ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK RADYOAKTİF MADDELERİN TAŞINMASINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ UYGULAMASI: HATA AĞACI MODEL ÖNERİSİ İLE RİSK ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

Hazırlayan

Furkan Erdoğan

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

Temmuz 2020

ANKARA

YÜKSEK RADYOAKTİF MADDELERİN TAŞINMASINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ UYGULAMASI: HATA AĞACI MODEL ÖNERİSİ İLE RİSK ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

Hazırlayan

Furkan Erdoğan

ANKARA, 2020

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAVI SONUÇ FORMU

FURKAN ERDOĞAN tarafından, **Prof. Dr. ERGÜN ERASLAN** gözetiminde tamamlanan **" YÜKSEK RADYOAKTİF MADDELERİN TAŞINMASINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ UYGULAMASI: HATA AĞACI MODEL ÖNERİSİ İLE RİSK ANALİZİ"** konulu tezi inceledik. Yapılan inceleme sonucunda kapsam ve kalite bakımından Yüksek Lisans derecesi için tamamen yeterli bir tez olduğunu onaylıyoruz**.**

Prof. Dr. Ergün ERASLAN

(Danışman)

Dr. Öğr. Üy. Abdullah YILDIZBAŞI

(Jüri Üyesi)

Dr. Öğr. Üy. Tahsin ÇETİNYOKUŞ

(Jüri Üyesi)

Prof. Dr. Ergün ERASLAN

Başkan

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım El Kitabına uygun olarak hazırlanan bu tezde; tezin kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda patent ve telif haklarını ihlal edici etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tezde kullanılmış olan tüm bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Aksi bir durumda, tüm yasal haklarımdan vazgeçmeyi kabul ediyorum.

Tarih: 02.07.2020 Furkan ERDOĞAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında, engin görüşleri ile bana yol gösteren, yeni fikirler ve bilgiler edinmemi sağlayan, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan ve eksik etmediği güler yüzünden dolayı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ergun Eraslan'a, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

20.05.2020 Furkan ERDOĞAN

APPLICATION OF TRANSPORTATION OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE MATERIALS: RISK ANALYSIS BY FAULT TREE METHOD PROPOSITON

ABSTRACT

Radiation is a significant topic that must be understood and investigated in all its aspects. Since the technological devices that emit long wavelength / low energy electromagnetic waves such as television, computer, phone are widely used in various fields such as health, nuclear medicine, nuclear energy, industry, agriculture to raise our quality of life, the radiation and its effects should be taken seriously. It is necessary to provide the necessary information and equipment, to inform the society and employees, and to develop and implement appropriate protection methods. Due to its ionizing effect, when high energy radiation interacts with the substance, it can cause undesirable harmful effects in soft tissue. Radiation accidents should be prevented in advance and necessary precautions should be taken within the framework of the principle of prevention before hazard emerges, which is the basic principle of the science of occupational health and safety.

Training of employees to work in high radioactive material transportation, design of transport containers, implementation of national and international standards, taking precautionary measures, protection of society, environment and employees is vital. Suitable transportation methods and procedures for ensuring occupational health and safety are exemplified in this thesis study in the light of the directives of national and international relevant institutions. The study focused on the concept of OHS, radiation, effects of radiation on living things, radiation protection, transportation of radioactive materials, methods and methods of transportation, occupational safety practices in transporting high radioactive materials. Then, risk factors were evaluated by Fault Tree Analysis method and Accident Site Application over a possible accident scenario.

Keywords: Occupational health and safety, radiation protection, transportation of high-level radioactive materials, risk assessment, fault tree analysis.

YÜKSEK RADYOAKTİF MADDELERİN TAŞINMASINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ UYGULAMASI: HATA AĞACI MODEL ÖNERİSİ İLE RİSK ANALİZİ

ÖZ

Radyasyon, tüm yönleri ile anlaşılması ve araştırılması gereken önemli bir konudur. Televizyon, bilgisayar, telefon gibi uzun dalga boylu/ düşük enerjili elektromanyetik dalgalar yayan teknolojik aletlerin yaygınlığı ve yaşam kalitemizi yükseltmeye yönelik sağlık, nükleer tıp, nükleer enerji, endüstri, tarım gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanıldığından, radyasyon ve etkilerinin ciddi bir şekilde ele alınması, gerekli bilgi ve donanımın sağlanması, toplumun ve çalışanların bilgilendirilmesi, uygun koruma yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. İyonlaştırıcı etkisi sebebi ile, yüksek enerjili radyasyon madde ile etkileştiğinde, yumuşak dokuda istenmeyen zararlı etkilere neden olabilir. Radyasyon kazaları, yanlış dozda ışımalar, nükleer serpintiler, denetimsiz radyoaktif alanlarda oluşabilecek tehlikeli durumlar, iş sağlığı ve güvenliği biliminin temel prensibi olan tehlike ortaya çıkmadan önleme ilkesi çerçevesinde, önceden engellenmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Yüksek radyoaktif madde taşımacılığında çalışacak personelin eğitilmesi, taşıma kaplarının tasarımı, ulusal ve uluslararası standartların uygulanması, tehlike durumlarını engelleyici tedbirlerin alınması, toplum, çevre ve çalışanların korunması hayati önem taşımaktadır. İşçi sağlığı ve iş güvenliğinin sağlanması için uygun taşıma yöntem ve usulleri, ulusal ve uluslararası ilgili kurumların direktifleri ışığında bu tez çalışmasında örneklendirilmiş. Çalışmada, İSG kavramı, radyasyon, radyasyonun canlılar üzerindeki etkileri, radyasyondan korunma, radyoaktif materyallerin taşınması, taşıma yöntem ve usulleri, yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında iş güvenliği uygulamaları üzerinde duruldu. Ardından muhtemel bir kaza senaryosu üzerinden hata ağacı analizi yöntemi ile risk faktörleri ve kaza saha uygulaması değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, radyasyondan korunma, yüksek radyoaktif madde taşıma, risk değerlendirmesi, hata ağacı analizi

İÇİNDEKİLER

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAVI SONUÇ FORMU.....ii
ETİK BEYAN FORMU.....iii
TEŞEKKÜR.....iv
ABSTRACT.....v
ÖZ.....vi
İÇİNDEKİLER vii
TERMİNOLOJİ…….. xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
TABLOLAR DİZİNİ.....xii
RESİMLER DİZİNİ.....xiv
BÖLÜM 1- GİRİŞ 1
BÖLÜM 2- İSG ve LİTERATÜR.....3
2.1 Dünyada İş Sağlığı ve Güvenliği.....4
2.2 Türkiye'de İş Sağlığı ve Güvenliği.....6
2.3 İşyeri Ortam Faktörleri.....7
2.4 İş Kazası ve Meslek Hastalıkları.....8
BÖLÜM 3- RADYASYON ve LİTERATÜR.....9
3.1 Radyasyonun Tarihsel Süreci.....9
3.2 İş Sağlığı ve Güvenliği ile Radyasyon İlişkisi…….…….……11
3.3 İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Radyasyonun Tarihsel Süreci..…….…...12
3.4 Radyasyon Çeşitleri.....15
3.4.1 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....15
3.4.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Türleri.....15
3.5 Radyasyonun Madde ile Etkileşimleri.....19
3.5.1 Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi.....19
3.5.2 Gama Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....21
3.5.3 Nötronların Madde ile Etkileşimi.....21
3.6 Radyasyon Birimleri.....22
3.7 Radyasyon Kaynakları.....23

3.7.1 Doğal Radyasyon Kaynakları.....23
3.7.2 Yapay Radyasyon Kaynakları.....24
3.8 Radyasyonun Biyolojik Etkileri.....25
3.8.1 İyonize Radyasyonun Hücre Düzeyinde Biyolojik Etkisi……..……26
3.8.2 Radyasyonun Biyolojik Etkilerinin Bağlı Olduğu Faktörler……..……....27
3.8.3 Radyasyonun Tüm Organizma Üzerine Biyolojik Etkileri…….……....……..28
3.8.4 Akut Radyasyon Sendromu.....30
BÖLÜM 4- RADYASYONDAN KORUNMA.....34
4.1 Radyasyondan Korunmanın Temel İlkeleri.....34
4.2 Görüntüleme/ Monitoring.....38
4.2.1 Alan Görüntüleme.....38
4.2.2 Personel Görüntüleme.....39
4.3 Radyasyondan Korunmada Fiziksel Etmenler.....40
4.4 İç Radyasyon Tehlikelerine Karşı Korunma Yöntemleri……..……..……42
BÖLÜM 5- RADYOAKTİF MADDE LOJİSTİĞİ VE İSG.....43
5.1 Tehlikeli Maddelerin Taşımacılığı.....43
5.1.1 Tehlikeli Maddelerin Sınıflandırılması.....43
5.1.2 UN Numarası.....46
5.1.3 Tehlikeli Madde Paket Grupları.....46
5.2 Radyoaktif Maddelerin Taşınması.....47
5.3 Radyoaktif Materyal Kullanımı.....48
5.3.1 Özel Formda Hazırlanmış Radyoaktif Maddeler……..……....49
5.3.2 Normal Formda Hazırlanmış Radyoaktif Maddeler…….…….....50
5.3.3 A1 ve A2 Miktar Limitleri.....50
5.3.4 Kontaminasyon.....50
BÖLÜM 6- YÜKSEK RADYOAKTİF MADDE TAŞIMA GÜVENLİĞİ VE UYGULAMALAR…….……51
6.1 Radyoaktif Madde Taşıma Güvenliği Düzenlemeleri……...……51
6.1.1 Uluslararası Düzenlemeler…….……51
6.1.2 Ulusal Düzenlemeler…….…….53
6.2 Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınmasında Ana Prensipler……...…….53
6.2.1 Radyoaktif Maddelerin Sınıflandırılması…….……..…53

6.2.2 Paketleme.....56
6.2.3 Etiketleme.....58
6.2.4 İşaretleme.....59
6.2.5 Araç Seçimi.....60
6.2.6 Plakaların Yerleştirilmesi.....61
6.3 Bölünebilir Maddeler.....61
6.3.1 Taşıma.....63
6.3.2 Paket Tasarımı.....65
6.3.4 MOX Yakıt Taşıma.....68
6.4 Uranyum Heksaflorür.....68
6.4.1 Taşıma Kapları Tasarım Özellikleri ve Gereklilikler.....69
6.5 Yüksek Radyoaktif Atıklar.....71
6.5.1 Kullanılmış Nükleer Yakıt.....72
6.5.2 Kullanılmış yakıt Nakil Konteyneri.....73
6.5.3 Yeniden İşlemeden Kaynaklanan Atık Malzemeler 76
6.6 Taşıma Kontrolleri.....79
BÖLÜM 7- RADYOAKTİF MADDE LOJİSTİĞİNDE KAZA RİSKİ.....80
7.1 Taşıma Kazası.....80
7.2 Kaza Sahası Uygulaması.....81
7.2.1 Bulgular.....82
7.2.2 Metot.....83
7.3 Risk Değerlendirmesi.....89
7.4 Hata Ağacı Analizi.....92
7.5 Yüksek Radyoaktif Maddelerin Taşınmasında Hata Ağacı Analiz Yönteminin Uygulanması.....92
7.5.1 Metot.....92
7.5.2 Uygulama.....94
7.5.3 Bulgular.....98
BÖLÜM 8- SONUÇ VE ÖNERİLER.....111
8.1 Kaza Sahası Bölgeleri.....111
8.1.1 Kaza Sahası Uygulamasının Faydaları.....111
8.2 Hata Ağacı Analizi ile Risk Değerlendirmesi.....113

8.2.1 Sonuç ve Öneriler.....113
8.2.2 Hata Ağacı Analizinin Yüksek Radyoaktif Madde Lojistiğinde Kullanılabilirliği.....114
KAYNAKLAR.....116
ÖZGEÇMİŞ.....133

TERMİNOLOJİ

Semboller

α Alfa parçacıkları

β Beta parçacıkları

γ Gama Işınları

Kısaltmalar

AFAD: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

ARPANSA: Avustralya Radyasyondan Korunma ve Nükleer Güvenlik Ajansı

DOT: ABD Ulaştırma Bakanlığı

EPA: ABD Çevre Koruma Ajansı

IAEA: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

ILO: Uluslararası Çalışma Ajansı

ISO: Uluslararası Standartlar Teşkilâtı

NDK: Türkiye Nükleer Düzenleme Kurumu

NIOSH: ABD Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü

OSHA: ABD İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi

SGK: Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumu

TAEK: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

TÜİK: Türkiye İstatistik Kurumu

UNSCEAR: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi

USCG: ABD Sahil Güvenlik Teşkilatı

USNRC: ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu

WNA: Dünya Nükleer Derneği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 ^{235}U'nin α- salınımı……..……..17

Şekil 3.2 ^{40}K'ın β bozunması…….……...17

Şekil 3.3 ^{60}Co'ın γ bozunması…….……..18

Şekil 3.4 Radyasyonun etki mekanizmaları, dolaylı ve direkt etki…...……..……..26

Şekil 4.1 α, β, ɣ ve nötronların maddeye nüfuz yeteneklerinin temsili gösterimi…..……40

Şekil 4.2 Radyasyon çalışanlarının radyoaktif kaynak ile çalışırken uyması gereken korunma faktörleri.…….……..41

Şekil 6.1 Radyoaktif malzeme taşıyan araçlara plakaların yerleştirilmesi…..……...…61

Şekil 6.2 Yakıt çevrimi ve tesisler arası taşıma…….……..…..64

Şekil 6.3 Kullanılmış yakıt taşıma kaskı…..…….……..….74

Şekil 6.4 Taze Yakıtın yanması sonucu geriye kalan ürünler……..……..77

Şekil 7.1 Kaza sonrası dağılan radyoaktif maddelerin ana transfer ve kirletme yolları.…84

Şekil 7.2 Ters kare yasası……..……85

Şekil 7.3 Radyoaktif madde taşıma kazasına ait saha planlaması…….…….…..87

Şekil 7.4 Boolen Matematiği çizelgesi..……..…….……..…97

Şekil 7.5 Radyoaktif taşıma kazası hata ağacı…..……...…..…102

Şekil 7.6 Hata ağacı trafik kazası ara kesit…….…….…...104

Şekil 7.7 A- Hata ağacı trafik kazası- personel faktörü…..…….……105

Şekil 7.8 B- Hata ağacı trafik kazası- sistemsel etkenler…….…….…..105

Şekil 7.9 C- Hata ağacı trafik kazası- dış etkenler…….…106

Şekil 7.10 D- Hata ağacı trafik kazası- yönetsel etkenler…….……106

Şekil 7.11 Hata ağacı taşıma kabı fiziksel etmenler ara kesit…….…108

Şekil 7.12 Hata ağacı taşıma kabı- tasarım faktörü…….……...……...…109

Şekil 7.13 Hata ağacı trafik kazası- personel faktörü……..……...……..…109

Şekil 7.14 Hata ağacı trafik kazası- termal değişim……..……..……....110

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo2.1 Türkiye'de bazı yıllara ait iş kazası istatistikleri…..……6

Tablo 3.1 Radyasyonun tarihsel süreci……..…….……9

Tablo 3.2 Radyasyon çeşitleri……..……15

Tablo 3.3 Radyasyon birimleri……...……..…22

Tablo 3.4 Türkiye'de yapay radyasyon kaynak sayıları…….…….…….25

Tablo 3.5 Radyasyonun tüm organizma üzerinde bıraktığı biyolojik etkileri……...……28

Tablo 3.6 Akut radyasyon hastalığının belirtileri, belirtilerin ortaya çıkış süresi, doz düzeyleri…….……..…31

Tablo 3.7 Çernobil kazasından sonra akut radyasyon hastası olan kurtarma ekibi çalışanları……...……...……31

Tablo 4.1 Tüm vücut için maruz kalınan dozlar ve etkilerinin karşılaştırılması.……...…35

Tablo 4.2 Radyasyon görevlileri ve halk için doz limitleri…….……..……37

Tablo 5.1 Tehlike madde sınıfları…….……..……..44

Tablo 5.2 Paketleme grupları, tanımları ve tehlike dereceleri……..…..…46

Tablo 6.1 Radyoaktif maddelerin taşınmasına ilişkin düzenleme yapan uluslararası organlar ve faaliyetleri……...……...51

Tablo 6.2 SCO grubunda yer alan nesneler için kirlenme limitleri…….……..55

Tablo 6.3 Radyoaktif madde taşımada kullanılan paket türleri ve özellikleri.…….….57

Tablo 6.4 Radyoaktif maddelerin paketlenmesinde kullanılan etiketler……..…….59

Tablo 6.5 Nükleer madde taşıma faaliyetleri……...…….……65

Tablo 7.1 Hata ağacı analizinde kullanılan semboller …….……..…96

Tablo 7.2 Olasılık ölçeği…….…….……98

Tablo 7.3 Hata ağacı analizinde trafik kazasına neden olan ana ve ara faktörler.……..101

Tablo 7.4 Hata ağacı analizinde taşıma kaplarından direkt radyasyon salınımını etkileyen ana ve ara fiziki faktörler……...……...…...107

Tablo 7.5 Hata ağacı analizi sonucu elde edilen olasılık değerleri……....….110

RESİMLER DİZİNİ

Resim 2.1 Sanayi Devrimi…….……..…5

Resim 2.2 Sanayi Devrimi sonrası çocuk işçiler ve grev gösterileri……..…….....5

Resim 3.1 Radyum kızları…….……..……14

Resim 4.1 Denetimli alan girişlerinde bulunması gereken uyarı işaretleri…….…...38

Resim 4.2 Radyasyondan korunmada kullanılan kişisel dozimetre örnekleri……..….39

Resim 5.1 Karayolu ile radyoaktif madde taşıma…….....48

Resim 5.2 (a) Endüstriyel radyografi kaynağı, (b) nötron kaynağı…….…..….49

Resim 6.1 Katı haldeki UF6……..…....68

Resim 6.2 UF6 taşımasında kullanılan silindir tanklar…….……...….70

Resim 6.3 Kullanılmış yakıt fıçıları ile yapılan tam ölçekli çarpışma ve yüksekten düşürme testi……..…….……75

Resim 7.1 Clinton, Tennessee radyoaktif madde taşıma kazası…….…….……..81

Resim 7.2 Çernobil nükleer kazası sonrası Avrupa'da 3 Mayıs 1986 tarihinde ölçülen dozlar…….…….....83

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Radyoaktif maddeler, bir taşıma kazasında acil önlem alınması gereken tehlikeli maddeler arasındadır. Radyoaktif maddelerin sevkiyatı, katı madde paketleme gereklilikleri uygulandığından, bu maddelerin dökülmesi veya salınması nadiren meydana gelir. Dünya genelinde çok az sayıda acil durum müdahalesi gerektiren radyoaktif madde içeren ulaşım kazası ile karşı karşıya gelinmiş olsa bile, Türkiye için yeni bir teknoloji sayılabilecek nükleer santrallerin kullanıma açılması ile birlikte, yüksek radyoaktif madde taşımacılığının gerçekleşeceği ve olası bir kaza sonrası oluşabilecek zararlı etkilerin büyüklüğü göze alındığında, kazanın oluşmasını engellemek ve gerekli güvenlik önlemlerini almak ve böyle bir kazaya cevap vermedeki rolünüzü bilmek çalışanların iş sağlığı ve güvenliği, toplum sağlığı ve çevreni korunması için büyük derecede öneme sahiptir.

Ülkemizde radyoaktif maddelerin güvenli taşınması ilkeleri Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın 1996 yılında yayınlamış olduğu, taşıma güvenliği yönetmelikleri ve taşıma standartlarını belirleyen diğer uluslararası kuruluşların tehlikeli madde taşımacılığına yönelik hazırladıkları tavsiye ve talimatlar kapsamında ve uluslararası geçerli olan antlaşmalar ile belirlenmiş ve ilk olarak Türkiye Atom Enerji Kurumu tarafından, daha sonra Nükleer Düzenleme Kurumu'nun kurulması ile birlikte bu kurum tarafından icra ve kontrol edilmektedir.

Ülkemizde iç su yolu taşımacılığının, kararlı rejime sahip olmaması nedeni ile taşımacılıkta kullanılmıyor olması ve aktif olarak raylı sistemler ile radyoaktif madde taşımacılığının gerçekleştirilmemesi sebebi ile, genel olarak kara ve deniz yolunun tercih edilmesine rağmen ülke içi suyolu, demiryolu da dahil olmak üzere; denizyolu, kara ve hava yolu için ayrı ayrı olarak mevcut mevzuatta uygulama koşulları ve taşımacılık standartları belirlenmiştir.

Radyoaktif madde taşımacılığı, halihazırda nükleer tıp ve onkolojide teşhis ve tedavi amaçlı, endüstri ve çeşitli laboratuvar ve üniversitede araştırma amaçlı kullanılan radyoizotopların ve atıklarının taşınmasında aktif olarak kullanılırken, Sinop ve Mersin'de yapılması planlanan nükleer santrallerin devreye girmesiyle birlikte büyük derecede tehlikeli etkiye sahip, yüksek radyoaktif maddelerin sisteme dahil olması ile daha da önem kazanacaktır.

Taşıdıkları yüksek risk potansiyeli sebebi ile yüksek radyoaktif madde taşımacılığı, çalışanları ve toplumu radyasyonun zararlı etkilerinden koruyabilmek için sıkı prosedürlere bağlı olarak gerçekleştirilir. Bu tez çalışmasında radyasyon, radyasyondan korunma, iş sağlığı ve güvenliği ile radyasyon ilişkisi, radyoaktif madde taşıma işlemi sırasında alınması gereken önlemler ve taşıma tarihçesi üzerinde durularak, ülkemizde yüksek radyoaktif madde taşımacılığı gerçekleştirilmeye başlamadan önce gerekli bilgi ve donanıma katkı sağlamak istenmiştir.

BÖLÜM 2

İSG ve LİTERATÜR

İş sağlığı ve güvenliği, iş icra edilirken fiziki ortam koşulları sebebiyle, çalışanların maruz kaldıkları sağlık problemleri ve mesleki tehlikelerin yok edilmesi veya azaltılması, çalışanların vücut bütünlüklerinin ve ruhsal durumlarının korunması amacıyla alınması gerekli olan tıbbi, teknik ve hukuki önemlerin sağlaması için yapılan bütün çalışmaları içerir [1].

İşçi sağlığı ve iş güvenliği çalışmalarında üç önemli unsur bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir [2].

a. **Çalışanların korunması:** İşçi sağlığı ve iş güvenliği çalışmalarında öncelikli amaç; çalışanların iş ortamlarından kaynaklı istenmeyen etkilerden korumak, konforlu koşullarda ve güvenilir ortamlarda işlerini yapmalarını sağlamak, çalışanları mesleki hastalıklar ve iş kazalarından uzak tutarak ruhi ve bedensel bütünlüklerinin korunmasıdır.
b. **Üretim güvenliğinin sağlanması:** İş sağlığı ve güvenliği tedbirleri ile çalışanların olası risklere karşı korunması, işgücü ve iş günü kayıplarını azaltacağından üretim korunacak ve verimliliğinde de artış meydana gelecektir.
c. **İşletme güvenliğinin sağlanması:** Güvensiz ve sağlıksız ortam koşulları ortadan kaldırıldığında, bu koşullar altında doğabilecek makine arızası, patlama, yangın gibi işletmeyi tehlikeye atabilecek unsurlar ortadan kaldırıldığından işletme içinde güvenlik artırılmış olur.

2.1 Dünyada İş Sağlığı ve Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi

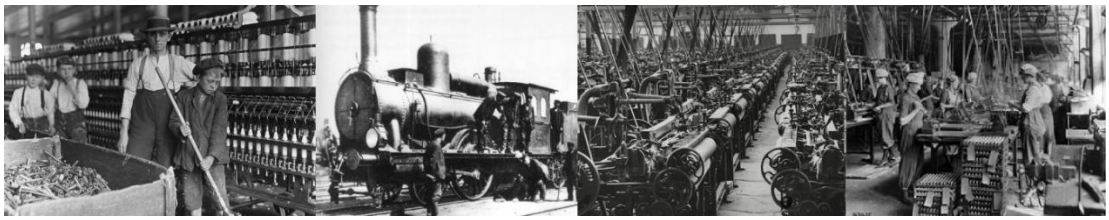
Üretim süreci ilk insanla başlayarak günümüze kadar teknik ve biçimsel olarak büyük değişimler geçirmiştir. Toprağın işlenmesi ile başlayan bu süreç ateşin kullanılması, madencilik, buhar gücünün kullanılması, iş alet ve araçlarının teknolojik gelişimi gibi tarihsel süreçlerin etkisi ile önemli gelişmeler kaydedilmiştir. İş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının temelini oluşturan işle sağlık arasındaki ilişkinin kurulması ve işten kaynaklı sağlık problemlerine çözüm bulmaya çalışılması oldukça eski çağlara dayanmaktadır [3].

İşçilerin sağlığının korunmasına karşı alınan tedbirler Eski Mısırlılar (M.Ö. 1500)'a kadar uzanır. M.Ö. 2000'lerde Babil İmparatoru Hammurabi (M.Ö. 1819-1950) hazırlattığı Hammurabi Kanunlarında işçi sağlığı ve iş güvenliği ile ilgili hükümlere yer vermiştir [4].

Eski Roma'da bugünkü anlamda iş güvenliği ve işçi sağlığı olarak anılabilecek çalışmalara rastlanılmaktadır. Bu dönemde yaşayan birçok bilim insanın iş sağlığı ve güvenliğine yönelik, günümüzde de hala geçerliliği sürdüren, çeşitli öneri ve teorileri bulunmaktadır. Tarihçi Herodot çalışanların daha verimli çalışabilmesi için daha yüksek enerjili besinler ile beslenmeleri gerekliliğini vurgulamıştır [4].

Tarihte bu alanda yapılan ilk köklü çalışma **Bernardino Ramazzini** (1633-1714) tarafından İtalya'da başlatılmış, bilimsel olarak değerlendirebileceğimiz iş hekimliği uygulamaları kullanılmaya başlanılmış ama köklü değişimler Sanayi Devrimi sonrası İngiltere'de yaşanmıştır [5].

Sanayi Devrimi sonrası (Resim 2.1) insan, rüzgâr, su, hayvan gücünün yerini; buhar gücünün harekete geçirdiği devasa makineler almış, el işine dayalı üretiminin yerine bu makinelerle donatılmış fabrika üretimine geçilmiştir. Bu köklü değişiklik çalışma çevresi ve şartlarında, üretim araç ve metotlarında büyük devrimlere neden olmuştur [6].



Resim 2.1 Sanayi Devrimi

Üretim metotlarında yaşanan hızlı gelişim, bu gelişime uyum sağlayamayan, eğitimsiz ve deneyimsiz çalışanlar, gerekli güvenlik önlemlerinin sağlanmaması, çok uzun mesai saatleri, yetersiz ve düşük maaşlar, çok zor şartlarda çocuk ve kadın işçilerin çalıştırılması Sanayi Devrimi ardından (Resim 2.2) iş kazalarında büyük artışlara neden olmuştur [7].



Resim 2.2 Sanayi Devrimi sonrası çocuk işçiler ve grev gösterileri

Mekanikleşmenin beraberinde getirdiği olumsuz çalışma ve yaşam koşulları nedeniyle başlangıçta makineler suçlansa da ilerleyen zamanlarda çalışma şartlarındaki olumsuzlukların iyileştirilmesi talebiyle işçiler grev gibi etkinlikler ile hak arayışına başlamıştır. Bu tepkiler sonucunda 19. Yüzyılda yaşanan teknolojik gelişmelerin getirdiği ağır şartları iyileştirmek ve güvenli bir çalışma ortamı sağlayabilmek adına birçok yasal, teknik ve tıbbi etüt çalışması yapılmıştır [7].

Sanayi Devrimi sonrasında başlayan olumsuz etkilere karşın, teknolojide yaşanan büyük devrimle sağlanan gelişmeler gelişmiş ülkelerde iş ortamından kaynaklı olumsuzlukların iyileştirilmesi için önemli adımlar kazandırmıştır. Robotlar denizaltında, toksik gaz ortamlarında ya da radyoaktif çalışmalarda, insanların çalışması uygun olmayan tehlikeli alanlarda kullanılarak bu etki daha da artırılmıştır [8,9]. Güvenlik kültürünün üretimde

yaygınlaşması ile iş kazası ve meslek hastalıklarına maruz kalma olasılıkları azalmıştır [10].

2.2 Türkiye'de İş Sağlığı ve Güvenliği

Ülkemizde de dünyada yaşanan gelişmelere paralel olarak işçi sağlığı ve iş güvenliği alanlarında benzer değişimler yaşanmıştır [11]. İSG kültürü Cumhuriyet'in kurulduğu ilk yıllardan günümüze uluslararası nitelikte yapılan düzenlemelere paralel gelişim göstermiştir. Avrupa birliği uyumluluk süreci kapsamında İSG konusunda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır [12].

İş hayatına güvenlik ve sağlık uygulamaları ile ilgili önemli ilk düzenlemelerden biri 1930'da çıkarılan Umumi Hıfzıssıhha Kanunu'dur. Borçlar Kanunu ve İş Kanunu yine işçi sağlığı ve iş güvenliği ile ilgili düzenlemeler içermektedir. Sosyal Sigortalar Kanunu'nda bu konu üzerine yaptırımları bulunmaktadır. Sosyal Sigortalar Kurumuna bağlı ilk meslek hastalıkları hastanesi 1949 yılından İstanbul Nişantaşı'nda faaliyete geçmiştir [13].

İş sağlığı ve güvenliği alanında yapılan bağımsız ve oldukça detaylı 6331 sayılı İSG kanunu TBMM tarafından 20.06.2012 tarihinde kabul edilmiş ve 30.06.2012 tarihinde yürürlüğe girmiştir [1]. Şimdiye kadar Türkiye 59 tane ILO sözleşmesine imza atmıştır [14]. Sosyal Güvenlik Kurumu (SSK) 2017 İstatistiklerine göre, son yıllarda yaşanan iş kazaları ve meslek hastalıkları sayıları tablo 2.1' de verilmiştir [15].

Tablo2.1 Türkiye'de bazı yıllara ait iş kazası istatistikleri

Yıl	İş Kazası	Ölüm (Kişi)	Meslek Hastalığı (Kişi)	İş Göremezlik (Kişi)
2012	74.871	745	395	2036
2013	191.389	1360	371	1656
2014	221.366	1626	494	1421
2015	241.547	1252	510	3433
2016	256.068	1970	597	4447

İşyeri ortam koşulları, personel hataları ve mesleki eğitim yetersizliği iş kazaları ve meslek hastalıklarının ana sebepleridir. Bir işyerinde belirlenen kurallar ve kararlar işveren tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle güvenli bir ortamın düzenlenmesi de işverenin sorumluluğundandır. Yapılan düzenlemeleri ve uygulamaları denetlemek, işçilerin haklarını korumak ise devletin elindedir [13].

2.3 İşyeri Ortam Faktörleri

İşyerinde işçi sağlığı ve iş güvenliğini tehlikeye atabilecek birçok risk grubu bulunmaktadır. Bu faktörler aşağıdaki detaylı olarak açıklanmıştır [2]:

Tozlar: Yüz mikronun altında partikül büyüklüğüne sahip olan ve havada asılı şekilde bulunan maddeler **toz** olarak adlandırılır. Tozlar çeşitli akciğer hastalıklarına, deri ve diğer organlarda çeşitli tahriş edici etkilere neden olabilir.

Ergonomik Faktörler: Çalışma koşullarının işçilerin rahat bir şekilde hareket edebilmelerini sağlayacak şekilde ergonomik (iş-işçi uyumu) faktörleri dikkate alınarak düzenlenmelidir.

Psiko-sosyal Faktörler: İş yeri ve çevresinde çalışanların psikolojik durumlarını etkiyecek, çalışanlar ve işveren arasındaki ilişkileri etkileyecek faktörlerdir.

Biyolojik Faktörler: Özellikle sağlık tesislerinde, laboratuvarlarda, gıda sanayisinde, tarım ve hayvancılık endüstrisinde, giyim sektöründe çalışanları etkileyebilecek biyolojik tehlikelerdir.

Kimyasal Faktörler: Birçok iş sektöründe yaygın olarak kullanılan kimyasal maddeler işçi sağlığını ve iş yeri güvenliğini etkiyecek en önemli faktörlerden biridir. Bu maddelerin bazıları vücutta birikebilirken, bazıları vücutta birikmeksizin yeterli doz alındığında akut zehirlenmeye neden olabilir. Kimyasal maddeler merkezi sinir sitemi, karaciğer, dolaşım ve sindirim sitemi üzerinde çeşitli etkileri vardır.

Fiziksel Faktörler: Çalışma ortamlarında en sık karşılaşılan faktörlerdir. Bunlardan başlıcaları *sıcaklık, gürültü, titreşim, yüksek veya düşük basınç, termal konfor ve radyasyon* olarak sayılabilir.

2.4 İş Kazası ve Meslek Hastalıkları

İş Kazası: İşverenin sorumluluğu altında bulunan alanlarda, ani olarak gelişen, nedeni bilinmeyen veya kontrol altına alınamamış olan, yaralanma, maddi zarar ve üretimin durmasına sebebiyet veren olaylardır [1].

Tehlike sınıfı: Yapılan işin özelliğinden kaynaklanan, işin her aşamasında veya belirli bir bölümünde ortaya çıkan, iş ekipmanı, kullanılan madde, üretim metot ve şekline, çalışma çevresi ve şartlarına göre belirlenen tehlike faktörleridir [1].

Meslek hastalığı: İşin taşıdığı özelliklere göre yinelenen bir nedenle veya işin gerektirdiği şartlar sebebiyle maruz kalınan geçici veya kalıcı hastalık, sakatlık veya ruhsal problem durumları olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde SGK mevzuatında meslek hastalıkları 5 grup halinde belirtilmiştir [2].

A grubu meslek hastalıkları: Kimyasal nedenlerle ortaya çıkan meslek hastalıkları,

B grubu meslek hastalıkları: Mesleki cilt hastalıkları

C grubu meslek hastalıkları: Toz faktörü nedeniyle oluşan mesleki solunum sistemi hastalıkları

D grubu meslek hastalıkları: Mikroorganizmaların etkisiyle oluşan mesleki bulaşıcı hastalıkları

E grubu meslek hastalıkları: İyonize radyasyon, kızılötesi ışınlar, gürültü, titreşim gibi fiziki etkenlerle ortaya çıkan hastalıklar.

BÖLÜM 3

RADYASYON ve LİTERATÜR

Bir maddenin atom çekirdeğindeki nötron ve proton sayısı birbirine eşit olmadığı durumlarda, bu tür maddeler kararsız bir çekirdek yapısı göstermekte ve çekirdeğindeki nötronlar alfa, beta, gama gibi çeşitli ışınlar yaymak suretiyle parçalanarak kararlı hale geçmeye çalışmaktadır [16]. Bu enerji yayılımı olayında **radyasyon**, çevresine bu şekilde ışın saçarak parçalanan maddelere ise **radyoaktif madde** denir [17].

3.1 Radyasyonun Tarihsel Süreci

Radyasyonun tarihsel süreci Tablo 3.1'de verilmiştir [18,19, 20,21,22,23].

Tablo 3.1 Radyasyonun tarihsel süreci

1895- **X-ışınları** Alman fizikçi Prof. Dr. Wilhelm C. Roentgen tarafından keşfedilmiştir.
1896- Fransız fizikçi Henri Becquerel tarafından doğada radyoaktif maddelerin varlığı ilk kez saptanmıştır.
1897- E**lektron** J. J. Thomson tarafından keşfedilmiştir.
1898- Marie Curie ve Pierre Curie tarafından yeni radyoaktif bir element olan ve uranyumun radyoaktif bozunmasından ortaya çıkan **polonyum** ve ardından **radyum** bulunmuştur.
1898- Rutherford, uranyumdan yayınlanan ışınımların **α (alfa)** ve **β (beta)** olmak üzere iki farklı tür olduğunu buldu. Bu keşiften iki yıl sonra Villard, ismi **γ (gama)** olarak adlandırılan üçüncü türde radyasyon keşfi yaptı.
1900- Max Planck **"temel radyasyon yasasını"** ortaya attı.

Tablo 3.1 (Devamı) Radyasyonun tarihsel süreci

1905- Albert Einstein tarafından 1905'te Annalen der Physik dergisinde, "Hareketli Cisimlerin Elektrodinamiği Üzerine" adlı 2. makalesinde açıklanan ve ardından 5. makalesi "Bir Cismin Atıllığı Anerji İçeriği ile Bağlantılı Olabilir mi?" başlıklı makaleyle pekiştirilen fizik kuramı: **Özel Görelilik Teorisi**'ni ortaya attı.
1911- Ernest Rutherford tarafından **"nükleer atom modeli"** geliştirildi.
1913- Niels Bohr tarafından **"yörüngesel atom modeli"** geliştirildi.
1923- Arthur Compton, **"Compton Etkisi"** adı verilen ve kendisine Nobel ödülünü getiren bir keşif yaptı. Bu keşifte Compton, ışık demetinin elektronlara çarpıp bir kısım enerjilerini aktardıklarını ve bu enerji ile atoma zayıf bağlı elektronların ivmelendiğini, fotonun ise enerjisinin azaldığı görüldü.
1927- Herman J. Muller, radyasyonun organik yapılar üzerinde genlerde değişikliğe neden olan **mutasyonları** saptamıştır. (1946 yılında Nobel Tıp Ödülü ile onurlandırılmıştır.).
1928- George Gamow, 1928 yılında Nikolai Kochin'un matematiksel yardımıyla, tünelleme olgusunu da kullanarak alfa çekirdek ışıması problemini çözmüştür
1932 - James Chadwick tarafından **nötron** keşfedildi.
1934- Irene Joliot Curie ve eşi Jean Frederick Joliot Curie, "1935 Nobel Kimya Ödülü" kazandıkları **yapay radyoaktiviteyi** keşfettiler. Bu keşif sonrasında doğal radyoaktif maddelerin yanına yapay radyoaktif maddelerin üretimi hızlanmıştır.
1934 - Enrico Fermi tarafından **"Beta bozunma teorisi"** geliştirildi.

Tablo 3.1 (Devamı) Radyasyonun tarihsel süreci

1942- Amerika'da Enrico Fermi yönetiminde ilk atom reaktörü operasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece ne yazık ki, radyasyonun ilk tercihli zararlı uygulamaları da başlamıştır.
1944- Epidemiyolojik çalışmalar sonucunda radyologların lösemi olasılığının diğer kişilere göre 10 kat fazla olduğu ortaya konulmuştur.
1945- ilk atom bombası 6 Ağustos 1945'te Japonya'nın **Hiroşima** kentine, ikinci atom bombası ise 9 Ağustos 1945 tarihinde **Nagazaki** kentine atılmış, bu bombalar sonucunda binlerce kişi ölmüş, yaralanmış veya sakat kalmıştır. Bu atom bombalarının ve atom bombası denemelerinin etkileri hala yaşanmaya devam etmektedir.
1947- Willard Libby radyoaktif karbon yaş tayini yöntemini geliştirdi.
1957- İngiltere'de **Windscale** nükleer santralinde kaza gerçekleşti.
1979- **Three Mile Island** nükleer santral kazası gerçekleşti
1986- **Çernobil** kazası gerçekleşti.
2011- Fukishima Daichi nükleer kazası gerçekleşti.

3.2 İş Sağlığı ve Güvenliği ile Radyasyonun İlişkisi

Günümüzde insanlar hem çalışma ortamında hem de genel çevre içinde radyasyon kaynakları ile daha sık olarak karşı karşıya gelmek durumundadır. Elektrik enerjisi ile çalışan cihazlar elektromanyetik radyasyon yayar [24]. Çalışma hayatında da çeşitli işlerde daha çok radyasyon etkilenimi söz konusudur. Radyasyon kavramı hem elektromanyetik hem de partiküller radyasyon alanlarını kapsar. Bunlardan elektromanyetik radyasyonun bir bölümü ile partiküller radyasyon, ulaştıkları hücrelerde

iyonlaşmaya neden olduklarından “iyozan- iyonlaştırıcı” radyasyon olarak adlandırılır. Çalışanlar açısından hem iyonizan hem de iyonizan olmayan radyasyon etkilenimi söz konusudur [25]. Bu etkileşim sonucunda çeşitli sağlık sorunları ortaya çıkabilir. İş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması, radyasyonun neden olabileceği maddi ve manevi her türlü etkinin kontrol altına alınabilmesi için; radyasyonun ve etkilerinin çok iyi bilinmesi, bu alanda çalışan tüm personelin gerekli eğitimleri alarak, olası tüm etkilerin önceden engellenmesine yönelik gerekli tüm önlemlerin alınmasını gerektirir [26].

İşçi sağlığı ve iş güvenliği uygulamalarının temeli olan kaynağın kontrolü iyonizan radyasyondan korunmada en etkili hedeftir. Radyasyonun neden olabileceği sağlık sorunları genellikle ciddi sorunlar olduğu için kaynağa yönelik önlemler titizlikle uygulanmalıdır. Bütün yapay radyasyon kaynakları birkaç kademeli mühendislik kontrol düzenekleriyle donatılmıştır. Koruyucu düzeneklerden birinin aksaması durumunda hemen bir başka koruyucu düzenek devreye girmek suretiyle korunma sağlanmaktadır. Kaynağa yönelik önlemler dışında mesafenin artırılması ve gereken durumda kişisel koruyucuların kullanılması yarar sağlar. Radyasyonla ilgili işlerde çalışanların etkilenme düzeyleri sürekli olarak izlenir [27].

Doğal radyasyon kaynaklarına maruziyet bakımından uçak personeli güneşe yakınlık nedeniyle, madenlerde çalışan işçiler de radyum kayaçlarının saldığı radon gazına maruziyet bakımından daha fazla risk altındandır [28,29]. Radyasyondan korunma ile ilgili detaylı bilgi radyasyondan korunma başlığında verilecektir.

3.3 İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Radyasyonun Tarihsel Süreci

Radyasyonun zararlı etkileri, Röntgen tarafından 1800’lerin sonlarına doğru x ışınlarının ve hemen ardından Becquerel tarafından radyoaktivitenin keşfini takiben yüksek radyasyon kaynaklarının kullanımı ile belirgin hale geldi. Radyasyonun fark edilmeyen uzun vadeli etkileri yıllar geçtikçe, yapılan her yeni çalışma sonrasında netlik kazanmaya başladı [30].

1890'lı yıllarda, x ışınlarının deride anormal kızarıklık, ödem, anormal kıl/saç kaybı gibi etkileri olduğu kayıtlara geçmiş, Becquerel ve Madam Curie' de radyoaktif maddeler nedeni ile derilerinde oluşan yanıklardan dolayı sıkıntı yaşamışlardır. İlerleyen yıllarda ise Madam Curie yüksek dozda radyasyona maruziyetin neden olduğu kan kanseri sonucu ölmüştür [31].

1920'li yıllarda Alman bilim insanı H.J. Muller, meyve sinekleri üzerinde yaptığı çalışmalarda üreme hücrelerinin x-ışınlarına karşı oldukça duyarlı olduğunu görmüştür [30]. Bu etkilerin gözlenmesinden kısa bir süre sonra iyonize radyasyonun kanserojen etkileri de belirlenmiştir. Bu vakaların birçoğu radyasyonu tedavi amaçlı kullanan radyologlarda gözlenmiştir. X -ışınlarının keşfinin ardından, 1899'da yüksek düzeyde radyasyonla ışınlanan bir radyoloğun elinde çeşitli yaralar oluşmuş, 1902'da radyologda kanser bulgusuna rastlanmıştır. 1932'de eli kesilmesine rağmen 1933'te da kanser nedeni ile vefat etmiştir. İngiltere'de 1921 yılından önce mesleğe başlayan radyologlar arasındaki kansere bağlı ölüm oranı, diğer alanlarda çalışan doktorlardan %75 daha fazla olduğu gözlenmiştir [32].

Zamanla içsel ışınlama kaynaklı tehlikelerin olduğu farklı vakalar da bildirilmiştir. Çek Cumhuriyeti'ndeki siyah, gri-siyah renklere sahip uranyum oksitten (U_3O_8) oluşan mineral madenlerinde çalışanlar arasında **akciğer kanseri** vakalarının daha yüksek sıklıkta görüldüğü raporlanmıştır. Daha sonraki dönemlerde bu madencilerin radon gazının ve maden tünellerinde serbest kalan uranyum bozunum ürünlerinin solunumunun yol açtığı içsel ışınlamaya maruz kaldıkları anlaşılmıştır [33].

Kayıtlara geçen en önemli iç ışıma vakası ise; ABD- New Jersey'de (Orange) bulunan bir saat fabrikasında çalışan radyum- kadran boyayıcılar arasında yaşanmıştır. Burada çalışan işçi kadınlar **"Radium Girls, Radyum Kızları",** saat kadranları üzerindeki numaraları **radyum içeren boya** ile boyarken, numaraların daha net olabilmesi için, boyaya batırılmış fırçalarını dudaklarıyla temizlemişlerdi. Bu şekilde ağızdan sindirim yolu ile vücuda alınan radon, iç ışıma yaparak çeşitli kanser türlerine neden olmuş ve 50 kadar

işçisinin bu nedenle ölümüne yol açmıştır [34]. Radyum kızları Resim 3.1'de gösterilmiştir [35].



Resim 3.1 Radyum kızları

Nükleer silah üretmek üzere II. Dünya Savaşı sırasında ABD, Kanada ve İngiltere tarafından başlatılan Manhattan Projesi için, Kanada'da Büyük Ayı Gölü yakınlarında kurulan depolara Kuzeybatı Topraklarından getirilen radyum cevherinin taşınması için yöredeki Kızılderililer çalıştırılmıştır. 1940'lı ve 1950'li yıllarda radyoaktif bilgilendirme yapılmaksızın ve herhangi bir önlem alınmadan yerli Kızılderililere yıllarca sırtlarında bez çuvallar içinde radyoaktif cevher taşıttırılmıştır. Burada çalışanların çoğu radyasyon zehirlenmesi sonucu ölmüştür [36].

Uçak yolculuğundaki radyasyon dozu, modern jet uçaklarının, kozmik ışın dozunun yeryüzündeki seviyesine kıyasla daha fazla olduğu 9 ila 15 km arasında, yüksek irtifalarda uçmasından kaynaklanır. Uçuş ekiplerinin maruz kaldığı doz miktarı yıllık 0.2- 5 mSv civarındadır [28]. Bu doz miktarı yıllık doğal radyasyonla alınan doz miktarının yaklaşık iki katıdır.

1940'tan sonra mezun olan radyologların radyasyon kaynaklı kanser sebebi ile ortaya çıkan ölüm riski daha az taşıdığı gözlenmiştir. Bu olumlu sonuç, radyolojinin gelişimi ve iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ile alınan çeşitli önlemler ve mesleki radyasyon dozlarının azaltılması ile sağlanmıştır [37].

3.4 Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon türleri Tablo 3.2'de verilmiştir [38,39].

Tablo 3.2 Radyasyon çeşitleri

Radyasyon		
İyonlaştırıcı Radyasyon		**İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon**
Parçacık Tipi	Dalga Tipi	Dalga Tipi
Alfa Parçacıkları Beta Parçacıkları Nötronlar	X- ışınları Gama Işınları	Radyo Dalgaları Mikrodalgalar Kızılötesi Dalgalar Görülebilir Işık

3.4.1 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir elektronun bir atomdan ya da molekülden tamamen koparabilmesi için, atomları veya molekülleri iyonlaştırabilecek yeterli enerji **(E> 10 eV)** taşımayan elektromanyetik veya yüklü parçacık türüdür [38]. Bir başka ifade ile iyonize olmayan radyasyon daha düşük frekanslı ve düşük enerjili elektromanyetik dalgalardır [39]. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon çevresindeki atomları iyonlaştırmaz. Örneğin topraktan gelen arka plan radyasyonunun çoğu, temas ettiği atomları iyonlaştırmaz [40].

3.4.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Türleri

Kararlı haldeki atomun yörüngesinde bulunan elektronlardan herhangi bir tanesi iyonlaştığında, atom elektrik yükü kazanır. Ayrılan elektronun ardından geriye kalan atoma "**iyon**" denilmektedir [39]. Bu şekilde iyon oluşması olayına "**iyonlaşma**" adı verilmektedir [38].

Çekirdeğin yaydığı radyasyon türü çekirdeğin nasıl etkileşimde bulunduğuna bağlıdır. Protonlar ve nötronlar yeniden düzenlenirse, atom gama radyasyonu yayar. Yörüngedeki bir elektron değişirse, atom x-ışınları verir. Proton ve nötron sayısı değişirse, atom bir veya daha fazla radyasyon türü yayar [18].

3.4.2.1 Nötronlar

Yüksüz parçacıklar oldukları için oldukça giricidirler ve genellikle nükleer reaktörlerde nükleer fisyon (bir atom çekirdeğinin ayrılması) gibi belirli üretim süreçleri yolu ile salınabilir. Doğrudan iyonizasyon meydana getirmezler ancak, atomlarla etkileşmeleri sonucu diğer iyonizan ışınları oluştururlar [19].

Nötronlar beta partiküllerinden oldukça büyüktür, ancak alfa partikülünün kütlesinin sadece dörtte birine sahiptir. Kalın kurşun kalkanlara bile nüfuz edebildikleri için insanlara ciddi derece zarar verebilirler [16].

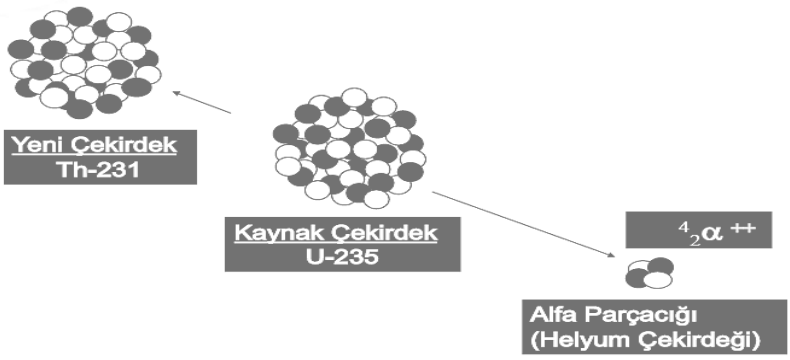
X ve gama ışınlarının aksine, **su** ve **parafin** gibi bazı hafif elementler ve **beton**, nötronların durdurulmasında ve iş sağlığı ve güvenliği açısından zırhlama malzemelerinde kullanılmaktadır [16].

3.4.2.2 Alfa Işınları

Alfalar, iki proton ve iki nötrondan oluşan, iki elektronunu vermiş Helyum atomu çekirdekleri olup, temsili olarak $_2He^4$ şeklinde gösterilmektedir [41]. Alfa parçacıkları genellikle doğal ve atom ağırlıkları büyük olan polonyum, toryum, radyum, uranyum gibi tabii radyoaktif izotoplardan yayınlanır. Ayrıca suni radyoaktif maddeler de alfa yayınlar [16].

Alfa parçacıkları radyasyon türleri içinde en yavaş olanlardır. Sahip oldukları büyük kütlelerinden dolayı, hava da oldukça kısa bir mesafe kat ederler ve ince bir kâğıt, her türlü giyecek ve insanın derisi alfaları soğurabilirler. Diğer yandan yüksek iyonlaştırıcı olma özellikleri nedeniyle, bu ışınlar canlı dokular için tehlikelidirler [20]. Vücut dokularında birikebilir ve kolayca solunabilirler. Solunum ve sindirim sistemlerine

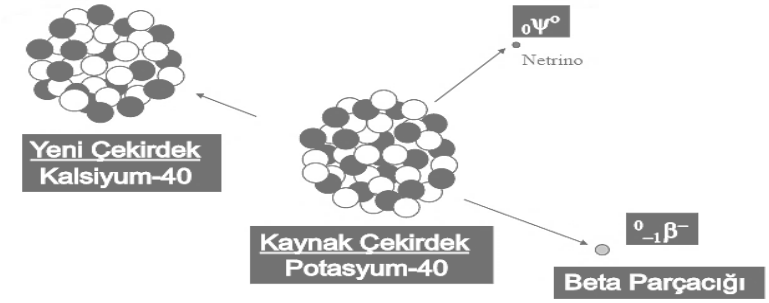
herhangi bir yolla girmeleri halinde canlı dokuya büyük ölçüde zarar verirler [39]. Radyum (^{226}Ra), Radon (^{222}Rn), Plütonyum (^{238}Pu) alfa yayınımı yapan maddelere örnek olarak gösterilebilir [19]. ^{235}U'nin α- salınımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 ^{235}U'nin α- salınımı

3.4.2.3 Beta Işınları

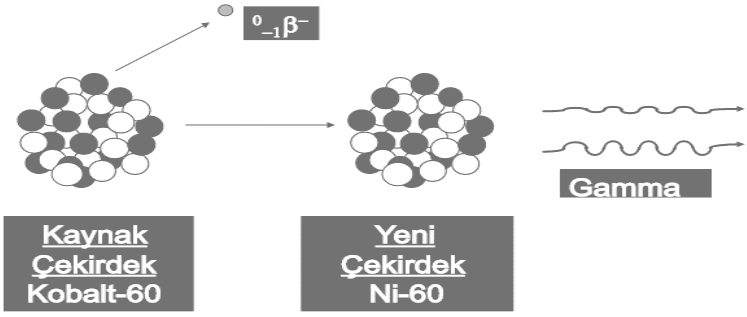
Bir elementin çekirdeğindeki proton veya nötronların eşit olmaması durumundan kaynaklanan, parçacık özelliği gösteren, küçük kütleli, negatif yüklü, alfa parçacıklarına göre daha yüksek enerjili elektronlardır [41]. Beta parçacıkları bir kâğıttan geçebilir, ancak bir alüminyum folyo veya cam tabakası ile durdurulabilir. Potasyum (^{40}K), Stronsiyum (^{90}Sr), Karbon (^{14}C) gösterilebilir [39]. Beta saçan maddelere örnek gösterilebilir. ^{40}K'ın β bozunması Şekil 3.2'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2 ^{40}K'ın β bozunması

3.4.2.4 Gama Işınları

Gama ışınları, yüksek enerjili fotonlardan oluşan elektromanyetik dalgalardır; durgun kütlesi yoktur. Yüksüz oldukları için yüzeye kolayca nüfuz edebilirler. Çekirdeğin yapısını değiştirmezler ve genellikle alfa ve beta bozunmalarının ardından gerçekleşir. Örneğin havada birkaç yüz metre, kurşunda 8-10 cm gittikleri halde, yine de tümüyle soğurulamazlar. Sezyum (^{137}Cs), Kripton (^{88}Kr), Kobalt (^{60}Co) gama yayan maddelere örnek gösterilebilir [39]. ^{60}Co'ın γ bozunması Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 ^{60}Co'ın γ bozunması

3.4.2.5 X- Işınları

X-ışınları esas olarak gama ışınları ile aynıdır, ancak bunlar çekirdeğin kendisinden ziyade atomun çekirdeğinin etrafında dönen elektronlardan yayılır. Gama ışınlarına ve X ışınlarına da foton denir. Çok yüksek enerjiye sahip oldukları ve derinlemesine nüfuz ettikleri için, gamalar ve X-ışınları sadece belirli organları değil, aynı zamanda çevre dokuları da etkileyebilir [18].

Gama radyasyonu ve X-ışınları elektromanyetik dalgalar veya fotonlardır ve elektrik yükü yoktur. İkisi arasındaki fark, gama ışınlarının çekirdeğin içinden ve X-ışınlarının çekirdeğin dışından kaynaklanmasıdır. Her ikisi de doğrudan elektronlarla etkileşerek bir atomu iyonize edebilir [18].

3.5 Radyasyonun Madde ile Etkileşimleri

Radyasyon, içinde yayılım yaptığı ortama enerji transferi yaparak çeşitli etkileşimlere neden olur. Etkilenen unsurdaki enerji birikimi radyasyon dozu olarak isimlendirilirken, eğer etkilenen unsur canlı doku ise, istenmeyen biyolojik etkiler ortaya çıkabilir [42]. Nükleer sistemlerin (nükleer reaktörler, zırhlar, izotop üreteçleri gibi) tasarımlarında radyasyonun madde ile nasıl ve ne şekilde etkileştiği önemlidir.

3.5.1 Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Yüklü bir parçacık bir atomun elektronları ile etkileşime geçerse; sahip olduğu enerjinin tamamını elektrona aktarabilir, tanecik elastik saçılabilir ve çok az miktarda bir enerji kaybı ile yoluna devam edebilir (göz ardı edilebilecek bir açı ile yön değiştirirse), aynı anda farklı elektronlar ile reaksiyona girebilir (Coulomb Kuvvetinin sonsuz menzile sahip olmasında dolayı), atom iyonlaşabilir [18].

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi, hafif yüklü parçacıklar (e, e^+) ve ağır yüklü parçacıklar (muon, pion, proton, alfa ve diğer ağır çekirdekler) olarak iki ana başlık altında gruplandırılabilir [18].

3.5.1.1 Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Kütleleri 1 atomik kütle birimi ya da daha büyük olan parçacıklar ağır yüklü parçacık olarak isimlendirilir [42]. Alfa parçacıkları, protonlar, döteronlar, fisyon parçacıkları ve hızlandırıcılarda üretilen parçacıklar ağır yüklü parçacıklar grubunda yer alır [43].

Soğurucu bir ortamda, alfaların sahip oldukları pozitif yükleri ile ortamdaki atomların yörüngelerinde bulunan elektronların negatif yükleri arasında **Coulomb kuvveti** ile bir etkileşim oluşur. Ağır yüklü parçacıklar inelastik çarpışmalar nedeni ile madde içerisinde enerji kaybı yaşarlar. Bu etkileşmelerde gelen parçacığın kinetik enerjisi atomun iyonlaşma enerjisinden yeterince büyük olmasın durumunda, enerjisini yolu üzerindeki atomları iyonlaştırmak için maddeye aktarır [44].

Yüklü parçacıklar madde içerisinde yol alırken, elektronlar ile çarpışarak enerjilerinin büyük bir kısmını yitirirler. Her etkileşimde kaybettiği enerji miktarı çok küçük olacaktır ve bu enerji, toplam enerjinin ufak bir kısmına tekabül edeceğinden, gelen parçacık madde ile etkileşimi sırasında bunun gibi birçok etkileşimde bulunacaktır. Bunun sonucunda binlerce iyon çifti oluşacaktır. Soğurucu ortamdaki atomdan kopan elektron negatif iyonu, geriye kalan atom da pozitif iyonu oluşturacaktır [45].

İyonlaşmanın yanı sıra, bir diğer yüklü parçacık- madde etkileşme mekanizma ise elektronların uyarılmasıdır. Bu durumun gerçekleşmesi için, gelen ağır yüklü parçacığın enerjisinin iyonizasyon enerjisinden daha küçük olması gerekmektedir. Ağır yüklü parçacıklar çekirdeklerle de elastik saçılma reaksiyonları verebilir [18].

Yüklü parçacıklar Relativistik enerjilere ulaştıklarında, madde içinden ışık hızından daha hızlı geçerek Çerenkov ışıması yapabilirler [43].

3.5.1.2 Hafif Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Pozitron ve elektronlar madde içerisinde benzer etkileşimlerde bulunurlar. Ağır yüklü parçacıklarda olduğu gibi Beta parçacıklarının madde ile etkileşmesi, iyonlaşma ve uyarılmanın yanında ortamdaki çekirdeğin elektrik alanından kaynaklanmaktadır [18].

Yüksek enerjili beta parçacıkları, çekirdekten geçerken, ışınlama yolu ile enerji kaybı yaşarlar. Enerji kaybı frenleme radyasyonu (Bremsstrahlung) olarak adlandırılan X ışını spektrumu biçiminde görülür [45]. Elektronun ivmelenmesi nedeni ile ortaya çıkan bu radyasyon, çekirdeğinden elektriksel çekiminden dolayı izlediği yolda sapmalara uğrar. Enerjisi birkaç MeV civarında ya da daha düşük ise enerji kaybı düşük olacaktır. Bundan dolayı beta parçacıkları sahip oldukları enerjilerinin önemli bir kısmını ortamdaki yörünge elektronlarıyla çarpışırken ya da Moller ve Bhabha saçılması yaparak kaybeder. Moller saçılması, elektronun ortamdaki elektronlar ile esnek olmayan saçılması iken; Bhabha saçılması ise pozitronların atomun elektronları ile esnek olmayan saçılmasıdır [46]. Beta parçacıkları, alfa parçacıklarının aksine karmaşık ve zikzaklı yollar üzerinde hareket eder. Bu sebeple betaların menzilleri daha uzundur [16].

3.5.2 Gama Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Gama radyasyonu madde ile 5 farklı şekilde etkileşime girerler. Bunlar Koherent Saçılma, Fotoelektrik Olay, Compton Saçılması, çift oluşumu ve foto-nükleer etkidir. Fotonlar (X ve gama ışınları) yüklü parçacıklara göre madde içerisinde daha uzun mesafede penetrasyon sağlar. Bu mesafeyi kat eden fotonların enerjilerinde azalma yaşanmazken, şiddetinde azalma meydana gelir [47].

3.5.3 Nötronların Madde ile Etkileşimi

Nötronların madde ile etkileşimlerde fotonlara kıyasla çok farklıdır. Fotonlar elektronlarla etkileşirken nötronlar yüksüzlerdir ve çekirdekle nükleer kuvvetler altında etkileşirler [45]. Yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb engelini aşmak zorunda değillerdir. Çekirdeğe 10-13 cm yakınlaştıklarında çekirdek ile etkileşebilirler [18].

3.6 Radyasyon Birimleri

İyonize radyasyonun madde etkileşiminin irdelenmesi sonucu "radyasyon birimleri" belirlenmiştir. Belirlenen bu birimler Tablo 3.3'te verilmiştir [22, 48].

Tablo 3.3 Radyasyon birimleri

Terim	Birimler	Dönüşüm
Aktivite	Curie (Ci): Saniyede 3.7x 10^{10} parçalanma (veya bozunma) gösteren maddenin aktivitesidir	Ci = 3.7x10^{10} Bq
	Becquerel (Bq): Saniyede 1 parçalanma yapan çekirdeğin aktivitesidir.	
Işınlama	Normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında 2.58x10^{-4} C' luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan x ve gama ışını miktarıdır.	1 C/kg = 3.88x10^{3} R
	Coulomb/kg (C/kg), normal hava şartlarında havanın1kg'ında Coulomb'luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya g radyasyonu miktarıdır.	
Soğurulmuş Doz	Rad: Işınlanan maddenin 1 kg'ına 10-4 joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır. Soğurulan enerji parçacık veya foton olabilir. Gray: Işınlanan maddenin 1 kg'ına 1joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır.	1 Gy = 1 J / kg 1 Gy = 100 Rad
	Gray (Gy), ışınlanan maddenin 1 kg'ına 1 Joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır.	
Eşdeğer Doz	Rem= Soğurulan Doz x Faktörler	1Sv = 100 Rem
	Sievert (Sv): 1 Gray'lik X ve γ ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır	

3.7 Radyasyon Kaynakları

3.7.1 Doğal Radyasyon Kaynakları

Dünyada kendiliğinden var olan ve belirli bir düzeyde radyoaktiviteye sahip kaynaklardır [16, 49, 50].

- ***Kozmik ışınlar***, Günlük yaşantımızda, kozmik ışınlar nedeniyle maruz kaldığımız radyasyon dozunun dünya ortalaması ***0.39 mSv / yıl***'dır.

- ***Fosil yakıtlar***, doğal ve uzun ömürlü radyoaktif elementler içerirler. Fosil yakıtlar yakıldıklarında bu elementler atmosfere yayılır ve daha sonra toprağa dönerek doğal radyasyon düzeyinde az da olsa bir artışa neden olur. Doğada mevcut kısa ömürlü radyoaktif elementlerin yaydığı gama ışınlarının da katkısıyla toprak nedeniyle maruz kaldığımız radyasyon dozunun dünya ortalaması ***0.46 mSv/yıl*** 'dır.

- ***Vücudumuzda bulunan radyoaktif elementlerden*** (40K, vb.) dolayı belli bir radyasyon dozuna maruz kalırız. Bir yıl boyunca bu şekilde maruz kaldığımız iç (dahili) radyasyon dozunun dünya ortalaması ***0.23 mSv*** kadardır.

- ***Yiyecek, içecek ve teneffüs ettiğimiz havadan*** maruz kaldığımız dozun dünya ortalaması yaklaşık ***0.25 mSv/yıl***'dır.

- ***Radyum elementinin*** bozunması ile ortaya çıkan Radon gazı sebebi ile dünya genelinde maruz kalınan ortalama doz 1.3 mSv/yıldır.

- Dünyada bazı ülkelerdeki yer alan yüksek doğal radyasyon barından volkanik tabakalar, uranyum mineralleri, karstik toprak gibi ***karasal radyasyon*** kaynakları.

3.7.2 Yapay Radyasyon Kaynakları

Radyoaktif izotopların çeşitli alanlarda kullanılması ile ortaya çıkan insan yapımı kaynaklardır. Yapay radyasyon kaynakları:

- ***Nükleer Serpinti:*** Nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen nükleer serpintilerdir [51],

- ***Nükleer santraller***, bu doz sadece güç santrallerinden kaynaklanmayıp; uranyum madenleri, değirmenleri, fabrikasyon ve yeniden yakıt işleme tesislerinden ve atıklardan kaynaklanmaktadır [16].

- ***İnşaat Malzemeleri***, özellikle granit, çimento ve beton gibi birçok inşaat malzemesi milyonda birkaç birim (ppm) uranyum, toryum ile bunların radyoaktif ürünlerini ve 40K içerir. Tuğla ve taş binaların duvarlarından doğrudan yayınlanan radyasyon nedeni ile bu binalarda yaşayanların aldıkları yıllık doz yaklaşık 7 mrem'dir. İnşaat malzemeleri ayrıca ^{222}Rn kaynağıdır ve özellikle havalandırması zayıf, iyi yalıtılmış, tuğla ve taş binalarda yüksek radon düzeyleri ölçülmüştür. Bir kişinin alacağı radon bağlantılı ortalama doz yılda 200 mrem olarak tahmin edilmektedir [16].

- ***Tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler***, televizyon, mikrodalga fırın, telefon gibi teknolojik cihazların saldığı radyasyon ve tütün gibi geniş yapraklı bitkilerin üzerine serpintiler sonucu yapışan radyoaktif parçacıklar, insanların maruz kaldığı radyasyon kaynaklarındandır [52].

- ***Deney ve araştırmalarda kullanılan kaynaklar***, ^{60}Co, ^{137}Cs gibi radyoaktif izotoplar birçok araştırma, eğitim, tanı ve tedavi alanlarında kullanılmaktadır [16].

- ***Zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan kaynaklar***, Kapalı radyoaktif kaynaklar çok değişik ve çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bu kaynaklar ülkelerin endüstrileşme düzeyine ve derecesine bağlı olarak kullanılmakta olan kaynakların miktarı ve çeşitliliği değişmektedir [40].

- ***Tıbbi amaçla kullanılan X-ışınları ve yapay radyoaktif maddeler***, insan yapımı kaynaklar nedeniyle genellikle halkın çoğunluğu tarafından alınan en büyük, anlamlı, lokalize doz tedavi birimleri ile bağlantılıdır. Bu doz, medikal ve dental teşhis radyolojisinden, klinik nükleer tıptan, radyasyon tedavisinden ve medikal – dental personelin mesleki ışınlamasından kaynaklanır [16].

TAEK verilerine göre 2019 yılı itibari ile Türkiye'de bulunan yapay radyoaktif kaynak miktarı Tablo 3.4'te verilmiştir [53].

Tablo 3.4 Türkiye'de yapay radyasyon kaynak sayıları

Yapay Radyasyon Kaynağı	Toplam Adet
Tıbbi Radyoloji Cihazı	17481
Diş hekimliğinde kullanılan radyoloji cihazları	15051
Radyoterapide Kullanılan Kaynaklar	363
Nükleer Tıp Uygulamalarında Kullanılan Kaynaklar	595
Endüstriyel Radyografi/ Radyoskopi Cihazları	784
Nükleer Ölçüm Cihazları	4204
Taşınabilir Yoğunluk ve Nem Ölçüm Cihazları	284
Işınlama Cihazları	74
Güvenlik Amaçlı Kullanılan Cihazlar	6122

3.8 Radyasyonun Biyolojik Etkileri

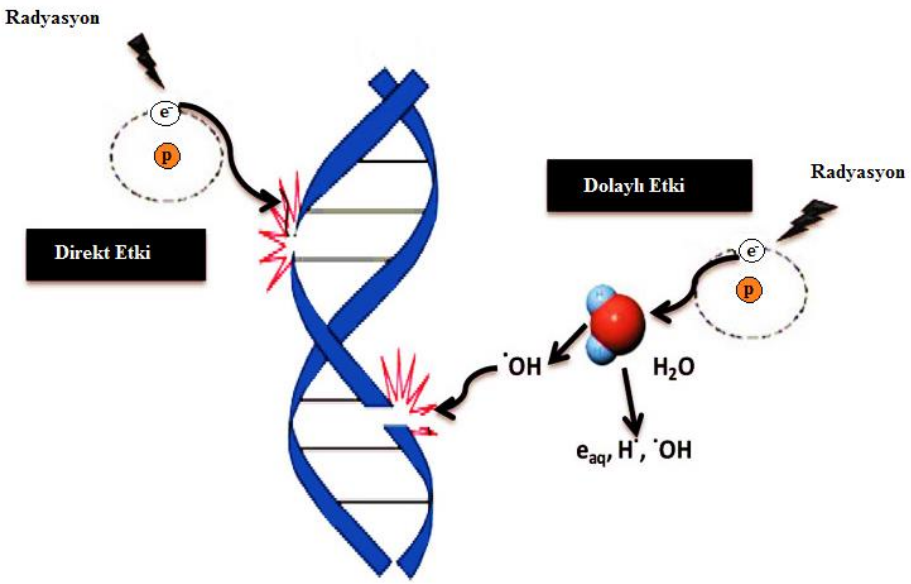
Radyasyonun canlı dokular üzerindeki etkileri üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Düşük dozlarda radyasyona maruziyet oldukça küçük etkilere neden

olabileceğinden bunların tespiti güçtür. Canlı doku radyasyonun neden olacağı küçük etkilere karşı kendini yenileyerek onarabilir. Canlı dokuların radyasyona maruziyeti sonrası; hücreler zarar görmeyebilir, hasarı onarabilir, ölebilir veya kendini yanlış şekilde onararak biyofiziksel bir değişikliğe neden olabilir [54].

3.8.1 İyonize Radyasyonun Hücre Düzeyinde Biyolojik Etkisi

Oldukça kompleks bir yapıya sahip olan hücreler için radyasyonun, hücre yüzeyinde bile, birçok etkisi söz konusudur. Ortaya çıkan her tür etki hangi organellerin hedef alındığına ve bunların hücrenin işlevselliği açısından önemine bağlıdır [55].

Radyasyon iki farklı mekanizma ile bir organeli etkiyebilir. İlkinde, radyasyon, iyonlaştırıcı etkisiyle canlılardaki bağları koparır ve molekülleri parçalar. Bu radyasyonun **doğrudan etkisi** olarak bilinir. İkincide ise, radyasyon, hücrelerin içindeki suya nüfuz ederek, iyonlaştırıcı özelliğinden dolayı, hücre içinde birbiri ile kimyasal olarak etkileşen yüksek düzeyde reaktif oksijen (O) ve hidroksil (OH) radikalleri gibi, yeni kimyasal yapılar üretir. Buda radyasyonun **dolaylı etkisi**dir [56]. Radyasyonun hücresel boyutta (DNA molekülüne) etki mekanizmaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir [57].



Şekil 3.4 Radyasyonun etki mekanizmaları, dolaylı ve direkt etki

3.8.2 Radyasyonun Biyolojik Etkilerinin Bağlı Olduğu Faktörler

Radyasyonun biyolojik etkileri; hücrelerin radyasyona duyarlılık derecesi, radyasyonun cinsi ve enerjisi, soğurulan doz miktarı, radyasyona maruz kalma süresi ve radyasyondan etkileniş şekline bağlıdır [58,59]. Bu faktörlerin özellikleri aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

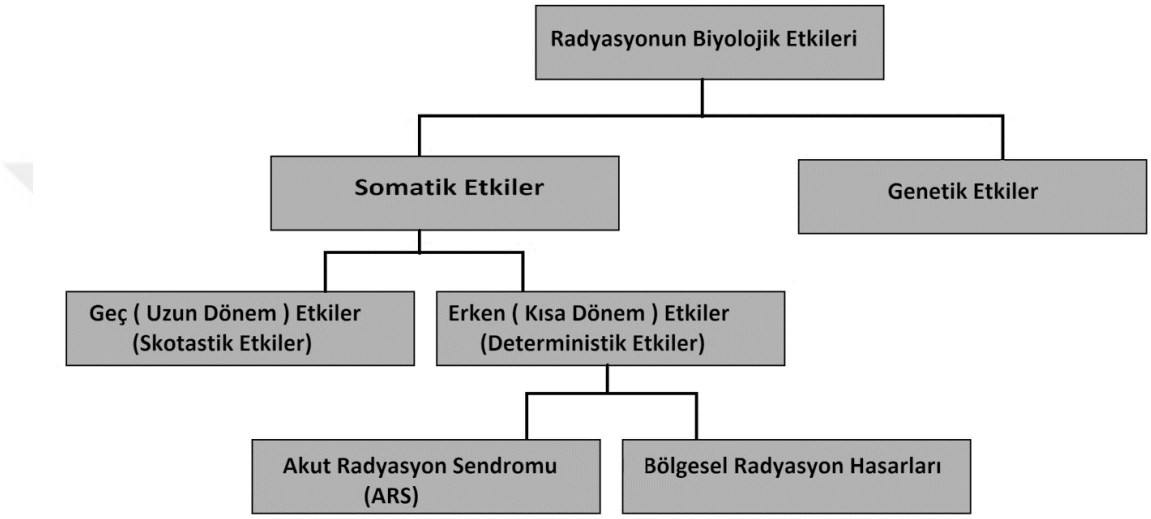
Bergonie – Tribandeu Yasasına göre ***radyasyona duyarlık derecesi (hücresel duyarlılık)***; genç, bölünme ve çoğalma yeteneği yüksek hücreler radyasyona karşı daha duyarlıdır. Buna göre; çocukların radyasyona duyarlılığı daha yüksektir [60, 61]. Üreme hücreleri, retina, dalak, deri gibi bazı dokular radyasyona daha duyarlı iken kas dokusu, sinir soku ve kemik dokusu radyasyona daha dirençlidir [62].

Radyasyona duyarlılığı yüksek hücrelerin meydana getirdiği organ veya dokuların radyasyon duyarlılığı da yüksektir. İnsan vücudunun her parçası radyasyon duyarlılığı eşit olmadığı gibi, aynı organı oluşturan çeşitli parçaların radyasyona duyarlılığı da eşit değildir. Mesela; gözde retina kısmı radyasyona karşı daha duyarlıdır [62].

3.8.3 Radyasyonun Tüm Organizma Üzerine Biyolojik Etkileri

Radyasyonun tüm vücut üzerinde bıraktığı etkiler Tablo 3.5'te şemalandırılmıştır [16].

Tablo 3.5 Radyasyonun tüm organizma üzerinde bıraktığı biyolojik etkileri



3.8.3.1 Genetik Etkiler

Radyasyona maruz kalan kişiden sonra gelecek nesillerde (genelde 2. nesilde) ortaya çıkan etkilerdir. Radyasyonun genetik etkileri, somatik etkilere kıyasla daha düşüktür [20].

Radyasyon DNA molekülünde mutasyona (geri dönüşümsüz hasar) neden olabilir [62]. Mutasyon geçirmiş hücrenin kendisi ölmese dahi üremesi durabilir. Üreme hücresinde meydana gelen mutasyon, genellikle süresiz veya geçici olarak hücrenin döllenebilme yeteneğini kaybetmesine neden olabilir. Fakat, mutasyona uğrayan gamet başarıyla döllenebilir ve zigot canlı bir döl halini alırsa mutasyon döle taşınabilir. Bu sebeple üreme organlarının özellikle üretkenlik döneminde radyasyon etkisi altında kalması oldukça olumsuz bir durumdur [20].

3.8.3.2 Somatik Etkiler

Radyasyon maruziyeti sonrası kişide ortaya çıkan etkilerdir. Somatik etkiler, maruz kalınan radyasyon dozuna göre; erken ortaya çıkan somatik etkiler ve geç ortaya çıkan somatik etkiler şeklinde iki başlıkta incelenebilir [63].

a. Radyasyonun Geç (Uzun Dönem) Belirtileri

Radyasyonun uzun dönemde ortaya çıkan belirtileri, şiddetleri değil, ortaya çıkma olasılıkları doz tarafından belirlenen etkilerdir. Kanser ve genetik mutasyonlar radyasyonun geç etkilerinin sonuçlarıdır [61]. Belirli bir dozda radyasyona maruziyet kansere neden olabilir; ancak kanserin bu maruziyet sebebiyle oluşup oluşmayacağı belli değildir. Ne kadar düşük seviyede olursa olsun, radyasyona maruziyet muhtemel bir etkiyi tetikleyebilir [20].

Hayatları boyunca en az bir defa yüksek seviyede bir akut tüm vücut dozuna maruz kalan bireydeki geç dönem radyasyon etkileri; katarakt, kornea delinmesi, körlük, kısırlık, kanser, doğal yaşamın kısalması olarak sıralanabilir. Bir sonraki nesillerde normal dışı yapısal bozukluklar, büyüme ve gelişme geriliği, gebelik döneminde veya doğumdan sonra ölüm gibi etkilere neden olabilir [20].

Kronik Düşük Dozlar

Kronik doz, uzun süreli düşük seviyelerde radyasyona maruziyet sonucu meydana gelen etkilerdir. İnsan vücudu kronik olarak maruz kalınan radyasyonu, akut olarak alınan radyasyona kıyasla daha iyi tolere edebilir. Kronik doza maruziyette hücrede oluşan hasar düşük olduğundan, vücudun oluşan zararları onarmak ve ölü veya işlevsiz hale gelmiş hücreleri sağlıklı olanlarla değiştirmek için yeterli süresi vardır. Yüksek seviyedeki radyasyon dozlarının biyolojik etkileri bilinmesine karşın, kronik düşük dozların, özellikle eşik değer altındaki dozların etkileri net olarak bilinmemektedir ve yıllar sonra ortaya çıkabilir. **Mesleki ışınlamalar** kronik ışınlamalardır [64].

b. Radyasyonun Erken (Kısa Dönem) Etkileri

Belirli bir dozun **(0.25 Sv veya üstü)** öngörülebilir sonucu olarak ortaya çıkan etkileridir. Kötücül olmayan deri hasarı, katarakt, hematolojik etkiler (kan kompozisyonunda değişikler) vb. radyasyonun erken dönem etkilerine örnektir. Doz düzeyi arttıkça hasarın şiddeti de artar. Akut dozlar sonucu oluşan etkiler, radyasyona maruziyeti takiben ilk 50 gün içinde açığa çıkan erken dönem etkilerken, 50 günden sonraki dönemde gözlenen belirtiler geç etkilerdir [20].

Radyasyona kısa süreli maruziyet daha erken ölüme neden olabilirken, uzun süreli maruziyet durumunda bu etki azalır. Bundan dolayı da radyoterapi uygulamalarında radyasyon doz fragmanları şeklinde hastaya verilir [65].

Bölgesel radyasyon hasarları

Vücutta belirli bir bölgenin ışınlanmaya maruz kalması sonucu ortaya çıkan kısa dönemde ortaya çıkan etkilerdir. Radyasyona maruziyet daha sınırlı bir alanda olması daha az ciddi hasara yol açabileceği anlamına gelmez. Burada hangi bölgenin ya da organın radyasyona maruz kaldığı önemlidir. Her organ ve dokunun radyasyona duyarlılığı farklıdır [66].

3.8.4 Akut Radyasyon Sendromu

Akut radyasyon sendromu (ARS), çok kısa süreli yüksek düzeyde (>75 rem), dış kaynaklı iyonizan radyasyona maruziyet sonucu kişilerde ortaya çıkan bir hastalıktır [67]. Radyasyon toksisitesi ya da radyasyon hastalığı olarak da adlandırılır. Ortalama **300 rem (3 Sv)** üzerindeki akut dozlarda ölümlü vakalar görülmeye başlar [68]. Radyasyon hastalığının belirtileri, belirtilerin ortaya çıkış süresi ve ilgili doz düzeyleri Tablo 3.6'da verilmiştir [16, 67, 68].

Tablo 3.6 Akut radyasyon hastalığının belirtileri, belirtilerin ortaya çıkış süresi, doz düzeyleri

Belirtiler	**1-2 Sv**	**2-6 Sv**	**6-8 Sv**	**8-10 Sv**
Bulantı, kusma	6 saat	2 saat	1 saat	10 dakika
İshal	-	8 saat	3 saat	1 saat
Baş ağrısı	-	24 saat	4 saat	2 saat
Yüksek Ateş	-	3 saat	1 saat	1 saat
Baş dönmesi, Denge kaybı	-	-	1 hafta	Anında
Halsizlik, Yorgunluk	4 hafta	1-4 hafta	1 hafta	Anında
Saç kaybı, Enfeksiyonlar, Kanlı kusmuk ve dışkı, Yaraların iyileşmemesi, Düşük kan basıncı	-	1-4 hafta	1 hafta	Anında

Çernobil kazasından sonra akut radyasyon hastası olan ve tedavi edilen kurtarma ekibi çalışanları ile ilgili veriler Tablo 3.7'de verilmiştir [69].

Tablo 3.7 Çernobil kazasından sonra akut radyasyon hastası olan kurtarma ekibi çalışanları.

Akut Radyasyon Hastalığı Seviyesi	**Doz düzeyi (Gy)**	**Tedavi Edilen Hasta Sayısı**		**Ölü sayısı**	**Yaşayan sayısı**
		Moskova	Kiev		
Hafif	0.8- 2.1	23	18	0 (%0)	41
Orta	2.2- 4.1	44	6	1 (%2)	49
Ciddi	4.2- 6.4	21	1	7 (%32)	15
Çok Ciddi	6.5- 16	20	1	20 (%95)	1
Toplam	0.8- 16	108	26	28	106

Radyasyonun akut etkileri son 50 yıl içinde meydana gelen radyasyona maruziyet vakalarındaki kayıtların tutulması ile oluşturulmuştur. Bu kayıtların oluşturulması ve listelenmesini yapan kuruluşlar; Radyasyonun Etkilerini Araştırma Fonu ve Uluslararası Atom Enerjisi Radyasyon Kaza Kayıt Merkezi ve ülkemizde ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'dur. Son 25 yıldır radyasyon kazalarının bildirimi Radyasyon Acil Durum Destek Merkezi/ Eğitim Birimi (REAC/TS) 'ne yapılmaktadır [67].

Akut Radyasyon Sendromunun Gelişimin Nedenleri

Yüksek seviyeli (**> 0,75 Gy**) ve dış kaynaklı radyasyon dozları akut radyasyon sendromunun gelişmesine neden olur. Maruz kalınan radyasyonun giricilik etkisi olmalı, iç organlara ulaşabilmelidir [67]. Yüksek enerjili X ve gama ışınları ile nötronlar giriciliği yüksek radyasyon kaynaklarıdır. Bu hastalığın gelişebilmesi için vücudun tamamının ya da büyük bir kısmının radyasyona maruz kalması gereklidir. Birçok radyasyon hasarı bölgeseldir, genellikle ellerde meydana gelir ve bu lokal hasarlar ARS bulgularına nadiren rastlanır. Bu hastalığın ortaya çıkmasına neden olacak doza kısa zamanda (dakikalar içinde) ulaşılması gerekir [20].

Kontrol dışı-koruma kalkanı olmayan radyoaktif kaynaklar, radyoaktif madde taşıma kazaları, nükleer reaktör kazaları, nükleer silahlar ve radyolojik dağıtım cihazları, terör saldırıları sonucu yüksek dozda radyasyon salınımı akut radyasyon sendromuna neden olabilir. Dünya genelinde 50'yi aşkın ülkede yaklaşık olarak 10 milyon tecritte bulunan radyasyon kaynağı mevcuttur. Bu radyoaktif materyaller (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co, ^{238}Pu, ^{239}Pu vs.) metalle kaplanmıştır ve tıp, endüstri, tarım gibi alanlarda kullanılırlar. 1995 yılından bu yana 621 adet tecrit edilmiş kaynak kayıp veya çalınmıştır, bunlardan 254'ü halen bulunamamıştır [70].

Nükleer bir patlama ortama üç farklı formda enerji yayar. Bunlar **ısı** (toplam enerjinin %35'i), **şok veya bomba patlaması** (%50) ve **radyasyon** (%15) enerjileridir. Patlama dalgası kırık, yırtılma, iç organlarda parçalanma, akciğerde ödem, kanama ve emboliye (kanla taşınan yabancı bir cismin damarı tıkaması durumu) sebep olurken, termal enerji ani yanıklara, alev yanıklarına, ani körlüğe ve retinal yanıklara yol açar. Salınan enerji

türü, meydana gelecek hasarlar ve ölüm oranları patlamanın mesafesine göre değişir. Radyoaktif maddeye dikkat edilmeksizin, patlama ve ısıdan kaynaklı hasarlar, travmalar ve yanıklar da ölüme yol açabilir [70].

Radyasyon hastalığında semptomları yüksek düzeyde ve kısa sürede radyasyona maruz kalınmasını takiben birkaç ay içinde gözlenir. Hastalığın gelişimesi için gerekli doz genellikle 2 Gy ile 100 Gy arasındadır [67]. ARS etkisinde, genellikle **serebrovasküler, gastrointestinal** ve **hematopoietik sistemleri** üzerinde semptomlara rastlanılır. Bu sendromlar, semptomların tipi ve radyasyon miktarına göre farklılık gösterir. Bu sendromların gelişiminde dört faz söz konusudur. Bunlar; *prodromal faz, latent faz, belirgin hastalık evresi* ve *iyileşme veya ölüm* olarak isimlendirilmiştir [71].

BÖLÜM 4

RADYASYONDAN KORUNMA

Radyasyona karşı korunmada temel prensip, radyasyon kazalarını meydana gelmeden önce, olası tüm ihtimaller göz önünde bulundurularak kaynağında gerekli önemleri almak, tolerans gösterilebilen doz limitlerini bilmek ve maruziyet sonucu ortaya çıkabilecek herhangi bir zararlı etkiden radyasyon çalışanlarını, halkı ve gelecek nesilleri korumaktır [72].

Günümüzde, radyasyon güvenliğinin sağlanmasında ve uygulanmasında birçok güçlükle karşılaşılmaktadır. Çalışanların radyasyon konusunda bilinçsiz ve duyarsız olması, düşük kronik dozlarda radyasyonun etkileri açıkça görülmediğinden korunmada yaşanan zorluklar, radyasyon ölçüm cihazlarının, kişisel dozimetrelerin ve koruyucu kıyafetlerin yaygın olarak kullanılmaması, ölçüm cihazlarının pahalı oluşu, bu alanda yeterli donanıma sahip iş sağlığı ve güvenliği uzmanlarının olmaması, mevcut uzmanlarının radyasyon konusunda yeterli bilgiye sahip olmamaları ya da bu konuya öncelik vermemeleri, maddi kaygılar nedeniyle hala eski teknoloji ürünlerinin kullanılmaya devam edilmesi, son teknoloji ürünlerin kullanımında yaşanan sıkıntılar vb. durumlar radyasyon korunmasında karşılaşılan güçlüklerdendir.

4.1 Radyasyondan Korunmanın Temel İlkeleri

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak amacıyla gerekli bütün önlemlerin alınması zorunludur. Radyasyonun insan ve çevre üzerindeki etkilerine ilişkin yeni bilgilere ulaşıldıkça bu standartlarda sürekli olarak yenilenmektedir. Radyasyondan korunmada uygulanacak yöntem ve gereksinimler tüm radyasyon kaynaklarına uygulanabilir olmalıdır. Tüm vücut için maruziyet limitleri ve etkileri Tablo 4.1‘de verilmiştir [49,72,73,74].

Tablo 4.1 Tüm vücut için maruz kalınan dozlar ve etkilerinin karşılaştırılması

Doz	Etkisi
2.4 mSv/yıl	Tüm halk tarafından maruz kalınan doğal radyasyon (Bu değer Avusturalya'da ortalama 1.5 mSv, Kuzey Amerika'da 3 mSv civarındadır.
1.5-2.5 mSv/yıl	Avusturalya'da uranyum madencilerinin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde nükleer endüstride çalışan işçilerin maruz kaldığı dozlar.
2.5-5 mSv/yıl	Orta enlemlerde hava mürettebatının maruz kaldığı doz.
9 mSv/yıl	New York- Tokyo arası uçuşlarda soğurulan doz.
10 mSv/yıl	Avustralyalı uranyum madencilerin maruz kaldığı maksimum gerçek doz.
10 mSv	Karın ve pelvis için kullanılan, bilgisayarlı tomografi görüntü alma cihazlarından kaynaklanan etkili doz.
20 mSv/yıl	Nükleer endüstri çalışanları ve uranyum madenciler için geçerli ortalama doz sınırı.
50 mSv/yıl	Nükleer endüstri çalışanları için eski rutin sınır, günümüzde, tek bir yıl için izin verilen maksimum doz (1 yıl için maksimum ortalama 20 mSv olmalı). Ayrıca İran, Hindistan ve Avrupa'da çeşitli yerlerde doğal arka plan düzeylerinden kaynaklanan doz oranıdır.
50 mSv	Acil durumlarda işçiler için izin verilen kısa süreli doz.
100 mSv	Kanser riskinde belirgin bir artışa neden olan en düşük yıllık doz seviyesi. Bu limitin üzerinde, doz artışına bağlı olarak, kanser olma olasılığında artış gözlenmektedir. Hayati iyileştirme önlemlerinin alınabileceği acil durum işçileri için izin verilen kısa süreli doz.
130 mSv/yıl	Düşük riskli radyolojik kazalardan sonra halk sağlığı için uzun vadeli güvenli yıllık doz düzeyi, bu değerin altındaki değerler, halk sağlığı için çok büyük risk içermemektedir.
170 mSv/hafta	Radyolojik kazalardan sonra, kirlenmiş yerden 1 m yukarıda ölçülen, halk için 7 günlük geçici güvenli seviye.
250 mSv	2011 Fukushima kazasını kontrol eden işçiler için izin verilen kısa süreli doz sınırı. Japonya'da acil durumlarda izin verilen doz sınırı olması önerildi (NRA).
250 mSv/yıl	Tespit edilmemiş sağlık etkileri ile, İran Ramsar bölgesindeki doğal radyasyon doz düzeyi (Maruz kalınan doz seviyesi yıllık700 mSv'e ulaşır).

Tablo 4.1 (Devamı) Tüm vücut için maruz kalınan dozlar ve etkilerinin karşılaştırılması

Doz	Etkisi
350 mSv/ömür boyu	Çernobil kazasından sonra yeni yerleşim yerlerine taşınan insanlar için doz alt limiti.
500 mSv	Hayat kurtaran önlemleri alan, acil durum işçileri için izin verilen kısa süreli doz düzeyi.
680 mSv/yıl	1955 yılında izin verilen doz seviyesi (gama, X-ray ve beta radyasyonu için).
700 mSv/yıl	Nükleer bir kazadan sonra tahliye sırasında önerilen eşik doz düzeyi.
800 mSv/yıl	Brezilya'da (Guarapari kumsalları) kaydedilen, en yüksek doğal radyasyon seviyesi.
1,000 mSv kısa süreli	Radyasyona maruz kalan her 100 kişiden 5'inde, birkaç yıl içerisinde, ölümcül bir kansere neden olabileceği varsayılan doz düzeyi. (Örneğin ölümcül bir radyasyona maruz kalma olasılığı %25 iken, bu seviyede bir doza maruz kalan kişide bu oran %30 civarına yükselmektedir. Acil durum kurtarma ekipler için ICRP tarafından önerilen en yüksek doz seviyesi.
1,000 mSv kısa süreli	Mide bulantısı ve beyaz kan hücrelerinde azalma gibi belirtilerle, radyasyon hastalığına (Akut Radyasyon Sendromu) neden olan eşik değeri. Bu değerin üzerinde, hastalık şiddeti doz ile doğru orantılı olarak artar.
5,000 mSv kısa süreli	1 ay içerisinde yüzde elli ölüm riski. (Bununla birlikte, bu doz, 4 ila 6 hafta boyunca, vücudun küçük bir bölümüne uygulanan, tipik bir günlük terapi dozunun iki katıdır.)
10,000 mSv kısa süreli	Bir iki hafta içerisinde ölümcül olan doz seviyesi.

Radyasyonun tedavi amaçlı kullanıldığı durumlarda, net bir fayda sağlanamayacak hiçbir ışınlamaya izin verilmemelidir (uygulamaların gerekliliği). Tedavide kullanılacak ışınlama dozları ilgili organ ve doku için belirlenen eşdeğer ve etkin doz değerlerin üzerinde uygulanamaz (doz sınırlaması). Çalışanlar için de uygulama esnasında maruz kalınacak bu doz değerleri sınırlandırılmıştır. Çalışanlar ve halk için belirlenen doz limitleri Tablo 4.2'de verilmiştir [75,76].

Işınlama işlerinde 18 yaşından küçükler çalıştırılamazlar. Eğitimleri dolayısıyla radyasyon kaynaklarını kullanılması gereken 16-18 yaş arasındaki stajyerler ve öğrenciler için etkin doz, yıllık 6 mSv sınırını geçemez. El, ayak veya deri için yıllık eşdeğer doz sınırı 150 mSv, göz merceği için 50 mSv'dir [74].

Tablo 4.2 Radyasyon görevlileri ve halk için doz limitleri

		Radyasyon Görevlileri	**Halk**
Etkin doz	Yıllık Ortalama	20 mSv/yıl	1mSv/yıl
	Tek Yıl	50 mSv/yıl	5 mSv/yıl
Eşdeğer Doz	Göz	150 mSv/yıl	15 mSv/yıl
	Cilt	500 mSv/yıl	50 mSv/yıl
	El-Ayak	500 mSv/yıl	50 mSv/yıl

Hamile radyasyon görevlileri için maruz kalınacak doz seviyesi mümkün olduğu kadar en düşük düzeyde tutulmalı, bunun için gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Fetüsün maruz kalacağı doz 1 mSv' i geçmemelidir. Emzirme dönemindeki kadın çalışanlar radyasyon riski taşıyan birimlerde çalıştırılmamalıdır [76].

ALARA – "As Low as Reasonably Achievable"

Radyasyondan korunmanın ana fikri olan mümkün olan en düşük dozun alınması kavramının kısaltmasıdır. Işınlamanın sonucunda ekonomik, sosyal ve psikolojik etmenler göz önünde bulundurularak, radyasyon kaynaklarının tasarımı, kullanımı ve tüm radyasyon uygulamaları ile ilgili konularda maruz kalınan radyasyon dozlarının ve radyoaktif salınımının en aza indirilmesini öngören çeşitli metotları kapsayan temel ilkedir [77].

4.2 Görüntüleme/ Monitoring

Radyasyon türü, radyoaktif kirlilik, kontaminasyon ve radyasyon seviyesinin tayin edilmesi işlemidir. Görüntüleme radyasyondan korunma uygulamalarında önemli bir aktördür. **Alan** ve **personel** olmak üzere iki türlü görüntüleme tekniği vardır [75].

4.2.1 Alan Görüntüleme

Radyasyon alanlarının sınıflandırılması işlemidir. Bir yıl için maruz kalınacak dozun 1 mSv' in üzerine çıkma ihtimali bulunan alanlar radyasyon alanı olarak değerlendirilir ve radyasyon alanları radyasyon seviyelerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır [78]:

Denetimli Alanlar: Giriş ve çıkışlarının özel denetime tabi olduğu, özel levha ve simgelerle uyarı, ikaz ve bilgilendirme işaretlerinin kullanıldığı, düzenli olarak radyasyon seviyesinin ölçüldüğü, yapılacak çalışmaların özel kurallara bağlı olduğu, görevi gereği radyasyon ile çalışanların birbirini takip eden beş yıl içinde ortalama yıllık doz sınırının 3/10'undan daha fazla oranda radyasyona maruz kalabilecekleri alanlardır [78]. Denetimli alan girişlerinde bulunması zorunlu radyasyon uyarı ve bilgilendirme işaretlerinin bazıları Resim 4.1'de gösterilmiştir [79].



Resim 4.1: Denetimli alan girişlerinde bulunması gereken uyarı işaretleri

Gözetimli Alanlar: kişisel doz ölçümünün zorunlu olmadığı, ortamdaki radyasyon seviyesinin takip edilmesini gerektiren, radyasyon çalışanları için belirlenen yıllık doz limitlerinin 1/20'sini aşma ihtimali olup, 3/10'unun aşmayan alanlardır [78].

4.2.3 Personel Monitoringi

Çalışanlar tarafından maruz kalınan toplam vücut dozunun rutin bir şekilde ölçülmesidir. Yüksek riskli, radyasyon kaynağına yakın çalışan işçiler mutlaka izlenmelidir. Bu yaklaşım önemli miktarda maruziyet olasılığının, kaynak ile işçi arasındaki mesafe ile doğru orantılı olması gerekçesine dayanır. Kaynağa en yakın çalışan personel radyasyona maruz kalmazsa, radyasyon kaynağına uzak bölgelerde çalışan personelin izlenmeleri gerekmez [80].

Radyasyon çalışanlarının maruz kaldıkları radyasyon dozunu ölçmek için kullanılacak dozimetreler için film dozimetreleri, TLD dozimetreleri, elektronik dozimetreler, kimyasal dozimetreler, cam dozimetreleri, kalem dozimetreleri örnek verilebilir [81]. Radyasyondan korunmada kullanılacak kişisel dozimetrelerden bazıları Resim 4.2'de verilmiştir.



Resim 4.2: Radyasyondan korunmada kullanılan kişisel dozimetre örnekleri

Personel monitoring sistemi ile, çalışanlarının aldıkları kişisel radyasyon dozlarının müsaade edilen maksimum seviyenin üstüne çıkmaması, düzenli takibi ve kayıtlarının tutulması, bu şekilde çalışanların sağlık durumlarının takibi ve sağlıklarının korunması, kurum ile personel arasında ortaya çıkabilecek doz maruziyeti anlaşmazlıklarında kanuni koruma olanağı sağlanması amaçlanmaktadır [81].

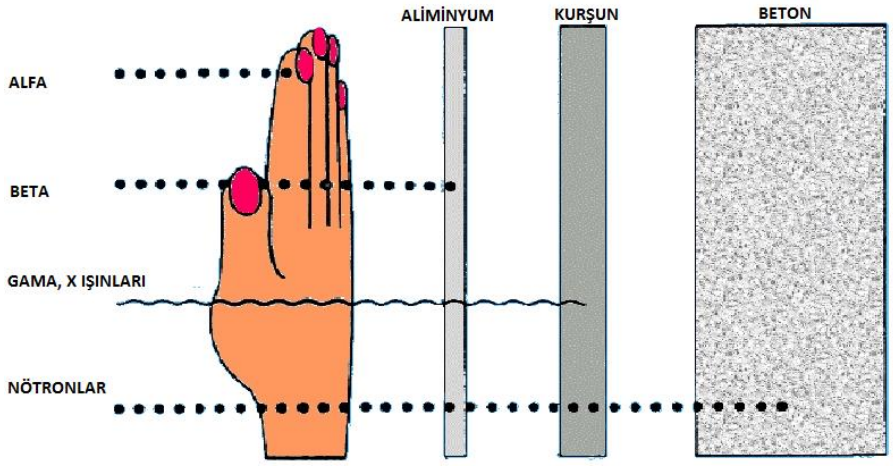
4.3 Radyasyondan Korunmada Fiziksel Etmenler

Olası bir kaza anında, radyasyondan korunmak için üç faktör belirlenmiştir. Bu faktörler, zaman, mesafe ve zırhlamadır [63].

Zaman: Radyoaktif kaynağın yakınında ne kadar az zaman geçirilirse daha az miktarda doza maruz kalınır. Kaynağın yanında geçirilen süreyle doğru orantılı olarak alınan doz miktarı da artar.

Mesafe: Radyasyon kaynağına olan uzaklık alınan doz miktarını etkiler. Radyasyon, radyoaktif kaynaktan uzaklaştıkça mesafenin karesi ile ters orantılı olarak şiddetini kaybeder.

Zırhlama: Radyasyon kaynağının çevre ile direkt ilişkisini kesmek üzere uygun bir engelin içine konulmasıdır. Kaynak ile alıcı arasına yerleştirilmiş materyaller kaynaktan yayılan radyasyon miktarını azaltması veya soğurması nedeniyle, kaynaktan alıcıya geçen radyasyon miktarını etkileyebilir. Zırhlama, radyasyondan korunmada en önemli kalkandır. Bu şekilde radyasyon kontrol altına alınabilir. Zırhlama radyasyonun türüne uygun olarak yapılır [16]. Radyasyon çeşitlerinin çeşitli malzemelerde giriciliği Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: α, β, ɣ ve nötronların maddeye nüfuz yeteneklerinin temsili gösterimi

Sonuç olarak, radyasyon çalışanları olası bir kaza anında ya da kaynakla çalışırken radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için kaynak çevresinde en kısa sürede işi bitirmeli, çalışırken mümkün olan en uzak mesafede durmalı ya da mesafeyi artıran tutucu aletler ve radyasyonu soğurucu zırh kullanmalıdır. Bir radyasyon çalışanının radyoaktif kaynak ile çalışırken uyması gereken korunma faktörleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Radyasyon çalışanlarının radyoaktif kaynak ile çalışırken uyması gereken korunma faktörleri

Personelin uyması gereken kurallar;

- Radyoaktif madde ile direkt temastan kaçınılmalıdır
- Kolay çıkarılabilecek koruyucu kıyafetler giyilmelidir. Radyasyon görevlileri, çalışma süresi boyunca kişisel olarak radyasyondan korunmak için, kurşunlu gözlükler, yüz koruyucuları, boyun koruyucuları, önlükler, eldivenler, paravan kullanmalı ve kişisel dozimetrelerini yanlarından ayırmamalıdır [82].
- Birden fazla eldiven giyilmeli ve sık sık değiştirilmelidir.
- Solunum yolunu koruyacak maske kullanılmalıdır.
- Radyolojik monitoring yapılmalıdır. Düzenli radyasyon seviyesi ölçülmelidir.
- Uyarı-ikaz işaret ve levhalarına uyulmalıdır.
- Kontamine olunması durumunda giysiler acilen çıkarılmalı bol su ile temizlenmelidir.

- ❖ Yemek yeme, sigara içme çiğneme, kozmetik ürünler kullanma gibi aktivitelerden kaçınılmalıdır.

- ❖ Aktif bir şekilde iletişim hatlarını kullanmalıdır.

4.4 İç Radyasyon Tehlikelerine Karşı Korunma Yöntemleri

Radyasyonun zararlı biyolojik etkilerinden korunmak için, ilk olarak herhangi bir kaza ya da radyasyon maruziyeti olasılığının en aza indirilmesi amacıyla çeşitli koruyucu önlemler belirlenmelidir. Gerçekleşen bir kaza durumunda, radyoaktif maddenin ortam, giysi ve cilde bulaşmasını, yiyecek ve solunum yolu ile vücuda girmesini önleyecek tedbirler alınmalıdır. Tehlike durumunda kontamine olan bölgelerde görevli monitoring ekiplerinin çevreye dağılan radyoaktif maddeleri vücutları içerisine almalarını, havada ve yerde birikmiş radyoaktiviteye maruz kalmalarını önlemek amacıyla solunum cihazları ve koruyucu elbiseler giymeleri gerekir [83]. Ayrıca bazı özel durumlarda uygun toz veya asit filtresiyle veya solunum cihazlarıyla donatılmış yüz maskelerini kullanmak gerekebilir.

Solunum yolu ile vücuda girebilecek radyoaktif maddeleri tutmak için mendil, havlu, kâğıt, pamuklu kumaş vb. gibi araçlarla solunum yollarını kapatarak iç kontaminasyondan korunmalıdır.

Radyasyonla kirlenen bölgede yaşayan küçük ve büyükbaş hayvanlar kapalı alanlarda tutulmalıdır. Açıkta bulunan yiyecek ve içeceklerin tüketilmemelidir. Radyasyonun yayıldığı bölgedeki açık su kaynaklarının, meraların ve tarım arazilerinin kullanılmaması, taze sebze ve meyvelerin yıkanmadan yenmemesi, yağmur sularının kullanılmaması, stok edilen yiyeceklerin tüketilmesi, hayvanların kuru ot ve samanla beslenmemesi için gerekli tedbirler alınmalıdır.

BÖLÜM 5

RAYOAKTİF MADDE LOJİSTİĞİ VE İSG

5.1 Tehlikeli Madde Taşımacılığı

Tehlikeli maddelerin taşınması, genellikle statik depolamadan daha büyük risk taşımaktadır. Bu nedenle yüksek derecede risk yönetimi güvencesi gerektirir. Taşıma işleminde yüksek standartlar mühendislik çalışmaları, planlama, risk analizleri, yasal düzenlemeler ve gerekli eğitimlerin verilmesi ile sağlanır [84].

5.1.1 Tehlikeleri Maddelerin Sınıflandırılması

Uluslararası yasal düzenlemelere göre tehlikeli maddeler taşıdıkları risk ve tehlikelere göre dokuz sınıfa göre düzenlenmiştir. Dünya üzerinde her yıl tehlikeli olarak sınıflandırılabilecek milyonlarca farklı türde ve miktarda madde taşımacılığı yapılmaktadır. Bu maddelerin taşınması sırasında her bir işlem için ayrı bir kural belirlenemeyeceği için bu sınıflandırmaların yapılması, sürecin daha hızlı ve güvenli şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu sınıflandırmaların temel amacı tehlike ve risk grubuna göre, taşıma sırasında meydana gelme olasılığı bulunan riskleri en aza indirgemektedir [84].

Yapılan sınıflandırmalar; adı geçen sınıfta yer alan tehlikeli maddenin tehlike ve taşıdığı riskleri genel olarak tanımlar. Bunun yanında tehlikeli madde sınıfların içinde bulunan alt sınıflandırmalar tehlike düzeyi ve risk derecesini tanımlamada kullanılmaktadır [85]. Yapılan bu sınıflandırmalar birçok uygulamanın kombinasyonu şeklindedir ve birçok farklı yaklaşımı içermektedir. Tehlikeli maddeler için yapılan sınıflandırma, uluslararası etiketi ve örnek maddeler Tablo 5.1‘de verilmiştir [84, 85].

Tablo 5.1 Tehlike madde sınıfları

Sınıfı		Adı	Etiketi	Örnek Madde
Sınıf 1		Patlayıcı Maddeler ve Nesneler		TNT, Dinamit Askeri Mühimmat
Sınıf 2		Gazlar		Aeresol Bütan, Propan
Sınıf 3		Alevlenir Sıvılar		Benzin Boya, Tiner
Sınıf 4: Yanıcı Katı Maddeler	**Sınıf 4.1**	Alevlenir Katılar		Kaset Bantları, Fotoğraf Filmi
	Sınıf 4.2	Kendiliğinden Yanmaya Yatkın Maddeler		Sodyum, Kömür
	Sınıf 4.3	Su ile Temas Ettiklerinde Yanıcı Gaz Çıkaran Maddeler		Çinko tozu, Kalsiyum Karpit

Tablo 5.1 (Devamı): Tehlike madde sınıfları

Sınıfı		Adı	Etiketi	Örnek Madde
Sınıf 5: Reaktif Maddeler	**Sınıf 5.1**	Oksitleyici Maddeler		Hidrojen Peroksit, Amonyaklı İncelticiler
	Sınıf 5.2	Organik Peroksitler		Organik Peroksitler,
Sınıf 5: Zehirli ve Bulaşıcı Maddeler	**Sınıf 6.1**	Zehirli Maddeler		Siyanür, Arsenik, Tarım İlacı
	Sınıf 6.2	Bulaşıcı Maddeler		Hayvan Derileri, Hastane Atıkları
Sınıf 7		Radyoaktif Maddeler		Işınlama Cihazlarında Kullanılan Kaynaklar Nükleer Santral Yakıt ve Atıkları
Sınıf 8		Aşındırıcı Maddeler		Tuz Ruhu, Çamaşır Suyu Sülfürik Asit
Sınıf 9		Muhtelif Tehlikeli Maddeler ve Nesneler		Asbest, Kullanılmış Piller

5.1.2 UN Numarası

Birleşmiş Milletler Ekonomik Konseyi (UNECE) tarafından, bu tanımlar içinde her bir madde için tehlikeli maddenin adı, özellikleri, tehlike ve risklerinin dünyanın her yerinde aynı şekilde anlaşılabilmesini sağlayacak ***UN numarası*** tanımlanmıştır [86]. Yüksek radyoaktif bölünebilir maddeler için UN numarası 3331 iken, Uranyum Heksaflorür için 2977'dir.

5.1.3 Tehlikeli Madde Paket Grupları

Tehlikeli maddeleri tanımlamak için kullanılan paketleme grup yaklaşımı ile bir grup içinde bulunan tehlikeli maddeleri neden olabilecekleri benzer risk derecelerine göre gruplandırılır. Üç farklı paketleme grubu bulunmaktadır. Tablo 5.2'de paketleme grupları, tanımları ve tehlike dereceleri verilmiştir [84].

Tablo 5.2 Paketleme grupları, tanımları ve tehlike dereceleri

Grup	Tanım	Tehlike Derecesi
Paketleme Grubu I	Taşıdığı risklerin gerçekleşmesi halinde neden olacağı sonuçlar dikkate alındığında çevre, toplum ve çalışanlar üzerinde en büyük ölçüde zararlı etki yaratacak maddelerdir.	Çok tehlikeli maddeler
Paketleme Grubu II	Taşıdığı risklerin gerçekleşmesi halinde neden olacağı sonuçlar dikkate alındığında çevre, toplum ve çalışanlar üzerinde orta seviyede zararlı etki yaratacak maddelerdir.	Tehlikeli maddeler
Paketleme Grubu III	Taşıdığı risklerin gerçekleşmesi halinde neden olacağı sonuçlar dikkate alındığında çevre, toplum ve çalışanlar üzerinde en düşük ölçüde zararlı etki yaratacak maddelerdir.	Az tehlikeli maddeler

5.2 Radyoaktif Maddelerin Taşınması

Radyoaktif maddeler tipik olarak nükleer fisyon veya diğer nükleer tabanlı süreçlerin sonucu ortaya çıkmaktadır. Dünya genelinde her gün, radyoaktif atık ve kullanılmış nükleer yakıtlar da dahil olmak üzere binlerce radyoaktif madde sevkiyatı gerçekleştirilmektedir [88]. Radyoaktif materyallerin taşınması araştırma, tıbbi ve endüstriyel amaçlı kullanılan radyoizotopların taşınmasını ve radyoaktif atıklar ile nükleer yakıt çevrimi malzemelerinin sevkiyatlarını içerir [89].

Günümüzde lojistik süreci üreticiden son kullanıcıya kadar taşınan malzemenin güvenli ve emniyetli bir şekilde taşınması ile başarıya ulaştırılır. Malzemeye olan talep arttıkça, sevkiyat sayısı ve hacmi de aynı oranda artış göstermektedir. Radyoaktif kaynakların birçok alanda yaygın olarak kullanılması, bu materyallerin nakliyesinde de büyük bir artış göstermiştir. Özellikle nükleer güç santrallerinde kullanılan nükleer yakıtların, radyoaktif atıkların ve diğer kontamine olmuş ürünlerin taşınmasında, radyasyonun canlı doku üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, lojistik faaliyetlerinde alınacak güvenlik tedbirleri büyük önem taşımaktadır.

Radyoaktif maddeler dünya genelindeki tüm tehlikeli maddelerin çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu sevkiyatların büyük çoğunluğu nükleer yakıt dışı, tedavi ve araştırma amaçlı kullanılan kaynaklardan oluşur [90]. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın verilerine göre şu anda dünya çapında her yıl yaklaşık 20 milyon radyoaktif materyal ve atık sevkiyatı yapılmakta ve bunların sadece %5'i nükleer yakıt çevrimi unsurları ile ilgilidir [88]. Sivil nükleer güç santrallerinin %20'sini işleten Amerika'da, radyoaktif maddeler yıl içinde gönderilen 300 milyon tehlikeli madde paketinin %1'lik bölümünü oluşturmaktadır [91]. ABD Ulaştırma Bakanlığı'na göre, ABD'de her yıl tehlikeli maddelerin sevkiyatıyla ilgili toplam maliyetin sadece %0,5'i radyoaktif maddelere aktarılmaktadır [92].

Radyoaktif maddeler en kararlı hallerinde sevk edilir. Genellikle katı formda taşınırlar. Sıvı ve gaz haldeki radyoaktif maddelerin taşınmasında ek önlemler alınmaktadır.

Radyoaktif maddelerin taşıma işlemi kamyon, tren gibi çeşitli araçlar ile gerçekleştirilir [89]. Karayolu ile gerçekleştirilen radyoaktif maddelerin taşınmasına örnek Resim 5.1'de verilmiştir [93].



Resim 5.1 Karayolu ile radyoaktif madde taşıma

Bu tez çalışmasına karayolu ile radyoaktif maddelerin taşınması referans alınmıştır. Önemli miktarda radyoaktif madde içeren gönderilerin, kargoyu tanımlayıcı belge, etiket ve afişlere sahip olması gerekir. Radyoaktif maddeler, olası bir riske karşı dayanıklılığı test edilmiş özel koruma kapları içinde bulundurulmalıdır [94]. Koruma kabı tasarımı, araç seçimi, paketleme, acil durum planlaması, hata analizleri, personel eğitimi ve denetleme işlemleri taşıma işleminde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir.

5.3 Radyoaktif Materyal Kullanımı

Radyoaktif malzemeler, elektrik enerjisi üretimi, araştırma, üretim, endüstriyel süreçler ve tıbbi teşhis ve tedavi dahil olmak üzere çok çeşitli amaçlar için kullanılır. Radyoaktif materyalin endüstriyel uygulamaları, kaynaklı derzlerin bütünlüğünün incelenmesi veya kâğıdın üretildiği sırada kalınlığının ölçülmesi gibi inceleme ve ölçme işlemlerini içerir. Mühürlü radyoaktif kaynaklar ayrıca petrol ve doğalgaz arama sondaj operasyonlarında ve asfaltlama operasyonları sırasında yol yataklarının durumunu kontrol etmek için

yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok radyoizotop, hastanelerin nükleer tıp bölümlerinde çok çeşitli hastalıkları teşhis etmek ve tedavi etmek için kullanılmaktadır. Radyoloji cihazları, X-ışınları vasıtasıyla görüntüleme amaçlı kullanılmaktadır. Işınlama yöntemi ile gıdaların kullanım süreleri uzatılmakta, tıbbi malzemelerin sterilizasyonunda, plastik malzemelerin fiziksel dayanaklıklarının artırılmasında, tarımda tohum verimliliğinin yükseltilmesinde kullanılır. Zenginleştirilmiş uranyum gibi izotoplar, nükleer güç santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır [16, 95].

5.3.1 Özel Formda Hazırlanmış Radyoaktif Maddeler

Özel formda hazırlanmış radyoaktif malzemeler (Resim 5.2), bir ambalajdan ortama yayılmaları durumunda, doğrudan harici radyasyon nedeniyle tehlike arz eden malzemelerdir [96]. Genellikle, bu malzemeler dayanıklı bir metal kapsül içinde ve katı halde olmalarından dolayı yüksek fiziksel bütünlüğe sahiptirler ve ağır kaza koşullarında bile yüksek radyoaktiviteye sahip olmalarına karşın radyoaktif kirletme ihtimalleri oldukça düşüktür [85].

Kapsüllerin herhangi bir kaza sonucu ambalajlardan çıkması ihtimaline karşı görülebilecek ölçülere sahip olması gerekmektedir [95]. Bu kapsüller ancak imha edildiklerinde açılacak şekilde imal edilmelidirler. Bu şekilde muhtemel bir kaza sonucu kapsüllerin açılması ve içindeki radyoaktif maddenin dışarı salınımın önüne geçilmiş olur.



Resim 5.2 (a) Endüstriyel radyografi kaynağı [97], (b) nötron kaynağı [98]

5.3.2 Normal Formda Hazırlanmış Radyoaktif Maddeler

Özel formda hazırlanan radyoaktif maddeler grubunda yer almayan maddelerdir. Katı, sıvı veya gaz halde olabilirler. Atık poşeti, cam ya da metal kap içinde taşınabilirler [85].

5.3.4 A1 ve A2 Miktar Limitleri

A1 ve A2, belirli bir radyoaktif madde sevkiyatı için kullanılacak ambalaj tipinin belirlenmesi için düzenlenen radyoaktivite değerleridir. Her radyonüklid için bir A1 veya bir A2 değeri atanır. A1 özel form için ve A2 normal form için geçerlidir [99].

5.3.5 Kontaminasyon (Bulaşma, Kirlenme)

Radyoaktif atom içeren bir malzemenin cilt, giysi veya herhangi bir yüzeyde birikmesi veya yüzeyi kirletmesi durumunda ortaya çıkar. Radyoaktif bir malzeme ile kontamine olmuş bir kişi, radyoaktif kirlenme giderilene kadar radyasyona maruz kalmaya devam edecektir. Radyoaktif kaynağın cilt veya kıyafetlere bulaşması durumunda dış kontaminasyon, radyasyon kaynağı yutma, soluma ve emilme sonucu vücut içine alınmışsa iç kontaminasyon gerçekleşir. Etrafa yayılan radyoaktif madde ortamı kirletmeye devam eder. Bu nedenle yayılımının engellenmesi gereklidir [85, 96].

BÖLÜM 6

YÜKSEK RADYOAKTİF MADDE TAŞIMA GÜVENLİĞİ VE UYGULAMALAR

6.1 Radyoaktif Madde Taşıma Güvenliği Düzenlemeleri

6.1.1 Uluslararası Düzenlemeler

Radyoaktif materyalin taşınmasıyla ilgilenen bir dizi uluslararası kurum ve kuruluş vardır. Bu uluslararası organların çoğunluğu Birleşmiş Milletler (BM) tarafından onaylanmıştır. Bu ajanslar, radyasyondan korunma ve radyoaktif maddelerin güvenliğini sağlamak için ortak uluslararası standartların belirlenmesinde aktif rol oynamakta ve ulusal düzenlemeler için, üye devletlere konu ile ilgili yönetmelikler ve uygulamalar konusunda yardımcı olmaktadır [85]. Bu kurum ve kuruluşlar Tablo 6.1' de verilmiştir [85, 100].

Tablo 6.1 Radyoaktif maddelerin taşınmasına ilişkin düzenleme yapan uluslararası organlar ve faaliyetleri

Kurum/ Kuruluş	Amacı	Faaliyet Alanı
Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA)	**Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınmasına İlişkin Düzenlemeler, SSR-** ile Nükleer teknolojinin barışçıl amaçlarla kullanımını sağlamak için görev yapan uluslararası ajanstır. Uluslararası standartların ilk yayını, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yayınlanan Güvenlik Serisi, No: 6 Radyoaktif Materyallerin Güvenli Taşınmasına İlişkin Yönetmelik baskısıdır. (1968)	Tüm Taşıma Yolları
Birleşmiş Milletler (BM) Ekonomik ve Sosyal Konseyi	Uzmanlar Komitesi tarafından oluşturulan, **Tehlikeli Malların Taşınmasına İlişkin Öneriler- Model Düzenlemeler (Turuncu Kitap)** ile tehlikeli maddelerin Taşınmasında Birleşmiş Milletler Tavsiyeleri ile dünya genelinde tehlikeli maddelerin taşımacılığı hususunda belirlenen standartlar ve düzenlemelerle üye devletlere ve uluslararası kuruluşlara katkıda bulunmaktadır.	Tüm Taşıma Yolları

Tablo 6.1 (Devamı) Radyoaktif maddelerin taşınmasına ilişkin düzenleme yapan uluslararası organlar ve faaliyetleri

Kurum/ Kuruluş	Amacı	Faaliyet Alanı
Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)	**Uluslararası Denizcilik Tehlikeli Maddeler (IMDG) Kodunda BM tavsiyeler**ini uygulamaktadır. IMDG Kodu, tehlikeli malların deniz yoluyla taşınmasına ilişkin düzenlemeler içermektedir. Tehlikeli sınıfta yer alan maddelerin, deniz yolu ile taşınması sırasında, mürettebatın korunması ve deniz kirliliğinin önüne geçilmesi için gerekli kuralları yayımlar ve tavsiyelerde bulunur.	Denizyolu ile Taşıma
Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO)	"**Tehlikeli Malların Hava Yoluyla Güvenli Taşınmasına İlişkin Teknik Talimatlar**" (ICAO TI), uçağı ve yolcularını risklerden koruyan bir güvenlik seviyesi sağlarken, tehlikeli maddelerin uçakta güvenli bir şekilde taşınmasını sağlamak için gerekli koşulları belirler. ICAO TI, Tehlikeli Maddelerin Taşınmasına ilişkin BM Tavsiyelerine ve Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınmasına İlişkin Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı Yönetmeliklerine dayanmaktadır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) tarafından yayınlanan Tehlikeli Maddeler Yönetmeliği (Dangerous Goods Regulations- DGR) bu talimatları esas almıştır.	Havayolu ile Taşıma
Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE)	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu, Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal Konseyi'nin yetkisi altındaki beş bölgesel komisyondan biridir. Üye Devletler arasında ekonomik iş birliğini ve entegrasyonu teşvik etmek amacıyla kurulmuştur. **Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması** (ADR) ile, tehlikeli maddelerin taşınması hususunda, üye ülkeler arasındaki iş birliğine katkıda bulunmaktadır.	Karayolu ile Taşıma
Demiryoluyla Uluslararası Taşımacılık için Hükümetler arası Örgüt	**Tehlikeli Maddelerin Demiryolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Düzenlemeler** (RID) ile tehlikeli maddelerin demiryolu ile taşınmasında takip edilmesi gereken kuralları belirleyerek katkıda bulunmaktadır.	Demiryolu ile Taşıma

6.1.2 Ulusal Düzenlemeler

Türkiye'de nükleer teknolojinin barışçıl amaçlarla kullanılması, temel nükleer politikaların geliştirilmesi, teknik ve bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesi, denetlenmesi ve organize edilmesi, 1982 yılından 2018 yılında kadar **Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK)** tarafından yürütülmekte iken, 9 Temmuz 2018 tarihinde yayınlanan 702 sayılı KHK ile, iyonlaştırıcı radyasyon, radyoaktif madde, nükleer tesis ve nükleer enerji kapsamında yürütülecek tüm faaliyetlerin denetimi ve çalışanların, çevrenin ve toplumun radyasyonun neden olabileceği zararlı etkilerden korunmasına yönelik tüm çalışmalar **Nükleer Düzenleme Kurumuna (NDK)** devredilmiştir. Türkiye'de radyoaktif maddelerin taşınmasına yönelik tüm faaliyetler NDK kontrolünde gerçekleştirilme olup, kurum tarafından yapılan düzenlemeler esas kabul edilmektedir [100].

6.2 Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınmasında Ana Prensipler

Türkiye'de radyoaktif maddelerin taşınması görevini üstlenen kuruluşların ilk olarak Nükleer Düzenleme Kurumu tarafından lisanslandırılmış olması gerekmektedir. İkinci olarak, radyoaktif maddeleri ilgilendiren her türlü ithalat, ihracat ve tüm transfer işlemleri NDK iznine tabidir [100].

6.2.1 Radyoaktif Maddelerin Sınıflandırılması

Taşımaya söz konusu olan radyoaktif maddenin sahip olduğu özelliklere göre sınıflandırılması, taşıma işleminin ilk basamağını oluşturmaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından yayınlanan Güvenlik Serisi, No: 6. Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınmasına Yönelik Düzenlemeler baskısında radyoaktif maddeler şu şekilde sınıflandırılmıştır [101].

a. LSA: Düşük Spesifik Aktiviteli Maddeler

Birim kütle başına düşük aktiviteye (spesifik aktivite) sahip radyoaktif materyaldir. **LSA-I, LSA-II** ve **LSA-III** olarak üç gruba ayrılır. Çoğu LSA materyali, nispeten düşük radyoaktivite konsantrasyonları nedeniyle sınırlı radyasyon tehlikesi sergileme özelliğine sahiptir. Bir LSA materyalinin spesifik aktivitesi hesaplandığında, radyoaktivite, radyoaktivitenin dağıtıldığı materyal kütlesine bölünür; LSA'yı çevreleyebilecek ambalajın kütlesi hesaplamadan hariç tutulur.

LSA-1 grubunda yer alan maddeler genel olarak ışınlanmamış doğal veya tükenmiş uranyum ve toryum bileşikleri ve işleme cevherleri, sınırsız A2 değerlerine sahip diğer radyonüklidler veya muaf konsantrasyonun 30 katını aşmayan belirli bir aktiviteye sahip malzemeden oluşur.

LSA-II materyali, ortalama spesifik aktivitenin katılar ve gazlar için 10^{-4} A_2 / g'yi ve sıvılar için 10^{-5} A_2 / g'yi aşmadığı malzemeleri içerir. Etkinlik malzeme boyunca dağıtılmalıdır. Trityumlu su için konsantrasyon limiti 0.8 TBq / L'dir.

LSA-III materyali, radyoaktif materyalin beton, bitüm veya seramik gibi katı bir bağlayıcı maddeye homojen bir şekilde dağıldığı katılardan oluşur. Su ile teması halinde haftada 0.1 A_2 veya daha az bir ayrışma oranına sahip ve 2 x 10^{-3} A_2 / g'yi aşmayan spesifik bir aktiviteye sahip maddelerdir [102].

b. SCO: Yüzeyi Kontamine Nesneler

Radyoaktif özelliğe sahip olmadığı halde, yüzeyi radyoaktif bir madde ile teması nedeniyle kontamine olmuş katı nesnelerdir. SCO-I, SCO-II olarak iki şekilde gruplandırılmaktadır. Limit değerleri ve özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir [85].

Tablo 6.2 SCO grubunda yer alan nesneler için kirlenme limitleri

Kirlenme Türü		**Limit (Bq/cm^2)**	
Erişilebilir Yüzeylerde		SCO-I	SCO-II
Sabit olmayan bulaşma	α yayıcıları	0.4	40
	β, γ ve düşük düzeyde zehirleyici	4.0	400
Sabit bulaşma	α yayıcıları	4×10^3	8×10^4
	β, γ ve düşük düzeyde zehirleyici	4×10^4	8×10^5
Erişilemez Yüzeylerde		SCO-I	SCO-II
Sabit ve Sabit Olmayan bulaşma	β, γ ve düşük düzeyde zehirleyici	4×10^3	8×10^4
	α yayıcıları	4×10^4	8×10^5

c. Yüksek Aktiviteli Maddeler (Bölünebilir Maddeler)

Bölünebilir (Fisil) Malzeme, önemli büyüklükte radyasyon ve ısı salınımına neden olacak kritik bir olay üretme potansiyeline sahip malzemelerdir [99]. Bu nedenle, bölünebilir malzemeler nakliye sırasında nükleer kritiklik güvenliğini sağlamak için daha özenli ve katı paket tasarımı hususları ve kontrolleri gerektirir. Bölünebilir malzeme plütonyum-239, plütonyum-241, uranyum-233, uranyum-235 veya bu radyonüklitlerin herhangi bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Işınlanmamış veya sadece termal reaktörlerde ışınlanmış doğal veya tükenmiş Uranyum, bölünebilir malzeme olarak kabul edilmez [96].

Türkiye'de mevcut uygulamada, faal bir nükleer güç santrali bulunmadığından bölünebilir maddelerin taşınması işlemleri yapılmamaktadır [100]. Fakat yapımı devam eden Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin devreye girmesiyle birlikte aktif şekilde bu işlem söz konusu olacaktır.

Bölünebilir materyallerin yaygın gönderileri arasında reaktör yakıtı, ara yakıt çevrim bileşiği olan Uranyum heksaflorür ve bölünebilir madde içeren nükleer santral atıkları bulunmaktadır [94]. Bu tez çalışmasında, **Uranyum heksaflorür** ve **yüksek radyoaktif atıklar** sahip oldukları özelliklerden dolayı özel taşıma unsurları gerektiğinden ayrı olarak ele alınmıştır.

6.2.2 Paketleme

Radyoaktif maddeler, taşımaya söz konusu materyallerin dağılmasını ve sızmasını önleyecek, katı güvenlik tedbirleri alınarak ve uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak tasarlanmış özel zırhlı kap ve tanklar ile taşınmaktadır [100].

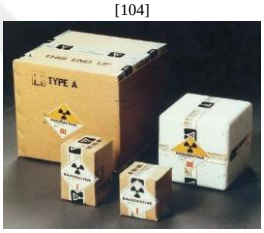
Radyoaktif maddelerin paketlenmesi, radyasyon emisyonuna veya kazara ya da kasıtlı darbelerden, yangından kaynaklanan radyoaktif maddelerin salınımına karşı yüksek düzeyde koruma sağlayan en önemli koruma unsurlarından biridir [103].

Sevkiyat işlemi gerçekleştirilmeden önce, nakliyecinin herhangi bir test veya bakım gerekip gerekmediğini belirlemek için paketleri gözden geçirmesi gerekir. Göndericinin paket bileşenlerini kontrol etmesi veya değiştirmesi veya sızıntı testi yapması gerekebilir. Ayrıca, nakliyecinin, radyoaktivite seviyelerinin gerekli sınırların altında olduğundan emin olmak için paketin üzerinde ve çevresinde belirli yerlerde radyasyon ölçümleri yapması gerekir.

Göndericinin ayrıca, Ulaştırma Bakanlığı'nın rota seçimi, araç durumu ve pankart, sürücü eğitimi, paket işaretleme, etiketleme ve diğer nakliye belgeleri de dahil olmak üzere nükleer malzemenin sevkiyatı için gerekli standartları karşılaması gerekir.

Taşınacak malzemeye bağlı olarak, radyoaktif maddelerin taşınması için kullanılan paket türleri Tablo 6.3‘te verilmiştir [85,99,100,104].

Tablo 6.3 Radyoaktif madde taşımada kullanılan paket türleri ve özellikleri

Paket Türü	Özelliği	Örnek Materyal	Paket Görseli
Adi Paketler	Düşük radyoaktiviteye sahip maddelerin taşınmasında kullanılır. Bu paketlerin içeriği radyoaktif seviyelerine göre çalışan, halk sağlığı ve güvenliği için minimum tehdit oluşturmaktadır.	• Önceden radyoaktif madde içeren boş ambalajlar • Duman detektörleri • Radyofarmasötikler	[100] 
Endüstriyel Paketler	Düşük özgül aktiviteli (LSA) malzemeler ve yüzey kontamine nesnelerin (SCO) taşımasında kullanılır.	• Uranyum cevherleri ve konsantreleri • Düşük seviyeli radyoaktif atıklar (kirli kâğıt havlular, eldivenler, vb.)	[105] 
A Tipi Paketler	İnsan sağlığı veya güvenliği veya çevre için minimum düzeyde risk oluşturan radyoaktif maddelerin taşınmasında kullanılır. Olası bir kaza anında verebileceği zarar çok büyük değildir.	• Medikal izotoplar • Endüstriyel Cihazlar	[104] 
Bölünebilir Madde Paketleri	Bölünebilir radyoaktif maddelerin taşınmasında kullanılır. Tepkimeye girmesini engelleyecek şekilde tasarlanır.	• Yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyum • Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar	[105] 
B Tipi Paketler	Olası bir kaza durumunda taşımaya söz konusu radyoaktif maddelerin yayılmasını engelleyecek şekilde tasarlanırlar. Yüksek radyoaktif kaynakların taşınmasında kullanılır. Olası bir kaza anında verebileceği zarar büyüktür.	• Kobalt kaynakları • Endüstriyel Radyografi Cihazları • Kan ışınlamada kullanılan kaynaklar • Radyoterapide kullanılan kaynaklar	[104] 

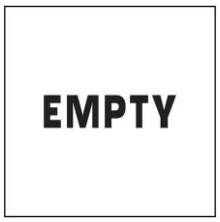
Tablo 6.3 (Devam) Radyoaktif madde taşımada kullanılan paket türleri ve özellikleri

Paket Türü	Özelliği	Örnek Materyal	Paket Görseli
H Tipi Paketler	Uranyum Heksaflorür (UF6) taşınmasında kullanılır.	• UF6, uranyum zenginleştirme işleminde kullanılan ve nükleer reaktörler için yakıt üreten bir bileşiktir	[106] 

6.2.3 Etiketleme

Etiketler, bir ambalajın içerdiği tehlikeli maddenin türünü ve aktivite seviyesini görsel olarak belirtmek için kullanılan afişlerdir [85]. Radyoaktif materyalin taşınması için gerekli olan paket (ambalaj), paketin içindeki maddenin aktivitesine göre seçilirken, paket üzerine yerleştirilen etiket, paketin dış yüzeyinde ölçülen radyasyon seviyesine göre seçilir [93]. Sınıflarına uygun şekilde yapılan paketlenin ardından, paketlerin içinde taşınacak malzemenin bilgilerini (içerik, sembol, sınıfı ve Bq cinsinden aktivite değeri) ve **taşıma endeksi (TI)** -*paket yüzeyinden 1 metre uzaklıktaki en yüksek radyasyon seviyesi*- içeren etiketler yerleştirilir. Bölünebilir maddeler için **kritiklik güvenlik indisi (CSI)** -*içinde bölünebilir madde bulunan paketlerin bir arada bulunabilecekleri adet kontrolü ile ilişkili değer*- etiket üzerine eklenmelidir. Etiketler paketin karşılıklı iki yan yüzeyine yapılır [85]. Radyoaktif maddelerin taşınmasında kullanılan etiket türleri ve özellikleri Tablo 6.4'te verilmiştir [96, 104,107].

Tablo 6.4 Radyoaktif maddelerin paketlenmesinde kullanılan etiketler

Etiket Türü	Etiket Bilgisi	Etiket Görseli
Beyaz–I Etiketi **Çok düşük radyasyon seviyesi**	Radyasyon seviyesi, paket yüzeyinde maksimum 0,5 mrem/saat olan paketler için kullanılır. (1 Sv = 100 rem)	
Sarı–II Etiketi **Düşük radyasyon seviyesi**	Radyasyon seviyesi, paket yüzeyinde 0,5 ila 50 mrem/saat arasında olan paketler için kullanılır. Paket yüzeyinden 1 m uzaklıkta ölçülen radyasyon seviyesi 1 mrem/saat 'ten daha büyük olmamalıdır.	
Sarı–III Etiketi **Yüksek radyasyon seviyesi**	Radyasyon seviyesi, paket yüzeyinde 50 ila 200 mrem/saat arasında olan paketler için kullanılır. Paket yüzeyinden 1 m uzaklıkta ölçülen radyasyon seviyesi 10 mrem/saat 'ten daha büyük olmamalıdır.	
Bölünebilir Madde (Fissile)	Bölünebilir malzemeler içeren paketlere uygulanır. Her paket *için Kritiklik Güvenlik Endeksi (CSI)* etikette belirtilmesi zorunludur.	
Boş Paket Etiketi	İçi boşaltıldığı halde, paketin dışında 0,5 mrem/saat' ten düşük düzeyde radyasyon içerebilen paketlere uygulanır.	

6.2.4 İşaretleme

İşaretler, standart terimler ve kodlar kullanılarak bir paketin içeriğinin açıklanmasını sağlamak üzere kullanılır. İşaretler doğrudan paketlerin üzerine basılabilir veya özel bir etiket ile paket üzerine eklenebilir. Gönderen ve alıcı bilgileri, UN numarası, malzemenin

sınıfı, paket türü, toplam ağırlığı, menşei ülke ve araç kayıt kodu bilgileri okunaklı ve sağlam bir şekilde işaretlenmelidir [93].

6.2.5 Araç Seçimi

Karayolu ile yapılacak radyoaktif madde lojistiğinde kullanılacak araçlar bir takım özel şartları taşıyor olması ve çeşitli donanımlara sahip olması gerekmektedir. Taşıma işleminde kullanılacak araçların sahip olması gerek ana özellikler şunlardır.

- Radyoaktif malzemelerin karayolu ile taşınması kapsamında gerekli izin belgeleri (Radyoaktif Malzeme Taşıma Belgesi, SRC-5, ADR) alınmalıdır. Araç takip cihazı bulunmalıdır [100].

- Sürücü bölümü tamamı ile radyoaktif malzemelerin bulunduğu konteyner kısmından ayrı ve korunmuş olması gerekmektedir (genellikle kurşun levha ile bölümler birbirinden ayrılır). Radyasyon seviyesi 2 mrem/saat' i geçmemelidir [96].

- Malzeme paketlerinin taşıma esnasında sabit kalmasını sağlayacak düzeneğe sahip olmalıdır.

- Yetkili çalışanlar dışında yolcu taşıma faaliyetlerinde bulunulamaz.

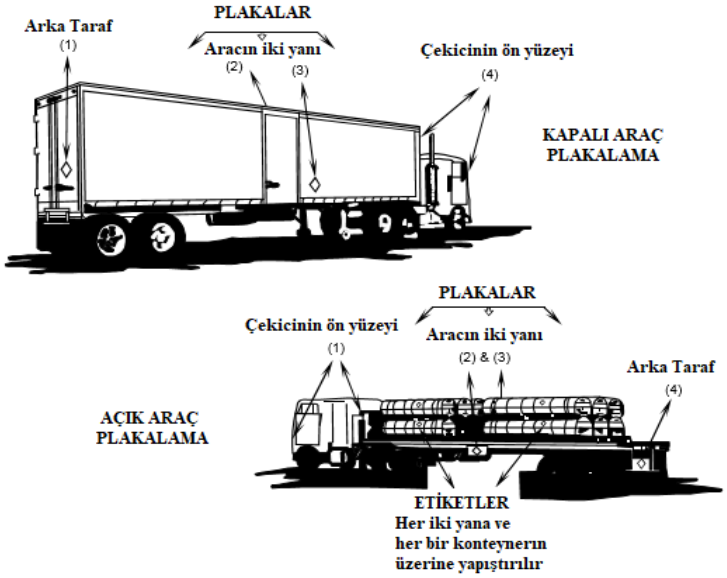
- Güvenlik için kullanılacak şerit, uyarı-ikaz levhaları, kişisel koruyucu ekipmanlar, yangın söndürücü, dozimetre hazır bulunmalıdır.

- *Normal sevkiyat şartlarında* açık veya kapalı aracın tüm dış yüzeyinde ölçülen radyasyon seviyesi maksimum 200 mrem/saat olabilir. Araçtan 2 metre uzaklıkta ölçülen radyasyon değeri 10 mrem/saat' i geçmemelidir [100].

- *Özel sevkiyat koşullarında* açık çekici ile yapılan taşıma sırasında kasa, yükün üst yüzeyi ve aracın alt yüzeyinde radyasyon seviyesi en çok 200 mrem/saat olabilir. Araç kapalı ise aracın dış yüzeylerinde ölçülen radyasyon düzeyi 200 mrem/saat' i geçemez. Taşıttan 2 metre uzaklıkta ölçülen radyasyon değeri en çok 10 mrem/saat olabilir [96].

6.2.6 Plakaların Yerleştirilmesi

Plakalar araçların ve yüklerin üzerine yerleştirilen, tehlikeli madde taşındığını gösteren daha büyük etiketlerdir. Şekil 6.1'de radyoaktif madde taşıyan açık ve kapalı araçlar için gerekli plakaların yerleri gösterilmiş [107].



Şekil 6.1 Radyoaktif malzeme taşıyan araçlara plakaların yerleştirilmesi.

6.3 Bölünebilir Maddeler

Bölünebilir (Fisil) Maddeler, termal (yavaş veya düşük enerji) nötronlar ile etkileşime girerek nükleer fisyon zinciri reaksiyonu sonucu muazzam miktarda enerji açığa çıkarabilen maddelerdir. Nükleer santrallerde bu reaksiyon kullanılarak elektrik enerjisi üretilir [16].

Doğal uranyum, doğada bulunan, kütlece yüzde 99,28 U238 ve yüzde 0,72 U235 izotop dağılımına sahip düşük radyoaktif özelliğe sahip ağır bir metaldir. U235 bölünebilir özelliğe sahipken, U238 bölünebilir özellikte değildir. Doğal uranyum mevcut yapısı gereği zincirleme çekirdek reaksiyonu vermez. **Fakirleştirilmiş (zayıflatılmış) uranyum**,

nükleer güç santrallerinde kullanılmak üzere yakıt üretimi için yapılan zenginleştirme işleminde yapısında bulunan U235 izotoplarının büyük bölümünün alınması sonucu geriye kalan uranyumdur [108]. Fakirleştirilmiş uranyum doğal uranyumdan daha düşük seviyede radyoaktiviteye sahiptir. **Zenginleştirilmiş uranyum**, %0,72'den daha fazla kütlece U235 içeren uranyum anlamına gelmektedir. Nükleer santralde yakıt olarak kullanılır [109]

Yeniden işlenmiş uranyum, kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi sonucu geri kazanılan uranyumdur. Kullanılmış yakıtın %1'lik kısmını U235 ve %1'lik kısmını plütonyum (U328'in nötronlar ile tepkimesi sonucu) oluşturmaktadır. Yeniden işleme yöntemi ile U235 izotopları kullanılmış yakıttan ayrılır ve zenginleştirme işleminde kullanılır. P329 ise uranyum oksit ile karıştırılarak **karışık oksit (MOX) yakıt** elde edilir [110].

Hafif zenginleştirilmiş uranyum, %2-20 oranında U235 konsantrasyonuna sahiptir. Dünyadaki en yaygın güç reaktörleri olan ticari hafif su reaktörlerinde (LWR) yakıt olarak %3-5 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanılır [111].

Yüksek zenginleştirilmiş uranyum, %20'den daha yüksek oranda U235 konsantrasyonuna sahiptir. Nükleer silah üretiminde, nötron ve denizaltı reaktörlerinde kullanılır [108].

Taze Yakıt, nükleer reaktörlerde fisyon oluşturarak ısı üretiminde kullanılan malzemelerdir. Yakıt grupları, nakliye sırasında oluşabilecek hasarlardan korumak için özel olarak yapılmış ambalajlarda taşınır. Uranyum yakıt gruplarının radyoaktivite seviyesi düşüktür ve radyasyon kalkanı gerekli değildir. Bölünebilir madde içerdiklerinden paket tasarımında ve taşınan maksimum paket sayısında kritiklik durumu dikkate alınır [112].

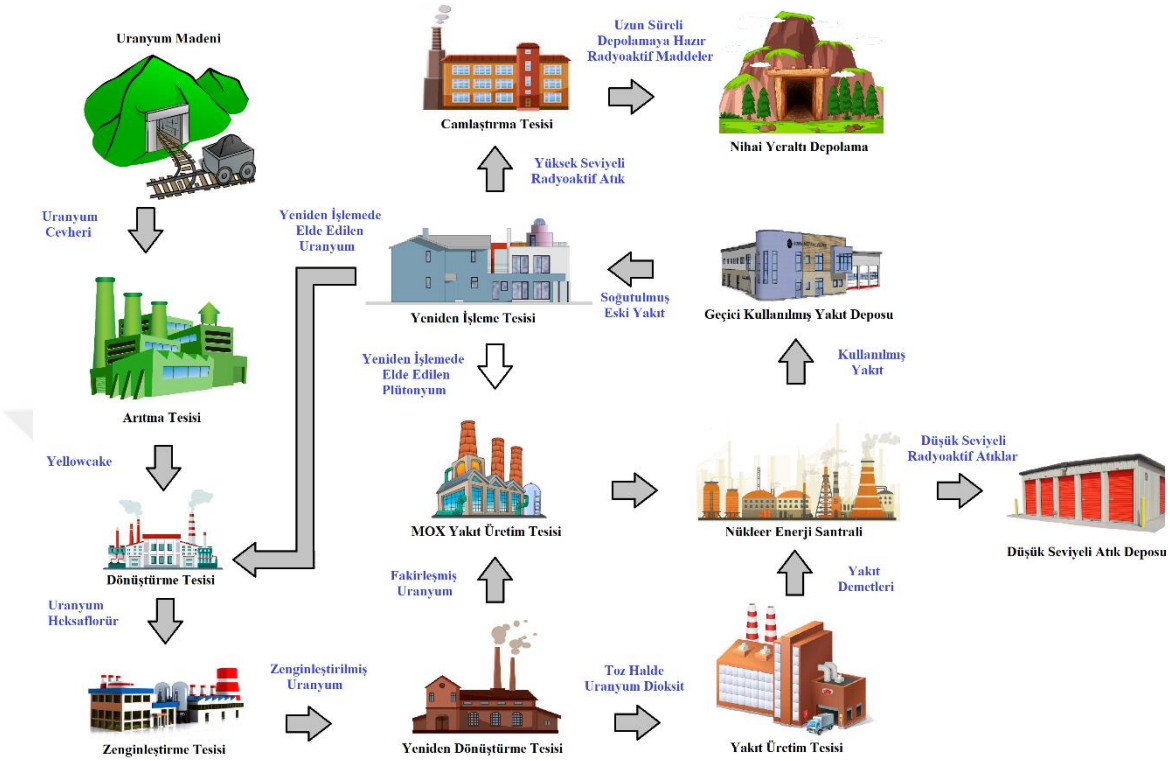
Kullanılmış Yakıt, nükleer güç reaktöründen kullanılan yakıt, %96 uranyum, %3 fisyon ürünleri ve %1 plütonyumun yanı sıra az miktarda başka transuranik maddeler içerir. Kullanılmış yakıt yüksek düzeyde radyasyon ve ısı yayar. Bu nedenle ilk ısı ve radyasyon seviyelerinin düşmesini sağlamak için reaktörün bulunduğu alanda su havuzlarında

depolanır. Genel olarak, kullanılmış yakıt taşınmadan önce en az beş ay bu havuzlarda depolanır [113]. Reaktör bölgesinden, kullanılmış yakıt kara, demiryolu veya deniz yoluyla geçici bir depolama alanına veya yeniden işleme tesisine taşınır [114].

6.3.1 Taşıma

Taşıma, nükleer yakıt çevriminin en önemli parçalarından biridir. Dünya genelinde, 31 ülkede, faal 447 nükleer santrali bulunmaktadır. Bunun yanında yaklaşık 30 ülkede uranyum madenciliği gerçekleştirilmektedir. Çıkarılan uranyumun büyük kısmı nükleer güce sahip olmayan ülkelerden gelmektedir [112]. Bu nedenle, radyoaktif maddelerin taşınması ulusal ve uluslararası boyutta değerlendirilmesi gereken çok yönlü bir ağ sistemi ve özel tasarım koşulları gerektirmektedir.

Nükleer yakıtlarda kullanılan malzemenin çoğu, yakıt döngüsü boyunca birkaç kez tesisler arasında farklı formlarda taşınmaktadır. Bu taşıma işlemi, yakıt döngüsünde düşük bir maliyeti kapsıyor olsa da muhtemel bir kaza sonrası meydana gelebilecek bir salınım durumunda, neden olacağı etkiler göz önüne alındığında, önemle dikkate alınmalıdır [112]. Bu tez çalışmasında daha çok yüksek radyoaktiviteye sahip malzemelerin bulunduğu taşıma aşamaları ve söz konusu malzemeler üzerinde durulacaktır. Yakıt çevrimi boyunca tesisler arasında yapılan taşıma döngüsü Şekil 6.2‘de verilmiştir.



Şekil 6.2 Yakıt çevrimi ve tesisler arası taşıma

Çok maliyetli ürünler olduklarından, yakıt grupları, nakliye sırasında olası bir hasarı önlemek için özel standartlara uygun olarak paketlenmeli ve mühürlenmelidir. Plütonyum içermediği sürece, taze yakıt paketlerinin radyasyon kalkanı içermesine gerek yoktur ve normal olarak A tipi paket standartlarını karşılayacak şekilde taşınabilir, ancak bölünebilir malzeme içeren paketler için ek gereksinimlere gerek vardır, yani Tip A (F) paketi ile taşıma işlemi gerçekleştirilir [96]. Nükleer taşıma faaliyetleri Tablo 7.1'de verilmiştir [112].

Tablo 6.5 Nükleer madde taşıma faaliyetleri

Nereden	Nereye	Malzeme	Taşıma Şekli
Maden	Arıtma Tesisi	Uranyum Cevheri	Adi taşıma işlemi
Arıtma Tesisi	Dönüştürme Tesisi	Uranyum Oksit Konsantrasyonu (Yellowcake- Sarı Pasta)	Genellikle altı metrelik standart taşıma konteynerlerinde 400 kg kapasiteli 200 litrelik variller
Dönüştürme Tesisi	Zenginleştirme Tesisi	Doğal Uranyum Heksaflorür (UF6)	Özel UF6 konteynerleri
Zenginleştirme Tesisi	Yakıt Üretimi Tesisi	Zenginleştirilmiş UF6	Özel UF6 konteynerleri
Yakıt Üretimi Tesisi	Nükleer Santral	Taze Yakıt	Taze Yakıt: A(F) Tipi MOX: B Tipi
Nükleer Santral	Kullanılmış Yakıt Deposu	Kullanılmış Yakıt	Yerinde depolamadan sonra büyük B Tipi tanklar
Kullanılmış Yakıt Deposu	Yeniden İşleme Tesisi	Kullanılmış Yakıt	B Tipi büyük tanklar
Yeniden İşleme Tesisi	Dönüştürme Tesisi	Uranyum Oksit	Sızdırmaz özel ambalajlar
Yeniden İşleme Tesisi	Yakıt Üretimi Tesisi	Plütonyum Oksit	Sızdırmaz özel ambalajlar
Yeniden İşleme Tesisi	Camlaştırma Tesisi	Bölünebilir Maddeler Yüksek Radyoaktif Atıklar	B Tipi büyük tanklar
Bütün Tesisler	Atık Deposu	Radyoaktif Atıklar Kontamine olmuş diğer malzemeler	Radyasyon seviyesine göre taşıma kapları seçilir.

6.3.2 Paket Tasarımı

Yüksek radyoaktiviteye sahip malzemelerin taşınmasında, işçileri, toplumu ve çevreyi korumak için taşımada kullanılacak paketlerin tasarımı ve kalite kontrolü büyük bir öneme sahiptir [115]. Bilgisayar analizleri, diğer tasarımlarla karşılaştırma, bileşen testleri,

ölçekli bir modelin fiziksel testleri veya bu tekniklerin bir kombinasyonu kullanılarak paketler tasarlanır. Çoğu zaman, tasarım analizleri ve fiziksel testleri birleştirilir ve standartlara uygun paket tasarımı gerçekleştirilir [116]. Bölünebilir madde taşımak için kullanılacak paketlerin tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar genel olarak aşağıda verilmiştir.

- Taşıma için kullanılacak paketler kolay taşınabilir ve yerleştirilebilir özellikte tasarlanmalıdır [100].
- 35kPa' dan yüksek tasarım basınçlarında, koruma kapları bu basınç altında taşınan maddeyi ve kendi bütünlüğünü koruyacak şekilde tasarlanır [96].
- Bölünebilir malzeme içeren ambalajlar, zırh ve taşıma kaplarının ısı transfer karakteristikleri dikkate alınarak belirlenen limitlere göre tasarlanır [96].
- Taşınacak bölünebilir maddenin özelliklerine göre uygun nötron yutucu (soğurucu) malzeme ve oranı gerekli testler yapılarak tasarıma eklenir [96].
- Taşıma onay sertifikasında yer alan koşulların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir.
- Normal sevkiyat ve beklenmedik olay durumlarında bölünebilir malzemenin *kritik altı durumu* dikkate alınarak tasarım yapılır [96].
- Fisil malzeme taşınacak paketlerin dış boyutu 10'cm daha küçük olmamalıdır [96].
- Sıcaklık değişimlerinin bölünebilir malzemenin üzerindeki etkileri veya nötron etkileşimi üzerindeki etkileri incelenerek tasarımlar gerçekleştirilmelidir. Sıcaklık değişiminin paket bütünlüğünü de etkileyebileceği göz önüne alınmalıdır. Örneğin, çok düşük enerjili (termal) nötronların egemen olduğu uranyum sistemlerinde, sıcaklık azaldıkça nötron sayısı artabilir [101].
- Aksi belirtilmedikçe, ambalajların tasarımında ortam sıcaklığının -40^{o}C ila +38^{o}C arasında olmasına dikkat edilir [96].

- Paketlerin sus sızdırmazlığı ve güvenliği şekilde kapatılıp kapatılmadığı gelişmiş kalite kontrol testleri ile takip edilir [96].

- Tasarım kaynaklı hata, üretim hatası, korozyon veya bütünselliğin bozulması gibi durumlar kalite kontrol testleri ile belirlenir [101].

- **Paket Dayanıklılığı Testleri**: Sprey, Su içinde bekletme, serbest düşme, sıkıştırma, giricilik, ısı testleri paketlerin dayanıklılıklarını belirlemek için kullanılan testlerdir [93, 96, 101].

    - *Sprey testi:* 5 cm/saat yağmur etkisine sahip su ile 1 saat boyunca ıslatılır.

    - *Su içinde bekletme:* 90 cm derinliğinde en az sekiz saat boyunca bekletilerek sızıntı kontrolü yapılır.

    - *Serbest düşme testi:* sert bir zemine yüksek bir noktadan (9 m) atılarak sağlanır.

    - *Sıkıştırma testi:* Paket, ağırlığının beş katı büyüklüğüne denk gelecek şekilde en az 24 saat boyunca sıkıştırılır.

    - *Giricilik:* Düz bir zemin üzerinde bulunan pakete belirli bir yükseklikten bırakılan hasara dirençli bir çubuk ile yapılır.

    - *Isı Testi:* 30 dakika boyunca 800ºC sıcaklıkta paketler ısı testine tabi tutulur.

    - *Kritik Güvenliği Testi*

6.3.3 MOX Yakıt Taşıma

Uluslararası olarak 1970'lerden beri MOX yakıtları taşınmaktadır. FS69, MX6 ve MX8 gibi fıçılar bu iş için yaygın olarak kullanılmıştır. Bu tip yakıtlar plütonyum izotopları barındırdıklarından taşıma kaplarında ek zırhlama önlemleri gerektirir. Bu nedenle MOX tipi yakıtlar B tipi fıçılar ile taşınır [117].

6.4 Uranyum Heksaflorür

Nükleer santrallerde kullanılacak yakıt üretimi için uranyum zenginleştirme işleminde kullanılan kimyasal bir bileşiktir ve radyoaktif madde taşımacılığının çok önemli bir parçasıdır. Sıcaklık ve basınç seviyesine göre katı, sıvı veya gaz halde bulunabilir. Düşük sıcaklıklarda uçucu olan tek uranyum bileşiğidir. Atmosfer basıncında (0.101 MPa) 56,4 ° C'de süblimleşir ve 0.151 MPa' lık bir basınçta 64 ° C'de sıvılaşır. Kaya tuzuna benzeyen beyaz kristal şeklindeki katı hali Resim 6.1' de verilmiştir [118].



Resim 6.1 Katı haldeki UF6

Madenden çıkarılan uranyum cevheri uranyum oksit (yellowcake) üretiminde kullanıldıktan sonra ortaya çıkan konsantre, susuz HF ve flor gazı ile reaksiyona sokularak UF6 elde edilir. Elde edilen ürün uranyum zenginleştirme işleminde kullanılmak üzere çelik silindirlerin içine yerleştirilerek zenginleştirme tesisine gönderilir [119].

Özel ölçüm cihazları ile tespit edilebilen yüksek enerjili ışınlar yayarlar. Son derece zehirli, radyoaktif ve aşındırıcıdır. Cildi, gözleri ve mukoza zarlarını büyük ölçüde tahriş eder [120].

Uranyum heksaflorür, oksijen, azot, karbon dioksit veya kuru hava ile reaksiyona girmez, ancak su veya su buharı ile reaksiyona girer. UF6, havadaki su buharı ile temas ettiğinde, UF6 ve su reaksiyona girdiğinde aşındırıcı özelliğe sahip hidrojen florür (HF) ve uranil florür (UO2F2) adı verilen uranyum florür bileşiği oluşturur [121].

HF'ye maruz kalma, maruziyet düzeyine bağlı olarak göz ve solunum yollarında tahrişten ölüme kadar bir dizi sağlık etkisine yol açabilir. Uranil florür, havada dağılabilen ve teneffüs edilebilen bir partiküldür. Solunduğunda, uranil florür kolayca çözünür ve kan dolaşımı ile emilir. Çok miktarda solunursa, böbrek toksisitesi ortaya çıkabilir [118].

Sekiz saatlik çalışma sürecinde havada izin verilen maruziyet limiti ortalama **0,05 mg / m^3**'tür [122].

6.4.1 Taşıma Kapları Tasarım Özellikleri ve Gereklilikler

UF6, radyoaktiflik ve bölünebilirlik özelliklerinin yanında, zehirleme ve aşındırma gibi diğer tehlikelerinden dolayı özel dikkat gösterilmesi gereken malzemelerdir [123]. Bu nedenle bölünebilir maddelerin taşınmasında kullanılan ambalajlardan farlı tasarım özelliklerine sahiptir. UF6 için kullanılacak taşıma kapları ISO 7195: "*Uranyum heksaflorürün taşınması için paketlenmesi*" standartlarına uygun olarak tasarlanır [122]. Uranyum heksaflorür taşınmasında kullanılan silindir tanklar Resim 6.2 'de verilmiştir [118].



Resim 6.2 UF6 taşımasında kullanılan silindir tanklar

- Uranyum kütlece %1'den daha fazla zenginleştirildiğinde, uranyum heksaflorür bölünebilir malzeme içeren ambalajlar için geçerli olan gerekliliklere uygun bir pakette taşınması gerektiğine dikkat edilmelidir [122].

- Paketler sızdırmaz, yangına ve patlamaya dayanıklı ve bütünlüğünü koruyacak şekilde tasarlanır [96].

- Su ve su buharı ile temasını tamamen önleyecek kaplar kullanılmalıdır. Su ile temas ettiğinde patlayabilir [99].

- Uranyum heksaflorür genellikle 0.4 MPa ‘lık basınç ve yaklaşık 100 ° C' lik bir sıcaklık altında (bu koşullarda UF6 sıvı haldedir) yüklenir. Bu nedenle ambalajlar basınçlı ekipman gereksinimlerine de uygun olmalıdır [99].

- Taşıma kapları 2 MPa (14 bar) servis basıncına dayanacak şekilde tasarlanmıştır. 0,1 kg ve üzerindeki miktarlarda, taşıma kaplarında basınç ayar ekipmanları (vanalar) bulundurulmaz. Özellikle ambalajlar, servis basıncının iki katı hidrostatik basınca karşı dirençlerini doğrulamak için her beş yılda bir test edilmelidir [99].

- Ambalajlar için uygulanacak testler aşağıda sırlanmıştır:

- *Su Spreyi:* 5 cm/saat yağmur etkisine sahip su ile 1 saat boyunca ıslatılır [96].

- *Silindir basınç testi:* 9000kg dan daha az miktarda UF6 taşınacak kaplar 1.38 MPa büyüklüğünde iç basınca dayanıklı olmalıdır. Daha büyük miktarlardaki taşıma işleminde 2.76 MPa değerinden daha düşük iç basınca sahip olmalıdır [96].

- *Düşürme testi:* Normal ve acil durum koşullarına dayanıklılık gösterecek şekilde düşürme testlerine tabii tutulur [96].

- *Giricilik:* 6 kg kütleye sahip 3,2 cm çapında bir çubuk numunenin en zayıf noktasına düşürülerek performans ölçümü yapılır [99].

- *Termal test:* 9000kg dan daha az miktarda UF6 taşınacak kaplar 30 dakika boyunca 800^{o}C termal teste tabi tutulur. Bu miktarı aşan tasarımlarda çok taraflı onay alınmalıdır [99].

- *Kritiklik güvenliği testi* [96]

- *Yetkili Otorite tasarım onayı* [96]

6.5 Yüksek Radyoaktif Atıklar

Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar, nükleer reaktörlerde oluşan reaksiyonların yan ürünü olarak üretilen yüksek düzeyde radyoaktif maddelerdir. *Kullanılmış (tükenmiş) yakıt* ve *kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi sonrasında geriye kalan atıklar* yüksek seviyeli atıklardır [114]. Radyoaktif atıkların yüzde 3'lük, toplam radyoaktivitenin yüzde 95' lik bir kısmını oluştur [124].

Oldukça radyoaktif fisyon ürünleri nedeniyle, yüksek seviyeli atıklar ve kullanılmış yakıt dikkatle taşınmalı ve depolanmalıdır. Radyoaktif atıkların nihayetinde zararsız hale gelmesinin tek yolu, yüksek seviyeli atıklar için yüz binlerce yıl alabilecek çürüme

yoluyla olduğundan, atıklar depolanmalı ve son olarak halkın çok uzun süre yeterli korunmasını sağlayacak şekilde bertaraf edilmelidir [114].

Nükleer atıkların taşınması, birçok belirsizlik, potansiyel etkiler ve sahip olduğu tehlikeler nedeni ile disiplinler arası çok yönlü bir çalışma ve programlama gerektirmektedir. Yapılan koordineli taşıma planlaması vasıtasıyla, 1962 yılından günümüze nakliye kazaları nedeniyle radyasyon salınımı yaşanmamıştır [124].

Yüksek radyoaktif atıkların taşınmasında, atıkların radyoaktivite düzeyleri en önemli unsurdur. Sevkiyat için kullanılacak kaplar materyallerin radyoaktiflik seviyesine göre tasarlanır. Nihai depolamada, atıklar içinde radyoizotopların bozunma süreleri önemli olduğu için taşıma işleminde de aynı tür malzemelerin birlikte taşınması depolama işlemlerinde de süre ve sürecin takibi açısından kolaylık sağlayacaktır [114].

6.5.1 Kullanılmış Nükleer Yakıt

Tükenmiş nükleer yakıt, fisyon süreci yavaşladığından artık elektrik üretmede verimli değildir. Bununla birlikte, hala sıcak, yüksek radyoaktif ve oldukça zararlıdır. Kullanılmış nükleer yakıtların kalıcı bir bertaraf deposuna nakledilene kadar, reaktörün bulunduğu alanda yeterli miktarda soğuyana kadar güvenli bir şekilde depolaması gerekir [125].

1954'ten 2013 yılının sonuna kadar nükleer enerjiye dayalı elektrik üretimi sonucunda Hindistan ve Pakistan hariç dünyadaki tüm nükleer güç santrallerinden toplam 370.000 ton kullanılmış yakıt ortaya çıkmıştır [125].

Kullanılmış yakıtların taşınması işlemi nükleer güç santrali, depolama tesisi ve yeniden işleme tesisleri arasında ve son olarak bertaraf tesislerinde bir dizi taşıma adımı içerir. Sevkiyat diğer bölünebilir maddelerin taşınmasında olduğu gibi işçilerin, halkın ve çevrenin, herhangi bir radyasyon salınımını ya da kaçağı önleyerek, güvenliğini sağlayan ve yakıtı soğutacak şekilde özel tasarlanmış taşıma kapları ile yapılır. Bu nakliye operasyonları, genellikle IAEA Güvenlik Standartları Serisi No. SSR-6, Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınması için Yönetmelikler (2012 Baskısı)' deki nakliye

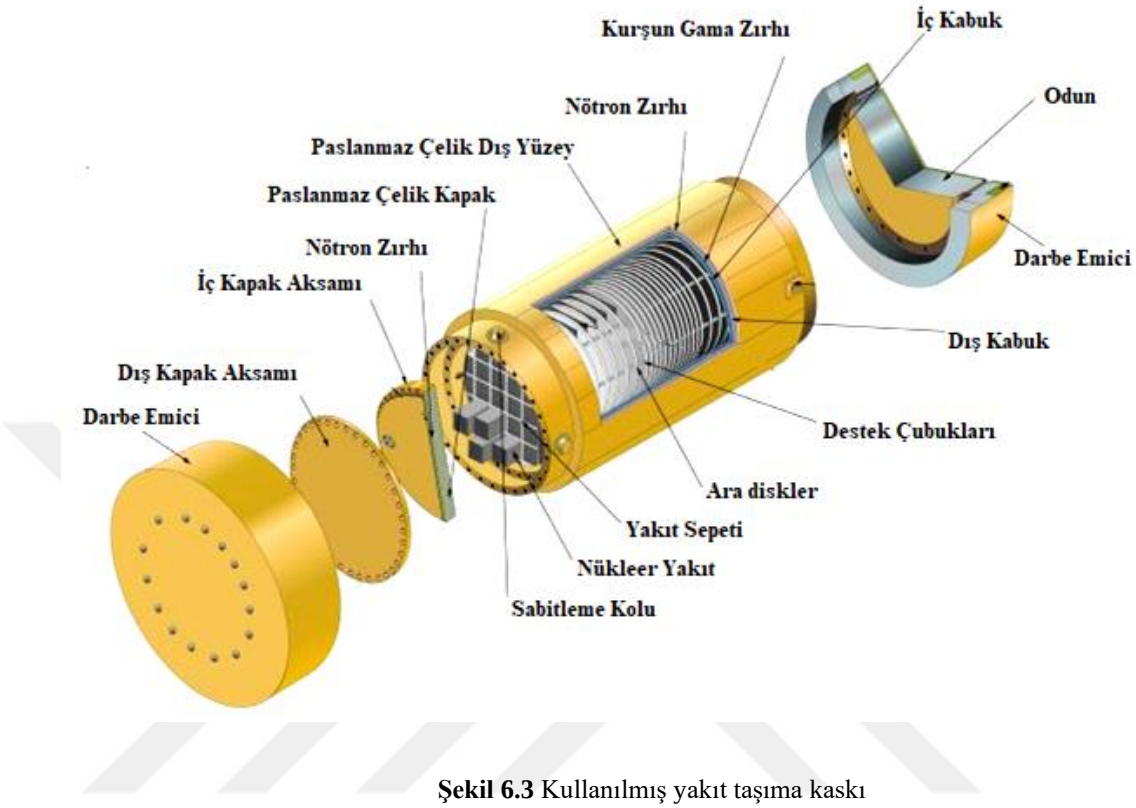
yönetmeliklerine dayanan ulusal yönetmeliklere göre sıkı bir şekilde kontrol edilmektedir [101].

6.5.2 Kullanılmış Yakıt Nakil Konteyneri

Kullanışmış yakıtlar yüksek radyoaktiviteye sahip olduklarından, güvenli bir şekilde nakledilebilmeleri için korunmalı ve muhafaza edilmelidirler. Güvenli sevkiyat, fıçı şeklindeki büyük ve sağlam yakıt kapları ve organize bir çalışma ile gerçekleştirilir. Karayolu ile taşınacak kullanılmış yakıtlar için ciddi büyüklükteki kazalarda dahi koruma sağlayacak yüksek donanımlı kap tasarımları kullanılmalıdır [126].

Kullanılmış yakıt grupları çelikle veya çelik- kurşun alaşımı ile korunan B Tipi fıçılarda sevk edilir. Fıçılar boşken 110 tona kadar ağırlığa sahip olabilirler. IAEA SSR-6 düzenlemelerine göre, fıçının dış yüzeyinde izin verilen maksimum doz **10 mSv / saat**' tir. Kullanılmış yakıtı taşımak için kullanılan tipik bir fıçının "dış doz oranı", fıçıdan 2 metre mesafede saatte yaklaşık **0.1 mSv**'dir. Bir kişinin yıllık maruz kaldığı doğal radyasyon dozunun eşdeğerini almak için bir fıçının yanında 24 saat beklemesi gerekir. Normal operasyonlar altında, 20 km / s hızla hareket eden kullanılmış yakıt taşıma kamyonundan 10 metre uzakta duran bir kişi yaklaşık 0.000025 mSv radyasyon dozuna maruz kalır. Fıçının türü ve kamyonun hızı da maruz kalınan doz miktarını etkiler [101]. Maruz kalınan doz fıçıdan uzaklaştıkça daha da düşecektir. Bu nedenle radyoaktif madde nakliyatı yapılacak karayolları halktan uzakta ya da olabildiğince az kişinin bulunduğu alanlarda seçilmelidir.

1971'den bu yana hem karada hem de denizde milyonlarca kilometreyi kapsayan en az 25.000 adet kullanılmış yakıt yükü taşınmıştır [127]. Kullanılmış yakıt için kullanılan taşıma kaskına dair bir örnek tasarım Şekil 6.3'te verilmiştir.



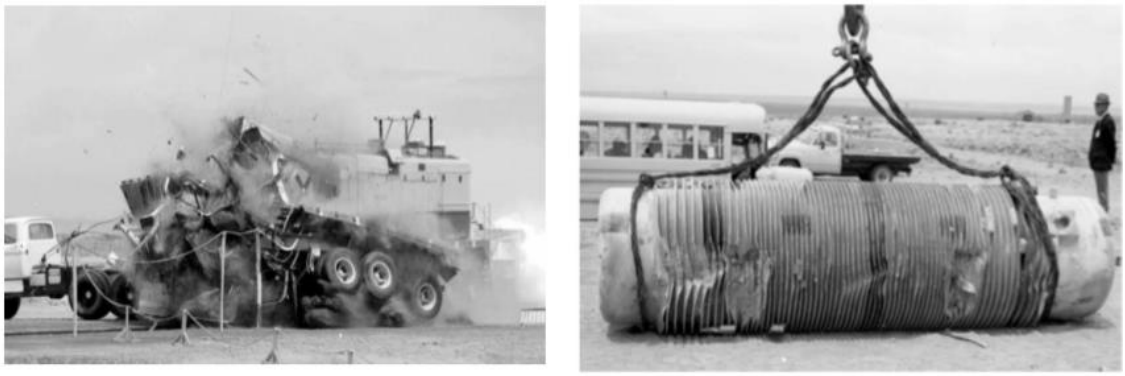
Şekil 6.3 Kullanılmış yakıt taşıma kaskı

İşçileri, halkı ve çevreyi korumak üzere, 12-40 cm kalınlığında dökme çelikten koruyucu duvarları ve büyük bir kapağı vardır. Kullanılmış yakıt ile dolu taşama kabı yaklaşık olarak 25 ton ağırlığında olur. Uçlarında darbeyi sınırlayıcı darbe emiciler bulunmaktadır. Yakıtlar yerleştirildikten sonra kapakları sıkıca mühürlenir ve kademeli güvenlik kontrolleri sağlanır [128].

Tam ölçekli çarpışma, darbe, delinme, ateş ve suya maruz bırakma gibi çeşitli testler ile kaza senaryoları gerçekleştirilerek taşıma kaplarının dayanıklılık testleri yapılır. Uluslararası ve ulusal düzenlemelerdeki standartlara uygunluğu ve test koşullarını karşılayan konteynerler tasarım aşamasından geçerler [129].

Testlerin uygulandığı sırada ve sonrasında, fıçılar nükleer materyali içermeli, radyasyon dozlarını kabul edilebilir seviyede sınırlamalı ve herhangi bir nükleer zincir reaksiyonunu önlemelidir [101]. 130 km/saat hıza sahip yüklü kamyon ile yapılan tam ölçekli çarpışma

testi ve 50 m yükseklikten taşıma kabının bırakılması ile yapılan düşürme testi Resim 6.3 ‘te verilmiştir [93]. Yapılan test sonucunda dış görünümü itibari ile hasar aldığı düşünülse de radyasyon salınımı gerçekleşmemiştir [93].



Resim 6.3 Kullanılmış yakıt fıçıları ile yapılan tam ölçekli çarpışma ve yüksekten düşürme testi

2001 yılında İsviçre’de yapılan bir araştırmada kullanılmış yakıt taşıyan fıçıların mühürlerin açılması sonucu 100 metre uzaklıkta bulunan bir kişinin kazadan bir yıl sonra maruz kaldığı radyasyon dozu 2.4 mSv (yaklaşık olarak doğal radyasyon maruziyeti ile aynı seviyede) ve 500 metre uzaklıkta bulunan bir kişinin maruz kaldığı doz ise 0.3 mSv olarak ölçülmüştür [130].

2014 yılında Amerikan Ulusal Araştırma Konseyi (USNRC) tarafından gerçekleştirilen kullanılmış yakıt taşıyan bir fıçıdan radyasyon yayılma deneyinde, fıçıdan yaklaşık 20 metre mesafe bulunan bir kişinin soluduğu havadan aldığı radyasyon dozu yaklaşık 1.6 Sv olarak ölçülmüştür [93]. Bu doz akut radyasyon hastalığına ya da ölüme neden olmasa da ciddi bir radyasyon maruziyetidir ve önemli sağlık sorunlarına neden olabilir. Bir kaza anında, kaza mahalline bu kadar yakın kişinin bulunmasına izin verilmeyecek şekilde taşıma rotası belirlenmelidir. Kaza anında da acil müdahale ekipleri ivedilikle güvenlik önlemlerini almalıdır ve kaza sahası operasyonunu uygulamalıdır.

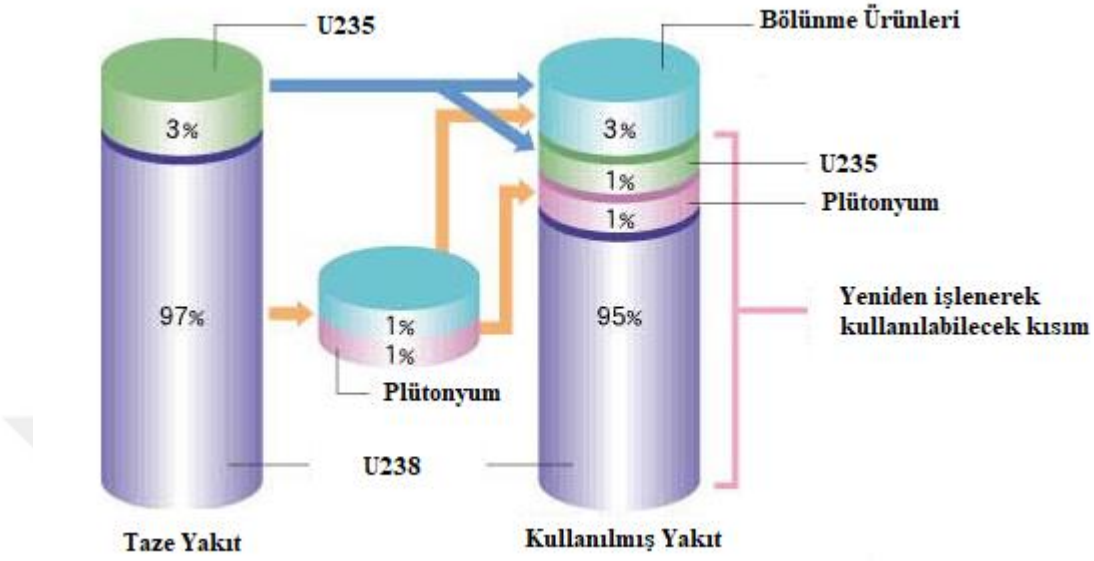
Dünya’da nükleer teknolojiye sahip birçok ülkede MPC (BWR ve PWR yakıtları için), Holtec HI-STAR, TN112 (MOX yakıtları için), ENUN (İspanya tasarımı) ve gibi konteyner tasarımları kullanılmış yakıtların taşınmasında kullanılmaktadır [131].

Rusya'da, kullanılmış nükleer yakıtları taşımak için TUK (transportation packaging set-nakliye ambalaj seti) fıçıları kullanılmaktadır. TUK-1410 fıçısı hem Rusya'da hem de deniz aşırı ülkelerde VVER-1000 yakıtlarının taşınmasında kullanılmaktadır. Her biri 100 tondan ağırlığındadır, çıkarılabilir bir kutuda 9 ton ağırlığında 18 VVER yakıt grubu bulunur ve 36 kW'a kadar ısı yükü olan daha sıcak yakıt için tasarlanmıştır. TUK-14 serisi daha yüksek korumalıdır ve Akkuyu’ da yapımı devam eden VVER-1200 tipi reaktörlerin yakıtlarının taşınmasında kullanılmaktadır [131].

6.5.3 Yeniden İşlemeden Kaynaklanan Atık Malzemeler

Yeniden işleme, uranyum ve plütonyumun ayrılması için kullanılmış yakıtın kimyasal olarak işlenmesi yöntemidir [132].

Kullanılmış yakıt, hala yaklaşık olarak %95 oranında tekrar yakıt olarak kullanılabilir malzeme içerir [16]. Taze yakıtın reaktörde kullanımının ardından kalan ürünler Şekil 6.4‘te verilmiştir.



Şekil 6.4 Taze yakıtın yanması sonucu geriye kalan ürünler

Nükleer reaktörlerde, yakıt çubuklarında bulunan uranyum atomları geçirdikleri zincirleme reaksiyonlar sonucunda teknesyum gibi farklı atomlara bölünmektedir. Bu sırada oluşan nötronlardan tepkimeye giremeyenler uranyum atomları tarafından yakalanır ve plütonyum, amerisyum, neptünyum trans-uranyum atomlarına da dönüşmektedir. Oluşan trans-uranyum atomları uzun yıllarca devam edecek yüksek radyoaktiviteye sahiptirler [133].

Plütonyum ve Uranyumun kimyasal yöntemlerle kullanılmış yakıttan ayrılması sonucu geriye kalan atık büyük ölçüde sıvı haldedir. Yakıtı kaplayan gövde, donanım ve çözünmemiş diğer ürünler katı haldedir. Çözünme işlemi sırasında kullanılmış yakıttan salınan gazlar ve uçucu fisyon ürünleri de gaz olarak ortaya çıkan atıklardır. Yeniden işleme tesislerinde fisyon ürünleri kullanılmış yakıttan çıkarıldıktan sonra geriye kalan yüksek seviyeli yan ürünler nihai depolama alanlarına götürülmek üzere camlaştırma tesislerinde, kararlı bir yapıya sahip borosilikat camı ile karıştırılarak güvenlikli kapların içerisine yerleştirilirler [134].

Elde edilen Plütonyum farklı boyutlardaki konteynerler ile farklı formlarda taşınabilir. Tek izotop veya birkaç izotopun toz yahut dökme katı formundaki karışımı halinde sevk edilebilir. Genelde küçük miktarda yapılan plütonyum sevkiyatları kamyonlar ile yapılmaktadır. Taşıma işlemi yeniden işleme ve yakıt üretim tesisleri arasında yapılır [101].

Tipik bir 1000 MWe nükleer reaktörün bir yıllık çalışmasından kaynaklanan yaklaşık 230 kilogram plütonyum (harcanan yakıtın %1'i) geri dönüşüm için ayrılır. Bu malzeme MOX yakıt üretiminde kullanılır. Kullanılmış yakıt yeniden işlenmezse, oluşan yan ürünlerin yanında yüksek derecede radyoaktif izotopları içerecektir. Bu açıdan yeniden işleme radyoaktif atık döngüsü ve miktarı açısından sisteme artı bir durum kazandırmaktadır [135].

Yeniden işlemeden sonra Kripton ve Ksenon gibi gaz formundaki fisyon ürünleri de ortaya çıkar. Yarılanma ömrü diğer gaz formdaki fisyon gazlarına göre daha yüksek olan Kr85'in yarılanma ömrü 10,7 yıldır. Genellikle gaz formdaki fisyon ürünleri geçici olarak depolanır ve yarılanma ömürlerine göre atmosfere salınırlar. Yarılanma ömrü yüksek olan gazlar katılaştırılarak, katı formdaki atıklar ile veya basınçlı silindirler ile taşınır [136].

6.6 Taşıma Kontrolleri

Radyoaktif maddelerin taşınmasında, nakliye gerçekleştirilmeden önce çalışanların ve halkın sağlığının korunması ve taşıma güvenliğinin sağlanmasında taşıma kontrolü büyük bir öneme sahiptir. Radyoaktif maddelerin güvenle taşınması ile ilgili uluslararası ve ulusal düzenlemeler dikkate alındığında, genel olarak yapılması gereken kontroller aşağıda sıralanmıştır.

- Ambalajların tasarım özelliklerine uygunluğu,
- Ambalajların periyodik muayeneleri,
- Radyoaktif maddelerin diğer tehlikeli maddelerden ayrı şekilde taşındığı,

- Sevkiyatı yapılacak materyalin sınıfına göre taşıma kabı seçimi,
- Taşınacak materyalin kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre paketleme, etiketleme, işaretleme ve plakalanması işlemlerinin ulusal ve uluslararası yönetmeliklere uygunluğu,
- Paketlerin ve konteynerlerin dış yüzeylerinde ölçülen radyasyon seviyesinin izin verilen doz limitlerine uygunluğu,
- Görevli personelin eğitimi ve göreve uygunluğu,
- Sürücü kabininin güvenliği, kişisel koruyucu ekipmanlar, araçların rutin kontrolleri,
- Ekipmanın, kontaminasyon olasılığına ve radyoaktif materyalin taşınma derecesine uygun periyodiklikte kontaminasyon seviyeleri açısından kontrolü,
- Dış yüzeyi kontamine olmuş taşıma kaplarının kullanılmaması,
- Taşıma endeksi (TI) ve kritik güvenlik endeksinin (CSI) belirlenmesi,
- Yönetmeliklerde belirtilen evrakların sağlanıp sağlanmadı,
- Taşıma rotasının uygunluğu, doğal afet riski, hava koşulları kontrolü,
- Acil durum planları,

BÖLÜM 7

RADYOAKTİF MADDE LOJİSTİĞİNDE KAZA RİSKİ

7.1 Taşıma Kazası

Dünyada 50 yıldır nükleer teknolojiye sahip birçok ülkede tonlarca büyüklükte binlerce Kullanılmış Yakıt (SF) ve Yüksek Seviyeli Radyoaktif Atık (HLW) taşımacılığı güvenli bir şekilde gerçekleştirilmiştir [137]. Radyoaktif madde salınımına neden olan SF ve HLW kazası kayıtlarda yer almamaktadır. Bu ürünlerin taşımasında gerçekleşen kazaların çoğu yoldan sapma veya küçük çaplı trafik kazalarından oluşmaktadır. 1970- 1980 yılları arasında Amerika ve Avrupa'da gerçekleştirilen taşıma işlerinde yükleri taşıyan fıçılarda ve araçlarda radyoaktif kirlenme olduğu bildirilmiştir [127]. İlerleyen yıllarda uygulanan prosedürlerle kontaminasyon örneklerine daha da az rastlanılmıştır [128]. Bu tez çalışmasında Amerika ve İngiltere'de meydana gelen kazalardan örneklere yer verilmiştir.

1970 yılında PATRAM (Packaging and Transport of Radioactive Materials)' da sunulan bir bildiriye göre, 1949 ve 1969 yılları arasında Amerika'da Atom Enerjisi Komisyonu (AEC) tarafından gerçekleştirilen sevkiyatlarda 14 nakliye kazası meydana gelmiştir. 1971 ve 2004 yılları arasında da 4 adet nakliye kazası bildirilmiştir. Bu kazalarda radyoaktif maddelerin bulunduğu fıçılar zarar görmemiştir. 2005 ve 2014 yılları arasında da 3 adet boş fıçının taşınması sırasında kaza meydana gelmiştir fakat bunlar normal trafik kazası statüsündedir [127]. ABD'de Clinton, Tennessee'de 1972 yılında gerçekleşen bir taşıma kazası Resim 7.1'de verilmiştir [127].



Resim 7.1: Clinton, Tennessee radyoaktif madde taşıma kazası

Karşıdan gelen traktör ile çarpışmak istemeyen sürücü, çarpışmayı önlemek için direksiyon yönünü değiştirdiğinde yoldan sapmış ve yola yakın bir yerde bulunan hendeğe saplanmıştır. Fıçıya kamyona sabitleyen bağlantılar kopmuş ve fıçı ile kamyonun bağlantısı kopmuştur. Fıçının iki metre kadar su ve toprak dolu hendeğin içine gömülmesi olası bir yangın riskini azalmıştır. Kazanın ardından trafik durdurulmuş, 500 metre çapında bir alanda bulunan insanlar tahliye edilmiş, yapılan ölçümler sonucunda radyasyon salınımı veya kontaminasyon ile karşılaşılmamıştır [138].

2006 yılında, İngiltere'de 1958-2004 dönemini inceleyen bir çalışma yapılmış ve 806 tane olay rapor edilmiştir. Bunlar genellikle küçük çaplı arıza, yangın, aracın yoldan çıkması gibi olayları içermektedir. 187 adet kullanılmış yakıt ve bunların taşındığı boş fıçılar ile ilgili olay bildirilmiş ve bu olayların %33 kısmında yüzeye bağlı düşük düzeyli radyoaktif kirlenme gözlenmiştir. 1996 yılında ise kullanılmış yakıt naklinde doz maruziyeti yaşanan bir olay gerçekleşmiştir. Sürücü fıçıdan kontamine olmuş bir parçayı yanlışlıkla sürücü kabinine taşınmış ve birkaç saat burada tutulmuştur [127].

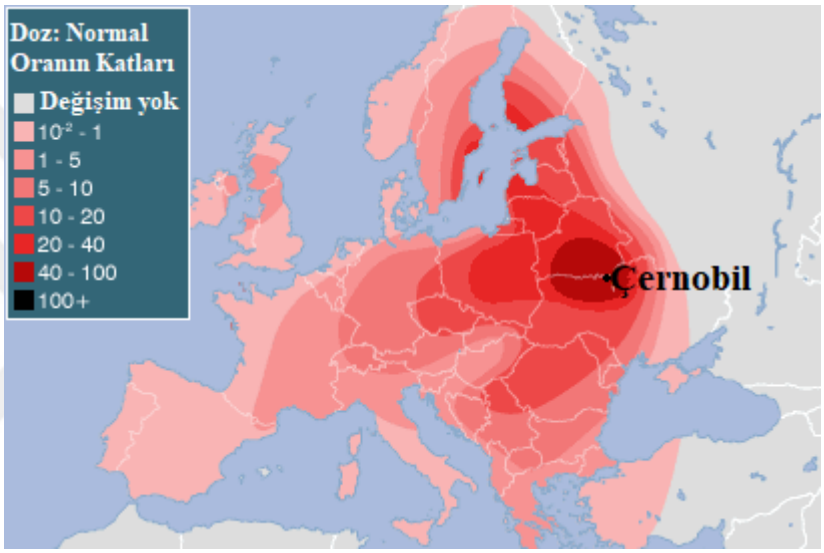
2012-2016 arasında ise rapor edilen olayların çoğu kapak cıvatasının yeterince oturtulmaması, cıvata kaybı, pim deliği sızıntısı, hatalı etiketleme ve işaretleme, yedek parçalarla ilgili sıkıntılar, kapak valflerindeki arızalar gibi küçük çaplı vakalardır. Radyoaktif kirlenme olduğu varsayılan olayların çoğu gönderinin ilk aşamada yüzeyinin kirlenmesinden kaynaklıdır [127]. Burada da anlaşıldığı üzere karşılaşılan durumlar çoğu sevkiyat hazırlıklarını gerçekleştiren personelin prosedürlere uymamasından kaynaklanmaktadır.

7.2 Kaza Sahası Uygulaması

Radyoaktif madde taşıma sırasında meydana gelen bir kaza, taşıma içeriğinin taşıdığı risk potansiyeli nedeni ile uygulanması zorunlu sıkı prosedürleri gerektirir. Kazanın gerçekleştiği sahanın değerlendirilmesi ve koruma çemberi altına alınması radyasyona maruz kalınmasının önüne geçilmek için yapılması gereken ilk önceliklerden biridir [139].

7.2.1 Bulgular

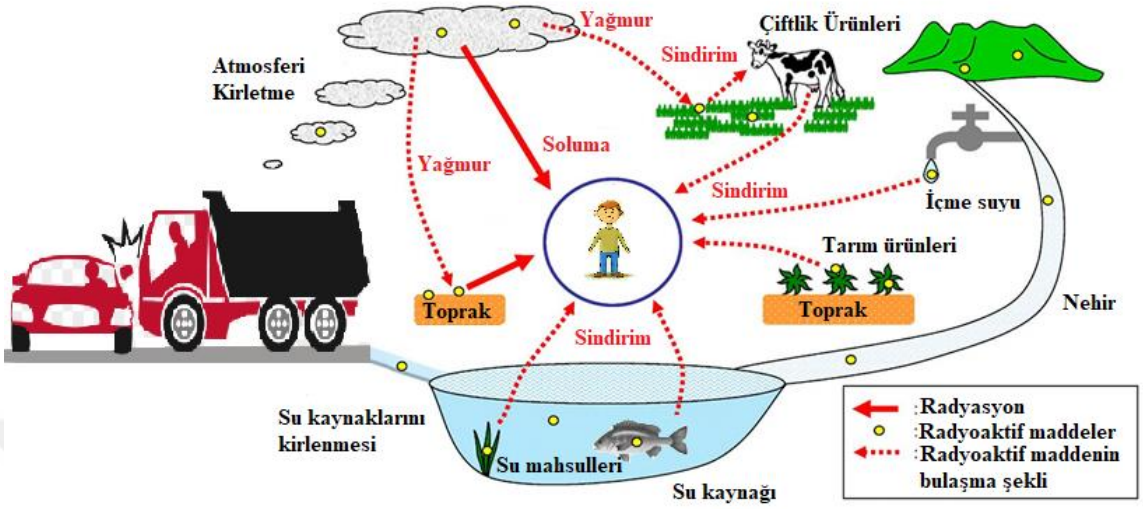
26 Nisan 1986 yılında gerçekleşen Çernobil Nükleer Reaktör Kazası sonrası, yüksek radyoaktif buhar ve parçacıkları atmosfere ve çevredeki arazilere yayıldı. Etkili rüzgârla birlikte Avrupa'da birçok ülkede radyasyon düzeyinde ciddi bir artış gözlenmiştir [140]. Avrupa'da ölçülen radyasyon seviyeleri Resim 7.2'de verilmiştir [141].



Resim 7.2 Çernobil nükleer kazası sonrası Avrupa'da 3 Mayıs 1986 tarihinde ölçülen dozlar

Resim 7.2'de yer alan radyasyon dağılım haritası, olası bir yüksek radyoaktif taşıma kazasına örnek kabul edilerek, radyasyonun rüzgarında etkisi ile geniş bir alana yayılabileceği tahmin edilebilir. Bu nedenle meydana gelen bir radyasyon kazasında kaza sahası bölgeleri uygulanabilir. Böylelikle radyasyonun salınım hızına göre belirlenen saha uygulaması ile temizlik işlerine katılacak uzmanların, sağlık ekiplerinin, kolluk kuvvetlerinin ve halkın radyasyona maruziyeti kontrol altına alınabilir.

Radyoaktif maddeler kaza sonrası çevreye yayıldığında ya da kırılan fıçılardan radyasyon salınımı gerçekleştiğinde, radyonüklidler çeşitli yollarla çevreyi kirleterek canlıları etkileyebilir. Kaza sonrası dağılan radyoaktif maddelerin transfer şekli ve canlılara ulaşma yolları Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1 Kaza sonrası dağılan radyoaktif maddelerin ana transfer ve kirletme yolları

Radyonüklidler toprağa ya da suya karıştıklarında direkt hava karışmalarının yanında, çevrede bulunan su birikintisi, kanalizasyon altyapısı veya su kanalları gibi yollarla su kaynaklarını kirletebilir [69]. Bu kaynaklarda yetişen su ürünlerin tüketilmesi, aynı su kaynağı ile sulanan tarım ürünlerinin ve bunlardan beslenen hayvan ürünlerinin tüketilmesi radyasyonun insan vücuduna alınmasına neden olur [142].

Kaza sahası uygulaması ile radyoaktif maddelerin toprağa ve su kaynakları ile teması kesilerek kirletme ve dolayısı ile uzun süreli radyonüklid maruziyeti önlenebilir. Böylelikle halkın radyasyon maruziyeti en aza indirilebilir.

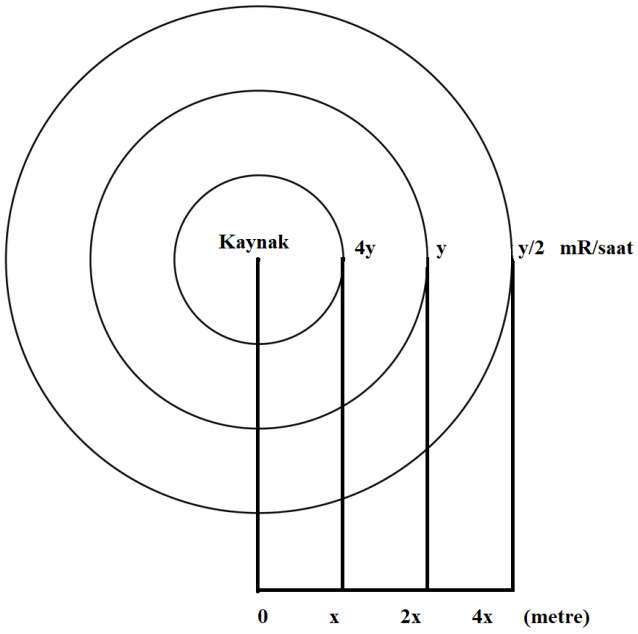
7.2.2 Metot

Yüksek radyoaktif madde taşımacılığında kaza sahasının belirlenmesinde adımlar şu şekildedir:

1. Acil durum planında ve aktif sahada güvenli mesafe belirleme
2. Kaza saha bölgeleri belirleme
3. Kaza sahası operasyonunun uygulanması

a) Güvenli Mesafe Belirleme

Taşımaya söz konusu maddenin olası bir kazada salınım meydana gelebileceği düşünülerek, acil durum planlamasında, radyoaktivitesine göre güvenli şerit mesafeleri hesaplanır. Böylelikle güvenli mesafeler ve oluşturulacak saha alanlarının mesafeleri taşıma öncesi organize edilir. Ters kare formülü, güvenli mesafeyi verir [143]. Bu prensip Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2: Ters kare yasası

Bir nokta kaynağından, radyasyon küresel bir alana yayılırsa, yarıçap (r) arttıkça, dozun dağıtıldığı alan (A) Denklem 7.1`de verilmiştir.

$A = 4\pi r^2$ olduğundan **(7.1)**

Bu nedenle, doz yarıçapın karesinin tersi ile orantılıdır. Ters kare yasası göre, bir kişi bir radyasyon kaynağından ne kadar uzak olursa, maruz kalacağı doz da o kadar düşük olacaktır. Radyasyonun yayılma merkezinden uzaklaştıkça radyasyon etkisi azalacaktır. Radyasyona kaynağından x metre mesafede ölçülen radyasyon seviyesi, mesafe iki katına

çıkarıldığında, başlangıç dozunun dörtte birine iner. Güvenli mesafe hesabı için Denklem 7.2 kullanılır [143]:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad \textbf{(7.2)}$$

D_1: Kaynağa r_1 metre uzaklıkta ölçülen radyoaktivite şiddeti

D_2: Güvenli mesafeyi belirleyecek radyoaktivite şiddetinin sınır değeri

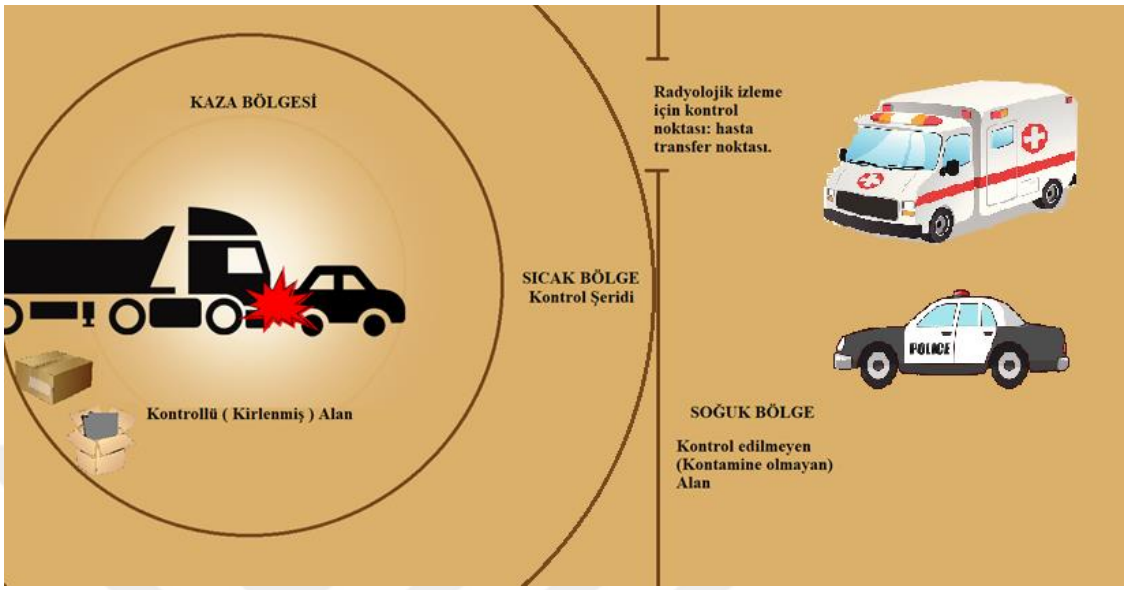
r_1: Radyasyon seviyesinin ilk ölçüldüğü mesafe

r_2: Güvenli mesafe

Radyoaktivitesi değerleri farklı birden fazla radyoaktif maddenin taşındığı sevkiyatlarda, yukarıda yapılan hesaba uygun olarak, radyoaktivitesi en yüksek içeriğe göre güvenli mesafe hesaplaması yapılır. Güvenli mesafe teorik olarak acil durum planına eklenmeli, fakat rüzgâr gibi radyasyonun yayılımını etkileyecek faktörlerde olması nedeni ile kaza bölgesinde tekrar ölçümler alınarak güvenli mesafeler belirlenmelidir. Bu yaklaşım ile dikdörtgen yapıya sahip radyoaktif kaynaklar içinde kullanılabilir [144].

b) Kaza Saha Bölgeleri

Kaza sahası uygulaması ile kaza mahalli, radyasyon salınımının en etkili olduğu bölge, tedavi ve kontrol işlemlerinin yapılacağı mesafe belirlenir. Bu şekilde personelin maruz kalacağı doz, radyoaktif madde kirliliğini temizlemede personelin çalışma süresi, çalışacak kişi sayısı planlanır ve çevrede bulunan halkın radyasyondan en az şekilde etkilenmesi sağlanır. Kaza bölgesinden salınabilecek radyoaktif salınım en aza indirilmeye çalışılır. Şekil 7.3'te verildiği gibi kaza sahası üç bölgeden oluşmaktadır.



Şekil 7.3: Radyoaktif madde taşıma kazasına ait saha planlaması

Kaza Bölgesi- Kontrollü (Kontamine) Alan: Sadece yangınla mücadele, tıbbi yardım, arama-kurtarma ve yaralıların radyolojik kontrol hattına aktarımı için görevlendirilmiş personel ve ekipman giriş çıkışına izin verilen kazanın merkezini çevreleyen alandır. İdeal olarak, radyasyon maruziyeti kaza bölgesinin dış sınırında acil durum işçileri için izin verilen kısa süreli doz düzeyi olan 500 mSv değerini geçmemelidir (Bkz. Tablo 4.1). Giriş için koruyucu giysi ve radyolojik izleme ekipmanı kullanılmalıdır. Kontamine olan tüm araç gereç, kıyafet ve yük burada kalmalıdır.

Sıcak Bölge- Kontrol Şeridi: Dekontaminasyon işlemleri sıcak bölgede yapılmalıdır. Sıcak bölgenin dış sınırında ölçülen radyasyon seviyesi, personelin ve ekipmanın radyolojik olarak izlenmesini kolaylaştırmak için doğal radyasyon dozuna eşit veya yakın olmalıdır. İdeal olarak, radyasyon maruziyeti kaza bölgesinin dış sınırında ise acil durumlarda halk için tek yıllık izin verilen en yüksek doz olan 5 mSv değerini geçmemelidir (Bkz. Tablo 4.2).

Soğuk Bölge- Kontrol Edilmeyen (Kontaminasyon Olmayan) Bölge: Acil müdahale ve uzman ekipler dışında kalan diğer kişilerin ve ambulans dahil diğer araçların bulunduğu

bölgedir. Bu bölgeden kontrollü bölgeye personel ve ekipman geçişinde radyolojik izlemeye gerek duyulmazken, kontrollü bölgeden bu bölgeye geçişlerde radyolojik görüntüleme zorunludur.

c) Radyasyon Kazalarına Yönelik Saha Operasyonu

Kaza meydana geldikten sonra uygulanması gereken iş sağlığı ve güvenliği yönetmeliklerine uygun olarak yapılan saha operasyon planı genel hatları ile şu şekilde olmalıdır:

Bilgilendirme

- Yetkili makamlara, kolluk güçlerine ve hastaneye hızlıca haber verilmelidir [1].
- Halk uyarılmalıdır [1].

Keşif

- Kazasının gerçekleştiği sahaya dikkatle yaklaşılmalıdır [1].
- Radyasyon salınımı olup olmadığına dair ölçümler alınarak kontroller yapılmalıdır [72].
- Taşınan materyal içeriği özellikleri kontrol listesi ve taşıma belgesinden kontrol edilmelidir [96].
- Acil durum planı kontrol edilmelidir[1].

Kişisel Korunma

- Radyoaktif madde ortama yayılmışsa kesinlikle uzak durulmalıdır. Dökülen maddeye ve hasarlı kaplara çıplak elle dokunulmamalıdır [72].
- Koruyucu giysiler giyilmeli, kişisel dozimetre ve ölçüm cihazları kullanılmalıdır [72].

- Sakin olunmalı, çalışanlar kendilerini tehlikeye atacak hareketlerde bulunmamalıdır [1].
- Hayat kurtarmak dışında herhangi bir şey hareket ettirilmemelidir.
- Kontamine alanlarda radyoaktif madde alımına yol açabilecek yeme, içme, sigara içme, çiğneme veya diğer faaliyetlere izin verilmemelidir [72].

Aksiyon

- Güvenli mesafeler belirlenmelidir.
- Kontrol sahası bölgeleri uygulanmalıdır.
- Güvenli bir mesafede uyarı ve ikaz işaretleri, rüzgârın yönü de dikkate alınarak yerleştirilir [114].
- Kontrol sahasının zemin özellikleri değerlendirilmeli, kanalizasyon alt yapısı, su kanalları ve su kaynaklarının kirliliği taşımasını engellemek için saha alanına girişi ve çıkışı kontrol edilmelidir.
- Kazanın türü tanımlanarak, bulgular değerlendirilmelidir (yangın, patlama tehlikesi).
- Ateşleme kaynakları kapatılmalıdır. Ateşle kaza sahasına girilmemelidir. Yanıcı maddeler ortamdan uzaklaştırılmalıdır [1].
- Rüzgâr ile daha geniş alanlara yayılmasını engellemek adına muşamba, plastik tabaka gibi materyallerle dağılan malzemenin üstü kaplanabilir.
- Uzman temizleme ekibinin çeşitli nedenlerle gecikmesi durumunda, acilen harekete geçilmesi gerekiyorsa; az *miktardaki dökülmeler* için, kum veya yanmaz emici bir malzeme ile üzeri kapatılabilir. *Büyük dökülmelerde* ise bir hendek açılarak içine itip üzeri kapatılmaya çalışılır. Fakat büyük ölçekli taşıma kaplarında bunu uygulamak mümkün olmayabilir.

Kurtarma

- Kontamine olmuş personelin güvenli alana alarak, yetkililer gelinceye kadar güvenli alandan çıkmaları veya başka bir noktaya gitmeleri engellenmelidir.

- Kontamine olmuş kıyafetler, aletler etiketlenmeli ve izole edilmelidir [72].

- Yaralı olup olmadığı kontrol edilmelidir. Hayati tehlike taşıyan bir yaralanma söz konusu ise ilk yardım uygulanmalıdır. Hastaya yaşam desteği sağlanarak, kontaminasyon durumu kontrol edilmelidir. Kontaminasyon varsa kıyafetleri hızlıca çıkarılmalı ve bol su ile temizlenmeye çalışılmalıdır (UF6 bulaşmasında su kullanmak doğru değildir). Uygun bir şekilde yaralı olay yerinden uzaklaştırılmalıdır. Mümkünse hasta, kontrollü bölgeye girmemiş personel tarafından hastaneye taşınmalıdır. Ambulanslarda müdahalede bulunan personel KKD kullanmalıdır. Hastaneye ulaşılıncaya kadar, hasta yeme, içme, çiğneme, sigara içme faaliyetlerinde bulunmamalıdır [72].

7.3 Risk Değerlendirmesi

Risk Değerlendirmesi, çalışma ortamının yapısı gereği sahip olduğu veya dış ortamdan ya da olaylardan kaynaklanabilecek tehlikelerin belirlenmesini, incelemeye söz konusu tehlikelerin risk oluşturmasına yol açacak faktörler ve bu tehlikelerin taşıdığı birincil risklerin analiz edilerek sınıflandırılmasını ve riskleri ortadan kaldıracak tedbirlerin belirlenmesi amacı ile yapılan tüm çalışmaları ifade eder [1].

Günümüzde birçok faaliyet alanında risk değerlendirme aracılığı ile beklenmedik olaylar, kusurlar, kayıplar ve bunlara neden olacak herhangi bir faktör vuku bulmadan önce engellenebilmektedir. Risk değerlendirmesi amacı sadece olumsuzlukları engellemek değil, aynı zamanda yapılacak işin her aşamasında çalışanlara risk bulunmayan güvenli bir iş ortamında sağlıklı bir şekilde çalışmalarına olanak sağlamaktır [145].

Radyoaktif maddelerin kullanıldığı çalışma alanları taşıdıkları potansiyel tehlikeler, yüksek teknoloji ve karmaşık yapıya sahip olması, bu alanda yürütülen işlerin çok aşamalı

ve birbiri ile sıkı sıkıya bağlı olması nedeni ile risk analizi yapmak oldukça önemli ve gereklidir [146].

Radyoaktif maddelerin taşınması sırasında meydana gelebilecek bir kazanın vuku bulma olasılığı ve oluşmasını etkileyen faktörler, taşımada kullanılan taşıma cinsine göre değişiklik gösterebilir [147]. Bu çalışmada karayolu ile yapılan taşıma işlemi ele alınmıştır.

Radyoaktif maddelerin taşınması işlemi sırasında karşılaşılabilecek en büyük risk faktörü, gerçekleşen kaza sonrası, taşıma işleminde söz konusu olan radyoaktif materyalin ortama yayılmasıdır. Alınan güvenlik önlemleri ve kullanılan teknoloji göz önüne alındığında, böylesi bir kazanın gerçekleşme sıklığı oldukça düşüktür. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde son 25 yıl içerisinde kayıtlara 300 adet radyoaktif madde taşıma kazası geçmiştir. Bunlardan yüzde 30'luk kısmını medikal ve endüstriyel radyokimyasallar oluşturmaktadır. Ölümle sonuçlanan radyoaktif madde taşıma kazası kayıtlarda yer almazken, nükleer güç santrallerinde kullanılmak üzere gerçekleştirilen taşıma işlemlerinde herhangi bir salınım yaşanmamıştır [148].

Yapılan risk analizleri, taşıma deneyimleri, yüksek kalite taşıma kabı tasarımları, etkili yönetim ve organizasyon ile bu başarıya ulaşılmıştır. Radyoaktif maddelerin taşıdıkları tehlike ve insan üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, kaza risklerini değerlendirilmesi ve muhtemel tüm senaryolar göz önüne bulundurularak tehlikelerin en aza indirilmesi gereklidir. Taşıma işlemine yönelik risk analizi çok adımlı bir yaklaşım gerektirir. Genel olarak yapılan risk analizleri şu soruların cevaplarını vermelidir:

- Ne tür aksilikler meydana gelebilir?
- Gerçekleşme olasılıkları nelerdir?
- Bir şeyler ters giderse sonuçları ne olur?

Yukarıda verilen soruların cevaplarına ulaşırken uzman bir ekibin desteğinden faydalanmalıdır. Uzmanlar kazaya neden olabilecek etkenleri detaylı bir şekilde inceler. Geçmişte yapılan taşıma faaliyetlerini, her yıl ne kadar sıklıkta radyoaktif madde

taşımacılığı gerçekleştirildiği, meydana gelen kaza oranları, kullanılan kapların uygulanan testler karşısında gösterdikleri performans ve taşınan materyallerin sınıfı, içeriği ve diğer kayıtları toparlar. Ne kadar miktarda taşıma yapılacağı, mesafesi ve süresi, taşıma rotası (nüfus yoğunluğu, yol yapısı, trafik kazası verileri vb.), taşınacak malzemenin türü ve radyoaktiflik derecesi, paket ve etiket seçimi, paket yüzeyi ve konteyner yüzeyindeki radyasyon seviyesi, hava koşulları (şiddetli rüzgarla radyoaktif madde daha uzak noktalara taşınabilir veya hava koşulları kazaya sebebiyet verebilir) gibi unsurlar dikkate alınarak risk analizleri gerçekleştirilir.

Çeşitli simülasyon programları kullanılarak nakliyede kullanılan konteyner parçalarının çarpışma veya yangınlarda nasıl şekilde etkileneceğini tahmin edilmeye çalışılır. Taşınan radyoaktif maddenin belirli bir kaza türünde nasıl tepki vereceği analiz edilir. Uzun süreli bir yangın sırasında fıçıların ve içeriğinin sıcaklığı hesaplatılır [Bkz. Taşıma Kapları Tasarım]. Bu bilgiler ile uzmanlar potansiyel bir radyasyon sızıntısının boyutunu ve ne kadar nükleer maddenin salınabileceğini tahmin etmeye çalışırlar.

Taşıma sırasında, radyoaktif maddelerin içinde bulunduğu koruma kaplarında meydana gelen kaçak ya da açılma sonucu çalışanlar, halk ve çevre radyoaktiviteye maruz kalabilir. Çeşitli faktörlerin etkisiyle ortaya çıkan kazalar, zırhlama hatası, zırhlama malzemesinin dayanıklılığı ve direnci, taşımaya söz konusu materyallerin tepkime vermesi veya dış etkenlerden kaynaklanan darbeler koruma kaplarında hasar yaratan başlıca sebeplerdir [148]. Burada taşıma için kullanılan paketlerin tasarımı ve üretimi radyoaktivite salınımı konusunda önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada olası bir radyoaktif madde salınımı kazasına neden olabilecek etkenler **Hata Ağacı Analiz** yöntemi ile incelenecektir. Radyoaktif maddelerin taşınmasında risk analizinin temel amacı kazanın gerçekleşme olasılığını en aza indirmektir. Bu şekilde herhangi bir salınım söz konusu olmayacak ve çalışanlar, toplum ve çevre radyasyonun zararlı etkilerinden korunmuş olacaktır.

7.4 Hata Ağacı Analizi (FTA)

Hata Ağacı Analizi, bir sistemdeki olası olayların kombinasyonları ile hatalar ve sistem arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını sağlayan ve istenmeyen durumlar arasındaki bağlantıları ifade eden sistematik ve grafiksel bir risk analizi yöntemidir. Bu analiz yöntemi genellikle mevcut sistemin güvenirliğini ve güvenliğini artırmak ve kaza olasılıklarını araştırmak için kullanılır [149].

Hata Ağacı Analizi ilk olarak 1962 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Bell Laboratuvarlarında füze fırlatma sitemlerinin güvenlik kontrolünü geliştirmek üzere kullanılmaya başlanmıştır [150]. 1975 yılında Amerika'da Nükleer Güvenlik analizlerinde kullanılmaya başlandı. 1979 yılında gerçekleşen Three Mile Island Nükleer Güç Santrali kazasının ardından önemi giderek artmaya başladı [151]. Günümüzde birçok farklı mühendislik alanında sitem güvenirliği analizlerinde kullanılmaktadır.

Hata ağacı analizi yöntemi ile yapılan çalışmalarda genel olarak dört ana aşama takip edilmektedir. Bunlar; sistemin tanımlanması, hata ağacının oluşturulması, nitel ve nicel değerlendirme aşamalarıdır [152].

7.5 Yüksek Radyoaktif Maddelerin Taşınmasında Hata Ağacı Analiz Yönteminin Uygulanması

7.5.1 Metot

Çalışmada önerilen Hata Ağacı Analizi beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada ortaya çıktığında en büyük tehlikeye neden olacak istenmeyen esas olay belirlenir. Burada amaç, bu olaya neden olacak faktörleri belirleyerek istenmeyen durumun ortaya çıkmasını engellemektir. İkinci aşamada ise, esas olayın ortaya çıkmasına neden olacak hatalı durumlar ve faktörler belirlenir. Üçüncü aşamada hata ağacı sembolleri kullanılarak bu durum ve faktörler hata ağacına alt alta ilişkilendirilerek yerleştirilir. Dördüncü aşamada Boolen Matematiği kullanılarak olasılık hesabı mevcut istatistiklere göre hesaplanır. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar değerlendirilir. Buna göre, inşa edilen hata ağacında yer

alan hatalı durum ve faktörler göz önünde bulundurularak, sistemin eniyilemesi yapılır. Hangi alanlarda güvenlik tedbirleri alınması gerektiği, zayıf ve eksik noktalar ve potansiyel hatalar saptanır. Önerilen algoritma aşağıda verilmiştir.

Aşama 1: İstenilmeyen esas olayı belirle

Adım 1: Ne tür aksilikler meydana gelebilir?

Mevcut sistemde ortaya çıkması halinde en büyük aksiliklere neden olacak olay seçilir.

Adım 2: Gerçekleşme olasılığı nedir?

Gerçekleşme sıklığı esas olayın belirlenmesinde etkilidir.

Adım 3: Bir şeyler ters giderse sonuç ne olur?

Herhangi bir kaza ya da hata sonucu ortaya çıkması halinde neden olacağı sonuçlar açısından en tehlikeli olay seçilir.

Aşama 2: Esas olayın ortaya çıkmasına neden olan durum ve faktörlerin belirlenmesi

İstenmeyen olayın ortaya çıkmasını etkileyen hatalar ve kaza nedenleri araştırılır. Mevcut kazalardan elde edilen bilgilerden faydalanılır. Potansiyel faktörler değerlendirilir.

Aşama 3: Hata ağacı sembolleri kullanılarak hata ağacını inşa edilmesi

Elde edilen hatalı durum ve faktörler Tablo ‘de verilen semboller kullanılarak hata ağacı inşa edilir.

Aşama 4: Boolen Matematiği ile olasılık hesabı

Boolen Matematiği esasına dayalı olasılık hesabı gerçekleştirilir.

Aşama 5: Sonuçların değerlendirilmesi

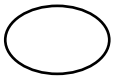
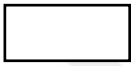
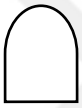
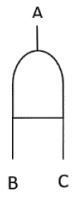
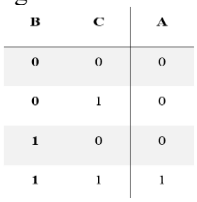
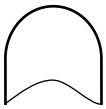
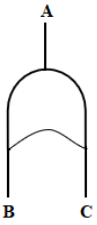
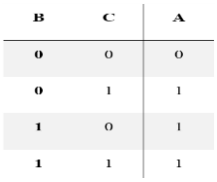
Elde edilen sonuçlar neticesinde sistem güvenirliği tanımlanır, istenmeyen esas olaya etki eden karmaşık ve sistematik olumsuzluklar ve birbirleri ile olan ilişkileri değerlendirilir. Sistemi etkileyecek tehlikeler sıralanır ve bunların azaltılmasına yönelik önlemler planlanır. İlerleyen süreçte yapılan iyileştirmeler tekrar aynı yöntem yenilenerek incelenebilir.

7.5.2 Uygulama

Yaratacağı etki açısından en ciddi sonuçlara neden olacak durum ana başlık olarak seçilir [153]. Bu tez çalışmasında radyoaktif madde salınımı ana başlık olarak seçilmiştir. Risk derecesi en yüksek olan olaya yol açabilecek olay dizileri ayrı ayrı ya da kombinasyon halinde ilişkilendirilerek bir hata ağacı oluşturulur. Bu yaklaşım, sistemdeki ve insan kaynaklı hata ve arızaların ilişkilendirilmesini sağlar. Birden fazla ana başlık bir arada incelenemez [152].

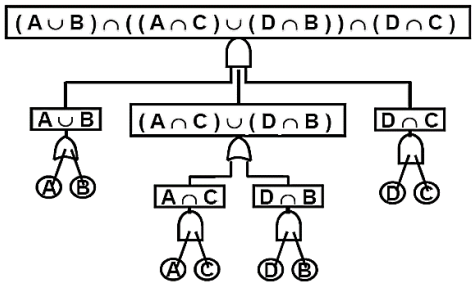
Ana başlık ve bu duruma neden olan risk faktörleri seçildikten sonra hata ağacı inşa edilir. Bu çalışmada kullanılan Hata Ağacı analizinde kullanılan semboller Tablo 7.1 de verilmiştir [152].

Tablo 7.1 Hata ağacı analizinde kullanılan semboller

<table>
<tr><th>Sembol</th><th colspan="3">Tanım</th></tr>
<tr><td></td><td colspan="3">Esas olay</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="3">Koşula bağlı olay</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="3">Belirli unsurların ortaya çıkması sonucu gerçekleşen olay</td></tr>
<tr><td></td><td>VE kapısı</td><td></td><td>A = B.C
Doğrulama Tablosu
</td></tr>
<tr><td></td><td>VEYA kapısı</td><td></td><td>A = B+C
Doğrulama Tablosu
</td></tr>
</table>

Risk faktörlerinin sebeplerini öğrenebilmek için bu faktörler Boolen Cebir'i (Şekil 7.4) giriş kapıları **"VE"** ve **"VEYA"** ile birbirine bağlanır Uygulanan matematiksel hesaplama Eşitlik (1) ve (2)' de verilmiştir. **"VE"** geçidi bağlı risk faktörlerinin hepsinin ortaya çıkması halinde olayın gerçekleşeceği anlamına gelir. **"VEYA"** geçidi ise bağlı nedenlerden herhangi biri meydana gelirse olayın gerçekleşeceği anlamına gelir. Risk yönetimi yapılarak sistem güçlendirilecek yöntemler bulunmaya çalışılır. Bu aşamada sistemi etkileyen tüm faktörler tanımlanır. Son olarak, sisteme dolaylı veya doğrudan etki

eden tehlikeli faktörleri ortadan kaldırmak veya etkilerini azaltabilmek için uygun yöntemler belirlenir [152].



Şekil 7.4 Boolen Matematiği çizelgesi

Hata ağacı analiz yöntemi olayların, hataların ve olayı etkileyen unsurların sayısal değerleri ele alındığında kantitatif risk çözümlemesi yapabilme imkânı da sağlamaktadır. Bu şekilde belirlenen risk ihtimallerini sayısal olarak hesaplanabilmektedir [84]. Yapılan bu hesaplamalarda Denklem 7.3 ve 7.4'te verilen formüller kullanılır.

$$(A \cup B) \cap ((A \cap C) \cup (D \cap B)) \cap (D \cap C) = (A+B)*(A*C+D*B)*D*C \quad \textbf{(7.3)}$$

$$=AACDC+ADBDC+BACDC+BDBDC$$

$$=ACD+ABCD+ABCD+BCD$$

$$=ACD+BCD$$

$$\left[\begin{array}{l} A + A = A,\ A*A = A \\ (A*B) + A = A,\ (A+B)*B = B \end{array}\right] \quad \textbf{(7.4)}$$

Hata ağacında her bir ara faktörün ortaya çıkma ihtimali bir üste yer alan olayın gerçekleşme ihtimaline etken olur. Olayların gerçekleşme sıklığı gerçekleşme ihtimalini belirler. Hata ağacının dallarını oluşturan her bir vakanın gerçekleşme olasılığı çok daha düşük olabileceğinden ve söz konusu olayın gerçekleşmesine etki edecek tüm faktörler ele alınamadığından, bir olayın toplam vaka sayısına bölünerek olasılık hesaplaması tercih

edilmemiştir. Bu tez çalışmasında sistem güvenirliği için Dizdar EN. (2003) tarafından hata ağacı analizini uyguladığı çalışmasında Tablo 7.2'de verilen olasılık ölçeği kullanılmıştır [154]. Aynı zamanda Türkiye İstatistik Kurumu'nun yayınlandığı 2018 trafik kazası verilerinden faydalanılmıştır [155]. Fakat Türkiye'de bu tez çalışması yapıldığı tarihte, nükleer teknoloji alanında gerçekleştirilen, nükleer santral kaynaklı yüksek radyoaktif madde taşımacılığı yapılmadığından yeterli istatistiki veri mevcut değildir. Bu nedenle OSHA tehlike kökü tanımlamalarından faydalanılmıştır [156]. Ek olarak Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından 2016 yılında hazırlanan A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel raporunda dünya genelinde yer alan taşıma kaza örneklerindeki kaza sebepleri ve Easton AP, Bajwa CS. (2010) tarafından 1975-2005 yılları arasında meydana gelen radyoaktif madde taşıyan tren kazalarında taşıma kapları kaynaklı olaylar referans alınmıştır [127,147].

Yönetsel etkenlerde, tasarım ve lojistik faaliyetleri aşamalarında insan kaynaklı ortaya çıkan en küçük hata direkt olarak tüm lojistik faaliyetlerini ve olayın kaza ile sonuçlanmasını etkiler. Çalışanların yaş ve deneyim süreleri de bu süreçte değişikliğe neden olabilir. [157**]**. Bu çalışmada yönetsel ve personel kaynaklı hataların maksimum iyileştirilmiş hali düşünülerek olasılık hesabı yapılmıştır. Maksimum düzeyde iyileştirilmiş sistemde insan kaynaklı her bir faktör oldukça nadir olarak seçilmiştir.

Tablo 7.2 Olasılık ölçeği

Gerçekleşme Olasılığı	**Gerçekleşme Frekansı**
Her 10 olayda 1	Çok sık
Her 100 olayda 1	Sık
Her 1000 olayda 1	Seyrek
Her 10000 olayda 1	Çok az
Her 100000 olayda 1	Nadiren
Her 1 milyon olayda 1	Oldukça nadiren

Hata ağacında yer alan diğer unsurlarda eniyileme yapıldığı düşünülerek oldukça nadir olarak seçilmiştir.

TÜİK 2018 verilerine göre, Türkiye'de mevcut kayıtlı araç sayısı yaklaşık olarak 23 milyondur. Aynı yıl yaklaşık olarak 1,23 milyon kaza meydana gelmiştir. Günlük ortalama 3370 civarında kaza gerçekleşmiştir [155]. Bu kazalar genel olarak sürücü, yaya, taşıt ve yol kaynaklı gerçekleşmiştir. Büyük çoğunluğu araca yandan çarpma, aracın yoldan çıkması, sabit cisme çarpma, karşılıklı çarpışma, duraç araca çarpma, insan ya da hayvana çarpma gibi olaylardır [158]. Kayıtlı araçların aktif olarak aynı gün trafiğe çıktığını düşünürsek herhangi bir trafik kazasının gerçekleşme olasılığı 0.00014'tür. Bu değer bir aracın trafik kazasına dahil olabilmesinin en yüksek ihtimali olarak belirlenmiştir.

2018 yılında gerçekleşen kazaların %75'i yerleşim bölgelerinde gerçekleşmiştir [159]. Yüksek radyoaktif maddelerin taşınması işlemleri nükleer tesisler ve depolama merkezleri arasında gerçekleştirildiğinden, taşıma işlemi genellikle yerleşim alanlarına uzak bölgelerde yapılmaktadır. Buna göre mevcut kaza ihtimalinin %25'i yüksek radyoaktif madde lojistik faaliyetinde bulunan bir aracın kazaya karışma olasılığı verir ve bu değer 0,000035'tir. Bütün kayıtlı araçların aynı saat aralığında trafikte olmaması, radyoaktif maddelerin taşınmasında kullanılacak rotaların düşük trafik yoğunluğuna sahip olması gibi faktörler çarpışma ile sonuçlanan bir trafik kazası (radyoaktif madde taşıyan aracın dahil olduğu) gerçekleşme ihtimalini daha da düşürecektir.

7.5.3 Bulgular

Hata Ağacı Analizi yöntemi ile, karayolu ile gerçekleştirilen yüksek radyoaktif maddelerin taşınması sırasında muhtemel bir kazanın önüne geçilmek ve bu kazadan ötürü radyoaktif salınımı engelleyerek çalışanlar, toplum ve çevrenin radyasyonun zararlı etkilerinden koruyabilmek için kazaya neden olabilecek olasılıkların kombinasyonları belirlenerek analiz edildi. Gerekli literatür çalışması yapıldıktan sonra, dünya genelinde uygulanan taşıma standartları ve kuralları göz önünde bulundurularak, uluslararası ve

ulusal yönetmelikler ve tavsiyeler ışığında, olası bir taşıma kazasına neden olabilecek faktörler belirlenerek hata ağacı şeması oluşturuldu. Birbiri ile ilişkili ya da zincirleme olarak gerçekleşecek durumlar ağaç dallarını oluşturacak şekilde sıralandı.

İlk olarak, olası bir radyoaktif salınıma neden olacak ana başlıklar (kök nedenler) belirlendi. Bunlar **trafik kazası** ve **taşıma kapları** olarak iki ana neden seçildi. Ardından trafik kazası başlığında, trafik kazasına ve bunun sonucunda taşıma kaplarının darbe alarak radyasyon yayılımına neden olan faktörler sıralandı. Taşıma kapları başlığı altına ise trafik kazası haricinde taşıma kaplarından direkt kaynaklanabilecek faktörler sıralandı.

Trafik kazası

Trafik kazasına neden olacak faktörler; **yönetimsel etkenler, sistemsel etkenler, personel faktörü** ve **dış etkenler** olarak dört ana başlık halinde sıralandı. Belirlenen bu faktörler, vakanın doğrudan nedeni olarak (birincil neden) belirlenmiştir. Daha sonra, aynı ilk nedene sahip ara faktörler gruplandırılarak hata ağacı dalları oluşturuldu. Ara faktörler, bu faktörlerin neden birincil faktöre bağlı olarak çıktığını belirleyerek tanımlandı. Olası bütün faktörler, ilişkili olduğu birinci nedenlerin altında gruplandırıldı. Yapılan bu gruplandırmalar açıklamalarıyla birlikte Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3 Hata ağacı analizinde trafik kazasına neden olan ana ve ara faktörler

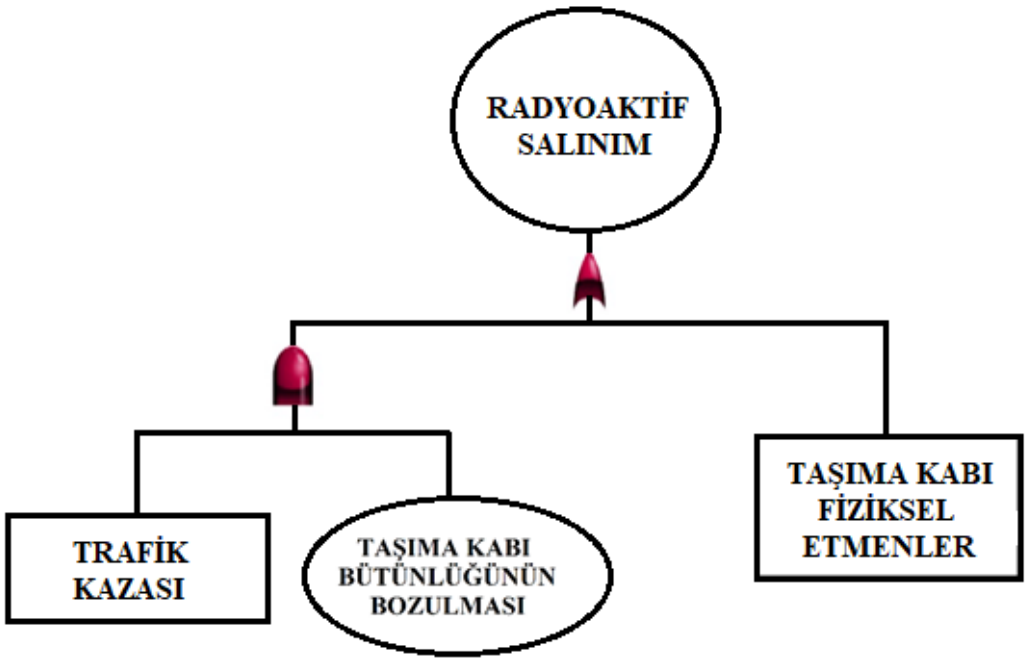
Ana Faktör	Ara Faktör	Tanımı
Sistemsel Etkenler	Araç sistem yangınları	Elektrik devreleri, motor, egzoz gibi araç donanımlarında yangın ortaya çıkması.
	Araç lastiklerinin zarar görmesi	Araç lastiklerinin patlaması, parçalanması aracın kontrolden çıkmasına neden olabilir.
	Aracın arızalanması	Araçta ortaya çıkan beklenmedik ani bir arıza sonucu aracın kontrolden çıkması.
	Güvenlik takip, alarm ve ikaz cihazlarının eksikliği	Radyasyon seviyesi ölçüm ve ikaz cihazları gibi güvenlik takip, alarm ve ikaz cihazları eksikliği veya bozuk olması
Dış Etkenler	Tehlikeli çalışma alanı	Çalışma koşullarından kaynaklı kazalar.
	Altyapı yetersizliği	Görev için kullanılan yolda mevcut olan alt yapı yetersizliği.
	Yangın, Patlama	Dış etkenlerden ötürü kaynaklanan, beklenmedik yangın veya patlama durumu. Örneğin, sigara izmariti, ısınan tekerleklerin neden olduğu yangın başlangıçları.
	Çarpışma	Seyir halindeyken, akan trafikte bulunan diğer araçların neden olduğu çarpışma kazaları.
	Doğal Afet	Deprem, heyelan, sel gibi beklenmedik ve ani gerçekleşen doğal afetlerin neden olabileceği kazalar.
	Tehlikeli çalışma alanı	Çalışma koşullarından kaynaklı kazalar.
Personel Faktörü	Uygunsuz pozisyon	Görev için radyoaktif madde dolu fıçıların doğru pozisyonlarda yerleştirilmemesi, kaza veya hataya sebebiyet verecek uygunsuz istifleme yapılması.
	Prosedürlere uyulmaması, Sorumsuzluk, Yanlış karar alma	Görev için belirlenen prosedürlere uyulmaması ve kendi başına karar alınması. Olası acil ya da ani gelişen bir olay sırasında yanlış karar alma ya da süreci yönetememe.
	Kontrol Hataları	Sevkiyat öncesi ambalajların kontrol edilmemesi veya ambalajlama hataları, yükün çekici üzerine sabitlenmemesi, kontrolünün yapılmaması Taşımaya söz konusu olan radyoaktif maddelerin bilgilerini içeren etiketlerin doğru olarak yapılmaması. Birbiri ile reaksiyona girebilecek farklı maddelerin bir arada taşınması. Taşıma aracının genel bakım kontrollerinin yapılmaması

Tablo 7.3 (Devam) Hata ağacı analizinde trafik kazasına neden olan ana ve ara faktörler

Personel Faktörü (Devamı)	Hız	Aracın yönetmeliklerde belirlenen hız limitlerinin dışında kullanılması.
	İletişimsizlik	Diğer çalışanlar ve amirlerle etkili bir iletişim kurulamaması
	Ani gelişen sağlık problemleri	Sürücünün yaşadığı sağlık problemlerinden (kalp krizi, sara krizi) kaynaklı araç kontrolünü kaybetmesi
Yönetsel Etkenler	Yetersiz sayıda personel	Görev sırasında uygun sayıda personelin bulunmaması. Gözlemci bulundurulmaması.
	Donanımsız personel	Uygun eğitim ve deneyime sahip olmayan personel çalıştırılması.
	Hatalı yol haritası	Kaza riski yüksek, yoğun trafiği bulunan, yerleşim alanları içine girilen, engebeli ve hasarlı bir yol güzergahının belirlenmesi.
	Koordinasyon eksikliği	Ekip organizasyonu, çalışma saatleri, iletişim ağı gibi kontrol mekanizmalarının gerektiği gibi yapılmaması.
	Kişisel koruyucu ekipman	Yeterli miktarda ve kalitede, yapılacak işe uygun kişisel koruyucu ekipmanların, özellikle kişisel dozimetre ve radyasyon ölçüm cihazlarının sağlanmaması sonucu çalışan personelin zarar görerek trafik kazasına sebebiyet vermesi
	Hatalı araç seçimi	Taşımaya söz konusu materyalin gerektirdiği araçların taşımada kullanılmaması, yükün ağır gelmesi, fıçıları sabit tutacak donanıma sahip olmaması.
	Periyodik Kontroller	Taşımada kullanılan fıçı ve konteynerlerin, araçların periyodik kontrollerinin düzenli şekilde yapılmaması.
	Mühendislik kontrol eksikliği	Radyoaktif maddelerin taşınması için kullanılacak kapların ve fıçıların güvenlik kontrollerinin yapılmaması ya da yetersiz yapılması, üretim ve kullanım aşamalarında kontrollerinin yapılmaması.
	Hatalı veya eksik risk analizi	Güvenliğin ana unsuru olan risk analizlerinin hatalı, eksik veya acele ile yapılması sonucu bazı risk faktörlerinin değerlendirilmemesi ya da gerekli güvenlik önlemlerinin alınmaması.
	Yetersiz denetim	Personeller tarafından yürütülen paketleme, etiketleme, paket yükleme gibi taşıma aşamalarının yetkili bir uzman tarafından denetlenmemesi ya da gerekli özenin gösterilmemesi.

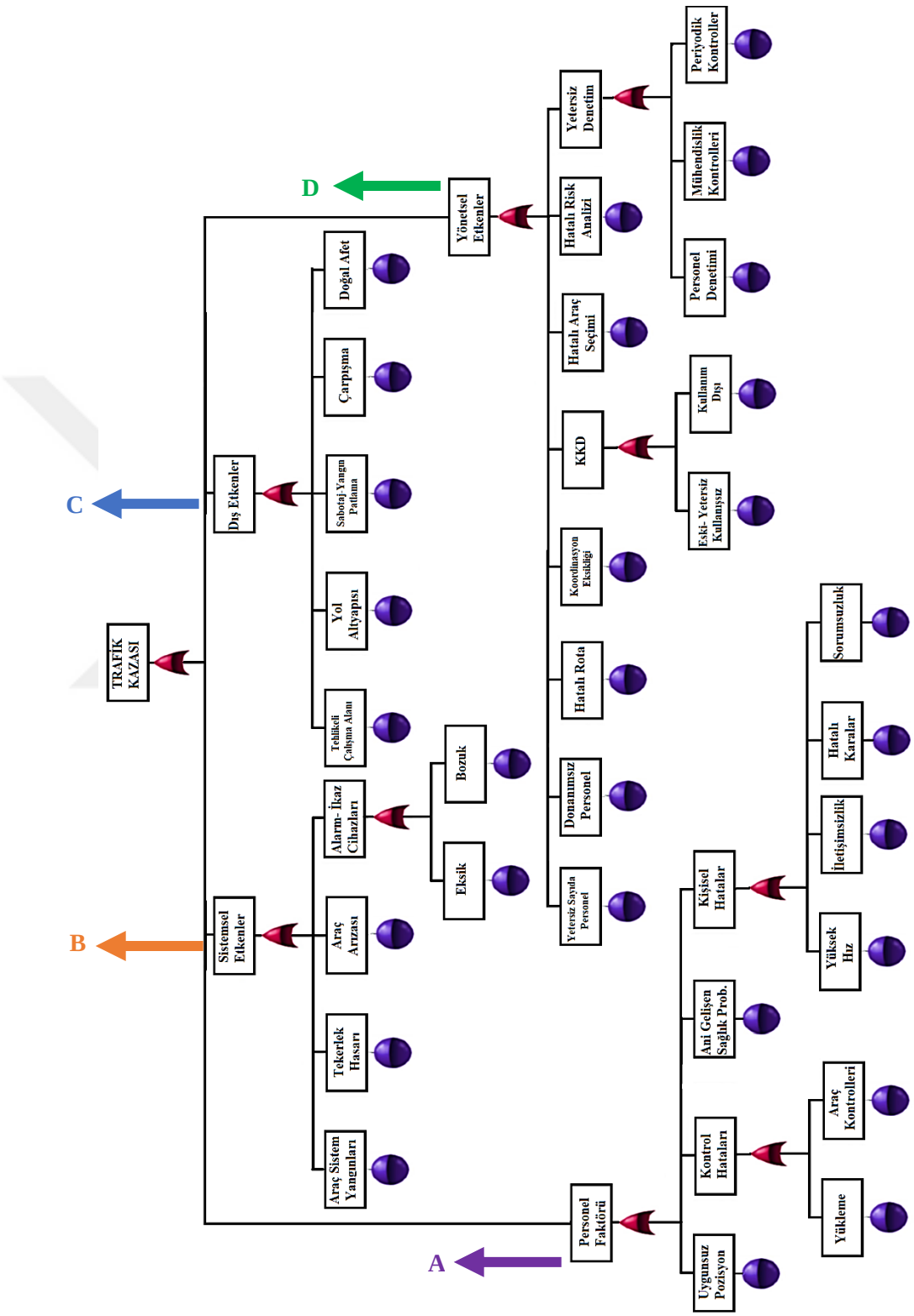
Tabloda verilen ana ve ara faktörler bir trafik kazasına, vuku bulan trafik kazası da kargo fıçılarının zarar görmesine ve radyoaktif maddelerin dış ortama salınmasına neden olabilir. Trafik kazası sonrasında fıçılar direkt darbe alarak çatlayabilir veya açılabilir ya da kaza sonucu meydana gelen yangından etkilenerek zarar görebilir. Her trafik kazasında radyasyon salınımı söz konusu olmayabilir. Radyasyon salınımının olabilmesi için taşıma kaplarının zarar görmesi ya da kapaklarının açılması gerekir.

Yüksek radyoaktif maddelerin taşınması sırasında meydana gelebilecek radyasyon salınımı; çarpışma, doğal afet gibi etkenlerden kaynaklanan trafik kazası sonucu veya taşıma kaplarının tasarım veya yükleme aşamalarındaki hatalar, ya da termal değişim gibi faktörlerden kaynaklı gerçekleşebilir. Radyoaktif madde taşımacılığında hata ağacı analizinin ana faktörleri Şekil 7.5'de verilmiştir. Tüm ana ve ara faktörleri hata ağacında birlikte göstermek zor olacağından, ana faktörleri oluşturan ara faktörler ilerleyen görsellerde detaylı olarak verilmiştir.

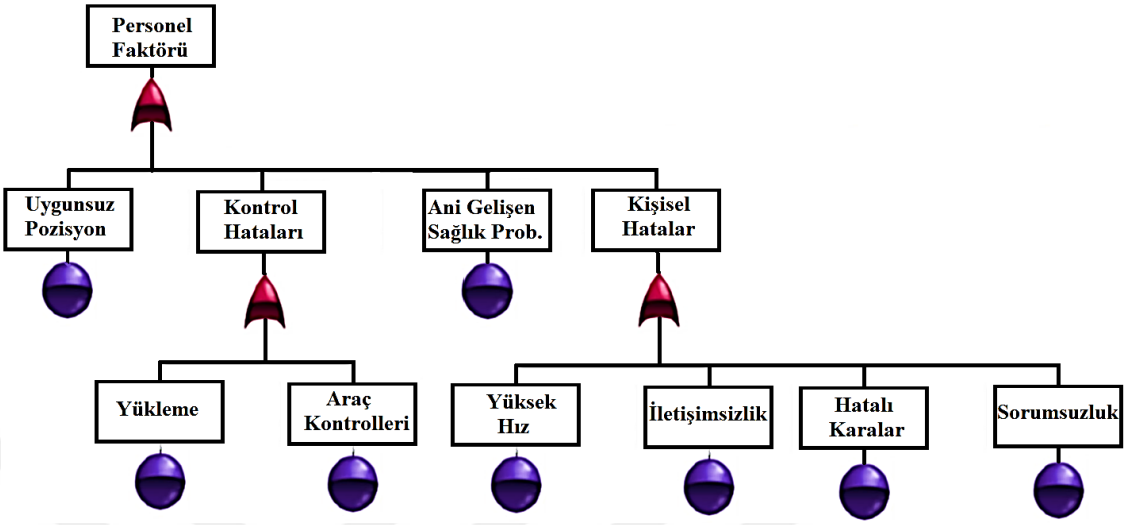


Şekil 7.5 Radyoaktif taşıma kazası hata ağacı

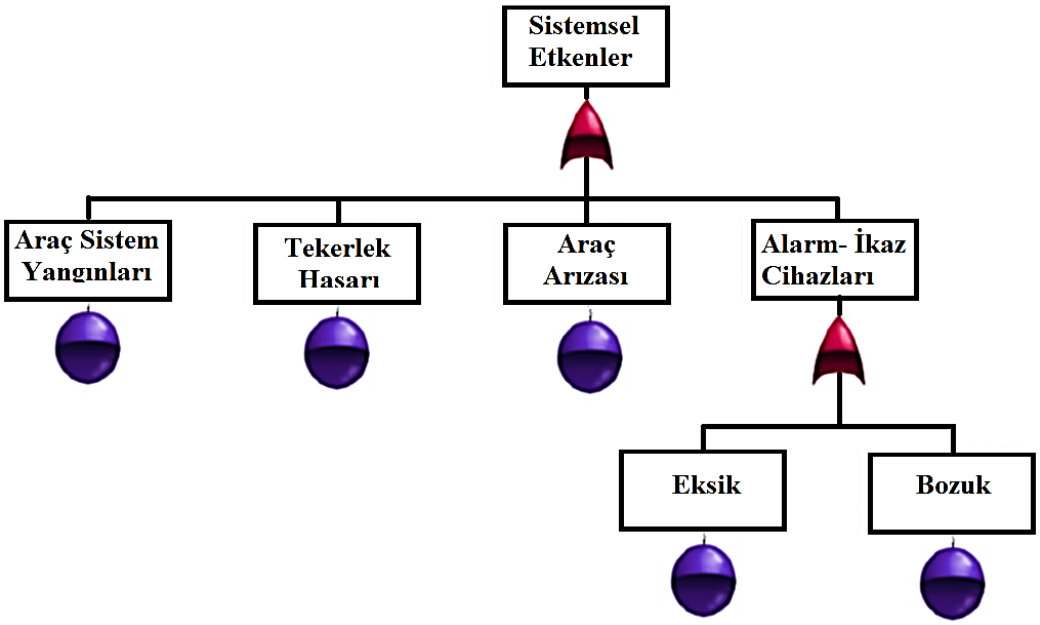
Radyoaktif madde salınımına neden olacak ana olaylardan ilki trafik kazası ile taşıma kaplarının bütünlüğünün bozulmasıdır. Radyoaktif madde taşımada Şekil 7.6'da verildiği gibi çeşitli faktörlerin etkisi ile trafik kazası meydana gelebilir. Bu faktörleri oluşturan ara faktörler Şekil 7.6'da A,B,C ve D kesitlerine ayrılarak Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10' da detaylı olarak verilmiştir. Her trafik kazası radyasyon salınımına sebebiyet vermez. Herhangi bir trafik kazasında radyoaktif madde salınımı olabilmesi taşıma kaplarının bütünlüğünün bozulması koşuluna bağlıdır. Radyasyon salınımı olabilmesi için taşıma fıçıları ve zırh malzemelerinin de zarar görmesi gerekir. Trafik kazası için belirlenen olasılık, radyasyon salınımının gerçekleşme ihtimalini artıran bir değerdir.



Şekil 7.6 Hata ağacı trafik kazası ara kesit

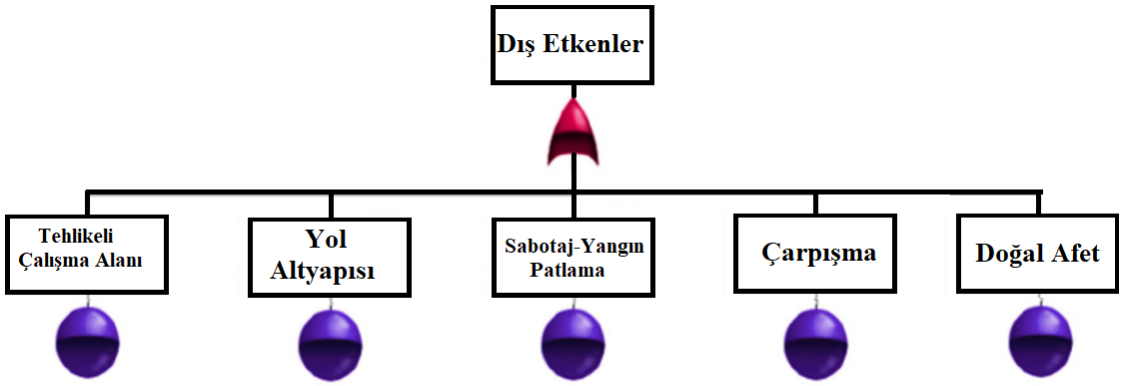


Şekil 7.7 A- Hata ağacı trafik kazası- personel faktörü

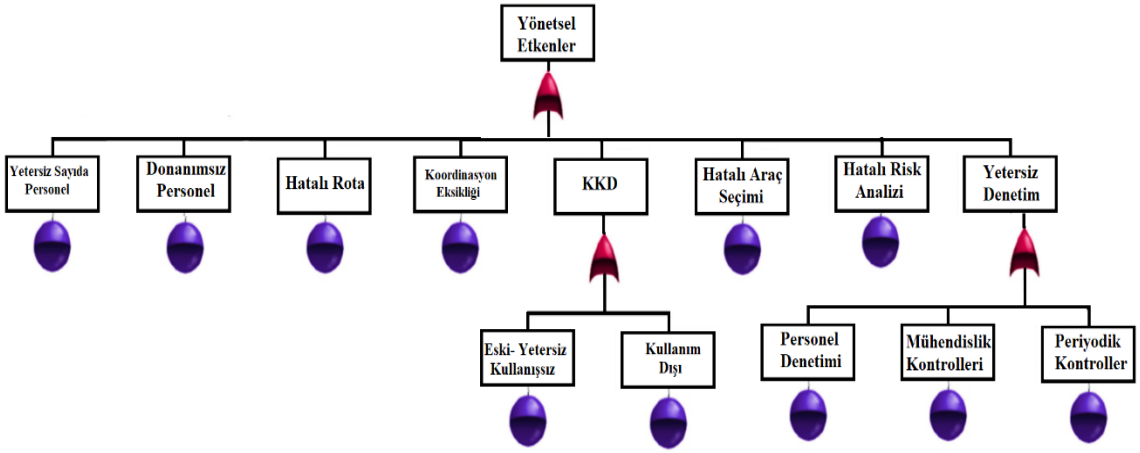


Şekil 7.8 B- Hata ağacı trafik kazası- sistemsel etkenler

Hata ağacında taşıma kazasında insan faktörü (Şekil 7.7, 7.10), diğer araç ve gereçler ya da doğal koşulların ortaya çıkaracağı etkilerden daha geniş yer kaplamaktadır. Bu faktörlerden kaynaklı hatalar direkt sistemi etkileyebilir.



Şekil 7.9 C- Hata ağacı trafik kazası- dış etkenler



Şekil 7.10 D- Hata ağacı trafik kazası- yönetsel etkenler

Taşıma Kaplarında Fiziksel Etmenler

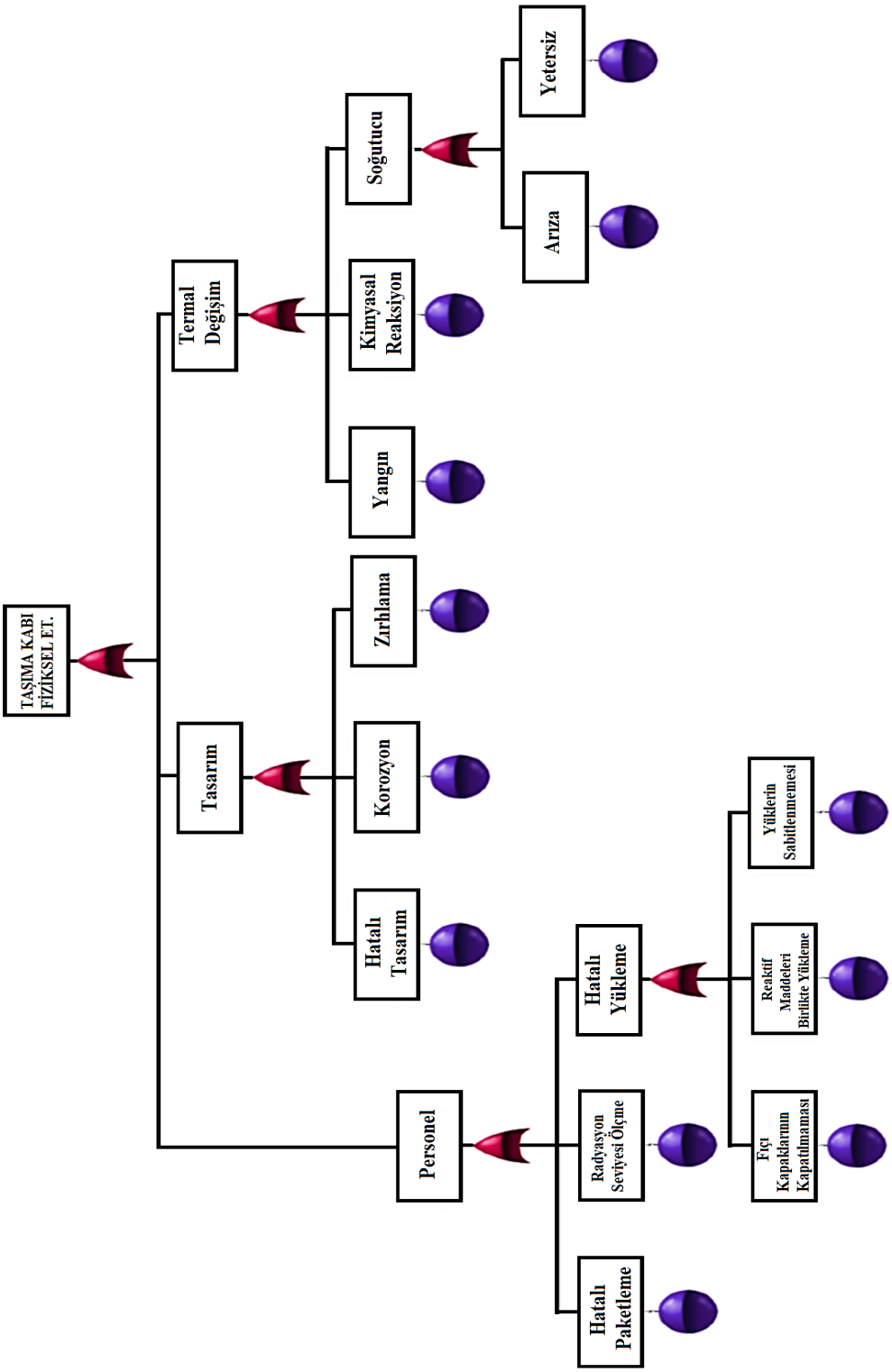
Taşıma kapları, radyoaktif maddelerin salınımın gerçekleşmesini engellemek üzere tasarlanır. Bu durum lojistik işlemlerinin en önemli aşamasıdır. Taşınacak malzemenin sınıfına uygun, olası kazaların şiddetine veya yangına dayanaklı şekilde tasarlanmış kaplar, radyasyon salınımının en etkili zırhıdır. Tasarlama aşamasında yapılan hatalar (Tablo 7.4), zamanla kapların zarar görmesi ya da personel dikkatsizliklerinden kaynaklanan fiziki hatalar, taşıma kaplarından direkt radyasyon salınımına veya radyoaktif maddelerin dış

ortalama yayılmasına neden olabilir. Bu etkenlerin hata ağacındaki yerleri Şekil 7.11'de verilmiştir.

Seyir halindeki araçta dış etkenlerden kaynaklı meydana gelen yangın ya da soğutucuların çalışmaması veya radyoaktif maddelerden kaynaklı reaksiyonlar fıçıların erimesine, sıcaklıktan dolayı söz konusu materyalin tepkimeye girmesine veya basınç artığı için patlamasına neden olabilir. Termal değişim basınçta da değişime neden olacaktır.[16]

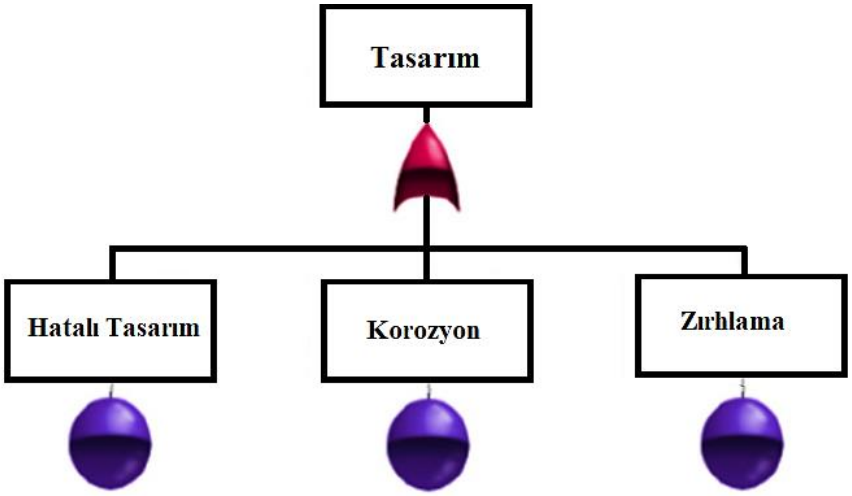
Tablo 7.4 Hata ağacı analizinde taşıma kaplarından direkt radyasyon salınımı etkileyen ana ve ara fiziki faktörler

Ana Faktör	Ara Faktör	Tanımı
Termal Değişim	Yangın	Dış etkenlerden kaynaklı yangın sonucu sıcaklık değişimi
	Radyoaktif maddelerden kaynaklanan fiziksel veya kimyasal reaksiyonlar	Radyolojik reaksiyona ya da sıcaklık artışına bağlı olarak saklama kapları içerisinde basınç seviyesinin yükselmesi. Yüksek basınç nedeni ile kaplarda patlama, çatlama veya kırılma gerçekleşmesi.
	Soğutucu	Soğutucu kaybı veya yetersizliği
Tasarım	Hatalı Tasarım	Standartlara uymayan, eksik, kalitesiz, yetersiz veya dayanıksız tasarım
	Korozyon	Taşıma kaplarının iç kısmında oluşacak korozyon sonucu kapların delinmesi, kırılması ya da çatlaması
	Zırhlama	Yetersiz zırhlama ya da hiç zırhlama yapılmaması
Personel Faktörü	Araçlara hatalı yükleme	Taşıma kaplarının ağızlarının kapatılmaması veya gevşek kapatılması
	Radyasyon Seviyesi Ölçümünün Yapılmaması	Taşıma kaplarının yüzeyinde ve araç çevresinde radyasyon seviyesinin ölçülmemesi sonucu, hatalı yükleme veya hatalı paket kullanımının anlaşılamaması
	Hatalı paket	Boş sanılarak içerisinde radyoaktif madde olan paketlerin açık ve güvenlik önlemleri alınmadan taşınması

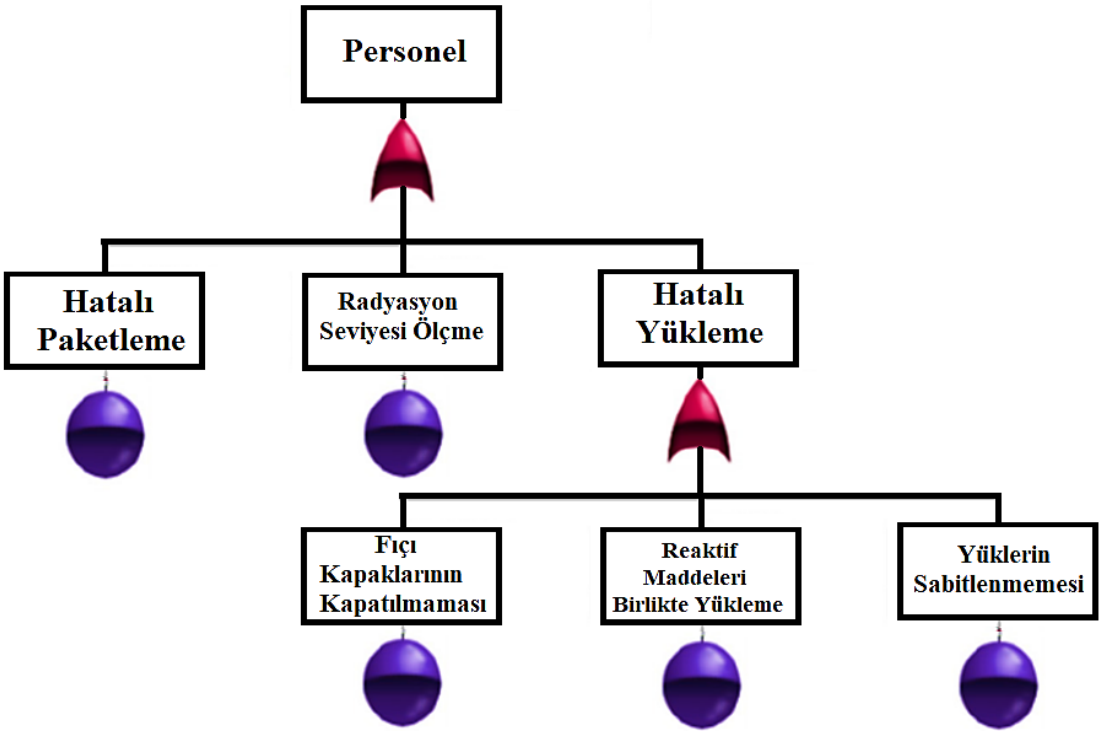


Şekil 7.11 Hata ağacı taşıma kabı fiziksel etmenler ara kesit

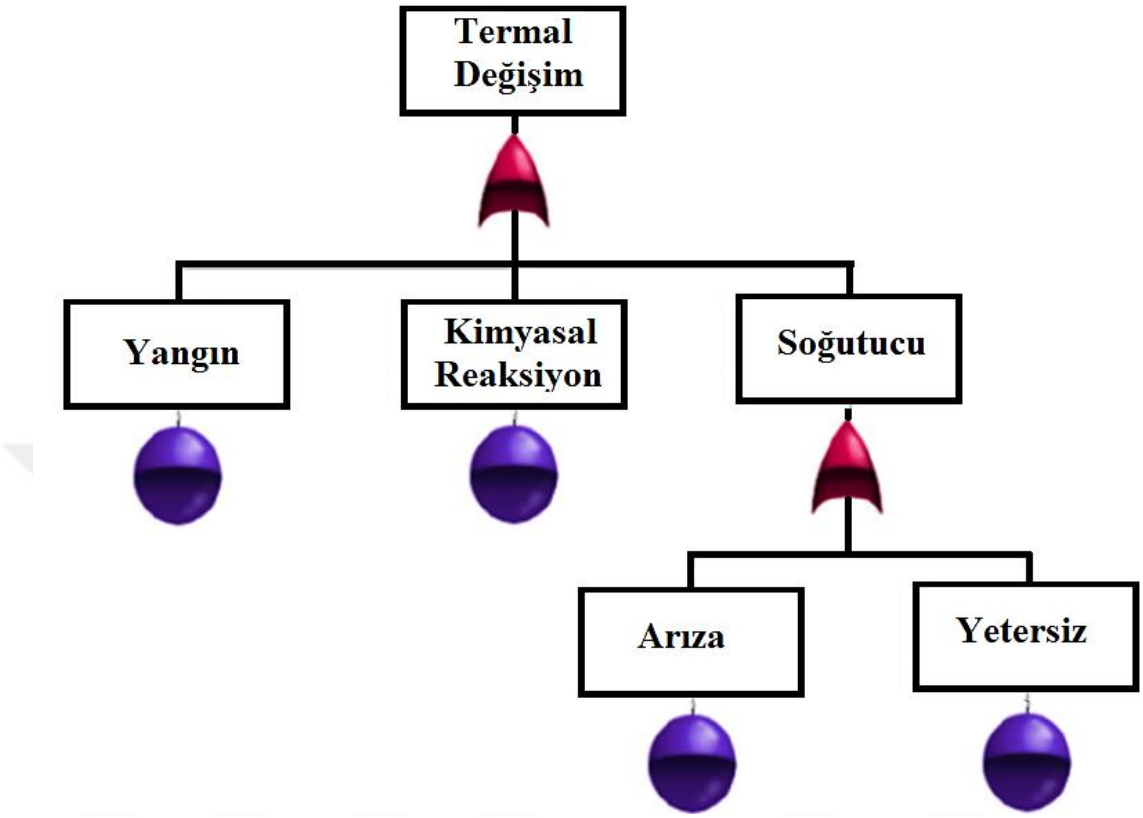
Taşıma kaplarında direkt olarak radyasyon salınımına neden olacak fiziksel etmenleri oluşturan alt başlık detaylı olarak Şekil 7.12, Şekil 7,13 ve Şekil 7,14 ‘de verilmiştir.



Şekil 7.12 Hata ağacı taşıma kabı- tasarım faktörü



Şekil 7.13 Hata ağacı trafik kazası- personel faktörü



Şekil 7.14 Hata ağacı trafik kazası- termal değişim

Hata ağacı analizi sonucunda kullanılan verilere göre yaklaşık olarak elde edilen radyasyon salınımı olasılığı Tablo 7.5'de verilmiştir.

Tablo 7.5 Hata ağacı analizi sonucu elde edilen olasılık değerleri

Olay	Olasılık
Trafik Kazası	0.000099
Taşıma Kabı	0.000012
Radyasyon Salınımı	0.000024

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 Kaza Sahası Bölgeleri

Alınan tüm önlemlere karşın, radyoaktif madde taşıyan araçların bir kazaya dahil olması durumunda acilen kaza sahası uygulama prosedürlerine geçilmelidir. İlk aşamada radyoaktif madde salınımı olsun ya da olmasın, ivedilikle yetkili kurumlara, kolluk kuvvetlerine haber verilerek, kasa saha bölgeleri belirlenmelidir. Kalabalık bir bölgede meydana gelen kazalarda çevrede bulunan insanlar tahliye edilmeli ve sıcak bölgenin dışında tutulmalıdır. Radyoaktif madde salınımı en aza düşürecek şekilde patlama, yangın, kayıp gibi durumların yaşanmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Kaza anında taşıma fıçıları darbe almamış olmasalar bile oluşabilecek büyük çaplı bir yangın ya da patlama fıçılarda kırık ya da çatlağa sebebiyet verebilir.

Radyasyondan korunma ve acil durum müdahale planına göre uygun şekilde hareket edilmeli, çalışanın kendisini tehlikeye atacak hatalı tutumlardan kaçınırken, toplum ve çevrenin radyasyona maruz kalmasının önüne geçilmelidir. Bu nedenle yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında acil durum planlarına kaza sahası uygulaması eklenerek tüm bu çalışmalar daha etkin, hızlı ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilir.

8.1.1 Kaza Sahası Uygulamasının Sağlayacağı Faydalar

- Acil durum planlamasında, radyoaktif maddeler için güvenli mesafeler belirleneceğinden kaza sahası uygulaması hızlı şekilde uygulanabilir.
- Kısa sürede çevrede etkilenebilecek insan ve hayvanlar tahliye edilebilir. Radyasyondan en az şekilde etkilenmeleri sağlanır.

- Radyasyon kaynağı ile su kaynaklarının bağlantıları kesileceğinden uzun döneme yayılacak bulaşmalar ve kirlenen ürünlerin tüketimi sonucu iç ışıma tehlikesinin önüne geçilir.

- Personelin radyasyona maruziyeti kontrol edilebilir. Giriş çıkış alanları kontrol altına alınacak ve düzenli radyasyon kontrolleri yapılacağından radyasyonun personel üzerindeki etkileri gözlenebilecektir.

- Kurtartma ve kirliliği temizleme işleri kontrollü ve güvenli şekilde gerçekleştirilebilir.

- Giriş çıkış kontrolleri sağlandığından, radyoaktif kaynakların veya kontamine olmuş maddelerin dışarı çıkarılması engellenir.

- Soğuk bölge içerisi tamamı ile boşaltıldığından ikinci bir risk oluşturacak, kaza veya dış müdahale gibi faktörler ortadan kaldırılmış olacaktır.

- Bu çalışmada uygulanan hata ağacı analizi ile belirlenen tehlikeli durumların ve risklerin göz önüne alınarak acil kaza müdahalelerinin iyileştirilmesine ve hızlandırılmasına katkıda bulunulur.

8.2 Hata Ağacı Analizi ile Risk Değerlendirmesi

8.2.1 Sonuç ve Öneriler

Trafik Kazası

Trafik kazası, taşımada kullanılan fıçıların ve zırhlarının direkt darbe alarak kırılması veya çatlamasına veya bir yangına sebebiyet vererek termal değişime neden olup taşıma kaplarının bütünlüğünü bozulmasına yol açabilir. Bütünlüğü bozulan fıçılardan da radyasyon salınımı gerçekleşebilir. Fıçı tasarımı ve alınan diğer önlemler de göz önüne alındığında, fıçıların trafik kazasından alacağı darbe sonucu bütünlüğünün bozularak radyasyon yayılması ihtimali, trafik kazası gerçekleşme ihtimalinden çok daha düşüktür. Trafik kazası radyasyon salınımı tetikleyebilecek en büyük etken olduğu için ana faktör olarak kabul edilebilir.

Taşıma Kabı Fiziksel Etmenler

Taşıma kapları olası bir trafik kazasında, radyoaktif maddenin dağılmasını engellemede kalkan görevi görür. Taşıma kapları ağır darbelere ve şiddetli trafik kazalarına karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanır (Bkz. Radyoaktif madde taşımacılığı). Böylelikle şiddetli trafik kazalarında dahi radyasyon salınımı ihtimalini düşürür. Taşıma kaplarında ortaya çıkan herhangi bir fiziksel problem direkt radyoaktif madde salınımına neden olacaktır.

Taşımada kullanılan fıçıların tasarımda yapılan hatalar, kullanılan materyal, uygun taşıma kabının kullanılmaması, kapaklarının açık unutulması, hatalı yükleme, soğutucu arızası gibi trafik kazasının dışında, taşıma kaplarının fiziksel özellikleri ya da fiziki taşıma işlemlerinden kaynaklı direkt durumlar nedeniyle radyasyon salınımı da gerçekleşebilir. Bu durum geri dönüşü olmayan büyük çaplı olaylara neden olabilir. Yaşanan vakaların sıklığı ve sebepleri üzerinde durularak büyük çaplı bir kazaya sebep vermeden kaynağında müdahale edilerek düzeltilmelidir. Burada iş sağlığı ve güvenliği yaklaşımının, kontrol ve denetim mekanizmasının ne derecede önemli bir kez daha gözler önüne serilmektedir.

8.2.2 Hata Ağacı Analizinin Yüksek Radyoaktif Madde Lojistiğinde Kullanılabilirliği

Hata ağacı analizi yüksek radyoaktif madde taşınması gibi karmaşık sistemlerde risklerin belirlenmesinde birçok farklı faktörün sisteme nasıl etki edeceğini göstermek için kullanılabilecek etkili, etkileşimli ve çok yönlü bir risk değerlendirme yöntemidir. Hata ağacını oluşturan dallar ile sisteme etki eden faktörler genelden detaya rahatlıkla görülebilir. Böylelikle karmaşık bağıntılar sisteme dahil edilerek hataların ne oranda ve büyüklükte sonuçlara yol açacağını görmemizi sağlayabilir. Birbiri ile yakınlığı ve ilişkisi bulunan hatalar bu şekilde tespit edilerek sistemin eniyilemesi için çözüme odaklanma sürecini hızlandırabilir.

Hata ağacı analizi, ayrıntılı bir çalışma gerektirdiğinden oldukça zaman alıcı ve uzman bir ekip gerektiren bir süreci kapsar. Ara faktörlerin gerçekleşme olasılığının hesaplanmasında yaşanan belirsizlikler, ana faktörün gerçekleşme ihtimalinin hesaplanmasında da belirsizliklere neden olur. Bu nedenle matematiksel olarak olasılık hesabı yapıldığında hata payı mutlaka olacaktır.

Sisteme etki edecek tüm faktörleri ele almak, bunların gerçekleşme ihtimallerini net olarak hesaplamak ve sonuçlandırmak neredeyse imkansızdır. Bu tez çalışmasında hata ağacı analizinin kullanılmasının amacı yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında meydana gelebilecek bir kazanın olasılığını yaklaşık olarak hesaplamak değil sisteme etki edecek faktörleri detaylı bir şekilde birbiri ile olan ilişkilerini ve risklerin hangi faktörlerden kaynaklanabileceğini göstermektir.

İnsan hataları sisteme dahil edildiğinde, matematiksel olarak yapılacak olasılık hesabı tahminlerin ötesine geçmeyecektir. İnsan kaynaklı hatalar sistemin ilerleyişini çok hızlı bir şekilde etkileyerek tümü ile değiştirebilir. Aynı zamanda bu analiz yöntemi durağan bir yapıya sahiptir. Zaman ile olan ilişkisini kestirmek mümkün değildir.

Sisteme etki etme potansiyeli olan olayların, geçmiş kazalardan elde edilen deneyimler aracılığı ile sisteme etki eden ana faktörlerin ve bu kök nedenlere etki edecek ara

faktörlerin zincirleme bağlantılarını görebilmek adına nükleer teknolojilerde risk değerlendirilmesi yaparken ve sistemlerin eniyilemesinde hata ağacı analizi etkili bir yöntem olarak varlığını sürdürecektir. Ulaştırma rotasının seçimi, paketleme, yükleme, tasarım ve taşıma aşamalarında güvenlik sistemlerinin belirlenmesinde, bu sistemlerin kalitesinin artırılmasında ve kaza sahası operasyonlarının belirlenmesinde ve yönetilmesinde, böylelikle çalışanların ve toplumun sağlığının korunmasında hata ağacının sonuçları kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, T.C Resmî Gazete, Sayı: 6331, 20.06.2012.

2. Bilir, N. ve Yıldız, A.N. *İş Sağlığı ve Güvenliği* (1. Baskı). Ankara: Hacettepe Üniversitesi Yayınları, 10-50, 135-15. 2004

3. Özdemir, İ. *İş Sağlığı ve Güvenliği Kavram ve Kurallarının Gelişimi, İş Sağlığı ve Güvenliği* (1. Baskı). Erzurum: Atatürk Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Yayınları, 5-10. 2004

4. Çiçek, Ö. ve Öçal, M. Dünya'da ve Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliğinin tarihsel gelişimi, *Emek ve Toplum, 5/11*: 107-129. 2016

5. Gochfeld, M. Chronologic history of occupational medicine. *Journal of Occupational and Environmental Medicine, 47(2):*96-114. 2005

6. Encyclopædia Britannica, The Industrial Revolution (n,d). 9 Aralık, 2019. https://www.britannica.com/technology/history-of-technology/The-Industrial-Revolution-1750-1900

7. Eves D. *A brief history of the origins, development and implementation of health and safety law in the United Kingdom, 1802–2014*. 12 Aralık 2019. https://www.historyofosh.org.uk/brief/index.html. 2014

8. Yirmibeşoğlu, O.D., Tyler, O., Olson G, Pelmer, C., & Menguc Y. Evaluation of 3D printed soft robots in radiation enviroments and comparison with molded counterparts. *Frontiers in Robots and Al, Volume 6: Article 40*. 2009

9. Freeman, K. Deep-Sea Diving Robot Can Do Dangerous Work. Mashable. 18 Ocak 2020. https://mashable.com/2012/01/18/deep-sea-diving-robot/ . 2012

10. World Health Organization. *World Day for Safety and Health at Work*, 12 Kasım 2019. https://www.who.int/occupational_health/mediacentre/ pr280405/en/ . 2005

11. Bilir, N. ve Yıldız, A.N. *Türkiye'de İş Sağlığı Konusuna Tarihsel Bakış* (1. Baskı). Ankara: Hacettepe Halk Sağlığı Vakfı, Yayın No: 98/12, 10-30. 1998

12. Dedeoğlu Tuner, A.B. Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği, Avrupa Birliği desteği, *İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, *41*:5-9. 2009

13. Berk, M., Önal, B. ve Güven, R. *Meslek Hastalıkları Rehberi* (1.Baskı). Ankara: İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, 14, 19-25. 2011

14. Uluslararası Çalışma Örgütü. *Türkiye'nin Onayladığı ILO Sözleşmeleri*, 12 Aralık 2019, https://www.ilo.org/ankara/conventions-ratified-by-turkey/lang--tr/index.htm.

15. Sosyal Güvenlik Kurumu. *2017 İş Kazası ve Meslek Hastalıkları İstatistikleri*, 12 Aralık 2019, http://www.sgk.gov.tr/ wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik.

16. Lamarsh, J. *Introduction to Nuclear Engineering* (3. Baskı). New Jersey: Prentice Hall, 52-57, 467-535, 549-595. 2001

17. USNRC. *Definitions*. 12 Aralık 2019, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1003.html . August 24, 2018

18. Martin, J.E. *Physics for Radiation Protection* (2. Baskı). Weinheim: Willey-VCH, 29-77, 305-365, 675-735. 2006

19. Krane, K.S. *Introductory Nuclear Physics* (1. Baskı). United States: John Wiley & Sons, Inc, 246-361. 1998

20. Turner, J.E. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection* (3. Baskı) Germany: John Wiley & Sons, Inc, 62-232, 399-424. 2007

21. Nobel Foundation. *Nobel Prize in Physics.* 20 Şubat 2020, https://www.nobelprize.org/

22. Grupen, C. *Introduction to Radiation Protection: Practical Knowledge for Handling Radioactive Sources* (1. Baskı). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-14. 2010

23. Lindell, B. A history of radiation protection. *Radiation Protection Dosimetry, 68*:83- 95. 1996

24. American Cancer Society. *Power Lines, Electrical Devices and Extremely Low Frequency Radiation*. 22 Kasım 2019. https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/radiation-exposure/extremely-low-frequency-radiation.html#references. 2017

25. OSHA. *Radiation*. 22 Kasım 2019. https://www.osha.gov/ SLTC/radiation/.

26. Health and Safety Executive. *Radiations*. 22 Kasım 2019. https://www. hse.gov.uk/toolbox/radiations.htm .

27. OSHA. *Control & Prevention*. 22 Kasım 2019. https://www.osha.gov/ SLTC/radiationionizing/prevention.html .

28. Centers of Disease Control and Prevention. *Aircrew Safety and Health*. 22 Kasım 2019. https://www.cdc.gov/niosh/topics/aircrew/cosmic ionizingradiation.html. 2017

29. Salamon, M. Miners Face Health Risks, Even on Good Days. *Life Science*. 19 Kasım 2019 https://www.livescience.com/11173-miners-face-health-risks-good-days.html . 2010

30. Walker, J.S. *Permissible Dose: A History of Radiation Protection in the Twentieth Century.* USA: The University of Noth Carolina Press. 1-29. 2000

31. Jorgensen, T.J. *Marie Curie and her X-ray vehicles' contribution to World War I battlefield medicine.* 19 Kasım 2019. https://phys.org/news/ 2017-10-marie-curie-x-ray-vehicles-contribution.html. 2017

32. Smith, P.G. & Doll R. Mortality from Cancer of All Causes Among UK Radiologists. *British Journal of Radiology*. *54(639):*187-94. 1981

33. Kulich, M., Rericha, V., Shore, D.L. & Sandler, D.P. Incidence of non-lung solid cancers in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environmental Research*. *111(3):* 400–405. 2011

34. Clark, C. *Radium Girls, Women and Industrial Health Reform: 1910-1935,* (1.Baskı) USA: The University of Noth Carolina Press. 12-28. 1997

35. Gunderman, R.B. & Gonda, A.S. Radium girls. *Radiology*. 274:314–318. 2015

36. Korstrom, G. The Dene People of Great Bear Lake Call for a Federal Response to Uranium Deaths. 19 Ocak 2019. http://www.ccnr.org/ dene.html . 1998

37. Gonzalez, A.B., Ntowe, E., Kitahara, C.M., Gilbert, E., Miller, D.L., Kleinerman, R.A. & Linet, M.S. Long-term Mortality in 43 763 U.S. Radiologists Compared with 64 990 U.S. Psychiatrists. *Radiology*. 281: 847- 857. 2016

38. EPA. *Radiation Basics*. 10 Ekim 2019. https://www.epa.gov/ radiation/radiation-basics.

39. Canadian Nuclear Safety Commission. *Introduction to Radiation*. 12 Aralık 2019. http://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Reading-Room/radiation/Introduction-to-Radiation-eng.pdf. 2012.

40. Osmanlıoğlu, A.E. *Radyoaktif Atık Yönetimi* (1. Baskı). Ankara: Nobel Yayıncılık, 1-3, 11-16, 106. 2014

41. Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. *Fundamentals of Physics* (9. Baskı). USA: John Wiley & Sons, Inc. 2011

42. Schimmerling, W. Interactions of Radiation with Matter. 17 Ekim 2019. https://three.jsc.nasa.gov/concepts/InteractionsMatter.pdf . 2011

43. Rangacharyulu, C. *Physics of Nuclear Radiations: Concepts, Techniques and Applications* (1. Baskı). USA: Taylor & Francis Group. 91-135. 2014

44. Bryan, J.C. *Introduction to Nuclear Science* (1. Baskı). USA: Taylor & Francis Group. 125-145, 263-277. 2010

45. Kenneth Shultis, J. & Faw, R.E. *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering* (2. Baskı). USA:Taylor & Francis Group. 165-199, 255-284. 2007

46. Epstein, C.S. & Milner, R.G. QED radioative corrections to low-energy moller and bhabha scattering. *Physical Review D*, Volume 94: 1-6. 2016

47. Curry, T.S., Dowdey, J.E. & Murry, R.C. *Christensen's Physics of Diagnostic Radiology* (4. Baskı). USA: Lippincott Williams & Wikings. 1-9, 61- 70. 1990

48. EPA. *Radiation Terms and Units*. 10 Kasım 2019, https://www.epa.gov/radiation/radiation-terms-and-units

49. EPA. *Radiation Sources and Doses*. 15 Ekim 2019, https://www.epa.gov/radiation/radiation-sources-and-doses

50. TAEK. *Doğal Radyasyon Kaynakları*. 19.11.2019, https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html. Haziran, 2016

51. TAEK. *Yapay Radyasyon Kaynakları*. 19.11.2019, https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1084-yapay-radyasyon-kaynaklari.html. Haziran, 2016

52. Atakan, Y. *Radyasyon ve Sağlığımız* (1. Baskı). Ankara: Nobel Yayıncılık, 1-90. 2014

53. Nükleer Düzenleme Kurumu. *Türkiye'de Radyasyon Kaynakları- 2019*. 18.05.2020, https://ndk.org.tr/tr/hizmetlerimiz/acil-durum-cevresel-yonetim/turkiyede-radyasyon-kaynaklari.html.

54. USNRC. *Backgrounder on Biological Effects of Radiation*. 10 Ekim 2019, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/bioeffects-radiation.html.

55. Murray, R.E. *Understanding Radioactive Waste* (4. Baskı). USA: Battelle Press, 23-25, 81-89. 1994

56. Önen, S. *Radyasyon Biyofiziği* (1. Baskı). İstanbul: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi. 1993

57. Moore, P. *Nondestructive Testing Handbook Volume 4: Radiographic Testing* (3. Baskı) Columbus: ASNT. 2002

58. Jablon, S. & Bailar, J.C. The contribution of ionizing radiation to cancer mortality in the United States. *Prev Med*. 9(2):219-26. 1980

59. Zeyrek, C.T. The Concepts for Safety and Protection in Applications of Ionizing Radiation. *Journal of Natural and Applied Science*, 17(3):1-9. 2013

60. Vogin, G. & Foray, N. The law of Bergonie and Tribondeau: a nice formula for a first approximation. *International Journal of Radiology*. 89: 1-7. 2012

61. EPA. *Radiation Health Effects*. 16 Ekim 2019. https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects

62. Grosch, D.S. & Hopwood, L.E. *Biological Effects of Radiation* (2. Baskı). New York: Academic Press, INC, 3-137. 1979

63. Harbison, S.A. & Martin, A. *An Introduction to Radiation Protection* (2. Baskı). New Delhi: Thomson Press (India). 37-48, 85-127. 1979

64. Saygın, M., Yaşar, S., Çetinkaya, G., Kayan, M., Özgüner, M.F. & Korucu, C.Ç. Depression and anxiety levels of radiology workers. *Journal of Health Science*. 2(3). 2011

65. USNRC. *High Radiation Doses*. 13 Aralık 2019, https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/high-rad-doses.html Ekim 02, 2017

66. Burshberg, J.T. *Radiation Injury*. 22 Kasım 2019, https://www.merckmanuals.com/home/injuries-and-poisoning/radiation-injury/radiation-injury . Temmuz, 2019

67. Centers of Disease Control and Prevention. *Acute Radiation Syndrome: A Fact Sheet for Physicians.* 12 Aralık 2019, https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/pdf/arsphysicianfactsheet.pdf. 2005

68. UNSCEAR (2008). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Volume II, Annex D. 11 Mart 2020, http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076Report 2008AnnexD.pdf . 2008

69. UNSCEAR (1988). *Exposures and effects of the Chernobyl accident*, Andex D report (pdf). 11 Mart 2020, http://www.unscear.org/ docs/reports/1988annexd.pdf. 1988

70. Özcan, M. ve Topçuoğlu, P. Akut Radyasyon Sendromu. İçinde: Arpacı F, Arat M (Editör). *Nükleer Kaza veya Terörist Atakta Hematopoietik Kök Hücre Transplantasyon Stratejisi.* Ankara: Bilimsel Tıp Yayınevi, 31-67. 2008

71. University of Florida. *Environmental Health and Safety, Principles of Radiation Protection, Biological Effects of Ionizing Radiation* (pdf). 11 Mart 2020, http://webfiles.ehs.ufl.edu/rssc_stdy_chp_5.pdf .

72. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, T.C. Resmî Gazete, sayı:23999, 24.03.2000.

73. UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Annex A (pdf). 11 Mart 2020, https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR2016Annex A.pdf. 2016

74. IAEA Safety Standarts. *Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection, No. RS-G-1.8*. 10 Mart 2020, https://www.iaea.org/ publications/7176/environmental-and-source-monitoring-for-purposes-of-radiation-protection .

75. Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi Radyasyon Güvenliği El Kitabı (pdf). 10.03.2020. http://www.hastane.ege.edu.tr/GenelUyumEgitimi/files/Radyasyon %20Güvenliği%20El%20Kitabı.pdf. 2014

76. Sağlık Hizmetlerinde İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları ile Çalışan Personelin Radyasyon Doz Limitleri ve Çalışma Esasları Hakkında Yönetmelik, T.C. Resmî Gazete, sayı: 28344, 05.07. 2012.

77. Centers of Disease Control and Prevention. *ALARA- As Low As Reasonably Achievable*. 27 Şubat 2020, from https://www.cdc.gov/nceh/ radiation/alara.html. Aralık, 2015

78. TAEK. *Radyasyon Güvenliği*. 30 Şubat 2020. https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/91-radyasyon-guvenligi-sss.html . Eylül, 2017

79. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı- AFAD. *Radyasyon Uyarı İşaretleri*. 3 Şubat 2020. https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-uyari-isaretleri . 2019

80. NIOSH, OSHA, USCG, EPA. *Occupational Safety and Health Guidance Manual for Hazardous Waste Site Activities* (pdf). 3 Şubat 2020, https://www.osha.gov/ Publications/ complinks/OSHG-HazWaste/all-in-one.pdf . 1985

81. Karataşlı, M. İş güvenliğinde dozimetreler. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 1: 15-31. 2018

82. Kumaş, A. *Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği* (1. Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 13-15. 2014

83. Akman, Y. ve Ketenoğlu, O. Çevre Kirliliği, *İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri* (1. Baskı). Ankara, Palme Yayıncılık, 255-261. 2012

84. Görçün, ÖF. Tehlikeleri Maddelerin Sınıflandırılması ve Paketlenmesi. İçinde: Koparal AS. *Tehlikeli Madde Lojistiği ve İş Güvenliği* (1.Baskı). Eskişehir. Anadolu Üniversitesi Yayınları, 4-25, 197-199. 2018

85. United States Department of Transportation (US DOT). *Radioactive Material Regulations Review* (pdf). 10 Nisan 2020, https://rampac.energy.gov/docs/default-source/dotinfo/dot_ramreg1.pdf?sfvrsn=2

86. Noll, G.G. & Hildebrand, M.S. *Hazardous Materials Managing the Incident* (4. Baskı) Burlington: Jones& Bartlett Learning. 44-45, 138-182. 2014

87. Cheremisinoff, N.P. *Transportation of Hazardous Materials*. Morganville, New Jersey: Noyes Publications. 45-100. 1994

88. IAEA. *Transporting radioactive materials*. 1 Nisan 2020, https://www.iaea.org/topics/transporting-radioactive-materials .

89. IAEA. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6*. Vienna :IAEA (pdf). 1 Nisan 2020, https://www.iaea.org/publications/8851/regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material-2012-edition . 2012

90. Er Z. Safety and security aspects for the effective shipment of radioactive materials with maritime transportation. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation.* 2(3):303-309. 2008

91. Ratin, A.S.R., Mithel, M.F.H., Rishad, A.S.R. & Nitu, T.A.K. Radioactive waste management of nuclear power plant. *International Journal of Renewable Energy Technology Research, 3(7):* 1-10. 2014

92. US Department of Transportation. *Bureau of Transportation Statics. Freight Facts and Figures*. 10 Nisan 2020, https://www.bts.gov/ . 2015

93. Cook, D., Flowers, Q., Maders, S., Chapman, N. & McCombie, C. *Safety and Risks in the Transportation of Radioactive Materials to and in Australia.* Australia: Jacobs Group Pty Limited. 11-38. 2016

94. IAEA Safety Standards. *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, No. TS-G-1.1. Vienna: IAEA. 63-194. 2008

95. PHAMSA- Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. *Hazardous Materials Safety Regulations Review* (pdf). 3 Nisan 2020, https://www.phmsa.dot.gov/phmsa-regulations.

96. Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınması Yönetmeliği (RMGTY). T.C. Resmî Gazete, sayı: 25869, 08.07.2005.

97. NDT Research Center. *Radio Isotope (Gamma) Sources.* 21 Nisan 2020, https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/EquipmentMaterials/isotopesources.htm .

98. Frontier Technology Cooparation. *Californium-252 (Cf-252) Neutron Sources*. 21 Nisan 2020, https://www.frontier-cf252.com/ neutron-sources/

99. IAEA. *Safe Transport of Radioactive Material* (4. Baskı). Vienna, IAEA-TCS-01/04. 65-263. 2008

100. TAEK. *Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınmasına İlişkin Kılavuz* (pdf), RSGD-KLV-035. 2018

101. IAEA Safety Standarts. (2018). Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (pdf), No: SSR-6. 21 Nisan 2020, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf . 2018

102. Cook, J., Lewis, R. & Easton, E. Categorizing and Transporting Low Specific Activity Materials and Surface Contaminated Objects (pdf), NUREG-1608. 21 Nisan 2020, https://www.nrc.gov/docs/ML1533/ ML15336A927.pdf . 1998

103. ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency). *Transport of radioactive material*. 10 Nisan 2020, https://www.arpansa. gov.au/regulation-and-licensing/safety-security-transport/transport-of-radioactive-materials

104. Radiation Emergency Medical Management (REMM). *Understanding Shipping Labels and Placards for Radioactive Materials*. 25 Nisan 2020, https://www.remm.nlm.gov/transportation_hazard_id.htm . 2020

105. FEMA Emergency Management Institue. *Packacing*. 15 Nisan 2020, https://emilms.fema.gov/is3/fema_is/is03/rem0302010.htm .

106. Colombia Hi Tech. *Front End Transport Packaging*. 15 Nisan 2020, http://chtnuclear.com/front-end-transport/ .

107. USNRC Technical Training Center. *Reactor Concepts Manual, Transportation of Radioactive Material* (pdf). 25 Nisan 2020, https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/11.pdf .

108. Office of Nuclear Energy. *Nuclear Fuel Facts: Uranium*. 18 Nisan 2020, https://www.energy.gov/ne/fuel-cycle-technologies/uranium-management-and-policy/nuclear-fuel-facts-uranium

109. McDiarmid, M.A. & Squibb, K.S. Uranium and thorium. In: Bingham E, Cohrssen, B.& Powell, C.H. (Eds). *Patty's toxicology*. New York: John Wiley, 381–422. 2001

110. World Nuclear Association. *Mixed Oxide (MOX) Fuel*18 Nisan 2020, https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx . 2017

111. Herczeg, J.W. *High-assay low enriched uranium* (pdf). 19 Nisan 2020, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f61/HALEU%20 Report%20to%20NEAC%20Committee%203-28-19%20%28FINAL%29.pdf . 2019

112. World Nuclear Association. *Transport of Radioactive Materials*. 19 Nisan 2020, https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/ transport-of-nuclear-materials/transport-of-radioactive-materials.aspx . 2017

113. Committee on Transportation of Radioactive Waste, National Research Council. *Going the Distance? The Safe Transport of Spent Nuclear Fuel and HighLevel Radioactive Waste in the United States* (1. Baskı). USA: National Academies Press. 55-182. 2006

114. Radyoaktif Atık Yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete, sayı: 28582, 09.03.2013.

115. Yüksek Aktiviteli Kapalı Radyoaktif Kaynakların ve Sahipsiz Kaynakların Kontrolü Yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete, sayı: 27176, 21.03.2009.

116. USNRC Protecting People and the Enviroment. *Safety of Spent Fuel Transportation* (pdf), NUREG/BR-0292. Washington: Office of Public Affairs. 2017

117. Hafner, R.S., Mok, G.C., Hovingh, J. & Syn, C.K. *Standard Review Plan for Transportation Packages for MOX Spent Nuclear Fuel*, NUREG-1617. Washington: USNRC Office of Nuclear Material Safety and Safeguards. 1-15. 2005

118. U.S. Department of Energy, The Depleted UF6 Management Information Network. 30 Mart 2020, https://web.evs.anl.gov/uranium/ index.cfm

119. Ayışkan, Ö. Uranyum Teknolojisi ve Türkiye, *Madencilik, Cilt: XII, Sayı: 4*. 1973

120. NJDOH- New Jersey Department of Health and Senior Services, *Hazardous Substance Fact Sheet, Uranium Hexafluoride* (pdf), 28 Mart 2020, https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1970.pdf. .2001

121. National Library of Medicine. *Uranium Hexaflouride*. 28 Mart 2020, https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Uranium-hexafluoride.

122. ISO- International Organization for Standardization. *Packaging of Uranium Hexafluoride (UF6) for Transport* (ISO 7195). Geneva: ISO. 1993

123. McDiarmid, M.A., Keogh, J.P., Hooper, F.J., Squibb, K.S. & Kane, R. Health effects of depleted uranium on exposed Gulf war veterans. *Environ Res*. 82:168–180. 2000

124. NWPO, State of Nevada Agency for Nuclear Project. *Nuclear Waste*. 10 Şubat 2020, http://www.state.nv.us/nucwaste/

125. IAEA. *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (pdf). 5 Mart 2020, https://www.iaea.org/publications/11173/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management . 2018

126. Feiveson, H., Mian, Z. & Ramana, M.V. Spent Fuel from Nuclear Power Reactors. *International Panel on Fissile Materials*. United States. 2011

127. Connolly, K.J. & Pope R.B. *A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel*. USA: Prepared for US Department of Energy Nuclear Fuels Storage and Transportation Planning Project. 3-46. 2016

128. Ammerman DJ. Assuring Safe Transportation of Nuclear and Hazardous Materials (pdf). 5 Mart 2020, https://energy.sandia.gov/wpcontent/gallery/uploads/Transportation.pdf . 2016

129. IAEA. *Policies and Strategies for Radioactive Waste Management*, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1. Vienna: IAEA. 28-29. 2009

130. Tunaboylu, K., Playfair, A. & Mariapillai, N. Waste transport and public safety. Pangea Technical Report PTR-01-03, *Pangea Resource International*, Baden, Switzerland. 2001

131. World Nuclear Association. Storage and Disposal of Radioactive Waste. 30 Mart 2020, https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx . 2020

132. Thompson, L. Vitrification of Nuclear Waste. 30 Mart 2020, http://large.stanford.edu/ courses/2010/ph240/thompson2/ . 2010

133. Taner, A.C. Radyoaktif atıkların yok edilmesi nihai depolanması. *Çağın Polisi Dergisi, 58.sayı*. 2016

134. Jantzen, C.M. First principles process-product models for vitrification of nuclear waste: Relationship of glass composition to glass viscosity, resistivity, liquidus temperature, and durability. *Conference: 93. Annual meeting and exposition of the American Ceramic Society (ACerS)*, Cincinnati, OH, United States WSRC-MS-91-011. 1991

135. ANSTO- The Australian Nuclear Science and Technology Organisation. *Management of radioactive waste in Australia* (pdf). 30 Mart 2020, http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/werner2/docs/ansto-jan11.pdf. 2011

136. Winger, K., Feicther, J., Kalinowski, M.B., Sartorius, H. & Schlosse, C. A new compilation of the atmospheric 85krypton inventories from 1945 to 2000 and its evaluation in a global transport model. *Journal of Environmental Radioactivity, 80:* 183-215. 2005

137. Swift P. *Recent Developments in Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel* (pdf). 10 Nisan 2020, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/Peter%20Swift%20PRACoP%202017%20final.pdf . 2017

138. Chandler, J. M. The Peach Bottom Spent Fuel Element Shipping Cask Accident December 8, 1971. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-3844. 1972

139. NEBRASKA SEOP. *Radioactive Materails Transportation Accident Plan (RAMTOP)*. 10 Nisan 2020, https://nema.nebraska.gov/sites/nema.nebraska.gov/files/doc/ramtap.pdf . 2017

140. UNSCEAR. *The Chernobyl accident*. 12 Nisan 2020, http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html . 2012

141. Moon, D. *A Postcard from Chernobyl*. 12 Nisan 2020, https://origins.osu.edu/connecting-history/postcard-chernobyl. 2016

142. Rommens, C., Reaud, P., Vray, F., Louvat, D. & Crabol, B. Uncertainties of the transfer of radionuclides in terrestrial ecosystems, *Radioprotection- Colloques*, volume 37, C1:1218-1222. 2002

143. Open Oregon Educational Resources. *Radiation Safety- Inverse Square Law.* 12 Nisan 2020, https://openoregon.pressbooks.pub/ radsafety130/ chapter/inverse-square-law/ .

144. Shafiei, S.Al., Hasanzadeh, H. & Shafiei, S.Ah. A simple calculation method for determination of equivalent square field. *Journal of Medical Physics 37(2):* 107–111. 2012

145. Dizdar EN. İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinde risklerin yapay sinir ağlarıyla değerlendirilmesi. *Academic Platform Journal of Engineering Science, 6-3:*73-83. 2018

146. Shrader-Frechette K. *Risk and uncertainty in nuclear waste management*. 21 Mart 2020, https://www.nwmo.ca/~/media/Site/Files/PDFs/2015/11/04/17/31/607_1-5RiskandUncertaintyinNuclearWasteManagement.ashx. 2003

147. Easton, A.P. & Bajwa, C.S. Just How Risky Is It? Comparisons of the Risks of Transporting Radioactive Waste. *WM2010 Conference*, Phoenix, AZ. 2010

148. EPA. *Transportation of Radioactive Material*. 20 Nisan 2020, https://www.epa.gov/radtown/transportation-radioactive-material

149. NASA- *National Aeronautics and Space Administration. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications.* Washington, DC: NASA Office of Safety and Mission Assurance, NASA Headquarters. 2002

150. Ericson, A. & Clifton, II. Fault tree analysis. A History. *Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference*. Seattle, Washington. 1999

151. USNRC. *Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants*. 13 Nisan 2020, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1150/v2/sr1150v2appa.pdf . 1990

152. Roberts, N.H. & Haasl, D.F. *Fault Tree Handbook.* 13 Nisan 2020, https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf . 1981

153. Marhavilas, P., Koulouriotis, D., Mitrakaz, C. Fault and event-tree techniques in occupational health-safety systems- part 1: integrated risk-evaluation scheme. *Environmental Engineering and Management Journal.* 13/8: 2097-2108. 2014

154. Dizdar EN. Sistem Güvenirliği için Hata Ağacı Analizi, *Teknoloji*, 3-4, 35-40. 2003

155. TÜİK. *Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2018*. 16 Mart 2020, http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27668.

156. OSHA. *Hazard Identification and Assessment*. 17 Mart 2020, https://www.osha.gov/shpguidelines/hazard-Identification.html .

157. Alizadeh, S.S., Mortazavi, S.B. & Sepehri, M.M. Analysis of Occupational Accident Fatalities and Injuries Among Male Group in Iran Between 2008 and 2012. *Iran Red Crescent Medical Journey*. 17/10: e18976. 2015

158. Özen, M., Zorlu, F. Türkiye'de Devlet Karayollarında Kaza Oranlarının ve Kaza Örüntüsünün Analizi. *Teknik Dergi*, 29 (5), 8589-8604. DOI: 10.18400/tekderg.308318. 2018

159. Yaprak, Ş. ve Akbulut, A.M. Trafik Kaza ve Denetim İstatistikleri, Polis Akademisi Yayınları, 75- ISBN: 978-605-7822-05-5, 8-13. 2019

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	Furkan Erdoğan
Doğum Tarihi	02.06.1990
Telefon	0546 635 4935
E-posta	furkanmavi_1990@hotmail.com

EĞİTİM

Lise	Balaban Lisesi (2007)
Ön Lisans	Anadolu Üniversitesi Dış Ticaret (2016)
Lisans	Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği (2016)
Lisans	Anadolu Üniversitesi Uluslararası Ticaret ve Lojistik Yönetimi (2020)
Yüksek Lisans	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği (2020)

Yüksek Lisans	Idaho Üniversitesi (2022) Nükleer Mühendislik
Dil Eğitimi	Rice Üniversitesi (2019)

ÇALIŞMA ALANLARI

- Nükleer Mühendislik
- İş Sağlığı ve Güvenliği
- Radyasyondan Korunma
- Nükleer Malzemeler
- Uluslararası Nükleer İlişkiler