı ülkelerle birlikte olayların hızlı bir şekilde bildirilmesini sağlayan bir iletişim ağı kurmuştur. Ülkeden ülkeye farklılık göstermekle birlikte, örneğin Hollanda menşeli LAKA adında bir kuruluşun veri tabanı, IAEA'nın tüm kaza raporlarına erişim imkânı sunmaktadır. Bu nedenle, daha kapsamlı ve topluma açık bir arşiv sağlamaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında toplanan tarihsel materyalleri, radyasyon kazaları ve etkileri üzerine yazılmış ulusal ve uluslararası akademik kitaplar, kuruluşlar tarafından yayınlanan raporlar ve teknik dokümanlardan yararlanılmıştır. Ayrıca, Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından yayınlanan raporlar da incelenmiştir. Kitap ve rapor formatında dokümantasyonu bulunmayan olay ve kazalar için IAEA ve LAKA web sayfalarındaki bilgilerden yararlanılmıştır.

1942’den itibaren izlenen radyasyon vakaları, askeri amaçlarla yürütülen deneyler ve silah testlerinde yaşanan olaylardır. Bu vakalar IAEA tarafından geriye dönük olarak seviyelendirmesi yapılmamıştır. Askeri doz limit kategorileri ile sivil toplum değerlendirme düzeyleri farklılık göstermektedir (Mettler vd. 1999).

Literatür tabanlı belgeler için de örnek olarak 1957 yılında gerçekleştiği düşünülen ve IAEA’de kaydı bulunmayan Kyshtym kazasından bahsederken, Akleyev ve arkadaşlarının yazdığı makaleye başvurulmuştur (Akleyev vd. 2017).

Bu tez derlemesinde ele alınan olaylar ve kazalarla ilgili belgeler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Yaşanan radyasyon olay ve kazaların alındığı referans bilgileri

TARİH	OLAY ve KAZA ADI	REFERANS BİLGİLERİ
1957	Kyshtym Felaketi	Akleyev vd. 2017; Rabl (2012)
1979	Three Mile Island Kazası	https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html
1986	Çernobil Felaketi	IAEA: The Chernobyl Forum: 2003–2005
1985-1987	Goiania Kazası	“The Radiological Accident in Goiania.” IAEA (1988)
1989	San Salvador Işınlama Tesisi Kazası	“The Radiological Accident in San Salvador.” IAEA (1990)
1990	İsrail Işınlama Tesisi Kazası	“The Radiological Accident in Soreq.” IAEA (1993)
1991	Belarus Işınlama Tesisi Kazası	“The radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh.” IAEA (1996)
1993	Sibirya Kimyasal İşletme Tesisi Kazası	“The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk.” IAEA, (1998)
1994	Tammiku Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Tammiku” IAEA, (1998)
1996	Gilan Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Gilan.” IAEA, (2002)
1997	Sarov Radyasyon Kazası	“The Criticality Accident in Sarov.” IAEA, (2001)
1997	Lilo Eğitim Birliği Kazası	“The Radiological Accident in Lilo” IAEA (2000)
1998-1999	İkitelli Radyasyon Kazası	“The Radiological Accident in Istanbul.” IAEA (2000)

1999	Yanango Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Yanango” IAEA (2000)
1999	Tokaimura Nükleer Yakıt İşleme Tesisi Kazası	“Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura,” IAEA (1999); https://radioactivity.eu.com/articles/nuclearenergy/tokaimura_accident .
2000	Samut Prakarn Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Samut Prakarn.” IAEA (2002)
2001	Białystok Onkoloji Merkezi Radyasyon Kazası	“Accidental overexposure of radiotherapy patients in Białystok” IAEA (2004)
2001	Lia Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Lia, Georgia.” IAEA (2014)
2002	Cochabamba Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Cochabamba” IAEA (2004)
2005	Nueva Aldea Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Nueva Aldea” IAEA (2009)
2011	Fukushima Daiichi Nükleer Santral Kazası	“The Fukushima Daiichi Accident” IAEA (2015)
2012	Chilca Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Chilca” IAEA (2018)
2014	Ventanilla Radyasyon Kazası	“The radiological accident in Ventanilla” IAEA (2019)

3.2. Metot

Tez çalışmamızda radyasyon kazalarının tarihsel analizi ve etkileri kapsamında en önemli radyasyon kazaları ve bu kazaların çevre, insan sağlığı ve canlılar üzerindeki etkileri INES’in seviyelendirme yöntemleri ile ele alınarak incelendi. Nükleer, radyolojik ve diğer olay ve kazalar ayrı kategorilere ayrıştırılarak sınıflandırması pasta grafikler şeklinde yapıldı.

Önem arz eden bazı kazaların nedenleri, tarihleri, meydana geldikleri yerler, maruz kalan kişilerin aldıkları doz ve maruz kalma durumlarının değerlendirmesi yapıp sağlık sonuçları irdelendi. Çevresel etkiler konusunda veriler değerlendirildi. Ayrıca kaza sürecinde ve sonrasında yaşanan sosyoekonomik etkilerini ele alarak inceledik. Olayların sonrasında alınan önlemler araştırıldı ve tartışıldı. Radyasyon kazalarının ardından oluşturulan uluslararası yönergeler ve nükleer enerji güvenliği ile ilgili gelişmeler de ele alındı.

Bu tez çalışmasında, bölgesel ve coğrafi açıdan olay ve kazaların dağılımı ele alınıp şematize edildi. Ayrıca INES açısından da tarihsel dönemlerine göre seviyelerin yoğunlukları araştırıldı ve dağılımı grafiklerle sunuldu. Yüksek INES seviyeli (4-7) kazaların ve INES seviyesi (0-3) olayların yıllara göre dağılımı ve sıklığı karşılaştırıldı.

Radyasyon kazalarının incelenmesi ilk olarak, literatür taraması yapıldı ve akademik kaynaklar, bilimsel makaleler ve güvenilir kaynaklardan radyasyon kazalarıyla ilgili veriler toplandı. Ardından, bu veriler analiz edilerek radyasyon kazalarının nedenleri, etkileri ve sonuçları seviyelendirip gruplandırarak hakkında detaylı bir incelemeye gidildi. Toplanan verilerin güvenilirliği ve doğruluğu için kaynak değerlendirmesi yapıldı ve güvenilir akademik kaynaklar ile uluslararası resmi raporlar kullanıldı. Veriler, "Google E-Tablolar" ve "Google Looker Studio" yazılımları

kullanılarak, 1957-2024 yılları arasında raporlanan radyasyon olay ve kazalarının yıllara, coğrafi bölgelere, INES seviyelerine ve farklı çalışma ortamlarına göre dağılımları gibi kriterlere göre sınıflandırılıp istatistiksel olarak değerlendirildi. Analiz verilerini kullanarak anlaşılabilir görseller elde edildi. Araştırma sonuçları, radyasyon kazalarının etkileri ve sonrasında alınan önlemler hakkında kapsamlı bilgi sunmuştur.



4. BULGULAR

Tarihsel süreçlerde yaşanmış radyasyon olay ve kazalarının kayıtları 1957 yılı itibariyle erişilebilmiştir. IAEA 1990'lı yıllardan sonra olay ve kazaların raporlarını anlaşılabilir devletlerle birlikte kayıt tutmaya başlamış ve değerlendirmesini yapmıştır. Ancak, geçmişte yaşanan ciddi kazaların kayıtlarını da geriye dönük olarak inceleyip değerlendirmiştir. Böylece 1990 döneminden itibaren, olay ve kazaların dağılımı daha net bir şekilde görülmeye başlanmıştır.

4.1. INES'in Seviyelendirme Yöntemiyle Radyasyon Kazalarının İncelenmesi

Tez çalışmasında, tarihsel süreçte meydana gelen önemli radyasyon olay ve kazalar için bildirilen INES seviyeleriyle birlikte inceleme sonucunda bulunan veriler Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Tarihte yaşanan radyasyon kazaları

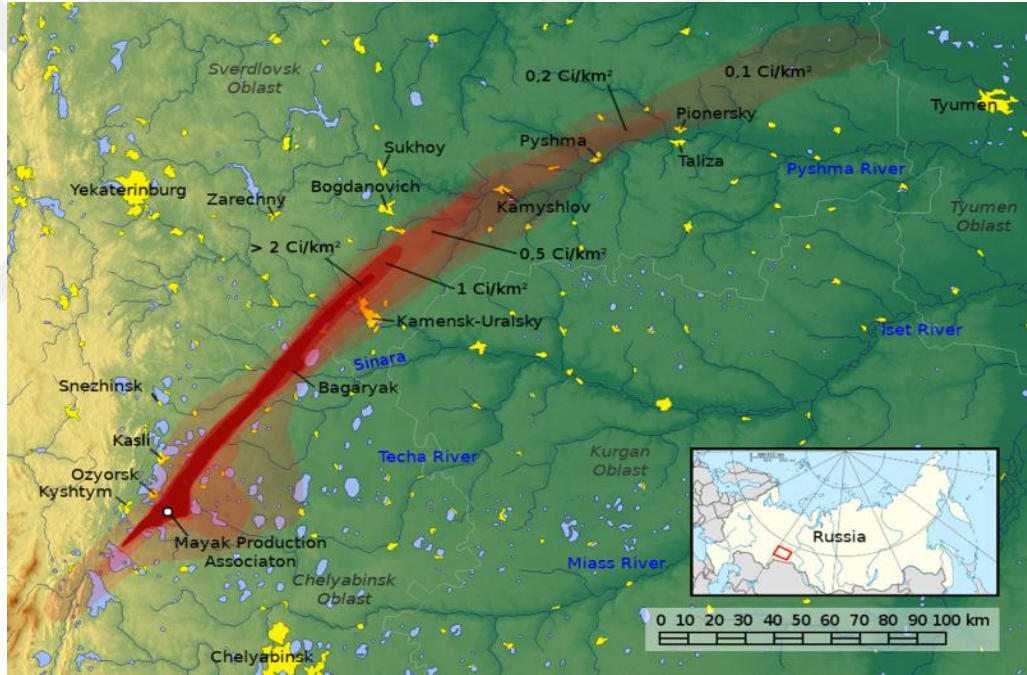
YAŞANDIĞI TARİH	YAŞANDIĞI YER	KAZA ADI	INES SEVİYESİ
29 Eylül 1957	Mayak, SSCB	Kyshtym Felaketi	6
28 Mart 1979	Three Mile Island, ABD	Three Mile Island Kazası	5
26 Nisan 1986	Çernobil, Ukrayna	Çernobil Felaketi	7
1985-1987	Goiânia, Brezilya	Goiânia Kazası	3
5 Şubat 1989	San Salvador, El Salvador	San Salvador Işınlama Tesisi Kazası	4
21 Haziran 1990	İsrail, Soreq	İsrail Işınlama Tesisi Kazası	4
26 Ekim 1991	Belarus, Nesvizh	Belarus Işınlama Tesisi Kazası	3
6 Nisan 1993	Rusya, Tomsk-7	Sibirya Kimyasal İşletme Tesisi Kazası	3
21 Ekim 1994	Estonya, Tammiku	Tammiku Radyasyon Kazası	4
24 Temmuz 1996	İran, Gilan	Gilan Radyasyon Kazası	3
17 Haziran 1997	Rusya Federasyonu	Sarov Radyasyon Kazası	4
9 Ekim 1997	Gürcistan	Lilo Eğitim Birliği Kazası	4
Aralık 1998-Ocak1999	İstanbul, Türkiye	İkitelli Radyasyon Kazası	3
20 Şubat 1999	Yanango, Peru	Yanango Radyasyon Kaza	3
30 Eylül 1999	Japonya, Tokaimura	Tokaimura Nükleer Yakıt İşleme Tesisi Kazası	4
30 Ocak-1 Şubat 2000	Samut Prakarn, Tayland	Samut Prakarn Radyasyon Kazası	5
27 Şubat 2001	Białystok, Polonya	Białystok Onkoloji Merkezi Radyasyon Kazası	4
2 Aralık 2001	Tsalenjikha, Gürcistan	Lia Radyasyon Kazası	Tanımsız
1 Nisan 2002	Cochabamba, Bolivya	Cochabamba Radyasyon Kazası	3
14 Aralık 2005	Nueva Aldea, Şili	Nueva Aldea Radyasyon Kazası	4
11 Mart 2011	Fukushima Daiichi, Japonya	Fukushima Daiichi Nükleer Santral Kazası	7
11 Ocak 2012	Chilca, Peru	Chilca Radyasyon Kazası	3
14 Şubat 2014	Ventanilla, Peru	Ventanilla Radyasyon Kazası	3

Yukarıdaki çizelgede bulunan her bir kazanın süreci, sağlık etkileri, çevresel etkileri ve sosyoekonomik etkileri ayrı ayrı ele alınmıştır.

4.1.1. Kyshtym Mayak Nükleer Tesis Kazası (29 Eylül 1957)

29 Eylül 1957’de Rusya Federasyonu’nun Kyshtym kasabasının yaklaşık 10 km doğusunda bulunan Mayak Üretim Birliği (PA; Production Association) nükleer kompleksinde meydana gelen “Kyshtym Kazası”, Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeğinde dünyanın en şiddetli nükleer kazalarından biri olarak derecelendirilmesine rağmen, 1989 yılına kadar Sovyetler Birliği bu felaketi inkâr etti.

Patlamadan sonra, Doğu Ural Radyoaktif İzi (EURT) olarak bilinen radyoaktif bir iz oluşmuş ve yaklaşık 23.000 km²’lik bir alanı kapsamıştır. Bu iz, radyoaktif maddelerin patlama alanından çevreye doğru yayılmasını ve çökmesini temsil etmektedir. EURT boyunca toprak, bitkiler, su kaynakları ve hava kontamine olmuştur. Kyshtym Kazası, INES ölçeğinde 6. seviyede yer almaktadır, yani “ciddi” kategorisine girmektedir (Akleyev vd 2017).



Şekil 4.1. Doğu Urallar Radyoaktif İz Haritası (EURT): Kyshtym felaketinin kirlettiği bölge (Goran 2019)

- Kaza süreci:** Mayak Üretim Birliği’ndeki sıvı reaktör atıklarının depolandığı tanktaki sıcaklık kontrol sisteminin arızalanmasının sonucunda, yeterli soğutma gerçekleşmedi ve termokimyasal bir patlama yaşandı. 20 milyon Ci (740 PBq) radyonüklid havaya salındı. Yaklaşık 2 MCi (74 PBq) Mayak PA sahasının ötesine yayılmış ve Doğu Ural Radyoaktif İzini (EURT) oluşturmuştur. Kazanın hemen ardından radyoaktif bulutun geçiş yolundaki en yakın yerleşim yerlerinde yaşayan insanlar tahliye edilmiştir (Rabl 2012).
- Sağlık etkileri:** Kazadan önce de 1949 ile 1952 yılları arasında radyoaktif atıkların yakındaki nehre boşaltılması, nehrin aşağısındaki köylerde birçok

radyasyon kaynaklı hastalığın ortaya çıkmasına neden oluyordu. Bu nedenle, bölge sakinleri bu bölgeden gelen görünmez tehlikelere aşınaydı.

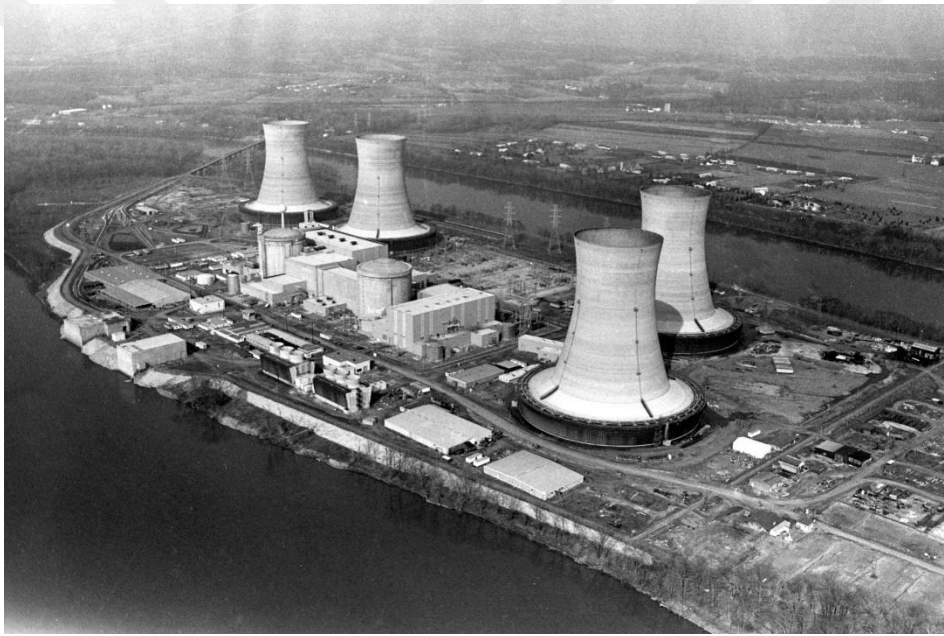
Kazadan hemen sonra, patlama mahaline en yakın yerleşim yerlerinde yaşayan insanların ilk tıbbi muayeneleri Mayak (PA) hastanesinde yapılmıştır. Bu muayenelerde, sağlık durumlarının detaylı bir şekilde incelenmesi ve çeşitli tıbbi testlerin uygulanmasıyla maruziyetin etkileri değerlendirilmiştir. Akut radyasyon sendromu vakası kaydedilmemiş, ancak trombosit, lökosit ve nötrofil sayılarının düşüklüğü tespit edilmiştir. Bazı vakalarda mutlak lenfopeni ve nötrofil artışı gözlemlendi ve bu durum hematopoietik sistemin radyasyona tepkisi olarak değerlendirildi. Kazadan 1-2 yıl sonra, aynı yerleşim yerlerinde yaşayan insanların ikinci tıbbi muayeneleri yapılmıştır. Bu muayenelerde, önceki tahlillerle karşılaştırma yapılarak, sağlık durumlarındaki değişimler incelenmiştir. Trombosit, lökosit ve nötrofil sayımlarında kontrolden farklı değerler gözlenmemiştir. Kazadan 10-12 yıl sonra, bölgede yaşayan insanların sağlık durumları ve bebek ölüm oranları incelenmiştir. Hem yetişkinlerde hem de çocuklarda solunum ve sindirim sistemi hastalıklarının görülme sıklığı kaydedilmiş, ancak maruziyetin doğrudan etkileri gözlenmemiştir. Bebek ölüm oranları, maruziyetin bebekler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için incelenmiş ve maruziyetle radikal bir şekilde değişmediği görülmüştür (A V Akleyev vd 2017, Rabl 2012).

- c) **Çevresel etkiler:** Patlama sonrası atmosfere yayılan radyoaktif izotoplar, özellikle Stronsiyum-90 (^{90}Sr) ve Sezyum-137 (^{137}Cs), geniş alanlara çökmüştür. Radyoaktif bulutun yayılma yönü, rüzgâr ve yağış gibi meteorolojik koşullar tarafından belirlenmiştir. Bu faktörler, radyoaktif izotopların geniş alanlara yayılmasını kolaylaştırmıştır. 1957 sonbaharından bu yana, bölgedeki iç maruziyet kaynaklarından emilen dozu azaltmak için gıda ve yemlerin kalite denetimi başlatılmıştır. Kazadan sonraki ilk 2 yıl içinde, EURT hanelerindeki yıllık gıda ve yem tedarikinin %2-3'üne tekabül eden büyük miktarlarda mahsul, patates, et ve süt geri çekildi. Belirli yerleşim yerlerinde yaşayanların radyoaktif maddelerin diyet alımı izin verilen seviyeleri aştı. Eski evlerinde yerlerinde yaşamaya devam eden sakinler için dış maruziyet dozlarını ve yıllık Sr-90 alımlarını azaltmaya yönelik çabalar gösterildi. Küçük çiftliklerin yerine, özel besleme ve barınma koşullarına sahip, et üretimine odaklanan büyük çiftlikler kuruldu. Çiftliklerin büyütülmesi, radyasyon izlemeyi önemli ölçüde kolaylaştırdı ve süt ve tahıl gibi iç ^{90}Sr maruziyetine en çok katkıda bulunan ürünlerden kaynaklanan nüfusun dozunu azalttı. Özel çiftliklerde üretilen sütteki ^{90}Sr içeriği 3-4 kat, ette ise 2-7 kat azaldı. ^{90}Sr 'un bitkilere ve tarım ürünlerine girişi zamanla azaldı. 1957 patlamadan hemen sonra, tahıllar açıkta veya kötü korunan depolarda bulunduğu için kirlenmişti.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** Kazadan sonra Berdyanish, Satlykovo ve Galikaeva gibi patlamaya en yakın köylerde yaşayan 1100 kişi acil olarak tahliye edildi. Bu yerleşim yerlerindeki evler ve tarım yapıları yıkıldı, özel çiftlik hayvanları kesildi ve yerinde gömüldü. 1958-1959 yıllarında 22 yerleşim yerinden yaklaşık 10.580 kişi tahliye edildi. Bu yerleşim yerleri, Sr-90 birikim yoğunluğu 2 Ci/km^2 üzerinde olan alanlarda bulunuyordu. Tahliye edilen insanlar için yeni konut sağlanırken, tarım ve hayvancılık gibi ekonomik faaliyetlerden mahrum kaldılar. Bu da ekonomik sıkıntılara neden oldu.

Halkın radyasyon korkusu ve belirsizlikler nedeniyle psikolojik sorunlar yaşadığı belirlendi. Bu durum, genel olarak yaşam kalitesinde azalmaya ve sosyal ilişkilerde bozulmalara neden oldu. Radyasyon tehlikeleri hakkında yeterli bilgilendirme yapılmaması ve güvenlik önlemlerinin yetersizliği halkın devlete ve ilgili kurumlara olan güvenini sarstı. Bölgenin yeniden yapılandırılması ve kalkınma çabaları için devlet desteği gerekli hale geldi. Ekonomik kalkınmayı desteklemek ve zarar gören toplulukları iyileştirmek için bölgeye yatırım projeleri yapıldı.

4.1.2. Three Mile Island Nükleer Santral Kazası (28 Mart 1979)

Three Mile Island kazası, Amerika Birleşik Devletleri'nin Pensilvanya'daki nükleer enerji santralinin 2 no'lu reaktörünün (TMI-2) erimesi nedeniyle meydana geldi. INES seviyesi 5 olarak belirlenen kaza, ABD ticari nükleer güç santrali işletme tarihindeki en ciddi kazaydı.



Şekil 4.2. 30 Mart 1979'da Three Mile Island nükleer enerji santralinin havadan görünüşü, merkezdeki küçük kubbe olayın meydana geldiği yer (AP Photo/Barry Thumma: ASSOCIATED PRESS) (<https://www.pennlive.com/news/2019/03/three-mile-island-40-years-later-a-timeline-of-events-as-they-occurred-on-march-28-1979.html>).

- a) **Kaza süreci:** Kaza, 28 Mart 1979'da sabah 4 civarında santralin nükleer olmayan ikincil bölümünde bir arıza ile başladı. Ana besleme su pompalarının arızası, reaktör çekirdeğinden ısıyı uzaklaştıran buhar jeneratörlerine su gönderimini engelledi. Bunun sonucunda santralin, türbin-jeneratörü ve reaktörün otomatik olarak kapanmasına neden oldu. Reaktör kapanırken, birincil sistemdeki basıncı kontrol etmek için açılan tahliye vanası kapanmadı. Kontrol odasındaki cihazlar vananın kapalı olduğunu gösterdiği için, tesis personeli tahliye vanasından buhar şeklinde soğutma suyunun döküldüğünü

fark etmedi. Bu yanıltıcı bilgiler sonucunda operatörler, soğutma sıvısı kaybı kazası yaşandığını anlayamadılar ve yanlış müdahaleler yapıldı. Reaktör soğutucu pompalarının kapanması ve acil soğutma suyu sistemine yapılan yanlış müdahaleler nedeniyle, basınçlı kaptaki su seviyesi düştü ve çekirdek aşırı ısındı.

- b) **Sağlık etkileri:** TMI kazası sonrası çeşitli kurumlar, kaza nedeniyle çevredeki yaklaşık 2 milyon kişinin ortalama sadece 1 mrem ek radyasyon dozu aldığını belirledi. Bu doz, bir göğüs röntgeninin 6 mrem'ine kıyasla oldukça düşüktür. Reaktördeki ciddi hasara rağmen, salınımın bireylerin fiziksel sağlığı ihmal edilebilir etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Saygın üniversitelerin yaptığı incelemeler, radyasyon salınımının bireylerin sağlığı üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkisi olduğunu göstermiştir. Gıda güvenliği üzerinde yapılan çalışmalar da radyoaktif maddelerin gıda zincirine sınırlı düzeyde girdiğini ve tüketici sağlığını tehdit etmediğini gösterdi.
- c) **Çevresel etkileri:** TMI kazasının çevresel etkileri incelendiğinde, kazanın çevreye sınırlı miktarda radyoaktif gaz saldırdığı ancak bu salınan maddelerin kontrol altına alındığı görüldü. Yapılan hava, su, toprak ve bitki örtüsü testleri, radyoaktif kontaminasyonun önemsiz olduğunu ortaya koydu. Uzun vadeli araştırmalar, kazanın çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi bir etkisi olmadığını belirledi. Bu nedenle, TMI kazasının çevresel etkileri minimal seviyede kaldı.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Kazanın ardından, ekonomik maliyetler artmış ve nükleer enerji endüstrisinde güven kaybı yaşanmıştır (U.S. NRC 2021).

4.1.3. Çernobil Nükleer Santral Kazası (26 Nisan 1986)

26 Nisan 1986'da Ukrayna'nın Belarus sınırına 20 km uzaklıkta bulunan Çernobil nükleer santralinde gerçekleşti. Bu kaza, nükleer endüstride yaşanan en ciddi ve yıkıcı felaketlerden biri olarak kayıtlara geçmiştir. INES seviyesi 7 olarak belirlenmiştir. Kazanın arkasındaki ana sebep, bir test sırasında kontrol edilemeyen bir reaktör aşırı ısınma ve patlama yaşamasıydı (UNSCEAR 2000).

- a) **Kaza süreci:** Kaza, o gün gerçekleştirilmekte olan bir güç çıkış testi sırasında meydana geldi. Reaktör operatörleri, reaktörün güç kaynağı kesildiğinde oluşan güç kaybını incelemek için kontrol çubuklarını çıkararak reaktörü düşük güçte çalıştırmayı planlıyordu. Ancak, reaktörde meydana gelen bir dizi operatör hatası ve tasarım kusuru, bu testin başarısızlıkla sonuçlanmasına ve felakete yol açmasına neden oldu. Kontrol çubukları tamamen çıkarıldığında, reaktördeki güç beklenmedik şekilde arttı ve reaktör aşırı ısındı. Bu durum, reaktörün patlamasına ve birinci reaktör binasının çökmesine neden oldu. Reaktör çatıyı delerek radyoaktif malzemelerin atmosfere yayılmasına ve çevrede büyük çapta radyoaktif kirliliğe neden oldu. Patlama sonrasında, radyoaktif bulut yakındaki bölgelere yayıldı ve binlerce kilometrekarelik bir alanı etkiledi. Hemen ardından, Pripyat şehri ve çevresindeki bölgeler tahliye edildi ve sakinleri bölgeyi terk etmek zorunda kaldı. Kazanın ardından radyoaktif bulut, başta Belarus, Rusya ve Ukrayna olmak üzere, Avrupa'nın büyük bir kısmına yayıldı.
- b) **Sağlık üzerindeki etkileri:** Çernobil kazasının sağlık sonuçları, kazadan etkilenen gruplar arasında acil durum çalışanları, tahliye edilen sakinler ve tahliye edilmemiş kirliliği bölgelerde yaşayanlar gibi çeşitli grupları içerir. En yüksek dozlar,

acil durum çalışanları ve sahadaki personel tarafından alınmış olup, kaza günlerinde birkaç işçi için ölümcül olan 2-16 Gy arasında değişen dozlar alınmıştır. Kazadan sonraki dört yıl boyunca kısa sürelerle çalışan kurtarma operasyonu işçilerinin aldığı dozlar 500 mSv'yi aşmış ve Belarus, Rusya ve Ukrayna Devlet Kayıtlarına göre ortalama yaklaşık 100 mSv olarak belirlenmiştir. Tahliye edilenler için etkili dozlar yaklaşık olarak 33 mSv olarak tahmin edilmiştir, en yüksek doz ise birkaç yüz mSv mertebesindedir. Tiroid dozları, dağıtılan sabit iyot tabletleri sayesinde önemli ölçüde azaltılmıştır. Kirlenmiş bölgelerde yaşayan insanların tiroid dozları, yaşa, yeraltı kirliliği düzeyine ve süt tüketimine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, tiroid dozları bireyler arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Bildirilen bireysel tiroid dozları yaklaşık 50 Gy'ye kadar çıkmış, kontamine olmuş alanlardaki ortalama dozlar ise insanların yaşadığı bölgeye ve yaşlarına bağlı olarak yaklaşık 0,03 ile birkaç Gy arasında değişmiştir. Özellikle kontamine ot yiyen ineklerin sütünü içmek çocukların, yüksek tiroid dozları almalarına, bu da tiroid kanseri vakalarının artmasına neden olmuştur. Çernobil kazasının sağlık etkileri incelendiğinde, özellikle akut radyasyon sendromu (ARS) ölümlerinin kazadan hemen sonra belgelendiği görülmüştür. 134 acil durum çalışanında ARS teşhisi konulmuş ve 1986'da 28'i ARS nedeniyle ölmüştür. Ayrıca, 1987-2004 yılları arasında 19 kişi daha çeşitli nedenlerle ölmüştür; ancak bu ölümlerin tamamı radyasyon maruziyetine doğrudan bağlı değildir. Kanser ölümleri, tahmin edilmesi en zor olanıdır. Çernobil kazasının neden olduğu ölümcül kanserlerin sayısını kesin olarak değerlendirmek mümkün değildir ve radyasyon kaynaklı kanserlerin diğer nedenlere bağlı kanserlerden ayırt edilememesi unutulmamalıdır. Genel halk, kazadan sonra gıdalar, su ve hava yoluyla radyonüklid alımına maruz kalmıştır. 1986-2005 yılları arasında 'kirli' bölgelerde yaşayan insanlar için biriken ortalama etkili dozlar 10 ila 30 mSv arasında tahmin edilmiştir. Sıkı radyolojik kontrol bölgelerinde ortalama doz 50 mSv ve daha fazla olmuştur. Bazı sakinler birkaç yüz mSv'ye kadar dozlar almıştır

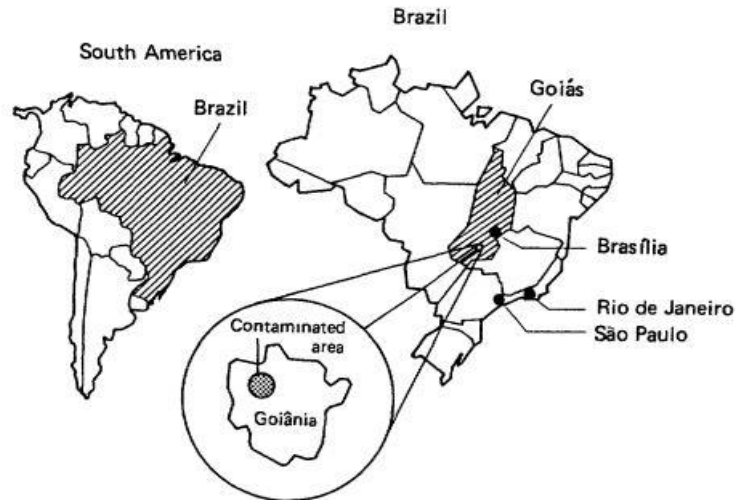
- c) **Çevresel etkileri:** Çernobil'in çevresel etkileri büyük ve uzun süreli olmuştur. 26 Nisan 1986'daki nükleer kazası, büyük miktarlarda radyoaktif maddenin atmosfere ve çevreye salınmasına neden oldu. Kazanın hemen ardından bölgeye büyük ölçüde radyoaktif maddeler yağdı ve bu maddeler Avrupa'nın geniş bir bölgesine yayıldı. Radyoaktif yağmurlar, tarım arazilerini, su kaynaklarını ve ormanları kirletti ve binlerce kilometrekarelik bir alan etkilendi. Kaza sonrası çevresel etkilerin birçoğu çevredeki bitki ve hayvan yaşamını etkiledi. Bitkiler ve hayvanlar radyoaktif maddeleri emerek ya da tüketerek kirlendi ve gıda zincirinin üst basamaklarına kadar yayıldı. İnsanlar ve diğer canlılar için ciddi sağlık riskleri oluşturdu. Bununla birlikte, kazadan sonra alınan çeşitli çevresel önlemler ve rehabilitasyon çabaları, bölgedeki çevresel etkileri azaltmaya ve zarar gören ekosistemlerin toparlanmasına yardımcı oldu. Örneğin, kirlenmiş toprakların temizlenmesi, radyasyonun yayılmasını ve çevresel kirliliği azaltmaya yardımcı oldu. Ayrıca, bölgedeki insan faaliyetlerinin kısıtlanması ve bölgenin bir kısmının "Güvenli Bölge" ilan edilmesi, çevredeki doğal yaşamın bir şekilde korunmasına yardımcı oldu. Ancak, Çernobil'in çevresel etkileri hala devam etmekte ve uzun vadeli olarak devam edecektir. Radyoaktif maddelerin yarı ömürleri uzun olduğu için, bölgedeki toprak, su ve biyolojik sistemler hala kirli durumda ve bu da gelecek nesiller için potansiyel sağlık risklerini beraberinde getirmektedir.

d) Sosyoekonomik etkiler: Çernobil nükleer faciasının sosyoekonomik sonuçları hem doğrudan hem de dolaylı olarak derin ve uzun süreli etkilere yol açmıştır. Facia, milyarlarca doları bulan maddi zararlara ve yeniden yerleşim, temizlik, sağlık hizmetleri gibi dolaylı maliyetlerle ekonomik yüklerle neden olmuştur. Özellikle tarım arazileri ve ormanların zarar görmesi, tarım ve ormancılık sektörlerinde ciddi kayıplar doğurarak yerel ekonomileri olumsuz etkilemiştir. Radyasyona maruz kalma sonucu ortaya çıkan sağlık sorunları, sağlık hizmetleri üzerinde ek bir yük oluşturmuş ve toplumun genel sağlık durumunu bozmuştur. Psikolojik etkiler de önemli bir faktör olarak ortaya çıkmış; korku, endişe ve belirsizlik gibi duygular, insanların günlük yaşamlarını etkilemiş ve toplumsal travmaya yol açmıştır. Facia sonrasında yerinden edilme ve gönüllü göçler, bölgedeki demografiyi değiştirmiş, yerel toplulukların yapısını bozmuştur. Hükümetlerin ve yetkililerin felaketle ilgili bilgi sağlama konusundaki yetersizlikleri, toplumun güvenini sarsmış ve felaket sonrası süreçlerde katılımı azaltmıştır. Tüm bu faktörler, Çernobil faciasının uzun vadeli sosyoekonomik sonuçlarını belirlemiş, bölge ve toplum üzerinde kalıcı etkiler bırakmıştır (The Chernobyl Forum: 2003–2005).

4.1.4. Goiânia Radyasyon Kazası (1985-1987)

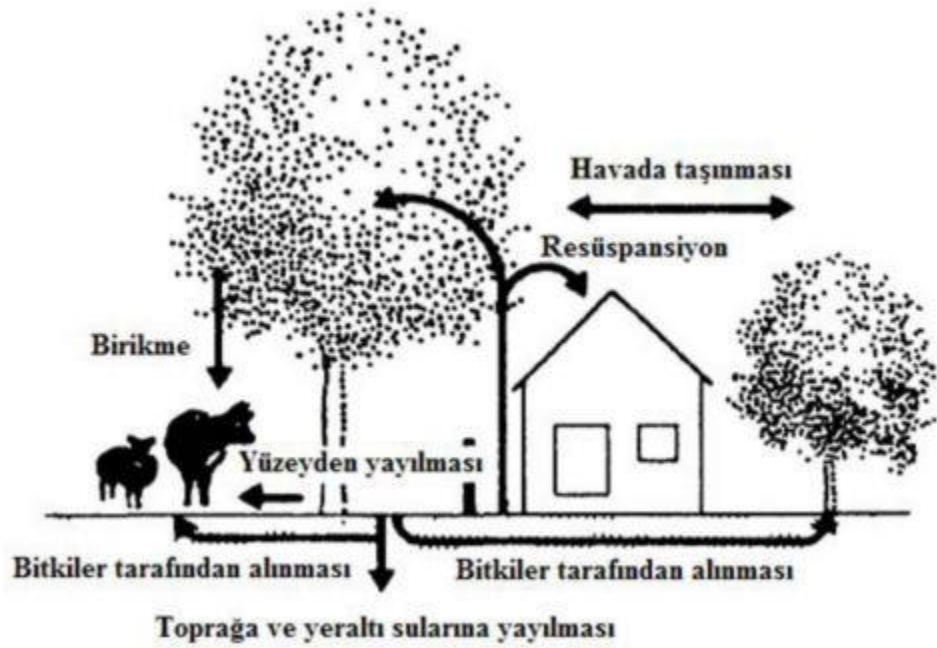
Brezilya’da bir özel radyoterapi kliniği taşınırken sezyum kaynağını eski binada korunmasız bir şekilde bırakılmıştır. Bunun sonucunda kolay dağılabilir sezyum klorür tuzu formundaki Cs-137, bilinçsiz insanların eline geçmiş oldu. Radyasyon kaynağı kolay dağılabilir yapısı nedeniyle hızlı bir biçimde yayılmış ve solunum yoluyla insanların iç kontaminasyon yaşamasına neden olmuştur.

INES, yer zaman fark etmeksizin yaşanan radyolojik kazaları seviyelendirmektedir. Bu kaza da INES Seviyesinde 5, “Geniş Sonuçları Olan Kaza” olarak yer almıştır.



Şekil 4.3. Goiânia’nın Rio de Janeiro’ya (1348 km) göre konumunu gösteren plan (IAEA 1988)

- a) **Kaza süreci:** 1985'in sonlarında, Brezilya'nın Goiania şehrindeki özel bir radyoterapi enstitüsü olan Goiano de Radioterapia, kobalt-60 teleterapi ünitesini yeni yerine taşıırken, lisans şartları gereği izin makamına bildirmeksizin, sezyum-137 teleterapi ünitesini yerinde bıraktı. Eski tesis kısmen yıkıldı ve bu nedenle teleterapi ünitesi tamamen korunmasız kaldı. İki kişi, hurda değeri olabileceğini düşünerek cihazın radyasyon başlığını söküp evlerine götürdü ve parçalamaya çalıştı. Bu sırada kaynak kapsülü hasar gördü ve radyoaktif madde çevreye yayıldı. Kaynak kapsülünün hasar görmesinin ardından, parçalar bir hurdalık sahibine satıldı. Hurdacı, parçaların karanlıkta mavi ışık yaydığını fark ederek yakınlarına da gösterdi ve bu durum beş gün boyunca devam etti. Kaynağın yaydığı radyasyona maruz kalan kişiler mide bulantısı, kusma ve ishal belirtileri ile hastaneye gittiler fakat semptomlar radyasyonla bağdaştırılmadı. Bu süre zarfında ışınlanan kişilerden biri semptomları, mavi ışık yayan kaynak ile ilişkilendirdi. Kaynak parçalarını en yakın halk sağlığı departmanına götürdü. Bu durum, kazanın keşfine yol açtı. Bir yerel fizikçi, kazanın ölçeğini ölçüm yaparak ilk değerlendiren kişiydi ve hemen iki bölgeyi tahliye etme adımlarını attı. Yetkililer bilgilendirildi ve hızlı bir şekilde genişleyen bir müdahale başlatıldı. Hızla başka önemli kontaminasyon bölgeleri tespit edildi ve sakinler tahliye edildi (IAEA 1988).



Şekil 4.4. Goiania kazasında Cs-137 için çevresel kontaminasyon yolları (IAEA 1988)

- b) **Sağlık etkileri:** Ciddi bir radyolojik kazanın meydana geldiği anlaşıldıktan kısa bir süre sonra, uzmanlar Goiania'ya sevk edildi. Kontamine ve yaralı kişilerin tespit edildiği geçici bir bekleme alanı oluşturuldu. Tıbbi triyaj sonucunda 20 kişinin hastane tedavisine ihtiyaç duyduğu belirlendi. Tahmin edilen dozların 21 kişi için 1.0 Gy'yi ve 8 kişi için 4.0 Gy'yi aştığını göstermektedir. Tahmin edilen

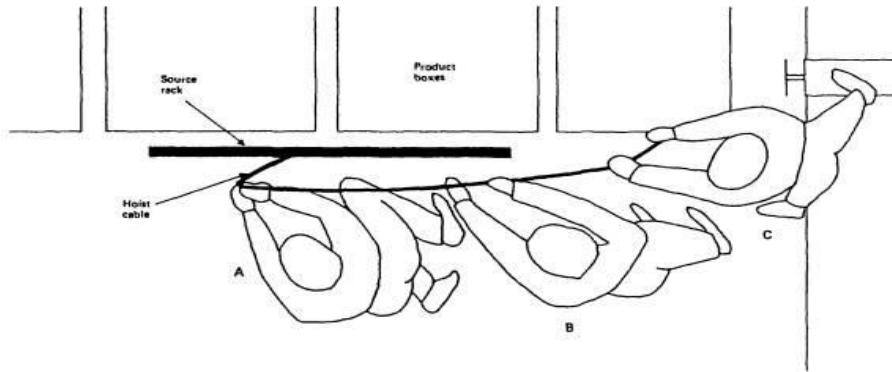
hiçbir doz 7.0 Gy'yi aşmamıştır. Yaralıların dördü, akut radyasyon sendromu ile ilişkili komplikasyonlar sonucu öldü. Tedavi sonrası hayatta kalanlar Goiania'ya geri gönderildi ve sezyumun vücuttan atılması süreci başladı. Kazadan etkilenenlerin çoğu iç ve dış ışınlanmaya maruz kaldı. Toplamda 112.00 kişi izlendi, bunlardan 249 kişi kontamine oldu. Kan örneklerinin analizi ve içsel kontaminasyonun belirlenmesi için idrar örnekleri toplandı. Prusya mavisinin sezyumu vücuttan atmasına yardım etkinliği, dışkı ve idrar analizleriyle değerlendirildi. Tüm vücut sayacı kullanılarak radyasyon maruziyeti ve kontaminasyonun etkileri izlendi.

- c) **Çevresel etkiler:** Radyolojik kazanın çevresel etkileri, ciddi kontaminasyona yol açtı. Temizlik çabaları iki aşamada gerçekleşti. İlk aşama, kontaminasyon kaynaklarını kontrol altına almayı ve belirlemeyi içeriyordu. Bu süreç 3 Ekim'e kadar sürdü. Genel olarak tüm kirlenme alanları ele alındığında 25 Aralık 1987 Noel'e kadar sürdü. İkinci aşama ise normal yaşam koşullarını yeniden sağlamayı hedefliyordu ve Mart 1988'e kadar devam etti. Acil müdahalenin ana hedefleri, yüksek radyasyon dozlarının neden olabileceği etkileri önlemek, kontaminasyon bölgelerini belirlemek ve kontrol altına almak oldu. İlk müdahalede, kontaminasyon bölgeleri belirlenerek kontrol altına alındı. Evlerin dekontaminasyonu ve insan tahliyesi süreci başlatıldı ve geçici barınma alanlarına yerleştirildi. Şüpheli kirlenmiş yerlerin tespit edilmesi ve izlenmesi birkaç ay sürdü. Kazazede destekleriyle, bu yerleşim bölgeleri yeniden düzenlendi ve tahliye edilen kişilerin çoğu evlerine geri döndü.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** Kazanın ardından, ulusal ve uluslararası medya tarafından geniş bir ilgi gördü ve topluluklar arasında belirsizlik ve korku yarattı. Kazadan etkilenen topluluklarda endişe yaygındı ve kirlenmiş bölgelerde yaşayanlar ile kazazede olanlar sosyal ayrımcılığa maruz kaldı. Halkın radyasyon konusundaki bilgi eksikliği ve korkuları, psikolojik stres yaşamasına neden oldu. Yaklaşık 200 ev, yıkılması veya temizlenmesi için boşaltıldı. Bunun sonucunda binlerce insan evsiz kaldı. Kirlenmiş bölgelerdeki mülk değerleri düştü ve bu da mülk sahipleri üzerinde ekonomik baskı oluşturdu. Şehirdeki kirlenmiş bölgelerden toprak ve yapılar temizlenmek zorunda kaldı. Bu temizlik çalışmaları önemli maliyetler doğurdu. Kazadan etkilenen işletmeler de ekonomik kayıplar yaşadı. Çevredeki işletmeler, müşteri kaybı ve operasyonel zorluklar nedeniyle gelir kaybına uğradı. Turizm ve ticaret de kötü etkilendi. Bunların sonucunda bölgenin ekonomik büyümesini olumsuz etkilendi. Mali yardım programları ve teşvikler, etkilenenlerin ekonomik iyileşme sürecini destekledi. Ayrıca, kazadan sonra temizlik ve rehabilitasyon çalışmaları için de büyük miktarda kaynak tahsis edildi (IAEA 1988).

4.1.5. El Salvador Işınlama Tesisi Kazası (5 Şubat 1989)

Kaza, San Salvador yakınlarında bir endüstriyel sterilizasyon tesisinde meydana gelmiştir. El Salvador'un içinde bulunduğu iç savaş ve güvenlik nedeni ile düzenli bakımı yapılmadı. Kaynağın normalde yapılması gereken yenileme ve güvenlik denetimleri gerçekleştirilmedi. Bunun sonucunda yaşanan San Salvador Radyasyon Kazası, Uluslararası Nükleer Olay Skalası (INES) üzerinde Seviye 4 olarak sınıflandırılmış ve "Yerel Sonuçları Olan Kaza" kategorisine girmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Işınlama işlemi sırasında kaynak kaldırma mekanizması, kobalt-60 kaynağını su havuzundan ışınlama pozisyonuna kaldırdı. Normal şartlarda mekanizma, kaynağın kullanım sırasında güvenli bir şekilde açılmasını ve kullanılmadığında su havuzuna geri dönmesini sağlamalıydı. Su havuzu kaynağın yaydığı radyasyonu soğuruyordu. Ancak, kaynağı kaldırmaya yarayan pistonun sıkışması ve hareketinin engellenmesi sonucunda kaynak ışınlama pozisyonunda takılı kaldı. Tesiste kullanılan kaynağın işleyişini izleyen kamera sistemi bulunmaması nedeniyle, raporlarda işçi A olarak tanımlanan çalışan odaya girip sorunu anlamaya çalıştı. Düzenli bakımların yapılmaması nedeniyle sistem, kaynağın güvenli konumda olduğunu belirten yeşil ışığı yanıyordu. Tesisin güç kaynağını kapatması halinde radyasyon yayılımının duracağını düşündü, bu yüzden güç kaynağını kapattı ve el feneri ile odaya girdi. İşçi kaynak rafının ışınlama odasına girmesinin ne gibi sonuçlar getireceğinin farkında değildi. Taşınabilir dozimetre ile radyasyon seviyesini kontrol etmedi. İşçi A kaynak rafının yanındaki alanda dört kutu yerine beş kutunun sıkıştığını gördü. Kutuların sıkışması pistonların algılama sistemini bozmuştu. Rafi tek başına indiremeyen işçi A beş dakika sonra odadan ayrılıp iş arkadaşları B ve C ile geri döndü. Deneyimsiz işçiler kaynağın tehlikeli olduğunu bilmiyorlardı. Kaynak rafını serbest bırakmak için üç işçi birden kaldırma kablolarını çekmeye başladı. Radyasyon odasından çıktıktan sonra en çok maruz kalan işçi A kusmaya başladı. Zaman geçtikçe daha kötü olan işçiler, acil servise gittiler. Aynı gecenin sabahı gündüz vardiyasına gelen işçi D, çalışma ortamını düzensiz bulunca dağınık kutuları düzeltti ve işini yapmaya devam etti. Hastaların radyolojik yaralanmalara maruz kaldığı hafta boyunca anlaşılmadı ve tesis işlemeye devam etti. Daha sonradan kaynağı oluşturan kalemlerin eksik olduğu anlaşıldı. Işınlama dozlarının eksik olduğu anlaşılmıca bir sorun olduğu düşünüldü ve tesis kapatıldı.



Şekil 4.5. Kaynak rafı serbest bırakmaya çalışırken A, B ve C İşçilerinin kaynak rafına göre konumlarının görünümü (IAEA 1990)

Tüm bunlar yaşanırken hiçbir çalışan kişisel dozimetre kullanmadı. Maruz kalmış olabilecek tüm işçiler, yapılan sitogenetik testlerin ardından aşırı doz aldıkları anlaşıldı. Kaza soruşturması yapıldı ve işçilerle görüşmeler gerçekleştirildi.

Soruşturma sonucunda, tesisin güvenli hale getirilmesi için çeşitli adımlar atıldı ve uluslararası kuruluşlarla iletişime geçildi.

- b) **Sağlık etkileri:** Radyasyon kazasının ardından, hasta A, B ve C'nin sağlık durumları ciddi şekilde etkilendi. Hasta A, hastaneye kabul edildiğinde, şiddetli gastrointestinal ve hematopoetik radyasyon sendromları belirtileri gösteriyordu. Vücudunda geniş çaplı radyodermatit, bacaklarında ve ayaklarında yanıklar, ellerinde ödem, sürekli bulantı, kusma, ishal ve normalde hafif olan vücut ağırlığının %20'sini kaybetmiş haldeydi. Kan ve kemik iliği durumu son derece kötüydü, ancak heterojen maruziyet nedeniyle bazı kemik iliği kalıntıları iyileşmeyi destekledi. Tedavi sürecinde koruyucu izolasyon altında tutuldu, kan transfüzyonları yapıldı ve total parenteral beslenme sağlandı. Ayrıca, deneysel bir ilaç olan GMCSF ile 20 günlük bir tedavi başlatıldı. Bu ilaç kemik iliği iyileşmesini teşvik edebilirken, titreme ve zayıflık gibi yan etkiler gösterdi. Tedavi sonucu durumu stabil hale geldi, ancak bacaklardaki yanıklar nedeniyle sağ bacağı diz üstünden ampute edilmek zorunda kaldı. Kaza sonrası altı buçuk ay içinde iyileşme gösterse de sol bacağındaki enfeksiyonlar ve komplikasyonlar nedeniyle durumu kötüleşti ve enfeksiyonlar ile radyasyonun kalıcı etkileri sonucu öldü. Hasta B, benzer şekilde, gastrointestinal ve hematopoetik semptomlarla hastaneye yatırıldı. Yanıklar, malnütrisyon ve şiddetli bir kan bozukluğu gözlemlendi. Tedavi olarak GMCSF kullanıldı ve hastaneye geldiğinde başlayan 10 günlük tedavi sürecinde belirgin yan etkiler görülmedi. Kan değerlerinde yeterli iyileşme gözlemlendikten sonra izolasyon sona erdi. Ancak, ilerleyici nekroz nedeniyle sol bacağı diz üstünden ampute edildi ve sonrasında sağ bacağı da aynı şekilde ampute edildi. Genel iyileşme süreci başladı, ancak hastanın psikolojik desteğe ihtiyacı belirgindi. Kaza sonrası sağlıklı bir iyileşme gösterdi, ancak geç dönem katarakt ve diğer radyasyon kaynaklı komplikasyonlar riski devam etti. Hasta C, daha hafif hematopoetik semptomlarla ve sol ayağında yanıklarla hastaneye kabul edildi. Tedavi süreci hasta A ve B'ye benzerdi, ancak daha az yoğunlukta bir tedavi uygulandı. 9 günlük GMCSF tedavisini tolere etti ve belirgin yan etkiler olmaksızın iyileşti. Mexico City'deki tedavisinin ardından taburcu edilerek, tam iyileşme beklenmekteydi. Ancak, ilerleyen dönemde gözlerinde radyasyon kaynaklı geç etkiler yaşama olasılığı vardı. Bu olay, akut radyasyon sendromu nedeniyle ciddi gastrointestinal ve hematopoetik semptomlara, derin yanıklara ve nekroza yol açtı. Tedavi süreçleri izolasyon, total parenteral beslenme, kan transfüzyonları ve enfeksiyonlara karşı sürekli mücadeleyi gerektirdi. Uzun tedavi süreçleri ve uzuv kayıpları hastaların psikolojik destek gereksinimini artırdı. Gelecekte katarakt ve akut lösemi gibi geç dönem sağlık sorunları yaşama riski devam etmektedir.
- c) **Çevresel etkiler:** Kazada çevresel etkiler sınırlı kalmış. Işınlamadan operatörler etkilenmiştir.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Yaralı işçilerin tedavisi, sağlık sistemine ciddi bir mali yük getirmiştir. Tesisin kapanması veya üretimin durması nedeniyle ekonomik kayıplar yaşanmış, bu durum işçilerin işlerini kaybetmesine ve gelir kaybı yaşamalarına yol açmıştır (IAEA 1990).

4.1.6. İsrail Işınlama Tesisi Kazası (21 Haziran 1990)

Soreq Nükleer Araştırma Merkezi'nde önceden paketlenmiş tıbbi ürünler ve baharatlar, bir kaynak rafı aracılığıyla yoğun radyoaktif kobalt-60 kaynağı kullanılarak sterilize ediliyordu. Kaza INES seviyesinde yerel sonuçları olan kaza, seviye 4 olarak belirlendi.

- a) **Kaza süreci:** 21 Haziran 1990 tarihinde radyasyon kaynağı barındıran taşıma mekanizmasında kartonlar nedeniyle bir sıkışma meydana geldi. Bu nedenle kaynak rafı ışınlama pozisyonunda takılı kaldı.



Şekil 4.6. Kaynak güvenli alana çekildikten sonra kaynak rafını engelleyen karton kutular (IAEA 1993)

Operatör, iki çelişkili uyarı sinyali aldı. Biri kaynağın güvenli olduğunu, diğeri ise olmadığını gösteriyordu. Daha önce de yanlış sinyal alan ve kaynağın güvenli olduğu hakkında hiç yanlış sinyal vermediğini deneyimlemiş operatör, uyarılara aldırmadan güvenlik sistemlerini atladı ve işlem odasına girdi. Işınlama odasından çıktıktan kısa bir süre sonra hastalandı ve midesi bulanmaya başladı. Hemen hastaneye kaldırıldı ve uzman bakımı sağlandı. Daha sonra kontrol edilen kaynak alınan tavsiyelerle güvenli konuma getirildi. Kaynağa çok yaklaşılmadan ölçülen doz 0.5 Sv/saat çıkmıştı.

- b) **Sağlık etkileri:** Operatör, ışınlama odasına girdi ve sıkışmış kartonları çıkarmak için çalışmaya başladı. Kısa bir süre sonra gözlerinde yanma hissi ve zonklama hissetmeye başladı. Korkarak odadan çıktı ve durumu bir üstüne bildirdi. Olaylar yaşanırken kişisel dozimetresini takmıyordu. Kısa bir süre sonra ise mide bulantısı yaşamaya ve kusmaya başladı. Hemen hastaneye kaldırıldı ve şiddetli hematolojik ve gastrointestinal aşamaları belirten belirtiler gösterdi. Ayrıca, radyasyona bağlı olarak lokalize deri yaralanmaları gelişti. Kazadan sonra aldığı radyasyon dozunun, tüm vücuda 10 Gy ile 20 Gy arasında olduğu tahmin edildi. Tüm tıbbi

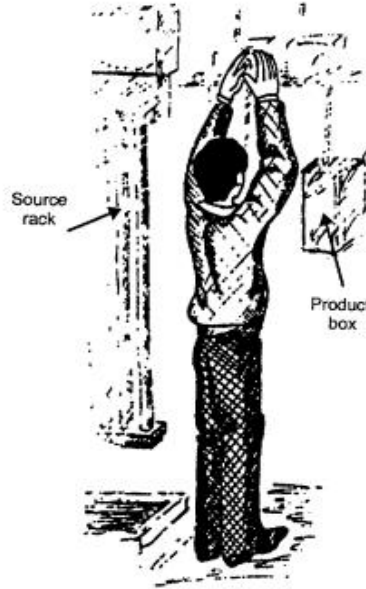
çabalara rağmen, yeni hematopoietik büyüme faktörü ilaçlarının kullanımı da dahil olmak üzere, operatör kazadan 36 gün sonra hayatını kaybetti. Bu kaza sonrasında, operatörün acil tıbbi müdahale gerektiren ciddi radyasyon maruziyeti sonucu hayatını kaybettiği net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

- c) **Çevresel etkiler:** Kazada çevresel etkiler sınırlı kalmış. Işınlamadan operatör etkilenmiştir. İşçinin yakın çevresindeki insanların sağlığı üzerinde de endişe yaratmıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** İsrail'deki 1990 nükleer tesisi kazasının sosyoekonomik etkileri oldukça sınırlı kalmıştır. Kazanın operatörün ölümüne neden olduğu çevrenin fazla etkilenmediği görülüyor (IAEA 1993).

4.1.7. Belarus (Nesvizh) Işınlama Tesisi Kazası (26 Ekim 1991)

26 Ekim 1991'de, Belarus'ın Minsk şehrine yaklaşık 120 km uzaklıkta bulunan Nesvizh kasabasında, bir radyolojik kaza meydana geldi. Kazaya karışan operatör Co-60 endüstriyel sterilizasyon tesisinde çalışan en deneyimli operatördü. Buna rağmen ihmaller sonucunda INES seviyesi 3 olan bu kaza meydana gelmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Kaza, 26 Ekim 1991 Cumartesi sabahı saat 03:40 civarında meydana geldi. Arıza, ürün taşıyıcılarının bağlantı kollarının ayrılması sonucu ortaya çıkmıştır. Operatör, ürün taşıyıcılarındaki bu arızayı fark etmeden önce kontrol panelindeki göstergeyi sürekli olarak izlememiş ve bu nedenle arızayı fark etmediği belirtilmiştir. Kontrol paneli var fakat herhangi bir uyarı alarmı yoktu.



Şekil 4.7. Operatörün maruziyet sırasındaki konumu (kazadan kısa bir süre sonra sağlık ekibine verilen bilgiye göre) (IAEA 1993)

Operatör, taşıma mekanizmasında bir engelle karşılaştınca, bu durumu düzeltmek için harekete geçmiştir. Kişisel radyasyon dozimetre cihazını ve acil durum durdurma düğmesini kullanmamasıyla durum daha da kötüye gitmiştir. Engeli

kaldırmaya çalışırken aniden şiddetli baş ağrısı, eklem ağrısı ve genel halsizlik hissetmeye başlamıştır. Başını çevirdiğinde, kaynak rafının ışınlama konumunda olduğunu görmüş, ancak yakındaki acil durdurma düğmesine basmamış ve hemen ışınlama odasından çıkmıştır.

Sonrasında yapılan incelemelerde, operatörün kontrol panelindeki anahtarın "hazır" konumuna getirilmiş olduğu ve bu durumda maruziyetin kaçınılmaz hale geldiği tespit edilmiştir. Ancak, kaynak rafının neden ışınlama konumuna yükseldiği ve operatörün bu durumu fark etmemesinin nedenleri tam olarak açıklanamamıştır. Kazayı araştırmak üzere bir komisyon kuruldu ve iyileştirme önerileri sunuldu. Öneriler uygulanana kadar tesisin işletimi askıya alındı. Tüm öneriler uygulandığında Kasım 1992'deki kaza sonrası gözden geçirmeye kadar işleme geri döndü.

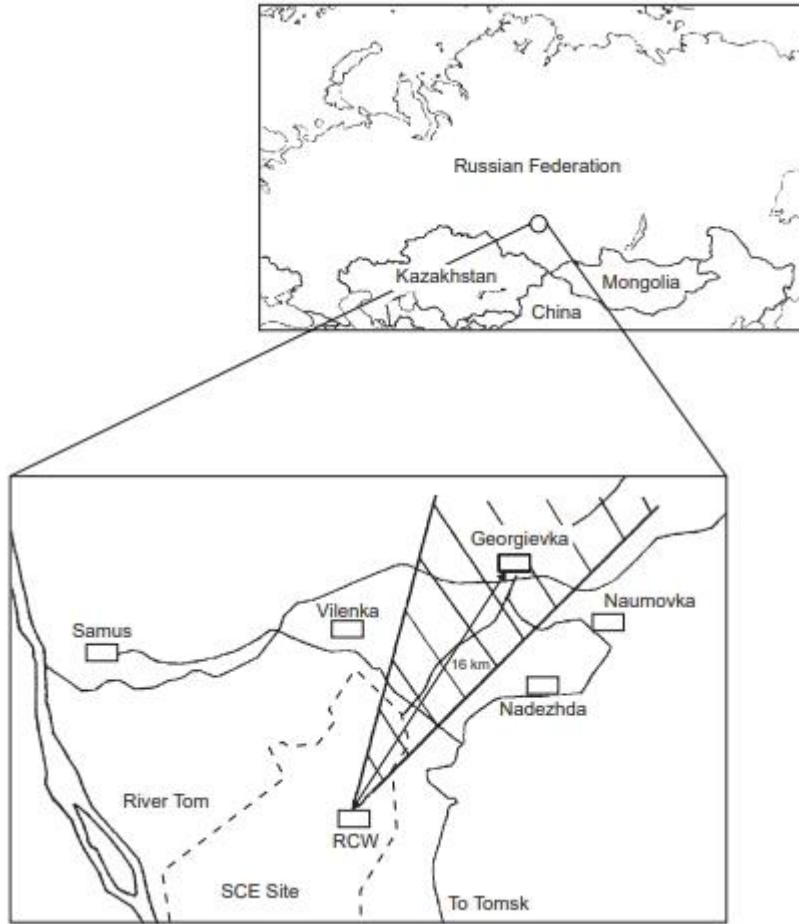
- b) **Sağlık etkileri:** Operatör, maruz kaldıktan hemen sonra baş ağrısı, eklemlerde ve üreme organlarında ağrı, genel olarak kötü hissetme ve nefes almada zorluk gibi akut semptomlar yaşamıştır. Bu semptomlar, hızla gelişmiş ve ciddi bir radyasyon maruziyetinin belirtileri olarak tanımlanmıştır. Radyasyon maruziyeti sonucunda cildinde kızarıklık ve doku hasarı görülmüştür. Özellikle ciltteki bu hasar, vücudun radyasyona maruz kalan bölgelerinde belirginleşmiştir. Operatörün kan ve kemik iliği lenfositlerinde yapılan analizler, radyasyon dozunun ciddiyetini göstermiştir. Kemik iliği ve lenfositlerdeki kromozom anomalileri, maruziyetin etkilerini doğrulamıştır. Tüm vücut dozunun 11 Gy olduğu, lokalize bölgelerde ise 20 Gy'ye kadar ulaşabileceği tahmin edilmiştir. Operatörün maruziyetten sonra hastanede 113 gün sonra hayatını kaybetmiştir. Bu, maruziyetin ciddiyetinin ve sağlık sorunlarının son derece önemli olduğunu göstermektedir.
- c) **Çevresel etkiler:** Çevreye etkileri sınırlı kalmış, çalışanların yüksek radyasyona maruz kalması ile sonuçlanmıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** Kazada doğrudan maruz kalan operatör hayatını kaybetti. Bunun sonucunda diğer çalışanların sağlık güvenliği endişeleri arttı. Kazanın ardından, tesis faaliyetlerinin kısıtlanması üretim kaybına ve finansal zarara neden oldu. Daha güvenli çalışma koşulları oluşturmak için yatırım yapılmıştır (IAEA 1996).

4.1.8. Sibirya Kimyasal İşletmeleri (SCE) Tesisi Kazası, TOMSK (6 Nisan 1993)

SCE tesisinde 6 Nisan 1993 tarihinde, nükleer yakıt reaktörü içinde gerçekleşen bir kontrol mekanizması hatası nedeniyle ciddi bir radyasyon kazası meydana geldi. Bu tesis, Rusya Federasyonu'nda o zamanki adıyla Tomsk-7'de bulunuyordu. SCE, Rusya Federasyonu'nun nükleer endüstrisinin bir parçası olup plütonyum ve uranyumun büyük ölçekli üretimiyle ilgilenmekteydi. Kaza, INES'e göre seviye 3'e tekabül etti, yani "ciddi bir olay" ancak personelde aşırı maruziyet yaşanmadı.

- a) **Kaza süreci:** Kaza, reaktör yakıtının yeniden üretimi sırasında meydana geldi. Çözeltilerin iyice karışmasını sağlamak için gereken sıkıştırılmış havanın eksikliği basıncın artmasına neden olmuştur. Basınç vericiden alınan verilerin artması sonucunda çalışan mühendis basıncın düşürülmesini emretmiş. Ancak, yapılan işlemler sonucu basınç yeterli miktarda azalmamış ve artmaya devam etmiştir. Birkaç saniye sonra bir patlama meydana gelmiş ve bina çatısında alevler

görülmüştür. Kazanın ardından radyasyon uyarı sistemleri devreye girmiş ve insanlar güvenli bir alana toplanmıştır. Kaza sonrası acil müdahale hızlı ve etkili olmuştur. İtfaiye kazadan iki dakika sonra gelmiş ve yangını söndürmüşlerdir. Bu tür kazalar genellikle işlem sırasında bir hatadan, kontrol sistemlerinin yetersizliğinden veya bir dizi yönetim ve operasyonel eksiklikten kaynaklanabilmektedir.



Şekil 4.8. Kirlenmiş alanın göreceli büyüklüğü hakkında bir izlenim ile SCE sahasının konumunu gösteren plan (IAEA 1998)

- b) Sağlık etkileri:** Kaza sırasında, doğrudan radyoaktif madde salınımına maruz kalan personel için belirgin bir aşırı doz veya akut radyasyon etkisi rapor edilmemiştir. Bu, kazanın hemen ardından alınan önlemler ve güvenlik protokollerinin etkili olduğunu göstermiştir. Kaza sonrası bölgede yaşayan halkın, radyoaktif maddelere uzun süreli maruz kalma nedeniyle sağlık üzerinde etkileri olabileceği dikkate alınmıştır. Ancak, izin verilen radyasyon doz sınırlarının altında kalınmıştır. İlerleyen dönemlerde kanser riskinde artış veya diğer radyasyonla ilgili sağlık sorunları potansiyel riskler arasında değerlendirilmiştir.

- c) **Çevresel etkiler:** Kazada radyoaktif maddenin ana salınımı, binanın yan duvarlarında ve çatısındaki büyük deliklerden gerçekleşmiştir. Salınan toplam radyoaktif aktivitenin 25.3 ile 36.7 TBq arasında olduğu tahmin edilmiştir. Radyoaktif partiküller toprağa düzensiz bir şekilde dağılmış ve sıcak partiküller nedeniyle küçük alanlarda yoğun beta akışı tespit edilmiştir. Havadan yapılan ölçümlerde Nb-95 dışında diğer radyoaktif maddelerin konsantrasyonları tespit edilemeyecek kadar düşük olmuştur. Nehirlerden alınan su örneklerinde, kontaminasyon seviyeleri genellikle tespit edilebilir seviyelerin altında kalmıştır. Bu etkiler, kaza sonrası alınan acil müdahale ve temizlik önlemleri sayesinde zamanla azaltılmıştır. Radyoaktif maddelerin yarı ömürleri nedeniyle dış doz oranları zamanla hızla azalmış ve 1994 başlarında ihmal edilebilir seviyelere düşmüştür.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** SCE'deki kaza, yerel ekonomi, sağlık ve sosyal yapı üzerinde önemli sosyoekonomik etkiler yaratmıştır. Bu etkiler, ekonomik faaliyetlerin yeniden düzenlenmesi, halk sağlığının korunması, çevre güvenliğinin sağlanması ve toplumsal güvenin yeniden inşa edilmesi açısından önemli adımların atılmasını gerektirmiştir. Uzun vadede, kazanın etkileri dikkate alınarak bölgesel kalkınma stratejileri ve güvenlik politikaları şekillendirilmiştir (IAEA 1998).

4.1.9. Tammiku Radyasyon Kazası (1994)

Tammiku kazası, 21 Ekim 1994 ile 17 Kasım 1994 tarihleri arasında, Estonya'nın Tammiku köyünde gerçekleşmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Üç kardeş, bir atık deposuna izinsiz girip kaynağı içeren metal konteynır buldular. Konteynerin açık tüpünden silindir kaynak kayıp düştü. Bunun radyoaktif bir kaynak olan sezyum-137 kaynağı olduğu sonradan anlaşıldı. Kardeşlerden biri kaynağı alarak cebine koydu ve yakınlardaki evine götürdü. Adam daha sonra kötü hissetmeye ve kusmaya başladı. Bacağı ve kalçasındaki yaralanmalar sonrası hastaneye kaldırıldı. Yaralanmanın radyasyon maruziyetinden kaynaklandığı anlaşılmadı. Radyasyon kaynağı evde kalmaya devam etti ve bir çocuk daha ellerindeki şiddetli yanıklarla hastaneye kaldırıldı. Doktor yaralanmanın radyasyon kaynaklı olduğu teşhisini koydu. Kaynak evden yetkililer tarafından alınıp Tammiku deposuna geri götürüldü.



Şekil 4.9. Kaynağın bulunduğu depo (IAEA 1998)

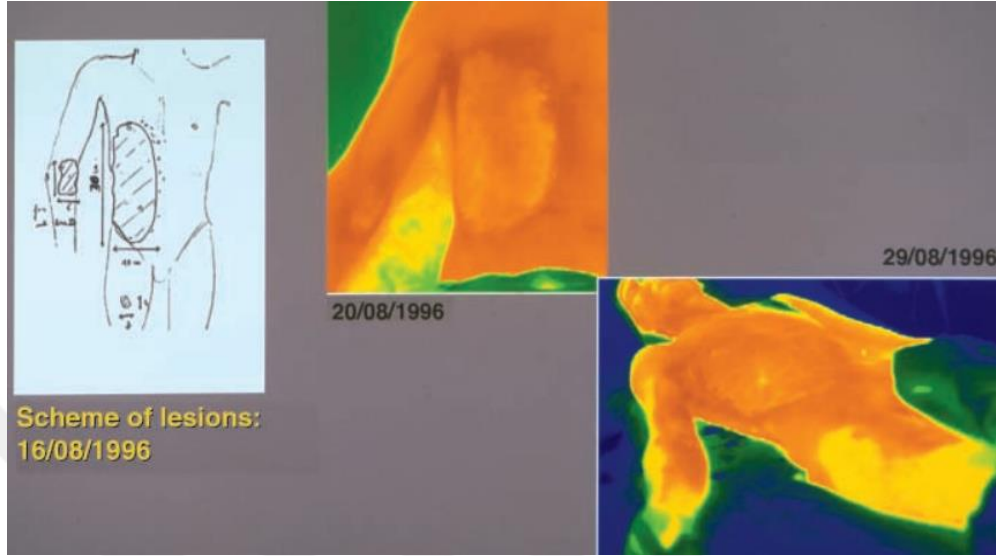
- b) Sağlık etkileri:** Radyoaktif kaynağı cebinde taşıyan kardeş ciddi derecede radyasyona maruz kalmıştı. Hızla gelişen lokal ciddi yaralanmalar ve genel durumunun kötüleşmesi sonucunda 12 gün sonra, 2 Kasım 1994 tarihinde öldü. Kazada en çok etkilenenlerden biri de ölen adamın oğlu oldu. Oğlan aşırı radyasyona maruz kalmıştı ve ciddi kemik iliği aplazisi yaşadı. Bu durum, sol elindeki radyoaktif kaynakla doğrudan temas etmesiyle ilişkilendirilen yerel yanıklarla karmaşık hale geldi. Yoğun bakım gerektiren bir süreçten sonra birkaç ay içinde iyileşti. Diğer bireylerde değişen düzeylerde etkiler görüldü. Bazılarına akut radyasyon sendromu, bazılarına ise lokalize radyasyon yanıkları teşhis edildi. Kazadan sonra tıbbi takip yapıldı ve bazı kişilerde kemik iliği aplazisi gibi ciddi komplikasyonlar geliştiği gözlenmiştir.
- c) Çevresel etkileri:** Kaynağın evin içinde bulunduğu yerlerde doz oranları 1.2 Gy/h civarındaydı. Diğer odalarda ise doz oranları yaklaşık 50 mGy/h olarak ölçüldü. Ev dışındaki bölgelerde, özellikle 200 metre yarıçapındaki alanlarda, doz oranları 0.4 µGy/h'nin üzerindeydi. Yüksek radyasyon seviyeleri nedeniyle, evin çevresinde bulunan toplam 15 ev tahliye edildi. Kaynağın bulunduğu ev, kurtarma işlemi tamamlandıktan sonra tahliye edilen bölgedeki evlerde radyoaktif kontaminasyon arandı ve büyük ölçüde temizlik yapıldı. Bazı evlerdeki kontaminasyon seviyeleri temizlendikten sonra bile kabul edilebilir seviyelerin üzerinde kaldı. Tammiku radyoaktif atık imha tesisinin güvenlik prosedürlerinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Bunun sonucunda ülke genelindeki hurda metal depolarında radyoaktif kontaminasyon denetimleri yapıldı. Ocak 1995'te Tallinn-Narva otoyolu boyunca yapılan denetimlerde, ikinci bir radyoaktif kaynak bulundu. Bu kaynak da Sezyum-137 idi ve aktivitesi 1.6 TBq olarak ölçüldü. İkinci kaynağın bulunduğu bölge çocuklar ve yetişkinler tarafından ziyaret edilen bir alandı. Ancak bu kişilerde radyasyon hastalığı belirtileri bulunmamıştır.
- d) Sosyoekonomik etkileri:** Kazadan sonra yerel halkın radyasyon etkilerine maruz kalıp kalmadığını belirlemek için kapsamlı sağlık taramaları yapıldı. Bu taramalar hem zaman hem de kaynak açısından önemli maliyetler doğurdu. Radyasyon kazası haberinin yayılması, bölgedeki insanların yaşamlarında ciddi bir stres ve endişeye neden olmuştur (IAEA 1998).

4.1.10. İran İslam Cumhuriyeti Gilan Radyasyon Kazası (24 Temmuz 1996)

Gilan Radyasyon Kazası, İran'ın Gilan eyaletinde 24 Temmuz 1996'da fosil yakıtlı enerji santralinde meydana geldi. INES seviye 3 olarak sınıflandırıldı. Bu kaza, radyolojik tehlike açısından ciddi bir olay olarak değerlendirilmiş ve yerel sonuçları olmuştur.

- a) Kaza süreci:** Kaza bir fabrikada radyografi amacıyla kullanılan iridyum kaynağının bildirildiğine göre radyografi kabındaki kilidin arızalanması nedeniyle kablосundan ayrılıp düştü ve kayboldu. Bir işçi, Ir-192 endüstriyel radyografi kaynağını buldu. Göğüs cebine koydu ve bu kaynak orada yaklaşık 1,5 saat kaldı. İşçi yüksek radyasyon dozuna maruz kaldı.
- b) Sağlık etkileri:** İşçi baş dönmesi, mide bulanması ve göğüste yanma hissi yaşamaya başladığında bunun bu nesneden kaynaklandığını düşünüp onu bulduğu yere bıraktı. Kaynak fark edilince yetkililer 600 personelin tamamının kan kontrollerinin tekrarlanmasını önerdi. Kan testleri sonucunda kazaya maruz kalan

işçi hariç tüm örnekler normal olduğu rapor edildi. İşçi maruz kaldığı yüksek radyasyon dozunun etkilerini yönetmek için yoğun bakım gerektirdi. Göğsünde dirsek ve ellerinde lezyonlar ve kabarcıklanma görüldü. Maruziyet sonrası tedavi ve izleme süreçleri boyunca genel olarak sağlık durumu stabildi. Hayati parametreleri normaldi.



Şekil 4.10. İşçinin 28. günde göğüs ve sağ dirseğin termografisi (IAEA 2002)

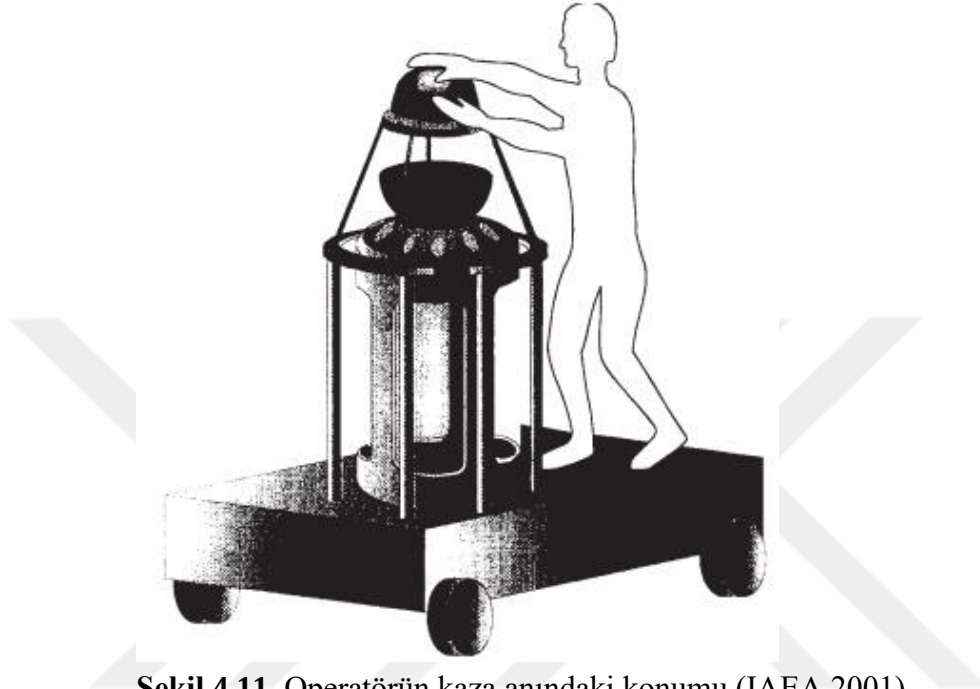
- c) **Çevresel etkiler:** Gilan Kazası, çevreye ciddi zararlar vermekten ziyade, işçinin doğrudan maruz kaldığı radyasyon nedeniyle özellikle insan sağlığını etkiledi. Bu kaza, işçinin yanlışlıkla maruz kaldığı radyasyon sonucu ciddi sağlık sorunları yaşamasına neden oldu.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** İşçinin, kazadan sonra uzun bir süre boyunca sağlık durumu ciddi şekilde etkilendi. Kaza sonrası yapılan genel kan tetkikleri ve diğer sağlık değerlendirmeleri, işçinin ve diğer potansiyel maruz kalanların sağlık durumunu belirlemek için gereken önemli adımlardı. Ancak, bu tetkiklerin işçi ve işveren üzerindeki mali etkileri oldu (IAEA 2002).

4.1.11. Rusya Federasyonu-Sarov Radyasyon Kazası (17 Haziran 1997)

17 Haziran 1997'de Rusya Federasyonu'ndaki Sarov Nükleer Merkezi'nde reaktörler için yakıt araştırması yapan bir tesiste üst düzey bir teknisyen olarak çalışan bir fizikçi, yüksek zenginleştirilmiş uranyumun bir montajı ile kritiklik kazası yaşayarak ciddi şekilde radyasyona maruz kaldı. Bu olay, kritik öneme sahiptir çünkü nükleer tesislerde çalışan işçilerin güvenliğine yönelik ciddi bir tehdidi temsil eder. INES 4. Seviye olarak belirlenmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Teknisyenin kritik bir montajı gerçekleştirirken bir bileşenin elinden kayması sonucu meydana gelmiştir. Bu daha önce işlev görmekte olan ve ağırlıklı olarak bakır reflektöre sahip bir kritik montajdı. Teknisyenin bu montajı, önceki tecrübelerine dayanarak tanıdığı bir sistem olarak kabul etmesine rağmen, kazanın gerçekleştiği deney salonunda yalnız çalışıyordu, ki bu da belgelenmiş

prosedürlerin ihlaliydi. Montaj sırasında, bir üst reflektör bileşeni teknisyenin lastik eldivenli elinden kayarak, daha önceden yapılmış olan ve zenginleştirilmiş uranyum çekirdeği içeren alt kısmına düşmüştür. Bu olay sonrasında, teknisyen kritik bir kaza meydana geldiğini fark etmiş, deney salonunu terk etmiş ve deney salonunu komşu odalara bağlayan sürgülü kapıları kapatmış ve olayı üstlerine ve meslektaşlarına bildirmiştir.



Şekil 4.11. Operatörün kaza anındaki konumu (IAEA 2001)

- b) Sağlık etkileri:** Teknisyen, kritik bir maruziyet yaşamıştır ve hemen belirtiler göstermeye başlamıştır. Maruziyet sonucunda mide bulantısı, kusma, yorgunluk, baş dönmesi, deride kızarıklık ve şişme gibi semptomlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca, vücut ısısında artış, tansiyon düşüklüğü ve kalp atışlarında artış gibi bulgular da tespit edilmiştir. Kan testlerinde, lenfopeni gibi birçok anormallik belirlenmiştir. Maruziyet sonucu, teknisyenin durumu hızla kötüleşmiş ve derin dokuları etkileyen ciddi yanıklar gelişmiştir. Teknisyenin durumunun kritik olduğu belirlenmiş ve özel bir hastaneye nakledilmiştir. Ancak, tüm tıbbi müdahalelere rağmen, maruziyet sonucu teknisyen hayatını kaybetmiştir. Bu olayın sağlık üzerindeki etkileri, yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan bireylerde görülebilecek ciddi sonuçları yansıtmaktadır.
- c) Çevresel etkileri:** Kazanın neden olduğu radyasyon sızıntısı, çevresel kirliliği veya yaygın kontaminasyonu tetiklemediği için çevre üzerindeki etkiler sınırlı kalmıştır. Bu durum, bölgedeki çevresel restorasyon ve dekontaminasyon çabalarını minimize etmiştir.
- d) Sosyoekonomik etkileri:** Kritiklik kazaları, nükleer tesislerde çalışan işçilerin maruz kaldığı ender ancak ciddi olaylardan biridir. Bu tür kazaların sosyoekonomik etkileri genellikle sınırlı olsa da etkilenen işçi ve ailesi için önemli sonuçları olabilmektedir (IAEA 2001).

4.1.12. Gürcistan Lilo Eğitim Birliği Kazası (9 Ekim 1997)

Lilo Eğitim Merkez sahasında 1997 yılında meydana gelen radyasyon kazası, dağınık şekilde bulunan çok sayıda radyasyon kaynağının uygun güvenlik protokolleri takip edilmeden bulunduğu anlaşılmıştır.

- a) **Kaza süreci:** Nisan-Ağustos 1997 tarihleri arasında, merkezdeki askerlerin vücutlarının çeşitli bölgelerinde deri lezyonları gelişti. Başlangıçta, Gürcistan Ordusu'ndaki tıp doktorları lezyonların nedenini termal yanıklara veya alerjik temas dermatitine gibi görünen bir durum olarak gördüler. Ancak, ağustos ayında Moskova Biyofizik Enstitüsü'nden bir hematolog ve bir dozimetre uzmanı, Gürcü doktorlarının haziran ayında yaptığı ilk teşhisleri 'farklı derecelerde radyasyon yanıkları' olarak onayladılar. 26 Ağustos'ta, yeraltı sığınacağının yakınında bir radyasyon sıcak noktası keşfedildi ve doz hızı yaklaşık 45 mGy/saat olarak ölçüldü.



Şekil 4.12. Yeraltı sığınacağının girişi (IAEA 2000)

5 Eylül 1997'de, aynı personel yüksek radyasyon seviyelerini doğrulamak için ikinci bir ölçüm yaptı. Gürcü yetkililer, bir fizikçi çalışma grubunu sahadaki radyolojik durumu değerlendirmek üzere kurdu. Çalışma grubu 11 Eylül 1997'de, bir askerin kış ceketinin cebinde bir kaynak buldu. Kaynak yaklaşık 6 mm çapında ve yaklaşık 12 mm yüksekliğinde metal bir silindirdi. Başka bir kaynak sığınaktan uzakta bir futbol sahasında bulundu. Bu şekilde farklı alanlarda ayrıntılı ölçümler yapıldı ve toplam 250.000 m²'lik bir alan tarandı. Alanda toplam 10 kaynak bulundu.



Şekil 4.13. 10'uncu kaynağın bulunduğu hurdalık (IAEA 2000)

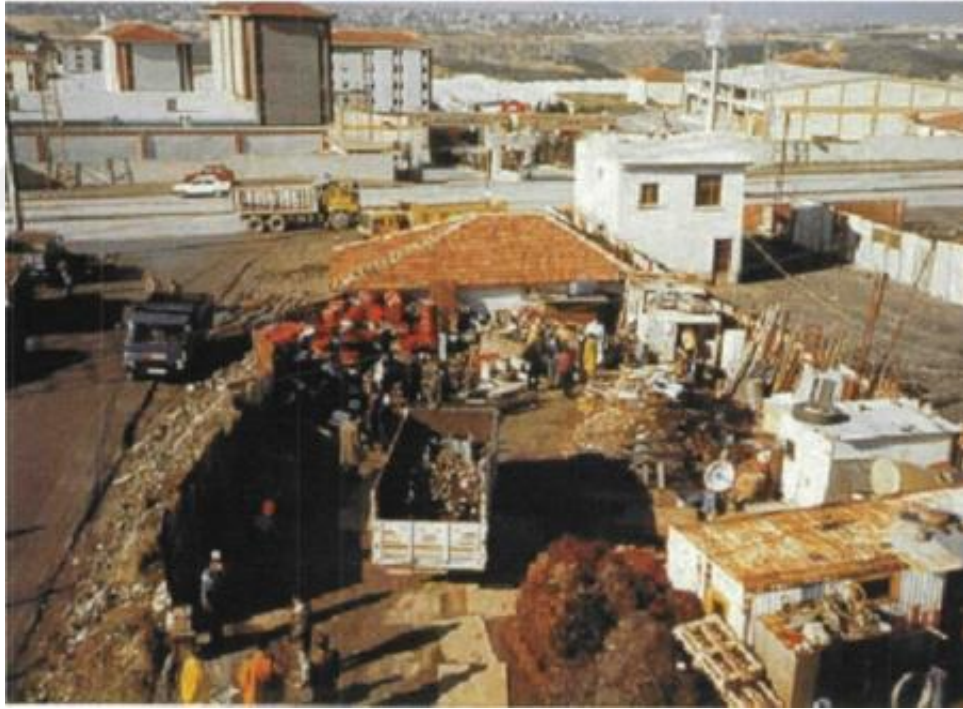
Bu durum kaynakların, uygun güvenlik önlemlerine uyulmadan kaynakların terk edilmesi ve düzenlemelere uygun şekilde transfer etmeyerek veya atık olarak işleyemeyerek ciddi bir güvenlik ihlali yapılması sonucunda etrafa dağılmasının bir sonucudur.

- b) **Sağlığa etkileri:** Olayın ardından 11 kişi radyasyona maruz kalmış ve cilt hastalıkları geliştirmiştir. Bu hastalıkların ciddiyeti, birkaç ay boyunca kesintili maruziyetlerin olması ve maruziyetlerin başlangıç zamanı ve koşullarının bilinmemesi nedeniyle daha da karmaşık hale getirmiştir. Hastaların çoğu radyasyon kaynaklı cilt lezyonları yaşamış, bazılarına ise kronik radyasyon sendromu teşhisi konmuştur. Tedavi için Paris ve Almanya'daki özel hastanelere sevk edilen hastalar, cilt sendromu semptomları yaşamıştır. Ancak, bu semptomlar hastadan hastaya farklılık göstermiş ve tedavi gereksinimleri de değişmiştir. Ayrıca, maruziyetin vücut geneline yayıldığı düşünülerek, hematopoiesis ve üreme organları üzerinde de olumsuz etkiler olabileceği öngörülmüştür.
- c) **Çevresel etkileri:** Kaza, çevre üzerinde de önemli etkilere yol açmıştır. Öncelikle, Lilo Eğitim Merkezi'nin çevresindeki alanlarda yüksek radyasyon seviyeleri tespit edilmiştir. Bu yüksek seviyeler, çevredeki toprağın ve çevresel unsurların radyoaktif kirlenmesine neden olmuştur. Radyasyon kaynaklarının bulunması ve kazanın ardından yapılan radyolojik izleme çalışmaları, çevredeki kirliliği belirlemeye yardımcı olmuştur. Radyasyonun etkilerinin izlenmesi ve çevresel kirliliğin değerlendirilmesi, kaza sonrası önemli bir süreç olmuştur. Ayrıca, kaza sonrası alınan uluslararası yardım talepleri ve uzmanların gönderilmesi, kirliliğin değerlendirilmesi ve temizlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Kazanın çevresel etkileriyle başa çıkma çabaları, bölgedeki çevre sağlığı ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** Kazaya maruz kalan kişiler, hem sağlık sorunları nedeniyle iş gücü kaybına uğradı hem de tıbbi tedavi masrafları nedeniyle ekonomik olarak zor durumda kaldı. Uluslararası tıbbi destek sağlanmış olsa da uzun vadeli ekonomik etkiler ve sağlık hizmetlerine erişim sorunları devam etti (IAEA 2000).

4.1.13. İstanbul Radyasyon Kazası (Aralık 1998-Ocak1999)

Dünya genelinde yüksek aktiviteli Kobalt-60 kaynaklarının yaygın bir kullanımı kanser hastalarının tedavisinde gerçekleşmektedir. İstanbul'da yaşanan bu kazada bu kaynakların birinin hurdacılar tarafından parçalanması sonucu yaşanmıştır. INES seviyesi 3 olarak belirlenmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Olay, 10 Aralık 1998'de İstanbul'un Küçükçekmece ilçesindeki İkitelli bölgesinde meydana geldi. Hastanelerden Kobalt-60 kaynaklarını toplayan bir firma 2 adet Kobalt-60 kaynağını bir depoya yerleştirmiş ancak deponun el değiştirmesi ile depodaki malzemeler hurda olarak satılmıştır. Bu iki kaynağı satın alan kişiler kapları açıp zırhlı konteynerleri parçalayarak kendileriyle birlikte birkaç kişiyi, farkında olmadan en az bir zırhsız Kobalt-60 kaynağından yayılan radyasyona maruz bırakmıştır. Yaklaşık iki hafta boyunca, sökülmüş konteyner parçaları ve en az bir korumasız kaynak, yerel bir hurdacıya götürülmeden önce hurdacılar tarafından bir konut alanında bırakıldı. Hurda alanından kalkanlı konteynerin çıkartılması için çalışmalar yapıldı. Kurtarılan kaynak kapsülü dış hasar göstermemiş ve radyoaktif madde sızıntısı olmamıştı. Doz hızı ölçümlerinde, kaynağın aktivitesi 3.3 TBq olarak tahmin edilmiştir.



Şekil 4.14. Kurtarma çalışmaları yapılan hurdalık (Z. GÖKALP; IAEA 2000)

Kaynak kurtarma operasyonuna dahil olan kişilerden sağlık fizik ekibinin kıdemli üyesi, başlangıç doz hızı ölçümünü yaparken ve kaynağı kurtarma operasyonunda yer alırken 5.47 mSv aldı. İkinci en yüksek doz 2.05 mSv'dir. Kaynağı geri alan kişi 0.6 mSv almıştır. Dört radyasyon konteyneri olduğu biliniyordu. Birinin boş olduğu bildirilmişti. Diğer üçünde de birer harcanmış Kobalt-60 kaynağı vardı. Hurdacıların parçaladığı kaynak ve hurdadan kurtarılıp imha edilen bir konteyner bulunmuştu. Bir diğer kaynak ise radyasyon taramaları sonucunda

bulunamamıştır. Bunun üzerine konteynerin başından beri boş olabileceği veya varsayılandan çok daha düşük aktiviteye sahip olabileceği düşünüldü, ancak kesin olarak kanıtlanamadı.

- b) **Sağlık etkileri:** 13 Aralık 1998'de, kaynağa yakın temas halinde bulunan kişiler mide bulantısı ile başlayan ve hızla kusmaya ilerleyen bir rahatsızlık yaşamaya başladılar. Etkilenen kişiler hastaneye gitti fakat radyasyon kazası geçirdikleri teşhis edilemedi. Hastalıkların nedeni uzun süre anlaşılmadı. Kazanın tanınmasından sonra yapılan araştırmalar sonucunda, korunaksız kaynağa yakınlaşmış olabilecek 404 kişi tıbbi veya hematolojik kontrollerlerden geçti. Bunların içinde, toplamda 18 kişi hastanelere kabul edildi. Hastaların 10'unda akut radyasyona maruz kalmanın klinik belirtileri görüldü. 5 hastanın aldığı dozun 2 ile 4 Gy arasında olduğu, diğer 5 kişinin ise 1 ile 2 Gy arasında olduğu tahmin edilmiştir. Daha ciddi etkilenen beş kişi 45 gün hastanede kaldı. Bunun yanında, bir kişinin sağ elinin iki parmağında radyasyon kaynaklı deri yaralanma belirtileri vardı. 45 günün sonunda, parmağının durumu iyileşme gösterdi. Ampütasyon gerekeceğine dair bir işaret barındırmıyordu.
- c) **Çevreye etkileri:** Kazanın ardından yapılan detaylı çevresel araştırmalar, radyoaktif kirliliğin sınırlı olduğunu ve çevresel kalıcı bir etki yaratmadığını göstermiştir. Kobalt-60'ın niteliği ve olayın doğası gereği kalıcı bir çevresel radyasyon kirliliğine yol açmadığını ortaya koymaktadır. Kazanın boyutu, doğrudan maruz kalanların belirli bir süre ışınlamalarından ibaret olup, parçacık veya gaz tarzında bir yayılım söz konusu olmamıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** 1999 yılında İstanbul'da meydana gelen radyasyon kazası, Türkiye'de bilinen ilk büyük radyolojik kaza olarak kaydedilmiştir. Kazanın hemen ardından, kamu ve medya, olayın ciddiyetini yanlış bir şekilde değerlendirdi ve başlangıçta Çernobil faciası ile karşılaştırdı. Bu yanlış algı, kamuoyunda büyük bir endişe ve panik yarattı. Halk, günlük yaşamlarında radyasyon riski konusunda endişeli hale geldi ve bu da ekonomik aktivite üzerinde olumsuz bir etkiye neden oldu. Terkedilmiş kaynağın başarılı bir şekilde kurtarılması haber yapıldı ve bunun halkın endişesini hafifletmeye yardımcı olduğu bildirildi. Kazanın halk üzerindeki psikolojik etkisi yüksekti kazada en çok etkilenen aile, raporlara göre anksiyete yaşadı ve arkadaşlarından ve akrabalarından sosyal izolasyon yaşamıştır (IAEA 2000; https://teknolojikkazalar.org/show_webpage/4d53fe7a0596d).

4.1.14. Yanango Radyasyon Kazası (Şubat 1999)

Peru'daki radyolojik kaza, 20 Şubat 1999'da Yanango hidroelektrik santralinde gerçekleşti.

- a) **Kaza süreci:** Bir kaynakçı, santralde çalışırken farkında olmadan bir endüstriyel radyografi kaynağı olan İridyum-192 içerikli bir radyografi kaynağını bulmuş ve sağ eliyle sağ arka cebine koymuştur. Kaynakçı, kaynağı birkaç saat cebinde tutmuş ve yüksek dozda radyasyona maruz kalmıştır.



Şekil 4.15. Kaynakçının bulduğu radyasyon çubuğu (IAEA 2000)

Eve döndüğünde, eşini ve çocuklarını da düşük dozda radyasyona maruz bırakmıştır. Bunun sonucunda işçi ve 4 aile üyesi olmak üzere 5 kişi maruz kalmış oldu. Kaynağın kayıp olduğunu anlayan radyografi operatörü, hemen kaynağı aramış ve işçinin evinde bulup ve geri almıştır.

- b) Sağlığa etkileri:** Kaynakçı, cebinde taşıdığı kaynak nedeniyle ciddi dozda radyasyona maruz kalmıştır. Doktora gittiğinde ona böcek ısırığı olduğu söylenip yanlış teşhis ve tedavi almıştır. Zaman geçtikçe bacakta ciddi doku hasarı meydana gelmiştir. Radyasyon maruziyeti teşhisi konulabildiğinde maruz kaldığı etkin dozun 1,1- 1,5 Sv arasında ve eşdeğer dozun ise 50 Sv'ten yüksek olduğu tahmin edilmiştir. Kaynakçının el ve bacaklarında lokal yanıklar oluşmuş ve sağ bacağının ampute edilmesi gerekmiştir. Eşi ve çocuklarının maruz kaldıkları etkin doz 1 Sv'ten az olduğu tahmin edilmiştir ve hafif semptomlar gözlemlenmiştir. Ciddi sağlık sorunları gelişmemiştir. Kaynakçı önce Peru'da tedavi görmüş, daha sonra daha ileri tedavi için Fransa'ya gönderilmiştir. Tedavide yaraların ve radyasyonun neden olduğu yanıkların iyileştirilmesine odaklanılmıştır.
- c) Çevreye etkileri:** Kaynağın geri alınması sonrasında çevrede radyasyon ölçümleri yapılmış ve kontaminasyonun insan sağlığına ciddi bir tehdit oluşturmadığı belirlenmiştir.
- d) Sosyoekonomik etkiler:** İşçinin bacağının amputasyonu ve uzun süreli tedavi gereksinimi hem kişisel hem de ailesel düzeyde ekonomik zorluklara neden olmuştur. Kaza, yerel toplulukta radyasyon ve güvenlik konusunda endişelere neden olmuştur. Bilinçlenme faaliyetleri ve güvenlik protokollerinin gözden geçirilmesi gerekmiştir (IAEA 2000, Anonymous 3).

4.1.15. Japonya Tokaimura Nükleer Yakıt İşleme Tesisi Kazası (30 Eylül 1999)

Tokaimura'daki nükleer yakıt işleme tesisinde gerçekleşen kaza, çalışanların güvenlik prosedürlerini ihlal etmesi ve yanlış işlemleri sonucu meydana geldi. İki işçinin ölümü ve bir işçinin maruziyeti ile sonuçlanan kaza, INES seviyesi 4 olarak belirlendi (LAKA).

- a) Kaza süreci:** Kaza, çalışanların belirtilen güvenli kütle sınırından 7 kat fazla olduğu anlaşılan, %18,8 oranında zenginleştirilmiş uranyum çözeltisini prosedür dışı bir uygulamayla doğrudan işlem tankına dökmesi sonucu meydana geldi. Bu durum tankta kritik kütlenin aşılmasına yol açarak zincirleme nükleer reaksiyona neden oldu. Kritik kütlenin aşılması atomik bir patlamanın başlangıcını tetikledi fakat patlama daha da büyümeden durduruldu.



Şekil 4.16. Kazaya neden olan durumun şemasın

(https://radioactivity.eu.com/articles/nuclearenergy/tokaimura_accident.)

- b) Sağlık etkileri:** Kazada karışımı yaparken huniyi tutan işçi bilincini kaybetti ve kusmaya başladı. Bilinci yerine geldikten sonra da kusmaya devam ediyor ve aynı zamanda ishal, ateş belirtileri gösteriyordu. Hastanın kusmuk örneğinden alınan örnekte ^{24}Na izotopu tespit edilmiş ve nötron ışınımına maruz kaldığı doğrulanmıştır. İşçinin lenfosit sayısı düşük ve kemik iliği sayısı azdı. Uygun donör olan kız kardeşinden kök hücre nakli yapıldı. Bu dozlar diğer vakalarda iki hafta içinde ölümle sonuçlanmıştı. Fakat tüm tedavilere rağmen 83. günde çoklu organ yetmezliği nedeni ile öldü. Yüksek maruziyete kalan, uranyum çözeltisini döken, diğer işçi yaklaşık bir saat sonra kusmaya başladı. Lenfosit sayısının ve kemik iliği hücre sayısı azdı. Sağ el ve ön kolunda şişlikle beraber ağrı olduğu rapor edildi. Kemik iliği ciddi zarar gördüğü için, uygun donör bulunmadığından, göbek kordonu kan hücre nakli gerçekleştirildi. Toplamda 49 kişi yüksek seviyede radyasyona maruz kaldı, bu da kısa vadeli sağlık sorunlarına ve potansiyel olarak uzun vadeli kanser riskine yol açmıştır.
- c) Çevreye etkileri:** Radyasyon yayılımı tesisin çevresinde yüksek seviyelerde tespit edildi, ancak kontaminasyon sınırlı kaldı ve geniş çaplı bir çevresel kirlenme yaşanmadı. Çevredeki alanlarda radyasyon izleme çalışmaları yapıldı ve yerel halk koruyucu önlemlerle bilgilendirilmiştir.
- d) Sosyoekonomik etkileri:** Kaza sonrasında 161 kişi tesis yakınlarından tahliye edildi ve geniş bir bölge için geçici sığınak uyarısı yapıldı. Tesisin kapatılması ve temizlenmesi için önemli maliyetler harcandı. Olay, Japonya'nın nükleer enerji politikaları üzerinde büyük bir baskı yarattı ve endüstride reformlara yol açmıştır (IAEA 1999).

4.1.16. Tayland Samut Prakarn Radyasyon Kazası (Ocak sonu ve Şubat 2000)

Kaza, 30 Ocak- 1 Şubat 2000 tarihleri arasında, Tayland'ın Samut Prakarn kentinde meydana gelmiştir. Olayın, kullanımı sona ermiş bir Kobalt-60 teleterapi başlığının güvenli olmayan bir depolama alanından alınarak hurda metal olarak satılması sonucu gerçekleşmiştir. INES seviyesi 5; geniş sonuçları olan kaza olarak belirlenmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Hurda işçileri, terk edilmiş kaynak kapsülü parçalamaya çalışırken bir çatlağa sebep olmuş ve radyasyon sızıntısı yaşanmıştır. İlk belirtiler ortalarında hissedilmeye başlanmış, birkaç kişi hastaneye başvurmuştur. Tıbbi personel radyasyon kaynaklı semptomlar tespit edince, durum yetkililere bildirilmiştir. Birkaç kişinin hastaneye başvurması ve semptomlarının radyasyon maruziyetine işaret etmesi üzerine, yetkililer harekete geçmiştir. Olay yeri tespit edilip kontrol altına alınmış, kaynak güvenli bir şekilde depolanmıştır. Kaynak, 20 Şubat 2000'de bulunmuş ve güvenli bir şekilde taşınmıştır. Olay yerinde çevresel kontaminasyon olmamış, fakat birkaç kişi yüksek dozda radyasyona maruz kalmıştır.
- b) **Sağlık etkileri:** Maruz kalan kişilerin bir kısmı, ciddi akut radyasyon sendromu belirtileri göstermiştir. Toplamda 10 kişi etkilenmiştir. 4'ü 6 Sv'in üstünde, geri kalanı 2 Sv etkin doza maruz kalmıştır. Mide bulantısı, cilt yanıkları, kemik iliği fonksiyon bozuklukları gibi belirtiler göstermişlerdir. Maruziyet yaşayan 3 kişi, kazanın ardından iki ay içinde hayatını kaybetti. Kalan kişilerde de ciddi tıbbi sorunlar oluşmuş, uzun süreli tedavi süreçleri gerekmiştir.



Şekil 4.17. Kaynak düzeneğinden silindirik parçalar (soldaki ögenin içi boştur; daha önce 60Co kaynağını çevreledi) (IAEA 2002)

- c) **Çevresel etkiler:** Kazanın çevresel etkileri sınırlı kalmış, kaynak kapsülü bozulmamış ve sızıntı olmamıştır. Olay yerinde hızlı bir şekilde güvenlik önlemleri alınmış ve radyasyonun daha geniş bir çevreye yayılması engellenmiştir.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** Kaza, Samut Prakarn toplumunda büyük bir endişe ve korku yaratmıştır. Maruz kalan kişilerin aileleri ve yakın çevreleri de psikolojik ve duygusal etkiler yaşamıştır. Kaza sonrası temizlik ve güvenlik önlemleri için önemli miktarda kaynak harcanmıştır. Hurda metal işleme sektöründe geçici iş durdurmaları ve güvenlik kontrolleri yapılmıştır, bu da ekonomik faaliyetleri

etkilemiştir. Tayland, uluslararası düzeyde eleştiriler almış ve güvenlik standartlarının artırılması için adımlar atmak zorunda kalmıştır. Kaza, radyolojik güvenlik konularında uluslararası iş birliği ve standartların önemini vurgulamıştır (IAEA 2002).

4.1.17. Polonya Białystok Onkoloji Merkezi Radyasyon Kazası (27 Şubat 2001)

27 Şubat 2001'de Białystok Onkoloji Merkezi'nde yaşanan elektrik kesintisi, radyoterapi görürken beş hastanın aşırı radyasyona maruz kalmasına neden oldu.

- a) **Kaza süreci:** Kazaya, lineer hızlandırıcının çalışmasını durduran geçici bir elektrik kesintisi neden oldu. Elektrik geri geldikten sonra, cihaz yeniden başlatıldı ve tedaviye devam edildi. Yaşanan arıza nedeni ile doz hızı göstergesi etkilenmiş, verilen dozun olduğundan düşük olduğunu düşünülmüş, sorun görülmemiştir. Ancak, iki hasta tedavi sırasında kaşıntı ve yanma hissi yaşadı, bu da personelin tedaviyi durdurmasına neden oldu. Yapılan ölçümler, cihazın beklenenden çok daha yüksek dozlarda radyasyon verdiğini ortaya koydu. Güvenlik sistemindeki bir elektronik bileşenin arızalı olduğu belirlendi ve sonuç olarak, beş hasta farklı derecelerde yerel radyasyon yaralanmaları geliştirdi.
- b) **Sağlığa etkileri:** Kazanın ardından beş hasta ciddi radyasyon yaralanmaları yaşadı. Yaralanmaların ciddiyeti zamanla arttı ve cerrahi müdahale gerektirdi. Üç hasta, Polonya'daki Kanser Merkezi'nde cerrahi tedavi gördü. IAEA'nın yardımıyla, kalan iki hasta tedavi için Paris, Fransa'daki Curie Enstitüsü'ne transfer edildi. Üç hastanın 60-80 Gy arası dozlarda radyasyona maruz kaldıkları düşünüldü.
- c) **Çevresel etkileri:** Olayın doğrudan çevresel etkilerinden ziyade, esas olarak etkilenen hastalar ve sağlık personeli üzerinde odaklandığı anlaşılmaktadır. Radyasyon sızıntısının lokalize kalmış ve çevrede geniş çaplı bir kirlenmeye neden olmamıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Kaza, sağlık sektöründe önemli yankılar uyandırdı ve Polonya sağlık otoritelerinin hızlı ve kapsamlı bir yanıt vermesine neden oldu. IAEA'nın müdahalesi ile uluslararası bir yardım sağlandı ve Polonya hükümeti kazadan etkilenen hastaların tedavisi için gerekli adımları attı. Kazanın ardından, radyoterapi departmanlarının kalite güvence ve güvenlik önlemlerini artırmaları gerektiği vurgulandı. Bu olay, radyolojik cihazların güvenliği ve doğru işleyişi konusundaki farkındalığı artırdı ve gelecekte benzer kazaların önlenmesi için düzenleyici çerçevelerin gözden geçirilmesine yol açtı (IAEA 2004).

4.1.18. Lia Radyasyon Kazası (2 Aralık 2001)

2 Aralık 2001'de, Gürcistan'ın Lia bölgesine, terk edilmiş Sr-90 radyoaktif kaynağın bulunması ile bir radyolojik kaza meydana gelmiştir. Bu radyoaktif kaynakların terk edilmiş bir askeri üsse ait olduğu, yanlışlıkla bırakıldıkları ve üzerlerinde herhangi bir uyarı etiketi bulunmaması kazaya yol açmıştır.

- a) **Kaza süreci:** Lia köyünde üç kişi, ormanda odun toplarken iki metal nesne buldu. Bunlar 1295 TBq aktiviteye sahip Stronsiyum-90 kaynaklarıydı. Geceyi ormanda geçiren insanlar kaynakları ısıtıcı olarak kullandı. İlk temasın ardından maruz

kalanlar baş ağrısı, baş dönmesi ve kusma şikayetlerinde bulundu. İlerleyen zamanda kişiler lokal yanma problemleriyle 22 Aralık'ta hastaneye başvurdular. Doktorlar hastaların klinik tablosuna dayanarak, akut radyasyon teşhisi kondu. Kazanın fark edilmesinden sonra, kaynakların yerinin belirlenmesi ve güvenli bir şekilde taşınması için Gürcistan Çevre Koruma ve Doğal Kaynaklar Bakanlığı, DESC (Devlet Ekolojik Güvenlik ve Depolama Departmanı) ve NRSS (Nükleer ve Radyasyon Güvenlik Servisi) gibi çeşitli ulusal kuruluşlar tarafından bir kurtarma operasyonu planlandı. Kurtarma operasyonu sırasında, radyoaktif kaynakların çevresine toprak ve taş yığınları konularak ek bir koruma sağlanmış ve bu, kurtarma ekibinin hazırlık çalışmalarını nispeten düşük radyasyon dozları altında gerçekleştirmesine olanak tanımıştır.

- b) Sağlık etkileri:** Kazanın sağlık üzerindeki etkileri, özellikle radyoaktif kaynağa maruz kalan kişiler üzerinde ciddi olmuştur. Çeşitli sağlık kontrolleri ve tedavi süreçleri, radyoaktif maruziyetten etkilenen kişilere uygulanmıştır. Maruz kalan kişilerde radyasyon yanıkları, kemik iliği baskılanması gibi ciddi sağlık sorunları görülmüştür. Özellikle iki hasta üzerinde yapılan tedaviler detaylandırılmış ve her iki hastanın da uzun süreli tedavi ve bakım süreçlerinden geçtiği belirtilmiştir.
- c) Çevreye etkileri:** Kazanın çevreye etkileri sınırlı olmuştur. Radyoaktif kaynaklar, izole bir alanda bulunduğu ve çevredeki en yakın yerleşim yerlerinin uzak olduğu belirtilmiştir. Bu durum, radyoaktif kaynakların çevreye olan potansiyel tehlikesini azaltmıştır. Ayrıca, radyoaktif kaynakların özel seramik kaplı ve çift kat paslanmaz çelik kapsüller içinde muhafaza edilmesi, çevresel radyasyon veya toksik madde sızıntısı riskini neredeyse tamamen ortadan kaldırmıştır.
- d) Sosyoekonomik etkileri:** Kaza, halk arasında büyük bir korku ve endişeye yol açmıştır. Yerel halkın artan endişesi ve bölgedeki insanların korkuları, hükümeti radyoaktif kaynakların kurtarma operasyonunu hızla gerçekleştirmeye zorlamıştır. Operasyon sırasında kullanılan ekipman ve teknik cihazlar, kurtarma ekibinin eğitimi ve operasyonun maliyeti, Gürcistan devlet bütçesinden karşılanmıştır. Bu durum, ülke ekonomisine ek bir yük getirmiştir (IAEA 2014).

4.1.19. Cochabamba Radyasyon Kazası (Nisan 2002)

2002 yılında Bolivya'da gerçekleşen Cochabamba radyasyon kazası, İridyum-192 kaynağının hatalı taşınması sonucu meydana gelmiştir. INES seviyesi 3, ciddi olay şeklinde değerlendirilmiştir.

- a) Kaza süreci:** Bir radyoaktif kaynak, Cochabamba'da denetimsiz olarak bir otobüs terminalinde bırakıldı. Kaynağın varlığı, 16 saat boyunca fark edilmedi. Kaynağa en yakın olan işçi, bu durumu fark etti. IBTEN'e (Bolivya Teknoloji ve Nükleer Enerji Enstitüsü) olay bildirildi. IBTEN, kaynakla ilgili durumu değerlendirdi ve radyasyon dozlarını hesapladı. İlk doz tahmini, İşçi 1'in maruz kaldığı 0,72 Gy olarak belirlendi. IBNORCA (Bolivya Standartlar ve Kalite Enstitüsü) kazaya karışan dört çalışanın doz değerlendirmeleri ve kan testlerini düzenledi. IBTEN, doz değerlendirmelerini genişletti ve otobüs yolcularının maruziyetini de dikkate aldı. Yaklaşık 2,5 Gy'ye kadar maruziyet olasılığı belirlendi. IBNORCA ve IBTEN, kazaya karışmış olabilecek otobüs yolcularını ve diğer bireyleri bulmak için geniş kapsamlı bir medya kampanyası yürüttü. IAEA (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı) durumu değerlendirmek için Bolivya'ya bir ekip gönderdi.

- b) **Sağlık etkileri:** Kaynağı ilk fark eden işçi 8 saat boyunca 1 metre mesafede kalmasından dolayı maruz kaldığı dozu yaklaşık 0.72 Gy olarak hesapladı. Bunun üzerine acil sağlık muayeneleri önerildi. Kazaya karışan dört çalışan için kan testleri ve sağlık muayeneleri düzenledi. Kazayla ilgili daha fazla bilgi toplandıkça, çalışanların maruziyet süreleri ve radyasyon dozları daha ayrıntılı hesaplandı. İşçi için doz 0.92 Gy'ye, diğer çalışanlar için ise 0.83 Gy'ye yükseltildi. Otobüs yolcularının da yaklaşık 2.5 Gy'ye kadar radyasyona maruz kalmış olabileceğini değerlendirdi.
- c) **Çevresel etkileri:** Kaynağın kontrolsüz bırakılması çevredeki alanlarda radyasyon sızıntısına neden oldu. Bu, özellikle otobüs terminali ve çevresinde radyasyon seviyelerinin artmasına yol açtı. Otobüs yolcularının da radyasyona maruz kalmış olabileceği anlaşılmıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Kazayla ilgili halkı bilgilendirmek ve maruz kalmış olabilecek kişileri bulmak için medya kampanyaları yürüttü. Kaza, radyoaktif maddelerle ilgili toplumsal endişeleri artırdı. IBNORCA, düzenlemelere uymadığı için para cezasına çarptırıldı. Ayrıca, tüm radyografi çalışmaları geçici olarak durduruldu. İzinsiz radyografi kaynaklarının ithalatı ve nötron nem ölçerin çalınması gibi olaylar, Bolivya'da nükleer güvenliğe dair genel bir güvensizlik ortamı oluşturdu (IAEA 2004).

4.1.20. Nueva Aldea Radyasyon Kazası (14 Aralık 2005)

Kaza, 14 Aralık 2005'te Şili, Nueva Aldea yapım aşamasındaki bir selüloz fabrikasında meydana geldi.

- a) **Kaza süreci:** Radyografi asistanı inşa halindeki binada radyografi işlemini tamamladıktan sonra, ekipmanı sökerken düşürdüğünü fark etmedi. Prosedürlerin yeterince takip edilmemesi ve uygulamanın denetlenmemesi sonucu kaynağın kaybolduğu anlaşılmamıştır. İnşaatta çalışan işçiler kaynağı bulmuş ve elle tutmuşlardır. İşçiler, gamma radyografi tekniği hakkında bilgi sahibi değildi ve kaynağı ilginç bir nesne olarak görmüşlerdi. Kaynak, herhangi bir tehlike uyarısı taşımamaktaydı ve bu durum kaza faktörlerinden biri olmuştur. Daha sonra çalışanlardan birinin alarm dozimetrisi devreye girdi ve işçiye kaynağı güvenli bir yere konması söylendi fakat işçi kaynağı bir boruya attı. Bu da radyasyona daha fazla kişinin maruz kalmasına neden oldu. Boruda bulunan kaynak birkaç kişinin daha temasına neden oldu. Kaynak güvence altına alındıktan sonra, yaralı kişilerin tıbbi müdahaleleri milli ve uluslararası yardımlarla sağlanmıştır.
- b) **Sağlık üzerine etkileri:** Radyasyona maruz kalan kişilerde ciddi cilt ve doku yanıkları meydana gelmiştir. Tedavi sürecinde, dozimetre yönlendirmeli cerrahi ve mezenkimal kök hücre (MSC) tedavisi gibi yenilikçi yöntemler kullanılmıştır. MSC tedavisi, iyileşme sürecini olumlu yönde etkilemiş ve nüks olmadan tam iyileşme sağlanmıştır. Bazı kişilerde radyasyon kaynaklı ağız mukozitisi gözlemlenmiştir. Bu durum, radyasyonun etkisiyle zaten enfekte olan dişlerdeki hassasiyetin artması sonucunda oluşmuştur.
- c) **Çevresel etkileri:** Kazanın ardından, çevresel radyasyon seviyeleri kontrol altına alınmış ve kontaminasyonun yayılması önlenmiştir. Ancak, bu tür kazaların çevresel radyasyon kirliliğine potansiyel etkileri ciddi bir endişe kaynağıdır.

- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Kazanın doğrudan ve dolaylı maliyetleri olmuştur. Tedavi maliyetleri, iş gücü kaybı ve uzun süreli sağlık izlemleri gibi faktörler, sosyoekonomik olarak büyük bir yük oluşturabilir (IAEA 2009).

4.1.21. Fukushima Daiichi Nükleer Santral Kazası (11 Mart 2011)

11 Mart 2011 tarihinde Japonya'daki Fukushima Daiichi nükleer enerji santralinde meydana gelen kaza, 1986'daki Çernobil felaketi dışında nükleer enerji santralinde meydana gelen en kötü kaza olduğu belirtilmektedir. INES seviyesi 7 olarak belirlenmiştir. Kazanın meydana geldiği sırada, ulusal ve yerel düzeyde nükleer acil durumlar ve doğal afetlere müdahale etmek için ayrı düzenlemeler mevcuttu. Ancak nükleer acil durumlarla doğal afetlerin eş zamanlı olarak oluşması durumunda koordineli bir planlama bulunmamaktaydı.

- a) **Kaza süreci:** Japonya'nın doğu kıyısında meydana gelen 9,0 büyüklüğündeki Tohoku depremi ve ardından gelen tsunami sonucu başladı. Deprem sonrasında, reaktörler otomatik olarak kapanarak acil durum soğutma sistemleri devreye girdi. Ancak, 14 metre yüksekliğindeki tsunami dalgaları santrali vurdu ve soğutma sistemlerini devre dışı bırakarak reaktör binalarını su altında bıraktı. Bu durum, elektrik kesintilerine ve reaktörlerin çekirdeklerinin aşırı ısınmasına yol açtı. Deprem sonrası santral, acil durum kapanma işlemlerini başarıyla gerçekleştirdi. Ancak, tsunami dalgaları santralin acil durum jeneratörlerini ve diğer kritik ekipmanları etkisiz hale getirdi. Soğutma sistemlerinin çalışmaması nedeniyle, reaktör çekirdekleri erimeye başladı. Hidrojen patlamaları meydana geldi ve radyoaktif maddeler atmosfere salındı. Çalışanlar, reaktörleri stabilize etmek ve radyasyon sızıntısını kontrol altına almak için büyük çaba sarf ettiler. Su püskürtme ve soğutma işlemleri yapıldı, ancak bu işlemler yeterince hızlı gerçekleştirilemedi.
- b) **Sağlık üzerindeki etkileri:** Kaza sonrası, santral çalışanları ve acil durum müdahale ekipleri dahil olmak üzere birçok kişi radyasyona maruz kaldı. Özellikle, reaktör binalarında çalışan işçiler, radyasyon dozlarının limitlerin üzerine çıkmasına rağmen görevlerini sürdürmek zorunda kaldılar. Genel halkın radyasyona maruz kalmasını önlemek amacıyla yaklaşık 150.000 kişi tahliye edildi ve koruyucu önlemler alındı. Ancak, uzun vadeli sağlık etkileri, özellikle kanser riskleri konusunda belirsizlikler devam etmektedir. Tiroit kanseri ve diğer kanser türleri risklerinin arttığı düşünülmektedir. Japonya Hükümeti, maruz kalan kişilere düzenli sağlık kontrolleri uygulamaktadır.
- c) **Çevresel etkileri:** Kaza, büyük miktarda radyoaktif maddenin çevreye salınmasına neden oldu. Özellikle radyoaktif iyot ve sezyum gibi izotoplar hava, su ve toprakta tespit edildi. Çevresel kirlenmenin kontrol altına alınması ve temizlenmesi için uzun vadeli stratejiler geliştirildi. Radyoaktif suyun yönetimi, büyük bir çevresel sorun olarak ortaya çıktı ve bu suyun kontrollü olarak tahliye edilmesi de dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanıldı. Japonya Hükümeti, kirlenmiş alanların temizlenmesi için geniş çaplı bir program başlattı. Bu program, toprak değiştirme, su arıtma ve radyoaktif atık yönetimi gibi çeşitli işlemleri içermektedir.
- d) **Sosyoekonomik etkiler:** 150.000'den fazla insan evlerini terk etmek zorunda kaldı ve birçok kişi yıllarca evlerine dönemedi. Bu durum, büyük sosyal ve

psikolojik sorunlara yol açtı. Tarım, balıkçılık ve turizm gibi sektörler ciddi şekilde etkilendi. Bölgedeki ekonomik faaliyetlerin durması, işsizlik ve gelir kaybı gibi sorunları beraberinde getirdi. Kazanın ardından, bölgenin yeniden inşası ve rehabilitasyonu için milyarlarca dolar harcandı. Bu kaza hem Japonya hükümeti hem de uluslararası toplum için büyük bir mali yük oluşturdu (IAEA 2015).

4.1.22. Chilca Radyasyon Kazası (11 Ocak 2012)

Chilca'da radyolojik kaza, 11 Ocak 2012 gecesi ve 12 Ocak sabahı Peru'da gerçekleşti. Perulu bir NDT (Non destructive inspection; Tahribatsız muayene) şirketi, Lima'nın Cañete Bölgesi'ndeki Chilca'da radyografi çalışmaları yapıyordu. Kaza INES seviyesi 3 olarak belirlemiş, ciddi kaza olarak nitelendirilmiştir.

- a) **Kaza süreci:** Üç işçi, yaklaşık 2,5 saat boyunca toplam 97 radyografi çekimi yaptı, ancak her çekimden sonra Ir-192 kaynağının korunma kabı içine geri dönüp dönmediğini kontrol etmediler. İşlerinden sonra, işçilerden biri kaynağın korunma kabı içinde olmadığını fark etti ve durumu radyasyon koruma görevlisine bildirdi. Görevli ve bir başka işçi, kaynağı güvenli bir şekilde yerine geri koydu. İşçiler, radyografi işlemlerinden yaklaşık 3 saat sonra kusma ve yorgunluk gibi belirtiler göstermeye başladılar. Üç gün sonra, şirket kazayı ulusal düzenleyici otorite olan Perulu Nükleer Enerji Enstitüsü'ne (IPEN) bildirilmiştir.
- b) **Sağlık üzerindeki etkiler:** Kazadan etkilenen üç işçi, akut radyasyon maruziyeti belirtileri gösterdi. IPEN'in araştırması ve tavsiyesi üzerine, işçilerin hastaneye yatırılması kararlaştırıldı. IAEA'ya yapılan resmi yardım talebi sonucunda, doz rekonstrüksiyonu ve tıbbi danışmanlık sağlandı. En ciddi şekilde maruz kalan işçi için tıbbi tedavi sağlandı ve belirtilerin tekrarlaması durumunda ek tıbbi destek verildi. Üç yıl sonra, en fazla maruz kalan işçinin sağlığına kavuştuğu ve lezyon bölgesinde herhangi bir tekrar eden yaralanma olmadığı raporlanmıştır.
- c) **Çevresel etkiler:** Chilca'daki kaza sonrası çevresel etki değerlendirmelerinde, radyasyonun çevreye yayılması ile ilgili büyük bir sorun olmadığı belirtildi. Ancak, kazanın meydana geldiği alanın dekontaminasyonu ve güvenlik önlemlerinin alınması için çeşitli çalışmalar yapıldı. Çevresel kontaminasyonun önlenmesi amacıyla radyasyon kaynağının güvenli bir şekilde taşınması sağlanmıştır.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Chilca kazası, yerel toplulukta radyasyon güvenliği konusunda farkındalığı arttırdı. Kaza sonrası, radyasyon güvenliği prosedürlerinin iyileştirilmesi ve iş güvenliği standartlarının artırılması amacıyla düzenlemeler yapıldı. Kazadan etkilenen işçiler için tazminat ve sosyal destek programları uygulandı. Ayrıca, kaza sonrası yapılan düzenlemeler ile benzer kazaların önlenmesi amacıyla eğitim ve bilgilendirme kampanyaları başlatılmıştır (IAEA 2018).

4.1.23. Ventanilla Radyasyon Kazası (14 Şubat 2014)

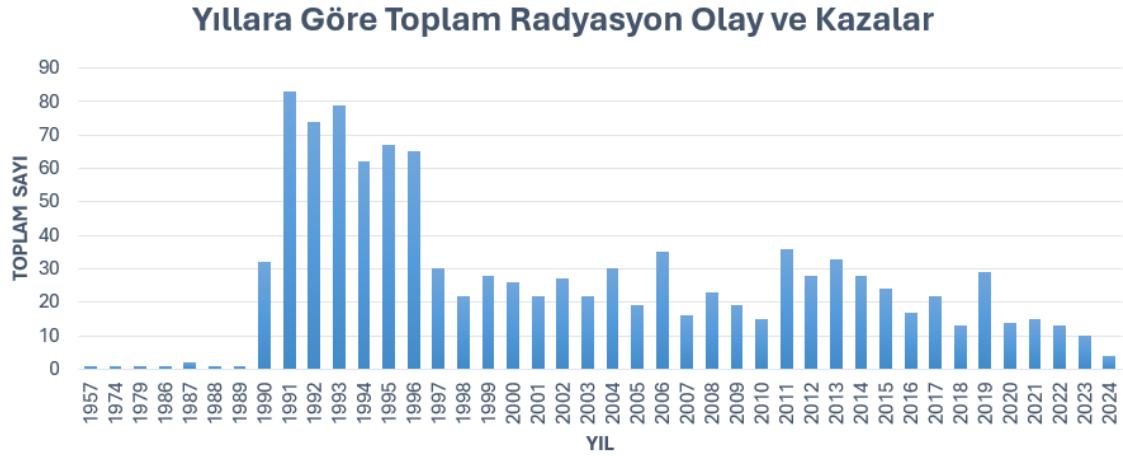
14 Şubat 2014'te Peru'nun Ventanilla bölgesinde radyolojik bir kaza meydana geldi. Bu kaza, bir radyografi cihazının hatalı kullanımı sonucu gerçekleşti. INES seviyesi 3 olarak belirlendi. Çalışanların maruziyetiyle sonuçlanmıştır.

- a) **Kaza süreci:** Kaza, radyografi cihazının kullanımı sırasında kaynak tüpünün cihaz içine geri çekilmemesi nedeniyle operatörler tarafından fark edilmedi ve yüksek dozda radyasyona maruz kaldı. Bu olay, radyasyon güvenliği prosedürlerinin ihmal edilmesi ve yeterli eğitim eksikliğinden kaynaklandı. Kaza, radyasyon kaynağının yanlış yerleştirilmesi sonucu oluşan bir teknik arızadan dolayı meydana gelmiştir.
- b) **Sağlık üzerindeki etkileri:** Kazanın ardından, maruz kalan işçilerde çeşitli sağlık sorunları gözlemlendi. Maruziyetin hemen ardından işçilerde kusma ve yorgunluk gibi akut radyasyon hastalığı belirtileri görüldü. Maruziyetin ardından yapılan tıbbi muayenelerde, işçilerin ciddi şekilde radyasyona maruz kaldığı belirlendi. İki yıl sonra yapılan takip muayenelerinde, en fazla maruz kalan işçide cilt lezyonlarının tekrar ettiği ve bu işçinin özel tıbbi bakıma ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir.
- c) **Çevresel etkileri:** Kaza sonrası yapılan incelemelerde, radyasyonun çevreye yayılması konusunda ciddi bir sorun tespit edilmedi. Ancak, kaza bölgesinde radyasyon güvenliği ve dekontaminasyon çalışmaları hızla başlatıldı. Radyasyonun çevreye yayılmasını engellemek için radyasyon kaynağı güvenli bir şekilde taşındı ve kazanın meydana geldiği alan temizlendi. Bu çalışmalar sayesinde çevresel etki minimize edilmiştir.
- d) **Sosyoekonomik etkileri:** Kaza, yerel halk üzerinde büyük bir endişe ve korku yarattı. Kaza sonrası, iş güvenliği standartlarının yükseltilmesi ve radyasyon güvenliği prosedürlerinin iyileştirilmesi için çeşitli yasal düzenlemeler yapıldı. Etkilenen işçiler ve aileleri için sosyal destek programları ve tazminat ödemeleri sağlandı. Ayrıca, benzer kazaların önlenmesi amacıyla radyasyon güvenliği konusunda eğitim programları başlatılmıştır (IAEA 2019).

4.2. 1957-2024 Tarihler Arası Tespit Edilen Olay ve Kazalar

Tez çalışmamızda, 1957-2024 yılları arasında raporlanan radyasyon olay ve kazaları geriye dönük olarak incelenen ve buna ilişkin elde edilen veriler tablolar halinde sunulmuştur.

Derlediğimiz verilere göre, Şekil 4.18.'de radyasyon olay ve kazalarının yıllara göre toplam sayılarının dağılımı sütun grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Yıllara göre toplam radyasyon olay ve kazaların dağılımı

Yaklaşık 70 yıllık bu süreç içinde kayıtlara geçen radyasyon olay ve kazalarının toplam sayısı 1054 olarak bulundu. İlgili veriler Şekil 4.18’de sütun grafik biçiminde görülmektedir.

4.3. Bölgesel ve Coğrafi Açıdan Olay ve Kazaların Dağılımı

Tarihsel süreçte gerçekleşen radyasyon olay ve kazalarının coğrafi bölgelere göre dağılımı, Şekil 4.19’da kullandığımız “Google Looker Studio” yazılımı ile kartografik olarak görselleştirilmiştir. Bölgelerde yaşanan vaka sayısındaki artış, yoğunluğa göre mavi renk tonlarıyla kodlanmış olup, vakaların yoğunluğu açık maviden koyu maviye doğru artan bir şekilde ifade edilmiştir.

Haritayı kıtalara göre ele alıp değerlendirdiğimizde Avrupa, Amerika, Asya, Afrika ve Avustralya kıtasında sırasıyla toplam 491, 221, 275, 9 ve 5 vakaya rastlanmıştır.

Şekil 4.20’de, 1957-2024 yılları arasında dünya genelinde meydana gelen radyasyon olay ve kazalarının dağılımı gösterilmektedir. Haritada, yüksek INES derecesine sahip kazalar oklarla işaretlenmiş, bu işaretler en ciddi kazaların yaşandığı bölgeleri ve kazaların INES seviyeleri ile parantez içinde tekrar eden vaka sayısı belirtmektedir.



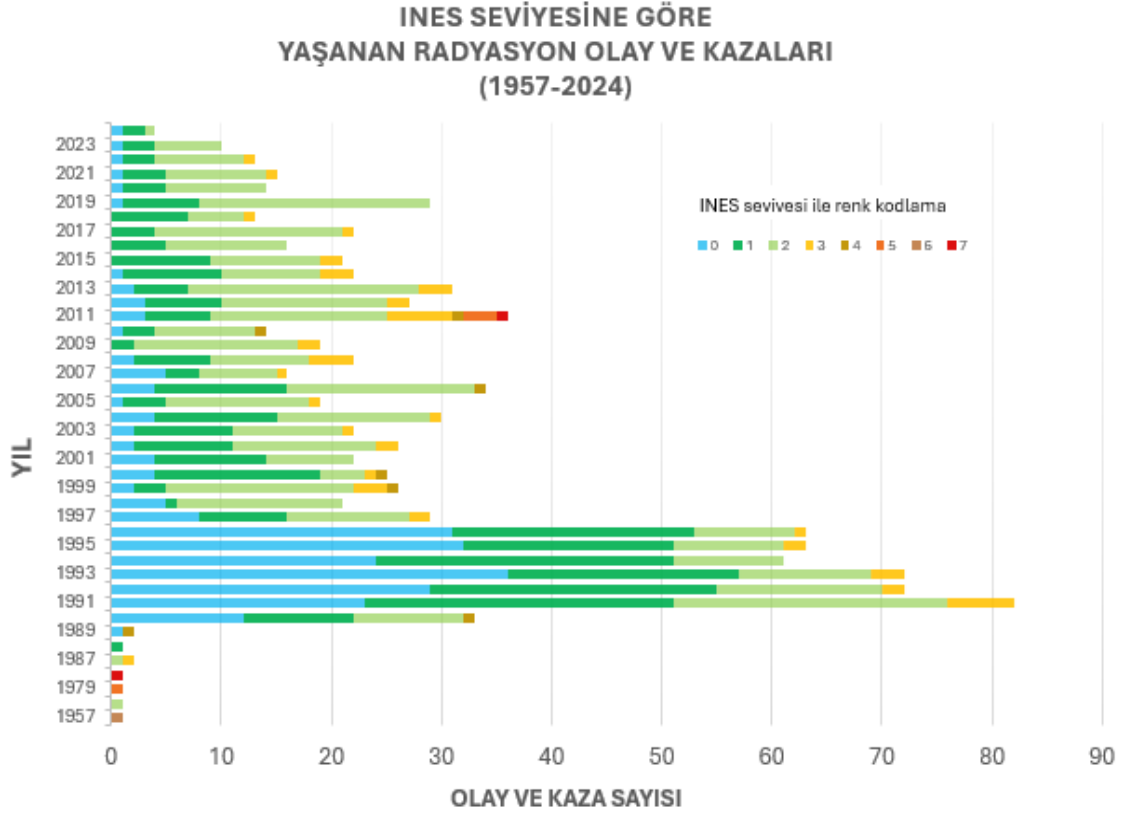
Şekil 4.19. Radyasyon olay ve kazalarının dünya genelinde yayılımını gösteren kartograf



Şekil 4.20. Radyasyon kazalarının dünya genelinde yayılımını gösteren kartograf

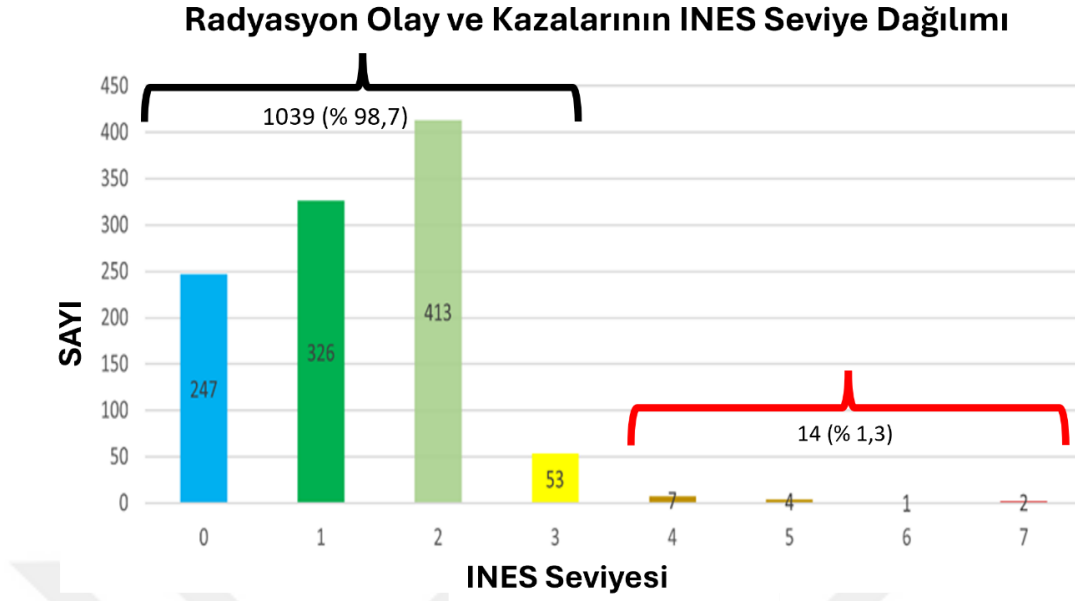
4.4. INES Seviyelerine Göre Yaşanan Radyasyon Olay ve Kazaların Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 4.21’de INES seviyelerine göre yaklaşık 70 yılda (1957-2024) yaşanan toplam radyasyon olay ve kazalarının sayısını ve dağılımını göstermektedir. Veriler INES seviyelerinde kullanılan renk kodlamasına dayanarak çubuk grafiği şeklinde sunulmuştur.



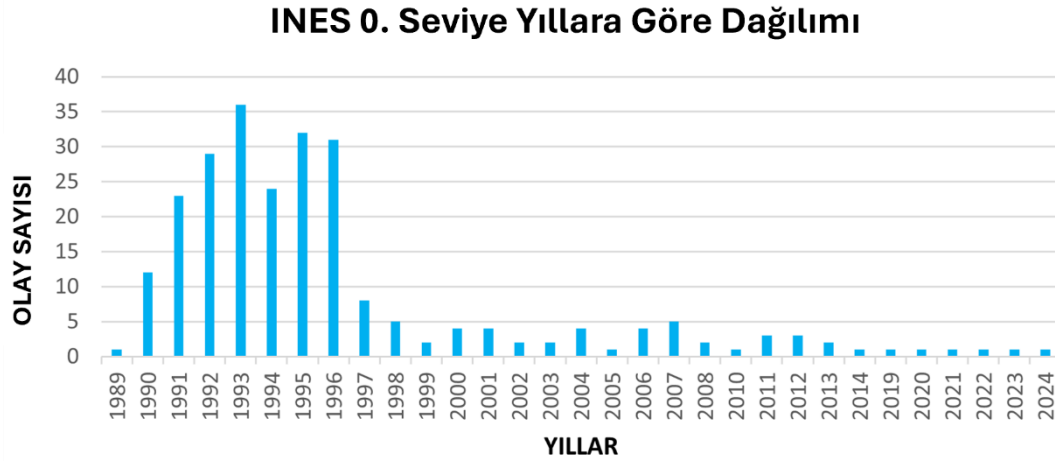
Şekil 4.21. INES seviyesine göre yaşanan radyasyon olay ve kazaların yıllara göre dağılımı

Yaklaşık 70 yılda kayda geçen toplam olay ve kazaların sayısına göre olayların payı %98,7 iken kazaların payı %1,3 olarak Şekil 4.22.’de tanımlanmıştır. En büyük olay sayısı INES 2. Seviyesinde gözlemlenmişken en düşük olay sayısı INES 3. Seviyesinde izlenmiştir. Olayların INES dağılımlarında belirgin oranda farklar 3. Seviye ile görülmektedir. En büyük kaza sayısı INES 4. Seviyede izlenirken en düşük kaza sayısı INES 6. Seviyededir.



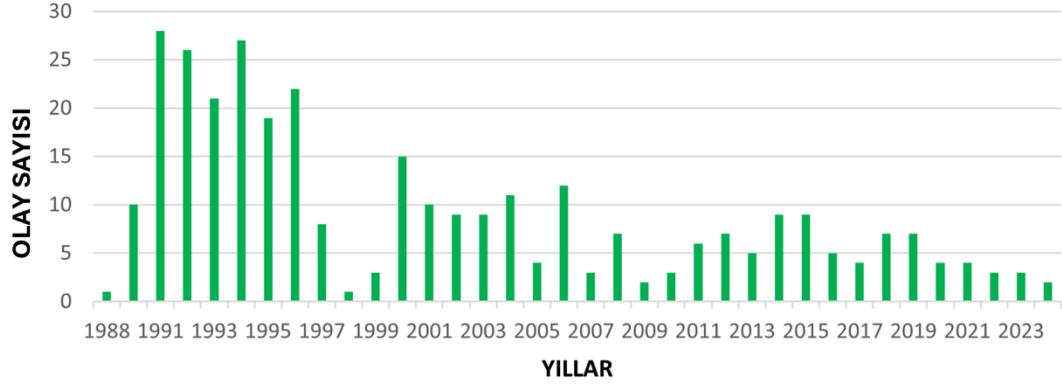
Şekil 4.22. Radyasyon olay ve kazaların INES seviyelerine göre dağılımı ve oranları

1957-2024 yılları arasında kayda geçen olayların INES seviyelerinin (0-3) yıllara göre dağılımları Şekil 4.23 ile 26.'da sütun grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca, INES seviyeleri 4-7 olan kazaların dağılımı ise tek bir grafik biçiminde Şekil 4.27'de görülmektedir.



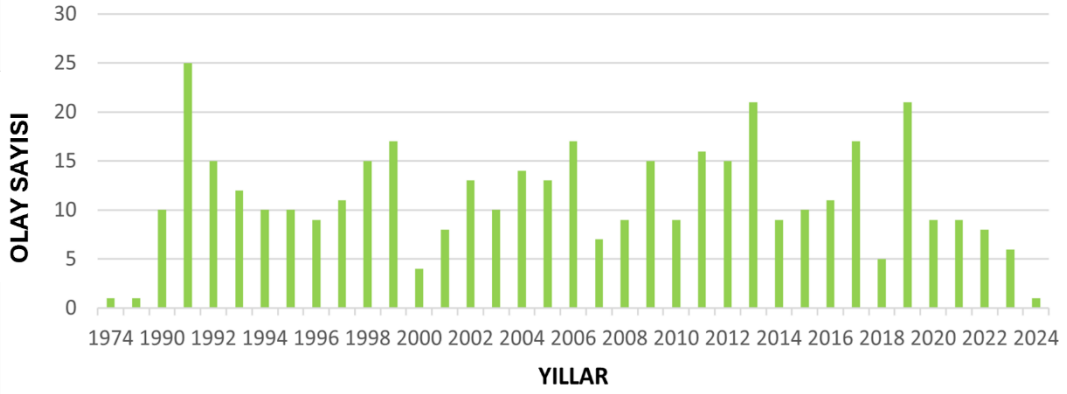
Şekil 4.23. INES 0. Seviye yıllara göre dağılımı

INES 1. Seviye Yıllara Göre Dağılımı



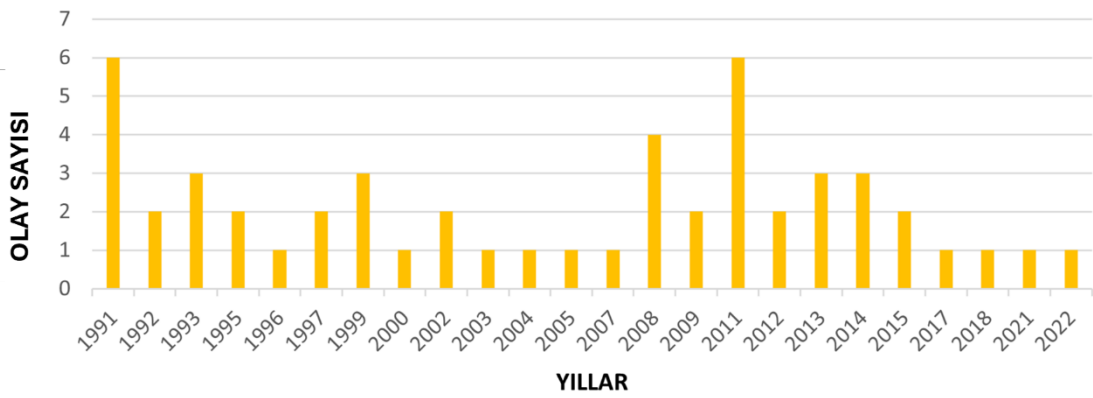
Şekil 4.24. INES 1. Seviye yıllara göre dağılımı

INES 2. Seviye Yıllara Göre Dağılımı



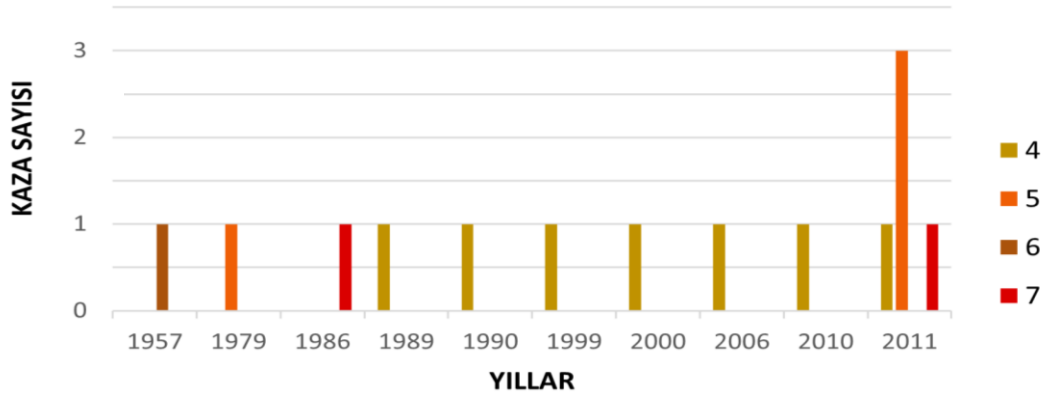
Şekil 4.25. INES 2. Seviye yıllara göre dağılımı

INES 3. Seviye Yıllara Göre Dağılımı



Şekil 4.26. INES 3. Seviye yıllara göre dağılımı

"Kaza" ların Yıllara Göre Dağılımı



Şekil 4.27. INES 4. ile 7. seviye kazaların dağılımı

4.5. Farklı Çalışma Ortamlarında Yaşanan Olay ve Kazaların Sınıflandırılması

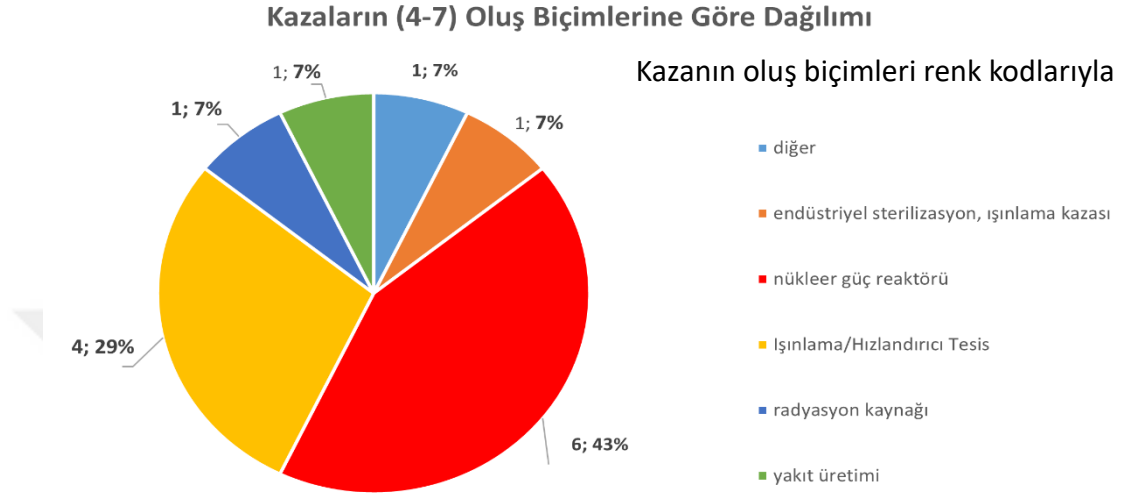
Yaklaşık 70 yıllık bir süreçte yaşanan farklı çalışma ortamlarından edinilen bilgiler sınıflandırılarak pasta grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.28. Vakaların ortamlarına göre sınıflandırılması

Güç reaktörü, yakıt yenileme işlemi, radyasyon kaynağı kullanılan tesisler, ısınlama/hızlandırıcı tesisleri, yakıt üretimi, taşıma, araştırma tesisleri, araştırma reaktörü, radyoizotop işleme/taşıma tesisleri, radyoaktif atık tesisleri ve sınıflandırılmayan kazalar diğerleri adı altında toplanmıştır.

En fazla vakayı güç reaktörü tesislerinde 600 vaka sayısı (%57) ile gözlemlenmiş olup vakalar 1 ile 7 INES seviyelerine sahiptir. Sıradaki en yüksek vaka sayısına sahip çalışma ortamı, 225 vaka (%21) ile radyasyon kaynağı içeren vakalardır. Bunu, 78 vaka sayısı ile diğer ortamlar takip etmektedir.



Şekil 4.29. 4.-7. INES seviyesinde olan kazaların ortama göre sınıflandırılması

Şekil 4.29'da oluşturulan pasta grafiğinde 14 kaza niteliğindeki vaka, farklı çalışma ortamlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu vakalar arasında en yüksek vaka sayısı, %43 oranıyla güç reaktörlerinde meydana gelen 6 kaza olarak tespit edilmiştir. Işınlama/hızlandırıcı tesislerinde ise %29 oranıyla 4 kaza bulunmuştur. En düşük kaza sayısı ise birer vaka ile endüstriyel sterilizasyon, yakıt üretimi, radyasyon kaynağı ve diğer kazalar kategorilerinde olup, her biri %7 oranında paya sahip olduğu belirlenmiştir.

5.TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, radyasyon kazaları ve etkileri, tarihsel gelişim çerçevesinde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, ulusal ve uluslararası düzeyde yazılmış akademik kitaplar, kuruluşlar tarafından yayımlanan raporlar ve teknik dokümanlardan faydalanılmıştır.

Çalışma kapsamında, ilk olarak en önemli 23 radyasyon kazası incelenmiş, bu kazaların tarihleri, meydana geldikleri yerler, maruz kalan kişilerin aldığı dozlar ve bu dozların sağlık üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, kazaların çevresel etkileri ve süreç içerisinde yaşanan sosyoekonomik sonuçları ele alınmıştır. İncelemeye, kazaların INES seviyelendirmeleri de dahil edilmiş ve olayların ardından alınan önlemler araştırılarak tartışılmıştır. Bunun yanı sıra, radyasyon kazaları sonrasında oluşturulan uluslararası yönergeler ve nükleer enerji güvenliği konusundaki gelişmeler de değerlendirilmiştir.

- Rusya Federasyonu'nda bulunan Kyshtym kasabasında meydana gelen 1957 yılındaki radyoaktif atıkların yayılımı ile gerçekleşen kaza 6. seviye INES olarak sonradan IAEA tarafından değerlendirilmiştir. Uluslararası iş birliği eksikliği, ülkeler arası bilgi paylaşımının olmaması ve Soğuk Savaş dönemi koşulları nedeniyle, radyonüklid bulutunun farklı ülkeler üzerindeki etkilerine rağmen kaza hakkında haberleşme ağı yetersiz kalmıştır. Bu durum, olayın halk sağlığı açısından ciddi bir boyut kazanmasına neden olmuştur. Kamuoyuna karşı kaza gizli tutulmasına rağmen, yerli halk kazayı anlamıştır. Tahliye sürecindeki gecikmeler ve yetersiz hazırlıklar, kazanın sosyoekonomik ve psikolojik etkilerini artırmış, devletin yeniden yapılandırma ve halkın güvenliğini kazanma gerekliliğini ön plana çıkarmıştır. Kazanın sağlık üzerindeki uzun vadeli etkileri, hematopoetik sistem üzerindeki değişikliklerle ortaya konmuş ve bu durum, daha fazla araştırma yapılması gerektiğini anlaşılmıştır. Çevresel etkiler açısından, tarım ve hayvancılık üzerindeki olumsuz sonuçların hafifletilmesine yönelik çabalar bazı olumlu sonuçlar doğurmuş olsa da alınan önlemlerin etkinliği ve sürdürülebilirliği hala tartışılmaktadır.
- 1979 yılında yaşanan Three Mile Island kazası nükleer reaktörün emniyet kontrol sistemlerinde ve operatör hatalarının bileşmesiyle INES 5. seviye kaza meydana gelmiştir. Reaktördeki ciddi hasara rağmen radyasyon sızıntısının bireylerin veya çevrenin fiziksel sağlığı üzerinde ihmal edilebilir etkilere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. İnsan hatasının tamamen ortadan kaldırılamayacağı ve bu nedenle nükleer güvenlik standartlarının sürekli iyileştirilmesi gerektiğinin haritası çizilmiştir. Bu kaza, operatör eğitimi, acil durum hazırlığı ve tesis tasarımında küresel çapta önemli reformların yapılmasına sağlamıştır.
- Çernobil kazası sonucunda sahadaki personel, acil durum çalışanları ve yerel halk gibi çeşitli gruplar 2-16 Gy arasında değişen dozlara maruz kalmışlardır. Geriye dönük olarak değerlendirilen bu kaza INES 7. Seviye olarak belirlenmiştir. Kaza sonrasında ise genel halk gıdalar, su ve hava yoluyla serbest kalan radyonüklid alımına maruz kalmıştır. Halk sağlığı açısından uzun vadeli sağlık etkilerinin izlenmesi ve bu konudaki araştırmaların sürekliliği, büyük önemini vurgulamıştır. Nükleer kazaların uzun vadeli çevresel ve sağlık etkileri, kapsamlı ve

sürdürülebilir çözümler gerektirdiğini ortaya koymuştur. Çernobil kazası sonrasında çok basamaklı güvenlik sistemlerinin oluşturulmasını gündeme getirilmiştir. Kaza önleme konusundaki nükleer güvenlik protokollerinde ve personellerin kaza yönetimindeki eksikliklerin iyileştirilmesi gündeme gelmiştir.

- INES 5. Seviyeli olan Gürcistan'daki bu kazada eski binada korunmasız bırakılan tuz formundaki sezyum-137 kaynağının, takip sisteminin gerekliliklerine uyulmaması ve kaynak kapsülünün hasar görmesi gibi faktörler rol oynamıştır. 1985-1987 yılında yaşanan kaza terk edilmiş radyoaktif kaynakların güvenli yönetimi ve halkın bilinçlendirilmesinin önemini gündeme getirmiştir. Ayrıca, acil durum müdahale süreçlerinin ve çevresel temizlik çalışmalarının iyileştirilmesi gerektiği bu tartışmada ortaya çıkmıştır. Kazanın toplumsal ve ekonomik etkileri de dikkate alındığında, benzer olayların önlenmesi için ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği ve iyileştirmelerin yapılmasının önemi vurgulanmıştır.
- 1989 yılında El Salvador'da Cobalt-60 sterilizasyon tesisinde meydana gelen radyasyon kazası, sonradan 4. seviye olarak derecelendirilmiştir. Kazanın ardından personellerin uzun tedavi süreçleri ve uzuv kayıplarının yanı sıra psikolojik destek gereksinimleri de ortaya çıkmıştır. Katarakt ve akut lösemi gibi geç dönem sağlık risklerinin takibi önem arz etmiştir. Bu olay, endüstriyel tesislerde düzenli bakım, güvenlik denetimleri ve personel eğitimlerinin hayati önemini vurgulayarak güvenlik kültürünün güçlendirilmesi gereğini açıkça ortaya koymuştur.
- İsrail'deki Soreq Nükleer Araştırma Merkezi'nde 1990 yılında meydana gelen Cobalt-60 ışınlama tesisi kazası, nükleer güvenlik önlemlerinin ihmal edilmesi ve operatör hatalarının trajik sonuçlara yol açabileceğini net bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Kaza INES 4. seviye olarak kayda geçirilmiştir. Operatörün kazadan sonra aldığı radyasyon dozuna bağlı olarak hayatını kaybettiği anlaşılmıştır. Kaza, kişisel dozimetre kullanımının ve kontrol sistemlerinin güvenilirliğinin ne kadar kritik olduğunu vurgularken, ekipmanların düzenli denetimden geçirilmesinin ve personelin acil durum prosedürlerine tam olarak uymasının hayati önemini de göstermiştir.
- 1991 yılında Belarus'daki Nesvizh Co-60 Işınlama Tesisi Kazası, güvenlik sistemlerinin ihmal edilmesinin ve operatör hatalarının ağır hayati sonuçlar doğurabileceğini açıkça göstermiştir. Deneyimli sorumlu operatörün yaşadığı bu kaza, INES 3. seviye olarak belirlenmiştir. Kazadan sonra, otomatik algılama sistemleri, yedekli güvenlik mekanizmaları ve operatörlerin prosedürlere tam uyulması gibi konulara önem verilmesi gerektiğinin sonucuna varılmıştır. Bu olay, sıkı denetim ve düzenlemelerin hayati önem taşıdığını bir kez daha ortaya koymuştur.
- SCE tesisinde 6 Nisan 1993 tarihinde nükleer yakıtının üretimi sırasında meydana gelen patlama sonucu yaşanan olay, kontrol mekanizmalarındaki hataların ve operasyonel eksikliklerin ciddi radyasyon kazalarına yol açabileceğini göstermiştir. INES 3. seviyeye tekabül eden bu olayda personelde aşırı maruziyet yaşanmamıştır. Ancak havada yapılan ölçümlerde Nb-95 kontaminasyonuna rastlanmıştır. Acil müdahale prosedürlerinin etkinliği ve tesisin güvenlik protokollerinin başarısı vurgulanmıştır.

- 1994 yılında Tammiku’da atık deposunda bulunan Cs-137 kaynağının kontrolsüz bir şekilde ele geçirilmesinin ciddi sağlık ve çevresel sorunlara yol açabileceğini göstermiştir. INES 4. Seviye olarak belirlenen kazanın ardından, radyoaktif kaynakların güvenli depolanmasının ve denetimlerin önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Ayrıca, toplumda radyasyon güvenliği bilincinin artırılması gerektiği ve güvenlik prosedürlerinin gözden geçirilmesinin önemini vurgulamıştır. Sosyoekonomik olarak, kaza yerel halkta büyük stres ve endişe yaratmış, sağlık taramaları ve temizlik çalışmaları ciddi maliyetler doğurmuştur.
- 24 Temmuz 1996’da fosil yakıtlı enerji santralinde meydana gelen Ir-192 gibi yüksek derecede tehlikeli bir radyoizotopun bilinçsiz bir çalışan tarafından bulunup taşınması sonucu meydana gelmiştir. INES 3. seviyeli, yaşanan bu olay ciddi güvenlik açığının var olduğunu göstermektedir. Kazadan sonra işçinin yoğun bakım gerektiren tedavi süreci, bu tür kazaların insan sağlığı üzerindeki yıkıcı etkilerini ve radyasyonun biyolojik dokular üzerindeki ciddi zararlı etkilerini açıkça ortaya çıkarmıştır. Endüstriyel radyografi gibi yüksek riskli bir işte çalışanların radyasyon güvenliği konusunda yeterince bilgi sahibi olmadıkları ve bu tür kazalara karşı hazırlıksız olduklarını ortaya koymuştur.
- Sarov’da bulunan Nükleer reaktörler için yakıt araştırması yapan bir tesiste 17 Haziran 1997 de olan kaza nükleer güvenlik açısından önemli dersler sunmaktadır. INES 4. Seviye olarak belirlenmiştir. Teknisyenin işlem sırasında yalnız çalışarak kaynakla ilgili işlem için yeni prosedürü göz önüne almadan prosedür ihlali yapmıştır. Teknisyenin maruz kaldığı yüksek radyasyon dozu, hızlı ve şiddetli semptomlara yol açmış olup tüm tıbbi müdahalelere rağmen ölümle sonuçlanmıştır. Bu durum güvenlik kurallarına uyulmadığını göstermiştir. Bu olay, nükleer güvenlikte insan hatasının ne kadar kritik olabileceğini ve güvenlik önlemlerinin sıkı bir şekilde uygulanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.
- Gürcistan’da bulunan Lilo Eğitim Merkez sahasında 1997 yılında meydana gelen radyasyon kazası, dağınık şekilde bulunan çok sayıda radyasyon kaynağının uygun güvenlik protokolleri takip edilmeden atıldığı anlaşılmıştır. Yaklaşık 11 kişinin maruziyeti bildirilmiş olup INES 4. seviye derecelendirilmiştir. Eğitim merkezinde bulunan askerlerin ciltlerinde oluşan radyasyon sendromları ile ilgili hekimlerin yeterli bilgileri olmadığı anlaşılmaktadır. Sağlık takibi açısından gecikme yaşanmış olup ayrıca kaza sebebinin farkındalığı oluşmamıştır. Bu durum, sağlık politikalarının yeniden düzenlenmesi konusunda radyasyon hasarlarıyla ilgili hekimler için yeni prosedürlerin geliştirilmesi radyasyon korunma ve güvenliği konusunda bilinçlendirmenin gerekliliğini göstermiştir. Radyasyon kaynaklarının etrafa yayılması ve bu durumun uzun süre fark edilmemesi, güvenlik ihlallerinin ciddi sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir.
- İstanbul’da Aralık 1998-Ocak 1999 yılları arasında yaşanan radyasyon kazası Cobalt-60 kaynaklarının depolandığı bina el değiştirdikten sonra, kaynakların hurda olarak satılması ve zırhlı konteynerlerin parçalanması sonucunda meydana geldi. Bu olay Türkiye’de yaşanan ilk büyük çaplı radyasyon vakası olup INES 3. seviye olarak belirlenmiş ve radyasyon güvenliği konusunda önemli bir dönüm noktası olarak değerlendirilmiştir. Olay halk arasında büyük bir endişe yaratmış ve medya tarafından Çernobil faciası ile kıyaslanmıştır. Bu yanlış algı, kamuoyunda panik yaşatmış ve halk üzerinde ciddi psikolojik etki yaratmıştır. Kazanın fark edilmesi sürecindeki ve hekimlerin tanı koymasındaki gecikme radyasyon kazalarına yönelik farkındalığın artırılması gerektiğini ortaya

koymuştur. Olay geniş çaplı bir çevresel tehlike yaratmadığını ancak, kaynakların yerleşim alanlarında bulunmuş olması, bu tür olayların çevresel etkilerinin daha ciddi olabileceğini hatırlatmıştır. Radyasyon kaynaklarının güvenli taşınması, depolanması ve kullanılmasındaki eksikliklerin nelere yol açabileceğini gözler önüne sermiştir. Dolayısıyla, radyoaktif malzemelerin taşınması ve depolanmasında daha katı önlemlerin alınması gerektiğini vurgulanmaktadır.

- Yanango radyasyon kazası, Şubat 1999'da Peru'da bir hidroelektrik santralde çalışan bir kaynak işçisinin, iş sırasında farkında olmadan İridyum-192 içeren bir radyografi kaynağını bulup cebine koyması sonucunda başlamıştır. Vaka INES 3. seviye olarak kayda geçmiştir. İşçi kaynağı saatlerce üzerinde taşımıştır ve maruz kaldığı yüksek dozda radyasyon nedeniyle ciddi hasar görmüştür. Gecikmeli teşhis ve tedavi sürecindeki, radyasyon kazalarına yönelik acil durum müdahalelerinin ne kadar önemli olduğunu bir kez daha göstermiştir. Kaynak işçisinin ailesi de düşük dozda radyasyona maruz kalması, kazanın bireysel etkilerinin yanı sıra ailevi ve toplumsal boyutlarını da ortaya koymaktadır. Radyografi kaynağının kaybolması, iş yerinde güvenlik protokollerinin yetersiz olduğunu ve radyoaktif maddelerin izlenmediği anlaşılmıştır. Kazanın bu şekilde gelişmesi, radyasyon güvenliği eğitimlerinin ve farkındalığın artırılması gerektiğini vurgulamıştır.
- 1999 yılında Japonya'daki Tokaimura nükleer yakıt işleme tesisinde gerçekleşen kaza, çalışanların belirtilen güvenli kütle sınırından katbekat fazla olduğu anlaşılan, zenginleştirilmiş uranyum çözeltisini prosedür dışı bir uygulamayla doğrudan işlem tankına dökmesi sonucu kimyasal bir patlamanın başlangıcını tetiklenmiştir. İki işçinin ölümü ve bir işçinin maruziyeti ile sonuçlanan kaza, INES 4. seviye olarak belirlenmiştir. Bu kazada, çalışanların güvenlik prosedürlerini ihlal etmeleri ve iş akışını hızlandırma amacıyla standart dışı yöntemler kullanmaları, ölümcül sonuçlar doğurmuştur. Kazanın yalnızca teknik bir hata veya ihmalin ötesinde, insan hatalarının ve yetersiz güvenlik kültürünün bir sonucunu temsil ettiği görülmektedir.
- Tayland'ın Samut Prakarn kentinde 2000 yılında meydana gelen bu nükleer kaza Kobalt-60 gibi yüksek radyoaktif bir maddenin güvenli olmayan bir depolama alanından çıkarılması ve hurda olarak satılması sonucunda meydana gelmiştir. INES 5. seviye olarak belirlenen kazada hurda işçilerinin radyasyon kaynağının tehlikesinden habersiz olması, 3 kişinin ölümüyle sonuçlandı. Diğer kişilerde de ciddi tıbbi sorunlar oluşmuş, uzun süreli tedavi süreçleri gerekmiştir. Maruz kalan kişilerin aileleri ve yakın çevreleri de psikolojik ve duygusal etkiler yaşamıştır. Kaynak kapsülünün bozulmamış olması ve olay yerinde hızlı bir şekilde güvenlik önlemleri alınması, daha geniş çaplı bir çevresel felaketi önlemiştir.
- Polonya'daki Białystok Onkoloji Merkezi'nde 27 Şubat 2001 tarihinde yaşanan elektrik kesintisi sonrasında lineer hızlandırıcı cihazının doz hızı göstergesi bozuldu. Göstergenin bozuk olması nedeni ile verilen dozun sanılanın aksine çok yüksek radyasyon verdiği anlaşılamadı. Bu durum, tedavi gören beş hastanın aşırı radyasyona maruz kalmasına neden olmuştur. Medikal alanda ilk olarak görünen INES 4. seviye olarak belirlenen bu kaza radyoterapi cihazlarının güvenliği konusunda uluslararası düzeyde farkındalık yarattı. Ayrıca, radyoterapi departmanlarının güvenlik önlemlerini artırmaları gerektiği net bir şekilde vurgulanmıştır.

- Gürcistan'ın Lia bölgesinde 2001 yılında yaşanan olay, terk edilmiş Sr-90 radyoaktif kaynakları geceyi ormanda geçiren insanların ısıtıcı olarak kullanmasıyla meydana geldi. Maruz kalan kişilerde lokal yanma problemleri ve akut radyasyon teşhisi konuldu. Askeri üsse ait olduğu anlaşılan kaynakların üzerinde herhangi bir uyarı işareti bulunmaması, bu tür materyallerin yönetimi ve denetiminin yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Radyoaktif materyallerin izlenmesi, saklanması ve bertaraf edilmesine yönelik uluslararası standartların sıkı bir şekilde uygulanması gerektiği anlaşılmıştır. Bu durum için IAEA tarafından INES seviyesi belirtilmemiştir.
- 2002 yılında Bolivya'da yaşanan bu olay, Ir-192 kaynağının denetimsiz bırakılması ve hatalı taşınması sonucu meydana gelmiş ve INES 3. Seviye olarak değerlendirilmiştir. Radyoaktif kaynağın denetimsiz bir şekilde otobüs terminalinde bırakılması ve sonradan fark edilmesiyle müdahale sürecini uzatmış olup maruziyet dozlarının artmasına neden olmuştur. Bu olay, radyoaktif kaynakların güvenli yönetimi konusundaki eksikliklerin hem insan sağlığı hem de çevre üzerinde ne tür tehditler oluşturabileceğine dair önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bolivya Standartlar ve Kalite Enstitüsü'nün hem hukuki maddi cezaya çarptırılması hem de tüm radyografi çalışmalarının geçici olarak durdurulması kararı, tarihe geçen önemli bir durumdur.
- 2005 yılında Şili'de yaşanan Nueva Aldea Radyasyon Kazası, inşaat halindeki bir selüloz fabrikasında meydana geldi. Binada radyografi işlemini tamamlandıktan sonra, ekipman sökülürken İridyum-192 kaynağının kaybolduğu fark edilmedi. Kaynağın üzerinde herhangi bir uyarı işareti olmaması, işçilerin radyasyonun tehlikelerinden habersiz bir şekilde maruz kalmasına yol açmıştır. Kazanın fark edilmesi ve müdahale edilmesi sürecinde de önemli ihmaller yaşanmıştır. Alarm dozimetrisi devreye girmesine rağmen, kaynağın güvenli bir şekilde muhafaza edilmesi sağlanamamış, aksine bir boruya atılarak başka kişilerin de radyasyona maruz kalmasına neden olunmuş ve INES 4. seviye olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, radyasyon kazalarının yönetimi ve acil müdahale konusundaki eksiklikleri gözler önüne sermiştir. Kazadan sonra yaralanan kişilere yapılan tıbbi müdahaleler, ulusal ve uluslararası yardımlar sayesinde gerçekleştirilmiş, bu sayede radyasyona maruz kalanların tedavisi mümkün olabilmıştır.
- 11 Mart 2011'de Japonya'da meydana gelen Fukushima kazasının temelinde, 9,0 büyüklüğündeki Tohoku depremi ve ardından gelen tsunami bulunmaktadır. Deprem sonrası reaktörlerin otomatik kapanması ve acil durum soğutma sistemlerinin devreye girmesi, başlangıçta krizi kontrol altına almaya yönelik önemli adımlar olarak değerlendirilebilir. Ancak, tsunami dalgalarının santrali vurması, bu sistemlerin işlevselliğini olumsuz bir şekilde etkilemiş ve reaktör çekirdeklerinin aşırı ısınmasına yol açmıştır. Bu kaza büyük miktarda radyoaktif maddenin çevreye salınmasına yol açmış ve INES 7. seviye olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, nükleer santrallerin doğal afetlere karşı ne kadar savunmasız olabileceğini ve bu tür olaylarda acil durum planlarının ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca çevresel kirlenmenin kontrol altına alınması ve temizlenmesi için başlatılan uzun vadeli stratejiler, çevre koruma ve radyoaktif atık yönetimi konularında önemli dersler sunmuştur. Kazanın sonucunda, nükleer acil durum yönergelerinin doğal afetleri de hesaba katarak planlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Yaşanan kaza sürecinde etkileri diğer ülkeleri de kapsama riskinden dolayı uluslararası iş birlik gerekliliği de ortaya

çıkmiştir. Fukushima Daiichi Kazasının doğurduğu sonuçlar hem ulusal hem de uluslararası düzeyde geniş çaplı tartışmalara yol açmıştır.

- Peru'nun Chilca bölgesinde 2012 tarihinde yaşanan radyasyon kaza, INES 3. seviyede sınıflandırılmıştır. Olay tahribatsız muayene işlemleri sırasında kullanılan Ir-192 kaynağının korunma kabı içine güvenli bir şekilde yerleştirilmemesi nedeniyle radyasyon sızıntısı yaşanmıştır. İşçilerin kazayı fark etmesi ve durumu yetkililere bildirmesi, kazanın kontrol altına alınmasında önemli bir rol oynamıştır. Radyoaktif kaynaklarla çalışırken izlenmesi gereken güvenlik protokollerinin titizlikle uygulanması gerektiği açıktır. Olayın ardından yapılan düzenlemeler ve iyileştirme çabaları, radyasyon güvenliği prosedürlerinin ve iş güvenliği standartlarının önemini pekiştirmektedir. Bu tür olaylar, iş yerlerinde radyasyon güvenliği eğitimlerinin sürekli olarak güncellenmesi ve uygulanması gerektiğini göstermektedir.
- 14 Şubat 2014'te Peru'nun Ventanilla bölgesinde meydana gelen radyasyon vakası, INES 3. seviyede değerlendirilmiş ve radyografi cihazının hatalı kullanımına bağlı olarak operatörlerin yüksek dozda radyasyona maruz kalmasıyla sonuçlanmıştır. Olay, Ir-192 radyografi cihazının kaynak tüpünün cihaz içine geri çekilmemesi sonucu oluşmuştur. Bu teknik arıza, radyasyon güvenliği prosedürlerinin ihmal edilmesi ve eğitim eksikliğinden kaynaklanmıştır. Bu olayda etkilenen işçilerde akut radyasyon semptomları raporlanmıştır ancak takip muayenelerinde bir işçiye ise tekrarlayan cilt lezyonları görülmüştür. Kaynağın yanlış yerleştirilmesi ve cihazın uygun şekilde kullanılmaması, radyasyon maruziyeti riskini artırmıştır. Bu durum, radyasyon güvenliği uygulamalarının ve eğitimlerinin ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır. Radyasyonun etkilerini izlemek ve erken müdahalede bulunmak, işçilerin sağlık durumunun iyileştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Çalışmanın ikinci basamağında, INES seviyelendirmesi üzerinde durulmuş ve 70 yılı kapsayan tarihsel perspektifte yaşanan tüm radyasyon olayları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu doğrultuda, radyasyon olay ve kazalarının yıllara, coğrafi bölgelere, INES seviyelerine ve çalışma ortamlarına göre dağılımları analiz edilip tartışılmıştır.

- Tarihsel sürece bakıldığında, 1957-1989 yılları arasında olay ve kaza sayısının düşük düzeyde (yılda yaklaşık 1 vaka) olduğu gözlemlenmiştir. 1990'lı yıllardan itibaren kayıt tutulmasının başlamasıyla vaka sayısında belirgin bir artış yaşanmış ve 1991 yılında en yüksek seviyeye ulaşarak 83 vaka sayısına ulaşılmıştır. 1997'ye kadar verilerde sürekli bir artış (yılda ortalama 61 vaka) raporlanmış, ancak bu tarihten sonra ortalama vaka sayısı yıllık 22'ye düşmüştür.
- Coğrafi açıdan radyasyon vakalarının dağılımının irdelenmesinde, bölgesel güvenlik kültürü, teknolojik gelişmişlik ve raporlama disiplinlerinin etkileri göz önüne alınmıştır. Avrupa'da güvenlik kültürünün hızlı gelişmesi ve etkili raporlama sistemleri, vaka sayılarının belirli bir sayıda (491) kalmasına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, Amerika kıtasındaki yüksek vaka sayıları (221), Kuzey Amerika'daki geniş ölçekteki endüstriyel faaliyetler sonucuyla 193 vaka sayısı, Güney Amerika'daki ise 28 vaka sayısı daha az gelişmiş raporlama altyapısının bir sonucu olabilir. Asya'da bulunan 275 vaka sayısı ise, Hindistan ve Rusya Federasyonu gibi ülkelerde gözlemlenen yüksek vaka sayıları, bölgesel

teknolojik farklar ve güvenlik uygulamalarındaki farklılıklarla ilişkilidir. Bu faktörler, vaka sayılarındaki coğrafi varyasyonların anlaşılmasında kritik öneme sahiptir.

- 1990'lı yıllardan önceki vakalarda, yetersiz veri kaydı nedeniyle INES derecelendirmesini sağlayabilecek geriye dönük çalışma yapılamamıştır. Kayıt ve değerlendirme yönteminin biçimlendirilmesiyle birlikte 1990 yılından itibaren vaka bildirim ve kayıtlarında artış gözlenmiştir. Bu süreçte 1991-1996 yılları arası ağırlıklı olarak en fazla olay ve kazanın yaşandığı yıllardır. Bu zaman diliminde baskın olarak olay niteliğinde olan 0. ve 1. INES seviyesi görülmektedir. Ancak bu seviyeli olaylarda 1997 yılından itibaren gözle görülür bir azalma göstermiştir. Olayların büyük bir kısmının düşük INES seviyelerinde (0-2) olduğu görülmüştür. Ancak, belirli yıllarda daha yüksek INES seviyelerine sahip (3 ve üzeri) ciddi olaylar ve kazalar da raporlanmıştır. 1957 yılında 6. seviyeli bir kaza, 1986 ve 2011 yıllarında ise 7. seviyeli büyük kazalar yaşanmıştır.
- 1990 yılından itibaren, INES'in 2. seviyeli olayların sayısı kayıt tutulmaya başlandığı ve sonraki yıllarda da aynı oranda izlenerek devam ettiği görülmüştür. Ancak bu dönemde INES'in 3. seviyeli olayların sayısı yıllara göre düzensiz seyrettiği bulunmuştur. Kaza niteliğindeki vakaların sayısı yıllara göre rastgele dağılım göstermektedir. Örneğin INES'in 4. seviye kazaları 1989-2011 yılları arasında izlenirken, 5. seviye kazalar 1979 ve 2011 yıllarında, 6. seviye kazalar 1957 yılında, 7. seviye kazalar ise 1986 ve 2011 yıllarında kaydedilmiştir.
- Yaklaşık son 10 yılda ise radyasyon vaka sayısının gittikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Olay niteliğinde vakalar görülmekle birlikte kaza niteliğinde olan vaka gerçekleşmemiştir.
- 1957-2024 yılları arasında toplam 1054 vaka rapor edilmiştir. Olayların payı %98,7 iken kazaların payı %1,3 olarak bulunmuştur.
- Güç reaktörü, yakıt yenileme işlemi, radyasyon kaynağı kullanılan tesisler, ışınlama/hızlandırıcı tesisleri, yakıt üretimi, taşıma, araştırma tesisleri, araştırma reaktörü, radyoizotop işleme/taşıma tesisleri, radyoaktif atık tesisleri ve sınıflandırılmayan olay ve kazalar diğerleri adı altında toplanmıştır.
- En fazla radyasyon olay ve kazalar güç reaktörü tesislerinde 600 vaka sayısı (%57) ile gözlemlenmiş olup vakalar 1. ile 7. INES seviyelerine sahiptir. Sıradaki en yüksek vaka sayısına sahip olan, 225 vaka (%21) ile radyasyon kaynağı içeren vakalardır. Bunu, 78 vaka sayısı ile diğer vakalar takip etmektedir.
- Veriler analiz edildiğinde, kaza niteliğinde toplam 14 vaka bulunduğu ve bunların %43'ünün (6 vaka) güç reaktörlerinde gerçekleştiği görülmektedir. En düşük oran ise %7 ile endüstriyel sterilizasyon, yakıt üretimi, radyasyon kaynağı ve diğer kazalar kategorilerinde birer vaka olarak gözlenmiştir. Ayrıca, 4 vaka ile %29 oranında ışınlama/hızlandırıcı tesis kazaları rapor edilmiştir.

Radyasyon kazalarının detaylı incelemesi sonucunda, kazaların ortak nedenleri arasında insan faktörünün belirgin bir şekilde öne çıktığı görülmüştür. Özellikle, insan hatası kaynaklı ihmaller, yetersiz eğitim, dikkatsizlik ve güvenlik protokollerine tam olarak uyulmaması bu kazaların en önemli sebeplerinden biri olarak ortaya çıkmıştır. Ancak sadece insan faktörü değil, aynı zamanda teknik ve mühendislik arızaları da ciddi risk faktörleri arasında yer almaktadır. Bu arızalar genellikle güvenlik sistemlerindeki hatalar, donanımın aşınması ya da yetersiz bakım gibi unsurlardan kaynaklanmaktadır.

Bunun yanında, güvenlik prosedürlerindeki eksiklikler, özellikle acil durum planlarının yetersizliği ve çalışanların bu süreçler hakkında yeterince bilgilendirilmemesi, kazaların önlenmesinde önemli bir zafiyet yaratmaktadır. Hatalı atık yönetimi ve uygun olmayan depolama yöntemleri de kazalara zemin hazırlayan başlıca faktörler arasında sayılmaktadır. Son olarak, doğal afetler de kontrol dışı bir etken olarak, özellikle uygun hazırlık ve dayanıklılık önlemlerinin alınmadığı durumlarda, radyasyon kazalarına yol açabilmektedir. Tüm bu faktörler, radyasyon kazalarının geniş bir nedenler yelpazesi içinde değerlendirilebileceğini göstermektedir.



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, radyasyon kazaları ve etkileri, tarihsel gelişim çerçevesinde incelenmiş ve tartışılmıştır. Çalışma kapsamında, ulusal ve uluslararası düzeyde yazılmış akademik kitaplar, kuruluşlar tarafından yayımlanan raporlar ve teknik dokümanlardan faydalanılmıştır.

İlk radyasyon kazaları, 20. yüzyılın başında radyasyonun keşfi ve kullanımının ardından güvenlik önlemlerinin henüz yeterince gelişmediği dönemde yaşanmıştır. Marie Curie ve ekibi, radyoaktif elementlerle çalışırken uzun süreli radyasyon maruziyetine bağlı sağlık sorunları yaşamış, Thomas Edison'un X-ışını projelerinde çalışan teknisyen Clarence Dally, 1904 yılında cilt kanseri ve diğer radyasyon kaynaklı hastalıklar nedeniyle hayatını kaybetmiştir. 1917-1926 yıllarında, radyumla boyanan saat kadranlarını elle boyayan işçiler de kemik kanseri ve diğer radyasyon hastalıklarına yakalanmıştır. Ayrıca, 20. yüzyılın ortasında ABD'nin Los Alamos Laboratuvarı'ndaki nükleer silah projelerinde yüksek doz radyasyona maruz kalan bilim insanlarının ölümü, nükleer araştırmaların tehlikelerine dikkat çeken ilk vakalar arasında yer almıştır. 21. yüzyılın başında, sivil kapsamda radyasyon maruziyet vakalarının bildirimleri, ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından, özellikle IAEA ve medya aracılığıyla şeffaf bir şekilde paylaşılmaya başlanmıştır. Bu uygulama, vakaların düzeylerinin daha net ve geniş bir şekilde tanımlanması ve değerlendirilmesini sağlamış böylece çalışmamızın sonucunda bu gelişmelerin etkileri açıkça ortaya konmuştur.

Güvenlik kültüründeki iyileşme ve gelişmeler, son 10 yılda bildirilen vakaların niteliğinde belirgin bir iyileşmeye yol açmış ve vakaların çoğunluğu genellikle INES 1-3 seviyelerinde sınırlı kalmıştır. Korunma prensiplerine dayanan güvenlik prosedürlerinin tüm coğrafi kıtalarında ve iş kollarında etkin bir şekilde uygulanması gerektiği açıkça görülmüştür. Bu uygulamaların, güvenlik standartlarının sürekli olarak yükseltilmesine ve risklerin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacağı da tarafımızca görülmüştür.

Tez çalışmasının sonucunda, radyasyon ile çalışan personelin sürekli olarak iş koluna yönelik eğitim almasının yanı sıra, güvenlik ve korunma konularında kapsamlı eğitim ve uygulamalara dahil edilmesinin kritik önemi ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, personelin bilgi ve becerilerini güncel tutarak güvenlik standartlarını yükseltir ve potansiyel riskleri minimize eder. Ayrıca, radyasyon izleme ve uyarı sistemleri, çalışanların ve halkın radyasyona maruz kalmasını en aza indirmek ve kazaları önceden tespit etmek için kritik bir rol oynar. Böylece bu sistemler, radyasyon seviyelerini sürekli izleyerek güvenlik sınırları aşıldığında erken uyarı verir, acil müdahaleyi hızlandırır ve ciddi kazaların önüne geçilmesini sağlar. Özellikle nükleer tesisler ve tıbbi radyasyon uygulamalarında hayati bir öneme sahiptir ve güvenlik yönetimi için zorunlu bir tedbir olarak yer almalıdır.

Güvenlik kültürünün uluslararası destekle güçlendirilmesi ve risklerin azaltılması açısından, teorik ve uygulamalı eğitimlerin sürekli eğitimle desteklenmesi önerilmektedir. Bu bağlamda, her ülkeye aynı standartlarda eğitimlerin verilmesi ve güvenlik kültürünün öneminin vurgulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, günümüzde sıkça tartışılan yapay zekanın, radyasyon kaza risklerini azaltmada destekli kontrol mekanizmalarında etkin kullanımının araştırılması ve önerilmesi gerektiği tarafımızca düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- A.G. Tanır, M.H. Bölükdemir, and K. Koç, Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği. Ankara: Palme Yayıncılık, 2013.
- AFAD, İçsel ve Dışsal Radyasyondan Korunma (afad.gov.tr) [son erişim tarihi: 2024].
- AFAD, <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir> [son erişim tarihi: 2024].
- Akleyev, A. V., Krestinina, L. Yu., Degteva, M. O., & Tolstykh, E. I. (2017). "Radiation risk estimation for chronic exposure: The Techa River study." Journal of Radiological Protection, 37, R19. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
- AP Photo Barry Thumma, Associated Press News Agency, 1979.
- Donna Lowe, Laurence Roy, Maria Antonella Tabocchini, Werner Rühm, Richard Wakeford, Gayle E. Woloschak, Dominique Laurier (2022). "Radiation dose rate effects: what is new and what is needed?"
- GPU Nuclear Corp. (1999). "10 briefing papers." Nuclear Energy Institute, Nuclear Energy Overview, 08/05/2000.
- Goran tek-en, Jan Rieke, maps-for-free.com, NordNordWest, Historicair, Bourrichon, Insider, Kneiphof (2019).
- Hall, E.J. and Giaccia, A.J. (2012) Radiobiology for the Radiologist. 7th Edition, Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- ICRU (2011) Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. Journal of ICRU, 11, 1-31.
- International Atomic Energy Agency (1988). "The Radiological Accident in Goiania." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (1990). "The Radiological Accident in San Salvador." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (1993). "The Radiological Accident in Soreq." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (1996). "The radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (1998). "The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (1998). "The radiological accident in Tammiku." IAEA, Vienna.

- International Atomic Energy Agency (1999). Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura, Japan.
- International Atomic Energy Agency (2000). "The radiological accident in Yanango." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2001). "The Criticality Accident in Sarov." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2002). "The radiological accident in Gilan." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2002). "The radiological accident in Samut Prakarn." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2004). "Accidental overexposure of radiotherapy patients in Białystok." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2004). "The radiological accident in Cochabamba." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2008). International Nuclear and Radiological Events Scale Users' Manual, Edition. Vienna, Austria.
- International Atomic Energy Agency (2009). "The radiological accident in Nueva Aldea." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2014). "The radiological accident in Lia, Georgia." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2015). "The Fukushima Daiichi accident," IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2018). "The radiological accident in Chilca." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2019). "The radiological accident in Ventanilla." IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2022). "The Radiological Incident in Hueypoxtlá." IAEA, Vienna, Austria.
- International Atomic Energy Agency, (1998). "The radiological accident in Tammiku" IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, (2002). "The radiological accident in Gilan." IAEA, Vienna.

- International Atomic Energy Agency, (2000). “The radiological accident in Yanango.” IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, (2009). “The radiological accident in Nueva Aldea.” IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, (2013), INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User’s Manual. IAEA, Vienna.
- Kiefer, Jürgen. Biological radiation effects. Springer Science & Business Media, 2012.
- Kyrylenko Y, Kameneva I, Popov O, Iatsyshyn A, Artemchuk V, Kovach V (2022) Actual Issues on Radiological Assessment for Events with Liquid Radioactive Materials Spills Systems, Decision and Control in Energy III ed Zaporozhets A (Cham: Springer International Publishing) pp 139–156 ISBN 978-3-030-87675-3 URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_8.
- LAndelijk Kernenergie Archief, LAKA, <https://www.laka.org/> [son erişim tarihi: 2024].
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 1999. Potential Radiation Exposure in Military Operations: Protecting the Soldier Before, During, and After. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9454>.
- Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), Radyasyon Olay veya Kazalarının Sınıflandırılmasına İlişkin Kılavuz, 2023-KLV-002. [son erişim tarihi:2024]. <https://webim.ndk.gov.tr/file/744add75-b0c2-49ea-a05d-60d57c561c1f>.
- Pennsylvania Real-Time News, <https://www.pennlive.com/news/2019/03/three-mile-island-40-years-later-a-timeline-of-events-as-they-occurred-on-march-28-1979.html> . [Son erişim tarihi: 2024].
- Rabl, Thomas. “The Nuclear Disaster of Kyshtym 1957 and the Politics of the Cold War.” Environment & Society Portal, Arcadia (2012), no. 20. Rachel Carson Center for Environment and Society. <https://doi.org/10.5282/rcc/4967>.
- Radioactivity.eu.com, https://radioactivity.eu.com/articles/nuclearenergy/tokaimura_accident. [son erişim tarihi:2024].
- Talapko, J., Talapko, D., Katalinić, D., Kotris, I., Erić, I., Belić, D., Vasilj Mihaljević, M., Vasilj, A., Erić, S., Flam, J., Bekić, S., Matić, S., & Škrlec, I. 2024. Health Effects of Ionizing Radiation on the Human Body. Medicina (Kaunas, Lithuania), 60(4), 653. <https://doi.org/10.3390/medicina60040653>.
- The Chernobyl Forum: 2003–2005. Chernobyl’s Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, Second revised version.
- The Radiological Accident in Lilo /jointly sponsored by the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization. Vienna: The Agency, 2000.

Three Mile Island Accident." <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html> [Son erişim tarihi: 29.08.2024].

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, TAEK, Radyasyon Olay veya Kazalarının Sınıflandırılmasına İlişkin Kılavuz, RSGD-KLV-033, TAEK, Ankara.

Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, TENMAK, <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/834-bolum-06-radyasyondan-korunma.html>.

UNSCEAR (2008). Report, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). "Three Mile Island Accident." <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html> [Son erişim tarihi: 29.08.2024].

ÖZGEÇMİŞ

ECEM RAMAZANOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2021-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2021	Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Antalya