T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN BEBEK GIDALARININ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

RAGHDA ABDULATEF ABDULHUSEIN ALTAMEMI

DOKTORA TEZİ

PROF. DR. ŞEREF TURAN

ŞUBAT - 2026
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Raghda Abdulatef Abdulhusein ALTAMEMI tarafından hazırlanan "**TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN BEBEK GIDALARININ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **17.02.2026** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Şeref TURAN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN Çankırı Karatekin Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Celal Tuğrul ZEYREK Çankırı Karatekin Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Temel Kan BAKIR Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. Selahattin KAYMAKCI .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Raghda Abdulatef Abdulhusein ALTAMEMI

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN BEBEK GIDALARININ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

RAGHDA ABDULATEF ABDULHUSEIN ALTAMEMI

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Bebeklik, fiziksel büyümenin yanı sıra bağışıklık, zihinsel ve bilişsel gelişmelerin en hızlı gerçekleştiği dönemdir. Bu dönemde doğru ve en uygun beslenme, bebeklerin sağlıklı, normal büyümesi ve gelişmesi için kritik öneme sahiptir. Bu dönemde edinilen sağlıklı beslenme, yaşam boyu sağlık üzerinde etkili olabilir. Anne sütü, fizyolojik gereksinimleri karşılayacak yeterli besin maddelerine sahip güvenli, doğal, sürdürülebilir en temel besin kaynağı olduğundan bebekler için doğru ve en uygun beslenme şeklidir. Bebek formülleri, emzirmenin mümkün olmadığı durumlarda bebekler veya yeni doğanlar (<1 yaş) ve emekleyen veya yeni yürümeye başlayan çocukların (1-3 yaş) beslenmesinde anne sütüne iyi bir alternatif olarak kabul edilir. Anne sütüne benzer şekilde üretilen bebek formülleri ve devam formülleri genellikle süt, çeşitli tahıllar, vitaminler, mineraller, bal ve kuru meyvelerden oluşur. Ancak çevre kirleticileri (tarımsal kimyasal kalıntıları) ve doğal toksinler nedeniyle, formüllerin kalitesi üretim, işleme, paketleme, depolama ve nakliye sırasında oluşabilecek olası kontaminasyon nedeniyle değişebilir. Bebekler, formüllerinden kaynaklanan bu kirleticilere karşı önemli ölçüde daha savunmasızdır. Bu durum, bebek formüllerinin güvenliği konusunda endişelere yol açmaktadır. Bu nedenle, bu kirleticileri doğru ve kesin bir şekilde belirlenmesi ve sürekli olarak izlenmesi çok önemlidir. Gıdaların doğal ve/veya antropojenik radyonüklit ile kontamine olması, zayıf bağışıklık sistemleri nedeniyle bebekler için her zaman ciddi bir sağlık tehdidi olmuştur. Besin zincirinde yoğunlaşan bu radyonüklitler, özellikle sindirim ve solunum yoluyla insan vücuduna girerek kanser ve diğer bazı hastalıkların gelişme riskini artırabilir. Bu çalışmada, ilk kez, Türkiye'de tüketilen ticari bebek formülü ve devam formülü örneklerindeki doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve antropojenik (^{137}Cs) radyonüklitlerin içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama ışın spektroskopisi kullanılarak belirlendi ve bu formüllerin sindirilmesi sonucu oluşabilecek radyolojik sağlık riski değerlendirildi. Bebek formülü örneklerindeki radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri; 2,8 Bq/kg (^{232}Th); 2,6 Bq/kg (^{226}Ra); 162,1 Bq/kg (^{40}K) ve <0,5 Bq/kg (^{137}Cs) olarak ölçüldü. Olası radyolojik sağlık riskini değerIendirmek için hesaplanan toplam yıllık etkin radyasyon dozunun, mortalite ve morbidite kanser riskinin ortalama değerleri, yeni doğanlar için 0,7 mSv/y; $2{,}8\times10^{-6}$ ve $4{,}3\times10^{-6}$ küçük çocuklar için 0,2 (mSv/y); $5{,}6\times10^{-6}$ ve $8{,}7\times10^{-6}$ olarak bulundu.

ANAHTAR KELİMELER: Bebek Maması, Bebek Formülü Radyoaktivite, Radyum, Toryum, Yıllık Etkin Doz, Radyolojik Sağlık Riski, Gama- Işını Spektroskopisi.

Şubat 2026, 109 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

DETERMINATION OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIOACTIVITY CONTENTS OF INFANT FORMULAS SOLD COMMERCIALLY IN TÜRKİYE AND EVALUATION OF RADIOLOGICAL HEALTH RISK

RAGHDA ABDULATEF ABDULHUSEIN ALTAMENI

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS
SUPERVISOR:PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Infancy is the period of most rapid physical growth, as well as immune, mental, and cognitive development. Proper and optimal nutrition during this period is critical for healthy, normal growth and development in infants. A healthy diet acquired during this period can have a lifelong impact on health. Breast milk is the most appropriate and appropriate form of nutrition for infants because it is a safe, natural, and sustainable source of essential nutrients, providing sufficient nutrients to meet physiological needs. Infant formulas are considered a good alternative to breast milk for feeding infants (<1 year) and toddlers (1-3 years) when breastfeeding is not possible. Infant formulas and follow-on formulas, produced in a manner similar to breast milk, generally consist of milk, various grains, vitamins, minerals, honey, and dried fruit. However, due to environmental contaminants (such as agricultural chemical residues) and natural toxins, the quality of formulas can vary due to potential contamination during production, processing, packaging, storage, and transportation. Infants are significantly more vulnerable to these contaminants from their formulas. This raises concerns about the safety of infant formulas. Therefore, it is crucial to accurately and precisely identify and continuously monitor these contaminants. Contamination of food with natural and/or anthropogenic radionuclides has always been a serious health threat for infants due to their weakened immune systems. These radionuclides, concentrated in the food chain, can enter the human body, particularly through ingestion and inhalation, and increase the risk of developing cancer and other diseases. In this study, for the first time, the contents of natural (^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{40}K) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides in commercial infant formula and follow-on formula samples consumed in Türkiye were determined by using gamma-ray spectroscopy with high purity germanium detector, and the potential radiological health risks that may arise from the ingestion of these formulas were assessed. The average activity concentrations of radionuclides in infant formula samples were measured as 2.8 Bq/kg (^{232}Th), 2.6 Bq/kg (^{226}Ra), 162.1 Bq/kg (^{40}K), and <0.5 Bq/kg (^{137}Cs). The average values of total annual effective radiation dose, mortality and morbidite cancer risk estimated to assess radiological health risk were found to be 0.7 mSv/y, 2.8×10^{-6} and $4{,}3\times10^{-6}$ for infants and 0.2 (mSv/y), 5.6×10^{-6} and $8{,}7\times10^{-6}$ for toddlers, respectively.

KEYWORDS: Infant Formula, Baby Food, Radioactivity, Radium, Thorium, Annual Effective Dose, Radiological Health Risk, Gamma-Ray Spectroscopy.

February 2026, 109 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, her zaman hoşgörü ve sabırla yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Şeref TURHAN'a en kalbi duygularımla müteşekkir olduğumu içtenlikle ifade ederim.

Örneklerin analizleri konusunda yardımcı olan Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Aslı KURNAZ'a teşekkür ederim.

Çalışmanın ilerleyişi sırasında gösterdiği nazik denetim ve rehberlik için Fizik Bölüm Başkanlığına, öğretim üyelerine ve Tez İzleme Komitesi üyesi Pof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI ve Prof. Dr. Temel Kan BAKIR'a teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, benim için çok kıymetli olan annem, babam ve kızıma ithaf ediyorum.

RAGHDA ABDULATEF ABDULHUSEIN ALTAMEMI

Kastamonu, 2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ... **ii**
TAAHHÜTNAME ... **iii**
ÖZET ... **iv**
ABSTRACT ... **v**
TEŞEKKÜR ... **vi**
İÇİNDEKİLER ... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ... **x**
GRAFİKLER DİZİNİ ... **xi**
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ ... **xii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ... **xiii**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Tezin Kapsamı ... 6
1.2 Tezin Hedef ve Amacı ... 6
1.3 Tezin Yapısı ... 7
2. LİTERATÜREL ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME ... **9**
2.1 Uluslararası Ölçekte Yapılan Çalışmalar ... 9
2.2 Ulusal Ölçekte Yapılan Çalışmalar ... 24
2.3 Literatürdeki Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi ... 25
2.4 Çalışmanın Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı ... 26
3. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KURAMSAL BİLGİ ... **27**
3.1 Radyasyon ve Etkileşim Süreçleri ... 27
3.1.1 Radyasyon ... 27
3.1.2 İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde İle Etkileşme Süreçleri ... 29
3.1.3 Gama- ışınlarının Etkileşme Mekanizmaları ... 31
3.1.3.1 Fotoelektrik etki ... 34
3.1.3.2 Compton saçılması ... 36
3.1.3.3 Çift oluşumu ... 38
3.1.3.4 Gama-ışınlarının dedektör içindeki etkileşmeleri ... 40
3.2 Radyasyon Doz Birimleri ... 43
3.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları ... 47
3.4 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri ... 52
3.5 Radyoaktivite ve Bozunma Süreçleri ... 61
3.6 Radyoaktivite Analiz Yöntemleri ... 63
4. MALZEME VE YÖNTEM ... **67**
4.1 Örneklerin Toplanması ... 67
4.2 Örneklerin Analiz için Hazırlanması ... 67
4.3 Örneklerin Radyonüklit İçeriklerinin Belirlenmesi ... 68
4.4 Radyolojik Sağlık Riskinin Değerlendirilmesi ... 78
4.4.1 Yıllık Ekin Radyasyon Dozu ... 79
4.4.2 Kanser Riski ... 79
4.4.3 İstatistikî Değerlendirme ... 80
5. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER ... **82**
5.1 Bebek Formülü Örneklerinin Radyonüklit Seviyeleri ... 82

5.2 Radyolojik Sağlık Risklerinin Değerlendirilmesi 90
5.2.1 Yıllık Etkin Radyasyon Dozu 90
5.2.2 Kanser Riski 94
5.3 Sonuç ve Öneriler 99
KAYNAKLAR 101
ÖZGEÇMİŞ 109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 İyonlaştırıcı radyasyonlar ile maddeyle etkileşmesi 30
Şekil 3.2 Farklı iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin farklı malzemelere nüfuz etme kapasiteleri 30
Şekil 3.3 (a) Fotoelektrik absorpsiyon mekanizması ve (b) floresan X ışınlarının emisyonu 35
Şekil 3.4 Compton saçılma süreci 37
Şekil 3.5 Çift oluşum süreci 39
Şekil 3.6 Çok büyük boyutlu bir dedektör içindeki etkileşim geçmişlerine örnekler. FE: Fotoelektrik etki; CS: Compton saçılması; ÇO: Çift oluşumu 41
Şekil 3.7 'Gerçek' bir dedektör içinde etkileşim için ek süreçler FE: Fotoelektrik etki; CS: Compton saçılması; ÇO: Çift oluşumu 43
Şekil 3.8 İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları 48
Şekil 3.9 Doğal radyoaktif seriler 50
Şekil 3.10 Dış ışınlama 53
Şekil 3.11 İç ışınlama 55
Şekil 3.12 Bir gama-ışını spektroskopisi 65

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Doku ve organları ağırlık faktörleri 47
Tablo 3.2 Radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon doz değerlerinin dünya ortalaması 52
Tablo 4.1 Bebek ve devam formülleri örnekler 69
Tablo 4.2 Bebek ve devam formüllerinin tür ve içerikleri 70
Tablo 4.3 Germanyum dedektörünün özellikleri 73
Tablo 4.4 Nükleer veriler 75
Tablo 4.5 Radyolojik risk değerlendirmesinde kullanılan parametrelerin değerleri 80
Tablo 5.1 Bebek formülü örneklerinin radyonüklit içerikleri ile ilgili bazı istatistikî bilgi 83
Tablo 5.2 Bebek formülü örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri 84
Tablo 5.3 Bebek formülü örneklerinin radyonüklit içeriklerinin literatür ile karşılaştırılması 85
Tablo 5.4 Yıllık etkin doz değerlerine ait bazı istatistikî bilgi 91
Tablo 5.5 Yeni doğanlar için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri 92
Tablo 5.6 Küçük çocuklar için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri 93
Tablo 5.7 Yeni doğanlar için hesaplanan mortalite kanser risk değerleri 95
Tablo 5.8 Yeni doğanlar için hesaplanan morbidite kanser risk değerleri 96
Tablo 5.9 Küçük çocuklar için hesaplanan mortalite kanser risk değerleri 97
Tablo 5.10 Küçük çocuklar için hesaplanan morbidite kanser risk değerleri 98

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 3.1 Gama-ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak malzemelerin zayıflama katsayısı 32
Grafik 3.2 Germanyumun ve bileşen parçalarının doğrusal zayıflatma katsayısı 33
Grafik 3.3 Compton saçılmasıyla soğurucuya aktarılan enerjinin saçılma açısına bağımlılığı 37
Grafik 4.1 Bir bebek maması örneğinin gama-ışını spektrumu 74
Grafik 4.2 Deneysel olarak elde edilen verim değerlerinin enerjiye göre değişimi 77
Grafik 5.1 Bebek formülü öneklerinde ölçülen 232Th dağılımı 85
Grafik 5.2 Bebek formülü öneklerinde ölçülen ^{226}Ra dağılımı 86
Grafik 5.3 Bebek formülü öneklerinde ölçülen ^{40}K dağılımı 86
Grafik 5.4 Karekök dönüşümünden önce ve sonra aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı 87
Grafik 5.5 Karekök dönüşümü uygulanmış veriler için kutu grafiği 88
Grafik 5.6 Radyonüklitlerin toplam yıllık etkin doza katkıları 91

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 4.1 Radyoaktivite ölçümü için hazırlanan bebek mamaları örnekleri..... 72
Fotoğraf 4.2 Yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometresi 72
Fotoğraf 4.3 Dedektör üzerine örneğin yerleştirilmesi 74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

^{111}In	**:** İndiyum-111
^{134}Cs	**:** Sezyum-134
^{137}Cs	**:** Sezyum-137
^{138}La	**:** Lantan-138
^{147}Sm	**:** Samaryum-147
^{176}Lu	**:** Luteryum-176
^{18}F	**:** Flor-18
^{201}Tl	**:** Talyum-201
^{210}Pb	**:** Kurşun-210
^{210}Po	**:** Polonyum-210
^{214}Bi	**:** Bizmut-214
^{214}Pb	**:** Kurşun-214
^{219}Rn	**:** Aktinon
^{220}Rn	**:** Toron
^{222}Rn	**:** Radon
^{226}Ra	**:** Radyum-226
^{232}Th	**:** Toryum-232
^{235}U	**:** Uranyum-235
^{238}U	**:** Uranyum-238
^{40}K	**:** Potasyum-40
^{67}Ga	**:** Galyum-67
^{87}Rb	**:** Rubidyum
A	**:** Aktivite
Bq	: Becquerel (Bekerel)
C	**:** Coulomb
Ci	**:** Curie
d	**:** Day (Gün)
D	**:** Doz
eV	**:** Elektron volt
Gy	**:** Gray
J	**:** Joule
keV	**:** Kilolektron volt
kg	**:** Kilogram (10^3 g)
Kr	**:** Kripton
mBq	**:** Milibekerel (10^{-3} Bq)
MeV	**:** Milyon elektron volt
min	**:** Minute (Dakika)
mSv	**:** Milisievert (10^{-3} Sv)
N	**:** Çekirdek sayısı
R	**:** Röntgen
rad	**:** Radiation absorbed dose
rem	**:** Röntgen equivalent man
s	**:** Saniye

Sv : Sievert
t : zaman
$T_{1/2}$: Yarılanma süresi veya Yarılanma Ömrü
Xe : Ksenon
y : Yıl
Z : Atom numarası
α : Alfa parçacığı
β : Beta parçacığı
γ : Gama ışını
λ : Bozunma sabiti
μSv : Mikrosievert (10^{-6} Sv)

Kısaltmalar

AD : Aktivite derişimi
B : Background
BBE : Bağıl biyolojik etki
BFDF : Bebek formülü, devam formülü
DDK : Doz dönüşüm katsayısı
DFD : Bozunum düzeltme faktörü
DFG : Geometri düzeltme faktörü
DFK : Koinsidans düzeltme faktörü
DSÖ : Dünya Sağlık Örgütü
ED : Etlin doz
HPGe : High purity germanium (Yüksek saflıkta germanyum)
IARC : International Agency for Research on Cancer
ICRP : International Commission on Radiological Protection
KF : Kalite faktörü
KR : Kanser riski
MS : Maruz kalma süresi
NaI(Tl) : Talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür
ÖMA : Ölçülebilir minimum aktivite
RAO : Radyonüklit alımı oranı
RF : Risk faktörü
RM : Referans malzeme
TKR : Toplam kanser riski
TO : Tüketim oranı
TYED : Toplam yıllık etkin radyasyon dozu
UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USEPA : United States Environmental Protection Agency
WHO : World Health Organization
WHO-BEIR : World Health Organization- Biological Effects of Ionizing Radiation
YED : Yıllık etkin radyasyon dozu
YTM : Yıllık tüketim miktarı

1. GİRİŞ

Özellikle bebeklik ve çocukluk döneminde büyük önem taşıyan beslenme, bedensel sağlığın temel unsurlarından biridir (WHO, 2023). Bebeklik dönemi, fiziksel büyümenin, bağışıklık, zihinsel ve bilişsel gelişmelerin en hızlı gerçekleştiği dönemdir (Açıkgöz, 2023; Demir vd., 2017; Şan ve Gökçay, 2025). Bebeklik döneminde uygun, doğru ve optimum beslenme, bebeklerin sağlıklı, normal büyüme ve gelişmesi için kritik öneme sahiptir (Demir vd., 2017). Bu dönemde edinilen sağlıklı beslenme, yetişkinlik döneminde enfeksiyon riskini azaltır, bazı kronik hastalıkları önler ve böylece yaşam boyu sağlığı etkileyebilir (Demir vd., 2017). Bununla birlikte, beslenmenin sağlıklı gelişimin temeli olarak önemi, genellikle küçümsenir ve ihmal edilir (WHO, 2023). Yetersiz beslenme sağlığın bozulmasına yol açar ve böylece sağlıksızlık da beslenme durumunun daha da kötüleşmesine katkıda bulunur. Bu etkiler, en çarpıcı şekilde yetersiz beslenmenin başlangıcından en çok etkilenen ve bununla ilişkili sakatlık ve ölüm riski en yüksek olan bebeklerde ve küçük çocuklarda görülür (WHO, 2023). 2001 yılında, ishalli hastalıklar, kızamık, sıtma ve alt solunum yolu enfeksiyonlarının yükünün %50-70'i yetersiz beslenmeye atfedilmişti (WHO, 2023). Ölen çocuklar, beslenme yetersizlikleri nedeniyle oluşan toplam sağlık yükünün yalnızca küçük bir kısmını oluşturmaktadır (WHO, 2023). Annenin yetersiz beslenmesi, uygunsuz emzirme ve tamamlayıcı beslenme, hayatta kalan çocukların sağlığı ve gelişimi için büyük riskler oluşturmaktadır. A vitamini, iyot, demir ve çinko eksikliği hala yaygındır ve aşırı morbidite ve mortalitenin yaygın bir nedenidir (WHO, 2023). Beş yaşın altındaki 50 milyondan fazla çocuk zayıftır ve düşük gelirli ülkelerde her üç çocuktan biri bodurluktan mustariptir (WHO, 2023). Nitekim birçok çocuk bu yaşa asla ulaşamaz. Yetersiz beslenme ve bodurluğun etkileri yaşam boyu devam ederek, düşük okul performansına, üretkenliğin azalmasına ve zihinsel ve sosyal gelişimin bozulmasına neden olur (WHO, 2023). Uygunsuz beslenme uygulamaları, küçük çocuklarda yetersiz beslenmenin başlamasının başlıca nedenlerinden biridir. Uygun şekilde emzirilmeyen çocuklar tekrarlayan enfeksiyonlara yakalanır, daha az iyi büyür ve en azından biraz anne sütü alan çocuklara göre bir aylıkken ölme olasılıkları neredeyse altı kat daha fazladır (WHO, 2023).

Anne sütü, bebeklerin yaşamlarının ilk aylarında sağlıklı büyüme ve gelişmeleri için en temel besin kaynağıdır. Anne sütü, fizyolojik gereksinimleri karşılayacak yeterli besinleri içeren, bebekler için güvenli, doğal, sürdürülebilir, tek ve en temel besin kaynağı olduğundan, emzirme bebekler için en uygun beslenme biçimidir (Amarh vd., 2023; Başaran ve Aydın, 2022; Eskici ve Karahan, 2022; Ljung vd., 2011; Sipahi vd., 2014). Dünya Sağlık Örgütü, (i) emzirmenin erken dönemde, doğumdan sonraki bir saat içinde başlamasını ve altı ay (180 gün) boyunca sadece anne sütü ile beslemeyi ve (ii) uygun tamamlayıcı beslenmenin altı aylıkken başlamasını ve emzirmenin iki yaşına veya ötesine kadar devam etmesini önermektedir (WHO, 2009). Ancak annelerin emzirme davranışını etkileyen iç ve dış etkenler (annelerin emzirmeye ilişkin bilgi ve tutumları, metabolik durumları, yaşları, eğitim düzeyleri, gelir düzeyleri, kültür ve sosyo-demografik yapı vb.) nedeniyle doğumdan sonra emzirme oranı dünya genelinde önemli ölçüde azalmaktadır (Başaran ve Aydın, 2022; Eskici ve Karahan, 2022). Dünya Sağlık Örgütü raporuna göre dünyadaki bebeklerin %34,8'i sadece anne sütüyle beslenmektedir (WHO, 2009). Diğer yandan, altı aydan küçük bebeklerden sadece anne sütüyle beslenenlerin oranı 2023 yılında küresel olarak %48'e ulaşmıştır (GBC, 2023). Türkiye'de emzirme yaygın bir uygulama olmasına rağmen sadece anne sütüyle beslenme istenilen düzeyde değildir. 2018 yılında 6 aydan küçük bebeklerin sadece %41'i anne sütüyle beslenmiştir (Eskici ve Karahan, 2022; Sert, 2005). Türkiye'de bebek maması veya diğer sıvıların erken dönemde verilmesi yaygındır ve biberonla besleme nispeten popüler bir beslenme uygulamasıdır (Eskici ve Karahan, 2022).

Altı aydan itibaren, anne sütü tek başına tüm beslenme gereksinimlerini karşılamaya yetmediğinde, bebekler tamamlayıcı beslenmenin özellikle hassas bir dönemine girerler ve bu dönemde aile yiyeceklerine kademeli olarak geçiş yaparlar (WHO, 2023). Çoğu ülkede 6 ila 18 aylık dönemde yetersiz beslenme sıklığı keskin bir şekilde artar ve bu yaşta edinilen eksikliklerin çocuklukta daha sonra telafi edilmesi zordur (WHO, 2023). Son on yılda, emzirme uygulamalarını iyileştirmeye yönelik müdahalelerin uygulanmasında önemli ilerleme kaydedilmiştir. Net öneriler ve yönergeler, siyasi kararlılık ve artan kaynak tahsisiyle bir araya gelerek birçok hükümetin emzirmeyi korumak, teşvik etmek ve desteklemek için gerekli eylemleri birleştiren programlar oluşturmasını sağlamıştır (WHO, 2023). Sonuç olarak, emzirme

oranlarında çeşitli ortamlarda iyileşmeler görülmüştür. Ancak, benzer bir ilerleme kaydedilmemiştir (WHO, 2023).

Anne sütünün bulunmadığı, yetersiz olduğu veya bebeğe verilmeye uygun olmadığı durumlarda, bebeğin beslenme gereksinimlerini karşılamak üzere anne sütünün besin içeriğini mümkün olduğunca taklit etmek üzere özel olarak tasarlanmış, piyasada bulunan bebek formülleri (veya bebek sütleri veya bebek mamaları), ve devam formülleri uygun bir alternatif sunmaktadır (Açıkgöz, 2023; Başaran, 2022; Demir ve Ağaoğlu, 2023; Şan ve Gökçay, 2023). Türk Gıda Kodeksi-Bebek Formülleri ve Devam Formülleri Tebliği'ne göre (i) bebek formülü, bebeklerin yaşamının ilk aylarında kullanılması amaçlanan ve uygun tamamlayıcı beslenmeye başlanana kadar tek başına bebeklerin besin gereksinimlerini karşılayan tek işlenmiş gıda maddesidir ve (ii) devam formülü, uygun tamamlayıcı beslenmeye başladıktan sonra bebekler ve küçük çocuklar tarafından tüketilmek üzere hazırlanan ve giderek çeşitlenen diyet ve sıvı alımına katkıda bulunan bir gıdadır (RG, 2019). Bebek formülleri, bebeğin erken gelişimi için gerekli olan protein, karbonhidrat, yağ, vitamin ve minerallerin dengeli bir kombinasyonunu sunar (Demir ve Ağaoğlu, 2023). Bu formüllerin bileşenlerini başlıca süt (inek, keçi), farklı tahıl türleri (buğday, yulaf, mısır, arpa, çavdar, soya vb.), bal, kuru meyveler ve katkı maddeleri (stabilizatörler, emülgatörler, asitlik düzenleyiciler, antioksidanlar) oluşturmaktadır sunar (Demir ve Ağaoğlu, 2023). Ayrıca bu formüllerde kullanılan her bir besin maddesi bebeğin sağlığını hiçbir şekilde olumsuz etkilemeyecek kalitede olmalıdır. Çünkü yanlış veya yetersiz besin ve enerji alımı, doğrudan bebek büyümesini etkileyebilir ve organ gelişimi ve işlevi üzerinde uzun vadeli sonuçlar doğurabilir, bu da yaşamın ilerleyen dönemlerinde olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir (Ljung vd., 2011). Çevresel kirleticilere (tarımsal kimyasal kalıntıları) ve doğal toksinlere ek olarak, bebek formüllerinin kalitesi; üretim, işleme, paketleme, depolama ve nakliye sırasında olası kontaminasyon nedeniyle değişebilir (Oztürk vd., 2023). Bebekler, mamalarından kaynaklanan bu kirleticilere karşı önemli ölçüde daha savunmasızdır (Peirovi-Minaee vd., 2024). Bu durum, bebek mamalarının güvenliği konusunda endişelere yol açmakta ve toplumda giderek artan bir endişe kaynağı hâline gelmektedir (Oztürk vd., 2023). Bu nedenle, bu eser kirleticilerin izlenmesi ve doğru ve kesin bir şekilde belirlenmesi hayati önem

taşımaktadır. Daha da önemlisi, bebek maması endüstrileri, bu ürünlerin güvenliğini sağlamak için katı standartlara uymalıdır (Peirovi-Minaee vd., 2024).

Gıdaların, doğal ve antropojenik (yapay) radyonüklitler ile kirlenmesi, insanlar özellikle de zayıf bağışıklık sistemleri nedeniyle bebekler için her zaman ciddi bir sağlık tehdidi olmuştur (Begam vd., 2020; Chabouni vd., 2023; Okodeyi vd., 2024). Besin zincirinde yoğunlaşan bu radyonüklitler, özellikle sindirim ve solunum yoluyla insan vücuduna alınabilir ve farklı organlara yerleşen bu radyonüklitlerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyon (alfa-, beta ve gama-ışınları) iç ışınlamaya sebep olur. Bu ışınlama zamanla kanser ve diğer bazı hastalıkların gelişme riskini artırabilir (Begam vd., 2020; Chabouni vd., 2023; Okodeyi vd., 2024). İnsanların gıda yoluyla iç ışınlamaya maruz bırakan bu iyonlaştırıcı radyasyonlar, doğal ve antropojenik radyonüklitlerden yayınlanabilir. Başlıca doğal radyonüklit (veya radyoizotop) kaynakları, uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) radyoaktif serisindeki radyonüklitler ve potasyum radyoizotopudur (^{40}K). Bu radyonüklitler, dünyanın oluşumundan bu yana hava, su, toprak, kayaç vb. çeşitli çevresel ortamlarda doğal olarak bulunur (Begam vd., 2020; Chabouni vd., 2023; Okodeyi vd., 2024; UNSCEAR, 2000). Yapay kaynaklı radyonüklitler ise özellikle stronsiyum radyoizotopları (^{89}Sr ve ^{90}Sr), iyot radyoizotopu (^{131}I) ve sezyum radyoizotoplarını (^{134}Cs ve ^{137}Cs) içerir. Bu radyoizotoplar, esas olarak 1950'ler ve 1960'larda meydana gelen nükleer silah denemelerinden ve nükleer santral kazalarından (1957'de Windscale, 1986'da Çernobil ve 2011'de Fukuşima Daiichi) kaynaklanan radyoaktif serpintiler; nükleer tesislerden ve diğer lisanslı tesislerden yetkili deşarjlar yoluyla meydana gelirler (IAEA, 2016). ^{137}Cs, biyokimyasal davranışının potasyuma benzerliği nedeniyle en tehlikeli radyoaktif serpinti radyonüklitlerden biri olarak kabul edilir (Ong vd., 2024). ^{137}Cs, solunduğunda veya yutulduğunda kas dokularına dağılır ve bu dokuları beta parçacıklarına ve gama radyasyonuna maruz bırakarak insanlarda kanser riskini artırır (Ong vd., 2024). Daha önce de belirtildiği gibi çevredeki doğal ve yapay radyonüklitlerin insan vücuduna girdiği başlıca yollardan biri gıda alımıdır. Toprak ve su kütlelerinde bulunan radyonüklitlerin yanı sıra havadan bitkilere biriken radyonüklitlerin hayvanlara geçme potansiyeli vardır. Bu radyoaktif kirleticiler, nihayetinde hayvansal ürünlerin tüketimi veya insan beslenmesinin bir parçası olarak bitkilerin doğrudan alımı yoluyla insanlara geçer (Ong vd., 2024). Gıdalardaki yüksek

radyoaktif madde derişimleri (veya konsantrasyonları), insan sağlığı için potansiyel radyolojik tehlikelere yol açabilir. Süt, radyoaktivite seviyeleri açısından izlenmesi gereken önemli bir gıda maddesidir. Özellikle bebekler ve küçük çocuklar için, büyüme ve gelişme için gerekli olan proteinleri, yağları, karbonhidratları, vitaminleri ve mineralleri nedeniyle temel bir besin kaynağıdır. Nükleer serpintilerden dolayı meralara biriken radyoaktif maddeler, inekler ve keçiler otla beslendiklerinde alınır ve daha sonra süte salgılanır. Bu durum, sütü, çevreden insanlara güçlü bir radyonüklit vektörü sağladığı için besin zinciri içinde kontaminasyon için mükemmel bir sensör haline getirir (Ong vd., 2024).

Bebek mamaları ilgili temel endişelerden biri; ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K gibi doğal radyonüklitler ile olası bulaşmadır (Jemii ve Alharbi, 2018; Ong vd., 2024). Bebek mamalarındaki radyoaktif kirleticilere maruz kalan bebekler, gelişmekte olan vücutları ve zayıf bağışıklık sistemleri nedeniyle daha savunmasız olduklarından ciddi sağlık riskleriyle karşı karşıya kalabilirler (Okodeyi vd., 2024). Daha önce de ifade edildiği gibi sindirim yolu ile vücuda alınan bu radyonüklitler, farklı iç organlarda birikebilir ve radyasyon yaymaya devam ederek zamanla doku ve organlara zarar verebilir. Bu uzun süreli maruz kalma, kanser, kemik iliği baskılanması ve tiroid sorunları dâhil olmak üzere çeşitli sağlık sorunları geliştirme riskini artırır (Okodeyi vd., 2024). Bebeklerin hassas fizyolojisi, düşük radyasyon seviyelerinin bile orantısız bir şekilde yüksek sağlık etkilerine yol açabileceği anlamına gelir. Radyoaktif maddelerin yutulması ayrıca önemli miktarda kümülatif radyasyon dozuna yol açarak kronik sağlık sorunları ve gelişimsel sorunlar (biyoakümülasyon) riskini artırabilir (Okodeyi vd., 2024). Daha uzun bir yaşam beklentisi olan bebekler için bu biyoakümülasyon önemli bir uzun vadeli risk oluşturabilir (Okodeyi vd., 2024). Bebekler ve yürümeye başlayan çocuklar günlük beslenmelerinde besin maddeleri için süt ve süt ürünlerine bağımlı olduklarından ve yetişkinlere göre radyonüklitlerin yutulmasına karşı daha hassas olduklarından, toplumdaki bu hassas grubun güvenliğini sağlamak için bu ürünlerdeki radyoaktivite seviyelerinin izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bebeklerin maruz kalabileceği iyonlaştırıcı radyasyon seviyelerini değerlendirmek için yaygın olarak tüketilen bebek mamalarındaki en önemli doğal ve yapay radyonüklitlerin içeriklerini veya seviyelerini bilmek büyük önem taşımaktadır. Bebek mamalarındaki, özellikle süt ve süt tozundaki radyoaktivitenin izlenmesi birçok

ülkede en önemli öncelik haline gelmiştir ve bugüne kadar bu konuda birçok çalışma yürütülmüştür (Ababneh vd. 2010; Al-Farha vd., 2025; Begam vd., 2020; Chabouni vd., 2023; Desideri vd., 2019; Duong vd., 2021; Faria da Silva vd., 2022; Hulif vd., 2025; Jemii ve Alharbi, 2018; Ong vd., 2024; Peirovi-Minaee vd., 2024; Pervin vd., 2024; Poltabtim ve Saenboonruang, 2019; Tucaković vd., 2023; Uwatse vd., 2015). Ancak literatür araştırmamıza göre Türkiye'de tüketilen ticari bebek mamalarında radyoaktivitenin izlenmesine yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, Türkiye'de 6-36 aylık yeni doğanlar (bebekler) ve emekleyen veya yürümeye başlayan küçük çocuklar için ticari olarak satılan bebek mamalarında radyoaktiviteyi ölçen ve buna bağlı radyolojik sağlık risklerini değerlendiren ilk çalışmadır.

1.1 Tezin Kapsamı

Bu tezin kapsamını;

(1) Türkiye genelinde yaygın olarak tüketilen ithal ve yerli 46 ticari bebek formülleri (veya bebek sütleri veya bebek mamaları) ve bebek devam formülleri örneği,

(2) Bu bebek formülü veya bebek maması örneklerinin doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri,

(3) bu radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ölçülmesi için kullanılan yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlü yüksek çözünürlüklü bir gama-ışını spektrometresi ve

(4) araştırılan bebek formülü örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan iç ışınlamanın sebep olduğu radyolojik sağlık riskinin yeni doğanlar (< 1 yaş) ve emekleyen veya yürüyen küçük çocuklar (1-3 yaş) için değerlendirilmesi oluşturmaktadır.

1.2 Tezin Hedef ve Amacı

Bu çalışma, Türkiye'de 6-36 aylık yeni doğanlar (bebekler) ve emekleyen veya yürümeye başlayan küçük çocuklar için ticari olarak satılan bebek mamalarında

radyoaktiviteyi ölçen ve buna bağlı radyolojik sağlık risklerini değerlendiren ilk çalışmadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın hedefi,

(1) Büyük bir kısmı farklı ülkelerden ithal edilen bebek formülleri markalarının radyolojik kalitesi ile ilgili ayrıntılı veri elde etmeyi,

(2) Bebek formülleri markalarının içerebileceği radyoaktivite hakkında ebeveynlerde farkındalık oluşturabilmeyi ve

(3) İlgili doğal ve yapay radyonüklitler ve/veya yıllık etkin radyasyon dozu için ölçüt veya sınır veya kılavuz seviyelerin belirlenmesinde yol gösterici bilgileri elde etmeyi hedeflemektedir.

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın amacı,

(1) Türkiye'de farklı markalardaki bebek mamaları ve devam mamalarının doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve antropojenik (^{137}Cs) radyonüklit içeriklerini, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama- ışını spektrometrisi ile belirlemek,

(2) Bu mama örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin sindirilmesi nedeniyle bebekler (< 1 yaş) ve küçük çocuklar (1-3 yaş) için yıllık etkin radyasyon dozu ve mortalite ve morbidite kanser risklerini hesaplayarak radyolojik sağlık riskini değerlendirmek ve

(3) Elde edilen verileri, ulusal/uluslararası çalışmalarda elde edilenlerle, ulusal/uluslararası düzenlemelerde tavsiye edilen ölçüt, sınır veya kılavuz seviyeler ile karşılaştırılmaktır.

1.3 Tezin Yapısı

Bu tez, beş bölüm içermektedir. Her bir bölüm ile ilgili genel bilgi aşağıda verildi:

Birinci Bölüm (Giriş): Bebeklik döneminde beslenmenin ve anne sütünün önemi, anne sütünün yetersiz olduğunda bebek formülerlerinin işlevleri, bebek formüllerinin içerikleri ve içeriklerinin bebeklerin sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek çevresel

kirleticileri ve gıdaların radyonüklite ile kontamine olmaları hakkında genel bilgi sunuldu. Ayrıca, bu bölümde tezin kapsamı, hedefi, amacı ve kapsamı da belirtildi.

İkinci Bölüm (Literatürel Araştırma ve Değerlendirme): Bu bölümde, bebek mamalarının doğal ve yapay radyonüklit içeriklerinin belirlenmesi ve mamaların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risklerinin değerlendirilmesi ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar, uluslararası ve ulusal olmak üzere iki başlık altında kronolojik olarak ele alındı, özetlendi ve değerlendirildi. Ayrıca, bu bölümde tezin mevcut literatüre katkısı ve özgünlüğü hakkında bilgi verildi.

Üçüncü Bölüm (Çalışma ile İlgili Kuramsal Bilgi): Bu bölümde, iyonlaştırıcı radyasyon ve kaynakları, doz birimleri, radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri, radyoaktivite, doğal radyoaktif kaynaklar, radyoaktivite ölçe yöntemleri ve gama-ışını spektrometresi ile ilgili öz bilgi sunuldu ve okuyucu, ayrıntılı bilgi için kaynaklara yönlendirildi.

Dördüncü Bölüm (Malzeme ve Yöntem): Bu bölümde, bebek formülü örneklerinin temin edilmesi, laboratuvara getirilmesi, örneklerin hazırlanması, radyoaktivite ölçme yöntemi, verim kalibrasyonu, radyoaktivite ölçme işleminde kullanılan gama-ışını spektrometresi ve radyolojik sağlık risk değerlendirme yöntemi ile ilgili bilgi verildi.

Beşinci Bölüm (Bulgular, Tartışma, Sonuç ve Öneriler): Bu bölümde, bebek formülü ve devam formülü örneklerinde ölçülen doğal ve yapay radyonüklitlerin derişimleri, radyolojik sağlık riski değerlendirmek amacıyla hesaplanan yıllık etkin doz değerleri, mortalite ve morbidite kanser risk değerleri, tablolar ve grafikler hâlinde sunuldu. Elde edilen bulgular değerlendirildi, radyoaktivite bulguları, literatürde yer alan benzer çalışmalarda elde edilenlerle ulusal ve/veya uluslararası kurumların önerdiği sınır değerlerle karşılaştırıldı ve bazı öneriler verildi.

2. LİTERATÜREL ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde bebek mamalarının doğal ve yapay radyonüklit içeriklerinin belirlenmesi ve mamaların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risklerinin değerlendirilmesi ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar, uluslararası ve ulusal olmak üzere iki başlık altında değerlendirildi. Literatürdeki çalışmalar, kronolojik olarak ele alındı, özetlendi ve değerlendirildi.

2.1 Uluslararası Ölçekte Yapılan Çalışmalar

Osibote vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada, Birleşik Krallık, İrlanda, Danimarka, İsviçre, Fransa ve Hollanda'dan ithal edilen çeşitli hazır süt tozlarından büyük miktarda örnekler, 26 Nisan ile 10 Mayıs 1996 tarihleri arasında Lagos, Ibadan, Benin City, Ilorin, Minna, Abuja, Kaduna, Jos, Enugu, Sokoto, Maiduguri, Ile-Ife, Akure ve Port Harcourt gibi birçok büyük şehirde bulunan marketlerden toplanmış ve radyoaktivite ölçümüne tabi tutulmuştur. Çalışmada, süt tozu örneklerindeki doğal (^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerin aktivite derişimleri, dikey geometrili, eş eksenli yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile ölçülmüştür. Çalışma kapsamında, (1) süt tozu örneklerinin hiçbirinde ^{137}Cs tespit edilmemiştir ve (2) süt tozu örneklerinde ölçülen edilen ^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 23 Bq/kg; 4 Bq/kg ve 832 Bq/kg olarak bulunmuştur.

Melquiades ve Appoloni (2001) tarafından yapılan çalışmada, yüksek saflıkta germanyum dedektörüne sahip yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak Londrina (Brezilya)'da üretilen süt tozu örneklerindeki doğal (^{40}K ve ^{232}Th) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerin seviyeleri belirlenmiştir.

Navarrete vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, 1986'daki Çernobil kazasından sonra Meksika′nın, 20 yıl önce bir Avrupa ülkesinden ithal ettiği kontamine olmuş süt tozu örneğinin ^{137}Cs ve ^{40}K içeriği, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür (NaI(TI)) sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma

sonucunda, kontamine olmuş süt tozu örneğinin; ^{40}K doğal radyonüklit içeriğinin; ^{137}Cs içeriğinden yaklaşık 14 kat, daha büyük olduğu bulunmuştur.

Spasova vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, Uluslararası Radyoaktivite Çevresel İzleme Karşılaştırma Planı kapsamında süt tozundaki ^{137}Cs; ^{40}K ve ^{90}Sr aktivite derişimlerinin ölçülmesine ilişkin uygulamalar sunulmuştur.

Afshari vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, Tahran-İran'da tüketilen 30 farklı süt ve bazıları Fransa, Almanya, ABD ve İsveç gibi ülkelerden ithal edilen 11 süt tozu örneklerindeki ^{40}K'nin aktivite derişimleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörüne sahip yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında, örneklerde ölçülen ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimleri 31,0±6,1 Bq/kg (süt örnekleri) ve 17,1±3,3 Bq/kg (süt tozu örnekleri) olarak bulunmuş ve örneklerin tüketilmesine eşlik eden yıllık etkin radyasyon doz (YED) değerleri, 14 µSv/y (yetişkinler için) ve 6,4 µSv/d–15,9 µSv/d (çocuklar için) aralığında hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, araştırılan süt ve süt tozu örneklerinin, önemli sağlık tehlikelerine yol açmayacağı belirtilmiştir.

Ababneh vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, Ürdün'de tüketilen ve dünyanın çeşitli bölgelerinden ithal edilen 14 markaya ait süt tozu yerel marketlerden satın alınarak toplanmış ve bu örnekler, radyoaktif içerikleri açısından incelenmiştir. Çalışmada, süt tozu örneklerindeki ^{40}K; ^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{137}Cs'nin aktivite derişimleri, yüksek çözünürlüklü, yüksek saflıkta dikey geometrili koaksiyel germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında, (1) ortalama aktivite derişimi 348 Bq/kg olarak ölçülen ^{40}K'nin aktivite seviyesinin, bir markadan diğerine büyük ölçüde değişmediği, (2) ^{137}Cs, Arjantin'den alınan örneklerin hiçbirinde tespit edilemediği ve Avrupa'dan alınan örneklerde ortalama 0,4 Bq/kg olarak ölçüldüğü ve (3) ^{226}Ra ve ^{228}Ra'nın aktivite derişimlerinin, sırasıyla 0,5 Bq/kg–2,1 Bq/kg ve 0,8–1,3 Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışma sonucunda, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin halk için önemli bir radyasyon dozu oluşturmadığı gösterilmiştir.

Al-Zahrani (2012) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan'da (Cidde şehri) kullanılan bebek süt tozu örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri, yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamımda, (1) süt tozu örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri 234,2 Bq/kg (^{40}K); 0,5 Bq/kg (^{226}Ra) ve 0,4 Bq/kg (^{232}Th) olarak bulunmuş ve (2) bebeklerde süt tozu tüketiminden kaynaklanan toplam ortalama YED değeri; 410 µSv/y (≤1 y için) ve 157 µSv/y (1–2 y için) olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin, bebekler için önemli bir radyasyon dozu oluşturmadığı gösterilmiştir.

Alraefae vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Kuveyt'te tüketilen ve 12 farklı ülkeden ithal edilen 66 süt tozu örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{222}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta koaksiyel germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve süt tozu tüketiminden kaynaklanan YED değerleri, üç yaş grubu için hesaplanmıştır.

Emumejaye (2012) tarafından yapılan çalışmada, Nijerya'nın Delta Eyaleti'ndeki yerel pazardan toplanan 10 farklı süt tozu örneğinin ^{40}K'nin içeriği, Laboratuvar Florimetresi (Model CBS-380) kullanılarak analiz edilmiştir. Süt örneği için elde edilen sonuçlar, insan tüketimi için güvenli olduğundan emin olmak amacıyla Dünya Sağlık Örgütü standartlarıyla karşılaştırılmış ve izin verilen limitlerin altında bulunmuştur.

Alamoudi (2013) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan'ın Cidde şehrindeki yerel pazarlardan toplanan 20 farklı süt tozu örneğinin doğal radyonüklit seviyesi, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve örneklerin tüketilmesinden kaynaklanan YED′ler, farklı yaş grupları için hesaplanmıştır. Çalışma kapsamımda, süt tozu örneklerinde ölçülen ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th'nin ortalama aktivite derişimleri; 74,5 Bq/kg; 9,6 Bq/kg ve 6,8 Bq/kg olarak bulunmuş ve bu süt tozu örneklerinin tüketiminden kaynaklanan YED değeri; 2–7 yaş için 183,7 µSv/y; 7–12 yaş için 198,34 µSv/y; 12–17 yaş için 234,2 µSv/y ve yetişkinler (<17 y) için 29,4 µSv/y olarak hesaplanmıştır.

Prabhath vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan, Mumbai'deki pazarlardan toplanan 11 bir markaya ait popüler bebek maması örneğinin ^{210}Po içeriği, yaklaşık %23 sayım verimliliğine sahip yüksek çözünürlüklü bir silikon yarı iletken dedektör ile donatılmış Eurysis yapımı alfa spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde ölçülen ^{210}Po′un aktivite derişiminin; 0,08 Bq/kg–0,23 Bq/kg aralığında ve önerilen günlük tüketime göre hesaplanan YED değerleri ise 0,04 mSv/d–0,89 mSv/d aralığında değiştiği bulunmuştur.

Uwatse vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Malezya'nın Selangor kentindeki farklı süpermarketlerden toplanan 14 marka bebek sütü örneğindeki doğal radyonüklitlerin aktivite derişimleri, p tipi eş eksenli (koaksiyel) HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, araştırılan süt örneklerinde ölçülen doğal radyonüklitlerin tüketilmesinden (sindirilmesinden) kaynaklanan radyolojik sağlık riski, YED değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri; 3,1±1,8 Bq/kg (^{226}Ra); 2,6±2,5 (^{232}Th) Bq/kg ve 99,1±69,5 Bq/kg (^{40}K) olarak ölçülmüş ve ortalama YED değeri ise yeni doğanlar (≤1 yaş) için 635 μSv/y ve emekleyen bebekler (1–2 yaş) için 111 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, araştırılan süt örneklerin tüketilmesinin, henüz önemli bir radyolojik tehlike oluşturmadığı ifade edilmiştir.

Agbalagba vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Nijerya'da tüketilen 10 süt tozu ve 11 sıvı süt örneğinin doğal radyonüklit seviyesi, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 16,6 Bq/L; 10,6 Bq/L ve 317,6 Bq/L (süt) ve 19,3 Bq/kg; 12,1 Bq/kg ve 468,0 Bq/kg (süt tozu) olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, Nijerya'da tüketilen toz ve sıvı sütün radyolojik olarak güvenli olduğunu ve incelenen süt markalarının tüketicileri için herhangi bir ani radyasyon sağlığı tehlikesine neden olmayabileceğini göstermiştir.

Alharshan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan'daki yerel pazardan toplanan 33 süt tozu ve 13 sıvı süt örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{222}Th ve ^{40}K) ve

yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta koaksiyel germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında (1) süt tozu örneklerinde ölçülen ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimi; 285±29 Bq/kg olarak ve ^{137}Cs′nin aktivite derişiminin ise 0,05±0,02–1,3± 0,2 Bq/kg aralığında değiştiği ve (2) süt örneklerinde ölçülen ^{40}K ve ^{137}Cs′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 66±4 Bq/L ve 0,12±0,03 Bq/L olarak bulunmuştur.

Amin vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Irak′ın Bağdat şehrindeki marketlerden toplanan ve farklı ülkelerden ithal edilen 10 değişik markaya ait süt tozu örneğinin doğal radyoaktivite içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve süt tozu örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riski, YED ve kanser riski hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, 40K′nin ortalama aktivite derişimi 290,7 Bq/kg olarak ve ^{226}Ra ve ^{232}Th'nin ortalama aktiviteleri ise tespit seviyesinin altında bulunmuştur. Çocuklar (2–7; 7–12; 12–17) ve yetişkinler (≥17) için süt tozu tüketiminden kaynaklanan toplam ortalama YED değerleri, sırasıyla 82,2 μSv/y; 50,9 μSv/y; 29,8 μSv/y ve 22,55 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin, halk için önemli bir radyasyon dozu oluşturmadığını göstermiştir.

Priharti vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Malezya'daki yerel bir süpermarketten farklı markalardan satın alınarak temin edilen 26 süt tozu örneğinin doğal radyoaktivite içeriği, p tipi yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve ölçülen aktivite derişimleri daha sonra, YED ve kanser riskinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalışma kapsamında toplam YED değerlerinin; 35,2 μSv/y–461,7 μSv/y aralığında değiştiği ve yetişkinler için tahmini kanser riskinin; $1{,}2\times10^{-4}$ olduğu bulundu. Çalışma sonucunda, elde edilen verilerin, uluslararası olarak önerilen seviyenin altında olduğu ve Malezya'daki süt tozunun nüfus üzerinde önemli bir radyolojik etkiye neden olmayacağını tespit edildi.

Trdin ve Benedik (2017) tarafından yapılan çalışmada, iki farklı üreticiden temin edilen 0-12 aylık bebekler için beş bebek maması örneğinin doğal radyonüklit (^{238}U; ^{234}U; ^{230}Th ve ^{210}Po) içeriği, alfa spektrometresi ve radyokimyasal nötron aktivasyon analizi tekniği kullanılarak araştırılmış ve bu radyonüklitlerden kaynaklanan YED

değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, YED değerlerinin; 230 µSv/y – 350 µSv/y aralığında değiştiğini ve ana katkı veren radyonüklitin ^{210}Po olduğunu göstermiştir.

El Mestikou vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, farklı ülkelerden gelen ve Tunus pazarlarında satılan altı süt tozu markasının radyoaktivite içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; ^{40}K ve ^{137}Cs′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 160±19 Bq/kg ve 2,3±0,5 Bq/kg olarak ve ^{226}Ra ve ^{232}Th′nin aktivite derişimlerinin ise tespit sınırının altında olduğu bulunmuştur. Çalışmada YED değerleri, 1 yaşındaki bebekler için 102 µSv/y ve 1–2 yaşındaki bebekler için 225 µSv/y olarak hesaplanmıştır. Radyolojik risk hesaplaması, bu sütlerin tüketiminin bebek sağlığı üzerinde önemli bir tehdit oluşturmadığını göstermiştir.

Onosohwo vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Malezya'nın Selangor kentindeki büyük süpermarketlerden satılan, farklı ülkelerden ithal edilen ve Malezya'da üretilen 14 markaya ait bebek süt tozu örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta koaksiyel germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında örneklerde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{40}K ve ^{137}Cs′nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 3,1 Bq/kg; 2,6 Bq/kg; 99,1 Bq/kg ve 0,3 Bq/kg olarak bulunmuştur. İncelenen süt toz örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan ortalama YED değerleri, 1 yaş ve üzeri bebekler için 635 µSv/y ve 1–2 yaş arası bebekler için 111 µSv/y olarak hesaplanmıştır.

Jemii ve Alharbi (2018), tarafından yapılan çalışmada, farklı ülkelerden ithal edilen ve Suudi Arabistan pazarlarında en çok ticarileştirilen bebek maması olarak kullanılan beş inek sütü tozu örneğinin doğal radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama-ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında süt tozu örneklerinde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 0,5±0,1 Bq/kg; 0,5±0,1 Bq/kg ve 372±4 Bq/kg olarak bulunmuş ve ortalama YED değeri, 1 yaşındaki bebekler için 0,62 mSv/y ve 1–2 yaş bebekler için 0,24 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, bu süt tozu örneklerinin

tüketiminden kaynaklanan önemli bir radyasyon dozu ve bebeklerde herhangi bir risk olmadığını göstermiştir.

Ahmed vd. (2019), tarafından yapılan çalışmada, Irak'taki çocuklar tarafından tüketilen 10 farklı tahıl kökenli bebek gıdası (maması) örneğinin doğal radyonüklit seviyesi, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmıştır ve bu mamalarının tüketiminden kaynaklanan YED değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde ölçülen ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 8,5±2,2 Bq/kg, 4,5±0,8 Bq/kg ve 223,9±29,2 Bq/kg olarak bulunmuş ve toplam ortalama YED değeri; 0,6±0,1 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, araştırılan örneklerin radyolojik açıdan güvenli olduğunu ortaya koymuştur.

Desideri vd. (2019), tarafından yapılan çalışmada, İtalyan bebekler tarafından yaygın olarak tüketilen 25 popüler bebek mamasının (pirinç kreması, homojenize meyve, balık, et, bebek peyniri ve süt tozu) doğal ve yapay radyoaktivitesi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin belirlenmesi dört farklı sıvı sintilasyon, gama, alfa ve kütle spektrometrisi teknikleri gerçekleştirilmiştir: a) ^{40}K ve ^{137}Cs için yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometrisi; b) ^{210}Po için alfa spektrometrisi; c) ^{226}Ra için sıvı sintilasyon sayımı ve d) ^{232}Th ve ^{238}U için kütle spektrometrisi (ICP-MS) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde ölçülen (1) ^{210}Po; ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K′nin aktivite derişimleri, sırasıyla 0,005 ila 0,238 Bq/kg; 0,0082 ila 1,65 Bq/kg; 0,0003 ila 0,015 Bq/kg ve <13,6 ila 233,3 Bq Bq/kg aralığında değiştiği; (2) ^{137}Cs ve ^{226}Ra′nın aktivite derişimleri ise tespit sınırının altında olduğu ve (3) örneklerdeki ^{210}Po; ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K alımına bağlı olarak bir yaşındaki bebekler için hesaplanan YED değerlerinin; 280 ila 800 µSv/y aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışma sonucunda, İtalya'da mevcut olan bebek mamasının bebekler üzerinde önemli bir radyolojik etki oluşturmayacağı gösterilmiştir.

Yii (2019) tarafından yapılan çalışmada, Malezya'daki süt tozu örneklerindeki bazı doğal (^{40}K; ^{226}Ra; ^{228}Ra; ^{232}Th ve ^{238}U) ve yapay (^{134}Cs ve ^{137}Cs) radyonüklitlerin derişim seviyeleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile belirlenmiş ve bu örneklerin tüketilmesine eşlik eden radyolojik risk

değerlendirilmiştir Çalışma kapsamında örneklerde analiz edilen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimi; 294 Bq/kg (^{40}K); 1,7 Bq/kg (^{226}Ra); 1,3 Bq/kg (^{228}Ra); 1,0 Bq/kg (^{232}Th); 1,0 Bq/kg ($^{238.}$ U) ve 0,3 Bq/kg (^{137}Cs) olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, incelenen süt tozu örneklerinin tüketiminden kaynaklanan radyolojik riskin, insan sağlığı üzerinde önemli olmadığı gösterilmiştir.

Poltabtim ve Saenboonruang (2019) tarafından yapılan çalışmada, Tayland, Bangkok'taki yerel marketlerden satın alınarak toplanan dokuz farklı ticari bebek maması örneğinin doğal ve yapay radyonüklit içeriği, ters elektrotlu, kapalı uçlu, koaksiyel geometrili yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmış ve bu mamaların tüketilmesine karşılık gelen radyolojik sağlık riskler, YED'ler hesaplanarak değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında, (1) bebek mamalarında ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri; 3,2±0,5 Bq/kg (^{226}Ra); 1,2±0,1 Bq/kg (^{232}Th); 213,2±25,5 Bq/kg (^{40}K) ve 4,9±0,7 Bq/kg (^{137}Cs) olarak bulunmuş ve (2) ortalama YED değeri, ≤1 yaş için 762,8±91,3 μSv/y ve 1–2 yaş için ise 189,6±22,5 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Genel sonuçlar, Tayland'daki bebek mamalarının etkili doz ve radyolojik sağlık riskleri oluşturmadığını, dolayısıyla bebekler için güvenli tüketim anlamına geldiğini göstermiştir.

Al-Sharabi (2020) tarafından yapılan çalışmada, Yemen'de en çok tüketilen yedi süt tozu örneğinin doğal radyonüklit içeriği, p-tipi koaksiyel geometrili yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmış ve bu mamaların tüketilmesine karşılık gelen radyolojik sağlık riskler, Çalışma kapsamında, süt tozu örneklerinde ölçülen ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 5,4 Bq/kg; 31,3 Bq/kg ve 96,8 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca, toplam ortalama YED değerleri, bebekler, çocuklar ve yetişkinler için sırasıyla 970,6 μSv/y; 660,8 μSv/y ve 315,5 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu örneklerinin, radyolojik sağlık risk oluşturmadığını, dolayısıyla bebekler için güvenli tüketim anlamına geldiğini göstermiştir.

Begam vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Bangladeş Dakka şehri yakınlarındaki Savar kentsel alanı ve çevresindeki yerel pazarlardan toplanan bebek gıdaları

örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve YED değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) süt örneklerinde ölçülen ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 5,4±0,4 Bq/kg; 5,7±0,5 Bq/kg ve 334±12 Bq/kg, (2) tahıl örneklerinde sırasıyla 2,9±0,4 Bq/kg; 3,9±0,3 Bq/kg ve 156±8 Bq/kg olarak bulunmuştur. Süt ve tahıl tüketiminden kaynaklanan doğal radyonüklitlerin yutulması sonucu oluşan YED değeri, <1 yaş grubu için 0,31 mSv/y ve 1–2 yaş grubu için 0,2 mSv/y olarak hesaplanmıştır.

Benaissa vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Cezayir'de tüketilen ve farklı ülkelerden ithal edilen 12 süt tozu örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 1,2 ± 0,8 Bq/kg; 1,5 ± 1,0 Bq/kg; 18,1±3,4 Bq/kg ve 0,2 ± 0,1 Bq/kg olarak bulunmuştur. Bir yaşın altındaki bebekler için ithal edilen süt tozundaki tüketilmesinden kaynaklanan ortalama YED değerleri; 153,2 µSv/y (^{226}Ra); 48,1 µSv/y (^{232}Th); 15,9 µSv/y (^{40}K) ve 0,03 µSv/y (^{137}Cs) olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu markalarının güvenle ve herhangi bir kısıtlama olmaksızın tüketilebileceğini ortaya koymuştur.

Din (2020) tarafından yapılan çalışmada, Mısır'ın Qena şehrindeki pazarlardan toplanan 14 marka bebek sütü tozu örneğinde bulunan doğal (^{226}Ra; ^{232}Th and ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerin aktivite derişimleri, n tipi koaksiyel yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüş ve YED değerleri, farklı bebek yaş grupları için hesaplanmıştır. Çalışma kapsamımda, örneklerde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri, 0,9 ± 0,2 Bq/kg (^{226}Ra); 0,6±0,1 Bq/kg (^{232}Th); 478±25 Bq/kg (^{40}K) ve 0,4±0,1 Bq/kg (^{137}Cs) olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin, bebekler üzerinde önemli bir radyolojik etki oluşturmayacağı gösterilmiştir.

Shakir ve Muttelab (2020) tarafından yapılan çalışmada, Irak Babil hükümetindeki yerel pazarlardan toplanan çeşitli marka adları arasında en çok bulunan süt tozu

örneğinin doğal radyonüklit içeriği, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmış ve örneklerin tüketilmesinden kaynaklanan YED′ler hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında örneklerde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimleri; 20,7 Bq/kg; 12,4 Bq/kg ve 377,5 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, halkın süt tozu tüketiminden kaynaklanan YED değerlerinin, Dünya Sağlık Örgütü tarafından önerilen doz sınırının altında olduğunu ortaya koymuştur.

Tawalbeh vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, altı farklı markadan altı çeşit bebek sütü tozu örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile araştırılmış ve YED değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında örneklerde ölçülen ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 1,1±0,3 Bq/kg; 0,4±0,1 Bq/kg ve 346±20 Bq/kg olduğu bulunmuş ve bebeklerin süt tozu nedeniyle maruz kalabilecekleri ortalama YED değeri 268 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin, önemli bir sağlık tehlikesi oluşturmayacağı gösterilmiştir.

Duoang vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Vietnam'da yaygın olarak tüketilen sekiz markaya ait taze süt örneği, yerel ve prestijli marketlerden satın alınarak toplanmış ve bu örneklerdeki doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, %30 bağıl verimliliğe sahip yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, ayrıca araştırılan taze süt örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlı riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, süt örneklerinde ölçülen doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite derişimleri, (0,6±0,2 Bq/kg–1,2±0,2 Bq/kg) (^{232}Th), (1,4 ± 0,2 Bq/kg–2,5 ± 0,2 Bq/kg) (^{226}Ra), (341±6 Bq/kg–387±7 Bq/kg) (^{40}K) ve (<0,1 Bq/kg–0,13±0,06 Bq/kg) (^{137}Cs) aralığında ölçülmüş ve tüm yaş grupları (yeni doğanlar, çocuklar ve yetişkinler) için toplam ortalama YED değerleri, Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) kılavuz seviyesinin çok altında hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, araştırılan tüm markaların tüketiminin radyolojik açıdan güvenilir olduğu belirtilmiştir.

Mohamed vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Mısır'da yaygın olarak tüketilen 34 farklı markaya ait bebek maması toz örneklerinin element (Al, Br, Ca, Cl, Co, Cu, Fe, I, K, Mg, Mn, Na, Rb, Sb, Sc, Se ve Zn) ve doğal radyonüklit (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) içeriği, enstrümantal nötron aktivasyon analiz yöntemi ve yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda örneklerde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 3 Bq/kg; 1 Bq/kg ve 121 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, bebek sütü (mama) örneklerinin birçoğunun temel elementi yeterli miktarda sağladığını ve bebekler için erken yaşam evrelerinde uygun bir besin kaynağı olarak kabul edildiğini ve tüm bebek mamaları örneklerinin, ihmal edilebilir düzeyde radyasyon riski taşıdığını ortaya koymuştur.

Sarker vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Bangladeş'in Dakka şehrindeki yerel pazarlardan toplanan 20 farklı markaya ait süt tozu örneğinin doğal radyonüklit (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) içeriği, yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü ve yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında örneklerde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K′nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 9,6±2,1 Bq/kg; 9,0±1,5 Bq/kg ve 164,5±3,7 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, Bangladeş'te yerel veya ithal süt tozu tüketiminden kaynaklanan radyasyon dozunun, düşük olduğunu ortaya koymuştur.

Caridi vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, İtalya'da üretilen ve büyük perakendecilerde satılan dört farklı erken çocukluk (iki yaşına kadar) gıda tipindeki (homojenize meyve, homojenize et, çocuk bisküvileri ve bebek makarnaları) 20 örneğin, doğal (^{40}K) ve antropojenik (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; ^{137}Cs'nin aktivite derişimleri, minimum tespit edilebilir aktiviteden daha düşük bulunmuştur.

Faria da Silva (2022) tarafından yapılan çalışmada, Brezilya′nın Rio de Janeiro şehrinden toplanan bebek sütü örneklerinin örneğinin doğal (^{40}K; ^{226}Ra ve ^{228}Ra) radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir yüksek çözünürlüklü gama- ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmış ve örneklerin tüketilmesine

eşlik eden radyolojik risk, YED ve kanser riski hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, bebek sütü örneklerinden ölçülen ^{40}K ve ^{228}Ra′nın en yüksek aktivite derişimi, sırasıyla 242±9 Bq/kg ve 5±1 Bq/kg olarak ve ^{226}Ra ise tespit sınırının altında bulunmuştur. Çalışma sonuçları, araştırılan bebek sütü örneklerinin, bebeğin yaşamının ilk iki yılında alımı açısından önemli bir risk oluşturmadığını göstermiştir.

Chabouni vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli ülkelerden ithal edilen ve Cezayir'de tüketilen 22 süt tozu örneğinin doğal (^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü (Canberra model GC3018) bir yüksek çözünürlüklü gama- ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, ayrıca araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlı riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) bebek süt tozu örneklerinde ölçülen doğal radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin, (133,6±1,8 Bq/kg–196,0±2,6 Bq/kg) (^{40}K), (1,35±0,03 Bq/kg–2,70±0,07 Bq/kg) (^{226}Ra) ve (1,34±0,03 Bq/kg–1,63±0,06 Bq/kg) (^{232}Th) aralığında, erişkin süt tozu örneklerinde ölçülen doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin, (110,5±1,5 Bq/kg–687,9±8,9 Bq/kg) (^{40}K), (1,38±0,04 Bq/kg–2,59±0,10 Bq/kg) (^{226}Ra), (1,25±0,03 Bq/kg–2,63±0,09 Bq/kg) (^{232}Th) ve (3,60±0,07 Bq/kg–7,78±0,11 Bq/kg) (^{137}Cs) aralığında değiştiği bulunmuş ve (3) süt tozu tüketiminden kaynaklanan YED değeri yeni doğanlar (≤1 y) için 583,8 μSv/y ve yetişkinler (≥17 y) için 56,9 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen süt toz örneklerinin, nüfus üzerinde önemli bir radyolojik etkiye sahip olmadığı gösterilmiştir.

Caridi vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, İtalya'da tüketilen 20 süt örneğinin doğal (^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama- ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, süt örneklerinde ölçülen ^{40}K′nin aktivite derişiminin; 30±4 Bq/L–48±6 Bq/L aralığında değiştiği ve ^{137}Cs′nin aktivite derişiminin, minimum ölçülebilir aktivite değerinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda, incelenen süt örneklerinin tüketiminden kaynaklanan radyasyon dozunun radyolojik açıdan toplum üzerinde önemli bir sağlık etkisi oluşturmadığı gösterilmiştir.

Tucaković vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Hırvatistan'da ticari olarak yaygın ve mevcut 31 erken çocuk (< 1 yaş) gıdası (süt tozu, tahıl lapası tozu, meyve lapası, sebze içeren homojenize öğünler ve sebze ve et içeren homojenize öğünler) örneğinin, doğal (^{40}K ve ^{226}Ra) ve yapay (^{137}Cs ve ^{90}Sr) radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama- ışını spektrometresi ve sıvı sintilasyon sayacı kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında örneklerde ölçülen 40K′nin aktivite derişimleri; 30 Bq/kg–262 Bq/kg aralığına bulunmuş ve 226Ra ise örneklerin çoğunda her türlü gıdada, 0,9 Bq/kg'ı geçmeyen küçük miktarlarda görülmüştür. ^{137}Cs; ^{40}K'nin de en yüksek değerleri gösterdiği örneklerde ölçülen maksimum aktivitelere (0,65±0,32 Bq/kg ve 0,38±0,14 Bq/kg) sahip olan süt tozu örneklerinin yalnızca bazılarında tespit edilmiştir. Meyve, sebze ve et yemeklerinin çoğunda ^{90}Sr tespit edilmiş ve patates ve havuç içeren sebze lapasında 0,065±0,025 Bq/kg'a kadar ulaşmıştır. Sadece bir süt tozu örneğinde tespit edilmiş ve tahıl lapası örneklerinin hiçbirinde tespit edilmemiştir. Çalışmada bebekler için hesaplanan YED′nin mümkün olan en yüksek değerinin, önerilen 1 mSv/y sınırını aşmadığı gösterilmiştir.

Ong vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Singapur'daki süpermarketlerden ve online alışveriş platformlarından farklı marka ve menşe ülkeler olan toplam 32 süt tozu örneğinin doğal (^{40}K; ^{226}Ra ve ^{228}Ra) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir yüksek çözünürlüklü gama- ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, ayrıca araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlı riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, küçük çocuklar tarafından tüketilen süt tozu örneklerinde ölçülen ^{228}Ra; ^{226}Ra; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 0,5 Bq/kg; 0,2 Bq/kg; 263 Bq/kg ve 0,1 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu tüketiminin bebekler ve küçük çocuklar için önemsiz bir sağlık riski oluşturduğunu göstermiştir.

Okedeyi vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Güneybatı Nijerya, Lagos'un Akesan bölgesindeki yerel pazarlardan toplanan dört bebek maması örneğinin (Nutribom, Friska, Dano ve Cowbell) doğal radyonüklit içeriği, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmış ve radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında süt tozu

örneklerinde ölçülen ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th′nin aktivite derişimlerinin, sırasıyla 212,6 Bq/kg–354,3 Bq/kg; 37,6 Bq/kg–129,3 Bq/kg ve 83,2 Bq/kg–223,9 Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Skoko vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Bu çalışma için, Hırvatistan'da bebekler (< 1 yaş) tarafından tipik olarak tüketilen seçilmiş gıda (süt tozu formülleri, tahıl tozu lapaları, meyve ve sebze lapaları ve hem sebze hem de et içeren lapalar) örneklerinin alfa- (^{210}Po ve $^{228,230,232}Th$) ve gama- (^{40}K; $^{226,228}Ra$ ve ^{137}Cs) radyasyonu yayınlayan radyonüklit içerikleri, düzlemsel silikon yarı iletken dedektörlü (450 mm² aktif alan) altı bölmeli bir alfa spektrometresi ve yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, (1) ^{210}Po; 502 mBq/kg'a kadar ulaşan tüm örnek türlerinde tespit edilmiştir; (2) ^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{232}Th izotoplarının en yüksek aktivite derişimleri, sırasıyla 230 mBq/kg; 1,29 Bq/kg ve 52 mBq/kg olarak bulunmuştur ve (3) bebekler için YED; 0,69 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, bebekler için Hırvatistan'da bulunan gıdaların tüketiminden kaynaklanan tahmini etkin alım dozunun, önerilen doz sınırlarının altında olduğunu ve bu nedenle radyolojik bir endişe oluşturmayacağını göstermiştir.

Spahiu ve Shyti (2024) tarafından yapılan çalışmada, Arnavutluk′un Tiran şehrindeki bazı pazarlardan toplanan 14 bebek süt tozu örneğinin doğal (^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmış ve örneklerin tüketilmesine eşlik eden radyolojik sağlık riskler, ≤ 1 yaş ve 1–2 yaş olmak üzere iki yaş grubu için YED′ler hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin aktivite derişimleri, sırasıyla 92,8± 4,3–400,5±17,0 Bq/kg; 0,8±0,2–4,9± 0,2 Bq/kg ve 0,19±0,02–1,89 ± 0,14 Bq/kg aralığında değiştiği ve ^{137}Cs için en yüksek değerin 0,36±0,03 Bq/kg olduğu bulunmuştur. Ortalama YED değerleri, ≤1 yaş bebekler için 664,5±31,1 μSv/y ve 1–2 yaş bebekler için 138,5±5,4 μSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, araştırılan örneklerin, Arnavutluk'taki bebekler tarafından normal olarak tüketilebileceğini ortaya koymuştur.

Younis vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Pakistan'ın farklı bölgelerinden toplanan 14 süt tozu örneğinin doğal radyonüklit içeriği, yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmış ve örneklerin tüketilmesine eşlik eden radyolojik sağlık risk değerlendirilmiştir Çalışma kapsamında, süt tozu örneklerinde ölçülen ^{40}K ve ^{232}Th'nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 231 Bq/kg ve 7 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu örneklerinin radyolojik olarak güvenli olduğunu ortaya koymuştur.

Sundström vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, İsveç′teki süpermarketlerden satın alınarak toplanan 59 bebek maması ürünü (süt tozu, yulaf lapası, sütlü tahıl içeceği, balık, et ve vejetaryen) örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri, yüksek çözünürlüklü bir gama- ışını spektrometri sistemi ve alfa spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, örneklerde tespit edilen ana radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri 120±70 mBq/kg (^{40}K); 60±40 mBq/kg (^{238}U); 100±50 mBq/kg (^{234}U); 330±260 mBq/kg (^{226}Ra); 780±1200 mBq/kg (^{210}Po) ve 360±290 mBq/kg (^{232}Th) olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, araştırılan ticari bebek mamalarının tüketiminden kaynaklanan düşük bir radyolojik risk olduğunu gösterilmiştir.

Faizra vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, Malezya, Johor'daki süpermarketlerden toplanan beş markaya ait yedi süt tozu örneğinin element bileşimini ve radyoaktivitesi X-ışını difraktometresi (XRD ve X-ışını flüoresans (XRF) spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır.

Al-Farha vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, Irak'ın Ninova Eyaleti'ndeki çeşitli yerel pazarlardan toplanan 15 süt tozu örneğinin doğal radyonüklit içeriği, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile araştırılmış ve radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, örneklerde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 3,8±0,6 Bq/kg; 1,0±0,4 Bq/kg ve 257±5 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçları, araştırılan tüm markaların halk sağlığı için herhangi bir radyolojik risk oluşturmadığını ve tüketim için güvenli olduğunu göstermiştir.

Hulif vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, Yemen'in Sana'a şehrindeki çeşitli marketlerden toplanan 16 süt tozu örneğinin doğal radyonüklit içeriği, yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır ve radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, araştırılan süt tozu örneklerinin tüketilmesinin, radyolojik açıdan güvenli olduğunu ortay koymuştur.

2.2 Ulusal Ölçekte Yapılan Çalışmalar

Kırış vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun, Trabzon ve Rize illerinden toplanan 12 farklı markaya ait inek sütü örneklerinin radyoaktivite seviyeleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlenmiş ve süt örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan YED değerleri hesaplamıştır. Çalışma kapsamında (1) süt örneklerinde ölçülen ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 3,2 Bq/L; 1,1 Bq/L; 31,3 Bq/L ve 0,5 Bq/L olarak bulunmuş ve YED değerleri; 21,2 µSv/y (^{226}Ra); 6,1 µSv/y (^{232}Th); 0,1 µSv/y (^{137}Cs) ve 4,7 µSv/y (^{40}K) olarak hesaplanmıştır.

Ağuş (2017) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de üretilen farklı marka süt ve süt ürünleri örneklerinin (beyaz peynir, peynir altı suyu tozu, süt tozu, labne, kaşkaval peyniri) doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, amaçla p tipi %110 bağıl verimliliğe sahip eş eksenli yüksek saflıkta germanyum dedektörüne sahip gama-ışını spektrometresi ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, (1) beyaz peynir, peynir altı suyu tozu, süt tozu, labne, kaşkaval peyniri ve süt örneklerinde ölçülen 40K′nin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 63,1±7,1 Bq/kg; 392,6±40,2 Bq/kg; 482,1±38,6 Bq/kg; 152,0±12,1 Bq/kg; 48,7±5,8 Bq/kg ve 52,2±4,2 Bq/kg olarak ve (2) ^{137}Cs ve ^{232}Th′nin (süt ürünleri hariç) aktivite derişimleri, tespit sınırının altında bulunmuştur.

Biçer ve Çetinkaya (2023) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye′nin Kütahya ilinden toplanan 12 ultra yüksek sıcaklık süt örneğinin doğal radyoaktivitesi içeriği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında örneklerin ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklit içeriği,

talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür sintilasyon dedektörlü bir gama- ışını spektrometresi ile ve ^{222}Rn ise E-perm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, araştırılan süt örneklerinin tüketilmesinin, güvenli olduğunu ortaya koymuştur.

2.3 Literatürdeki Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Yukarıda kronolojik olarak verilen literatürel çalışmalar ile ilgili yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir:

(1) Uluslararası ölçekte literatürde yer alan uluslararası çalışmalar, Nijerya, Brezilya, Meksika, İran, Ürdün, Suudi Arabistan, Kuveyt, Hindistan, Mısır, Vietnam, Singapur, Pakistan, Irak, Malezya, Tunus, İtalya, Tayland, Yemen, Bangladeş, Cezayir, Hırvatistan, Arnavutluk ve İsveç gibi ülkelerde tüketilen genellikle süt tozu örneklerindeki doğal ve/veya yapay radyoaktivitenin araştırılması ve radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi ile ilgilidir.

(2) Ulusal ölçekte literatürde yer alan uluslararası çalışmalar çok sınırlıdır ve sadece üç çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, süt örneklerindeki doğal ve/veya yapay radyoaktivitenin araştırılması ve radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi ile ilgilidir.

(3) Uluslararası ölçekte yapılan çalışmaların çok azı (dört tanesi) bebek mamaları ile ilgili iken ulusal ölçekte ise bebek mamaları ile ilgili herhangi bir çalışma mevcut değildir.

(4) Genel olarak araştırılan örneklerin doğal radyonüklit, içeriği olarak ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{228}Ra ve ^{40}K ve yapay radyonüklit olarak ^{137}Cs dikkate alınmıştır.

(4) Çalışmalarının büyük bir kısmında yukarıda sözü edilen radyonüklitlerin aktivite derişimleri yüksek saflıkta germanyum yarı kristal dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür.

(5) Çalışmalar kapsamında belirlenen radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik riskler, genel olarak yıllık etkin radyasyon dozu ve ilişkili yaşam boyu kanser riskleri hesaplanarak değerlendirilmiştir.

2.4 Çalışmanın Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı

Bu çalışma, Türkiye'de bebekler (< 1 yaş) ve emekleyen veya yürüyen küçük çocuklar (1-3 yaş) için ticari olarak satılan yerli ve ithal bebek mamalarının veya formüllerinin doğal ve yapay radyonüklit içeriklerini belirlemek ve buna bağlı radyolojik sağlık risklerini değerlendirmek amacıyla yapılan ilk çalışmadır. Bu çalışmanın yeniliği, bir kısmı Avrupa ülkelerinden ithal edilen bebek mamalarının radyolojik kalitesi konusunda tüketicilerde farkındalık yaratmak ve bu mamaların tüketilmesi ilgili doğal radyonüklitlerin sınır değerlerini veya kılavuz seviyelerini veya etkin radyasyon dozlarını belirlemek için kullanılabilecek bir veri tabanı oluşturmaya yönelik olarak yol gösterici bilgi niteliğinde olmasıdır.

3. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KURAMSAL BİLGİ

3.1 Radyasyon ve Etkileşim Süreçleri

3.1.1 Radyasyon

Kütle ve enerji, evreni oluşturan iki ana unsurdur. En temel düzeyde, bu iki unsur, bazen kütle, bazen de enerji olarak kendini gösteren tek bir gerçekliği temsil eder. Einstein'ın ünlü kütle-enerji ilişkisi $E = mc^2$ aracılığıyla birbirleriyle karmaşık bir şekilde ilişkilidirler. Tıpkı madde gibi, enerji de parçacıklar veya dalgalar aracılığıyla uzayda bir noktadan diğerine hareket edebilir. Bu enerji taşıyıcıları her zaman bir kaynaktan gelir ve bir madde tarafından soğurulana veya yok edilene kadar uzayda yolculuklarına devam ederler. "Radyasyon" terimi, kütle ve enerjinin uzayda bu şekilde taşınmasını tanımlamak için kullanılır. Potansiyellerinin farkına varılmasından bu yana, radyasyon çeşitli alanlardaki teknolojik gelişmelerimizde merkezi bir rol oynamıştır. Örneğin, hepimiz tıbbi teşhis ve tedavide radyasyonun faydalarından yararlanıyoruz. Öte yandan, dünya ayrıca atom patlamaları ve radyasyona maruz kalma şeklinde radyasyonun tehlikelerine de tanık olmuştur. Başka bir ifadeyle radyasyon hayatın bir gerçeğidir. Radyasyonun her yerde doğal olarak mevcut olduğu bir dünyada yaşıyoruz. Güneş'teki nükleer tepkimelerden kaynaklanan ışık ve ısı, varlığımız için olmazsa olmazdır. Radyonüklitler çevremizde doğal olarak bulunur ve vücudumuz karbon-14 (^{14}C), potasyum-40 (^{40}K) ve polonyum-210 (^{210}Po) gibi radyonüklitleri doğal olarak içerir. Dünya'daki tüm yaşamın oluşmasında radyasyonun varlığı çok önemli rol oynamıştır. X- ışınlarının ve radyoaktivitenin 100 yıldan uzun bir süre önce keşfedilmesinden bu yana, radyasyon ve radyoaktif maddeleri yapay olarak üretmenin yollarını bulundu. X- ışınlarının ilk kullanımı, 1895'teki keşiflerinden sonraki altı ay içinde tıbbi teşhis amacıyla gerçekleşti. Dolayısıyla radyasyon kullanımının faydaları çok erken bir dönemde ortaya konmuş olsa da, radyasyonun potansiyel tehlikeleri de 1900'lerin başlarında farkında olmadan kendilerini X- ışınlarına aşırı maruz bırakan doktorlar ve cerrahlar tarafından fark edildi. O zamandan beri, radyasyon ve radyoaktif maddelerin birçok farklı uygulama alanı geliştirildi. Radyasyon, madde üzerinde oluşturduğu etkilere göre iyonlaştırıcı ve

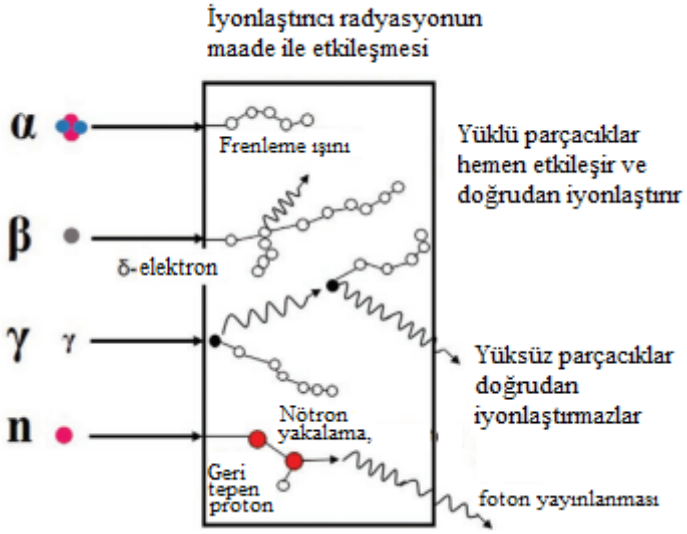
iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği ortamın (hava, su, canlı dokular vb.) atomlarından veya moleküllerinden elektronları koparabilecek enerjiye sahip parçacık (enerjik elektronlar, protonlar, alfalar, ağır iyonlar, nötronlar vb.) ve dalga (kozmik ışınları, X-ışınları ve gama-ışınları) biçimindeki radyasyonları içerir. Bir atomu iyonlaştırmak için gereken minimum enerji (iyonlaşma potansiyeli), alkali elementler için birkaç elektron volttan helyum (soy gaz) için 24,5 eV'ye kadar değişir. İyonlaşma doğrudan veya dolaylı olabilir. Enerjik elektronlar (β-ışını veya radyasyonu), enerjik elektronlar, alfa (α)-parçacıkları ve ağır iyon gibi yüklü parçacıklar, doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanır ve bunlar, ortamdaki atomların yörünge elektronlarıyla doğrudan Coulomb etkileşimleri yoluyla ortama enerji aktarırlar. Nötronlar (n) ve fotonlardan oluşan X-ışınları ve gama (γ)-ışınları gibi yükü olmayanlar, dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanır ve bunlar, iki aşamalı bir süreçle ortama enerji aktarırlar. İlk adımda yüklü bir parçacık ortama salınır (fotonlar elektron veya pozitronları, nötronlar ise protonları veya daha ağır iyonları serbest bırakır). İkinci adımda ise serbest kalan yüklü parçacıklar, ortamdaki atomların yörünge elektronlarıyla doğrudan Coulomb etkileşimleri yoluyla ortama enerji aktarır (Krane, 1987). Yüksek nüfuz etme gücü ve atom yapısını değiştirme yeteneği, iyonlaştırıcı radyasyonun iyi amaçlar için kullanılmasını sağlar; örneğin, X-ışını, gama-ışını, beta ve pozitron radyasyonu, tıbbi görüntüleme, kanser tedavisi, tahribatsız muayene ve çeşitli endüstriyel ölçümlerde kullanılır. İyonlaştırıcı radyasyonun sterilize edici etkileri, tıbbi aletlerin sterilizasyonu ve gıda ışınlaması tekniği için faydalıdır. Bununla birlikte, aşırı veya uzun süreli maruziyetin insanlar için tehlikeli olabilmesi gibi bir dezavantajı da vardır.

Öte yandan, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon daha az enerjiktir, daha az nüfuz edicidir ve maddeden elektron koparamaz, bu da onu iyonlaştırıcı radyasyona kıyasla insan sağlığı için daha az tehlikeli kılar. Elektromanyetik spektrumda yer alan ultraviyole, görünür ışık, kızılötesi, mikrodalga ve radyo dalgaları iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun radar iletişimi, yemek pişirme (mikrodalgalar), bilgi iletimi (radyo dalgaları), ısıtma, kurutma, pişirme, seraları ısıtma, kızılötesi fotoğrafçılık ve ısı arayan füzeler (kızılötesi), görme, sıradan fotoğrafçılık, lazer ışınları (görünür ışık), spektroskopi, mineral analizi, sahteciliği tespit etme, bakteri öldürme gibi değerli kullanımları vardır.

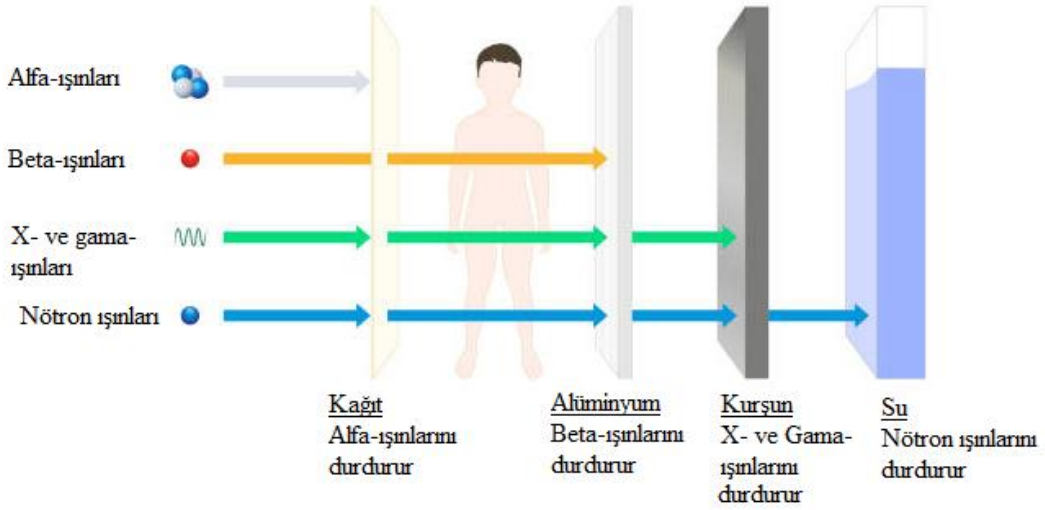
3.1.2 İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde İle Etkileşme Süreçleri

Daha önce de ifade edildiği gibi iyonlaştırıcı radyasyon maddeyle etkileşime girdiğinde, maddeyi oluşturan atom veya moleküldeki elektronu uyarabilir ve/veya elektronu koparabilir. Bu açıdan ele alındığında iyonlaştırıcı radyasyon iki gruba ayrılabilir: Yüklü parçacık radyasyonu ve yükü olmayan radyasyon. Alfa parçacıkları, protonlar, elektronlar ve iyonları içeren yüklü parçacıkların maddeyle etkileşimi, X-ışınları, gama- ışınları ve nötronlar gibi yükü olmayan nötr radyasyonların etkileşiminden farklıdır. Yüklü parçacıklar, atomlarının elektronlarıyla etkileşime girerek atomları iyonlaştırır ve doğrudan iyonlaştırıcı olarak sınıflandırılırken, gama ışınları ve nötronlar, malzeme içindeki diğer atomları iyonlaştırabilen yüklü bir parçacık üretebilir ve dolaylı iyonlaştırıcı olarak sınıflandırılır. Şekil 3.1, iyonlaştırıcı radyasyon türleri ve maddeyle etkileşimlerini şematik olarak göstermektedir. Şekil 3.1'deki düz çizgiler, alfa (α), beta (β, enerjik elektronlar) ve nötron (n) gibi parçacıkların yollarını; dalgalı çizgiler, gama (γ)- ışınlarını ve boş daireler iyonlaşmanın gerçekleştiği yerleri temsil eder. Bu ayrım önemlidir çünkü etkileşimin gücü, yüklü parçacıkların nüfuz edebilirliğini sınırlar ve bu da malzeme yüzeyine verilen hasarı sınırlar. Fotonlar ve nötronlar ise daha derinlere nüfuz ederek daha homojen bir etki yaratabilir. Örneğin, 1 MeV enerjide, havadaki menzil fotonlar için 10^4 cm, nötronlar ve elektronlar için 10^2 cm ve protonlar için 10^0 cm civarındadır (Grdanovska, 2015). Şekil 3.2, bazı iyonlaştırıcı radyasyonların fraklı malzemelerdeki nüfuz etme derinliklerini şematik olarak göstermektedir.

Kütleleri elektronun kütlesinden yüzlerce kat daha büyük olduğu için "ağır" olarak tanımlanan yüklü ağır parçacıklar hem pozitif hem de negatif yüklü olabilirler ve hedef çekirdeklerin elektronlarını uyarırlar ve her uyarılmada enerjilerinin küçük bir kısmını kaybederler. Etkileştikleri madde için aldıkları yolun en sonunda, çok sayıda çarpışma sonucu neredeyse tüm kinetik enerjilerini kaybettikleri anlar hariç, oldukça düz bir yolda ilerlerler; kat edilen mesafe arttıkça iyonların enerjisi azalır. Yüklü ağır parçacıkların bağlı elektronlarla çarpışması esnek olmayan bir çarpışmadır; hedef elektronun bağlanma enerjisinin üstesinden gelmek için kinetik enerjinin bir kısmı kaybedilir. Yüklü parçacıkların nüfuz etme (penetrasyon) derinliğine bağlı enerji kaybı Bragg eğrisi ile gösterilir.



Şekil 3.1 İyonlaştırıcı radyasyonlar ile maddeyle etkileşmesi (Dhanekar ve Rangra, 2021)



Şekil 3.2 Farklı iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin farklı malzemelere nüfuz etme kapasiteleri (Dhanekar ve Rangra, 2021)

Parçacık kinetik enerjisini kaybettikçe, etkileşim kesiti artar. Bu, parçacık durmadan önce artan bir durdurma gücüyle sonuçlanan parçacık etkileşiminde bir artış olduğu anlamına gelir. Bu, protonun enerjisinin çoğunu biriktireceği özgül derinlik, malzemeye en fazla zararın verileceği yer olduğundan büyük önem taşır. Bragg eğrisi tarafından tanımlanan bağıl durdurma gücü davranışı, kanser tedavisi için parçacık terapisinde çok faydalıdır ve doktorların durdurma gücünü ve dolayısıyla parçacığın enerji birikimini kanser hücrelerine yoğunlaştırırken çevredeki hücrelere verilen hasarı en aza indirmesini sağlar. Beta parçacıkları (enerjik elektronlar) gibi yüklü hafif parçacıklar, madde içinde hareket ederken yüklü ağır parçacıklara benzer şekilde

enerji kaybederler ve esas olarak Coulomb kuvveti aracılığıyla maddeyle etkileşime girerler. Ancak hafif ve ağır yüklü parçacıkların kütlelerindeki fark, iki tür arasındaki enerji kayıplarında fark yaratır. Yüklü hafif parçacıkların, özellikle elektronların, etkileştikleri maddenin atom çekirdeklerinin elektrik alanlarında geçerken yavaşlamaları sonucu elektromanyetik radyasyon olan Bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu yayınlanabilir veya saptırılan parçacıklar hareket yoluyla ilişkili elastik saçılma etkileşimlerine maruz kalırlar.

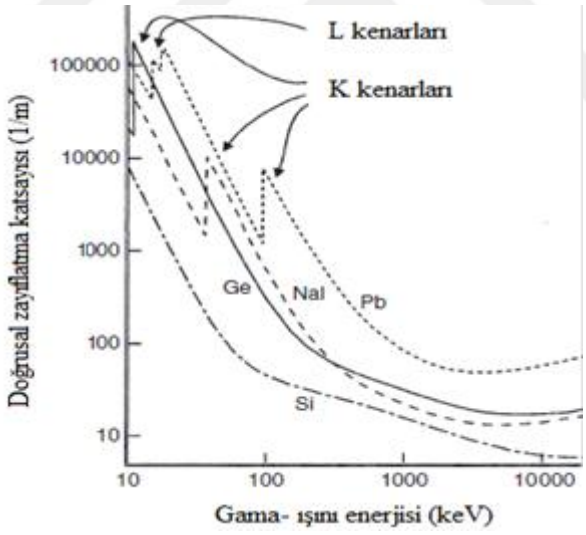
Nötron ve foton gibi yükü olmayan nötr radyasyonlar, herhangi bir yük taşımadıkları için dolaylı olarak iyonlaştırıcıdır. Nötron radyasyonu, çekirdek bölünmesi (nükleer fisyon) sonucunda yayınlananlar gibi serbest nötronlardan oluşmaktadır. Atomik elektronların geçişlerinden kaynaklanan X- ve kararsız bir çekirdekten yayınlanan gama- radyasyonları, yüksek enerjili fotonlardan oluşan elektromanyetik radyasyonlardır. Bu tezin kapsamı doğrultusunda, ele alınacak tek iyonlaştırıcı fotonlar gama- ışınlarıdır. Yüksek enerjili bir foton, maddeyle üç mekanizmadan biriyle etkileşime girebilir: Fotoelektrik etki, çift oluşumu ve Compton saçılması. Her bir mekanizmanın olasılığı, radyasyonun enerjisine ve hedef çekirdeğin atom numarasına bağlıdır.

3.1.3 Gama- ışınlarının Etkileşme Mekanizmaları

Bu kısımda, gama radyasyonunun maddeyle etkileşim mekanizmaları tartışıldı. Bu mekanizmaların bilinmesi, gama-ışını spektrometresinin en önemli unsuru dedektörün kendi içindeki ve dedektör çevresindeki etkileşimler nedeniyle bir gama-ışını spektrumundaki özelliklerin doğrudan yorumlanmasına yol açacaktır. Tartışma gama radyasyonuna odaklansa da, gama radyasyonunun, tıpkı X-ışını radyasyonu gibi, doğası gereği elektromanyetik olduğu ve bir dedektör için ayırt edilemez olduğu unutulmamalıdır. Herhangi bir parçacığın veya radyasyonun aletsel tespiti, bir elektrik sinyali üretmek üzere bir araya getirilebilen yüklü ikincil parçacıkların üretimine bağlıdır. Yüklü parçacıklar, örneğin alfa ve beta parçacıkları, dedektör malzemesinin doğrudan iyonlaşması ve uyarılmasıyla bir dedektör içinde bir sinyal üretir. Gama fotonları yüksüzdür ve bu nedenle bunu yapamazlar. Gama ışını tespiti, gama ışını enerjisini dedektör malzemesi içindeki elektronlara aktaran diğer etkileşim türlerine

bağlıdır. Bu uyarılmış elektronlar yüklüdür ve dedektör ortamındaki atomların iyonlaşması ve uyarılmasıyla enerjilerini kaybederler ve bu da birçok elektron-delik çiftinin oluşmasına neden olur. Gazlardaki gama radyasyonunun emilim katsayısı düşüktür ve tüm pratik gama ışını dedektörleri bir katıyla etkileşime dayanır. Dolayısıyla, birincil elektron tarafından üretilen yüklü çiftler elektron-delik çiftleridir. Üretilen elektron sayısı, birincil etkileşim tarafından üretilen elektronların enerjisiyle orantılıdır. Dedektör, uygun malzemeden ve elektron-delik çiftlerinin toplanıp bir elektrik sinyali olarak sunulabileceği şekilde yapılmalıdır (Gilmore, 2008).

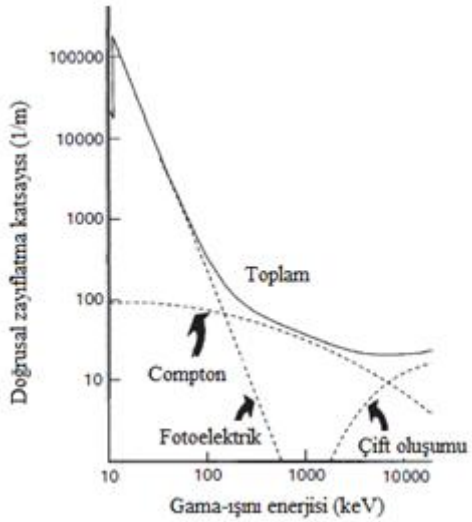
Gama radyasyonunun maddeyle etkileşim derecesinin radyasyonun enerjisine bağlı olması beklenmedik bir durum değildir. Ancak, beklenmeyen şey, bu enerji bağımlılığının ayrıntılı şeklidir. Grafik 3.1, gama-ışını spektrometresiyle ilgili bir dizi malzemenin zayıflama katsayısını gama- ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak göstermektedir.



Grafik 3.1 Gama-ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak malzemelerin zayıflama katsayısı (Gilmore, 2008)

Bu eğrilerde en dikkat çekici özellikler, düşük enerjideki zayıflama katsayısındaki keskin sıçramalar ve enerji aralığının çoğunda bir düşüşün ardından yüksek enerjideki artıştır. Bu özellikler, ilgili etkileşim süreçlerinin ayrıntılı bir incelemesiyle açıklanabilir ve daha da önemlisi, bir gama spektrometrisi açısından, bu inceleme gama-ışını spektrumunun şeklinin açıklanmasını sağlayacaktır. Ayrıca, diyagramda, zayıflatma veya zayıflama katsayısıyla ifade edilen bir etkileşim olasılığının, etkileşen

atomun boyutuna bağlı olduğu da açıktır. Zayıflatma katsayısı, daha yüksek atom numaralı malzemeler için daha yüksektir. Dolayısıyla, germanyum, gama- ışınları için silikondan daha tatmin edici bir dedektör malzemesi ve kurşun, daha düşük atom numaralı malzemelerden daha tatmin edici bir zırhlama malzemesidir. Başlangıçta, belki de zayıflama ve soğurma arasındaki farkın açıkça belirtilmesi gerekir. Bir zayıflatma katsayısı, bir soğurucunun belirli bir enerjide neden olduğu gama- ışını yoğunluğundaki azalmanın bir ölçüsüdür. Soğurma katsayısı ise gama radyasyonu içinden geçerken soğurucu tarafından tutulan enerji miktarıyla ilişkilidir. Tüm etkileşimler, gama- ışınının tamamen soğurulmasını etkilemez. Bunun sonucu olarak, soğurma eğrileri, orta enerji aralığındaki zayıflama eğrilerinin biraz altında yer alır. Grafik 3.1'deki eğrilerin her biri, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu yoluyla oluşan etkileşimlerden kaynaklanan eğrilerin toplamıdır. Bu bileşenlerin her birinin germanyum için göreceli büyüklüğü, Grafik 3.2'de gösterildi.



Grafik 3.2 Germanyumun ve bileşen parçalarının doğrusal zayıflatma katsayısı (Gilmore, 2008)

Fotoelektrik etkileşimler düşük enerjide baskındır ve çift üretimi yüksek enerjide baskındır. Compton saçılması ise orta enerji aralığında en önemli olanıdır. Gama radyasyonu ayrıca koherent saçılma (Bragg veya Rayleigh saçılması olarak da bilinir) ve fotonükleer tepkimelerle de etkileşime girebilir. Koherent saçılma, gama- ışınının soğurulmasından sonra değişmeyen enerjiyle ancak farklı bir yönde yeniden emisyonunu içerir. Böyle bir etkileşim, bir gama- ışını demetinin zayıflamasına katkıda bulunabilir, ancak dedektöre enerji aktarılmadığı için dedektör sinyalinin

oluşumunda hiçbir rol oynayamaz ve daha fazla incelenmesi gerekmez. Önemli etkileşim süreçlerinin her birinin, gama- ışını enerjisinin soğurucu ortamdaki, yani gama- ışını dedektöründeki elektronlara aktarılmasıyla sonuçlandığının bilincinde olmak önemlidir. Dolayısıyla, bundan sonraki tüm süreçlerde, elektronlara aktarılan enerji, dedektör tarafından soğurulan enerjiyi temsil eder ve bu da dedektörün verimi (çıktısıyla) ilişkilidir.

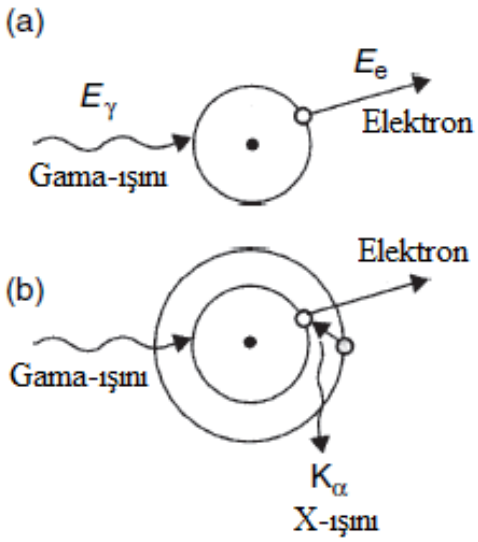
3.1.3.1 Fotoelektrik etki

Fotoelektrik etki veya soğurma, gama- ışını fotonunun bir atomdaki bağlı elektronlardan biriyle etkileşimi sonucu ortaya çıkar. Fotoelektrik etki sonucunda oluşan gama-ışının soğurulması şematik olarak Şekil 3.3'te gösterildi. Elektron, kabuğundan (Şekil 3.3a), E_e kinetik enerjisiyle fırlatılır ve şu şekilde ifade edilir (Gilmore, 2008):

$$E_e = E_\gamma - E_b \tag{3.1}$$

Burada E_γ gama-ışını enerjisi ve E_b elektronun bağlanma enerjisidir. Bu süreçte atom, fazladan E_b enerjisiyle uyarılmış bir durumda kalır ve dengesini iki şekilde geri kazanır. Atom, uyarılma enerjisinin atomdaki kalan elektronlar arasında yeniden dağıtılmasıyla uyarılmayabilir. Bu, atomdan daha fazla elektronun salınmasına (bir Auger kaskede, Auger cascade) ve toplam gama- ışını enerjisinin daha büyük bir kısmının ortama (dedektöre) aktarılmasına neden olabilir. Alternatif olarak, fotoelektronun atılmasıyla oluşan boşluk, içine düşen ve X-ışını floresans adı verilen karakteristik bir X-ışını emisyonuyla daha yüksek enerjili bir elektron tarafından doldurulabilir (Şekil 3.3b). Bu X-ışını daha sonra fotoelektrik soğurulmaya (absorpsiyona) uğrayabilir ve muhtemelen daha fazla X-ışını yayabilir ve bu X-ışınları da nihayetinde tüm gama-ışınının enerjisi soğurulana kadar soğurulmaya devam eder. Bir elektron fırlatıldığında momentumu korumak için, geri tepen atomun çok az miktarda enerjiyi tutması gerekir. Bu çok küçüktür ve pratik amaçlar için göz ardı edilebilir. Elektronun fırlatıldığı enerji seviyesi, gama- ışınının enerjisine bağlıdır. Fırlatılma olasılığı en yüksek olan elektron K elektronudur. Bir K elektronunu fırlatmak için yeterli enerji yoksa L veya M elektron fırlatılır. Bu durum, fotoelektrik

soğurma eğrilerinde süreksizliklere yol açar. Bu soğurma kenarları, elektron kabuklarına karşılık gelen bağlanma enerjilerinde meydana gelir. Örneğin, germanyum eğrisinde (Grafik 3.1) K soğurma kenarı 11,1 keV'de meydana gelir. Sezyum iyodür için iki K kenarı vardır; biri 33,2 keV'deki iyot K elektronuna, diğeri ise 35,96 keV'deki sezyum K elektronuna karşılık gelir. Bu enerjilerin altında, yalnızca L ve daha yüksek mertebeden elektronlar fotoelektrik olarak fırlatılabilir. Enerjinin etkileşen atoma aktarılabileceği bir yol daha azaldığından, zayıflama katsayısı K elektronunun kesin enerjisinde kademeli olarak düşer. L ve diğer daha az sıkı bağlı elektronlara karşılık gelen benzer kenarlar, kurşun eğrisinde daha düşük enerjilerde görülebilir. L elektron kabuğunun üç alt seviyesi vardır ve bu, L kenarı şeklinde yansıtılır.



Şekil 3.3 (a) Fotoelektrik absorpsiyon mekanizması ve (b) floresan X ışınlarının emisyonu (Gilmore, 2008)

Bir fotonun fotoelektrik soğurma geçirme olasılığı, bir tesir kesiti olarak ifade edilebilir. Soğurma ve zayıflama derecesinin bu ölçüsü, soğurucunun atom numarası Z ve gama- ışını enerjisi E ile karmaşık bir şekilde aşağıda verildiği gibi değişir (Gilmore, 2008):

$$\tau \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \tag{3.2}$$

Burada n ve m, enerjiye bağlı olarak 3 ila 5 aralığındadır. Bu denklemin önemi, daha ağır atomların gama radyasyonunu, en azından fotoelektrik etki açısından, daha hafif atomlardan daha etkili bir şekilde soğurmasıdır. Dolayısıyla, ideal dedektör malzemelerinin, yük toplama özellikleri tatmin edici olduğu sürece, yüksek Z'ye sahip olması gerekir. Fotoelektrik zayıflama katsayısı μ_{FE}, ilgili kesitten aşağıdaki şekilde türetilebilir (Gilmore, 2008):

$$\mu_{FE} = \tau \times \rho \times \frac{N_{Av}}{A} \tag{3.3}$$

Burada ρ, soğurucu malzemenin yoğunluğu, A ortalama atom kütlesi ve N_{Av} Avogadro sabitidir.

3.1.3.2 Compton saçılması

Compton saçılması, şematik olarak Şekil 3.4′de gösterildi. Compton saçılması, gama-ışınının bir elektronla doğrudan etkileşimidir ve gama-ışını enerjisinin bir kısmını aktarır. Geri tepme elektronuna aktarılan enerji aşağıdaki denklemle verilir (Gilmore, 2008):

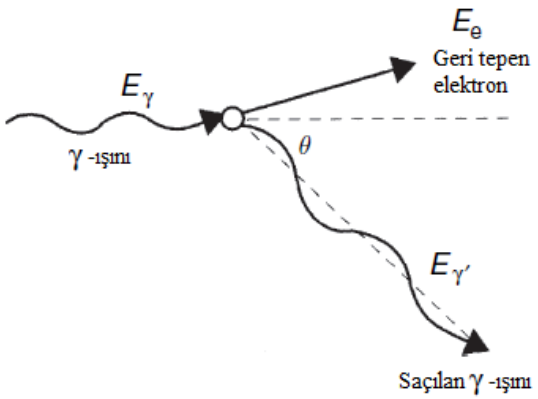
$$E_e = E_\gamma - E_\gamma^{'} \tag{3.4}$$

veya

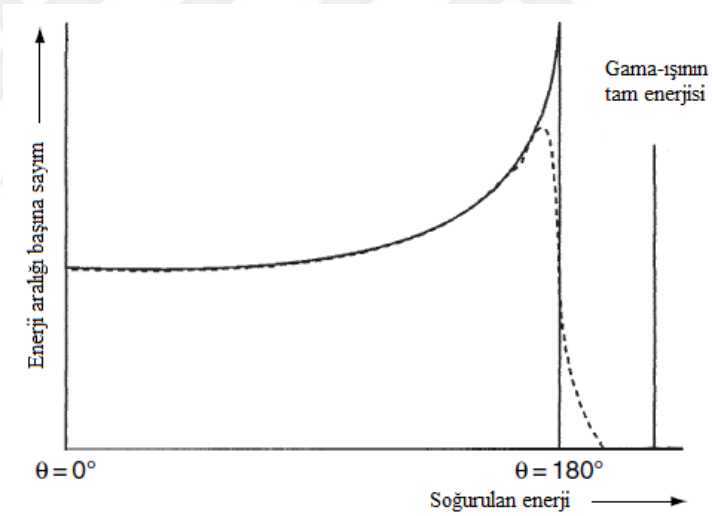
$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + E_\gamma (1 - \cos\theta)/m_0 c^2} \right] \right\} \tag{3.5}$$

Bu denklemde farklı değerler alabilen θ, soğurulan enerjinin saçılma açısına göre nasıl değiştiğini gösterir. Dolayısıyla, θ=0° olduğunda, yani etkileşim noktasından doğrudan ileriye doğru saçıldığında, E_e'nin 0 olduğu ve dedektöre enerji aktarılmadığı bulunur. Diğer uçta, gama- ışını geri saçıldığında ve θ=180° olduğunda, yukarıdaki denklemde parantez içindeki terim hala 1'den küçüktür ve bu nedenle gama- ışını enerjisinin yalnızca bir kısmı geri tepen elektrona aktarılacaktır. Ara saçılma

açılarında, elektrona aktarılan enerji miktarı bu iki uç nokta arasında olmalıdır. Grafik 3.3, bu ilişkiyi gösteren şematik bir diyagramdır. Kaçınılmaz sonuç, tüm saçılma açılarında, gama- ışını enerjisinin %100'ünden daha azının dedektör içinde soğurulduğudur.



Şekil 3.4 Compton saçılma süreci (Gilmore, 2008)



Grafik 3.3 Compton saçılmasıyla soğurucuya aktarılan enerjinin saçılma açısına bağımlılığı (Gilmore, 2008)

Gama-ışınının serbest bir elektronla etkileşime girdiğini varsayıldığında, aslında elektronun bir atoma bağlı olması çok daha olasıdır ve elektronun bağlanma enerjisi hesaba katılmalıdır. Çoğu etkileşim, daha dış, daha az sıkı bağlı elektronları içerir ve çoğu durumda bağlanma enerjisi, gama- ışınının enerjisine kıyasla önemsiz olacaktır (birkaç eV, yüzlerce keV). Bağlanma enerjisini hesaba katmak, Compton tepki fonksiyonunun şeklini bir dereceye kadar değiştirir; maksimum geri tepme enerjisindeki keskin uç daha yuvarlak hale gelir ve 180° geri saçılmaya karşılık gelen kenar bir eğim kazanır. Bu, Grafik 3.3'teki noktalı eğri ile gösterilmiştir. Compton

saçılması soğurulma kesiti, genellikle σ sembolüyle verilir, malzemenin atom numarası ve gama- ışınının enerjisiyle ilişkisi,

$$\sigma \propto f\left(E_{\gamma}\right) \tag{3.6}$$

ile verilir. Uygun bir şekilde 1/E'lik bir enerji fonksiyonu önerildiğinde, bir Compton saçılma katsayısı, μ_{CS}, hesaplanabilir. Periyodik Tablonun büyük bir bölümünde A/Z oranının 2'ye yakın bir değerle makul ölçüde sabit olduğu gerçeğini de hesaba katıldığında, μ_{CS}, aşağıdaki denklem ile verilir (Gilmore, 2008):

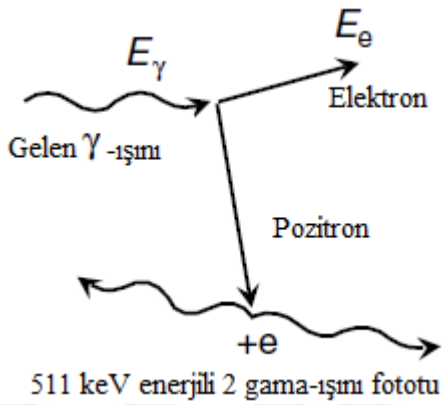
$$\mu_{CS} = \text{sabit} \times \sigma \times f\left(E_{\gamma}\right) \tag{3.7}$$

Bunun anlamı, belirli bir gama- ışını enerjisinde Compton saçılması olasılığının atom numarasından neredeyse bağımsız, ancak malzemenin yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olmasıdır. Ayrıca, kütle zayıflama katsayısı μ_{CS}/ρ'da, yine belirli bir enerjide, atom numarasına bağlı olarak çok az değişiklik vardır; bu da, bilinmeyen bileşimdeki örneklerde gama-ışınlarının kendi kendine soğurulması için bir düzeltme yapmanın zorluklarını hafifleten bir gerçektir.

3.1.3.3 Çift oluşumu

Fotoelektrik etki ve Compton saçılmasının aksine, çift oluşumu gama- ışınının, atomun tamamıyla etkileşiminden kaynaklanır. Bu süreç çekirdeğin Coulomb alanı içinde gerçekleşir ve bir gama-ışınının bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesiyle sonuçlanır. Kuantum mekaniğine özgü bir durumda, gama ışını kaybolur ve bir elektron-pozitron çifti ortaya çıkar. Bu mucizevi olayın gerçekleşmesi için gama-ışınının en azından iki parçacığın birleşik durağan kütlesine eşdeğer bir enerjiye (511 eV+ 511 eV= 1022 keV) sahip olması gerekir. Uygulamada, çift oluşumuna dair kanıtlar yalnızca bir gama -ışını spektrumunda, enerji 1022 keV'den biraz daha fazla olduğunda görülür. Prensip olarak, çift oluşumu bir elektron alanının etkisi altında da meydana gelebilir, ancak olasılık çok daha düşüktür ve enerji eşiği 4 elektron durağan kütlesidir, bu da normal 0 ila 3 MeV gama spektrometresinde göz ardı edilebilir bir husustur. Oluşan elektron ve pozitron, fazla gama-ışını enerjisini (yani, birleşik

elektron-pozitron durağan kütlesinin üzerindeki enerjiyi) eşit olarak paylaşır ve yavaşlatıldıkça dedektör ortamına kaybederler. Pozitronun enerjisi neredeyse termal enerjilere düştüğünde, kaçınılmaz olarak bir elektronla karşılaşmak zorundadır ve ikisi yok olarak iki 511 keV yok olma fotonu açığa çıkarır. Bu, çiftin oluşumundan itibaren 1 ns içinde gerçekleşme olasılığı yüksektir ve tipik dedektörlerin yük toplama süresinin 100 ila 700 ns olduğu göz önüne alındığında, yok oluş, çift üretim olayıyla birlikte anlık olarak kabul edilebilir. Olayların tam dizisi Şekil 3.5'te açıklanmıştır.



Şekil 3.5 Çift oluşum süreci (Gilmore, 2008)

Çift oluşumu veya üretim olayının anlık sonuçları tarafından dedektör içinde soğurulan net enerji (enerjiler keV cinsinden ifade edilmiştir),

$$E_e = E_\gamma - 1022 \tag{3.8}$$

ile verilir. Tesir veya etkileşimin kesiti (κ), E ve Z'ye karmaşık bir şekilde bağlıdır ve şu şekilde ifade edilebilir (Gilmore, 2008):

$$\kappa \propto Z^2 f\left(E_\gamma, Z\right) \tag{3.9}$$

Zayıflama katsayısı μ_{PO}, fotoelektrik zayıflama katsayısına benzer şekilde hesaplanır. κ'nın, atom boyutuna göre değişimi Z^2 terimi tarafından belirlenir, parantez içindeki fonksiyon Z ile yalnızca biraz değişir. κ'nn enerji bağımlılığı; 1022 keV'deki eşik değerinden itibaren enerjiyle sürekli artan f (E_γ, Z) fonksiyonu tarafından belirlenir, böylece 10 MeV'den yüksek enerjilerde çift üretimi baskın etkileşim mekanizmasıdır. Pozitronun yok ettiği elektronun bir atoma bağlı olması oldukça olasıdır. Bu nedenle,

elektronu uzaklaştırmak için atomla bir miktar enerjinin paylaşılması gerekir. Bu, yok olma kuantaları arasında paylaşılabilecek enerjinin beklenenden daha düşük olacağı anlamına gelir. Örneğin, alüminyumda yok olma radyasyonunun teorik 511,0034 keV yerine 510,9957 keV olduğu tahmin edilmiştir. Günlük gama-ışını spektrometresinde bu nüansın fark edilmesi pek olası değildir.

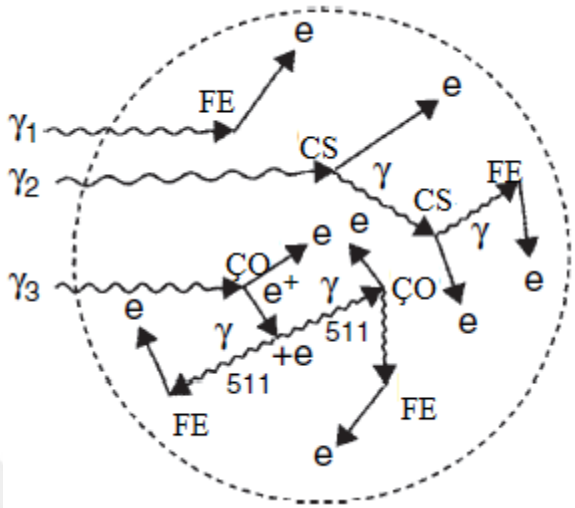
3.1.3.4 Gama-ışınlarının dedektör içindeki etkileşmeleri

Gama-ışınları ve dedektör malzemeleri arasındaki tüm önemli etkileşimlerin, gama-ışınından elektronlara veya çift oluşumu durumunda bir elektron ve bir pozitrona enerji aktarımıyla nasıl sonuçlandığı yukarıdaki bölümlerde anlatılmıştı. Bu bireysel parçacıkların enerjisi, sıfıra yakın enerjiden gama-ışınının tam enerjisine yakın enerjiye kadar değişebilir. Gama-ışını spektrometresi açısından, enerjiler birkaç keV'den birkaç MeV'ye kadar değişebilir. Bu enerjileri, germanyumda bir iyon çifti oluşturmak için gereken enerjiyle (2,96 eV) karşılaştırıldığında, enerjik birincil elektronların dedektörün gövdesi içinde saçılırken elektron-delik çiftleri oluşturması gerektiği açıktır. Böyle enerjik bir elektronun oluşturduğu beklenen iyon çifti sayısı (NÇ), aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir (Gilmore, 2008):

$$N = \frac{E_e}{\varepsilon} \tag{3.10}$$

Burada E_e, elektron enerjisi ve ε, iyon çiftini oluşturmak için gereken enerjidir. Bu sayının, bir elektron üzerindeki yük ile çarpılması, dedektör içinde oluşan yükün bir tahminini verir. Dedektörden elektrik sinyali üretmek için toplanması gerekenler, bu ikincil elektronlar ve bunlarla ilişkili pozitif yüklü boşluklardır. Gama-ışınlarının maddeyle etkileşime girme şeklinin ayrıntısı, her bir gama-ışını için dedektör sinyalinin boyutunu belirler. Bu, fotonun enerjisine, soğurucu atomun atom numarasına ve Compton olayları için, gelen gama radyasyonu ile saçılan gama-ışını arasındaki açıya bağlı olacaktır. Çoğu durumda, tek bir etkileşimin gama-ışınını tamamen soğurmayacağını göz önünde bulundurarak, etkileşimin dedektör içindeki konumunun (X-ışınları kaçar) ve dedektörün boyutunun önemli olabileceği düşünebilir. Dedektör büyük olduğunda, her bir gama- ışınının daha önce tartışılan üç

süreçten biriyle etkileşime girme fırsatına sahip olması beklenebilir. Şekil 3.6, yukarıda açıklanan süreçlerin her biriyle etkileşime giren gama- ışınlarının temsili etkileşim geçmişlerini göstermektedir.



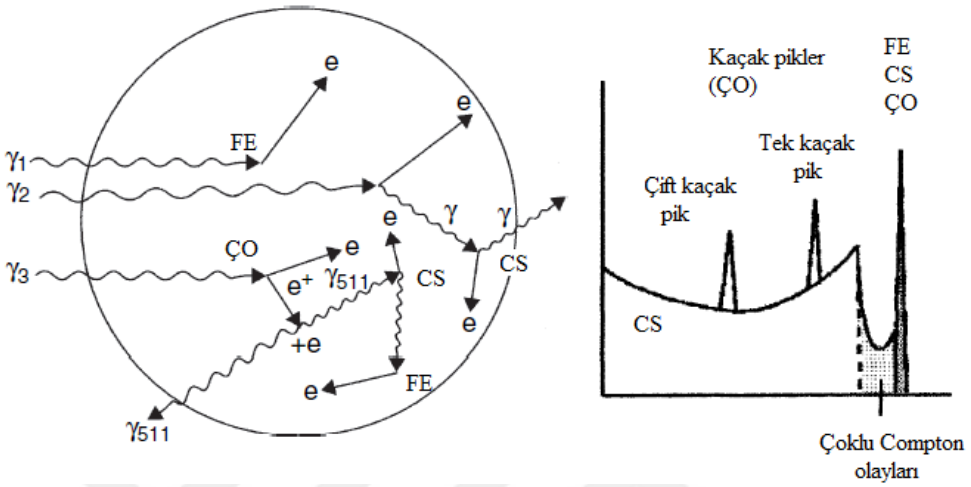
Şekil 3.6 Çok büyük boyutlu bir dedektör içindeki etkileşim geçmişlerine örnekler. FE: Fotoelektrik etki; CS: Compton saçılması; ÇO: Çift oluşumu (Gilmore, 2008)

Etkileşim fotoelektrik etkiyle gerçekleşirse, sonuç foto elektronların serbest kalması ve Auger elektronlarının toplam gama-ışını enerjisini paylaşmasıyla tam bir soğurma olacaktır. Bu şekilde etkileşen her gama-ışını tüm enerjisini açığa çıkaracak ve gama-ışınları özdeş olduğundan, aynı dedektör tepkisini üretecektir. Şekil 3.6'daki Compton saçılma geçmişi, bir geri tepme elektronu serbest bırakan bir başlangıç etkileşimini ve ardından saçılan gama-ışını ile daha fazla geri tepme elektronu serbest bırakan daha fazla Compton etkileşimini göstermektedir. Her bir saçılmadan sonra, saçılan gama-ışını daha az enerji taşır. Sonunda, bu enerji o kadar düşük olacaktır ki, fotoelektrik soğurma kaçınılmaz olacak ve kalan gama-ışını enerjisi fotoelektronlara aktarılacaktır. Böylece, gama-ışınının toplam enerjisi, bir dizi geri tepme elektronu ve fotoelektron arasında paylaşılır. Bu etkileşimlerin zaman ölçeği, herhangi bir pratik dedektörün yük toplama süresinden çok daha kısadır ve tüm birincil elektronlar aslında aynı anda serbest bırakılır. Olaydan olaya, son fotoelektrik olaydan önce gerçekleşen Compton olaylarının gerçek sayısı değişecektir, ancak her durumda toplam gama-ışını enerjisi dedektör içindeki birincil enerjik elektronlara aktarılacaktır. Aynı enerjiye sahip tüm gama-ışınlarına karşı sabit bir dedektör tepkisi bekleyebiliriz. Benzer şekilde, çift oluşumu etkileşim geçmişi, gama-ışınının tüm enerjisinin dedektöre aktarılabileceğini göstermektedir. Bu durumda, toplam gama-ışını enerjisi, ilk etapta, etkileşim sonucu

oluşan elektron ve pozitron arasında eşit olarak paylaşılır. Hem elektron hem de pozitron enerji kaybederek, bu süreçte elektron-delik çiftleri oluşturur. Pozitron termal veya termale yakın enerjilere ulaştığında, bir elektronla birleşerek yok olur ve 511 keV'lik iki yok olma fotonu açığa çıkar. Şekil 3.6, bunların Compton saçılması ve fotoelektrik soğurma kombinasyonuyla normal şekilde soğurulduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, ilk çift üretimi, pozitronun nihai imhası ve imha fotonlarının soğurulmasıyla birlikte, tüm gama-ışını enerjisi soğurulmaktadır. Yine, bireysel etkileşim geçmişleri gama-ışınından gama ışınına farklılık gösterse de, dedektörün aynı gama-ışınlarına verdiği tepki aynı olacaktır. Her özdeş gama-ışını için, başlangıçtaki etkileşim modundan bağımsız olarak aynı dedektör tepkisi beklenildiğinde, böyle bir dedektörden gelen gama-ışını spektrumunun, her biri kaynak tarafından yayılan ayrı bir gama-ışını enerjisine karşılık gelen tekil tepelerden oluşmasını bekleriz. Bazı çevrelerde, gama-ışını spektrumlarındaki tepelere "fotopikler" denir ve bu fotopiklerin yalnızca fotoelektrik olayların bir sonucu olarak ortaya çıktığı ima edilir. Gördüğümüz gibi, toplam soğurulmaya neden olan olaylar Compton saçılmasını ve çift oluşumunu da içerebilir ve bir spektrumdaki ortaya çıkan fotopikleri tanımlamak için tam enerji fotopik terimi tercih edilmelidir.

Elbette, herhangi bir "gerçek" dedektör yukarıdaki iki uç nokta arasında bir yerde bir durumu temsil eder. Bazı Compton saçılma olaylarının ve hatta bazı çift üretim olaylarının, kalan gama-ışını enerjisinin tamamen veya daha büyük olasılıkla daha büyük bir kısmının soğurulmayı takip edilebileceği beklenebilir. Gama-ışını spektrumunda tanımlanabilir özelliklere yol açan başka özel olasılıklar, Şekil 3.7'de gösterildi. Compton saçılma olaylarını, saçılan gama-ışını dedektörden kaçmadan önce, her biri biraz daha fazla gama-ışını enerjisi soğurarak, bir veya daha fazla Compton etkileşimi izleyebilir. Bu çoklu saçılmanın, Compton kenarına yakın bir tepki üretebilecek bir başlangıç olayını takip ettiği düşünüldüğünde, soğurulan ilave enerjinin bazı durumlarda Compton kenarı ile tam enerjili fotopik arasındaki spektrumda ortaya çıkabilecek olaylara yol açabileceği anlaşılabilir. Bunlara çoklu Compton olayları denir. Gama-ışını enerjisi 1022 keV eşiğinden büyükse, gama-ışını spektrumlarında çift oluşumu nedeniyle başka bir özellik görülebilir. Pozitronun yok olmasından sonra, yok olma fotonlarından yalnızca biri kaçarken diğeri tamamen soğurulursa, dedektörden tam olarak 511 keV enerji kaybolacaktır. Bu, spektrumda E

- 511 keV'yi temsil eden ayrı bir fotopike neden olur ve buna tek kaçış fotopiki denir. Elbette, her iki foton da kısmen soğurulur ve bu da spektrumun başka yerlerinde belirli bir spektral imzası olmayan sayımlara yol açabilir. Tek kaçış tepelerinin, tek kaçış enerjisinin 170 keV altında kendi Compton kenarları vardır.



Şekil 3.7 'Gerçek' bir dedektör içinde etkileşim için ek süreçler FE: Fotoelektrik etki; CS: Compton saçılması; ÇO: Çift oluşumu (Gilmore, 2008)

3.2 Radyasyon Doz Birimleri

İyonlaştırıcı radyasyon, duyu organlarıyla doğrudan tespit edilemez, ancak başka yöntemlerle tespit edip ölçebilir. Bu yöntemler, fotoğraf filmleri, Geiger-Müller tüpleri ve sintilasyon sayaçlarına dayalı yerleşik yöntemler, termolüminesans malzemeler ve silikon diyotlar kullanan daha yeni teknikleri içermektedir. Yapılan ölçümler, ilgili radyasyonun insan vücudunun her yerine veya vücudun belirli bir bölgesine aktaracağı enerji cinsinden yorumlayabilir. Doğrudan ölçümler mümkün olmadığında -örneğin, bir radyonüklit bir iç organa biriktirildiğinde- organda tutulan aktivite miktarı bilindiği sürece, o organ tarafından soğurulan doz hesaplayabilir. Radyasyona maruz kalmanın neden olduğu hasar, organın veya dokuların radyasyon dozuna ve hassasiyetine bağlıdır.

Röntgen (R), 1928 yılında sadece X-ışınları için daha sonra 1937 yılında ise X- ve gama-ışınlarını kapsayacak şekilde aşağıda verildiği gibi tanımlanan kabul edilmiş ilk radyasyon doz birimidir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$R = 2{,}58 \times 10^{-4} C/kg \tag{3.11}$$

Bir röntgen, normal şartlarda 1 kg havada $2{,}58 \times 10^{-4}$ coulombluk (C′lik) elektrik yükü değerinde artı ve eksi iyonlar oluşturan X-veya gama- ışınının miktarıdır. Daha sonra Uluslararası Birim sisteminde, röntgen eş değer karşılığı olarak X simgesi ile gösterilen ve 1 kg'lık havada 1 C′luk elektrik yükü değerinde artı ve eksi iyonlar oluşturan X-veya gama-ışınının miktarı olarak tanımlanan birim üretilmiştir (X= C/kg). Röntgen radyasyon demetindeki foton sayısı ve radyasyonun enerjisi ile ilgili olmayıp sadece X-veya gama-ışınına maruz kalma ile ilgilidir. Röntgen X- ve gama-ışınları için tanımlandığı için başka radyasyonlar için kullanılmaz. Aynı miktar X-veya gama-ışını ile farklı numaralı ve yoğunluklu maddelerin birim kütle başına soğurdukları enerji miktarı farklı olabilir. Örneğin, bir röntgenlik X- veya gama-ışını ile havada gram başına 86,9 erg'lik enerji soğurulduğu hâlde aynı miktarda ışın ile yumuşak dokuda gram başına 98 erg'lik enerji soğurulur. Bununla birlikte, daha önce de ifade edildiği gibi X- ve gama-ışınlarında başka alfa, beta, proton, nötron vb. radyasyonlar da geçtikleri ortama, ortamın özelliğine bağlı olarak enerji aktarırlar. Bu sebeple radyasyonun cinsinden, enerjisinden ve soğurucu ortamın özelliğinden bağımsız yeni bir doz birimine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaç için 1953 yılında Uluslararası Radyoloji Birim ve Ölçümleri Komisyonu (ICRU) tarafından ışınlamaya maruz bırakılan malzemenin kütlesi başına soğurulan enerjinin ölçüsünü "soğurulan doz" birim olarak "rad" şu şekilde tanımlanmıştır: 1 rad, ışınlanan malzemenin 1 gramına 100 erg'lik enerji veren radyasyon miktarıdır. Havanın bir röntgen′lik ışınlanması, soğurulmuş doz cinsinden 0,88 rad'a denktir (1 R = 0,88 rad) (Krane, 1987; Sultan, 2025). Uluslararası Birim sisteminde, doz birimi olarak gray (Gy) kullanılmaktadır. Bir kilogram kütle 1 joule (J) enerji soğurduğunda, 1 Gy′lik iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalmıştır (1 Gy = J/kg=10^2 rad) (Krane, 1987; Sultan, 2025). Bu doz birimi sadece soğrulan enerji miktarını gösteren ancak hem parçacık hem de foton özellikli radyasyonlar uygulanan bir büyüklüktür.

İyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir sistemde oluşturacağı değişiklikler, soğurulan enerjinin büyüklüğüne bağlıdır. Ancak biyolojik ortamda gözlenen değişmelerin, başka faktörlere de bağlı olduğu gözlenmiştir. Farklı radyasyonların aktardığı enerji aynı olsa bile bunlardan kaynaklanan biyolojik etkiler farklı olabilir. Dolayısıyla,

değişik ışınlama koşullarında, herhangi bir kütlenin eşit miktarda enerji soğurulması, aynı biyolojik etkiyi oluşturmayabilir. Radyasyona maruz kalmanın oluşturduğu biyolojik zarar, bu radyasyonun sebep olduğu uyarma ve/veya etkisindeki biyolojik moleküllerin kimyasal değişimi ile takip edilebilir. Bu biyolojik zarar ile ilgili olumsuz değişimlerin büyüklüğü ve kalıcılığı, radyasyonun geçtiği yol boyunca enerji birikimin yerel hızı olarak bilinen doğrusal enerji aktarımı ile ilgilidir (Krane, 1987; Sultan, 2025). Bu nedenle kişilerin radyasyondan korunması ile ilgili standartları belirlemek için farklı türdeki radyasyonların oluşturabileceği bazı biyolojik etkilerinin ölçülmesi gerekli ve önemlidir (Sultan, 2025). Bu durum için de bağıl biyolojik etkinlik (BBE) ortaya konmuştur. BBE, belirli bir radyasyon dozunun, aynı biyolojik etkiyi meydana getiren X-ışınlarının dozuna oranıdır (Sultan, 2025). Ancak BBE′nin, bağıl olarak ölçülmesi güç olduğundan BBE′nin yerini kalite faktörü (KF) almıştır. KF, radyasyonun aldığı birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir radyasyonun tipi enerjisi için kolaylıkla hesaplanabilir (Sultan, 2025). Dolayısıyla, bilinen bir iyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir biyolojik sistem üzerindeki etkisini tanımlayan yeni bir doz birimi "röntgenin insan eş değeri" veya "doz eşdeğeri" veya "eşdeğer doz" olan "rem", şöyle tarif edilmiştir. 1 rem, 1 röntgenlik X-veya gama-ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır (Krane, 1987; Sultan, 2025). Böylece bir doku veya organdaki eşdeğer doz şu şekilde verilir:

$$H = \sum_{R} KF_R \cdot D_{T,R} \tag{3.12}$$

Burada H, eşdeğer doz; $D_{T,R}$, bir doku veya organdaki radyasyondan kaynaklanan ortalama soğurulan doz ve KF, radyasyon kalite faktörüdür. $D_{T,R}$,′nin birimi rad olarak alındığında, H′nin birimi rem ve $D_{T,R}$,′nin birimi Gy olarak alındığında ise H′nin birimi sievert (Sv) olarak verilir (1 Sv=10^2 rem) (Sultan, 2025). KF değerleri: β-, X- ve γ-ışınları için 1; düşük enerjili (~ keV) nötron ve protonlar için 2 ila 5 arasında; enerjik (~ MeV) nötron ve protonlar için 5 ila 10 arasında ve α- ışınları için 20 olarak belirlenmiştir (Krane, 1987; Sultan, 2025).

Eşdeğer doz, tür veya enerjilerinden bağımsız olarak çeşitli radyasyon türlerine maruz kalmaktan belirli bir doku veya organın zarar görme olasılığının bir endeksini sağlar.

Örneğin, akciğere 1 Sv alfa radyasyonu, 1 Sv beta radyasyonuyla aynı ölümcül akciğer kanseri oluşturma riskini yaratır. İnsan vücudunun çeşitli bölümleri için risk organdan orgaına değişir. Örneğin, birim eşdeğer doz başına ölümcül malignite riski, tiroit için akciğere göre daha düşüktür. Dahası, ölümcül olmayan kanserler veya testis veya yumurtalıkların ışınlanmasının neden olduğu ciddi kalıtsal hasar riski gibi başka önemli zarar türleri de vardır. Bu etkiler hem tür hem de büyüklük olarak farklıdır. Dolayısıyla, radyasyona maruz kalmaktan kaynaklanan insan sağlığına yönelik genel zarar, değerlendirilirken bunların hesaba katılması gerekir. Tüm bu karmaşıklıklarla, vücudun her bir ana doku ve organındaki eşdeğer dozu alıp, Tablo 3.1'de verilen doku veya organla ilişkili riske ilişkin bir ağırlık faktörü ile çarparak başa çıkabilir. Bu ağırlıklı eşdeğer dozların toplamı, etkin doz adı verilen bir niceliktir ve vücuttaki çeşitli doz eşdeğerlerini tek bir sayı olarak gösterilmesini sağlar. Etkin doz, radyasyonun enerjisini ve türünü de hesaba katar ve bu nedenle sağlığa verdiği zararı genel olarak gösterir. Böylece vücudun belirtilen tüm doku ve organlarındaki eşdeğer dozların doku ağırlıklı toplamı olan etkin doz, şu ifadeyle verilir:

$$ED = \sum_T w_T \cdot \sum_R KF_R \cdot D_{T,R} \quad \text{veya} \quad ED = \sum_T w_T \cdot H_T \tag{3.13}$$

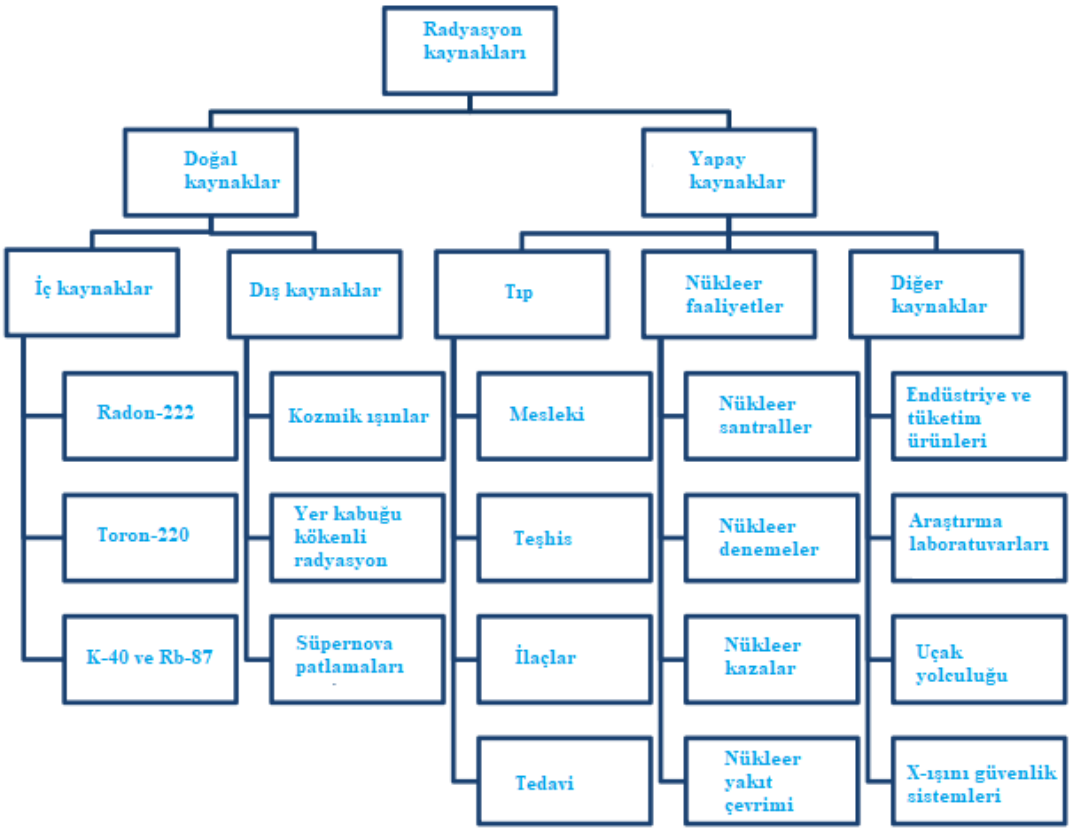
Burada ED, etkin doz; H_T, bir doku veya organdaki eşdeğer doz ve w_T ise Tablo 3.1′de verilen doku ağırlık veya ağırlıklandırma faktörüdür. ED′nin birimi, H_T ile aynıdır. Etkin doz, dış-iç maruziyet ve tekdüze-tekdüze olmayan ışınlama için eşit şekilde geçerlidir. Bazen insan grupları veya tüm bir nüfus için toplam radyasyon dozunun bir ölçüsüne sahip olmak faydalıdır. Bu toplamı ifade etmek için kullanılan nicelik, toplu etkin dozdur. Bu, maruz kalan tüm kişiler için, ilgili grup veya nüfustaki her bir kişinin ilgili radyasyon kaynağından aldığı etkin dozun toplanmasıyla elde edilir. Örneğin, tüm radyasyon kaynaklarından alınan etkin doz, ortalama olarak yılda 2,8 mSv'dir. Dünya nüfusu yaklaşık 8 milyar kabul edildiğinde, tüm nüfusa düşen yıllık toplu etkin doz, bu iki sayının çarpımıdır ve yaklaşık 22.000.000 kişi sievert, sembol kişi Sv.

Tablo 3.1 Doku ve organları ağırlık faktörleri

Doku veya organ	Doku ağırlık faktörü
Gonadlar (yumurtalık, erbezi)	0,20
Kemik iliği (kırmızı)	0,12
Kolon (kalın bağırsa)	0,12
Akciğer	0,12
Mide	0,12
Mesane	0,05
Göğüs (meme)	0,05
Karaciğer	0,05
Özofagus (yemek borusu)	0,05
Kalkan bezi (tiroit)	0,05
Deri (cilt)	0,01
Kemik yüzeyi	0,01
Diğer kalanlar	0,05
Tüm vücut	1,00

3.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları

İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, genel olarak iki kategoriye ayrılabilir: Doğal ve yapay iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları (Ahmed, 2007; Sultan, 2025). İki tür doğal radyasyon kaynağı vardır: Kozmik ve yer kabuğu kökenli radyasyon kaynakları. İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, Şekil 3.8′de özetlendi. Bu kaynakların büyük kısmından kaynaklanan maruziyet çok düşüktür ve bu sebeple vücudumuzda ölçülebilir bir hasar oluşturmaz. Ancak, çevremizde radon gibi potansiyel olarak tehlikeli bazı radyonüklitler bulunmaktadır ve bunlar yüksek entegre dozlar verebildikleri için endişe kaynağıdır (Ahmed, 2007).



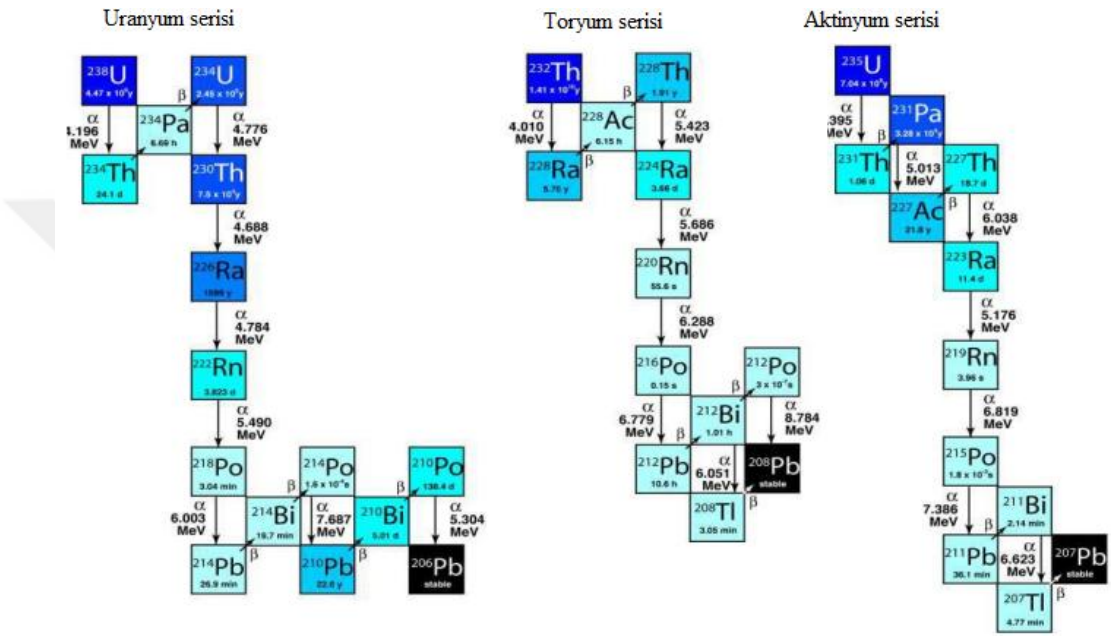
Şekil 3.8 İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları (Dhanekar ve Rangra, 2021)

Uzay, yanan (örneğin Güneşimiz) ve patlayan (örneğin Süpernovalar) yıldızlar gibi çeşitli kaynaklardan gelen kozmik radyasyonla doludur. Bu gök cisimleri muazzam miktarda radyasyon üretir ve bunların bir kısmı Dünya'ya ulaşır. Neyse ki Dünya atmosferi, Güneş'ten gelen ultraviyole ışınlarının ozon tabakası tarafından engellenmesi gibi bu radyasyonların en kötülerine karşı bir kalkan görevi görür. Ancak zararlı radyasyonun tamamı engellenemez ve bir kısmı Dünya yüzeyine ulaşarak uzun süre güneş ışığına maruz kalan kişilerde cilt yanıklarına ve kansere neden olur. Ozon tabakasının bir nedenle inceldiği yerlerde durum daha da kötüdür. Bu yerel radyasyon kaynaklarının yanı sıra, düşük enerjili fotonlardan oluşan bir arka plan radyasyonu da vardır. Bu radyasyonun, evreni yaratan sözde büyük patlamanın kalıntısı olduğu düşünülmektedir. Foton spektrumu, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde zirve yaptığı için kozmik mikrodalga arka plan radyasyonu olarak bilinir. Bu fotonlar Dünya yüzeyine ulaşsa da, düşük enerjileri nedeniyle zararlı olarak kabul edilmezler. Fotonların yanı sıra, uzayda sürekli olarak üretilen başka parçacıklar da vardır. Ancak bunların çoğu, manyetik sapma veya Dünya'nın üst koruyucu atmosferi nedeniyle Dünya'ya asla ulaşmaz. Müonlar, elektronlar ve nötrinolar gibi bazı

parçacıklar, diğer kozmik parçacıklar üst atmosferdeki atomlarla etkileşime girdiğinde üretilir. Bu parçacıkların yağmuru Dünya yüzeyine ulaşır, ancak düşük enerjileri ve düşük etkileşim olasılıkları nedeniyle önemli bir sağlık tehlikesi oluşturmazlar. Uzaydaki ışıklı cisimler tarafından doğrudan üretilen müonlar ve nötrinolar da düşük etkileşim kabiliyetleri nedeniyle Dünya'ya ulaşmayı başarır, ancak son derece düşük etkileşim kesitleri nedeniyle sağlık için tehlikeli olarak kabul edilmezler. Yer seviyesinde, kozmik ışın alanının baskın bileşeni, enerjileri çoğunlukla 1–20 GeV arasında olan müonlardır (UNSCEAR, 2000). Kozmik ışın nötron alanını başlatan protonlar, dünyanın manyetik alanından güçlü bir şekilde etkilenir ve bu da ekvator bölgelerindeki nötron akı oranının kutup bölgelerindekinden daha düşük olmasına neden olur (UNSCEAR, 2000). Kozmik ışın parçacıklarının atmosferdeki etkileşimleri; ^{3}H, berilyum (^{7}Be); ^{14}C ve sodyum (^{22}Na) dâhil olmak üzere bir dizi kozmojenik radyonüklit üretir (UNSCEAR, 2000). Esasen hedef çekirdeklerden daha hafif olan tüm nükleer türler (özellikle azot, oksijen ve argon) yüksek enerjili spalasyon etkileşimleri tarafından üretilir (UNSCEAR, 2000). Üretim üst stratosferde en yüksektir, ancak bazı enerjik kozmik ışın nötronları ve protonları alt atmosferde de kozmojenik radyonüklitler üretir (UNSCEAR, 2000). Üretim yalnızca rakıma değil, aynı zamanda enleme de bağlıdır ve kozmik ışınların dünyanın manyetik alanından geçişini düzenleyen 11 yıllık güneş döngüsüne göre de değişir (UNSCEAR, 2000).

Yer kabuğu kökenli radyasyon, etrafımızda az miktarda bulunur ve kaçınılmazdır. Çevremiz, içtiğimiz su, soluduğumuz hava ve tükettiğimiz yiyecekler, hepsi çok az miktarda radyasyon yayan radyonüklitler ile kontamine olmuştur. Bu radyonüklitler, genel olarak son derece tehlikeli olsa da normalden daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmadıkları sürece vücudumuza kayda değer bir zarar vermeleri beklenmez. Yer kabuğu kökenli radyasyonun ana kaynağı uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif serilerde yer alan radyonüklitler oluşturmaktadır (Şekil 3.9). Bu radyonüklitlerin yanı sıra yer kabuğu kökenli radyasyon kaynakları, bu serilerde yer almayan lütesyum (^{176}Lu), samaryum (^{147}Sm), lantan (^{138}La), rubidyum (^{87}Rb) ve potasyum (^{40}K) gibi primordiyal radyonüklitler de içermektedir (UNSCEAR, 2000). Bu radyonüklitlerin her biri, bozunma süreçlerine bağlı olarak α-, veya β- veya γ- veya bunların kombinasyonları olan iyonlaştırıcı radyasyonları yayarlar. Her üç radyoaktif seride de hem katı hem de gaz hâlinde radyonüklitler oluşmaktadır. Bu üç seride soy

gaz olarak oluşan radon izotopları, uranyum serisindeki radon (^{222}Rn), toryum serisindeki toron (^{220}Rn) ve aktinyum serisindeki aktinon (^{219}Rn) olarak isimlendirilmektedir (Sultan, 2025). Bununla birlikte, aktinyum serisinde yer alan radyonüklitler ve ^{40}K′un dışındaki diğer radyonüklitler (^{176}Lu; ^{147}Sm; ^{138}La ve ^{87}Rb), toplam etkin doz hızına olan katıklarının küçük olması sebebiyle genelde radyasyondan korunma süreçlerine dâhil edilmemektedir (UNSCEAR, 2000).



Şekil 3.9 Doğal radyoaktif seriler

Yapay iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarını, (1) nükleer silah denemeler ve nükleer santral kazalar sonucunda oluşan radyoaktif serpintiler ve nükleer tesislerden kaynaklanan yetkili deşarjlar ile yayılan ^{3}H; ^{14}C; ^{89,90}Sr; ^{131}I; ^{134,137}Cs vb. radyonüklitler, (2) tıpta teşhis amaçlı kullanılan ^{18}F; ^{67}Ga; ^{111}In; ^{201}Tl vb. radyonüklitler, Röntgen ve bilgisayarlı tomografi cihazları (3) endüstriyel faaliyetlerde ve tıpta tedavi amaçlı kullanılan ^{60}Co radyonükliti ve elektron hızlandırıcıları oluşturmaktadır. Nükleer reaktörlerin çalışması sırasında, aktivasyon radyonükliti ^{41}Ar gibi çeşitli fisyon soy gazları açığa çıkar. Daha belirgin fisyon soy gazları arasında, basınçlı su reaktörlerinden ^{133}Xe ve kaynar su reaktörlerinden ^{85,87,88}Kr ve ^{133,135,135m,138}Xe bulunur (UNSCEAR, 2000). Fisyon ürünü soy gazların ve aktivasyon gazının çoğu kısa ömürlü olduğundan, tesisi yakınlardaki sakinlerin maruziyetine odaklanılmıştır (UNSCEAR, 2000).

Radyasyon içeren herhangi bir uygulamanın faydaları ve riskleri, mutlaka belirlenmelidir. Böylece kullanımları hakkında bilinçli bir karar verilip riskler en aza indirilmelidir. İyonlaştırıcı radyasyon ve radyoaktif maddeler, yukarıda da ifade edildiği gibi tıbbi teşhis ve tedavide önemli ilerlemelere yol açmış ve endüstri, tarım ve araştırma alanlarında çok çeşitli prosedürlerde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, insanlar için zararlı olabilirler ve gereksiz veya aşırı maruziyetlerden korunmak gerekir. Bu nedenle, kontrol edebilecek durumlarda, insanları radyasyona maruz bırakan prosedürlerin faydaları ve riskleri arasında dikkatli bir denge kurulmalıdır. İyonlaştırıcı radyasyonla ilgili en büyük endişe, maruz kalan kişilerde kötü huylu hastalıklara ve sonraki nesillerde kalıtsal kusurlara neden olma potansiyelinden kaynaklanmaktadır. Bu tür etkilerin olasılığı, kişinin aldığı radyasyon miktarına, doğal veya yapay bir kaynaktan olup olmadığına bağlıdır. İyonlaştırıcı radyasyonun etkileri son yıllarda daha iyi anlaşıldıkça, insanları radyasyon kaynaklarına maruz kalmaktan korumak için bir radyolojik koruma sistemi geliştirilmiştir. Ancak halkın kaygısı devam etmektedir. Radyasyon, "korkunç hastalık" olarak bilinen kanserin birçok nedeni arasında yer almaktadır. Duyularımız radyasyonu algılayamaz ve bu görünmez risk daha da sinsi görünür. Toplu kaygımız, nükleer santrallerde ve diğer tesislerde meydana gelen kazaların anıları ve bazı durumlarda devam eden etkileri ve nükleer silahlar da dahil olmak üzere her türlü radyasyonu "nükleer" ile ilişkilendirme eğilimiyle daha da güçlenmektedir.

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), atmosferik nükleer silah denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintinin potansiyel sağlık risklerini tahmin etmek üzere 1955 yılında kurulmuştur. Bu komite, günümüzde, tüm kaynaklardan gelen radyasyon doz verilerini düzenli olarak yayınlamaktadır. Tablo 3.2′de verildiği gibi dünya nüfusu üzerinden ortalaması alınan yıllık etkin radyasyon dozu toplamda yaklaşık 2,8 mSv'dir (UNSCEAR, 2008). Bu toplamın yaklaşık %86'sı doğal kaynaklardan ileri gelmekte olup, yaklaşık yarısı evdeki radon bozunma ürünlerinden gelmektedir. Hastaların tıbbi maruziyeti toplamın yüzde 14'ünü oluştururken, diğer tüm yapay kaynaklar toplam değerin yüzde 1'inden daha azını oluşturmaktadır. Dozdaki en büyük farklılıklar, yıllık 10 mSv veya daha fazla doz verebilen evlerdeki radon bozunma ürünlerinden kaynaklanmaktadır. İşyerinde radyasyona maruz kalanların yıllık dozları, şu anda çoğu ülkede yasalarca

50 mSv veya daha azıyla sınırlandırılmıştır; ancak iş gücünün yalnızca küçük bir kısmı 20 mSv'yi aşmaktadır. Toplumun büyük bir kısmının yapay kaynaklara tesadüfen maruz kalması sonucu yılda 1 mSv'nin çok küçük bir kısmından fazlasını alması olası değildir. Bazı teşhis prosedürlerinde hastalara verilen dozlar yaklaşık 10 mSv olabilir. Duman alarmları ve ışıklı saatler gibi radyoaktif madde içeren tüketici ürünleri için yıllık dozlar en fazla 1 μSv'dir. Ancak toryum içeren gaz mantoları gibi daha az yaygın ürünler belirli durumlarda yılda 0,1 mSv'ye kadar radyasyona neden olabilir.

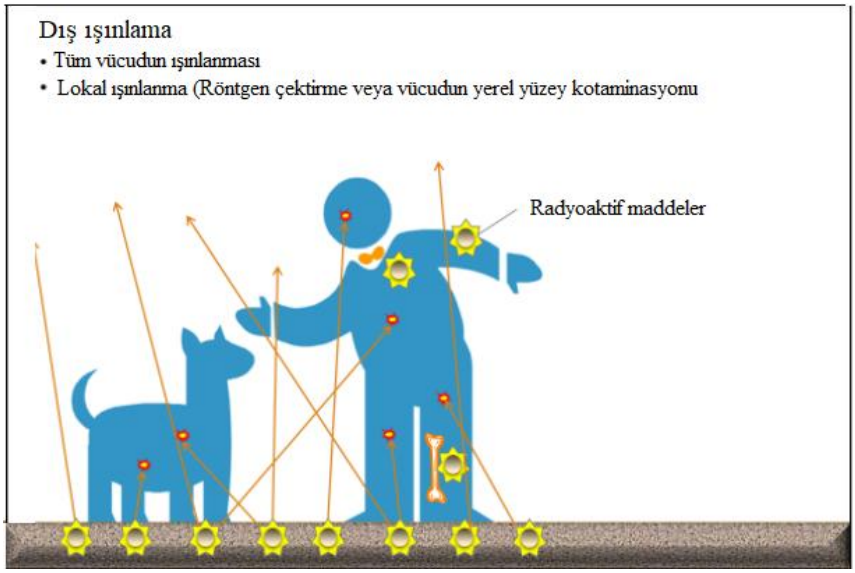
Tablo 3.2 Radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon doz değerlerinin dünya ortalaması (UNSCEAR, 2008)

Kaynaklar	Etkin yıllık doz (mSv)
Doğal kaynaklar	**2,416**
Dış ışınlanma	
Bina içi (kapalı ortam)	0,41
Bina dışı (açık ortam)	0,07
İç ışınlanma	
Solunum yoluyla	**1,256**
^{238}U ve ^{232}Th serileri	0,006
Radon	1,15
Toron	0,1
Sindirim yoluyla	**0,290**
^{40}K	0,17
^{238}U ve ^{232}Th serileri	0,12
Kozmik	**0,39**
Foton bileşenleri	0,28
Nötron bileşenleri	0,1
Kozmojenik radyonüklitler	0,01
Yapay	**0,4072**
Tıp	0,4
Atmosferik nükleer denemeler	0,005
Çernobil (Chernobyl)	0,002
Nükleer santraller	0,0002

3.4 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İnsanlar; bina içi ve/veya bina dışı, iş yerleri ve hastaneler veya tedavi merkezleri gibi farklı şartlar altında yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan kaynaklardan yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalabilirler. Bu maruziyet iç ve dış ışınlama gibi iki farklı yolla meydana gelebilir. İç ışınlama ile dış ışınlama arasındaki fark, radyasyon yayan kaynağın vücudun içinde mi yoksa dışında mı olduğuna bağlıdır. Vücut her iki durumda da radyasyona eşit şekilde maruz kalır. İç ışınlanma ve dış ışınlanma terimleri, doğal olarak oluşan radyasyon, kaza sonucu oluşan radyasyon veya tıbbi radyasyon gibi radyasyon türlerinden bağımsız olarak kullanılır.

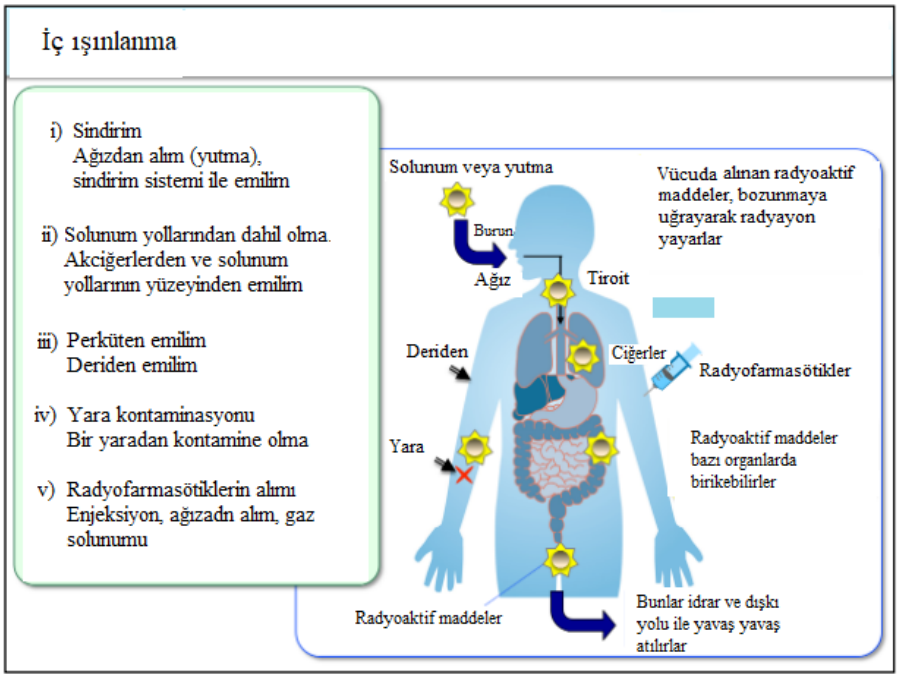
Şekil 3.10′da gösterildiği gibi dış ışınlanma, yerde veya havada bulunan veya giysilere ya da vücut yüzeyine yapışmış radyoaktif maddelerden (radyonüklit içeren malzemeler) gelen radyasyona maruz kalmak anlamına gelir. Vücudun radyasyona maruz kalmasından ne ölçüde etkileneceği, maruziyetin yerine ve kapsamına bağlıdır. Tüm vücut ışınlanması veya maruziyeti, tüm vücudun radyasyona maruz kalması anlamına gelirken, yerel (lokal) maruziyet, vücudun bir bölümünün radyasyona maruz kalması anlamına gelir. Tüm vücut maruziyetinde, tüm organlar ve dokular radyasyondan etkilenebilirken, yerel maruziyette etkiler prensip olarak maruz kalan organlar ve dokularla sınırlıdır. Bağışıklık sisteminin veya endokrin sistemin herhangi bir organı maruz kalan bölgeye dahilse, uzak organlar veya dokular dolaylı olarak etkilenebilir, ancak asıl endişe, maruz kalan organlar ve dokular üzerindeki etkilerdir. Organların radyasyona duyarlılığı farklılık gösterir. Bu nedenle, yerel maruziyette etkilerin kapsamı, maruz kalan bölgenin radyasyona karşı oldukça hassas organları içerip içermediğine bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Dış ışınlanma durumunda, zayıf nüfuz etme gücüne sahip α-parçacıkları derinin üzerinde durur ve bu nedenle herhangi bir etki oluşturmaz. Ancak, β-parçacıkları yayan büyük miktarda radyoaktif madde vücudun yüzeyine uzun süre yapışırsa, radyasyona karşı yüksek hassasiyete sahip olan cildin bazal hücrelerini ve saç kökü hücrelerini etkileyerek, ciltte kızarıklık, saç dökülmesi vb. ile karakterize cilt eritemi oluşmasına neden olabilir. Ancak, bu tür maruz kalmalar son derece nadirdir ve dış etkenlere maruz kalmanın başlıca sorunları, vücudun içini etkileyen γ- ışınları yayan radyoaktif maddelerle ilişkilidir.



Şekil 3.10 Dış ışınlama

İç ışınlanmada, radyoaktif maddelerin birikme olasılığı olan organlar ve dokular yüksek doz radyasyona maruz kalır. Birikmeye yatkın bu organ ve dokuların radyasyona karşı yüksek hassasiyetleri varsa, radyasyondan etkilenme olasılıkları daha yüksektir. Belarus Ukrayna'daki Çernobil nükleer santral kazasından sonra, çocuklar arasında tiroit kanseri vakalarında artış görülmüştür. Bu artış, hem radyoaktif iyotun tiroitte birikme eğiliminden hem de çocukların tiroitlerinin yetişkinlere göre radyasyona karşı daha yüksek hassasiyete sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.11′de gösterildiği iç ışınlanma (i) bir kişi yemek yerken yiyecek veya içecekle radyoaktif maddeler aldığında (yutma); (ii) bir kişi havadaki radyoaktif maddeleri soluduğunda (soluma); (iii) radyoaktif maddeler deri yoluyla emildiğinde (perkütan emilim); (iv) radyoaktif maddeler bir yaradan vücuda girdiğinde (yara kontaminasyonu); ve (v) radyoaktif maddeler içeren radyofarmasötikler tıbbi tedavi amacıyla uygulandığında ortaya çıkar. Radyoaktif madde türlerine bağlı olarak bazı belirli organlarda birikme meydana gelebilir. Bu büyük ölçüde radyoaktif maddelerin fizikokimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, kalsiyuma benzer özelliklere sahip olan stronsiyum, vücuda girdiğinde kemikler gibi kalsiyum açısından zengin bölgelerde birikme eğilimindedir. Sezyum ise potasyuma benzer özellikleri nedeniyle vücuda girdiğinde tüm vücuda dağılma eğilimindedir. Tiroit hormonlarının bir bileşeni olan iyot ister radyoaktif iyot ister kararlı iyot olsun, tiroitte birikme eğilimindedir. Bunula birlikte radyoaktif maddeler vücuda girdiğinde, diğer elementlere bozunurlar ve metabolizma yoluyla idrar ve dışkı yoluyla kademeli olarak atılırlar. Böylece vücuda giren radyoaktif maddeler hem fiziksel yarı ömürleri hem de biyolojik yarı ömürleri boyunca zamanla zayıflayana kadar radyasyona yayamaya devam ederler. İç ışınlama ilgili önemli bir sorun, uzun yarı ömre sahip ve alfa parçacıkları yayan radyoaktif maddelerden kaynaklanır. Kimyasal yapısı ve elemente özgü biyokinetik davranışı açısından, vücuda kolayca dâhil olan ancak atılması zor olan radyoaktif maddeler ve ayrıca belirli organlarda/dokularda birikme eğiliminde olanlar, iç maruziyet dozlarının artmasına neden oldukları için sorunlara yol açar. Örneğin, sindirim sisteminde kolayca emilmeyen plütonyum, vücuda gıda yoluyla alınmak yerine solunum yoluyla akciğerlere alınırsa endişe verici olabilir. Plütonyumun daha sonra akciğerlerden kan damarlarına girdiği ve kan akışıyla kemiklere ve karaciğere taşınarak orada yerleştiği bilinmektedir. Plütonyum bu tür organlarda alfa parçacıkları yaydığı için akciğer kanserine, kemik tümörlerine veya

karaciğer kanserine neden olabilir. Radyoaktif sezyum ise potasyuma benzer özellikleri nedeniyle vücuda kolayca girer, ancak aynı zamanda kolayca atılma eğilimindedir. Belirli bir organda birikmez, esas olarak kaslar tarafından alınır. Yetişkinlerde, vücuda giren radyoaktif sezyumun yarıya inmesi için gereken sürenin yaklaşık 70 gündür.



Şekil 3.11 İç ışınlama

İyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir canlıda biyolojik etki meydana getirebilmesi için, radyasyon enerjisinin canlıyı meydan getiren hücreler ve dokular tarafından soğurulması (absorplanması) ve dokularda dağılması gerekir. Radyasyon enerjisinin soğurulması ile biyolojik etkinin meydana gelmesi arasında geçen sürede aşağıda verilen dört süreç birbirini takip eder (Sultan, 2025): Birinci süreçte, fiziksel etkileşmeler meydana gelir ve iyonlaştırıcı radyasyonu absorplayan hücre veya dokuları oluşturan atomların veya moleküllerin uyarılma veya iyonlaşmalarını içerir. Etkileşmeler neticesinde meydana gelen ürünler; 10^{-10} s gibi çok kısa sürede ikincil tepkimelerin oluşmasına neden olurlar ve ikincil reaksiyon ürünleri ortaya çıkar (Sultan, 2025). İkinci süreçte, fizikokimyasal etkileşmeler meydana gelir ve ikincil tepkimeleri içerir. Üçüncü süreçte, kimyasal etkileşmeler meydana gelir ve radikallerin veya serbest atomların birbirleri ve ortamdaki moleküller ile tepkimelerini içerir. Dördüncü süreçte, biyolojik etkileşmelerin meydana gelir ve radyasyon etkisi

ile herhangi bir organizmada oluşan moleküler değişiklikleri içerir (Sultan, 2025). Bu kademeler neticesinde kromozomda meydana gelen hasarlar, bir takım biyolojik olayları tetikler. Bu olaylarda genlerin hasar almasına ve kansere sebep olabilir. Üreme organlarının hasar alması ise mutasyona götürebilir ve bu tip bir mutasyon nesillere aktarılabilir. Kalıtsal mutasyonlar ve kanser olayları, stokastik (olasılıklı) etkiler olarak isimlendirilir. Vücudun tamamı, kısa sürede yüksek seviyedeki radyasyon dozlarına (1 Sv- 10 Sv) maruz bırakıldığı zaman, çok sayıda hücre ölümü gerçekleşebilir. Bu durum, hayati organların ve sistemlerin fonksiyonlarını bozabilir. Bu bozulmalar neticesinde; kusma, mide bulantısı, derin doku ve cilt yanıkları, vücudun enfekte olması gibi ani (akut) görülen sağlık etkileri saatler, günler veya haftalar sonrasında ortaya çıkabilir. Vücudun tamamı, kısa sürede aşırı seviyedeki radyasyon dozlarına (≥10 Sv) maruz bırakıldığında, dokular ve iç organlar öyle hasar alır ki hayati sistemlerin fonksiyonları biter ve günler veya haftalar içinde ölüm gerçekleşir. Radyasyon dozu, hasarın büyüklüğünü artırır. Bu etkilere, belirli (deterministik) etkiler olarak tanımlanır ve eşik değerlerden daha küçük radyasyon doz seviyelerinde gözlenmeyebilir. Radyasyon dozları, eşik değerlerin altındaki seviyelere sınırlandırılırsa, belirli etkiler tamamen engellenebilir (Sultan, 2025).

Tüm vücuda çok yüksek bir doz, haftalar içinde ölüme neden olabilir. Örneğin, anında alınan 5 Gy veya daha fazla soğurulan doz, tedavi verilmediği takdirde kemik iliği ve gastrointestinal sistemde hasara yol açtığı için muhtemelen ölümcül olacaktır (Ford, 2004). Uygun tıbbi tedavi, 5 Gy'ye maruz kalan bir kişinin hayatını kurtarabilir, ancak 50 Gy'lik tüm vücuda uygulanan bir doz, tıbbi müdahaleyle bile neredeyse kesinlikle ölümcül olacaktır (Ford, 2004). Vücudun sınırlı bir bölgesine uygulanan çok yüksek bir doz ölümcül olmayabilir, ancak diğer erken etkiler ortaya çıkabilir. Örneğin, cilde anında emilen 5 Gy'lik bir doz, muhtemelen bir hafta veya daha kısa bir süre içinde eriteme (cildin ağrılı kızarması) neden olurken, üreme organlarına uygulanan benzer bir doz kısırlığa neden olabilir (Ford, 2004). Deterministik etkiler, yalnızca doz veya doz oranı belirli bir eşik değerinden büyükse ortaya çıkar ve etki, doz ve doz oranı arttıkça daha erken ve daha şiddetli ortaya çıkar. Bir bireydeki deterministik etkiler, klinik olarak radyasyona maruz kalmanın bir sonucu olarak tanımlanabilir (ancak kazalar sonucu ortaya çıktıkları nadir durumlarda da olsa). Deterministik etkilerin bir türü, maruziyetten daha uzun bir süre sonra ortaya çıkar (Ford, 2004). Bu tür etkiler

genellikle ölümcül değildir, ancak vücudun bazı bölümlerinin işlevi bozulabileceği veya diğer kötü huylu değişiklikler ortaya çıkabileceği için sakatlayıcı veya rahatsız edici olabilir. En bilinen örnekler katarakt (göz merceğinde opaklık) ve cilt hasarıdır (incelme ve ülserasyon). Bu durumları tetiklemek için normalde birkaç Gy′lik yüksek dozlar gerekir. Doz daha düşükse veya daha uzun bir süre boyunca verilirse, vücut hücrelerinin onarılması için daha fazla fırsat vardır ve erken bir yaralanma belirtisi olmayabilir. Yine de dokular stokastik etkilerin ancak yaşamın ilerleyen dönemlerinde (belki on yıllar sonra) veya hatta ışınlanan kişinin torunlarında ortaya çıkacak şekilde hasar görmüş olabilir (Ford, 2004). Doz arttıkça etki de artar. Ancak, herhangi bir etkinin zamanlaması ve şiddeti, doza bağlı değildir. Radyasyon, bu etkilerin çoğunun bilinen tek nedeni olmadığından, bir vakanın radyasyona maruz kalmanın sonucu olup olmadığını klinik olarak belirlemek genellikle imkansızdır (Ford, 2004). Stokastik etkilerin en önemlisi, her zaman ciddi ve genellikle ölümcül olan kanserdir. Çoğu kanserin kesin nedeni bilinmemekle veya yeterince anlaşılmamakla birlikte, tütün dumanı, asbest ve ultraviyole radyasyon gibi etkenlere maruz kalmanın yanı sıra iyonlaştırıcı radyasyonun da belirli kanser türlerinin oluşumunda rol oynadığı bilinmektedir. Kanser gelişimi, genellikle yıllar süren karmaşık ve çok aşamalı bir süreçtir. Radyasyonun, dokulardaki normal hücrelerin DNA'sında belirli mutasyonlar oluşturarak, esas olarak başlangıç aşamasında etki ettiği görülmektedir. Bu mutasyonlar, bir hücrenin bazen kötü huylu tümör gelişimine yol açabilen anormal bir büyüme yoluna girmesine neden olur. Radyasyona maruz kalmaktan kaynaklanan kanser vakaları ile diğer nedenlere bağlı kanser vakaları arasında ayrım yapılamayacağına göre, radyasyondan kaynaklanan kanser riskini nasıl hesaplayabilir? Uygulamada, belirli nüfus gruplarında belirli hastalıkların görülme sıklığının (vaka sayısı ve dağılımları) istatistiksel çalışması olan epidemiyolojinin kullanılması zorunludur. Radyasyona maruz kalan bir gruptaki kişi sayısını ve aldıkları dozları bilindiği varsayıldığında, gruptaki kanser oluşumunu gözlemleyerek ve benzer ancak ışınlanmamış bir grupta beklenen dozlar ve kanser sayısıyla karşılaştırarak, birim doz başına artan kanser riskini tahmin edebilir. Bu genellikle risk faktörü olarak adlandırılır. Tahminlerdeki istatistiksel belirsizlikleri en aza indirmek ve kanserin kendiliğinden gelişimini etkileyen yaş ve cinsiyet gibi faktörleri hesaba katmak için bu hesaplamalara geniş insan gruplarına ait verileri dahil etmek son derece önemlidir (Ford, 2004).

Tüm kanserler ölümcül değildir. Radyasyona bağlı tiroit kanserinden kaynaklanan ortalama ölüm oranı yaklaşık %10'dur, meme kanserinden kaynaklanan ölüm oranı yaklaşık %50 ve cilt kanserinden kaynaklanan ölüm oranı yaklaşık %1'dir. Genel olarak, tüm vücudu eşit şekilde ışınlayarak kansere neden olma riski, ölümcül bir kansere neden olma riskinin yaklaşık yarısı kadardır. Radyolojik korumada, ölümcül kanser riski, aşırı önemi nedeniyle daha fazla endişe yaratmaktadır. Ölümcül kanser risklerinin kullanılması, bunların hayatta karşılaşılan diğer ölümcül risklerle karşılaştırılmasını da kolaylaştırır (Ford, 2004). Buna karşılık, ölümcül olmayan risklerin karşılaştırılması zorluklarla doludur. Kanser dışında, radyasyonun diğer önemli geç etkisi kalıtsal hastalıklardır. Kanserde olduğu gibi, kalıtsal hastalık olasılığı da doza bağlıdır. Genetik hasar, erkeklerde sperm hücrelerini ve kadınlarda yumurta hücrelerini üreten testis ve yumurtalıkların ışınlanmasından kaynaklanır. İyonlaştırıcı radyasyon, bu hücrelerde veya onları oluşturan germ hücrelerinde mutasyonlara neden olabilir; bu mutasyonlar gelecek nesillerde zararlı etkilere yol açabilir. Mutasyonlar, tek germ hücrelerindeki DNA'da meydana gelen yapısal değişiklikler sonucu oluşur ve bu hücreler daha sonra kalıtsal bilgiyi gelecek nesillere aktarır. Oluşabilecek kalıtsal hastalıkların şiddeti, erken ölümden ciddi zihinsel bozukluklara, nispeten önemsiz iskelet anormalliklerinden küçük metabolik bozukluklara kadar değişir. Mutasyonlar insanlarda görünürde herhangi bir neden olmaksızın ortaya çıksa da doğal radyasyon ve çevredeki diğer etkenler de mutasyonlara neden olabilir ve kalıtsal hastalıkların yaygınlaşmasına katkıda bulunabilir (Ford, 2004). Bununla birlikte, çocuklarda doğal veya yapay radyasyona maruz kalmaya bağlı kalıtsal kusurlar için kesin bir kanıt bulunmamaktadır. Özellikle atom bombalarından kurtulanların çocukları üzerinde yapılan kapsamlı çalışmalar, kalıtsal kusurlarda istatistiksel olarak anlamlı bir artış göstermemiştir (Ford, 2004). Bunun yerine, olumsuz bulgular, onlar için risk faktörünün üst sınırını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun hayvanlarda, özellikle de farelerde neden olduğu kalıtsal hasar üzerine geniş deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, geniş bir doz ve doz hızı aralığını kapsamakta ve iyonlaştırıcı radyasyonun mutasyonlara neden olduğunu açıkça göstermektedir. Sonuçlar ayrıca, bilinen dozların kalıtsal kusurlara ne sıklıkla neden olduğunu da göstermektedir. Atom bombasından kurtulanlara ilişkin bulgularla birlikte değerlendirildiğinde, bu bilgi insanlar için kalıtsal risk tahminlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır (Ford, 2004). Bu bağlamda, ICRP düşük doz ve doz hızlarına

maruz kalan genel bir popülasyonda ciddi kalıtsal hastalık riskini değerlendirmiştir. Bu tür hastalıkların gelecek nesillerde herhangi bir zamanda ortaya çıkması için 1,0 × 10^{-2} 1/Sv veya Sv başına 100'de 1 risk faktörü tahmin edilmiştir (Ford, 2004). Hemofili ve Down Sendromu gibi kesinlikle kalıtımsal hastalıklara yol açan mutasyonlar toplamın yaklaşık yarısını oluşturur: geri kalanı diyabet ve astım gibi çok faktörlü hastalıklar adı verilen bir gruptan kaynaklanır. Bu risk tahmini, özellikle bozuklukları etkileyen genetik ve çevresel faktörlerin etkileşiminin yeterince anlaşılmadığı çok faktörlü hastalıklar için önemli bir belirsizlik taşır (Ford, 2004). Testis ve yumurtalıkların ışınlanması, yalnızca yaşamın üreme döneminde veya öncesinde meydana gelirse kalıtsal etki riski taşır (Ford, 2004). Çalışan bir nüfusun üreme olasılığı genel nüfusa göre daha düşük olduğundan, çalışanlar için risk faktörü daha küçüktür. ICRP, çalışan bir popülasyon için tüm gelecek nesillerde ciddi kalıtsal hastalıklar açısından riski 0,6 × 10^{-2} 1/Sv veya Sv başına 170'te 1 olarak tahmin etmektedir (Ford, 2004). Daha yeni değerlendirmeler, özellikle çok faktörlü hastalıklar için kalıtsal etki risklerinin aslında bu önceki tahminlerden daha düşük olabileceğini göstermektedir. UNSCEAR, BM Genel Kurulu'na sunduğu 2001 tarihli Raporunda, radyasyona maruz kalmanın kalıtsal risklerine dair kapsamlı bir inceleme sunmuştur (Ford, 2004). Sadece bir nesilde radyasyona maruz kalan bir popülasyon için, radyasyon sonrası ilk nesil için riskin Gy başına %0,3-0,5 olduğu tahmin edilmiştir. Bu, yukarıda alıntılanan tüm nesiller için ICRP tahmininin üçte biri ile yarısı arasındadır. İlk nesil dışındaki nesiller için riskler bundan çok daha düşüktür (Ford, 2004). Başka bir deyişle, Gy başına bu yeni risk tahmini, insan popülasyonunda bu bozuklukların başlangıç sıklığının %0,4-0,6'sı mertebesindedir. Rahimdeyken radyasyona maruz kalan çocuklar için riskler özel olarak belirtilmelidir (Ford, 2004). Bir embriyo veya fetüs, organların oluştuğu dönemde radyasyona maruz kalırsa, baş çapının küçülmesi veya zihinsel gerilik gibi gelişimsel kusurlar ortaya çıkabilir (Ford, 2004). Doğumdan önce atom bombasına maruz kalan kurtulanlar üzerinde yapılan çalışmalar, zihinsel geriliğin çoğunlukla gebe kaldıktan sonraki 8 ila 15 hafta arasındaki dönemde maruz kalmayı takip ettiğini göstermiştir (Ford, 2004). Doz ve yanıt arasındaki ilişkinin biçimi ve altında hiçbir etki görülmeyen bir eşik değerinin varlığı konusunda tartışmalar olmuştur (Ford, 2004). Ancak ICRP, en hassas 8-15 haftalık dönemdeki maruziyetler için, zekâ seviyesindeki (IQ, intelligence quotient) düşüşün bir eşik olmaksızın doğrudan doza bağlı olduğunu ve Sv başına 30 IQ puanı

kaybı olduğunu varsayar (Ford, 2004). Dolayısıyla, örneğin, gebeliğin bu aşamasında fetüsün 5 mSv'ye maruz kalması, tespit edilemeyecek 0,15 puanlık bir IQ kaybına yol açacaktır. Embriyo ve fetüste yüksek dozlar ölüme veya büyük malformasyonlara neden olabilir. Bu etkiler için eşik, gebe kalma süresine bağlı olarak 0,1 Sv ile 1 Sv veya daha fazlası arasındadır (Ford, 2004). Fetüsler için genetik risklerin, doğumdan sonra tamamen üreme çağındaki bir popülasyondaki risklerle aynı olduğu, yani $2,4 \times 10^{-2}$ 1/Sv veya Sv başına 40'ta 1 olduğu düşünülmektedir (Ford, 2004). Doğumdan önce radyasyona maruz kalmak da çocukluk çağında malignite riskini artırabilir. 15 yaşına kadar ölümcül kanser riskinin yaklaşık $3,0 \times 10^{-2}$ 1/Sv veya Sv başına 30'da 1 olduğu ve genel kanser riskinin bu değerin yaklaşık iki katı olduğu tahmin edilmektedir (Ford, 2004). Tüm bu nedenlerden dolayı, hamileliğin sonuna kadar ertelenmesi istenmeyen bir durum olmadıkça, hamile kadınların karın bölgesinin tanısal röntgenlerinden kaçınmaları en iyisidir. Bu yüzden gerekli şart, bireyleri ve onların soyundan gelenleri kabul edilemez düzeyde riske maruz bırakmama yükümlülüğüdür (Ford, 2004). Bu, katı doz sınırları getirilerek ve koruma optimizasyonu ilkesi uygulanarak sağlanır. Bu doz ölçütü veya sınırı, çalışanlar için yılda 20 mSv (beş yıllık bir süre boyunca ortalama, herhangi bir yılda en fazla 50 mSv) ve halk için yılda 1 mSv doz olarak belirlenmiştir (Ford, 2004). Etkili doz cinsinden ifade edilen bu temel sınırlar, kanser ve kalıtsal hasar gibi olasılık unsuru içeren ciddi etkilerin görülme sıklığını kontrol altına almayı amaçlamaktadır. Doz sınırları hakkında iki yaygın yanılgı vardır. Birincisi, biyolojik riskte ani bir değişikliği, güvenli ve güvensiz arasında bir sınır çizgisini işaret ettikleridir. Doz ve risk tartışmasından bunun böyle olmadığı anlaşılmalıdır. Ayrıca, çalışanlar ve halk için farklı doz sınırları olduğu gerçeğinden de anlaşılmalıdır (Ford, 2004). Bu sınırlar farklılık gösterir çünkü daha yüksek riskler, işlerinden fayda sağlayan çalışanlar için, riski istemsiz olan halk için olduğundan daha kabul edilebilir kabul edilir. İkinci yanılgı ise, dozları sınırların altında tutmanın radyolojik korumadaki tek önemli gereklilik olduğudur (Ford, 2004). Aksine, öncelikli gereklilik, dozları makul ölçüde elde edilebilecek en düşük seviyede tutmaktır. Bu durum, elbette doz sınırlarının altında belirlenen araştırma seviyelerine daha fazla vurgu yapılmasıyla yansıtılmaktadır (Ford, 2004).

3.5 Radyoaktivite ve Bozunma Süreçleri

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeğinin, daha kararlı duruma geçebilmesi için radyoaktif bozunma süreçleri sonucunda elektromanyetik veya tanecik radyasyonu yayınlayarak kendiliğinden farklı atom çekirdeklerine dönüşmesidir (Knoll, 2000; Krane, 1987; Sultan, 2025). Radyoaktif bozunma, bir atomun çekirdeğinde parçacıkların veya elektromanyetik radyasyonun yayılmasına neden olan kendiliğinden bir değişimdir. Radyoaktif bozunma biçimleri esas olarak alfa ve beta bozunmasıdır. Kendiliğinden fisyon ise daha nadir görülen birkaç süreçten biridir. Radyoaktif bozunma kütle değişimiyle tetiklenir. Bozunma ürünün veya ürünlerinin kütlesi, orijinal çekirdeğin kütlesinden daha küçüktür. Rastgele gelişen ve istatistik yasalarına tabi olan radyoaktif bozunma, her zaman enerji veren (ekzoerjik) bir süreçtir (Gilmore, 2008). Bozunma süreci, Bozunum Yasası olarak bilinen aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \tag{3.14}$$

Burada, N_0, t=0 anındaki ve N(t), t süre sonraki kararsız çekirdek sayısı ve λ, her bir kararsız çekirdeğin karakteristiği olan bozunum sabitidir. λ, aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987):

$$\lambda = \frac{Ln(2)}{T_{1/2}} \tag{3.15}$$

Burada $T_{1/2}$, başlangıçtaki kararsız çekirdek sayısının, yarıya düşmesi için geçen süre olarak tanımlanan yarılanma süresidir. Bir kaynağın radyoaktivitesi (birim zamandaki bozunum sayısı) (A), aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N \tag{3.16}$$

Aktivitenin geleneksel birimi, curie (Ci) olarak belirlenmiştir ve bir Ci, bir saniyede 3,7 x 10^{10} tane çekirdeğin bozunuma uğraması olarak tarif edilir (1 Ci =3,7 x 10^{10} bozunum/s). Son yıllarda aktivitenin uluslararası birimi olarak becquerel (Bq,)

kullanılmaktadır. Bir Bq, bir çekirdeğin bir saniyede bozunmasıdır (Bq= bozumun/s). Aktivite derişimi (konsantrasyonu), katılarda kütle başına aktiviteyi (Bq/kg) ve sıvılar-gazlarda iaşe hacim başına aktiviteyi (Bq/L) (Sultan, 2025).

Kararsız bir çekirdek, alfa bozunması sürecinde, enerjik α-parçacığı taneciği ve beta bozunması sürecinde ise β-parçacığı yayınlayarak daha kararlı duruma geçer. Bu bozunma süreçlerinden sonra daha kararlı ancak uyarılmış durumda kalan çekirdek, gama bozunması yaparak γ-ışını yayınlayarak taban duruma nükleer özelliğini kaybetmeden geçiş yapar (Krane, 1987; Sultan, 2025;). Alfa tanecikleri; 2 nötron ve 2 protondan meydana gelen helyum (He) atomudur. Coulomb itmesi etkisi ile oluşan alfa bozunma süreci, özellikle kütle numarası 210′dan büyük olan çekirdeklerde etkindir. Bir α- bozunum süreci sembolik olarak aşağıda verildiği gösterilebilir:

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + \alpha\left({}^{4}_{2}He\right) \tag{3.17} $$

Burada, X, başlangıçtaki ve Y, bozunum sonrasında oluşan çekirdektir. Bu bozunumda, X çekirdeğinin nötron sayısı ve proton sayısı 2 (kütle sayısı 4) birim azalır. Ayrıca bu bozunumda, nötron sayısı, proton sayısı, açısal ve doğrusal momentum ve enerji korunmaktadır.

Beta bozunum sürecinde, X çekirdeğinin nötron ve proton sayıları değişirken kütle sayısı sabit kalır. Üç tür beta bozunma süreci vardır: Negatif beta veya negatron bozunması (X çekirdeğin bir nötronu, protona dönüşür) pozitif beta veya pozitron bozunması (X çekirdeğin bir protonu, nötrona dönüşür) ve elektron yakalama bozunması. Bu bozunumlar, sembolik olarak sırayla,

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^{-}(e^{-}) + \bar{\nu} \qquad n \rightarrow p + e^{-} \tag{3.18} $$

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \beta^{+}(e^{+}) + \nu \qquad p \rightarrow n + e^{+} \tag{3.19} $$

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \nu \qquad p + e^{-} \rightarrow n \tag{3.20} $$

İle gösterilir. Burada ν, nötrino ve $\overline{\nu}$ ise anti-nötrinodur.

Gama bozunum sürecinde uyarılmış bir durumda olan çekirdek, daha düşük enerji düzeyine ve/veya taban duruma nükleer durumlar arasındaki enerji farkına eşit bir enerjiye sahip γ-ışınını yayınlayarak geçer (Krane, 1987; Sultan, 2025). Gama bozunumu, kütle numarası 5′ten büyük olan ve uyarılmış bağlı durumlara sahip çekirdeklerde oluşur ve yarılanma süreleri genellikle 10^{-9} saniyeden daha düşüktür. Uzun süreli uyarılmış durumlar, izomerik durumlar veya yarı kararlı durumlar ve yarılanma süreleri uzun olan geçişler ise izomerik geçişler olarak bilinir (Krane, 1987; Sultan, 2025). Bununla birlikte, iç dönüşüm bozunma sürecinde, fazla enerji gama-ışını fotonu olarak yayınlanmaz ve gama-ışını fotonu, çekirdeğe en yakın yörüngedeki elektronla etkileşerek onun atomdan koparılmasına neden olur.

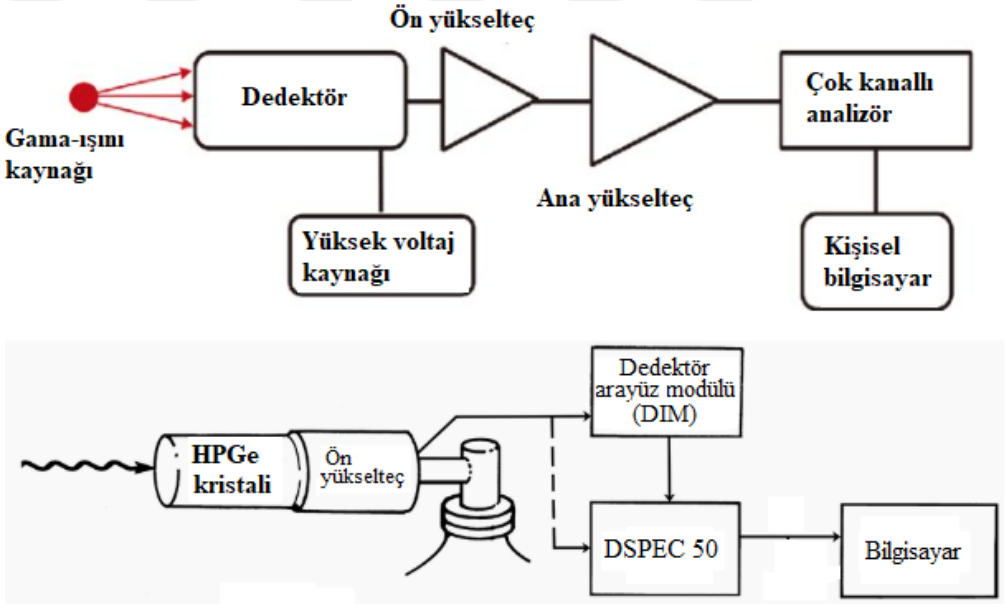
3.6 Radyoaktivite Analiz Yöntemleri

Radyoaktivite analizi için genel olarak alfa-, beta- ve gama-ışını spektroskopik analiz yöntemleri kullanılmaktadır (Sultan, 2025). Bu kısımda sadece tez kapsamında olan gama-ışını spektroskopik analiz yöntemi ile ilgili öz bilgi verilmiştir. Gama-ışını karakteristiktir, enerji düzeyleri sabittir ve enerji yoğunluğu zamanla azalır (Gilmore, 2008; Knoll, 2000; Krane, 1987). Gama-ışını spektroskopisi, çeşitli matrislerdeki değişik örneklerin içerebilecekleri γ-ışını yayınlayan radyonüklitlerin nitel ve nicel olarak analizlerini mümkün kılan bir nükleer analitik yöntemdir (Sultan, 2025). Bu yöntem, diğer bilinen analitik yöntemlere göre en az seviyede örnek hazırlama süreci ile bir analiz işleminde çoklu radyonüklitlerin belirlenmesini sağlayabilen tahribatsız analiz yöntemidir. Bu spektroskopik yöntem; nükleer tıp, sağlık fiziği, nükleer madde kaçakçılığı, malzeme araştırmaları, çevre bilimi, nükleer tesislerde izleme gibi alanlarda ve nötron aktivasyon analizi gibi uygulamalarda etkin ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Sultan, 2025). Hızlı, tekrarlanabilir, güvenilir, doğru ve kesin ölçme özelliğinden ve düşük analiz maliyetinden dolayı, dünya genelinde endüstriyel tesislerde ve akademik laboratuvarlarda yaklaşık iki yüz binden fazla gama-ışını spektrometresinin olabileceği tahmin edilmektedir (Sultan, 2025).

Gama-ışını spektroskopisinin en önemli elemanı olan dedektörlerin çalışma ilkesi, ölçülecek radyasyonun, dedektör malzemesi ile etkileşmesine bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi (Şekil 3.7) γ-fotonları, dedektör malzemesi ile fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu olmak üzere üç farklı şekilde etkileşim yaparlar (Knoll, 2000; Krane, 1987). Radyasyon tespiti ile ilgili etkileşim süreçleri, tamamen istatistiksel olarak gerçekleşir. Demetteki γ- fotonların, malzeme ile nasıl etkileşime gireceği, yukarıda bahsedilen bu üç etkileşimin tesir kesitleri hesaplanır ve ilgili γ-foton enerjisindeki en yüksek değere göre tahmin edilebilir (Şekil 3.7). Fotoelektrik olayının etkileşme tesir kesiti, atom sayısı ile doğru ve gelen γ- fotonunun enerjisi ile ters orantılıdır. Böylece fotoelektrik olayının meydana gelem olasılığı, hedef atomun atom sayısıyla önemli ölçüde artar. Aynı zamanda fotoelektrik olayı, bağıl olarak düşük enerjiye sahip X- ve γ-ışınları için baskın bir süreçtir (Sultan, 2025). Compton olayı, fotonlar ile serbest veya gevşek bağlı elektronların esnek olmayan saçılması veya çarpışmasıdır (Knoll, 2000; Sultan 2025). Fotoelektrik olayından farklı olarak Compton olayında, foton enerjisinin sadece bir bölümünü elektrona aktarır ve sürece sadece dış yörüngedeki serbest elektronlar dâhildir (Knoll, 2000; Sultan 2025). Bu durumda gelen foton, geliş açısına göre bir açıda saçılırken elektronun da farklı bir açıda saçılmasını sağlar. Böylece elastik olmayan saçılmalar, bütün açılarda mümkün olabileceğinden dolayı elektronun kazandığı enerji, sıfırdan γ-ışını enerjisinin önemli bir bölümünde kadar değişebilir (Knoll, 2000; Sultan, 2025). Compton olayı olma ihtimali, hedef atomlarının elektron sayısına bağlı olduğundan atom sayısı ile doğru orantılı olarak artar (Sultan, 2025). Çift oluşumu sürecinde bir γ-fotonu, elektron-pozitron çiftine dönüştür. Çift oluşumu olayı, eğer fotonun enerjisi, elektron-pozitron çiftinin durgun kütle enerji toplamı olan 1,022 MeV′den büyük ise enerjik olarak mümkün olur. Uygulamalarda, bu etkileşmenin olma ihtimali, foton enerjisi birkaç MeV'e yaklaşana kadar çok düşüktür ve bu yüzden çift oluşumu baskın olarak yüksek enerjili fotonlar için etkindir (Knoll, 2000; Sultan, 2025).

Tipik bir gama-ışını spektrometresi, şematik olarak Şekil 3.12′de gösterildiği gibi bir dedektör, bu dedektöre bağlı elektronik birimlerden (yüksek gerilimli güç kaynağı, ön yükselteç, yükselteç, analog-sayısal dönüştürücü) ve çok kanallı analizör (MCA) veya bilgisayar ve yazıcıdan meydana gelmektedir (Sultan, 2025). Elektronik birimin fonksiyonu, sinyal darbeleri ile oluşturulan elektronların toplamak, bu darbeleri

işlemek ve yükseklik veya enerjiye göre sınıflandırmaktır. Bir gama-ışını spektrumu, aşağıda verilen aşamalardan sonra elde edilmektedir: (i) γ- fotonun, dedektör kristal ile daha önce bahsedilen etkileşim süreçlerinden sonra elektronlar oluşur; (ii) uygulanan besleme gerilimi, elektronları kristalden süpürür ve elektronlar akım sinyal darbesini meydana getirir; (iii) darbenin genliği ön yükselteç ile yükseltilir ve daha sonra darbenin genliği, yükselteç ile daha da güçlendirilir ve şekillendirilir; (iv) güçlendirilmiş sinyal darbesi bir analog-sayısal dönüştürücü ile sayısal değerlere dönüştürülür ve (vi) sayısal değerler, çok kanallı analizöre gönderilir ve burada darbeler, kanal numarasına göre yerleştirilir ve böylece bir gama-ışını spektrumu elde edilir. Darbelerin oluşturduğu fotopiklerin alanları, ilgili radyonüklitin aktivitesi ile ve kanal numarası da radyonüklitin enerjisi ile ilgilidir (Sultan, 2025).



Şekil 3.12 Bir gama-ışını spektroskopisi (Gilmore, 2008)

Gama-ışını spektroskopilerinde, yarı iletken veya inorganik sintilasyon dedektörleri kullanılmaktadır (Sultan, 2025). Genel olarak yarı iletken dedektörü olarak HPGe ve sintilasyon dedektörü olarak da NaI(Tl) kullanılır (Knoll, 2000; Sultan, 2025). HPGe dedektörünün, NaI(Tl) dedektörüne göre algılama verimi düşük iken ayırma gücü yüksektir. Genelde, bir HPGe dedektörü, ısıl uyarılma ile sonuçlanabilecek elektronik gürültüyü en aza indirgemek amacıyla sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır (Sultan, 2025). Bir dedektörün duyarlılığı, herhangi bir kaynaktan yayınlanan gama-ışınlarından kaç tanesinin elektrik darbesine dönüştüğünün bir ölçüsü olan dedektör

verimi ile doğru ile orantılıdır. Bir HPGe dedektörü ile ilgili dört verimden bahsedilebilir: 1) her bir Ge kristaline özgün verim, 2) mutlak verim, 3) NaI(Tl) dedektörüne göre bağıl verim ve 4) tam enerjili fotopik verimi (Sultan, 2025). Bir dedektörün ayırma gücü (rezülasyonu), belirli bir enerjideki tek bir γ-enerji fotopikinin yarı yüksekliğindeki tam genişliğinin ölçüsüdür. Ayırma gücü, HPGe için birkaç keV iken NaI(Tl) için ^{137}Cs′nin gama-ışını enerjisinin yüzdesi cinsinden verilir (yaklaşık olarak 40-60 keV dir) (Knoll, 2000).

Bir gama-ışını spektroskopisinde, enerji kalibrasyonu, kanal sayısına karşılık gelen γ-ışını enerjisinin bilinmesi için farklı geometrilerdeki (nokta, ampul, sıvı vb.) standart kaynaklar kullanılarak yapılmaktadır. Enerji kalibrasyonu aşağıda verildiği gibi yapılır: Standart kaynak, dedektör üzerine konulur; belli bir süre sayılır, ilgili gama-ışını fotopikleri oluşturulur; fotopiklerin tepe noktasına karşılık gelen kanal sayısı belirlenir ve not edilir. Daha sonra bu veriler, birinci gerektiğinde ikinci veya üçüncü) dereceden bir polinoma uydurularak kanal sayısı ile γ- ışını enerjisi arasındaki ilişkiyi veren bağıntı elde edilir (Knoll, 2000).

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 Örneklerin Toplanması

Bebek formülleri veya (mamaları) doğrudan tüketilebilir veya su ilavesi dışında herhangi bir işlem gerektirmez ve tüketime hazır süt bazlı toz veya sıvı formda bulunabilir. Kolay ulaşılabilir olmaları ve pratik hazırlanma süreçleri nedeniyle sıklıkla tercih edilirler (Açıkgöz, 2023). Günümüzde bebek maması sektöründe küresel olarak birçok şirket faaliyet göstermektedir (Açıkgöz, 2023; Başaran ve Aydın, 2022). Türkiye'de ticari bebek ve çocuk maması ürünlerinin çeşitliliğinde ve tüketiminde bir artış görülmektedir (Şan ve Gökçay, 2023). Ancak son yıllarda Türkiye'deki bebek sütü ve bebek maması pazarı, ekonomik durum, azalan doğum oranları ve emzirme ile ev yapımı seçeneklerden kaynaklanan rekabetin artması gibi faktörler nedeniyle düşük düzeyde büyüme yaşamıştır (Statista, 2025). Ancak bu ürünlerin sunduğu kolaylık talebi artırmaya devam etmektedir (Statista, 2025). Yıllık yaklaşık %6 büyüme beklentisiyle, bebek maması pazarındaki gelirin 2025 yılında 982 milyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (Statista, 2025). Türkiye, bebek mamalarının %45'ini çoğunlukla Almanya ve Hollanda'dan ithal etmektedir (Techsciresearch, 2025).

4.2 Örneklerin Analiz için Hazırlanması

Bu çalışmada, Türkiye nüfusunun tercihlerini ve tüketim alışkanlıklarını yansıtan en popüler ticari yerli ve ithal bebek formülü ve devam formülü markaları radyoaktivite ölçümü için seçilmiştir. Tez kapsamında, Ankara ve İstanbul'daki süpermarketlerden satın alınarak, 16 ticari markaya ait toplam 46 bebek formülü ve devam formülü örneği toplanmıştır. Tablo 4.1'de, toplanan örneklerin menşe ülkeleri ve önerilen yaş grupları ve Tablo 4.2′de ise türleri ve içerikleri listelendi. Toplanan tüm örnekler, orijinal ambalajlarında Kastamonu Üniversitesi Fen Fakültesi Örnek Hazırlama Laboratuvarına getirilmiş ve örnekler, ticari kaygılar göz önüne alınarak marka ve firma ismi verilmeden BFDF olarak kodlanmıştır. Örnekler, herhangi bir dış bulaşmadan (kontaminasyondan) kaçınmak için dikkatlice korunmuştur. Orijinal ambalajı açıldıktan sonra örnekler kurutma işlemine tabi tutuldu ve daha sonra katı

hacimsel örnekler, verim kalibrasyonunda kullanılan referans malzemeler ile aynı geometride ve şekilde olabilmesi için öğütülerek toz hâline getirildi. Her bir toz örnek, verim kalibrasyonu için kullanılan polipropilen örnek kaplarına yerleştirildi ve hassas bir terazi kullanılarak tartıldı. Örnek kapları radon gazının kaçışını önlemek amacıyla parafin filmle sızdırmaz bir şekilde kapatıldı (Fotoğraf 4.1). Örnekler; ^{226}Ra ve ^{232}Th radyonüklitleri ile bozunma ürünleri arasında kalıcı bir denge sağlanması için 30 gün süreyle laboratuvarda uygun bir yerde bekletildi.

4.3 Örneklerin Radyonüklit İçeriklerinin Belirlenmesi

Bebek formülleri örneklerinin doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit seviyeleri, Kastamonu Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan p-tipi eş eksenli yarı iletken yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüne (ORTEC GEM50P4-83) sahip gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlendi (Fotoğraf 4.2). Teknik özellikleri, Tablo 4.3′te verilen germanyum dedektörü, Fotoğraf 4.2'den de görülebileceği gibi laboratuvar ortamındaki radyoaktivite seviyesini indirgemek amacıyla kurşundan yapılmış yüksek performanslı kurşun zırh içine yerleştirilmiştir. Yüksek performanslı ve düşük çevre radyasyon seviyeli (düşük backgroundlu) kurşun zırh, 4 litreye kadar Marinelli kaplara uygun, yaklaşık 28 cm çapında x 41 cm derinliğinde bir boşluğa sahiptir. Zırhın içi, kurşun (Pb) X-ışınlarını soğurması için bakır ve kalay katmanlarından oluşan kademeli bir astar ile kaplanmıştır. Zırh malzemesi, yaklaşık 10 cm kalınlığında yeniden işlenmiş kurşundur. Destek ayağı ve kalkan kılıfı düşük karbonlu çelikten yapılmıştır. Tüm dış yüzeyler dayanıklı dokulu poliüretanla kaplanmıştır. Germanyum dedektörü, elektronik gürültüyü düşük düzeyde tutmak için sıvı azot sıcaklığında tutulmaktadır. Bunun için azot kapı (30 L'lik Dewar) kullanılmıştır. Dedektör, ara yüz modülü (DIM) ve ileri sayısal sinyal işlemi (DSP) içeren ve tam özellikli 16-K çok kanallı sayısal spektrum analizörüne (DSPEC-50) bağlıdır (Sultan, 2025). DSPEC-50, fotopikleri otomatik olarak bulan, fotopikleri değerlendiren, fotopiklerin belirsizliğini hesaplayan, kütüphanesi ile gerektiğinde radyonüklitleri belirleyen ve aktivite analizlerini yapabilen GammaVision gama spektroskopi yazılımı ile birlikte çalışmaktadır (Sultan, 2025).

Tablo 4.1 Bebek ve devam formülleri örnekler

Örnek kodu	Yaş grubu	Üretim yeri
BFDF-1	6– 36 ay	Hollanda
BFDF-2	0– 6 ay	Hollanda
BFDF-3	9– 12 ay	Hollanda
BFDF-4	0– 36 ay	Hollanda
BFDF-5	0– 6 ay	Polonya ve Hollanda
BFDF-6	12– 36 ay	Polonya
BFDF-7	0– 36 ay	Polonya
BFDF-8	0– 36 ay	Hollanda
BFDF-9	6– 36 ay	Polonya
BFDF-10	6– 36 ay	Almanya
BFDF-11	6– 36 ay	Almanya
BFDF-12	6– 36 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-13	6– 36 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-14	0– 6 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-15	9– 12 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-16	0– 6 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-17	12– 36 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-18	9– 12 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-19	0– 6 ay	Almanya ve İngiltere
BFDF-20	0– 36 ay	Almanya
BFDF-21	12– 36 ay	Almanya
BFDF-22	6– 36 ay	Almanya
BFDF-23	6– 36 ay	Almanya
BFDF-24	0– 36 ay	Almanya
BFDF-25	6– 36 ay	Almanya
BFDF-26	12– 36 ay	Almanya
BFDF-27	6– 36 ay	Almanya
BFDF-28	0– 6 ay	İsviçre
BFDF-29	0–12 ay	İsviçre
BFDF-30	0– 6 ay	İsviçre
BFDF-31	4– 36 ay	Türkiye
BFDF-32	6– 12 ay	Türkiye
BFDF-33	6– 36 ay	Türkiye
BFDF-34	6– 36 ay	Türkiye
BFDF-35	6– 36 ay	Türkiye
BFDF-36	0– 6 ay	Türkiye
BFDF-37	6– 12 ay	Fransa
BFDF-38	0– 6 ay	Fransa
BFDF-39	6– 12 ay	ABD
BFDF-40	0– 36 ay	Türkiye
BFDF-41	6– 36 ay	Türkiye
BFDF-42	0– 36 ay	ABD
BFDF-43	0– 12 ay	Türkiye
BFDF-44	6– 36 ay	Türkiye
BFDF-45	6– 36 ay	Portekiz
BFDF-46	12– 36 ay	Türkiye

Tablo 4.2 Bebek ve devam formüllerinin tür ve içerikleri

Örnek kodu	Türü	İçeriği
BFDF-1	Devam sütü	Süt Tozu, bitkisel yağlar, laktoz, vitaminler ve mineraller (magnezyum, kalsiyum, potasyum, fosfor, demir, çinko, bakır, klor, selenyum ve iyot)
BFDF-2	Devam sütü	Süt, kalsiyum, D vitamini, prebiyotik lifler, vitaminler ve mineraller
BFDF-3	Devam sütü	Süt, demir, Omega 3, Omega 6, kalsiyum, D vitamini, prebiyotik lifler, vitaminler ve mineraller
BFDF-4	Bebek sütü	Süt, palm, hindistan cevizi, kanola, yüksek oleik asitli ayçiçek yağları, laktoz, vitaminler, mineraller,
BFDF-5	Devam sütü	Süt, vitaminler, mineraller: iyot, prebiyotik lifler, esansiyel yağ asitleri: Omega-3 ve Omega-6, nükleotidler ve laktoz
BFDF-6	Devam sütü	Süt, vitaminler, mineraller, prebiyotik bileşenler ve laktoz
BFDF-7	Bebek sütü	Süt, demineralize peynir altı suyu tozu (sütten), bitkisel yağlar, laktoz (sütten), yağsız süt tozu, prebiyotik lifler, balık yağı, mineraller ve vitaminler
BFDF-8	Bebek maması	Laktozsuz süt bazlı formül, taurin ve nükleotid
BFDF-9	Sütlaç	Süt tozu, pirinç unu veya pirinç unu bazlı nişasta, şeker veya doğal tatlandırıcılar, vitaminler, mineraller, bitkisel yağlar, probiyotikler
BFDF-10	Bebek maması	Tahıllar (pirinç, buğday veya yulaf), meyve püresi (elma, armut, muz gibi doğal meyve püresi), süt tozu veya yoğurt, vitaminler ve mineraller
BFDF-11	Sütlaç	Süt, pirinç, vitaminler ve mineraller
BFDF-12	Bebek maması	Vitaminler, doğal meyve püresi, irmik, B1 (tiamin), B2 (riboflavin), B3 (Niasin), B6 (piridoksin) ve B12 (kobalamin)
BFDF-13	Bebek maması	Süt, bal, irmik, vitaminler, mineraller ve prebiyotik
BFDF-14	Bebek sütü	Süt, kısmi hidrolize edilmiş peynir altı suyu proteini (sütten), azaltılmış laktoz içeriği, prebiyotik lifler, Omega-3 yağ asidi, vitamin ve mineraller
BFDF-15	Devam sütü	Süt, Prebiyotik lifler, vitaminler, mineraller ve balık yağı
BFDF-16	Bebek sütü	Süt, probiyotik bileşenler, vitaminler ve mineraller
BFDF-17	Devam sütü	Süt, prebiyotik lifler, vitaminler ve mineraller
BFDF-18	Devam sütü	Süt tozu (pastörize inek sütü), laktoz (süt şekeri), bitkisel yağlar palm yağı, ayçiçek yağı, hindistancevizi yağı), vitaminler, mineraller ve Omega-3 yağ asidi
BFDF-19	Bebek sütü	Süt, kısmi hidrolize edilmiş inek sütü proteini, yağ karışımı (yüksek oleik ayçiçek yağı, hindistancevizi yağı, kolza yağı), prebiyotikler, mineraller ve vitaminler
BFDF-20	Bebek sütü	Süt, bebeklerin sindirim sistemine uygun formüle edilmiştir. doğal protein, prebiyotik lifler, vitamin ve mineraller
BFDF-21	Devam sütü	Süt, yağsız süt, bitkisel yağlar, kalsiyum karbonat, vitaminler ve mineraller
BFDF-22	Devam sütü	Süt, Omega-3, Omega-6, vitaminler ve mineraller
BFDF-23	Devam sütü	Organik süt, vitaminler, mineraller, Omega-3, Omega-6
BFDF-24	Devam sütü	Organik süt, prebiyotik ve probiyotik desteği, çoklu doymamış yağ asitleri, vitaminler ve mineraller
BFDF-25	Devam sütü	Organik süt, prebiyotik ve probiyotik desteği, Omega-3, Omega-6, vitaminler ve mineraller
BFDF-26	Devam sütü	Organik süt, laktoz, vitaminler ve mineraller
BFDF-27	Bebek bisküvisi	Glüten içerir.

Tablo 4.2'nin devamı

Örnek kodu	Türü	İçeriği
BFDF-28	Bebek sütü	Yağsız süt, demineralize peynir altı suyu (süt ürünü), bitkisel yağlar, laktoz (süt ürünü), sitrik asidin kalsiyum tuzları, potasyum sitrat, balık yağı, mantar yağı, magnezyum klorür, potasyum hidroksit
BFDF-29	Devam sütü	Laktoz içeriği düşürülmüş veya kısmen laktozsuz formül, vitaminler, mineraller, Omega 3 ve Omega 6
BFDF-30	Bebek sütü	Laktoz, prebiyotikler, vitaminler ve mineraller, Omega 3 ve Omega 6
BFDF-31	Pirinç unu	12 vitaminli ve 6 mineralli sütlü pirinç unu
BFDF-32	Pirinç unu	Pirinç unu, öğütülmüş şeker, laktoz (süt ürünü), yağsız süt tozu, peynir altı suyu, muz tozu, bitkisel yağ (hurma yağı, kanola yağı, ayçiçeği yağı), vitaminler ve mineraller
BFDF-33	Pirinç unu	Süt tozu, pirinç unu, vitaminler ve mineraller
BFDF-34	Bebek maması	Yağsız süt tozu, pirinç, tam buğday, arpa, darı, çavdar, mısır, yulaf (%3), bitkisel yağlar, vitaminler ve mineraller
BFDF-35	Bebek maması	Süt tozu, pirinç unu, vitaminler ve mineraller
BFDF-36	Bebek sütü	Tam yağlı keçi sütü, laktoz (süt ürünü), bitkisel yağlar, peynir altı suyu vitaminler ve mineraller
BFDF-37	Devam sütü	Süt, vitaminler ve mineraller
BFDF-38	Devam sütü	Süt, laktoz, Omega-3, Omega-6, vitaminler ve mineraller
BFDF-39	Devam sütü	Süt, laktoz, Omega-3, Omega-6, vitaminler ve mineraller
BFDF-40	Bebek maması	Süt tozu, vitaminler, mineraller ve nükleotidler gibi besin öğeleriyle zenginleştirilmiştir
BFDF-41	Devam sütü	Yağsız süt, karbonhidratlar, bitkisel yağlar, peynir altı suyu, mineraller, vitaminler ve balık yağı
BFDF-42	Bebek formülü	Süt, yağ, karbonhidrat, sodyum, potasyum ve kalsiyum
BFDF-43	Devam sütü	Süt, protein, yağ, doymuş yağ asitleri, karbonhidrat, vitaminler ve mineraller
BFDF-44	Çorba	Kemik sulu sebze çorbası, Kemik suyu, sebze ve zeytinyağı
BFDF-45	Meyve püresi	Organik meyve (armut, elma, muz) püresi, limon suyu konsantresi, antioksidan (askorbik asit) ve karbonhidrat
BFDF-46	Meyve püresi	Organik meyve (elma, şeftali, yaban mersini ve böğürtlen) püresi



Fotoğraf 4.1 Radyoaktivite ölçümü için hazırlanan bebek mamaları örnekleri



Fotoğraf 4.2 Yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometresi (Sultan, 2025)

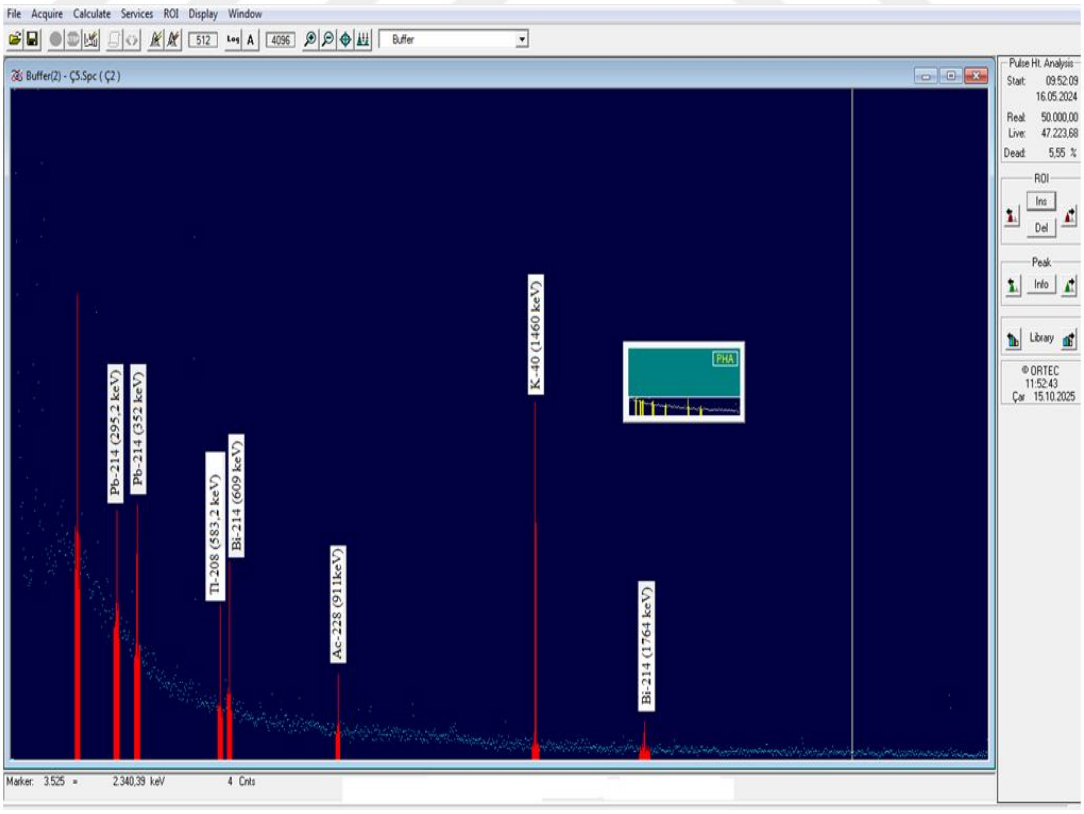
Tablo 4.3 Germanyum dedektörünün özellikleri (Sultan, 2025)

Dedektör modeli	ORTEC GEM50P4-83
Bağıl verimi	% 50
Enerji ayırma gücü (çözünürlük)	1,9 keV (^{60}Co'ın 1,33 MeV enerjili fotopiki için)
Pik/Compton oranı	66:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi HPGe
Çapı ve yüksekliği	62,5 mm
Pencereden uzaklık	5 mm
Çalışma gerilimi	+3000 V dc
Kriyostat ve azot kabı hacmi	Dikey geometrili ve 30 L

Her bir bebek formülü örneğinin gama- ışını spektrumu, Fotoğraf 4.3'te gösterildiği gibi dedektör üzerine (dedektör-örnek mesafesi=0) yerleştirilen örneğin; 86400 saniye süre sayılması ile elde edildi. Grafik 4.1, bir bebek formülü örneğine ait gama-ışını spektrumunu göstermektedir. Çevresel radyasyon veya laboratuvar ortamı (background) gama- ışını spektrumu da aynı şartlarda ve periyodik olarak elde edildi. Her bir bebek formülü örneğindeki ^{232}Th; ^{226}Ra; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin aktivite derişimleri, Tablo 4.4′de verilen spektroskopik veriler Grafik 4.1′de gösterilen gama-ışını fotopikler kullanılarak belirlendi. Grafik 4.1′de gösterildiği gibi gama-ışını spektrumunda, (1) ^{232}Th′nin aktivite derişiminin belirlenmesi için ^{232}Th serisinde yer alan bozunum ürünü ^{228}Ac′nin 911,2 keV ve ^{208}Tl′nin 583,2 keV enerjili gama-ışını fotopikleri ilgilenilen (region of interest) fotopik olarak seçildi; (2) ^{226}Ra'nın aktivite derişiminin belirlenmesi için ^{238}U serisinde yer alan bozunum ürünü ^{214}Pb'nin 295,2 ve 352,9 keV enerjili gama-ışını fotopikleri ile ^{214}Bi'nin 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili gama-ışını fotopikleri ilgilenilen fotopik olarak seçildi; (3) ^{40}K'nin aktivite derişiminin belirlenmesi için kendisine ait 1460,8 keV enerjili tek bir gama-ışını fotopiki ilgilenilen fotopik olarak seçildi ve (4) ^{137}Cs'nin aktivite derişiminin belirlenmesi için kendisine ait 661,7 keV enerjili tek bir gama-ışını fotopiki ilgilenilen fotopik olarak seçildi (Sultan, 2025). Her bir bebek formülü spektrumunda ve background spektrumunda seçilen her bir fotopikin alanı yazlım yardımı ile hesaplandı. Daha sonra her bir radyonüklitin aktivite derişimi, aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplandı (Sultan, 2025):



Fotoğraf 4.3 Dedektör üzerine örneğin yerleştirilmesi



Grafik 4.1 Bir bebek maması örneğinin gama-ışını spektrumu

Tablo 4.4 Nükleer veriler (Debertin ve Helmer, 1988)

Ölçülecek radyonüklit	Seçilen fotopikin enerjisi (keV)	Gama yayınlama ihtimali (I_γ) (%)	Seçilen fotopikin ait olduğu bozunum ürünü radyonüklit
^{228}Ra	583,2	30,6	^{208}Tl
	911,2	26,6	^{228}Ac
^{226}Ra	295,2	18,2	^{214}Pb
	351,9	35,1	^{214}Pb
	609,3	44,6	^{214}Bi
	1764,5	15,1	^{214}Bi
^{40}K	1460,8	14,7	^{40}K
^{137}Cs	661,7	85,1	^{137}Cs

$$AD = \frac{(S_{Ö} - S_B)}{\varepsilon_\gamma \times I_\gamma \times M \times t} \quad (4.1)$$

Bu denklemde; AD, aktivite derişimi (Bq/kg); $S_{Ö}$, her bir bebek sütü örneğine ait ilgilenilen gama-ışını fotopikinin alanı; S_B, background spektrumundaki aynı ilgilenilen gama-ışını fotopikinin alanı; εγ, ilgilenilen gama-ışını fotopiki için dedektör verimi; Iγ, ilgilenilen gama-ışını fotopikinin gama-ışını yayınlama ihtimali; M, bebek sütü örneğinin kg cinsinden kütlesi ve t, saniye cinsinden sayım süresidir. Yukarıda formülde verilen gama-ışını spektrometrik sistemin verimi veya tam enerji fotopik verimi (ε_γ), dedektör örnek mesafesi ve örnek geometrisi gibi parametrelere bağlıdır. Tez kapsamındaki radyoaktivite ölçümü için ε_γ, aşağıda verilen denklem kullanılarak belirlendi (Altamemi vd., 2021).

$$\varepsilon_\gamma = \frac{(S_{RM} - S_B)}{A \times I_\gamma \times t} \times DF_K \times DF_G \times DF_D \quad (4.2)$$

Bu denklemde; S_{RM}, verim için kullanılan referans veya standart kaynağa ait gama-ışını spektrumunda ilgilenilen gama-ışını fotopikinin alanı; S_B, background spektrumundaki aynı ilgilenilen gama-ışını fotopikinin alanı; A, referans veya standart kaynağın aktivitesi (Bq); DF_K, toplam koinsidans (çakışma) düzeltme faktörü; DF_G, geometri düzeltme faktörü ve DF_D, bozunma düzeltme faktörüdür. Bu çalışmada dedektör verimini bulmak için radyonüklite özgün verim kalibrasyon işlemi uygulandı. Radyonüklite özgün verim kalibrasyon, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumundan (IAEA) temin edilen sertifikalı doğal uranyum RGU-1 (U-cevher; 400±2

mg/kg), doğal toryum RGTh-1 (Th-cevher; 800±16 mg/kg) ve potasyum RGK-1 (K_2SO_4; %44,8±0,3 K) referans malzemeleri kullanılarak yapıldı. Böylece, tam enerji fotopik verim kalibrasyonunda, yayılan gama-ışını fotonlarının, toplam koinsidans ve kütle zayıflama ve bozunum etkileri için düzeltme işlemlerine gerek kalmadı (Altamemi vd., 2021; Stoulo vd., 2003). Örnek kaplarına koyulan, tartılan ve dedektör üzerine yerleştirilen RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 referans malzemeleri, iyi bir istatistik elde edilene kadar sayım işlemine tabı tutuldu. Elde edilen gama-ışını spektrumunda ilgili fotopikler seçilerek, Tablo 4.4'deki veriler ve Denklem (4.2) kullanılarak 300 keV– 3000 keV enerji aralığında tam enerji fotopik verimleri hesaplandı. Grafik 4.2'de gösterildiği gibi hesaplanan verim değerlerinin enerji değerlerine göre grafiği elde edildi ve eğri aşağıda verilen fonksiyona fit edildi:

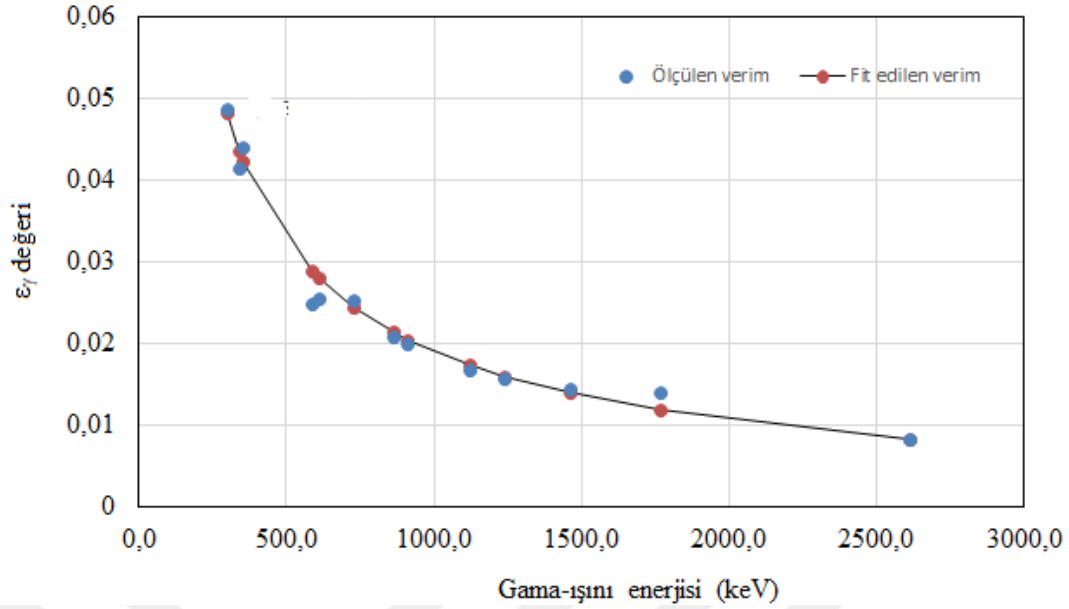
$$\varepsilon(E_\gamma) = a \times b^{E_\gamma} \times E_\gamma^{\,c} \tag{4.3}$$

Bu fonksiyonda; E_γ, ilgilenilen gama-ışını fotopik enerjisi (keV); a, b ve c, sırasıyla 2,9434; 0,9999 and -0,7187 değerinde verilen katsayılardır.

Her bir bebek formülü örneği için elde edilen gama-ışını spektrumu değerlendirildi ve ilgilenilen gama-ışını fotopiklerinin ait olduğu radyonüklitlerin aktiviteleri, Denklem (4.1) kullanılarak hesaplandı Daha sonra tez kapsamındaki radyonüklitlerin aktivite derişimleri belirlendi. ^{232}Th′nin aktivite derişimi, aşağıda verilen denklemler kullanılarak belirlendi:

$$A_{^{232}\mathrm{Th}} = \frac{A_{^{201}\mathrm{Tl}} + A_{^{228}\mathrm{Ac}}}{2} \tag{4.4}$$

^{226}Ra′nın aktivite derişimi, üç aşamalı olarak belirlendi: Birinci aşama: ^{214}Pb′ye ait birden fazla ilgilenilen fotopik olduğundan öncelikle ^{214}Pb′nin aktivitesi ağırlıklı ortalama alınarak aşağıdaki gibi hesaplandı:



Grafik 4.2 Deneysel olarak elde edilen verim değerlerinin enerjiye göre değişimi

$$A_{^{214}Pb} = \frac{A_{295} \times 18{,}2 + A_{352} \times 35{,}1}{18{,}2 + 35{,}1} \tag{4.5}$$

İkinci aşama: ^{214}Bi'ye ait birden fazla ilgilenilen fotopik olduğundan öncelikle ^{214}Bi'nin aktivitesi ağırlıklı ortalama alınarak aşağıdaki gibi hesaplandı:

$$A_{^{214}Bi} = \frac{A_{609} \times 44{,}6 + A_{1764} \times 15{,}1}{44{,}6 + 15{,}1} \tag{4.6}$$

Üçüncü aşama: İki radyonüklitin aktivitelerinin ortalaması aşağıda verildiği gibi alındı

$$A_{^{226}Ra} = \frac{A_{^{214}Pb} + A_{^{214}Bi}}{2} \tag{4.7}$$

Radyoaktivite ölçme sistemi için ölçülebilir minimum aktivite derişimi, %95 güvenilirlikle aşağıda verilen denklem ile hesaplandı (Currie, 1968):

$$\text{ÖMA} = \frac{TS}{\varepsilon_\gamma \times I_\gamma \times M \times t} \tag{4.8}$$

Bu bağıntıda; ÖMA, ölçülebilir minimum aktivite derişimi (Bq/kg) ve TS, tespit alt sınırıdır (TS=2,706+4,653×√B ve B, ilgilenilen gama- ışını fotopikinin background spektrumundaki alanıdır). Tez kapsamındaki radyonüklitler için hesaplanan ortalama ÖMA değerleri; 0,4 Bq/kg (^{232}Th); 0,3 Bq/kg (^{226}Ra); 5,1 Bq/kg (^{40}K) ve 0,2 Bq/kg (^{137}Cs) olarak bulundu.

Her ölçüme eşlik eden ölçme belirsizliği, aşağıda verilen bağıntı kullanılarak elde edildi (Altamemi vd., 2021; Sultan, 2025):

$$\Delta AD = AD \times \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_\gamma}{I_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \quad (4.9)$$

Bu formülde; ΔAD, aktivite derişim belirsizliği, ΔS sayım belirsizliği; Δε, verimlilik belirsizliği, ΔP_γ, gama-ışını yayınlanma olasılığı belirsizliği, ΔM, kütle tartım belirsizliği ve Δt, zaman belirsizliğidir.

4.4 Radyolojik Sağlık Riskinin Değerlendirilmesi

Gıdalardaki doğal ve/veya yapay radyonüklitler, sindirim yoluyla doğrudan gastrointestinal sisteme ulaşabilir ve daha sonra vücuttaki farklı organlara taşınabilirler (Turhan vd., 2025). Vücuda giren bu radyonüklitlerden yayılan iyonlaştırıcı radyasyon, özellikle alfa ve beta ışınları, iç ışınlanmaya neden olur ve uzun süreli maruz kalmalar insan sağlığı üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir (Turhan vd., 2025). Bu nedenle, stokastik etkisinden dolayı, bireysel etkili dozların değerlendirilmesi özel bir ilgi gerektirir (Turhan vd., 2025). Bu çalışmada, incelenen bebek formülü örneklerinin tüketilmesi sonucunda örneklerde ölçülen radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden radyolojik sağlık riski, bebekler (< 1 yaş) ve emekleyen veya yürümeye başlayan (1–3 yaş) küçük çocuklar için yıllık etkin doz ve kanser riski tahmini hesaplanarak değerlendirildi.

4.4.1 Yıllık Ekin Radyasyon Dozu

Bebek formülü örneklerinde ölçülen her bir radyonüklitin sindirilmesinden kaynaklanan yıllık etkin radyasyon dozu (YED), tahmini olarak aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplandı (Turhan vd., 2025; UNSCEAR, 2000):

$$\text{YED (mSv/y)} = \text{AD} \times \text{TO} \times \text{DDK} \tag{4.10}$$

Bu denklemde; AD, bebek formülü örneğinde ölçülen radyonüklitin aktivite derişimi (Bq/kg), TO, tüketim oranı (kg/y) ve DDK, doz dönüşüm katsayısıdır (mSv/Bq). Bebeklerin yaş grubuna bağlı olarak değişen TO ve DDK değerleri Tablo 4.5'te verildi. Her bir bebek formülü örneğinin tüketilmesine eşlik eden toplam yıllık etkin radyasyon dozu (TYED) aşağıda verildiği gibi hesaplandı:

$$\text{TYED (mSv/y)} = \text{YED}_{^{232}\text{Th}} + \text{YED}_{^{226}\text{Ra}} + \text{YED}_{^{40}\text{K}} + \text{YED}_{^{137}\text{Cs}} \tag{4.11}$$

Bu denklemde; YED_{232Th}; YED_{226Ra}; YED_{40K} ve YED_{137Cs}; sırasıyla ^{232}Th; ^{226}Ra; ^{40}K ve ^{137}Cs için Denklem (4,10) kullanılarak hesaplanan YED′lerdir.

4.4.2 Kanser Riski

Araştırılan her bir bebek formülü örneğindeki radyonüklitin sindirmesinden kaynaklanan mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser riski aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplandı (Turhan vd., 2025; USEPA, 1999):

$$\text{KR}_{\text{MORT}} = \text{RAO} \times \text{MS} \times \text{RF}_{\text{MORT}} \tag{4.12}$$

$$\text{KR}_{\text{MORB}} = \text{RAO} \times \text{MS} \times \text{RF}_{\text{MORB}} \tag{4.13}$$

Bu denklemde; KR_{MORT}, mortalite yaşam boyu kanser riski; KR_{MORB}, morbidite yaşam boyu kanser riski; RAO, radyonüklit alım oranı (Bq/kg·d); MS, maruz süresi (d), RF_{MORT} ve RF_{MORB} Tablo 4.5'in son iki sütununda sunulan (1/Bq) cinsinden verilen risk faktörüdür ve her bir radyonüklitin yutulmasına ilişkin ölüm ve hastalık risk

faktörünü ifade eder. Bebekleri belirli bir çevresel ortamda radyasyona maruz bırakan her bir radyonüklit için RF değerleri, iç ışınlamaya ilişkin sindirilen birim aktivite başına radyojenik kanser ölüm veya hastalık olasılığının bir tahminidir (USEPA, 1999). Örneklerde ölçülen radyonüklitlerden kaynaklanan toplam mortalite ($TKR_{MOR)}$ ve toplam morbidite (TKR_{MOB}) aşağıda verildiği gibi hesaplandı:

$$TKR_{MORT} = KR_{MORT(Th)} + KR_{MORT(Ra)} + KR_{MORT(K)} \quad (4.14)$$

$$TKR_{MORB} = KR_{MORB(Th)} + KR_{MORB(Ra)} + KR_{MORB(K)} \quad (4.15)$$

Tablo 4.5 Radyolojik risk değerlendirmesinde kullanılan parametrelerin değerleri

Yaş grubu (y)	TO (kg/y) (Jemii ve Alharbi, 2019)	Radyonüklit	DDK (mSv/Bq) (ICRP, 2012)	RF (1/Bq) (USEPA, 1999)	
				Mortalite	Morbidite
< 1	22	^{226}Ra	$4{,}7 \times 10^{-3}$	$9{,}56 \times 10^{-9}$	$1{,}39 \times 10^{-8}$
		^{232}Th	$4{,}6 \times 10^{-3}$	$2{,}45 \times 10^{-9}$	$3{,}60 \times 10^{-9}$
		^{40}K	$6{,}2 \times 10^{-5}$	$5{,}89 \times 10^{-10}$	$9{,}26 \times 10^{-10}$
		^{137}Cs	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$6{,}88 \times 10^{-10}$	$1{,}11 \times 10^{-9}$
1– 3	15	^{226}Ra	$9{,}6 \times 10^{-4}$	$9{,}56 \times 10^{-9}$	$1{,}39 \times 10^{-8}$
		^{232}Th	$4{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}45 \times 10^{-9}$	$3{,}60 \times 10^{-9}$
		^{40}K	$4{,}2 \times 10^{-5}$	$5{,}89 \times 10^{-10}$	$9{,}26 \times 10^{-10}$
		^{137}Cs	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$6{,}88 \times 10^{-10}$	$1{,}11 \times 10^{-9}$

4.4.3 İstatistikî Değerlendirme

İstatistiksel analizden önce veri özellikleri kapsamlı bir şekilde incelendi. Normal dağılım Shapiro-Wilk testi ile varyansların homojenliği ise Levene testi ile değerlendirildi. Veriler sürekli olarak normal olmayan dağılımlar ve çeşitli gruplar arasında varyansların heterojenliğini sergilediğinden, parametrik testler için gerekli varsayımları karşılamak amacıyla logaritmik, karekök, ters ve üstel dönüşümler dâhil olmak üzere çeşitli dönüşümler uygulanmıştır. Bu dönüşümler arasında, karekök dönüşümünün, verileri normalleştirmede ve varyans heterojenliğini azaltmada en etkili olduğu görüldü. Ancak, bu dönüşümden sonra bile, bazı veri kümeleri normallikten önemli sapmalar göstermiş veya varyansların tam homojenliğinden yoksun kalmış ve bu da parametrik testlerin kullanımını engellemiştir. Sonuç olarak, veri özellikleri göz önünde bulundurulduğunda sağlam ve uygun karşılaştırmalar sağlamak için, karekök

dönüştürülmüş veriler daha sonra parametrik olmayan bir yaklaşım kullanılarak analiz edildi: ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite derişimleri arasındaki karşılaştırmalar için Kruskal-Wallis H testi kullanıldı. Anlamlı bir Kruskal-Wallis sonucunun ardından, gruplar arasındaki belirli farklılıkları belirlemek için Dunn testi kullanılarak post-hoc çoklu karşılaştırmalar yapıldı ve anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ olarak belirlendi. Tüm istatistiksel analizler R Studio 2025.05.0 sürümü (R Core Team, 2024) kullanılarak gerçekleştirildi.

5. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Dördüncü bölümde verilen Tablo 4.2′den de görülebileceği gibi tez kapsamımda, Türkiye′de marketlerde ve eczanelerde devam sütü, bebek formülü, bebek sütü, bebek maması, sütlaç, bebek bisküvisi, sütlü pirinç unu, bebek çorbası ve meyve püresi olarak satılan ticari 46 bebek formülü ve bebek devam formülü örneği radyoaktivite ve radyolojik risk açısından araştırmaya tabi tutuldu. Tezin bu bölümünde, (1) araştırılan bebek formülü ve bebek devam formülü örneklerinin doğal ve yapay radyonüklit içerikleri ve (2) örneklerinin tüketilmesi sonucunda radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan iç ışınlamanın sebep olabileceği radyolojik sağlık riskinin değerlendirilmesi ile ilgili bulgular, tablolar ve grafikler şeklinde sunuldu.

Tez kapsamındaki her bir bebek formülü örneğinin radyolojik açıdan önemli olan doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit seviyesi veya içeriği, örneklere ait gama-ışını spektrumları değerlendirilerek belirlendi. Bebek formülü ve bebek devam formülü örneklerinde ölçülen ^{137}Cs′nin aktivite derişimlerinin tamamı, ortalama ölçülebilir minimum aktivite derişim değeri olan 0,2 Bq/kg′ın altında gözlendi. Dolayısıyla ^{137}Cs, radyolojik sağlık risk değerlendirmesinde dikkate alınmadı. Örneklerinde 12′sindeki ^{232}Th′nin aktivite derişimi ve üçündeki ^{226}Ra′nın aktivite derişimi, sırasıyla ölçülebilir minimum aktivite derişim değeri olan 0,4 Bq/kg ve 0,3 Bq/kg′ın altında ölçüldü. Bununla birlikte örneklerin radyonüklit dağılımlarını gösteren grafiklerde ve radyolojik risk değerlendirmelerinde, bu örneklerin ^{232}Th ve ^{226}Ra aktivite derişimleri, ölçülebilir minimum aktivite derişim değerine eşitlendi.

5.1 Bebek Formülü Örneklerinin Radyonüklit Seviyeleri

Bebek formülü örneklerinde ölçülen ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K'nin aktivite derişimlerine ait bazı istatistikî bulgular, Tablo 5.1'de ve her bir örneğin radyonüklit seviyeleri, ölçme belirsizlikleri ile birlikte ise Tablo 5.2'de verildi. Araştırılan bebek formülü örneklerinin ortalama ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K içeriklerinin, literatürde yer alan çalışma sonuçları karşılaştırılması ise Tablo 5.3′te verildi. Ayrıca bebek formülü örneklerinin ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite seviyelerinin karşılaştırılmaları, sırasıyla Grafik 5.1, Grafik

5.2 ve Grafik 5.3′te görsel olarak sunuldu. Veri dönüşümünün etkisini görsel olarak göstermek için radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin frekans dağılımları ile karekök dönüşümünden sonraki aktivite derişimlerinin frekans dağılımlarının karşılaştırılması, Grafik 5.4'de gösterildi. Bu karşılaştırmanın amacı, dönüşümün eğriliği azaltılarak ve şekli çan eğrisine yaklaştırılarak verilerin normalleştirilmesine nasıl yardımcı olduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca, her bir radyonüklit için karekök dönüşümü uygulanmış aktivite derişimlerinin dağılımının ortancaları, çeyreklik aralıkları ve olası aykırı değerler de dâhil olmak üzere ayrıntılı bir özetini gösteren kutu grafiği, Grafik 5.5'te sunuldu. Grafik 5.4 ve Grafik 5.5′den de görülebileceği gibi ^{232}Th ve ^{226}Ra için bir iyileşme gözlemlenirken, ^{40}K için böyle bir iyileşme gözlemlenmemiştir. İstatistiksel analiz, ^{232}Th ve ^{226}Ra'nın aktivite derişimlerinin istatistiksel olarak benzer olduğunu, ^{40}K'nin aktivite derişimlerinin ise ^{232}Th ve ^{226}Ra ile karşılaştırıldığında, istatistiksel olarak anlamlı bir fark gösterdiğini ortaya koymuştur ($p<0,05$). Tablo 5.1'de verilen ortalama aktive derişimlerine göre radyonüklitler büyükten küçüğe doğru ^{40}K > ^{232}Th > ^{226}Ra olarak sıralanmaktadır. Grafik 5.1, Grafik 5.2 ve Grafik 5.3′den de görülebileceği gibi bebek formülü örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite derişimlerinde farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum, bebek formülü örneklerinin kökenlerinin ve içeriklilerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.1 Bebek formülü örneklerinin radyonüklit içerikleri ile ilgili bazı istatistikî bilgi

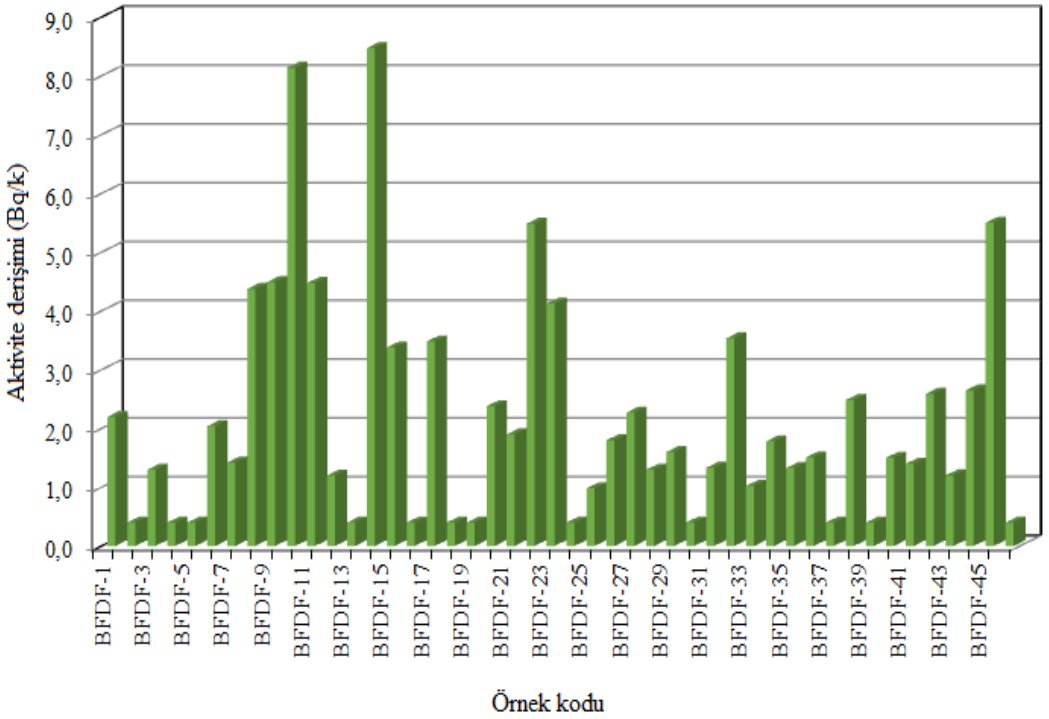
	Aktivite derişim (Bq/kg)		
	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
Ortalama	2,8	2,6	162,1
Standart hata	0,3	0,3	6,5
Ortanca	2,1	2,0	166,0
Standart sapma	1,9	1,9	44,3
Basıklık	2,4	6,7	2,4
Çarpıklık	1,6	2,5	-1,1
En küçük	< ÖMA	< ÖMA	11,2
En büyük	8,5	9,9	235,3
Örnek sayısı	34	43	46

Tablo 5.2 Bebek formülü örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri

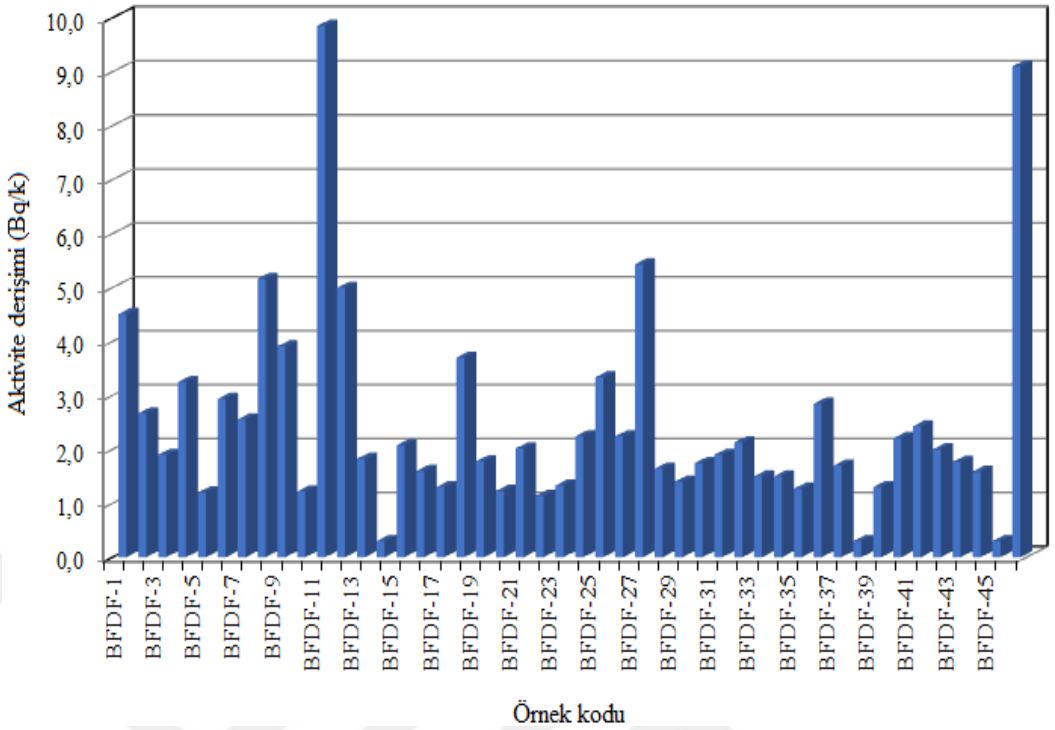
Örnek kodu	Aktivite derişimi (Bq/kg)								
	^{232}Th			^{226}Ra			^{40}K		
BFDF-1	2,2	±	0,2	4,5	±	0,5	170,9	±	12,0
BFDF-2	< ÖMA			2,7	±	0,3	148,6	±	12,2
BFDF-3	1,3	±	0,1	1,9	±	0,4	151,3	±	10,8
BFDF-4	< ÖMA			3,2	±	0,4	155,2	±	12,6
BFDF-5	< ÖMA			1,2	±	0,2	154,3	±	11,4
BFDF-6	2,0	±	0,2	2,9	±	0,4	135,5	±	12,3
BFDF-7	1,4	±	0,2	2,6	±	0,3	161,4	±	13,5
BFDF-8	4,4	±	0,5	5,2	±	0,5	177,2	±	14,5
BFDF-9	4,5		0,4	3,9		0,5	132,5		10,9
BFDF-10	8,1	±	0,7	1,2	±	0,2	11,2	±	1,1
BFDF-11	4,5	±	0,4	9,9	±	0,9	109,0	±	8,8
BFDF-12	1,2	±	0,1	5,0	±	0,6	206,6	±	14,5
BFDF-13	< ÖMA			1,8	±	0,3	183,7	±	13,2
BFDF-14	8,5	±	0,8	< ÖMA			153,4	±	12,0
BFDF-15	3,4	±	0,4	2,1	±	0,3	174,6	±	13,8
BFDF-16	< ÖMA			1,6	±	0,2	184,1	±	13,8
BFDF-17	3,5	±	0,4	1,3	±	0,2	139,7	±	10,6
BFDF-18	< ÖMA			3,7	±	0,4	153,4	±	12,0
BFDF-19	< ÖMA			1,8	±	0,2	191,7	±	13,8
BFDF-20	2,4	±	0,5	1,2	±	0,2	205,5	±	14,2
BFDF-21	1,9	±	0,3	2,0	±	0,3	203,5	±	13,3
BFDF-22	5,5	±	0,5	1,1	±	0,2	153,2	±	12,4
BFDF-23	4,1	±	0,4	1,3	±	0,2	227,8	±	14,8
BFDF-24	< ÖMA			2,2	±	0,3	182,4	±	13,7
BFDF-25	1,0	±	0,1	3,3	±	0,4	228,2	±	14,6
BFDF-26	1,8	±	0,2	2,2	±	0,3	235,3	±	14,7
BFDF-27	2,3	±	0,2	5,4	±	0,6	53,3	±	5,0
BFDF-28	1,3	±	0,2	1,6	±	0,2	191,3	±	15,5
BFDF-29	1,6	±	0,2	1,4	±	0,2	202,3	±	15,8
BFDF-30	< ÖMA			1,7	±	0,2	218,1	±	13,5
BFDF-31	1,3	±	0,2	1,9	±	0,3	109,0	±	8,8
BFDF-32	3,5	±	0,4	2,1	±	0,3	84,9	±	7,0
BFDF-33	1,0	±	0,2	1,5	±	0,2	147,1	±	13,1
BFDF-34	1,8	±	0,2	1,5	±	0,2	184,4	±	14,6
BFDF-35	1,3	±	0,2	1,3	±	0,2	144,4	±	11,9
BFDF-36	1,5	±	0,2	2,8	±	0,3	168,4	±	13,8
BFDF-37	< ÖMA			1,7	±	0,2	174,7	±	14,5
BFDF-38	2,5	±	0,3	< ÖMA			150,8	±	11,4
BFDF-39	< ÖMA			1,3	±	0,2	214,2	±	12,7
BFDF-40	1,5	±	0,2	2,2	±	0,3	173,9	±	11,1
BFDF-41	1,4	±	0,2	2,4	±	0,3	193,5	±	13,3
BFDF-42	2,6	±	0,3	2,0	±	0,3	152,3	±	11,4
BFDF-43	1,2	±	0,2	1,8	±	0,2	163,7	±	12,4
BFDF-44	2,6	±	0,3	1,6	±	0,2	87,7	±	8,1
BFDF-45	5,5	±	0,5	< ÖMA			142,3	±	11,2
BFDF-46	< ÖMA			9,1	±	0,7	168,4	±	12,7

Tablo 5.3 Bebek formülü örneklerinin radyonüklit içeriklerinin literatür ile karşılaştırılması

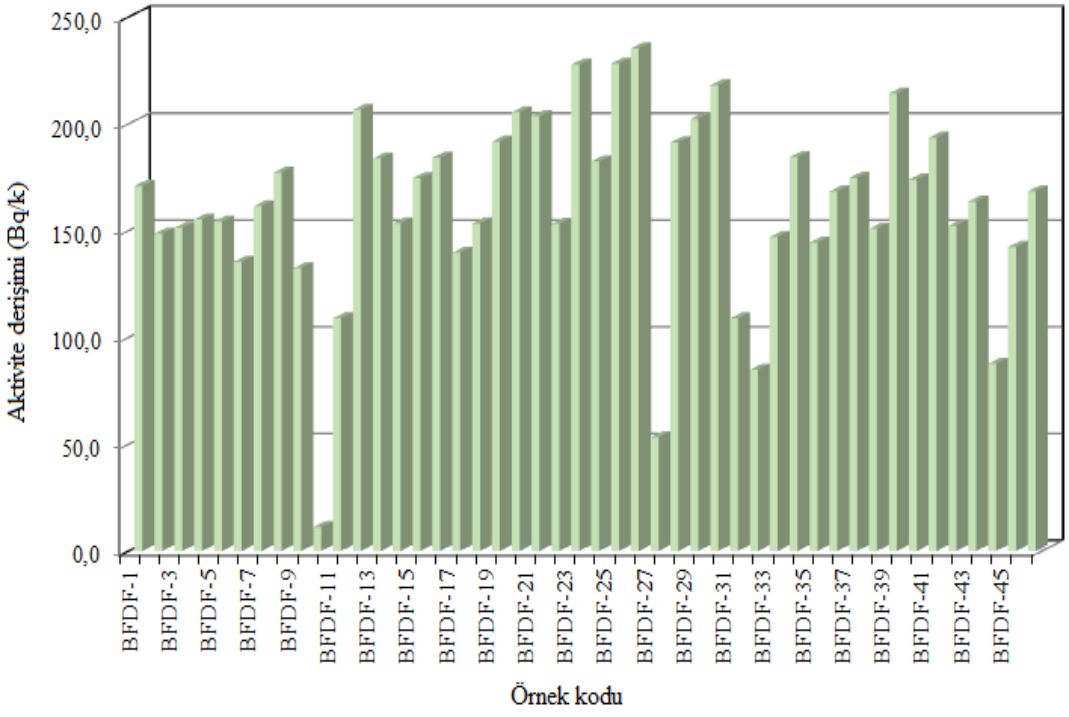
Ülke	Ürün	Aktivite derişimi (Bq/kg)			Referans
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Suudi Arabistan	Süt tozu	0,5	0,5	372,0	Jemii ve Alharbi, 2018
Tayland	Bebek formülü	3,2	1,2	213,2	Poltabtim ve Saenboonruang, 2019
Irak	Süt tozu	3,8	1,0	257,0	Al-Farha vd., 2025
İtalya	Süt tozu	< 0,6	-	145,2	Desideri vd., 2019
Malezya	Bebek formülü	3,1	2,6	99,1	Uwatse vd., 2015
Yemen	Süt tozu	1,9	0,7	321,4	Hulif vd., 2025
Cezayir	Süt tozu	2,0	1,5	165,5	Chabouni vd., 2023
Brezilya	Bebek formülü	-	-	202,3	Faria da Silva vd., 2022
Kuveyt	Süt tozu	-	0,5	243,5	Alraefae vd., 2012
İsveç	Bebek maması	0,3	0,6	120,0	Sundström vd., 2025
Arnavutluk	Bebek formülü	2,5	1,2	189,3	Spahiu ve Shyti, 2024
Mısır	Bebek formülü	0,9	0,6	477,0	Din, 2020
Avrupa Birliği	Süt tozu	-	-	578,0	Spasova vd., 2008
Türkiye	Bebek formülü	2,6	2,8	162,1	Bu çalışma



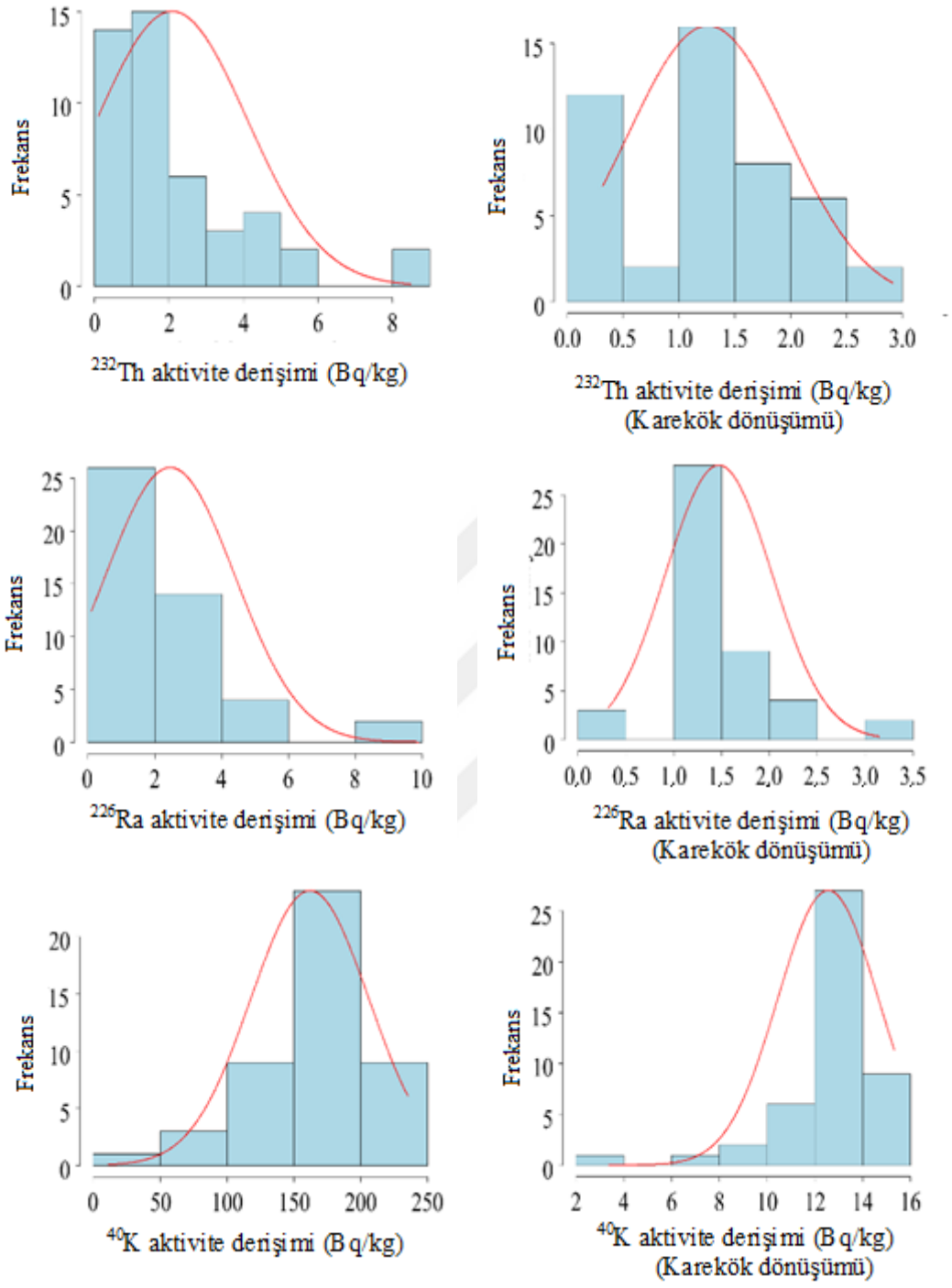
Grafik 5.1 Bebek formülü öneklerinde ölçülen 232Th dağılımı



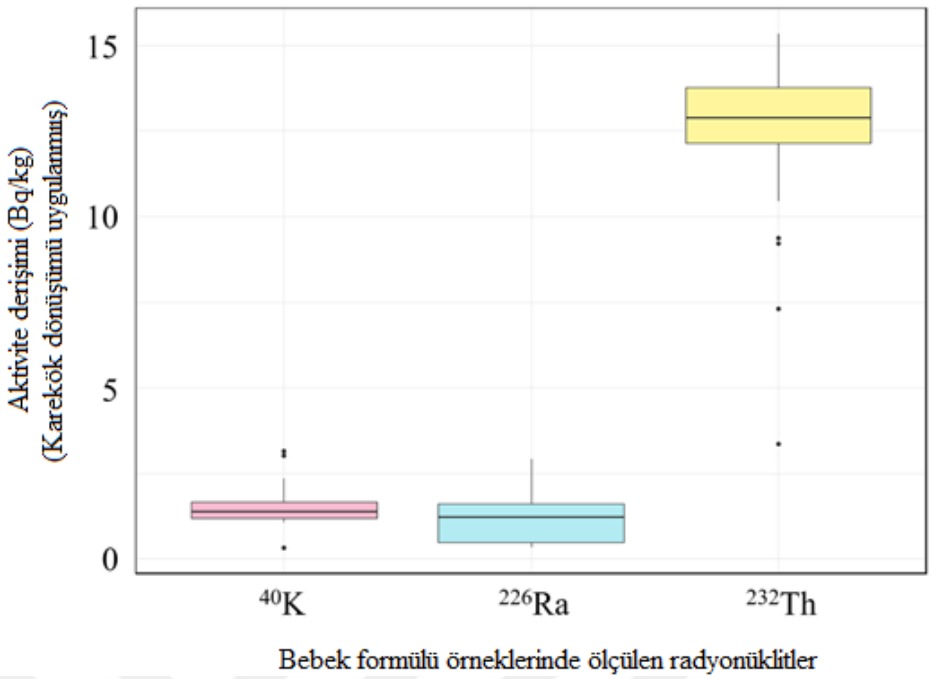
Grafik 5.2 Bebek formülü öneklerinde ölçülen ^{226}Ra dağılımı



Grafik 5.3 Bebek formülü öneklerinde ölçülen ^{40}K dağılımı



Grafik 5.4 Karekök dönüşümünden önce ve sonra aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı



Grafik 5.5 Karekök dönüşümü uygulanmış veriler için kutu grafiği

Tablo 5.1′den de görülebileceği gibi bebek örneklerinde ölçülen ^{232}Th'nin aktivite derişimleri, ortalaması 2,8 ± 0,3 Bq/kg olmak üzere < ÖMA (0,4 Bq/kg) – 8,5 ± 0,8 Bq/kg aralığında değişmektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi ^{232}Th'nin en yüksek aktivite derişimi, BFDF-14 kodlu bebek sütü örneğinde ölçülmüştür. Tablo 4.2′den de görülebileceği gibi bu örnek, kısmen hidrolize peynir altı suyu proteini (sütten), indirgenmiş laktoz, prebiyotik lifler, Omega-3 yağ asitleri, nükleotidler, balık yağı, vitaminler ve kalsiyum, demir, çinko gibi mineraller içermektedir. Grafik 5.4′de verilen frekans dağılımı; ^{232}Th'nin aktivite derişimlerinin, yaklaşık %88'nin; 1,0 Bq/kg – 4,5 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi Türkiye'de tüketilen bebek formüllerindeki ^{232}Th içeriği, Malezya′da tüketilen bebek formülünün içeriğine yakın iken diğer ülkelerde tüketilen süt tozları ve bebek formüllerinin içeriğinden daha büyüktür.

Tablo 5.1′den de görülebileceği gibi bebek örneklerinde ölçülen ^{226}Ra'nın aktivite derişimleri, ortalaması 2,6 ± 0,3 Bq/kg olmak üzere < ÖMA (0,3 Bq/kg) – 9,9 ± 0,9 Bq/kg aralığında değişmektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi ^{226}Ra'nın en yüksek aktivite derişimi, BFDF-11 kodlu bebek maması (sütlaç) örneğinde ölçülmüştür. Tablo 4.2′den de görülebileceği gibi bu örnek, pirinç esaslıdır ve

kalsiyum ve demir gibi vitamin ve mineraller de içermektedir. Grafik 5.4′de verilen frekans dağılımı; ^{226}Ra'nın aktivite derişimlerinin, yaklaşık %86'sı; 1,0 Bq/kg – 4,0 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi Türkiye'de tüketilen bebek formüllerindeki ^{226}Ra içeriği, Arnavutluk, Tayland ve Malezya′da tüketilen bebek formülünün içeriğine yakındır.

Tablo 5.1′den de görülebileceği gibi bebek örneklerinde ölçülen ^{40}K'nin aktivite derişimleri, ortalaması 162,1 ± 6,5 Bq/kg olmak üzere 11,2 ± 1,1 Bq/kg – 235,3 ± 14,7 Bq/kg aralığında değişmektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi ^{40}K'nin en yüksek aktivite derişimi, BFDF-26 kodlu devam sütü örneğinde ölçülmüştür. Tablo 4.2′den de görülebileceği gibi bu örnek, bir yaş ve üzeri çocuklar için özel olarak formüle edilmiş, tamamen organik sütten yapılmış ve laktoz, vitaminler, iyot, biotin ve folik asit içermektedir. ^{40}K'nin en düşük aktivite derişimi, BFDF-10 kodlu bebek maması örneğinde ölçülmüştür. Tablo 4.2′den de görülebileceği gibi bu örnek, süt tozu, elma, armut, muz gibi doğal meyve püresi, vitaminler ve mineraller içermektedir. Grafik 5.4′de verilen frekans dağılımı, ^{40}K'nin aktivite derişimlerinin, yaklaşık %87'si; 170 Bq/kg – 250 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.2′den de görülebileceği gibi Türkiye'de tüketilen bebek formüllerindeki ^{40}K içeriği, Cezayir′de tüketilen süt tozu içeriğine yakın iken İtalya, Malezya ve İsveç′te tüketilen süt tozları ve bebek formüllerinin içeriğinden daha büyüktür.

Grafik 5.4'ten, karekök dönüşümünden sonra ^{232}Th ve ^{226}Ra′nın frekans dağılımlarının, normale yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Grafik 5.5, bebek formülü örneklerinde ölçülen her bir radyonüklitin merkezi eğiliminin, yayılımının ve aykırı değerlerin varlığının net bir görsel karşılaştırmasına olanak tanımaktadır. Grafikteki kutular çeyreklik aralıkları, ince çizgiler 5. ile 95. yüzdelikleri ve noktalar aykırı değerleri göstermektedir.

5.2 Radyolojik Sağlık Risklerinin Değerlendirilmesi

5.2.1 Yıllık Etkin Radyasyon Dozu

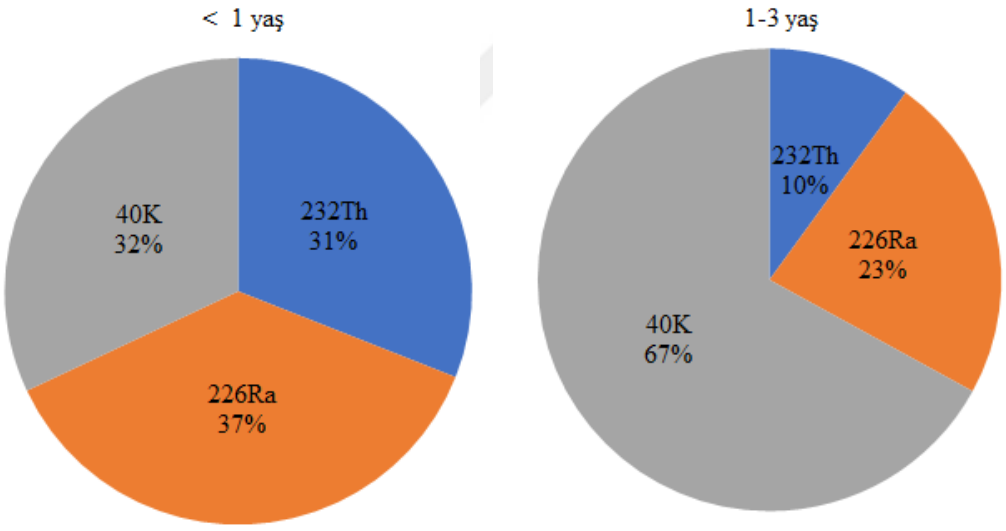
Bebekler veya yeni doğanlar ve emeklemeyen veya yürümeye başlayan küçük çocuklar için bebek formülü ve bebek devam formülü örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri esas alınarak hesaplanan YED değerlerine ait bazı istatistikî bilgi Tablo 5.4′de verildi. Her iki yaş grubu için radyonüklitlerin TYED'e katkısı şematik olarak Grafik 5.6'da gösterildi. Ayrıca her bir örnek için hesaplanan YED değerleri, yeni doğanlar için Tablo 5.5′te ve küçük çocuklar için Tablo 5.6′da sunuldu.

Tablo 5.4′den de görülebileceği gibi yeni doğanlar için hesaplanan ortalama YED değerleri; 0,22 mSv/y (0,04 – 0,87 mSv/y) (^{232}Th); 0,26 mSv/y (0,03 – 1,04 mSv/y) (^{226}Ra) ve 0,23 mSv/y (0,02 – 0,33 mSv/y) (^{40}K) olarak bulundu. TYED değerleri, ortalaması 0,71 mSv/y olmak üzere 0,38 mSv/y – 1,65 mSv/y aralığında hesaplandı. Grafik 5.6'dan da görülebileceği gibi yeni doğanlar için radyonüklitlerin toplam doza katkısı, %31 (^{232}Th); %37 (^{226}Ra) ve %32 (^{40}K) hemen hemen eşit seviyededir. Tablo 5.5′den de görülebileceği gibi TYED′e en büyük katkı ^{226}Ra′dan ileri gelmektedir ve TYED′in en büyük değeri (1,65 mSv/y), BFDF-11 kodlu bebek maması (sütlaç) örneği için hesaplandı.

Tablo 5.4′den de görülebileceği gibi küçük çocuklar için hesaplanan ortalama YED değerleri; 0,015 mSv/y (0,003 – 0,05 mSv/y) (^{232}Th); 0,036 mSv/y (0,004 – 0,142 mSv/y) (^{226}Ra) ve 0,102 mSv/y (0,007 – 0,148 mSv/y) (^{40}K) olarak bulundu. TYED değerleri, ortalaması 0,15 mSv/y olmak üzere 0,08 mSv/y – 0,24 mSv/y aralığında hesaplandı. Grafik 5.6'dan da görülebileceği gibi yeni doğanlar için radyonüklitlerin toplam doza katkısı, %10 (^{232}Th); %23 (^{226}Ra) ve %67 (^{40}K) olarak bulundu. Tablo 5.6′dan da görülebileceği gibi TYED′e en büyük katkı ^{40}K′den ileri gelmektedir ve TYED′in en büyük değeri (0,241 mSv/y), BFDF-11 kodlu bebek maması (sütlaç) örneği için hesaplandı.

Tablo 5.4 Yıllık etkin doz değerlerine ait bazı istatistikî bilgi

Yaş grubu (y)		Yıllık etkin radyasyon dozu (mSv/y)			
		$YED_{^{232}Th}$	$YED_{^{226}Ra}$	$YED_{^{40}K}$	TYED
< 1 (yeni doğanlar veya bebekler)	Ortalama	0,22	0,26	0,23	0,71
	Standart hata	0,03	0,03	0,01	0,04
	Ortanca	0,15	0,20	0,23	0,65
	Standart sapma	0,20	0,20	0,06	0,25
	Basıklık	2,71	6,42	2,36	3,28
	Çarpıklık	1,62	2,33	-1,14	1,61
	En küçük	0,04	0,03	0,02	0,38
	En büyük	0,87	1,04	0,33	1,65
1– 3 (emekleyen veya yürümeye başlayan küçük çocuklar)	Ortalama	0,036	0,015	0,102	0,152
	Standart hata	0,004	0,002	0,004	0,005
	Ortanca	0,027	0,010	0,105	0,150
	Standart sapma	0,028	0,013	0,028	0,034
	Basıklık	6,425	2,711	2,364	0,932
	Çarpıklık	2,333	1,624	-1,139	0,657
	En küçük	0,004	0,003	0,007	0,080
	En büyük	0,142	0,057	0,148	0,241



Grafik 5.6 Radyonüklitlerin toplam yıllık etkin doza katkıları

Tablo 5.5 Yeni doğanlar için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri

Örnek kodu	Yıllık etkin radyasyon dozu (mSv/y)			
	$YED_{^{232}Th}$	$YED_{^{226}Ra}$	$YED_{^{40}K}$	TYED
BFDF-1	0,23	0,47	0,24	0,94
BFDF-2	0,04	0,28	0,21	0,53
BFDF-3	0,13	0,20	0,21	0,54
BFDF-4	0,04	0,34	0,22	0,60
BFDF-5	0,04	0,13	0,21	0,38
BFDF-6	0,21	0,31	0,19	0,71
BFDF-7	0,15	0,27	0,22	0,64
BFDF-8	0,45	0,54	0,25	1,24
BFDF-9	0,46	0,41	0,18	1,06
BFDF-10	0,84	0,13	0,02	0,98
BFDF-11	0,46	1,04	0,15	1,65
BFDF-12	0,12	0,53	0,29	0,94
BFDF-13	0,04	0,19	0,26	0,49
BFDF-14	0,87	0,03	0,21	1,12
BFDF-15	0,35	0,22	0,24	0,81
BFDF-16	0,04	0,17	0,26	0,47
BFDF-17	0,36	0,14	0,19	0,69
BFDF-18	0,04	0,39	0,21	0,64
BFDF-19	0,04	0,19	0,27	0,49
BFDF-20	0,25	0,13	0,29	0,66
BFDF-21	0,20	0,21	0,28	0,69
BFDF-22	0,57	0,12	0,21	0,90
BFDF-23	0,43	0,14	0,32	0,88
BFDF-24	0,04	0,24	0,25	0,53
BFDF-25	0,10	0,35	0,32	0,77
BFDF-26	0,19	0,24	0,33	0,75
BFDF-27	0,23	0,57	0,07	0,88
BFDF-28	0,13	0,17	0,27	0,57
BFDF-29	0,16	0,15	0,28	0,59
BFDF-30	0,04	0,18	0,30	0,53
BFDF-31	0,14	0,20	0,15	0,49
BFDF-32	0,36	0,22	0,12	0,71
BFDF-33	0,11	0,16	0,20	0,47
BFDF-34	0,18	0,16	0,26	0,60
BFDF-35	0,14	0,13	0,20	0,47
BFDF-36	0,16	0,30	0,23	0,69
BFDF-37	0,04	0,18	0,24	0,46
BFDF-38	0,26	0,03	0,21	0,50
BFDF-39	0,04	0,14	0,30	0,48
BFDF-40	0,15	0,23	0,24	0,63
BFDF-41	0,14	0,26	0,27	0,67
BFDF-42	0,27	0,21	0,21	0,69
BFDF-43	0,12	0,19	0,23	0,54
BFDF-44	0,27	0,17	0,12	0,56
BFDF-45	0,57	0,03	0,20	0,80
BFDF-46	0,04	0,96	0,23	1,23

Tablo 5.6 Küçük çocuklar için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri

Örnek kodu	Yıllık etkin radyasyon dozu (mSv/y)			
	$YED_{^{232}Th}$	$YED_{^{226}Ra}$	$YED_{^{40}K}$	TYED
BFDF-1	0,065	0,015	0,108	0,187
BFDF-2	0,038	0,003	0,094	0,135
BFDF-3	0,027	0,009	0,095	0,131
BFDF-4	0,047	0,003	0,098	0,147
BFDF-5	0,017	0,003	0,097	0,117
BFDF-6	0,042	0,014	0,085	0,141
BFDF-7	0,037	0,010	0,102	0,148
BFDF-8	0,074	0,030	0,112	0,215
BFDF-9	0,056	0,030	0,083	0,170
BFDF-10	0,018	0,055	0,007	0,080
BFDF-11	0,142	0,030	0,069	0,241
BFDF-12	0,072	0,008	0,130	0,210
BFDF-13	0,026	0,003	0,116	0,145
BFDF-14	0,004	0,057	0,097	0,158
BFDF-15	0,030	0,023	0,110	0,163
BFDF-16	0,023	0,003	0,116	0,142
BFDF-17	0,019	0,024	0,088	0,130
BFDF-18	0,053	0,003	0,097	0,153
BFDF-19	0,026	0,003	0,121	0,149
BFDF-20	0,018	0,016	0,129	0,163
BFDF-21	0,029	0,013	0,128	0,170
BFDF-22	0,016	0,037	0,096	0,150
BFDF-23	0,019	0,028	0,143	0,190
BFDF-24	0,032	0,003	0,115	0,150
BFDF-25	0,048	0,007	0,144	0,198
BFDF-26	0,032	0,012	0,148	0,193
BFDF-27	0,078	0,015	0,034	0,127
BFDF-28	0,024	0,009	0,121	0,153
BFDF-29	0,020	0,011	0,127	0,158
BFDF-30	0,025	0,003	0,137	0,165
BFDF-31	0,027	0,009	0,069	0,105
BFDF-32	0,031	0,024	0,053	0,108
BFDF-33	0,022	0,007	0,093	0,121
BFDF-34	0,022	0,012	0,116	0,150
BFDF-35	0,018	0,009	0,091	0,118
BFDF-36	0,041	0,010	0,106	0,157
BFDF-37	0,024	0,003	0,110	0,137
BFDF-38	0,004	0,017	0,095	0,116
BFDF-39	0,019	0,003	0,135	0,156
BFDF-40	0,032	0,010	0,110	0,151
BFDF-41	0,035	0,009	0,122	0,166
BFDF-42	0,029	0,017	0,096	0,142
BFDF-43	0,025	0,008	0,103	0,137
BFDF-44	0,023	0,018	0,055	0,096
BFDF-45	0,004	0,037	0,090	0,131
BFDF-46	0,131	0,003	0,106	0,240

5.2.2 Kanser Riski

Bebekler veya yeni doğanlar için hesaplanan mortalite ve morbidite KR değerleri, sırasıyla Tablo 5.7 ve Tablo 5.8′de verildi. Her bir radyonüklit için hesaplanan ortalama mortalite kanser risk (KR_{MOR}) değerleri; $1,2 \times 10^{-7}$ ($2,2 \times 10^{-8} – 4,7 \times 10^{-7}$) (^{232}Th); $5,3 \times 10^{-7}$ ($6,4 \times 10^{-8} – 2,1 \times 10^{-6}$) (^{226}Ra) ve $2,1 \times 10^{-6}$ ($1,5 \times 10^{-7} – 3,1 \times 10^{-6}$) (^{40}K) olarak bulundu. TKR_{MOR} değerleri ise ortalaması $4,3 \times 10^{-6}$ olmak üzere $1,3 \times 10^{-6} – 6,4 \times 10^{-6}$ aralığında değişti. Her bir radyonüklit için hesaplanan ortalama morbidite kanser risk (KR_{MOB}) değerleri; $1,7 \times 10^{-7}$ ($3,2 \times 10^{-8} – 6,8 \times 10^{-7}$) (^{232}Th); $7,7 \times 10^{-7}$ ($9,3 \times 10^{-8} – 3,1 \times 10^{-6}$) (^{226}Ra) ve $3,4 \times 10^{-6}$ ($2,3 \times 10^{-7} – 4,9 \times 10^{-6}$) (^{40}K) olarak bulundu. TKR_{MOB} değerleri ise ortalaması $2,8 \times 10^{-6}$ olmak üzere $8,6 \times 10^{-7} – 4,2 \times 10^{-6}$ aralığında değişti.

Küçük çocuklar için hesaplanan mortalite ve morbidite KR değerleri, sırasıyla Tablo 5.9 ve Tablo 5.10′da verildi. Her bir radyonüklit için hesaplanan ortalama mortalite kanser risk (KR_{MOR}) değerleri; $2,4 \times 10^{-7}$ ($4,4 \times 10^{-8} – 9,3 \times 10^{-7}$) (^{232}Th); $1,1 \times 10^{-6}$ ($1,3 \times 10^{-7} – 4,9 \times 10^{-6}$) (^{226}Ra) ve $4,3 \times 10^{-6}$ ($3,0 \times 10^{-7} – 6,2 \times 10^{-6}$) (^{40}K) olarak bulundu. TKR_{MOR} değerleri ise ortalaması $5,6 \times 10^{-6}$ olmak üzere $1,7 \times 10^{-6} – 8,4 \times 10^{-6}$ aralığında değişti. Her bir radyonüklit için hesaplanan ortalama morbidite kanser risk (KR_{MOB}) değerleri; $3,5 \times 10^{-7}$ ($6,5 \times 10^{-8} – 1,4 \times 10^{-7}$) (^{232}Th); $1,6 \times 10^{-6}$ ($1,9 \times 10^{-7} – 6,2 \times 10^{-6}$) (^{226}Ra) ve $6,8 \times 10^{-6}$ ($4,7 \times 10^{-7} – 9,8 \times 10^{-6}$) (^{40}K) olarak bulundu. TKR_{MOB} değerleri ise ortalaması $8,7 \times 10^{-6}$ olmak üzere $2,5 \times 10^{-6} – 1,3 \times 10^{-5}$ aralığında değişti.

Tablo 5.7 Yeni doğanlar için hesaplanan mortalite kanser risk değerleri

Örnek kodu	$KR_{MOR(Th)}$	$KR_{MOR(Ra)}$	$KR_{MOR(K)}$	TKR_{MOR}
BFDF-1	$1,2 \times 10^{-7}$	$9,7 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
BFDF-2	$2,2 \times 10^{-8}$	$5,7 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
BFDF-3	$7,1 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
BFDF-4	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-5	$2,2 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
BFDF-6	$1,1 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
BFDF-7	$7,8 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-8	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$
BFDF-9	$2,5 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-10	$4,5 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-7}$
BFDF-11	$2,5 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$
BFDF-12	$6,6 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$
BFDF-13	$2,2 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-14	$4,7 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
BFDF-15	$1,9 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-16	$2,2 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-17	$1,9 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
BFDF-18	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,9 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-19	$2,2 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-20	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
BFDF-21	$1,0 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$
BFDF-22	$3,0 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
BFDF-23	$2,3 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$
BFDF-24	$2,2 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-25	$5,4 \times 10^{-8}$	$7,1 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$
BFDF-26	$9,9 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$
BFDF-27	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$
BFDF-28	$7,1 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-29	$8,8 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
BFDF-30	$2,2 \times 10^{-8}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
BFDF-31	$7,3 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$
BFDF-32	$1,9 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
BFDF-33	$5,6 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
BFDF-34	$9,8 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-35	$7,3 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
BFDF-36	$8,3 \times 10^{-8}$	$6,1 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
BFDF-37	$2,2 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$
BFDF-38	$1,4 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$
BFDF-39	$2,2 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
BFDF-40	$8,2 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
BFDF-41	$7,7 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
BFDF-42	$1,4 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
BFDF-43	$6,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
BFDF-44	$1,5 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$
BFDF-45	$3,0 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$
BFDF-46	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$
Ortalama	$1,2 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
En küçük	$2,2 \times 10^{-8}$	$6,4 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-7}$
En büyük	$4,7 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$

Tablo 5.8 Yeni doğanlar için hesaplanan morbidite kanser risk değerleri

Örnek kodu	$KR_{MOB(Th)}$	$KR_{MOB(Ra)}$	$KR_{MOB(K)}$	TKR_{MOB}
BFDF-1	$1,8 \times10^{-7}$	$1,4 \times10^{-6}$	$3,5 \times10^{-6}$	$5,1 \times10^{-6}$
BFDF-2	$3,2 \times10^{-8}$	$8,3 \times10^{-7}$	$3,1 \times10^{-6}$	$3,9 \times10^{-6}$
BFDF-3	$1,0 \times10^{-7}$	$5,9 \times10^{-7}$	$3,1 \times10^{-6}$	$3,8 \times10^{-6}$
BFDF-4	$3,2 \times10^{-8}$	$1,0 \times10^{-6}$	$3,2 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$
BFDF-5	$3,2 \times10^{-8}$	$3,7 \times10^{-7}$	$3,2 \times10^{-6}$	$3,6 \times10^{-6}$
BFDF-6	$1,6 \times10^{-7}$	$9,1 \times10^{-7}$	$2,8 \times10^{-6}$	$3,9 \times10^{-6}$
BFDF-7	$1,1 \times10^{-7}$	$8,0 \times10^{-7}$	$3,3 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$
BFDF-8	$3,5 \times10^{-7}$	$1,6 \times10^{-6}$	$3,7 \times10^{-6}$	$5,6 \times10^{-6}$
BFDF-9	$3,6 \times10^{-7}$	$1,2 \times10^{-6}$	$2,7 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$
BFDF-10	$6,6 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-7}$	2,3E-07	$1,3 \times10^{-6}$
BFDF-11	$3,6 \times10^{-7}$	$3,1 \times10^{-6}$	$2,3 \times10^{-6}$	$5,7 \times10^{-6}$
BFDF-12	$9,7 \times10^{-8}$	$1,6 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$	$5,9 \times10^{-6}$
BFDF-13	$3,2 \times10^{-8}$	$5,7 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-6}$	$4,4 \times10^{-6}$
BFDF-14	$6,8 \times10^{-7}$	$9,3 \times10^{-8}$	$3,2 \times10^{-6}$	$4,0 \times10^{-6}$
BFDF-15	$2,7 \times10^{-7}$	$6,5 \times10^{-7}$	$3,6 \times10^{-6}$	$4,5 \times10^{-6}$
BFDF-16	$3,2 \times10^{-8}$	$5,0 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$
BFDF-17	$2,8 \times10^{-7}$	$4,0 \times10^{-7}$	$2,9 \times10^{-6}$	$3,6 \times10^{-6}$
BFDF-18	$3,2 \times10^{-8}$	$1,2 \times10^{-6}$	$3,2 \times10^{-6}$	$4,4 \times10^{-6}$
BFDF-19	$3,2 \times10^{-8}$	$5,5 \times10^{-7}$	$4,0 \times10^{-6}$	$4,6 \times10^{-6}$
BFDF-20	$1,9 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-7}$	$4,3 \times10^{-6}$	$4,8 \times10^{-6}$
BFDF-21	$1,5 \times10^{-7}$	$6,3 \times10^{-7}$	$4,2 \times10^{-6}$	$5,0 \times10^{-6}$
BFDF-22	$4,4 \times10^{-7}$	$3,5 \times10^{-7}$	$3,2 \times10^{-6}$	$4,0 \times10^{-6}$
BFDF-23	$3,3 \times10^{-7}$	$4,1 \times10^{-7}$	$4,7 \times10^{-6}$	$5,5 \times10^{-6}$
BFDF-24	$3,2 \times10^{-8}$	$7,0 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-6}$	$4,5 \times10^{-6}$
BFDF-25	$7,9 \times10^{-8}$	$1,0 \times10^{-6}$	$4,7 \times10^{-6}$	$5,9 \times10^{-6}$
BFDF-26	$1,5 \times10^{-7}$	$7,0 \times10^{-7}$	$4,9 \times10^{-6}$	$5,7 \times10^{-6}$
BFDF-27	$1,8 \times10^{-7}$	$1,7 \times10^{-6}$	$1,1 \times10^{-6}$	$3,0 \times10^{-6}$
BFDF-28	$1,0 \times10^{-7}$	$5,1 \times10^{-7}$	$4,0 \times10^{-6}$	$4,6 \times10^{-6}$
BFDF-29	$1,3 \times10^{-7}$	$4,4 \times10^{-7}$	$4,2 \times10^{-6}$	$4,8 \times10^{-6}$
BFDF-30	$3,2 \times10^{-8}$	$5,4 \times10^{-7}$	$4,5 \times10^{-6}$	$5,1 \times10^{-6}$
BFDF-31	$1,1 \times10^{-7}$	$5,9 \times10^{-7}$	$2,3 \times10^{-6}$	$3,0 \times10^{-6}$
BFDF-32	$2,9 \times10^{-7}$	$6,6 \times10^{-7}$	$1,8 \times10^{-6}$	$2,7 \times10^{-6}$
BFDF-33	$8,3 \times10^{-8}$	$4,7 \times10^{-7}$	$3,1 \times10^{-6}$	$3,6 \times10^{-6}$
BFDF-34	$1,4 \times10^{-7}$	$4,7 \times10^{-7}$	$3,8 \times10^{-6}$	$4,4 \times10^{-6}$
BFDF-35	$1,1 \times10^{-7}$	$4,0 \times10^{-7}$	$3,0 \times10^{-6}$	$3,5 \times10^{-6}$
BFDF-36	$1,2 \times10^{-7}$	$8,9 \times10^{-7}$	$3,5 \times10^{-6}$	$4,5 \times10^{-6}$
BFDF-37	$3,2 \times10^{-8}$	$5,3 \times10^{-7}$	$3,6 \times10^{-6}$	$4,2 \times10^{-6}$
BFDF-38	$2,0 \times10^{-7}$	$9,3 \times10^{-8}$	$3,1 \times10^{-6}$	$3,4 \times10^{-6}$
BFDF-39	$3,2 \times10^{-8}$	$4,0 \times10^{-7}$	$4,4 \times10^{-6}$	$4,9 \times10^{-6}$
BFDF-40	$1,2 \times10^{-7}$	$6,9 \times10^{-7}$	$3,6 \times10^{-6}$	$4,4 \times10^{-6}$
BFDF-41	$1,1 \times10^{-7}$	$7,6 \times10^{-7}$	$4,0 \times10^{-6}$	$4,9 \times10^{-6}$
BFDF-42	$2,1 \times10^{-7}$	$6,2 \times10^{-7}$	$3,2 \times10^{-6}$	$4,0 \times10^{-6}$
BFDF-43	$9,7 \times10^{-8}$	$5,5 \times10^{-7}$	$3,4 \times10^{-6}$	$4,0 \times10^{-6}$
BFDF-44	$2,1 \times10^{-7}$	$4,9 \times10^{-7}$	$1,8 \times10^{-6}$	$2,5 \times10^{-6}$
BFDF-45	$4,4 \times10^{-7}$	$9,3 \times10^{-8}$	$3,0 \times10^{-6}$	$3,5 \times10^{-6}$
BFDF-46	$3,2 \times10^{-8}$	$2,8 \times10^{-6}$	$3,5 \times10^{-6}$	$6,4 \times10^{-6}$
Ortalama	$1,7 \times10^{-7}$	$7,7 \times10^{-7}$	$3,4 \times10^{-6}$	$4,3 \times10^{-6}$
En küçük	$3,2 \times10^{-8}$	$9,3 \times10^{-8}$	$2,3 \times10^{-7}$	$1,3 \times10^{-6}$
En büyük	$6,8 \times10^{-7}$	$3,1 \times10^{-6}$	$4,9 \times10^{-6}$	$6,4 \times10^{-6}$

Tablo 5.9 Küçük çocuklar için hesaplanan mortalite kanser risk değerleri

Örnek kodu	$KR_{MOR(Th)}$	$KR_{MOR(Ra)}$	$KR_{MOR(K)}$	TKR_{MOR}
BFDF-1	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-6}$
BFDF-2	$4,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$
BFDF-3	$1,4 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
BFDF-4	$4,4 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$
BFDF-5	$4,4 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-6}$
BFDF-6	$2,2 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$
BFDF-7	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$
BFDF-8	$4,8 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$
BFDF-9	$5,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
BFDF-10	$9,0 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$
BFDF-11	$4,9 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-6}$
BFDF-12	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$7,8 \times 10^{-6}$
BFDF-13	$4,4 \times 10^{-8}$	$7,8 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
BFDF-14	$9,3 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$
BFDF-15	$3,7 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
BFDF-16	$4,4 \times 10^{-8}$	$6,9 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$
BFDF-17	$3,8 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-6}$
BFDF-18	$4,4 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
BFDF-19	$4,4 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
BFDF-20	$2,6 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^{-6}$
BFDF-21	$2,1 \times 10^{-7}$	$8,7 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$6,5 \times 10^{-6}$
BFDF-22	$6,0 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-6}$
BFDF-23	$4,5 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-6}$
BFDF-24	$4,4 \times 10^{-8}$	$9,6 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-6}$
BFDF-25	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-6}$
BFDF-26	$2,0 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$
BFDF-27	$2,5 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$
BFDF-28	$1,4 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
BFDF-29	$1,8 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$6,1 \times 10^{-6}$
BFDF-30	$4,4 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-7}$	$5,8 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-6}$
BFDF-31	$1,5 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$
BFDF-32	$3,9 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$
BFDF-33	$1,1 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-6}$
BFDF-34	$2,0 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
BFDF-35	$1,5 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$
BFDF-36	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
BFDF-37	$4,4 \times 10^{-8}$	$7,3 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-6}$
BFDF-38	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$
BFDF-39	$4,4 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-7}$	$5, \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$
BFDF-40	$1,7 \times 10^{-7}$	$9,5 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
BFDF-41	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$
BFDF-42	$2,9 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-6}$
BFDF-43	$1,3 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-6}$
BFDF-44	$2,9 \times 10^{-7}$	$6,8 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
BFDF-45	$6,1 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$
BFDF-46	$4,4 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
Ortalama	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$
En küçük	$4,4 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$
En büyük	$9,3 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$

Tablo 5.10 Küçük çocuklar için hesaplanan morbidite kanser risk değerleri

Örnek kodu	$KR_{MOB(Th)}$	$KR_{MOB(Ra)}$	$KR_{MOB(K)}$	TKR_{MOB}
BFDF-1	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$
BFDF-2	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$
BFDF-3	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$	$7,7 \times 10^{-6}$
BFDF-4	$6,5 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$6,5 \times 10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-6}$
BFDF-5	$6,5 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$
BFDF-6	$3,3 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$7,8 \times 10^{-6}$
BFDF-7	$2,3 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-6}$
BFDF-8	$7,1 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
BFDF-9	$7,3 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
BFDF-10	$1,3 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$
BFDF-11	$7,2 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
BFDF-12	$1,9 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$
BFDF-13	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$7,7 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-6}$
BFDF-14	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$
BFDF-15	$5,5 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$
BFDF-16	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$7,7 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
BFDF-17	$5,6 \times 10^{-7}$	$8,1 \times 10^{-7}$	$5,8 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$
BFDF-18	$6,5 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
BFDF-19	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-6}$
BFDF-20	$3,9 \times 10^{-7}$	$7,7 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-6}$	$9,7 \times 10^{-6}$
BFDF-21	$3,1 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$
BFDF-22	$8,9 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$
BFDF-23	$6,7 \times 10^{-7}$	$8,3 \times 10^{-7}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
BFDF-24	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$
BFDF-25	$1,6 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$
BFDF-26	$2,9 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
BFDF-27	$3,7 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-6}$
BFDF-28	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-6}$
BFDF-29	$2,6 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-6}$
BFDF-30	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$
BFDF-31	$2,2 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$
BFDF-32	$5,7 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-6}$
BFDF-33	$1,7 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-7}$	$6,1 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$
BFDF-34	$2,9 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-7}$	$7,7 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-6}$
BFDF-35	$2,1 \times 10^{-7}$	$7,9 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$
BFDF-36	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-6}$
BFDF-37	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
BFDF-38	$4,0 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-6}$
BFDF-39	$6,5 \times 10^{-8}$	$8,1 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$
BFDF-40	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-6}$
BFDF-41	$2,3 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$8,1 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$
BFDF-42	$4,2 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$
BFDF-43	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$6,8 \times 10^{-6}$	$8,1 \times 10^{-6}$
BFDF-44	$4,3 \times 10^{-7}$	$9,9 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$
BFDF-45	$8,9 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$
BFDF-46	$6,5 \times 10^{-8}$	$5,7 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Ortalama	$3,5 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$6,8 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
En küçük	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$
En büyük	$1,4 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$

5.3 Sonuç ve Öneriler

Tez kapsamında yapılan bu çalışmada, Türkiye'de en çok tüketilen ticari bebek maması markalarına ait farklı içeriklere sahip bebek formülü ve devam devam formülü örneklerinin radyolojik kalitesinin değerlendirilmesi ve bebek formülü örneklerinde ölçülen ^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K alımına bağlı potansiyel radyolojik sağlık riski ile ilgili veriler ilk kez sunulmaktadır. Veriler, bebeğin yaşamının ilk üç yılında bebek formülü alımı açısından önemli bir radyolojik risk olmadığını ortaya koymuştur. Bu veriler, ebeveynlerde bebek mamalarının radyolojik kalitesi konusunda farkındalık oluştur uçaktır. Ayrıca, Türkiye'de tüketilen bebek mamalarındaki radyoaktivite derişimleri ve doz değerleri için referans veya ölçütlerin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Tez kapsamında yapılan radyometrik ve radyolojik değerlendirmenin sonuçları aşağıda maddeler hâlinde özetlendi:

- Bebek formülü türlerinin radyolojik kalitesini değerlendirmek için örneklerde doğal (^{232}Th; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerin aktivite derişimleri ölçüldü. Çernobil nükleer kazasının sonucu olarak Türkiye'ye yağışla gelerek toprak, su ve gıda örneklerini kirleten (kontamine eden) fisyon ürünü yapay ^{137}Cs radyonükliti, örneklerin tamamında, ÖMA değerinin (0,2 Bq/kg) altında gözlendi. Örneklerde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 2,8 Bq/kg (^{232}Th); 2,6 Bq/kg (^{226}Ra) ve 162,1 Bq/kg (^{40}K) olarak bulundu. Radyometrik bulgular, araştırılan bebek formüllerinin, düşük seviyede ^{232}Th ve ^{226}Ra ve normal seviyede ^{40}K içermektedir. Dolayısıyla; ^{40}K aktivite derişimi; ^{232}Th ve ^{226}Ra aktivite derişimlerinden önemli ölçüde yüksektir. Vücut metabolizması için gerekli bir element olan potasyumun bebek mamalarının bileşiminde büyük miktarlarda bulunması gerektiğinden, bu beklenen bir sonuçtur. Bilindiği gibi Birleşmiş Milletlere bağlı Dünya Sağlık Örgütü ve Gıda ve Tarım Örgütü (WHO/FAO) Ortak Gıda Standartları Programı kapsamında oluşturulan Kodeks Alimentarius Komisyonu, nükleer bir acil durumun ardından gıdalardaki belirli (yapay fisyon ürünü olan) radyonüklitler için kılavuz seviyeleri geliştirmiştir. Bu kılavuz seviyeler, nükleer veya radyolojik bir acil durumun ardından kontamine olmuş, insan tüketimine yönelik ve uluslararası ticareti

yapılan gıdalara uygulanmaktadır. Bu Kodeks'de doğal kaynaklı radyonüklitler dikkate alınmamış ve bunlar için herhangi kılavuz seviye belirlenmemiştir.

- Radyolojik değerlendirme bulguları, beş örnek hariç her iki yaş grubu için hesaplanan yıllık etkin radyasyon değerlerinin, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü/Dünya Sağlık Örgütü (FAO/WHO, 1991) ve Uluslararası Radyasyon Koruması Komisyonu (ICRP, 2007) tarafından önerilen 1 mSv/y sınırının altında olduğunu gösterdi. BFDF-8, BFDF-9, BFDF-11, BFDF-14 ve BFDF-46 olarak kodlanmış bu beş örneğin yıllık etkin radyasyon değerleri, sırasıyla 1,24 mSv/y; 1,06 mSv/y; 1,65 mSv/y; 1,09 mSv/y ve 1,19 mSv/y olarak hesaplandı.

- Radyolojik değerlendirme bulguları, her iki yaş grubu için hesaplanan mortalite ve morbidite kanser risk değerlerinin, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından önerilen 1×10^{-6} – 1×10^{-4} radyolojik risk aralığında olduğunu ortaya koydu (USEPA, 1999).

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen radyolojik değerlendirme bulguları, bebek ve küçük çocuk sağlığı için kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte olumlu sonuçlara rağmen, bağışıklık sistemlerinin zayıf olmasından dolayı savunmasız durumda olan bebeklerin potansiyel radyolojik sağlık risklerini en aza indirmek için ticari olarak satışa sunulan bebek maması markalarının veya gıdalarının radyonüklit içeriklerinin periyodik olarak izlenmesi şiddetle önerilmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulguların tüketicilerde farkındalık oluşturacağı, bebek formüllerinin radyolojik kalite kontrolü için temel veri sağlayacağı ve gelecekte olası radyoaktivite kontaminasyonunun izlenmesi için referans veri olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ababneh, Z., Alyassain, Q., Aljarrah, A. M. & Ababneh, K. M. (2010). Measurement of natural and artificial radioactivity in powdered milk consumed in Jordan and estimates of the corresponding annual effective dose. *Radiation Protection Dosimetry, 138*, 278–283.

Açıkgöz, A. (2023). Güvenli toz bebek maması hazırlanması ile ilgili bir ölçeğin geliştirilmesi, geçerlik ve güvenirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.

Afshari, N. S., Abbasisiar, F. M., Abdomaleki, P. & Nejad, M. G. (2009). Determination of ^{40}K concentration in milk samples consumed in Tehran-Iran and estimation of its annual effective dose. *Iranian Journal of Radiation Research, 7*, 159–164.

Agbalagba, E. O., Agbalagba, H. O. & Avwiri, G. O. (2016). Cost-benefit analysis approach to risk assessment of natural radioactivity in powdered and liquid milk products consumed in Nigeria. *Environmental Forensics, 17*(3), 191–202.

Ağuş, Y. (2017). Radioactivity concentrations of the milk and dairy products. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19*(2), 169–176.

Ahmed, A. Q., Mohsen, A. A. H., Al-Khayyat, A. N., Abojassim, A. A. & Munim, R. R. (2019). Natural radioactivity in cerelac baby food samples commonly used in Iraq. *Plant Archives, 19*(1), 1057–1061.

Ahmed, S. N. (2007). Physics and Engineering of Radiation Detection. Academic Press Inc. Published by Elsevier, England, 2007.

Al-Farha, E. M., Jasim, H. I. & Wais, T. Y. (2025). Evaluation of natural radioactivity in powdered milk in the markets of Nineveh Governorate, Iraq. *The European Physical Journal Plus, 140*, 1–12.

Al-Sharabi, W. M. S. (2020). Assessment of natural radionuclides in some powdered milk samples consumed in Yemen and estimated of the corresponding annual effective dose. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies, 23*(2), 461–469.

Al-Zahrani, J. H. (2012). Natural radioactivity and heavy metals in milk consumed in Saudi Arabia and population dose rate estimates. *Life Science Journal, 9*(2), 651–656.

Alamoudi, Z. M. (2013). Assessment of natural radionuclides in powdered milk consumed in Saudi Arabia and estimates of the corresponding annual effective dose. *Journal of American Science, 9*(6), 267–273.

Alharshan, G. A., Aloraini, D. A., Al-Ghamdi, H., Almuqrin, A. H., El-Azony, K. M. & Alsalamah A. S. (2016). Measuring the radioactivity concentration of ^{40}K and

^{137}Cs and calculating the annual internal doses from ingesting liquid and powdered milk. *Radiochemistry, 59*(1), 98–103.

Alraefae, T., Nageswaran, T.N., Al-Failakawi, A. & Al-Shemali, T. (2012). Radioactivity of long lived gamma emitters in milk powder consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses. *Kuwait Journal of Science and Engineering, 39*(1), 143–158.

Altamemi, R. A. A., Turhan, Ş. & Kurnaz, A. (2021). Natural and anthropogenic radioactivity in some vegetables and fruits commonly consumed in the Western Black Sea region of Turkey. *Radiochimica Acta, 109*(12), 935–942.

Amarh, F. A., Agorku, E. S., Voegborlo, R. B., Ashong, G. W. & Atongo, G. A. (2023). Health risk assessment of some selected heavy metals in infant food sold in Wa, Ghana. *Heliyon. 9*(5), 1–10.

Amin, S. A., 1 Mohammed S. M. AL-kafaje, M. S. M. & Al-Ani, R. R. (2016). Assessment of natural radionuclides in powdered milk consumed in Iraq. *Journal of Natural Sciences Research, 6*(13), 112–115.

Başaran, B. (2022). An assessment of heavy metal level in infant formula on the market in Turkey and the hazard index. *Journal of Food Composition and Analysis, 105*, 1–9.

Başaran, B. & Aydın, F. (2022). Determination of acrylamide levels in infant formulas and baby biscuits sold in Turkey. *Letters in Applied NanoBioScience, 11*(1), 3155–3165.

Begam, K., Rahman, M. M., Kabir, M. A., Tamim, U., Hossain, S. M. & Begum, A. (2020). Natural radioactivity level of ^{238}U, ^{232}Th, and ^{40}K in baby food and committed annual effective dose assessment in Bangladesh. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 8*(6), 187–192.

Benaissa, K., Seladji, L. N., Kadum, A. & Dahmani, A. (2020). Radionuclide assessment in imported powdered infant milk consumed in Algeria and radiation hazard indices. *Radiochemistry, 62*(5), 673–680.

Biçer, M. & Çetinkaya, H. (2023). Measurement of radioactivity levels of liquid milk samples in Kütahya, Turkey. *International Journal of Radiation Research, 21*(3), 597–600.

Caridi, F., Paladini, G., Venuti, V., Spoto, S. E., Crupi, V., Belmusto, G. & Majolino, D. (2022). Natural and anthropogenic radioactivity content and radiation hazard assessment of baby food consumption in Italy. *Applied Sciences, 12*, 1–7.

Caridi, F., Venuti, V., Paladini, G., Belmusto, G., Crupi, V. & Majolino, D. (2023). Assessment of radioactivity concentration in milk samples consumed in Italy. *Current Nutrition & Food Science, 19*(2), 176–181.

Chabouni, L., Hamitouche, N., Graichi, R., Benbourenane, A. & Amri, O. (2023). Measurement of radioactivity levels in powdered milk consumed in Algeria and

estimation of annual effective doses. *Algerian Journal of Engineering and Technology, 8*(2), 258–265.

Currie, L. A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitativedetermination. *Analytical Chemistry, 40*, 586–593.

Debertin, K. & Helmer, R. G. (1988). Spectrometry with Semiconductor Detectors. North-Holland, Amesterdam.

Demir, F., Yildirim, M., Mermer, N.K. & Derun, E. M. (2017). Determination of some element concentrations of first infant milk formula and health risk assessment. *CBU International Conference Proceedings, 5*, 937–942.

Demir, T. & Ağaoğlu, S. (2023). Exposure Assessment of Aflatoxin M1 Through Ingestion of Infant Formula in Türkiye. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 11*(2), 396–402.

Desideri, D., Battisti, P., Giardina, I., Roselli, C., Feduzi, L., Gorietti, D. & Assunta Meli, M. (2019). Assessment of radioactivity in Italian baby food. *Food Chemistry, 279*, 408–415.

Dhanekar, S. & Rangra, R. (2021). Wearable dosimeters for medical and defense applications: A state of the art review. Advanced Materials Technologies, 6, 1–15.

Din, K. S. (2020). Assessment of natural and artificial radioactivity in infants' powdered milk and their associated radiological health risks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,* 324, 977–981.

Duong, V. H., Nguyen, T. D., Hegedűs, M., Tóth-Bodrogi, & E., Kovács, T. (2021). Assessment of ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{137}Cs, and ^{40}K concentrations and annual effective dose due to the consumption of Vietnamese fresh milk. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 328*, 1399–1404.

El Mestikou, R., Jemii, E., Mazouz, M., Benali, M. & Ghedira, L. (2018). Determination of the activity level in powdered milk available in Tunisia and assessment of the radiological risks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 317*, 991–996.

Emumejaye, K. (2012). Determination of potassium-40 concentration in some powdered milk samples consumed in Delta State, Nigeria. *IOSR Journal of Applied Physics, 2*, 8–12.

Eskici, G. & Karahan, S. Y. (2022). Attitudes and practice of Turkish mothers with babies between 0-24 months regarding infant nutrition: The Iowa Infant Feeding Attitude Scale. *Revista de Nutrição, 5*, 1–13.

Faizra, A. H. M., Yusmadi, R. A., A'zizi, N. A. A. & Sharip, N. (2025). Assessment of radiation dose from natural radionuclides content of powdered milk in Malaysia. *Multidisciplinary Applied Research and Innovation, 6*(3), 12–17.

FAO/WHO (1991). Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization Codex Alimentarius, General Requirements, Section 6.1, Guidance Levels for Radionuclides in Foods Following Accidental Nuclear Contamination, Joint FAO/WHO Food Standards Programme. Rome.

Faria da Silva, L., Dutra Garcêz, R. W., Fernandes, T. S., Lopes, J. M., Mello, C. R., Barbosa da Silva, L., Kuster de Souza Paiva, A. & Xavier da Silva, A. (2022). An assessment of committed effective dose and lifetime cancer risk due to the ingestion of infant milk. *Applied radiation and isotopes, 190*, 1–6.

Ford, J. (2004). Radiation, people and the environment. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna (Austria), 2004.

GBC, (2023). Rates of breastfeeding increase around the world through improved protection and support. Global Breastfeeding Collective, UNICEF (WHO). Web page: https://www.unicef.org/media/150586/file/Global%20breastfeeding%20scorecard%202023.pdf, Erişim Tarihi: 10.04.2025.

Gilmore, G. R. (2008). Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition, John Wiley & Sons, England, 2008.

Hulif, A. M. N., Al-Motawakel, M. Q., Eadan, Z. A. & Al-Sowaidi, N. A. (2025). Measurement of radioactivity in common powered milk consumed in Sana'a, Yemen and estimation of the associated annual effective dose. *Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology*, *3*(1), 621–627.

IAEA (International Atomic Energy Agency). (2016). Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water, TECDOC-1788, IAEA, Vienna (2016). https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1788_web.pdf, Erişim Tarihi: 11.03.2025.

ICRP (2007). International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Volume 37, 2–4.

ICRP (2012). International Commission on Radiological Protection. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.) Published by Elsevier Ltd.

Jemii, E. & Alharbi, T. (2018). Measurements of natural radioactivity in infant formula and radiological risk assessment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 315*, 157–161.

Kırış, E., Baltaş, H., Damla, N., Ertuğral, B. & Çevik, U. (2013). Radioactivity levels in some cow milks consumed in Eastern Black Sea Region of Turkey. *Batman University Journal of Life Sciences, 3*(2), 29–38.

Knoll G. F. (2000). Radiation detection and measurements. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons.

Krane, K. S. (1987). Introductory nuclear physics. 2nd ed., New York: John Willey & Sons.

Ljung, K., Palm, B., Grandér, M. & Vahter, M. (2011). High concentrations of essential and toxic elements in infant formula and infant foods - A matter of concern. *Food Chemistry, 127*(3), 943–951.

Melquiades, F. L. & Appoloni, C. R. (2001). Radiation of powdered milk produced at Londrina, PR, Brazil. *Radiation Physics and Chemistry, 61*(3-6), 691–692.

Mohamed, G. Y., Soliman, M., Issa, S. A. M., Mohamed, N. M. A. & Al-Abyad, M. (2021). Trace elements assessment and natural radioactivity levels of infant formulas consumed in Egypt. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 330*, 1127–1136.

Navarrete, J. M., Martinez, T. & Cabrera, L. (2007). Comparative study between radioactive contamination in powder milk by Chernobyl accident (^{137}Cs) and natural radioactivity (^{40}K). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 272*, 277–279.

Okedeyi, S. A., Ikuemonisan, F. E., Olajuwon, O. O., Atilade, A. O., Mustapha, A. O. Coker, J. O., Kayode, Y. O., Ajose, A. S., Kasika, F. A. & Odubote, B. O. (2024). Assessment of natural radioactivity levels of ^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th in some selected baby food in southwestern Nigeria. *Caliphate Journal of Science and Technology, 2*, 175–183.

Ong, J. X., Gan, P., Lee, K. K. M., Wu, Y. & Chan, J. S. H. (2024). An assessment of natural and artifical radionuclide content in powdered milk consumed by infants and toddlers in Singapore. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 333*(2), 951–959.

Onosohwo, B., Olatunji, M., Khandaker, M., Amin, Y., Bradley, D., Alkhorayef, M. & Alzimami, K. (2015). Measurement of natural and artificial radioactivity in infant powdered milk and estimation of the corresponding annual effective dose. *Environmental Engineering Science, 32*(10), 1–11.

Osibote, O. A., Olomo, J. B., Tchokossa, P. & Balogun, F. A. (1999). Radioactivity in milk consumed in Nigeria 10 years after Chernobyl reactor accident. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 442*, 778–783.

Ozturk, K., Caliskan, C.E., Akinci, Z. & Ciftci, H. (2023). Assessment of some element content and potential health risks in infant formulas available in Turkish markets, *Turkish Journal of Analytical Chemistry, 5*(1), 17–24.

Peirovi-Minaee, R., Taghavi, M., Harimi, M. & Zarei, A. (2024). Trace elements in commercially available infant formulas in Iran: Determination and estimation of health risks. *Food and Chemical Toxicology, 186*, 1–9.

Pervin, S., Kabir, M. M., Dewan, M. J., Khandaker, M. U. & Yeasmin. S. (2024). Evaluation of radioactivity concentration in farm fresh milk and concomitant dose to consumer. *Heliyon, 10*(9), 1–9.

Poltabtim, W. & Saenboonruang, K. (2019). Assessment of activity concentrations and their associated radiological health risks in commercial infant formulas in Thailand. *Chiang Mai Journal of Science, 46*(4), 778–786.

Prabhath, R. K., Sreejith, S. R., Nair, M. G., Rao, D. D. & Pradeepkuma, K. S. R. (2015). Determination of ^{210}Po concentration in commercially available infant formulae and assessment of daily ingestion dose. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8*, 470–476.

Priharti, W., Samat, S. B., Yasir, M. S. & Garba, N. N. (2016). Assessment of radiation hazard indices arising from natural radionuclides content of powdered milk in Malaysia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 307*, 297–303.

R Core Team, (2023). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

RG (Resmi Gazete), (2019). Türk gida kodeksi bebek formülleri ve devam formülleri tebliği (Tebliğ No: 2019/14). Sayı: 30819 ve Tarih: 2 Temmuz 2019.

Şan C. K. & Gökçay, G. F. (2025). Nutritional aspects of commercial infant and toddler food products sold in Turkey. *Nutrition and Health, 31*(2), 517–526.

Sarker, M. S. D., Rahman, R., Siraz, M. M.M., Khandaker, M. U. & Yeasmin, S. (2021). The presence of primordial radionuclides in powdered milk and estimation of the concomitant ingestion dose. *Radiation Physics and Chemistry, 188*, 1–7.

Sert, S. (2025). Breastfeeding practices and influencing factors among mothers: a survey study. *Journal of Health Sciences and Medicine, 8*(2), 215–221.

Shakir, A. A. & Muttelab, M. K. (2020) Radionuclide concentrations and Estimation of the Corresponding Annual Effective Dose due to gamma radioactivity in Powdered Milk in Babylon governments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 553*, 1–5.

Sipahi, H., Eken, A., Aydın, A., Sahin, G. & Baydar, T. (2014). Safety assessment of essential and toxic metals in infant formula. *The Turkish Journal of Pediatrics, 56*, 385–391.

Skoko, B., Košiček, K. M., Ilievski, T., Karanović, G., Grahek, Z., Coha, I., Hamer, D. P. & Tucaković, I., (20024). Radionuclides determination by alpha (^{210}Po, ^{228,230,232}Th) and gamma (^{226,228}Ra, ^{137}Cs, ^{40}K) spectrometry in children's food in Croatia with assessment of cumulative ingestion dose for infants. *Journal of Food Composition and Analysis, 136*, 1–7.

Spahiu, E. & Shyti, M. (2024). Assessment of natural and artificial radioactivity concentrations in infant powdered milk consumed in Albania and estimation of the annual effective dose. *Applied Radiation and Isotopes, 211*, 1–4.

Spasova, Y., Wätjen, U. & Altzitzoglou, T. (2008). European measurement comparison of ^{137}Cs, ^{40}K and ^{90}Sr in milk powder. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 277*(1), 211–215.

Statista (2025). Web sayfası: https://www.statista.com/outlook/cmo/food/baby-food/baby-milk-infant-formula/turkey. Erişim tarihi: 10/09/2025.

Stoulo, S., Manolopoulou, M. & Papastefanou, C. (2003). Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity, 69*(3), 225–240.

Sultan, D. A. O. (2025). Türkiye'de tüketilen alkolsüz gazlı ve fonksiyonel içeceklerdeki radyotoksik elementlerin belirlenmesi ve radyolojik sağlık risklerin değerlendirilmesi. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.* Kastamonu.

Sundström, J., Piñero-García, F., Thomas, R., Forssell-Aronsson, E. & Isaksson, M. (2025). Radiological characterization of commercial baby food in Sweden. *Journal of Food Composition and Analysis, 144*, 1–6.

Tawalbeh, A. A., Abumurad, K. M., Abu-Nameh, E. S. M. & Qaisi, A. M. (2020). Measurement of natural radionuclides levels and their annual effective doses in different types of powdered milk consumed by infants in Jordan. *Jordan Journal of Pharmaceutical Sciences, 13*(1), 29–39.

Techsciresearch (2025). Turkey baby food market. Web sayfası: https://www.techsciresearch.com/report/turkey-baby-food-market/13058.html. Erişim tarihi: 11/08/2025.

Trdin, M. & Benedik, L. (2017). Uranium, polonium and thorium in infant formulas (powder milk) and assessment of a cumulative ingestion dose. *Journal of Food Composition and Analysis, 64*(2), 198–202,

Tucaković, I., Karanović, G., Coha, I., Pavičić-Hamer, D. & Grahek Ž. (2023). Radionuclides in commercial children's food consumed in Croatia. *Food Control, 145*, 1–6.

Turhan, Ş., Kurnaz, A., Altuner, E. M. & Topaç, A. (2025). Radiological quality of packaged natural spring waters sold in Türkiye and radiological health risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis, 146*, 1–10.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *United Nations Publication*, New York, USA, 2000.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *United Nations Publication*, New York, USA, 2010.

USEPA (1999). United States Environmental Protection Agency Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report No. 13, EPA 402-R-99-001, Washington, DC.

Uwatse, O. B., Olatunji, M. A., Khandaker, M. U., & Amin, Y., M. (2015). Radiation dose to Malaysian infants from natural radionuclides via consumption of powdered milk. *AIP Conference Proceedings, 1657*, 1–7.

WHO (2009). World Health Organization (WHO). Infant and young child feeding. Model chapter for textbooks for medical students and allied health professionals, Geneva.

WHO (2023). World Health Organization (WHO). Complementary feeding: report of the global consultation, and summary of guiding principles for complementary feeding of the breastfed child. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data (NLM Classification: QU 145.5), Geneva.

Yii, M. W. (2019) Measurement of activity concentrations in powdered milk and estimation of the corresponding annual effective dose. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 320*, 193–199.

Younis, H., Ahmad, M. A., Azeem, U., Shaik, M. R., Al-Warthan, A., Shaik, B., Jagnandan, A., Jagnandan, S. & Ajaz, M. (2024). Comprehensive analysis of contaminants in powdered milk samples using an HPGe for γ radiation. *ACS Omega, 9*(19), 21089–21096.