

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE'DEKİ BAZI İNŞAAT MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİFLİK
SEVİYELERİNİN VE KÜTLE SOĞURMA KATSAYILARININ BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Nevzat DAMLA

**NİSAN 2009
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE’DEKİ BAZI İNŞAAT MALZEMELERİNDE DOĞAL
RADYOAKTİFLİK SEVİYELERİNİN VE KÜTLE SOĞURMA
KATSAYILARININ BELİRLENMESİ**

Nevzat DAMLA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (Fizik)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01. 04. 2009
Tezin Savunma Tarihi : 24. 04. 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hüseyin KARAL
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL**

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

ÖNSÖZ

Türkiye'deki bazı inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktiflik seviyeleri ve kütle soğurma katsayılarının belirlenmesi için yapılan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlandı.

Doğal radyoaktiflik ve kütle soğurma katsayılarının ölçümleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Atom ve Çekirdek Fiziği laboratuvarında ve XRD analizleri Katıhal Fiziği Araştırma laboratuvarında gerçekleştirildi. Kimyasal analizler ise Antwerp Üniversitesi (Belçika) Micro and Trace Analysis Center'da gerçekleştirildi.

Doktora tez çalışmamda deneysel ve teorik bilgi yönünden yararlandığım ve öğrenciliğimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA ve Prof. Dr. Uğur ÇEVİK hocama en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği ve Katıhal Fiziği laboratuvarlarında çalışmalarım boyunca ilgilerini ve desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, Arş. Gör. Ahmet ÇELİK'e, Arş. Gör. Necati ÇELİK'e, Arş. Gör. Mustafa KARABIDAK'a Arş. Gör. İsmail POLAT'a, Arş. Gör. Y. Özkan YEŞİLBAĞ'a, Öğr. Gör. Ayhan KARA'ya, Öğr. Gör. Selim KAYA'ya ve Ümit IŞIK'a, ayrıca numunelerin XRD yorumlarından dolayı Jeoloji Mühendisliği Öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Aydın Ali VAN'a ve EDXRF analizleri için Prof. Dr. Rene Van Grieken'e çok teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle sürekli beni cesaretlendiren ve yanımda olan aileme, eşime ve kızıma en içten saygı ve sevgilerimi iletirim.

Nevzat DAMLA
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Radyoaktiflik	5
1.2.1. Doğal Radyoaktiflik	5
1.2.2. Yapay Radyoaktiflik.....	6
1.2.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu	7
1.2.4. Peş Peşe Bozunma Kanunu	11
1.2.5. Radyoaktif Denge.....	13
1.2.5.1. Geçici Denge.....	13
1.2.5.2. Sürekli Denge	14
1.3. Aktivite ve Radyasyon Birimleri	14
1.3.1. Aktivite Birimleri	14
1.3.2. Işınlama Birimi.....	15
1.3.3. Soğurulmuş Doz	15
1.3.4. Eşdeğer Doz	15
1.4. Radyasyon ve Madde ile Etkileşmesi	16
1.4.1. Alfa Parçacıkları.....	17
1.4.2. Beta Parçacıkları.....	18
1.4.3. Gamma Işınları	19
1.4.3.1. Fotoelektrik Soğurma	20
1.4.3.2. Compton Saçılması	21
1.4.3.3. Çift Oluşumu.....	22
1.4.4. Soğurma.....	23

1.4.4.1. Lineer Soğurma Katsayısı.....	24
1.4.4.2. Kütle Soğurma Katsayısı	25
1.5. Gama Işını Dedektörleri.....	27
1.5.1.1. Yarıiletken Dedektörler	27
1.5.1.2. Sintilasyon Dedektörler	28
1.6. Türkiye’deki İnşaatlarda Kullanılan Temel Malzemeler.....	29
1.6.1. Gazlı Beton.....	29
1.6.2. Çimento	29
1.6.2.1. Portland Çimento (CEM I 42,5 R).....	30
1.6.2.2. Kompoze Çimento (CEM V/A).....	31
1.6.2.3. Portland Kompoze Çimento.....	31
1.6.2.4. Beyaz Portland Çimentosu (BPC)	32
1.6.2.5. Puzolanik Çimento (CEM IV /B-P).....	32
1.6.2.6. Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ)	32
1.6.3. Kum	32
1.6.4. Tuğla ve Kiremit	33
1.6.5. Mermer	34
1.6.6. Kireç	34
1.6.7. Alçı	35
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
2.1. Çalışma Alanı	36
2.2. Numunelerin Toplanması	37
2.3. Yapı Analizleri.....	37
2.4. Kimyasal Analizler	38
2.5. Radyoaktiflik Ölçümleri	39
2.5.1. Numunelerin Analize Hazırlanması	39
2.5.2. Deney Sistemi.....	39
2.5.3. Deneysel Yöntem	41
2.5.3.1. Enerji Kalibrasyonu	41
2.5.3.2. Verim Kalibrasyonu.....	43
2.5.4. Spektrumların Alınması	44
2.5.4.1. Pik Belirleme ve Değerlendirme.....	44
2.5.4.2. Aktivite Hesabı	45
2.6. Kütle Soğurma Katsayısı Ölçümleri	45

2.6.1.	Deney Sistemi.....	45
2.6.1.1.	Enerji Kalibrasyonu	47
3.	BULGULAR.....	49
3.1.	Yapısal Analiz.....	49
3.2.	Kimyasal Analiz	59
3.3.	Radyoaktiflik Ölçümleri	66
3.4.	Kütle Soğurma Katsayıları Ölçümleri	82
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	87
4.1.	EDXRF ve XRD Analiz Sonuçları	87
4.2.	Radyoaktiflik Sonuçları	88
4.2.1.	Radyum Eşdeğer Aktifliği.....	93
4.2.2.	Soğurulan Gama Doz Hızı (D).....	93
4.2.3.	Yıllık Etkin Doz	94
4.2.4.	Gama İndeksi (I_γ).....	94
4.2.5.	Alfa İndeksi (I_α)	94
4.3.	Kütle Soğurma Katsayılarının Sonuçları	100
4.4.	İstatistik Analiz	102
5.	ÖNERİLER.....	105
6.	KAYNAKLAR	106
7.	EKLER.....	111
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmanın amacı Türkiye’de inşaat malzemeleri olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerinin doğal radyoaktiflik seviyelerini ve kütle soğurma katsayılarını belirlemek ve böylece malzemelerin radyolojik tehlikelerini değerlendirmektir.

Türkiye’de inşaat malzemeleri olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerindeki doğal radyoaktif çekirdekler (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) gama spektrometresi kullanılarak ölçüldü. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırasıyla gazlı beton için 82, 28 ve 384 Bq/kg; çimento için 52, 40 ve 324 Bq/kg; kum için 44, 26 ve 441 Bq/kg; tuğla için 34, 34 ve 462 Bq/kg; kiremit için 34, 33 ve 429 Bq/kg; mermer için 23, 15 ve 149 Bq/kg; kireç için 38, 20 ve 56 Bq/kg; alçı için 17, 13 ve 70 Bq/kg olarak bulundu. Bu radyoaktif çekirdekler için ölçülen aktiflik konsantrasyonları diğer ülkeler için rapor edilen verilerle karşılaştırıldı. Gama (I_γ) ve alfa (I_α) indislerinin yanı sıra radyum eşdeğer aktiflikleri (R_{eq}), soğurulan doz oranları (D), yıllık etkin doz eşdeğerleri (YED) hesaplandı ve önerilen verilerle karşılaştırıldı. Ayrıca, bu malzemeler için kütle soğurma katsayıları deneysel olarak belirlendi ve teorik olarak hesaplandı. Deneysel kütle soğurma katsayısı değerleri, XCOM kullanılarak elde edilen teorik değerlerle karşılaştırıldı. Ayrıca, bu numunelerin kimyasal bileşimleri ve yapısal analizleri incelendi.

Anahtar Kelimeler: İnşaat malzemeleri, Radyoaktiflik, Kütle soğurma katsayıları, Kimyasal analiz, XRD, Türkiye.

SUMMARY

Determination of Natural Radioactivity Levels and Mass Attenuation Coefficients in Some Building Materials in Turkey

The objective of this study is to determine natural (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) radioactivity levels and mass attenuation coefficients and to assess the radiological hazard from these sample of gas concrete, cement, sand, brick roofing tile, marble, lime and gypsum samples used as building materials in Turkey.

Natural radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) in gas concrete, cement, sand, brick roofing tile, marble, lime and gypsum samples used as building materials in Turkey were measured by using gamma spectrometry. The average activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K were 82, 28 and 384 Bq/kg for gas concrete; 52, 40 and 324 Bq/kg for cement; 44, 26 and 441 Bq/kg for sand; 34, 34 and 462 Bq/kg for brick; 34, 33 and 429 Bq/kg for roofing tile; 23, 15 and 149 Bq/kg for marble; 38, 20 and 156 Bq/kg for lime and 17, 13 and 70 Bq/kg for gypsum, respectively. The measured activity concentrations for these radionuclides were compared with the reported data of other countries. The radium equivalent activities (Ra_{eq}), absorbed dose rates (D), annual effective dose rates (AED) as well as gamma (I_γ) and alpha (I_α) indices were calculated and compared with the recommended data. Moreover, the mass attenuation coefficients for these materials were determined experimentally and calculated theoretically. Experimental mass attenuation coefficient values were compared with theoretical values obtained by using XCOM. Also, chemical compositions and structural analysis of these samples were investigated.

Key Words: Building materials, Radioactivity, Mass attenuation coefficients, Chemical analysis, XRD, Turkey.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi	9
Şekil 2. Peş peşe bozunma grafiği	13
Şekil 3. Compton saçılmasında açılar için gösterim.....	22
Şekil 4. Çift oluşumu	22
Şekil 5. Elektromagnetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması	24
Şekil 6. Yarıiletken dedektör şeması	27
Şekil 7. Sintilasyon dedektörlerin şematik gösterimi	28
Şekil 8. Türkiye'nin Bölgesel Haritası	36
Şekil 9. Rigaku D/Max-IIIIC marka X-ışını difraktometresi.....	38
Şekil 10. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı	38
Şekil 11. Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü	39
Şekil 12. Gama spektrometre sisteminin blok diyagramı.....	40
Şekil 13. Enerji-Kanal grafiği.....	43
Şekil 14. Enerji-Verim eğrisi.....	44
Şekil 15. Soğurma ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin genel görünüşü	46
Şekil 16. Gama ışınları soğurma ölçümleri için kullanılan deney geometrisi.....	47
Şekil 17. Enerji-Kanal grafiği.....	48
Şekil 18. Gazlı beton numunelerinin X-ışını kırınım desenleri.....	49
Şekil 19. Çimento numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	50
Şekil 20. Kum numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	51
Şekil 21. Tuğla numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	52
Şekil 22. Kiremit numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	53
Şekil 23. Mermer numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	54
Şekil 24. Kireç numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	56
Şekil 25. Alçı numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	57
Şekil 26. Çimento numunelerinin radyoaktiflik haritaları.....	75
Şekil 27. Kum numunelerinin radyoaktiflik haritaları.....	76
Şekil 28. Tuğla numunelerinin radyoaktiflik haritaları	77
Şekil 29. Kiremit numunelerinin radyoaktiflik haritaları	78

Şekil 30. Mermer numunelerinin radyoaktiflik haritaları.....	79
Şekil 31. Kireç numunelerinin radyoaktiflik haritaları.....	80
Şekil 32. Alçı numunelerinin radyoaktiflik haritaları.....	81

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Doğada bilinen dört radyoaktif seri.....	6
Tablo 2. Yapay radyoaktif çekirdekler	7
Tablo 3. Bazı izotopların yarı-ömürleri	10
Tablo 4. Radyasyon ölçümü için nicelikler ve birimleri.....	16
Tablo 5. Toplanan numunelerin bölgelere göre dağılımı.....	37
Tablo 6. Standart kaynakların özellikleri	42
Tablo 7. Aktivitesi hesaplanan radyoaktif çekirdekler ve salma hızları	45
Tablo 8. X-Işını kırınım desenleriyle belirlenen mineraller	58
Tablo 9. Gazlı beton numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.....	59
Tablo 10. Çimento numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	60
Tablo 11. Kum numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	61
Tablo 12. Tuğla numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	62
Tablo 13. Kiremit numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	63
Tablo 14. Mermer numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	64
Tablo 15. Kireç numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	65
Tablo 16. Alçı numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	66
Tablo 17. Gazlı beton numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	67
Tablo 18. Çimento numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	68
Tablo 19. Kum numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	69
Tablo 20. Tuğla numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları	70
Tablo 21. Kiremit numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları	71
Tablo 22. Mermer numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	72
Tablo 23. Kireç numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	73
Tablo 24. Alçı numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları.....	74
Tablo 25. Gazlı beton numunelerindeki kütle soğurma katsayıları.....	82
Tablo 26. Çimento numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	83
Tablo 27. Kum numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	83
Tablo 28. Tuğla numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	84
Tablo 29. Kiremit numunelerindeki kütle soğurma katsayıları.....	84
Tablo 30. Mermer numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	85

Tablo 31. Kireç numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	85
Tablo 32. Alçı numunelerindeki kütle soğurma katsayıları	86
Tablo 33. Gazlı beton numunelerinin literatürdeki hafif betonlarla karşılaştırılması	88
Tablo 34. Çimento numunelerinin literatürle karşılaştırılması.....	89
Tablo 35. Kum numunelerinin literatürle karşılaştırılması	90
Tablo 36. Tuğla ve kiremit numunelerinin literatürle karşılaştırılması.....	91
Tablo 37. Mermer numunelerinin literatürle karşılaştırılması.....	92
Tablo 38. Kireç ve alçı numunelerinin literatürle karşılaştırılması.....	93
Table 39. Gazlı beton numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri	96
Tablo 40. Çimento numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri.....	97
Tablo 41. Kum numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri.....	97
Tablo 42. Tuğla numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri	98
Tablo 43. Kiremit numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri	98
Tablo 44. Mermer numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri.....	99
Tablo 45. Kireç numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri.....	99
Tablo 46. Alçı numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri.....	100
Tablo 47. Deneysel ve teorik kütle soğurma katsayılarının literatürle kıyaslanması.....	101
Tablo 48. İnşaat malzemelerin değişik enerjilerdeki % soğurma oranları	102
Tablo 49. Tek yönlü varyans analizi sonuçları.....	103
Tablo 50. Malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler arasındaki korelasyon katsayıları.....	104

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktiflik
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
D	: Soğrulan doz
EC	: European Commision
Gy	: Gray
KF	: Kalibrasyon faktörü
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı
N_0	: İntegrasyon sabiti
Sv	: Sievert
$T_{1/2}$: Yarı ömür
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
YED	: Yıllık etkin doz
Q	: Radyoaktif bozunma sonucu açığa çıkan enerji
λ	: Bozunma sabiti
τ	: Ortalama ömür

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanoğlu var oluşundan bu yana sürekli olarak radyasyonla iç içe yaşamak zorunda kalmıştır. Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan çok uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif çekirdekler yaşadığımız çevrede normal ve kaçınılmaz olarak kabul edilen doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmuşlardır. Doğal radyasyonlar, Güneş'ten, yıldızlardan gelen kozmik ışınlar ile yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar dolayısıyla toprak ve yapı (inşaat) malzemeleri, su ve gıdalar gibi doğal kaynaklardan yayınlanan radyasyonlardan gelmektedir.

Doğal radyasyonlarla ışınlanma, bazı insan aktiviteleri ile de artmaktadır. Mesela; uçak yolculukları, inşaat yapımında kullanılan tuğla, kum, çimento gibi malzemelerdeki doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarının yüksek olması, evlerin iyi havalandırılmaması gibi durumlar ilave doz alınmasına sebep olmaktadır. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi doğal radyoaktif çekirdeklerin birim kütle başına aktiflik konsantrasyonları toprak ve kaya tiplerine göre değişir. Doğal radyoaktif çekirdekler özellikle granit, volkanik, fosfat ve tuz kayalarında yüksek yoğunlukta bulunmaktadır. Bunun yanında en düşük radyoaktiflik konsantrasyonu kireç kayalarında bulunmaktadır. Başkalaşım kayaları ise oluştukları kayaların konsantrasyonuna sahiptirler.

Çevresel radyasyon ölçümlerinin temel amacı, insanların çevresel kaynaklardan aldıkları radyasyon dozunun belirlenmesi ve oluşturabileceği sağlık riskinin değerlendirilmesidir. Bunun için doğal radyasyon kaynaklarını oluşturan radyoaktif çekirdeklerin çevresel ortamdaki konsantrasyonları ve insanların maruz kaldıkları toplam radyasyon dozuna bunların katkıları ölçülmelidir. Ayrıca çevresel ortamda bulunan radyoaktif çekirdekler ile insanların bu kaynaklardan aldıkları radyasyon dozu arasındaki ilişkinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu tür sistematik araştırmalar sonucu, bir bölgenin doğal radyasyonunun çevre yönünden sağlıklı ve yaşama uygun olup olmadığına karar verilebilir.

Inşaat malzemelerinde yüksek oranda doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonları, hem iç hem de dış maruziyetlerden kaynaklanan bina içi yüksek doz oranları ile sonuçlanmaktadır. Dış doz, inşaat malzemelerinde bulunan radyoaktif çekirdeklerden

yayılan gamma ışınlarından kaynaklanırken iç doz, inşaat malzemelerinden çıkan radon ve thoron solumaktan kaynaklanmaktadır.

Bina içi radyasyon düzeylerine katkılar ve buna bağlı olarak maruz kalınacak dozlar konusunda yapılacak araştırmalar için, ilk önce bina materyallerindeki radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarının belirlenmesi gerekir. Doz oranları ve radyoaktif çekirdek bileşenleri arasında çok çeşitli ilişkiler söz konusudur. Bu ilişkiler literatürde birçok çalışmada incelenmiştir. Toplam doz oranları uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları temel alınarak hesaplanmıştır.

Literatürlerde, bu amaçla yapılmış birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu tür çalışmaların bazıları belli bir bölgeye, bazıları da bu çalışmada olduğu gibi belli bir ülkeye has yapılmış çalışmalardır.

J. Al-Jundi ve arkadaşları, Ürdün'deki yapı malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarını sırayla 42, 13 ve 39 Bq/kg bulmuşlardır (Al-Jundi vd., 2005).

N.P. Petropoulos ve arkadaşları, Yunanistan'daki yapı malzemelerindeki doğal radyoaktifliği ve soğurma katsayılarını belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonların aralığını beyaz çimento için sırayla 14–26, 7–13 ve 5–67 Bq/kg, siyah çimento için 29–147, 13–30 ve 172–331 Bq/kg, uçucu kül için 273–1377, 41–65 ve 143–663 Bq/kg olarak tespit etmişler ve ayrıca bu malzemelerin soğurma katsayılarını tayin etmişlerdir (Petropoulos vd., 2002).

V. Kumar ve arkadaşları, Hindistan'daki inşaat malzemeleri ve inşaat malzemelerinde atık olarak kullanılan ürünlerin doğal radyoaktifliklerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarını toprak için sırayla 43, 61 ve 436 Bq/kg, kum için 44, 64 ve 456 Bq/kg, portland çimento için 37, 24 ve 432 Bq/kg, uçucu kül için 45, 40 ve 88 Bq/kg ve cüruf için 67, 78 ve 145 Bq/kg olarak bulmuşlardır (Kumar vd., 1999).

N.K. Ahmed, Mısırın Qena şehrindeki binalarda kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin ortalama aktiflik konsantrasyonlarını alçı taşı için 105, 45 ve 500 Bq/kg, kireçli tuğla için 132, 45 ve 306 Bq/kg, beyaz çimento için 72, 46 ve 250 Bq/kg, portland çimento için 134, 88 ve 416 Bq/kg, granit için 187, 118 ve 852 Bq/kg, mermer için 205, 115 ve 865 Bq/kg, killi tuğla için 33, 37 ve 511 Bq/kg olarak tespit etmiştir (Ahmed, 2005).

K. Kovler ve arkadaşları, İsrail'deki inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarını belirleyerek iç ve dış tehlike indekslerini, doz hızlarını ve yıllık efektif dozları tayin etmişlerdir (Kovler vd., 2002).

K. Khan ve H. M. Khan, Pakistan'daki çimentolardaki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin ortalama aktiflik konsantrasyonlarını sırayla 26, 29 ve 273 Bq/kg olarak bulmuşlardır (Khan ve Khan, 2001).

S. Roy ve arkadaşları, Bangladeş'teki Dhaka şehri ve civarında kullanılan bazı inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonların aralığını çimento numuneleri için sırayla 41–118, 63–113 ve 956–1350 Bq/kg, kum numuneleri için 39–72, 90–243 ve 1558–1624 Bq/kg olarak tespit etmişlerdir (Roy vd., 2005).

S. Righi ve L. Bruzzi, İtalya'daki evlerde kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktifliği ve radon solunumunu belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada binalarda yaygın olarak kullanılan 42 numuneyi incelemişlerdir. Avrupa komisyonu tarafından kullanılan ve tanımlanan dış ve iç tehlike indekslerini hesaplamışlar ve spesifik radon solunumunu ve yaymasını ölçmüşlerdir (Righi ve Bruzzi, 2006).

N. Hizem ve arkadaşları, Tunus evlerinde kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada 17 çeşit yapı malzemesini analiz etmişlerdir. ^{226}Ra ve ^{232}Th radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarının 40 Bq/kg'ı aşmadığı fakat ^{40}K radyoaktif çekirdeğinin aktiflik konsantrasyonunun aralığını 50–1215 Bq/kg olduğunu bularak yıllık efektif doz oranlarının aralığını 0,07-0,86 mSv/yıl olarak hesaplamışlardır (Hizem vd., 2005).

O. Brigido Flores ve arkadaşları, Küba'daki bazı yapı malzemelerindeki ve bunların ev içi gama doz oranına katkısını incelemek için yaptıkları çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin ortalama aktiflik konsantrasyonlarını çimento için 23, 11 ve 467 Bq/kg, beton için 25, 12 ve 595 Bq/kg, tuğla için 57, 12 ve 785 Bq/kg, kum için 17, 16 ve 188 Bq/kg, beyaz çimento için 45, 22 ve 99 Bq/kg olarak bularak soğurulan doz oranını ortalama olarak 63,6 nGy/saat ve yıllık efektif doz oranını 188 μSv /yıl olarak hesaplamışlardır (Brigidio Flores vd., 2004).

D. Armani ve M. Tahtat, Cezayir'deki inşaat malzemelerinde doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada inşaat malzemelerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K

radioaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarını belirleyerek Avrupa komisyonu tarafında önerilen iç ve dış tehlike indeksleri ve yıllık efektif dozlarını belirlemiştir (Amrani ve Tahtat, 2001).

I.C.P. Salinas ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Brezilya'daki bazı inşaat malzemelerinin kütle soğurma katsayılarını tayin etmişlerdir (Salinas vd., 2006).

J. Somlai ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Macaristan'ın Transdanubian bölgesindeki yapı malzemelerinde kullanılan kömür cürüflardaki radyasyon dozlarını tayin etmişlerdir (Somlai vd., 2005).

M.N. Alam ve arkadaşları, Bangladeş'teki bazı bina materyallerinde 276–1332 keV enerjileri arasında soğurma katsayılarını tayin etmişlerdir (Alam vd., 2001).

C. Singh ve arkadaşları, yapı malzemelerinin kütle soğurma katsayılarının enerji ve kimyasal bileşime bağımlılığını tayin etmişlerdir (Singh vd., 2004).

Lu Xinwei, Çin'nin Shaanxi eyaletinden toplatılan çimento ve ürünlerindeki radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada çimento ve ürünlerindeki Ra_{eq} değerinin 370 Bq/kg' ı aşmadığını tespit etmiştir (Xinwei, 2005).

Lu Xinwei, Çin'nin Xi'an eyaletindeki bazı inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktifliği belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada numunelerdeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonlarının sırayla 20–68 Bq/kg, 13–52 Bq/kg ve 63–714 Bq/kg arasında değiştiğini bulmuştur (Xinwei, 2005).

A.O. Mustapha ve arkadaşları, Kenya'daki bazı inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktifliği ölçerek bunların ev içi doz oranlarına katkısını hesaplamışlardır (Mustapha vd., 1997).

S. M. El-Bahi, Mısır'daki çimentolardaki doğal radyoaktiflik seviyeleri ve radon soluma oranlarını tayin etmiştir (El-Bahi, 2004).

A. Kumar ve arkadaşları, Hindistan'da yaptıkları çalışmada seçilen inşaat malzemelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin konsantrasyon aralıklarını sırayla 3 – 152 Bq/kg, 14-64 Bq/kg ve 24-122 Bq/kg olarak tespit etmişlerdir (Kumar vd., 1999).

M. Ngachin ve arkadaşları, Kamerun'daki bazı bina malzemelerinin doğal radyoaktifliğini ölçerek, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktiflik konsantrasyonların aralığını sırayla 2–50, 1–147 ve 18–1226 Bq/kg olarak tespit etmişlerdir (Ngachin vd., 2007).

M.I. Awadallah ve M.M.A. Imran, Ürdün’de kullanılan bazı inşaat malzemelerindeki gama soğurma oranlarını tayin etmişlerdir (Awadallah ve İmran, 2007)

1.2. Radyoaktiflik

Çekirdek fiziğinde çok önemli gelişmelere yol açan radyoaktiflik, 1895 yılında Wilhelm Röntgen’in X-ışınlarını bulmasından sonra, 1896 yılında Henry Becquerel tarafından uranyumun gözle görülmeyen ışınlar yaydığını belirlemesiyle keşfedildi. Daha sonraki yıllarda Curie ve diğer bilim adamları tarafından yapılan klasik çalışmalar, bu alanda yapılan yeni gelişmelere zemin hazırladı.

Kararsız atom çekirdeklerinin dışardan enerji almadan kendiliğinden bozunuma uğrayarak bazı ışınlar yayınlayıp niteliğini değiştirerek başka bir çekirdeğe dönüşmesi olayına radyoaktiflik denir. Bir başka ifadeyle radyoaktiflik, kararsız atom çekirdeğinin kararlı duruma geçebilmek için çeşitli ışın veya parçacık yayması olayıdır. Doğal ve yapay olmak üzere iki tip radyoaktiflik mevcuttur.

1.2.1. Doğal Radyoaktiflik

Bozunuma uğrayan çekirdek (izotop) doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunumu sonrası ortaya çıkıyorsa buna doğal radyoaktiflik denir. Çekirdek yapısının açıklanmasında, yaş hesaplarında, sediment oluşum oranlarının tespiti gibi farklı alanlarda doğal radyoaktiflikten faydalanılır. Çevrenin doğal radyoaktiflik seviyesinin bilinmesi, nükleer kaza esnasında o bölgenin hangi oranlarda kirlendiğinin tespiti açısından önemlidir. Doğada bilinen radyoaktif çekirdek sayısı 340 civarındadır. Doğal radyoaktif özellikler taşıyan elementler, periyodik cetvelin atom numaraları $Z=81-92$ arasında kalan bölgesini kaplarlar. Doğal radyoaktif elementler genel olarak kara ve uzay kökenli olmak üzere iki ana grupta toplanırlar.

Kara kökenli radyoaktif çekirdekler; Uranyum serisi (^{238}U), Toryum serisi (^{232}Th), Aktinyum serisi (^{235}U), Tek izotoplu radyoaktif çekirdekler (^{40}K , ^{87}Rb , ^{147}Sm v.s.) ve Neptünyum serisi (^{241}Pu). Bu serinin halen bilinen tek izotopu ^{209}Bi ’dur. Tablo 1’de dört seriye ait bazı temel özellikler verilmektedir. Tarihsel sıralama söz konusu olduğunda en son keşfedilen seri Neptünyum serisidir. Bozunma zinciri sonucunda yukarıdaki kararsız çekirdeklerden Uranyum, Toryum ve Aktinyum sırasıyla kurşunun kararlı olan

$^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$, ve $^{207}_{82}\text{Pb}$ çekirdeklerine ulaşırken Neptünyum kararlı en ağır çekirdek olan $^{209}_{83}\text{Bi}$ bizmuta dönüşür. Ek-1, Ek-2 ve Ek-3'te sırasıyla Uranyum, Toryum ve Aktinyum bozunma şeması verilmektedir. Neptünyum serisinin en uzun ömürlü üyesinin yarı ömrü diğerlerinininkine nazaran Dünya'nın oluşumundan bu yana geçen süreye göre çok kısa olduğundan bu seri doğal maddelerde gözlenmez (Krane, 2001) .

Tablo 1. Doğada bilinen dört radyoaktif seri

Seri Adı	Türü	Son Çekirdek	Ana Çekirdek	Yarı Ömür (yıl)
Toryum	4n	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41.10^{10}$
Neptünyum	4n+1	$^{209}_{83}\text{Bi}$	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2,14.10^6$
Uranyum	4n+2	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,47.10^9$
Aktinyum	4n+3	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,04.10^8$

Uzay kökenli radyoaktif çekirdekler; kozmik ışınlar ve yüklü parçacıklardır. Kozmik ışınlar veya yüklü parçacıklar, dünya atmosferine girdiklerinde ortamda bulunan (azot, oksijen, argon, v.b.) gazlarla nükleer reaksiyonlara girerek nötron, proton, muon ve kaonların yanı sıra dozimetrik açıdan önemli olan kozmojenik ^{14}C , ^3He , ^7Be , ^{22}Na gibi radyoaktif çekirdekleri üretirler. Güneş ve yıldızlardan kaynaklanan yüksek enerjili kozmik ışınlar, daha çok (% 93) hızlı protonlardan ve daha az da (% 6,3) alfalardan ve bir miktar da trityum ve karbon-14 çekirdeklerinden oluşuyor. Uzaydan gelen kozmik ışınlar birincil kozmik ışınlar, atmosferdeki reaksiyonlar sonucu üretilen ışınlar (nötron, proton, pion, kaon, mezon) *ikincil kozmik ışınlar*, reaksiyon ürünü olan, ^{14}C , ^3He , ^7Be ve ^{22}Na gibi radyoaktif çekirdeklere de kozmojenik radyoaktif çekirdekler denilir. Güneşten dünyaya sürekli olarak 1 keV'lik enerjilerde partiküller gelmektedir. Bu parçacıkların çok az bir kısmı yer seviyesine kadar ulaşabilirler.

1.2.2. Yapay Radyoaktiflik

Nükleer reaktör veya hızlandırıcılarda üretilen bir radyoizotopun bozunuma uğraması olayıdır. Gelişmiş endüstriyel ekonomilerin ve yüksek yaşam standartlarının, doğada mevcut olmayan bazı radyasyon kaynakları kullanılmadan süreklilik gösterebileceğini düşünmek şimdilik pek mümkün gözükmemektedir. İşte bu yüzden

insanoğlu, teknolojik gelişiminin gereği olarak, bazı radyasyon kaynaklarını yapay yollarla üretme ihtiyacı duymuştur. Bu kaynaklar, bir çok işin daha iyi, daha kolay, daha çabuk, daha ucuz ve basit yapılmasına olanak sağlar (URL-1).

Son yüzyılda tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan X-ışınları ve yapay radyoaktif maddeler, nükleer silah denemeleri sonucu meydana gelen nükleer serpintiler, çok az da olsa nükleer güç üretiminden salınan radyoaktif maddeler ile bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler vasıtasıyla doğal radyasyon düzeylerinde artışlar olmuştur.

Başlıca yapay radyoaktif çekirdekler Tablo 2’de verilmiştir. Doğal radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyondan alınan doz, yapay radyoaktif çekirdeklerden alınan radyasyon dozuna oranla insanlar tarafından daha yüksek olmasına rağmen, insan yapımı radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyon, yaydıkları radyasyon türü gereği daha fazla endişeye yol açarlar.

Tablo 2. Yapay radyoaktif çekirdekler

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayılan Radyasyon
⁶⁰ Co	5.3 (yıl)	β, γ
⁶⁵ Zn	244 (gün)	γ
⁹⁰ Sr	29 (yıl)	β
⁹⁰ Y	64 (saat)	β
¹²⁵ I	60 (gün)	X
¹³¹ I	8 (gün)	β, γ
¹³⁴ Cs	2,1 (yıl)	β, γ
¹³⁷ Cs	30 (yıl)	β, γ
¹⁵⁵ Eu	4,96 (yıl)	β, γ
²³⁸ Pu	87,7 (yıl)	α
²³⁹ Pu	2,4.10 ² (yıl)	α,γ
²⁴⁰ Pu	6,5x10 ³ (yıl)	α
²⁴¹ Pu	14,4 (yıl)	β

1.2.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Tabiatta atom çekirdeklerinin bir kısmı kararlı, diğer bir kısmı da kararsızdır. Kararsız çekirdek, taşıdıkları fazla enerjiyi parçacık çıkarmak veya ışımaya yapmak suretiyle

atarlar. Çekirdeğin böyle kendi kendine parçacık çıkararak başka izotopa veya aynı izotopun başka bir durumuna dönüşmesi olayına *radyoaktif bozunma* denir.

Bazı radyoaktif atomların kendi kendine bozunması zamandan bağımsızdır. Tamamıyla tesadüfî bir karakter gösterir. Bozunma sayısı, sadece mevcut atom sayısı ile orantılıdır ve zaman birimindeki ortalama bozunma sayısından bahsedilir.

Radyoaktifliğin keşfedildiği 1896 yılını izleyen üç yılda yapılan deneylerde, saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel kanuna uyduğu gösterilmiştir. Radyoaktifliğin tüm numunede değil de tek tek atomlarda değişikliği temsil ettiğinin anlaşılması için daha birçok yılın geçmesi gerekmiştir. Bozunmanın istatistiksel yapıda olduğunun, yani herhangi bir atomun ne zaman bozunacağıının bilinmemesi ve bu hipotezin doğrudan üstel kanuna uyduğunun anlaşılması ise iki yıl almıştır. Kuantum teorisinin gelişmesinden önce, bu durumun kabul edilmesi oldukça zor olmuştur (Krane, 2001).

Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı çekirdeğin *bozunma hızı* veya *aktivitesi* olarak tanımlanır. Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozulan çekirdek sayısı N ile orantılı olacaktır.

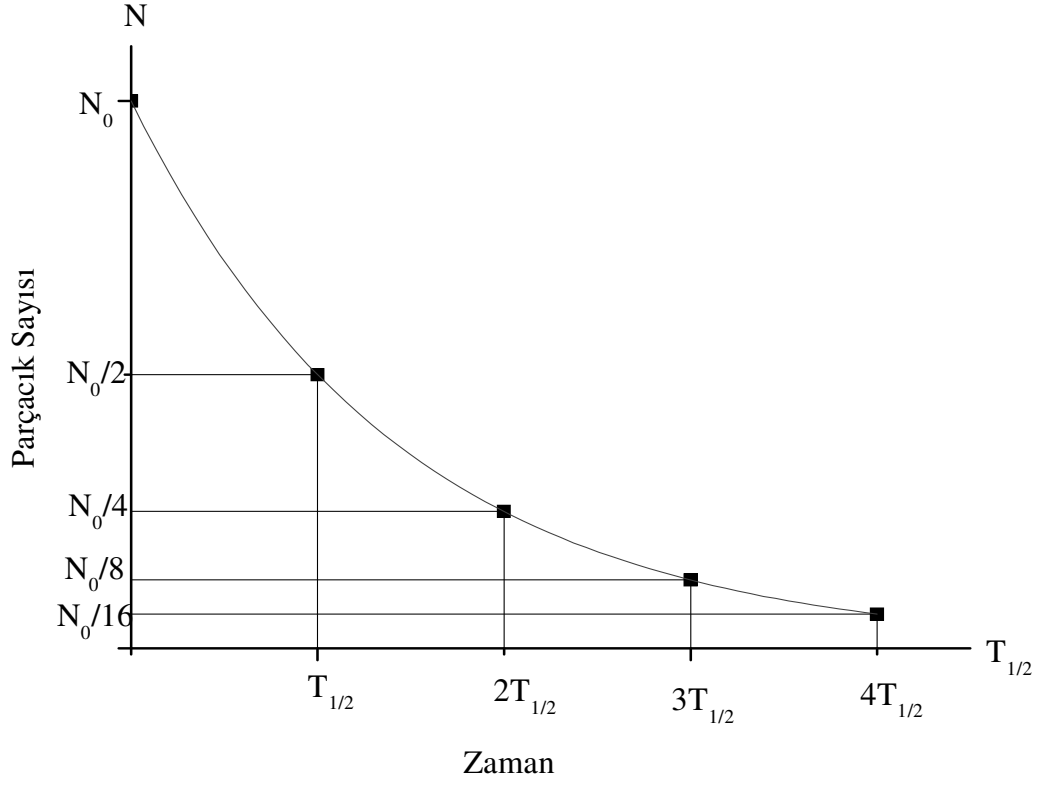
$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (1)$$

Eksi işareti zamanla radyoaktif atomların azaldığını gösteriyor. Denklem çözülerek radyoaktif üstel bozunma yasası elde edilir.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \longrightarrow \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda dt \longrightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Denklemden N(t), t zamanı sonunda arta kalan çekirdek sayısını, N₀ başlangıçtaki (t=0 iken) çekirdek sayısını ve λ radyoaktif numunenin *bozunma sabitini* gösterir ve birimi s⁻¹ dir.

Şekil 1’de bir radyoaktif çekirdeğin üstel bozunma denklemine ait çekirdek sayısı değişimi vermektedir.



Şekil 1. Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi

Radyoaktif maddelerle ilgili önemli diğer karakteristik değerde yarı-ömür dür. Radyoizotopların sahip oldukları kararsız atom sayılarının yarıya inmesi için geçmesi gereken süreye yarılanma süresi (yarı ömür) denir ve $T_{1/2}$ ile gösterilir. Her izotopun kendine özgü bir yarı ömrü vardır ve bu süre saniyeler kadar kısa veya milyarca yıl gibi uzun olabilmektedir. Tablo 3’de bazı izotoplara ilişkin yarı-ömür ve radyasyon türleri verilmiştir. Radyoaktif bir maddenin birim zamandaki parçalanma sayısı, o andaki mevcut atom sayısı ile orantılıdır. Yarı-ömürü tayin etmek için denklem 2’de $N = \frac{N_0}{2}$ olarak alınır;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \longrightarrow e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \longrightarrow T_{1/2} = -\frac{0,693}{\lambda} \quad (3)$$

elde edilir.

Tablo 3. Bazı izotopların yarı-ömürleri

İzotop	Yarı-Ömür	Radyoaktivlik Türü
^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10}$ yıl	α, γ
^{238}U	$4,5 \cdot 10^{10}$ yıl	α, γ
^{226}Ra	1620 yıl	α, γ
^{222}Rn	3,82 gün	α
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ yıl	β, γ
^{137}Cs	30 yıl	β, γ

Bozunmanın üstel ifadesi, radyoaktif atomların sayısının sıfır olması için sonsuz zaman olması gerektiğini gösterir. Radyoaktivitenin istatistiksel karakteri nedeni ile radyoaktif bir atomun ömrü, sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değer olabilir. Buna göre bir atomun ne kadar yaşayacağı bilinmez, ancak bir grup atomun ortalama ömründen söz edilebilir. Bu nedenle radyoaktif atomlar için yarı ömürden farklı bir tanım verilir.

τ ortalama ömür de bir çekirdeğin bozununcaya kadar geçirdiği ortalama süre olarak tanımlanır. t_1, t_2 ömürlerine sahip atomların sayıları sırası ile $dN_1(t), dN_2(t) \dots$ ise ortalama ömür aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\tau = \frac{t_1 dN_1(t) + t_2 dN_2(t) + \dots}{dN_1(t) + dN_2(t) + \dots} = \frac{t dN(t)}{dN(t)} \quad (4)$$

Burada ($dN \rightarrow 0$) için

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{\int_0^{N_0} dN(t)} = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{N_0} \quad (5)$$

denklem 2'deki $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ bağıntısı yerine konursa

$$\tau = -\lambda \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

elde edilir.

1.2.4. Peş Peşe Bozunma Kanunu

Hem doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplarda hem de yapay olarak meydana getirilen radyoaktif izotoplarda bozunma peş peşe bozunmalar şeklinde meydana gelebilir. Ana radyoaktif element başka bir ürüne bozunur. Eğer bu üründe radyoaktif ise bu da başka bir elemente bozunur. Birçok durumda bu peş peşe bozunma ana maddenin ürüne ve ürününde kararlı bir elemente bozunmasıyla sınırlıdır. Şayet işe radyoaktif ana izotopun belli sayıda atomlarıyla başlanmışsa verilen herhangi bir anda bozunma ürünün atomlarının sayısı ne olacaktır. Bu sayılar şu şekilde hesaplanabilir. Herhangi bir t anında, λ_1 bozunma katsayısıyla ürüne bozunacak ana elementin atomlarının sayısı N_1 olsun. Ürün elementin atomlarının sayısını N_2 ile gösterelim. Bunlar da λ_2 bozunma katsayısı ile başka bir elemente bozunacaktır. Bu kararlı elementteki atomların sayısı is N_3 olsun. Ayrıca, $t = 0$ iken $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20}$, $N_3 = N_{30}$ olduğunu farz edelim. Aktifliğin saniyede bozunma sayısı şeklindeki tanımından;

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (7)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (8)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (9)$$

7 bağıntısı N_1 'in bozunma hızını verir. 8 bağıntısı N_2 tipindeki atomların $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretildiklerini ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla gözden kaybolduklarını göstermektedir. 9 bağıntısı N_3 atomlarının üretim hızı elde edilir.

7 denkleminde $t = 0$ da $N_1 = N_{10}$ integrali alınırsa

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (10)$$

elde edilir. N_1 'in bu değeri denklem 8 de yerine konulursa

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (11)$$

olur. Bu bağıntının iki tarafı $e^{-\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa

$$\frac{d}{dt}(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (12)$$

bulunur. Gerekli işlemler yapılırsa

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (13)$$

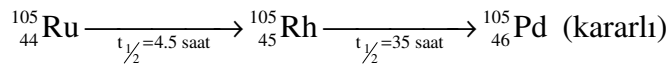
elde edilir. Benzer şekilde 9 bağıntısı $t=0$ 'da $N_3 = N_{30} = 0$ şartıyla çözümlerse

$$N_3 = N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (14)$$

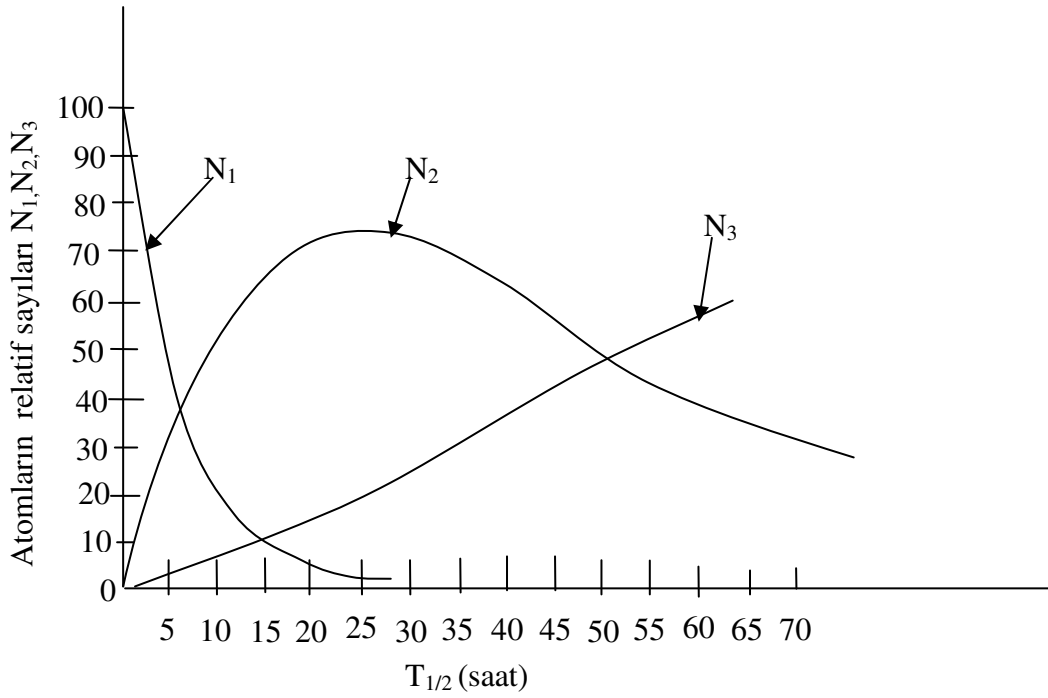
elde edilir. 10, 13, 14 eşitlikleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan atomların sayısı bulunabilir. Bu eşitlikler, $t=0$ da $N_1 = N_{10}$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ özel durumları için üretildi.

Bundan sonra N_{20} ve N_{30} , $t=0$ iken sıfır olmasalar bile N_1, N_2 ve N_3 için bağıntılar üretmek mümkündür.

10, 13, 14 bağıntılarının nasıl kullanılacağına örnek olarak



verilebilir. $t=0$ iken $N_{10} = 100$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ şartları altında başlayan bu ${}^{105}_{44}\text{Ru}$ bozunmasıyla oluşan N_1, N_2 ve N_3 'ün t 'ye göre değişimi Şekil 2'de verilmektedir (Arya, 1999).



Şekil 2. Peş peşe bozunma grafiği

1.2.5. Radyoaktif Denge

1.2.5.1. Geçici Denge

Bir ana çekirdeğin λ_1 bozunma sabitiyle birinci ürüne bozunduğunu ve bunun da λ_2 sabitiyle bozunduğunu düşünelim. Eşitlik 13,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (15)$$

ifadesinde $\lambda_2 < \lambda_1$ olduğunda yeterli derecede uzun bir zaman sonunda $e^{-\lambda_1 t}$ terimi $e^{-\lambda_2 t}$ 'ye göre ihmal edilebilir olacağından,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \quad (16)$$

elde edilir. Bu ise belli bir zamandan sonra birinci ürün elementinin kendisi için belirlenmiş olan λ_2 bozunma sabitiyle bozunacağı anlamına gelir.

1.2.5.2. Sürekli Denge

Denklem 12’te $\lambda_1 \ll \lambda_2$ durumunu ele alalım. $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ ve $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ yazabiliriz. Böylece bu ifade,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (17)$$

olarak elde edilir. Ürün çekirdeğin miktarı, zamanın artmasıyla $e^{-\lambda_2 t}$ terimi sıfıra gideceğinden bir denge durumuna yaklaşır ve denge durumunda,

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_2 \quad (18)$$

elde edilir. λ_1 çok küçük olduğundan $\lambda_1 N_1 \approx 0$ olacaktır. Buradan ana çekirdeğin çok büyük yarı ömre sahip olduğu anlaşılır.

1.3. Aktivite ve Radyasyon Birimleri

1.3.1. Aktivite Birimleri

Aktivite birimi Becquerel olup saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarı olarak tanımlanmaktadır. Eskiden kullanılan aktivite birimi Curie’dir. Herhangi bir radyoaktif madde miktarı eğer saniyede $3,7 \cdot 10^{10}$ bozunma hızına sahipse aktivitesi 1 Curie olarak tanımlanmaktadır.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ parçalanma/saniye}$$

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

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci'dir}$$

1.3.2. Işınlama Birimi

Işınlama dozu olarak tarif edilen Coulomb/kg (C/kg) normal şartlar altında 0 °C ve 760 mm Hg basıncında havanın 1 kg'ında 1 Coulomb'luk elektrik yükü değerinde pozitif negatif iyonlar oluşturan X veya γ radyasyonu miktarıdır. 1 C/kg=3876 R(Röntgen) veya 1 R=2.5x10⁻⁴ C/kg dır.

1.3.3. Soğurulmuş Doz

Radyasyonlarla ışınlanan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisidir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi Gray (Gy) olup, Gray, 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule (J)'lük enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyonun dozudur. Eski özel birimi rad olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurma eşdeğeridir.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J.kg}^{-1} = 100 \text{ erg.g}^{-1}$$

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

1.3.4. Eşdeğer Doz

Radyasyonun biyolojik etkileri göz önünde bulundurularak tanımlanan birim rem'dir. Doku ve organlarda, birim kütlede soğurulan enerji miktarlarıyla orantılı bir değerdir. Vücut için eşdeğer doz olarak tanımlanır. SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi Sievert (Sv)'dir.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

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

Radyasyonun şiddetinin tanımlanmasında yalnız bozunma hızının (aktiflik) sayılması veya yaşayan sistemlerdeki etkisinin (doz eşdeğeri) ölçülmesinden hangisini isteyeceğimize bağlı olarak birçok farklı yol vardır. Tablo 4'te bu değişik ölçümler ile bu ölçümlerin ifade edildiği geleneksel ve SI birimlerinin bir özeti verilmiştir.

Tablo 4. Radyasyon ölçümü için nicelikler ve birimleri

Nicelik	Ölçüm	Geleneksel Birim	SI Birimi
Aktiflik (A)	Bozunma hızı	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)
Doz (X)	Havadaki iyonlaşma	Röntgen (R)	Kilogram başına Coulomb (C/kg)
Soğurulan doz (D)	Enerji soğurulması	Rad	Gray (Gy)
Doz eşdeğeri (DE)	Biyolojik etkinlik	Rem	Sievert (Sv)

1.4. Radyasyon ve Madde ile Etkileşmesi

Radyasyonu ortamda yol alan enerji olarak da tanımlamak mümkündür. Bu tanım kapsamında doğal ya da radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromagnetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri de “Radyasyon ” olarak adlandırılır.

Radyasyonu temel olarak iki şekilde sınıflandırabiliriz. Bunlar “Parçacık” ve “Dalga” tipi radyasyonlardır. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden minik parçacıkları ifade eder. Bunlar hareketli mermilere benzerler, ancak gözle görülemeyecek kadar küçüktürler. Dalga tipi radyasyon; belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyon çeşididir. Bunlar, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgalarıdır. Görünür ışık dalga tipi radyasyonun bir çeşididir (URL-1).

Gözlerimizin fark edebileceği en yüksek enerjili ışık mor renkli ışıktır. Radyasyonun enerjisi arttıkça ışık mor renk ötesine gider ve mor ötesi olarak adlandırılır. Mor ötesi ışığı göremez veya hissedemeyiz, ancak mevcuttur ve eğer şiddeti büyükse ciltte bırakacağı güneş yanığına benzer yanık izleri ile varlığı hissedilebilir. Parçacık ve dalga tipi radyasyonları da iki gruba ayırmamız mümkündür. Bunlar iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır. İyonlaştırıcı radyasyonlar, radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucunda, madde içerisinde iyonizasyon oluşturan radyasyonlardır. Birçok radyasyon tipi bu gruba girmektedir. Örnek olarak alfa parçacıkları, beta parçacıkları, nötronlar, X ve gama ışınlarıdır. Bu radyasyon tiplerinden elektrik yüklü olanlar madde ile etkileşmeleri sırasında doğrudan iyonizasyona neden olmaktadır. Bu nedenle de bu tip radyasyonlara “doğrudan iyonlaştırıcı radyasyonlar” denir. Bir de elektrik yüklü olmadıkları halde madde

içinde iyonizasyona neden olan radyasyon çeşitleri vardır. Bunlara ise “dolaylı iyonlaştırıcı radyasyonlar” adı verilmektedir. Bu tip radyasyonlar arasında nötronlar, X ışınları ve gama ışınları sayılabilir.

Son yıllardaki teknoloji alanındaki hızlı gelişime paralel olarak sanayi, tıp, nükleer reaktörler gibi nükleer teknolojilerin kullanıldığı alanlardaki uygulamalar göz önüne alındığında ortaya çıkması muhtemel olan bu fotonların zırhlanmasının çok önemli olduğu görülmektedir.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar ise radyasyon karakteri göstermekle birlikte madde ile etkileşmesi sırasında maddeyi iyonize etmeyen radyasyon çeşitleridir. Bunlar arasında kızıl ötesi ışınlar ve görünür ışınlar sayılabilirler.

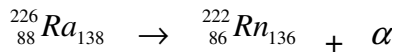
1.4.1. Alfa Parçacıkları

Alfa ışınları parçacık radyasyonlardır ve esas itibarıyla, Helyum çekirdeği olup enerjileri 3–5 MeV arasında değişen pozitif yüklü parçacıklardır. Bir başka deyişle her alfa, parçacığı, 2 proton ve 2 nötrondan oluşmaktadır.

Alfa bozunması işleminde ana çekirdek iki proton ve iki nötron kaybederek kütlesi dört birim, yükü ise iki birim azalır. Bu işlem



bağıntısı ile temsil edilebilir. Burada, X ana çekirdeği, Y ürün çekirdeği, A çekirdeğin kütle numarasını, Z atom numarasını göstermektedir. α bozunumuna bir örnek,



dır. Burada ${}^{226}Ra$ 'nın yarı-ömürü 1620 yıldır ve α parçacığının kinetik enerjisi yaklaşık 4,8 MeV' dir

Alfa tanecikleri, pozitif yüklü iki proton ve iki nötrondan meydana geldikleri için bir elektrona yaklaştıklarında, aralarında kuvvetli bir elektrostatik çekim kuvveti meydana gelir. Bu taneciklerin kütlesi yaklaşık olarak elektronunkinin 8000 katı kadardır. Hızları $1,6 \cdot 10^7$ m/s mertebesindedir. Enerjilerini esnek ve esnek olmayan çarpışmalarla kaybederler. Alfa tanecikleri çoğunlukla, içinden geçtikleri ortamdaki atomların

elektronlarıyla etkileşim yaptıkları için geçtikleri yol üzerinde birçok iyon çifti oluştururlar (Bilge, 1985). +2 elektrik yüklerinden dolayı madde içinden geçerken kuvvetle iyonizasyona neden olurlar. Havada her seferinde 32,5 eV vererek bir ‘‘iyon çifti’’ oluştururlar. Bir başka deyişle ortamdaki atomlardan negatif yüklü elektronları koparıp atomlar arası uzaya çıkmalarına neden olarak sonuçta atomları pozitif ve negatif elektrik yüklü kısımlara ayırtmış olurlar.

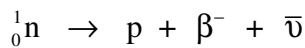
Alfa taneciklerinin enerjileri bu şekilde tümüyle soğurur. Alfa parçacıklarının kütlesi ağır olduğundan madde içindeki menzili kısadır. Bu tanecikleri bir kağıtla bile durdurmak mümkündür. Derinin yüzey tabakasından ancak geçebilir. Solunum veya sindirim gibi herhangi bir yolla vücut içine girmedikleri sürece, etkileri sadece yüzeyseldir.

1.4.2. Beta Parçacıkları

Beta ışınları, karasız atom çekirdeklerinden yayınlanan yüksek enerjili elektronlardır. Karasız çekirdeklerde protonlar ve nötronlar arasındaki çekirdek kuvvetleri daha yakından incelendiğinde enerji fazlalığından kurtulmak için nükleonlarda bazı değişiklikler olduğu göze çarpar. Bu değişiklikler protonların nötronlara, nötronların da protonlara dönüşmesi şeklindedir.

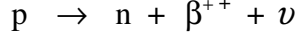
Çekirdek fazla proton veya nötronundan bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek kurtulabilir. Bu işlem 3 farklı şekilde gerçekleşebilir. Her üçünde de elektrik yükünün korunabilmesi için başka bir yüklü parçacığın bulunması gerekir.

β^- Bozunumu : β^- yayınlanması işleminde elektrik yükünün korunumu bir nötronun bir protona dönüşmesini, yani atom numarasının bir artmasını gerektirir. Bozunma denklemi,



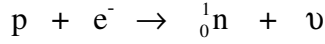
şeklindedir. Bu ifade, nötronun bozunarak bir proton, bir elektron ve bir antinötrino parçacığının meydana geldiğini göstermektedir.

β^+ Bozunumu: Bu işlem pozitif beta bozunumu veya pozitron bozunumu olarak adlandırılır ve pozitif yüklü bir elektron yayınlanır. β^+ bozunması bir protonun bir nötrona dönüşmesi olayıdır. Böylece çekirdeğin atom numarası bir azalır ve bozunma denklemi,



şeklindedir

Elektron Yakalama: Bu işlemde ise çekirdek etrafında en yakın yörüngede dönen elektron çekirdek tarafından yakalanır ve bir proton bir nötrona dönüşür. Bozunma denklemi,



şeklindedir.

Beta parçacıklarının enerjileri 0,8-3 MeV olup, hızları ise yayınladığı radyoaktif maddenin çeşidine göre $1,2 \cdot 10^8$ - $2,8 \cdot 10^8$ m/s arasında değişir. Beta parçacıklarının madde içinden geçmesi ve iyon çifti oluşturmaları alfa parçacıklarına benzer. Ancak yine de aralarında önemli farklar vardır. Beta parçacıklarının kütleleri alfa parçacıklarından küçük olduğundan aynı enerjide oluşturdukları özgül iyonizasyon daha küçüktür. Alfa parçacıkları radyoaktif kaynaktan genellikle aynı enerjide, nadiren iki üç farklı enerjide çıkarlar. Beta parçacıkları ise sürekli enerji dağılımına sahiptirler. Beta parçacıkları, madde içinden geçerken atom çekirdekleri ve elektronlarla çarpışır ve yönlerinde değişiklik olur. Beta parçacıkları, kütlelerinin küçük olması ve bir tek elementer yükleri nedeniyle, alfalar gibi kolayca durdurulamazlar ise de, yüksek enerjilere çıkmadıkça madde içine fazla nüfuz edemezler.

1.4.3. Gamma Işınları

Gama ışınlarının kaynağı atom çekirdeğidir. Bu ışınlar atom çekirdeğinin enerji seviyelerindeki farklılıklarından meydana gelir. Radyoaktif bir çekirdek alfa veya beta

yayınlanmasından sonra çoğu zaman kararlı durumda kalmayabilir. Bir başka deyişle, radyoaktif parçalanmadan sonra geride kalan çekirdek uyarılmış halde kalabilir. Bu çekirdek, oluştuğundan çok kısa bir zaman sonra bir veya birkaç gama ışını yayınlarken üzerindeki fazla enerjiyi atar ve kararlı hale gelir. Çekirdek ne kadar yüksek enerji seviyesinde uyarılmış olarak kalmışsa, çıkacak gama ışınları o kadar yüksek enerjili olacaktır.

Gama ışınlarının dalga boyları 10^{-10} m ile 10^{-14} m arasındadır. Bu ışınlar yüksek derecede giricilik özelliğine sahiptirler. Bu nedenle canlı dokular tarafından soğurulduğunda ciddi zararlar oluştururlar. Tedbir olarak bu tür radyasyonun yanında çalışanlar, kalın kurşun tabaka benzeri iyi soğurucu maddelerle korunmalıdır.

Maddeyle girdiklerinde gama ışınları değişik şekillerde atomla etkileşebilirler. Üç ana etkileşim fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Üç durumun tümünde serbest elektronlar üretilir ve bu elektronlar madde içinde yolları üzerinde yavaşlatıldığından elektron-iyon veya elektron-delik çiftleri oluşturur. Birçok foton dedektöründe, ya bir fotonun geçişini dedekte etmede ya da yüklü parçacığın miktarını ölçmeyle onun enerjisini tayin etmede bu yüklü parçacıklar kullanılır.

1.4.3.1. Fotoelektrik Soğurma

Fotoelektrik soğurma olayında, foton bağlı bir elektronla etkileşir ve foton enerjisinin tümü soğurulur. Elektron E_e enerjisiyle atomdan fırlatılır:

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (23)$$

Burada E_b bağlanma enerjisidir. Bir miktar enerji atoma verilir. Bu enerji denklem (23)'te ihmal edilmiştir. Hem enerjinin hem de momentumun korunması mümkün olmadığından fotoelektrik soğurma bağlı olmayan elektronlarda vuku bulmaz.

Etkileşme vakumda olmadıkça, fırlatılan elektron komşu materyalde yavaşlatılır ve enerjisi orada soğurulur. Fırlatılan elektron bir atom kabuğunda bir delik bırakacağından bu atom bir veya daha fazla X ışınlarının veya Auger elektronlarının yayımıyla yeniden uyarılmış olur. Eğer bu etkileşme bir katı malzemede vuku bulursa X ışınları çevredeki malzeme tarafından soğurulur. Bundan dolayı çoğu durumda bu etkileşme, etkileşme bölgesine yakın malzemeye tüm foton enerjisinin transferini içerir.

Her ne kadar etkileşme tesir kesiti basit bir analitik ifadeyle açıklanamasa da, fotonun E_γ enerjisine ve malzemenin Z atom numarasına bağlılığı yaklaşık olarak

$$\tau = \text{sabit. } Z^{4.5} E_\gamma^{-3} \quad (24)$$

ifadesiyle tanımlanabilir.

Güçlü Z bağlılığı göstermektedir ki, yüksek Z 'li materyal foton soğurulmasında çok etkindir. Foton enerjisine bağlılık niçin bu etkin düşük enerjilerde etkileşmenin baskın şekli olduğu, fakat yüksek enerjilerde ihmal edilebilir olduğunun sebebidir.

1.4.3.2. Compton Saçılması

Compton saçılması olayında, foton enerjisinin yalnızca bir kısmı elektrona aktarılır ve artakalan enerji ikincil bir foton olarak görülür. Enerji ve momentum korunumundan, saçılan foton ve elektronun enerjileri yayıldıkları açığa bağlıdır. Saçılma açıları Şekil 3'teki gibi tanımlanır. E gelen fotonun enerjisi, E' ve E_e sırasıyla çıkan fotonun ve elektronun enerjileri ve α , E/m_0c^2 olsun. Burada m_0c^2 elektronun durgun kütesine uyan enerjidir (511 keV). O halde ikincil fotonun enerjisi

$$E' = E [1 + \alpha(1 - \cos\theta)]^{-1} \quad (25)$$

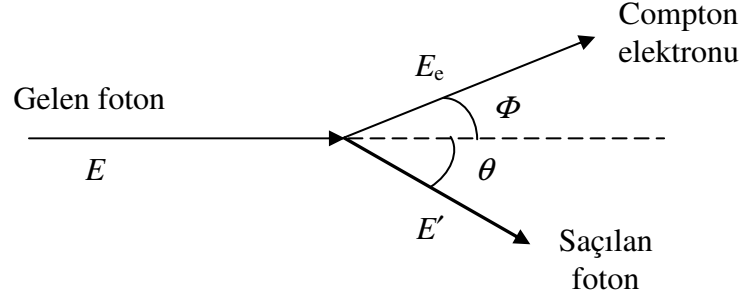
ve saçılan elektronun enerjisi

$$E_e = E \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right\} \quad (26)$$

ile verilir. İki açı ise

$$\tan \Phi = 1 / [1 + \alpha \tan(\theta/2)] \quad (27)$$

bağıntısıyla ilişkilidir. Çok küçük foton saçılma açıları için elektron enerjisi sıfıra gider ve bundan dolayı ikincil foton yaklaşık olarak gelen fotonla aynı enerjiye sahiptir. Fakat 180° 'lik saçılma açısı için ikincil foton $E/(1+2\alpha)$ olan büyük bir enerjiye sahiptir.

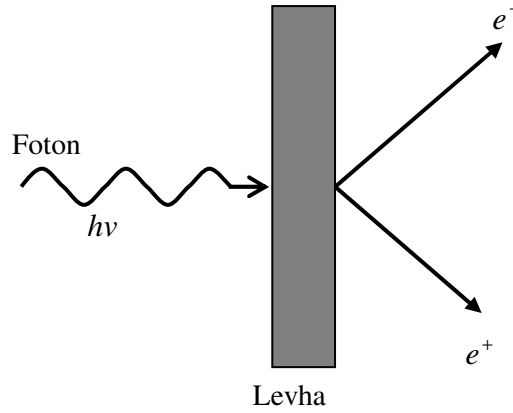


Şekil 3. Compton saçılmasında açılar için gösterim

Bu olay saçılan fotonun yayımını içerdiğinden gelen fotonun enerjisi ilk etkileşme bölgesinde toplanmaz. Tüm foton enerjisini araştırmak için, ikincil foton ve onun etkileşme terimini takip etmeliyiz. Yüksek enerjili (1 MeV gibi) bir foton için, ardışık fotoelektrik soğurma olayı ile son bulmadan önce her biri ikincil bir foton enerjisi üreten bir seri Compton saçılması olayı olabilir. Bundan dolayı gelen foton enerjisi materyalin büyük bir hacmi içine dağıtılabilir.

1.4.3.3. Çift Oluşumu

Birkaç MeV'lik γ ışınları için çift oluşumu öne çıkan etkileşme mekanizmasıdır. Bu olayda fotonun enerjisi nükleer Coulomb alanı içinde bir pozitron elektron çiftine dönüşür.



Şekil 4. Çift oluşumu

Bundan dolayı foton enerjisi, elektronun durgun kütle enerjisinin iki katından daha büyük yani (1022 keV) olmalıdır. Fazla enerji, $E_\gamma - 2m_0c^2$, kinetik enerji olarak iki parçacık arasında paylaşılır. Hem elektron hem de pozitron bitişik materyalde yavaşlatılır. Pozitron son olarak bir elektronla reaksiyona girer ve yok olur. Eğer bu olay, pozitronun kinetik enerjisinin tümü tamamen kaybolduktan sonra vuku bulursa, yaklaşık $m_0c^2 = 511$ keV'lik enerjili iki foton üretilir. Bu iki foton momentumun korunumu için hemen hemen zıt yönde yayılır. Elektron genellikle zayıf bir şekilde atoma bağlı olduğu için, küçük bir miktar enerji uygun bir momentumla birlikte atoma transfer olabilir. Bu enerji kaybının sonucu olarak iki fotonun enerjisi m_0c^2 'den biraz daha az olur.

1.4.4. Soğurma

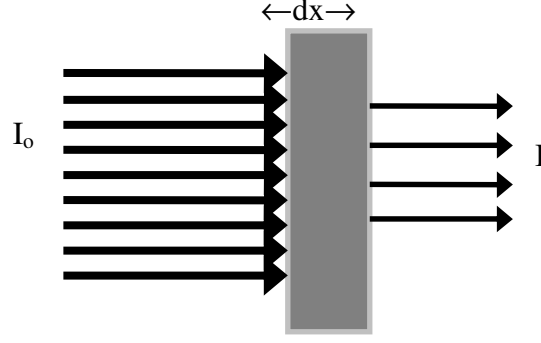
İnsanoğlu sürekli olarak gerek doğal gerekse yapay radyasyon kaynakları tarafından ışınlanmaktadır. Bu kaynaklardan alfa tanecikleri gibi madde içine nüfuz oranı düşük radyasyonların yanı sıra gama ışınları gibi madde içerisinde daha uzun yollar katedebilen elektromagnetik radyasyonlar da yayımlanmaktadır. Dünyamıza dış uzaydan gelen kozmik ışınlar ya da nükleer silah patlamaları sonucu yoğun bir şekilde yayımlanan gama ışınları ise göreceli olarak daha yüksek enerjili ışınlardır. İnsan sağlığı açısından düşünüldüğünde, sürekli maruz kalındığında bu ışınların pek çok hastalığa (özellikle genetik hastalıklara) sebep olabileceği bilinmektedir. Bu bakımından, özellikle vaktimizin çoğunu geçirdiğimiz yaşam alanlarımızda kullanılan yapı malzemelerinin soğurma özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

Belli bir enerjiye sahip fotonlar Z atom numaralı bir maddeyle etkileştiğinde bu fotonların bir kısmı maddenin diğer tarafına geçerken bir kısmı ise soğurulur. Bu soğurma olayı fotonların soğurucu maddenin atomları ile etkileşmesi sonucu oluşur ve genellikle iki farklı yolla gerçekleşir.

- a) Gerçek soğurma (fotoelektrik soğurma), fotonların atomlarla etkileşmesi sonucu elektronik geçişlere sebep olması ile gerçekleşir. Toplam soğurmaya katkısı oldukça fazladır.
- b) Fotonların atomlardan saçılması ile gerçekleşen soğurma. Toplam soğurmaya katkısı azdır.

Şekil 5'te elektromanyetik radyasyonun azalmasının şematik gösterimi verilmektedir. Madde ile gelen demet arasındaki azaltma olayları ve türü için hedef

materyalin kalınlığı ve atom numarasının değeri de önemli bir etkidir. Soğurucu materyal belli bir kalınlıktan daha ince olduğunda, bütün parçacıklar soğurucu materyali geçebilir ancak soğurucu materyal belli bir kalınlıktan daha kalın ise parçacıklar bütün enerjisini kaybeder ve soğurucu materyalden çıkamaz.



Şekil 5. Elektromagnetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması

1.4.4.1. Lineer Soğurma Katsayısı

Soğurma olayı ilk kez Röntgen tarafından izah edilmiştir. Buna göre, I_0 şiddetli bir fotonun (x-ışını, γ -ışını, vs.) soğurucu bir maddenin dx kalınlığında ince bir tabakasından geçerken şiddetinde dI kadar bir azalma olur ve bu azalma soğurucunun kalınlığı ile orantılıdır.

$$dI \propto -Idx \quad (29)$$

$$dI = -\mu I dx \quad (30)$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx \quad (31)$$

Burada μ (cm^{-1}) lineer soğurma katsayısıdır ve birim kalınlık başına düşen enerji soğurma kesri olarak tanımlanır. Lineer soğurma katsayısı, soğurucunun atom numarasına (Z) ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Denklem (31)'in sonlu bir x kalınlığı üzerinden integralini alırsak,

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx \quad (32)$$

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (33)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (34)$$

Lambert Beer yasası olarak bilinen ifade elde edilir. Buradan da lineer soğurma katsayısı,

$$\mu = x^{-1} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (35)$$

olarak bulunur.

1.4.4.2. Kütle Soğurma Katsayısı

I_0 şiddeti ile gelen tek enerjili fotonların dar bir ışını, yoğunluğu ρ ve kütle kalınlığı x olan bir katmanı geçerek exponansiyel soğurma kanunu ile verilen I şiddeti ile dışarı çıkar.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (36)$$

şeklinde olur. Burada $\frac{\mu}{\rho}$ kütle soğurma katsayısı (μ_m) olarak adlandırılırken, ρx ifadesi ise soğurucunun yüzey yoğunluğudur ($d(\text{gr/cm}^2)$). Bu ifadeleri denklem (15)'de yerine yazarsak,

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (37)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (16)'yı yeniden düzenlersek, kütle soğurma katsayısı için,

$$\frac{\mu}{\rho} = d^{-1} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (38)$$

ifadesini elde etmiş oluruz.

Biden fazla element içeren bir maddenin kütle soğurma katsayısını bilmemiz gerekir. Bu madde bir karışım, çözelti veya bileşik olabilir. O zaman maddenin kütle soğurma katsayısı,

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (39)$$

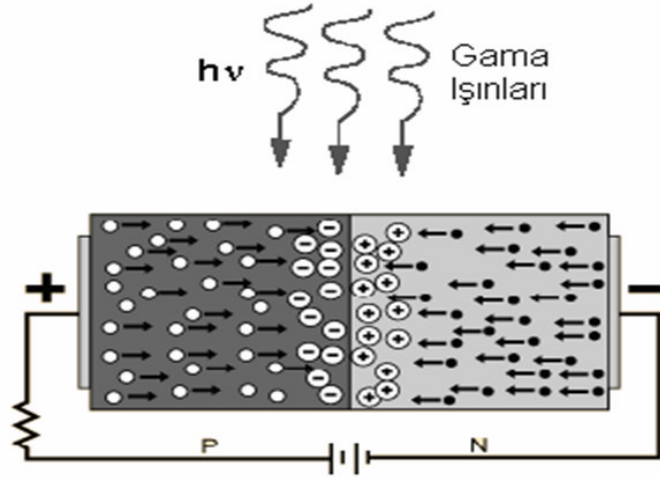
şeklinde olur. Burada w_i , maddeyi oluşturan her bir elementin ağırlık kesridir, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ ise her bir elementin kütle soğurma katsayısıdır.

1.5. Gama Işını Dedektörleri

Nükleer radyasyonu tespit etmek için kullanılan tüm dedektörler benzer çalışma özelliklerine sahiptirler. Radyasyon dedektöre girer, dedektör materyalinin atomlarıyla etkileşir, enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybeder ve atom yörüngelerinden elektronların salınmasına neden olur. Bu elektronlar toplanır ve analiz edilmek için elektronik devre tarafından ya akım pulsu yada voltaj şekline dönüştürülür. Dedektör materyalinin seçimi ölçülecek radyasyonun tipine bağlıdır. Gama ışınlarının ölçümünde yaygın olarak kullanılan dedektörler, yarıiletken ve sintilasyon dedektörlerdir. Bu dedektörlerin çalışması, gama ışınlarının kullanılan materyal içinde iyonlaşarak enerji kaybetmesi gerçeğine dayanır.

1.5.1.1. Yarıiletken Dedektörler

Yarı iletken dedektörler, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (boşluk) taşıyıcıları fazla olan n ve p tipi materyaller temas ettirilerek elde edilir. Ters besleme altında dedektörde, elektron ve boşluk arınmış bir hassas bölge oluşur. Dedektör veriminin yüksek olması için derin bir hassas bölge, derin hassas bölge elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Bir foton, eklem içinden geçtikçe, bir elektron valans bandından iletim bandına yükseltilir ve elektron-boşluk çifti üretilmiş olur. İçerdeki elektrik alan, elektronları eklemin pozitif, boşlukları da negatif tarafa doğru sürükler. Bu da bir sayıcı ile sayılabilen bir puls meydana getirir. Şekil 9'da yarıiletken dedektörlerin basit şematik gösterimi verilmiştir.



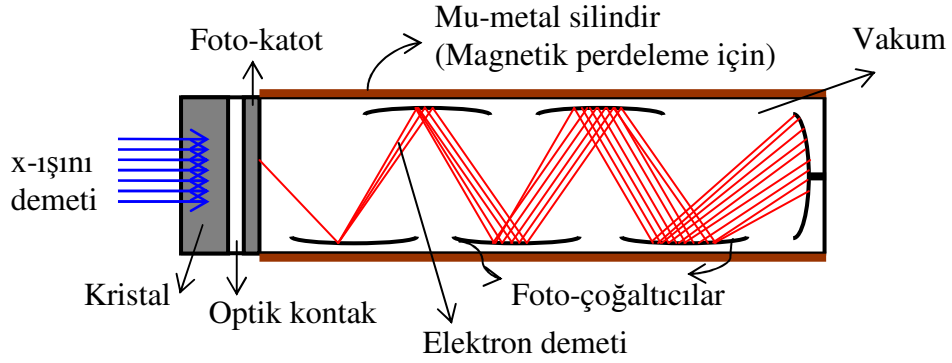
Şekil 6. Yarıiletken dedektör şeması

1.5.1.2. Sintilasyon Dedektörler

Sintilasyon dedektörleri iki ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 7).

a) Üzerine yüklü bir parçacık (x-ışını, γ -ışını,...) düştüğü zaman ışık pırıltıları meydana getiren, küçük miktarlarda talyum veya yuropiyum gibi saf elementlerin sürüklendiği sodyum iyodür, sezyum iyodür, antrasin, naftalin ve fenantrin gibi maddelerden oluşan kristal kısım.

b) Oluşan ışık pırıltılarını ölçülebilir bir voltaj pulsuna dönüştüren fotoçoğaltıcı tüp kısmı.



Şekil 7. Sintilasyon dedektörlerin şematik gösterimi

Kristal üzerine düşen x-ışınlarının soğurulması sonucu kristalde ışık pırıltıları oluşur. Bu pırıltılar fotoçoğaltıcı tüpe geçerek fotokatot yüzeyden elektronların sökülmesine neden olur. Sökülen bu elektronlar, 800 ile 1500 voltluk potansiyel uygulanan peş peşe ve voltaj artmaları olacak şekilde yerleştirilen birçok metal çoğaltıcıya doğru sürüklenir. Sürüklenen bu elektronlardan çoğaltıcıya çarpan her elektron iki elektrona dönüşerek, tüp sonundaki çoğaltıcıda büyük miktarlarda elektron oluşmasını sağlar. Bu olayın tamamı bir mikrosaniyeden daha kısa sürelerde gerçekleşir. Bu elektronlar burada bir yük pulsuna dönüştürülür. Bu pulsun yüksekliği gelen fotonların enerjisiyle orantılıdır. Bu pulsar yükseltilerek bir sayıcı ile sayılır.

1.6. Türkiye'deki İnşaatlarda Kullanılan Temel Malzemeler

1.6.1. Gazlı Beton

Gazlı beton, silisli kum, çimento, kireç, alüminyum tozu ve suyun karışımıyla oluşturulan harcın, basınçlı buhar altında sertleştirilmesiyle elde edilen gözenekli bir yapı malzeme ve elemanıdır. Yapısının %84'ü, içinde durgun hava bulunan gözeneklerden oluşur. Betondan 10, delikli tuğladan 2–4 kez daha fazla ısı yalıtımı özelliğine sahiptir. Gazlı beton ile yapı yazın serin, kışın sıcak olur. Gazlı beton ürünlerindeki milyonlarca gözenek, yapının nefes almasını sağlayarak, rutubetlenmeyi önler, konfor düzeyini artırır. Gazlı beton, fabrikada özel makinelerle milimetrik hassasiyetle boyutlandırılır. Böylece, malzemenin düzgün olması, yüzeylerin sıvasız bırakılabilmesi veya yalnız perdah sıva ile yetinilmesini sağlar. Gazlı beton yanmaz ve 1200 °C' ye kadar ateşe dayanıklı olduğundan yapıda yangın emniyeti sağlar. Gazlı betonlar, beton sınıfına girmesine karşın ahşap gibi kolayca işlenebilir. Testere ile kesilebilir, matkap ile delinebilir, çivi çakılıp vidalanabilir, tesisat için kolaylıkla kanallar açılabilir. Gazlı betonlar hafiftir ve depreme dayanıklıdır. Gazlı beton, normal betondan 6, tuğladan 3 kez daha hafif olması nedeniyle; nakliyeden, demir ve çimentodan önemli tasarruf sağlar. Yapı hafiflediği için deprem emniyeti artar, her türlü zemin şartlarında güvenlikle inşa edilebilir.

1.6.2. Çimento

Çimento CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve az miktarda MgO ihtiva eden, esas itibariyle kalker ve kil karışımı olan hammaddelerin belirli oranlarda ve şartlarda karıştırılarak klinkerleşme sıcaklığına kadar pişirilmesi sonucu elde edilen ve yeterli miktarlarda öğütülerek aranan fiziksel özellikleri gösteren, hava ile suda sertleşen ve sertleştikten sonrada suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı malzeme olarak tanımlanabilir (Köktürk, 2002).

İnsanoğlunun geçmişte en fazla kullandığı ve gelecekte en fazla kullanacağı yapı malzemesi olan çimentonun üretiminde atık kullanımı giderek önemli boyutlara varmaktadır. Çimentonun yapımında çimentoya bağlayıcı özelliği kazandırmak amacıyla puzolonlar karıştırılır. Puzolonlar kendileri bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan fakat çok ince öğütüldüklerinde Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek bağlayıcı

bileşiklerin oluşmasını sağlayan silisli ve alüminli maddelerdir. Puzolonlar, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolonlar, başlıca az ya da çok geniş değişikliklere uğramış, volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşurlar. Doğal puzolonlara en iyi örnek volkanik küller, volkanik tüfler ve tras'tır. Doğal puzolanik maddelere tras da denilmektedir. Tras, kendisinde hidrolitik bağlayıcılık özelliği olmayan fakat kireç veya çimento gibi maddelerle karıştırıldığı zaman bağlayıcı maddeler meydana getirebilen ve karıştırıldığı çimentoya kimyasal mukavemet kazandıran volkanik bir maddedir. Dolayısıyla doğal puzolanlı çimentolara traslı çimento denilmektedir. Puzolanik davranış gösteren volkanik kaynaklı olmayan çöküntüler arasında hem silis hemde orijinal kayada bulunan temel oksitlerin büyük bir kısmını kaybetmiş olan bazı silisli kayalar bulunur. Tüm bu doğal puzolonların mineralojik yapısından dolayı (kuvars, feldispat vb.) uranyum iz veya yüksek oranlarda bulunması beklenir. Ayrıca bu maddelerin bileşimlerinde yüksek oranlarda silis bulunmasından dolayı, uranyum ve toryum yığışmaları söz konusu olabilir (Uğur, 1992). Yapay puzolonlar, bu gibi doğal maddelerin kil ya da şist olarak ısıtılmasıyla elde edilirler, bundan başka diğer ürünlerin atıklarıdır. Örneğin "silis dumanları" metal silis veya silis temeli alaşımların üretiminden elde edilirken uçucu kül termal elektrik güç santrallerindeki öğütülmüş ocak kömürünün yanmasından elde edilir. Yapay puzolonlara en iyi örnek uçucu küllerdir. Uçucu küller, termik santrallerde pulverize kömürün yanmasından oluşan bir yan üründür. Bu santrallerde düşük kalorili olmaları nedeniyle başka yerlerde kullanılma olasılığı olmayan kömür ve artıkları kullanılır. Şlam denilen bu kömürlerin tane çapları 0.2–0.5 mm dolayındadır ve kül oranları oldukça yüksektir (Zor, 1986). Uçucu kül taneleri tipik olarak küresel olup, çapları 1 ile 150 mikron arasında değişir, çoğunluğu 45 mikrondan daha küçüktür. Tane büyüklüğü dağılımı toz toplama sisteminin tipine bağlıdır. Uçucu küllerin bileşimi hem kömürün orijinine hem de yanma işlemine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Çoğunluğu %85'ten daha fazla oranda silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum elementlerinden oluşan kimyasal bileşenler ile camsı yapı ihtiva ederler.

Türkiye'de kullanılan çimento çeşitleri ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

1.6.2.1. Portland Çimento (CEM I 42,5 R)

Portland çimentosu genellikle gri renkli toz halindeki maddedir. Elde edilmesi için önce kalker, kil ve gerekiyorsa bir miktar alüminyum ve demir oksitler istenilen kimyasal

bileşimi sağlamak üzere orantılı olarak harmanlanıp öğütülürler. Farin olarak adlandırılan hammadde karışımı döner fırında 1450 °C civarında bir sıcaklığa kadar pişirilir. Fırın çıkış ucuna doğru farin taneleri önce ergiyerek ve sonra çeşitli reaksiyonlar sonucu granüle halde klinker adı verilen topakları meydana getirirler. Portland çimentosu elde etmek için klinkerin az bir miktar kalsiyum sülfat (örneğin alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesi gerekir. Bu şekilde elde edilen portland çimentosuna klinker ile kalsiyum sülfatın öğütülmesi sırasında veya ayrıca öğütülmüş olarak bazı mineral katkıları katılarak değişik tipli çimentoların üretilmesi giderek yaygınlaşan bir uygulamadır (URL-2). Genel olarak yüksek dayanım gerektiren yapılarda, soğuk havada dökülen betonlarda, prefabrik yapılarda, tünel-kalıp uygulamalarında, yapı kimyasalları üretiminde ve temel betonları uygulamalarında kullanılır.

1.6.2.2. Kompoze Çimento (CEM V/A)

Kütlece 40–64 kısım portland çimento klinkeri ile karşılıklı olarak 60–36 kısım uygun katkı maddelerinin bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. Kompoze çimento, özelliği olmayan normal inşaatlarda ve düşük hidrasyon ısısı istenen kütle betonlarında kullanılır.

1.6.2.3. Portland Kompoze Çimento

Portland kompoze çimento CEM II/B-M ve CEM II/A-M olmak üzere ikiye ayrılır. CEM II/B-M: Kütlece (21–35) kısım en az iki cins katkı maddesinin ve karşılıklı olarak (79–65) kısım portland çimento klinkerinin bir miktar alçı taşı ile öğütülmesi sonucu elde edilen; suyla karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Katkı maddeleri olarak, kalker, doğal puzolan (tras), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılabilir.

CEM II/A-M: Portland kompoze çimento, kütlece (6–20) kısım en az iki cins katkı maddesinin ve karşılıklı olarak (94–80) kısım portland çimento klinkerinin bir miktar alçı taşı ile öğütülmesi sonucu elde edilen ve 28 günlük dayanımı minimum 42,5 olan hidrolik bağlayıcıdır. Katkılı çimentoların kullanıldığı genel amaçlı ve daha yüksek dayanım gerektiren inşaatlarda kullanılır.

1.6.2.4. Beyaz Portland Çimentosu (BPC)

Özel nitelikli kil ile kireç taşının birlikte pişirilmesi ile elde edilen, beyaza yakın renkli klinkerin bir miktar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesi sonucu meydana gelen beyaz renkli bir hidrolik bağlayıcıdır. Hazır sıva ve harçlar, yapıştırıcı ve derz dolgu malzemelerinde, mimari ve dekoratif betonlarda, sanat ürünlerinde kullanılmaktadır.

1.6.2.5. Puzolanik Çimento (CEM IV /B-P)

Standartlarında tanımlanmış oranda (en çok % 55) mineral katkı maddeleri (puzolan) ile portland çimentosu klinkerinin belirli miktarda priz düzenleyici (alçıtaşı) ile beraber öğütülmesi sonucu elde edilen; suyla karıştırıldıktan bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Portland çimento ile portland kompoze çimentoya göre daha geç dayanım kazanır. Su/çimento oranları da göreceli olarak daha yüksektir. Alkali-agrega reaksiyonuna ve kimyasal dış etkilere karşı daha dayanıklıdır. Genel olarak yapılarda tamirat işlerinde, sıva yapımı ve yapı kimyasalları üretiminde kullanılır.

1.6.2.6. Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ)

Portland çimento gibi sülfata dayanıklı çimento da; kalker, marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit, vb. hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek, pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin, bir miktar priz düzenleyici (genellikle alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesinden oluşan; suyla karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Genel olarak normal portland çimentoların kullanıldığı yerlerde kullanılabileceği gibi, Trikalsiyum alüminat (C_3A) miktarının %5'in altında olması dolayısı ile sülfatlı saha ve deniz suyu tesirinde kalan bölgelerdeki inşaatlarda, su altı, köprü, baraj ve liman temel inşaatlarında, istinat duvarları inşaatlarında kullanılır.

1.6.3. Kum

Yeryüzünde önceden var olan kayaçların çeşitli fiziksel ve kimyasal yollarla aşınıp ayrışması ile oluşmuş 0.062 mm ile 2 mm arası tane boyuna sahip kırıntılı bir malzemedir. Yapısında, çoğunlukla silis, feldispat ve çoğunda %1-2 oranında mika, çört, olivin ve

garnet bulunmaktadır. Kum yataklarından çıkarıldığı gibi hiçbir hazırlama işlemine tabi tutulmadan olduğu gibi kullanılır. Bunlarda fazla miktarda kil ve yabancı maddeler vardır. Kilin fazla olması tavlama suyunun artmasına ve gaz geçirgenliğinin azalmasına neden olur. Ayrıca bunlarda tane dağılımı homojen olmayıp içerdikleri oksidin miktarına göre kırmızı, sarı, siyah ve kahverengi olabilir (Köktürk, 2002).

1.6.4. Tuğla ve Kiremit

Tuğla ve kiremit inşaatlarda birbirinden farklı amaçlar için kullanılan yapı malzemeleridir. Tuğla duvarlarda, kiremit ise çatılarda kullanılır. Tuğla ve kiremit suya dona ve ateşe karşı oldukça dayanıklı olduğundan yapı malzemesi olarak kullanılan temel bir maddedir. Kiremitlerin yapım tekniği tuğlalarınkine benzer olmak üzere yalnız hamuru daha ince öğütülmüş ve yoğrulmuştur. Türkiye'deki tuğla ve kiremit sektörü, ülkenin dört bir yanına dağılmış çok sayıda üretim birimi olan bir sanayi türüdür. Üretim hammaddelerinin kolay temin edildiği bölgelerde küçük yoğunlaşmalar gösteren sektörde çok sayıda tuğla kiremit fabrikası vardır. Türkiye içinde dağılan tuğla-kiremit fabrikaları bölgeler itibarıyla yoğunlaşmalar göstermektedir. Tekirdağ, Turgutlu, Salihli, Burdur, Afyon, Çorum, Boyabat, Erbaa, Yozgat, Osmancık, Avanos ve Eskişehir önemli üretim bölgeleri içindedir.

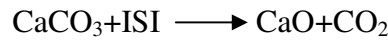
İçinde, kil minerali ihtiva eden, belli ölçüde suyla karıştırıldığında plastik çamur haline gelen, şekillenme özelliğine sahip ve 900–1000 °C'de pişirildiğinde, çatlamadan sertleşebilen bütün topraklar, tuğla-kiremit hammaddesi olarak kabul edilir. Tuğla ve kiremit toprağı genellikle illit, az miktarda montmorillonit, kaolinit, kuvars, demir mineralleri, az miktarda organik maddeler ve suda çözülebilen tuzlar ihtiva ederler (Köktürk, 2002). Killer genel olarak kimyasal bakımından çok değişiklik gösterdiklerinden ve karmaşık yapılara sahip olduklarından bu konuda bir standardizasyon yapmak mümkün olmamaktadır. Tuğla ve kiremit imalatı başlıca şu aşamalarda gerçekleşmektedir: Tuğla kilden imal edilir. Kil çamur haline getirilip bir dizi işlemde geçirilir. Öncelikle ham maddenin hazırlanması gerekir. Daha sonra bu ham madde preslenerek şekillendirme işlemine tabi tutulur. Şekillendirilen tuğla ve kiremitler kurumaya bırakılır. Kurumadan sonra tuğla ve kiremitler fırınlarda pişirilir. Bu işlemde sonra fırından direk olarak satışa sunulabildiği gibi bazen de stoklanır. Yani, tuğla-kiremit üretim kademeleri hammadde hazırlama, şekillendirme, kurutma, pişirme, ambalajlama ve sevktir.

1.6.5. Mermer

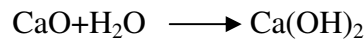
Bilimsel anlamda mermer, kireçtaşı, dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) veya dolomitik kireçtaşı gibi karbonatlı kayaların sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğrayarak yeniden kristallenme ile oluşan metaformik kayadır. Kimyasal bileşiminde, büyük oranda kalsiyum, karbonat, magnezyum karbonatın yanı sıra ve silisyum dioksit ile değişik metal oksitleri ve silikat mineralleri bulunur. Ticari anlamda mermer tanımı oldukça farklıdır. Blok verebilen, kesilip cilalandığında parlayan, dayanıklı ve güzel görünümlü her tür kayaç (magmatik, metaformik, sedimentar) mermer olarak tanımlanır. Bu tanım uyarınca kalker, traverten, kumtaşı gibi tortul; gnays, mermer, kuvarsit gibi metamorfik; granit, siyenit, serpantin, andezit, bazalt gibi magmatik taşlar da mermer olarak isimlendirilmektedir. Ocaklarda düzgün geometrik boyutlar halinde işletilen mermer atölyelere getirilerek, değişik boyut ve kalınlıkta kesilir ve plakalar elde edilir. Silme ve parlatma (cilalama) işlemlerinden sonra kenar düzeltilmesi (şekillendirme) yapılarak piyasaya sunulur. Güzel renkli, küçük parçalar el sanatlarının çeşitli dallarında kullanılır. Mermer artıkları, inşaat, boya ve seramik sanayinde kullanım bulur. Mermer saf kalsiyum karbonat bileşiminde olduğu zaman beyaz ve yarı saydamdır (Kırıkoğlu, 1990).

1.6.6. Kireç

Kireçtaşı, sönmemiş kireç ve sönmüş kireçten oluşan ürün grubuna “kireç ürünleri” adı verilir. Kireç, en az %90 CaCO_3 içeren kireçtaşının kireç fırınlarında 900–1000 °C'nin üzerinde kalsinasyonu sonucunda kalsiyum okside (sönmemiş kireç) dönüşmesiyle elde edilir.



Kalsiyum oksit, suyla reaksiyona sokulması sonucunda kalsiyum hidroksit'e (sönmüş kireç) dönüşür:



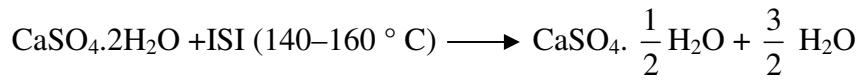
Kirecin hammaddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan kireçtaşı, karbonatlı tortul kayaç ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak

kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikleri ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) kombine halde bulunur. Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünyada çok çeşitli formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre gruplandırılır (örneğin tebeşir, marn, traverten gibi). İçindeki MgCO_3 miktarının %20–40 arasında olması durumunda ise kireçtaşı, romboedrik yapıdaki dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) adını alır.

1.6.7. Alçı

Alçı taşı (jips), dünyanın var oluşundan bu yana bulunan düşük yoğunlukta bir taştır. İşlendikten sonra çok çeşitli kullanımı olan taş, bugün dünyanın birçok ülkesinde ev ve işyerlerinin duvar ve tavan kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe, doğadan kolayca elde edilip işlenebilen alçı malzeme kullanımının artması ile minimum enerji sarfiyatıyla yüksek performanslı ürün elde edilebilecek ve binalardaki ısı kaybı da azalacaktır. Alçı malzeme doğru olarak ve uygun yerlerde uygulandığında, mimariye çok geniş imkanlar tanıyan ve yüzyıllarca bozulmadan kalan bir malzemedir.

Alçı taşı (jips) doğal olarak oluşan ve bileşiminde iki molekül su bulunduran bir kalsiyum sülfat mineralidir ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Alçı taşının bünyesinde yarım molekül su kalacak şekilde, ısıtılması ve öğütülmesi ile alçı elde edilir. Alçı suyla karıştırılınca tekrar katılarak bağlayıcılık özelliği taşıyan bir yapı malzemesine dönüşür.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanı

Türkiye, Avrupa ve Asya kıtalarının kesişme noktasında bulunan bir ülkedir. Ülke topraklarının bir bölümü Anadolu Yarımadasında, bir bölümü ise Balkan Yarımadası'nın uzantısı olan Trakya'da bulunur. Ülkenin üç yanı Akdeniz, Karadeniz ve bu iki denizi birbirine bağlayan Boğazlar ile Marmara Denizi ve Ege Denizi ile çevrilidir. Komşuları Yunanistan, Bulgaristan, Gürcistan, Ermenistan, Azerbaycan, İran, Irak ve Suriye'dir.

Türkiye'nin toprakları 36° - 42° Kuzey paralelleri ve 26° - 45° Doğu meridyenleri arasında yer alır. Kabaca bir dikdörtgeni andırır ve genişliği 1.660 kilometredir. Göller ve adalar dahil kapladığı gerçek alan 814.578 km²'dir. Türkiye 6-21 Haziran 1941 tarihinde yapılan Birinci Türk Coğrafya Kongresi'nde Şekil 8' de görüldüğü gibi 7 ana coğrafi bölgeye ayrılmıştır. Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinden dördüne komşu olduğu denizin adı verilmiştir, diğer üç bölge de Anadolu bütünü içindeki konumlarına göre adlandırılmışlardır (URL-3).

Marmara Bölgesi % 8,5, Ege Bölgesi % 12, Akdeniz Bölgesi % 16, İç Anadolu Bölgesi % 18, Karadeniz Bölgesi % 18, Doğu Anadolu Bölgesi % 21, Güneydoğu Anadolu Bölgesi % 7,5 oranında yer tutar.



Şekil 8. Türkiye'nin Bölgesel Haritası

2.2. Numunelerin Toplanması

Türkiye'nin 7 bölgesinden inşaatlarda yapı malzemesi olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numuneleri fabrikalardan, üreticilerden ve inşaatı yapılan binalardan temin edildi. Toplanan numunelerin bölgelere göre dağılımı Tablo 5'te verilmiştir. Toplanan numuneler K.T.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünde bulunan kırıcılar yardımıyla öğütülerek toz haline getirildi.

Tablo 5. Toplanan numunelerin bölgelere göre dağılımı

Bölgeler	Toplanan numune çeşitleri ve sayıları							
	Kum	Çimento	Tuğla	Kiremit	Alçı	Kireç	Mermer	Gazlı beton
Marmara	32	18	17	12	8	12	18	6
Ege	28	12	17	12	10	12	19	1
Akdeniz	28	13	21	9	9	13	11	1
Karadeniz	65	14	33	12	8	18	21	2
İç Anadolu	38	20	27	13	11	10	20	3
Doğu Anadolu	38	9	22	12	8	12	10	1
Güneydoğu Anadolu	30	10	22	10	8	10	8	5

2.3. Yapı Analizleri

Toplanan inşaat malzemelerinin X-ışınları kırınım desenleri Rigaku D/Max-IIIC difraktometresinde CuK_α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, 35 keV, 30 mA) ışınımı kullanılarak elde edildi. Tüm ölçümler, oda sıcaklığında, $5^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$ aralığında $3^\circ/\text{dak}$. tarama hızında ve $0,02^\circ$ 'lik örnekleme aralığında yapıldı.



Şekil 9. Rigaku D/Max-III C marka X-ışını difraktometresi

2.4. Kimyasal Analizler

Toplanan inşaat malzemelerin kimyasal analizi EDXRF cihazında (Epsilon 5, PANalytical) yapıldı. Numuneler ilk olarak içlerindeki suyu buharlaştırmak için 105 °C'de 4 saat kurutuldu. 20 saniye boyunca 7 tonluk hidrolik basınç uygulayarak küçük tabletler haline getirildi. Bu tabletlerin çapı 40 mm ve kütleleri yaklaşık olarak 400 ± 2 mg'dır.



Şekil 10. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı

2.5. Radyoaktiflik Ölçümleri

2.5.1. Numunelerin Analize Hazırlanması

Toz haline getirilen numuneler 80 Mesh'lik elekten geçirilerek neminin alınması için 105 °C' de bir etüve konuldu. Etüvde bir kaç gün kaldıktan sonra deney geometrisine uygun biçimde hazırlanan, çapı 6 cm ve yüksekliği 5 cm olan plastik kutuların içine bırakılıp kutuların ağızları sıkıca kapatılarak 1 ay süreyle bekletildi. Böylece ^{238}U ve ^{232}Th ürünleri arasındaki radyoaktif dengenin oluşması sağlandı ve numuneler sayıma hazır hale getirildi.

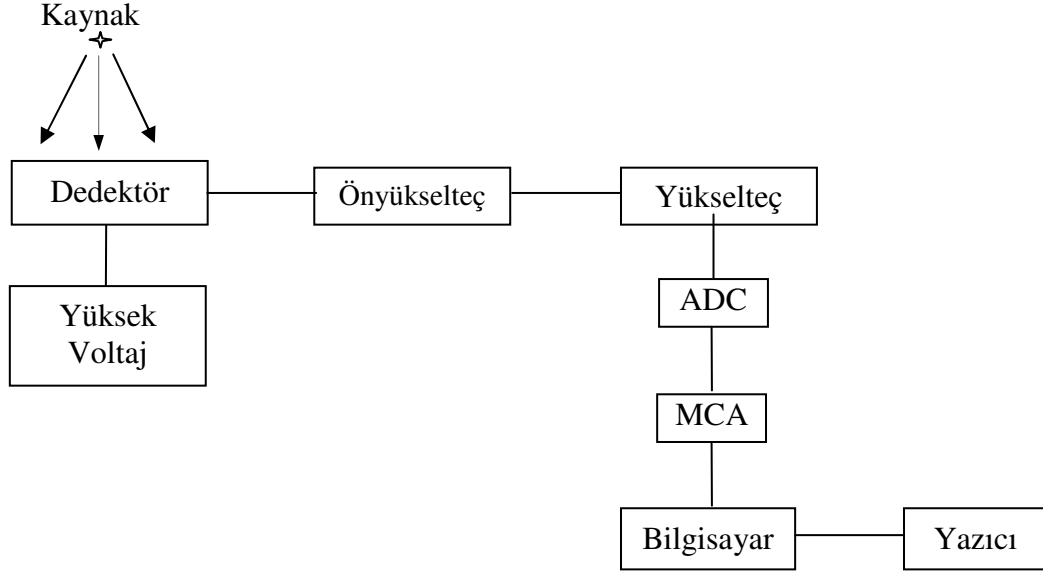
2.5.2. Deney Sistemi

Numunelerin radyoaktiflik ölçümleri için 1332,5 keV'de 1,9 keV rezölüsyona ve % 15' lik relatif verime sahip olan Canberra, GC 1519 model HPGe dedektörü kullanıldı. Şekil 14'te gama spektrometre sisteminin genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 11. Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü

Gama spektrometresi, dedektör, önyükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayımları elektronik sinyallere dönüştüren ADC sistemi, çok kanallı analizörden (MCA) ibarettir. Bu çalışmada kullanılan gama spektrometre sisteminin şeması aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 12. Gama spektrometre sisteminin blok diyagramı

Sistemde bulunan üniteler ayrı ayrı aşağıda açıklanmıştır.

a) Dedektör

Gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılan dedektörlerde, gelen foton kristalle etkileşerek enerjisini kaybeder. Bu etkileşmeler sonucunda, kristalde elektron-boşluk çiftleri meydana gelir ve dedektöre uygulanan yüksek voltajın oluşturduğu elektrik alanı ile bu yükler sürüklenir. Gelen radyasyonun enerjisi ile orantılı olarak biriken bu yük, analizörde ölçülebilen bir voltaj pulsu meydana getirir.

b) Yüksek Voltaj Ünitesi

Dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı oluşturmak üzere, negatif veya pozitif 5000 V 'a kadar gerilim sağlayan ünite dir.

c) Önyükselteç

Önyükselteç, dedektörden gelen pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürür. Elektronik katlar için pulsları şekillendirir ve büyütür. Dedektör ile elektronik devre arasında empedans uyumu sağlar. Önyükselteç'in ilk devresi dedektöre çok yakın yerleştirilmiş bir alan etkili transistor dür. Elektronik gürültüyü en düşük

seviyeye indirmek için, genellikle bir alan-etkili transistör (FET) olan ön yükselticinin girişi dedektörle aynı oranda soğutulur, yani sıvı azot kaynama sıcaklığında muhafaza edilir.

d) Yükselteç

Önyükselteç'ten gelen pulsların, puls yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayrılmasını sağlayacak şekillendirmeyi sağlar. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsunun genliği 2 V'tan 10 V'a kadar değişir. Çoğu yükselticiler hem unipolar çıkış (yani, sinyalin tepe kısmı tamamen pozitif veya tamamen negatiftir) hem de bipolar çıkış (yani, sinyal hem pozitif hem de negatif bileşene sahiptir) ile donatılmıştır. En iyi sinyal-gürültü oranını elde etmek için, yükselticinin unipolar çıkışı seçilir.

e) Analog Dijital Çevirici (ADC)

Analog dijital dönüştürücünün (ADC) amacı yükselticiden gelen analog pulsu, onun genliği ile orantılı X ve gama ışını fotonunun enerjisiyle orantılı tamsayıya çevirmektir. Sayılmış olan bir puls yüksekliği kadar sayı analizörün hafızasında biriktirilir. Sonuçta bu bilgi bir enerji spektrumu olarak ekrana aktarılır. Burada ölü zaman çok önemlidir. Ölü zaman, birim zaman başına veya dönüşümün artmasıyla orantılı olarak artar. Yani ADC'nin meşgul olduğu zamandır. ADC genellikle puls yüksekliği analizinde kullanılır.

f) Çok Kanallı Analizör (MCA)

Çok kanallı analizörler, genellikle puls yüksekliği analizi yapan cihazlardır, MCA'daki en önemli devre veya bileşen, örneksel/sayısal dönüştürücüdür. Burada, gelen her puls, sayısal hale çevrilir ve genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle pikler oluşur.

2.5.3. Deneysel Yöntem

2.5.3.1. Enerji Kalibrasyonu

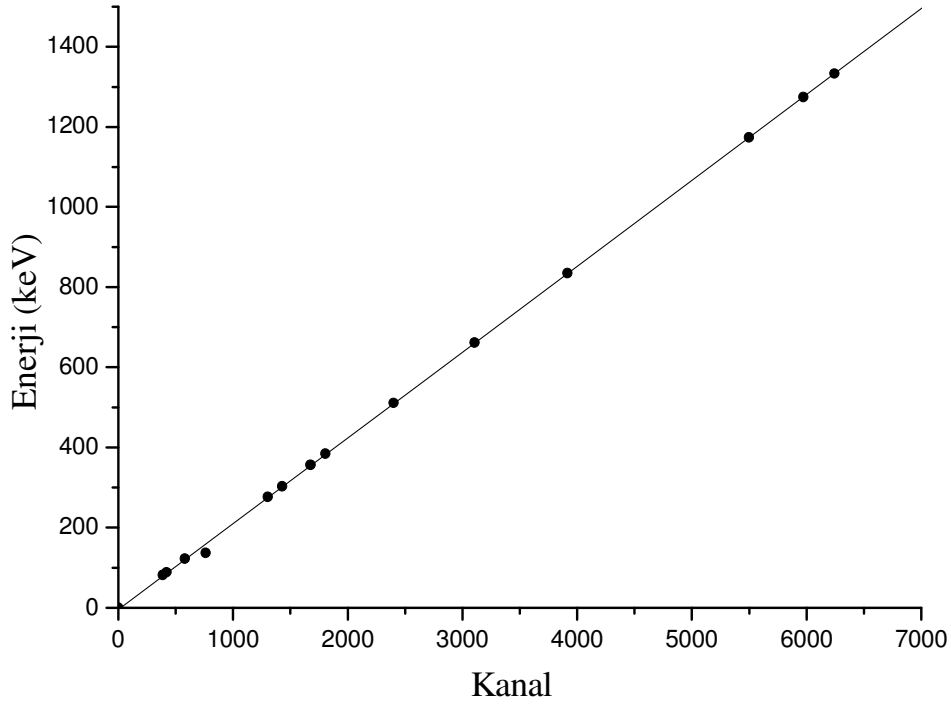
Çok kanallı analizörde toplanan spektrumların analiz edilebilmeleri için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Her kanal bir enerji değerine karşı gelmektedir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir. Enerji

kalibrasyonunun yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart bir kaynağa (kaynaklara) ihtiyaç vardır. Enerji ve verim kalibrasyonu için enerjileri 80–1400 keV arasında değişen ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co radyoizotop standart nokta kaynaklar kullanıldı. Çalışma süresince enerji kalibrasyonu periyodik olarak kontrol edildi. Tablo 6’da kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 6. Standart kaynakların özellikleri

İzotoplar	Enerji (keV)	Yarı-ömür (gün)	Salma hızı(%)
^{133}Ba	81	3830	33
^{109}Cd	88	464	3,72
^{57}Co	122,1	271	86
^{57}Co	136,5	271	11
^{133}Ba	276,4	3830	6,9
^{133}Ba	302,8	3830	19
^{133}Ba	356	3830	62
^{133}Ba	383,8	3830	8,7
^{22}Na	511	946	180
^{137}Cs	661,6	11022	85
^{54}Mn	834,8	313	100
^{60}Co	1173,2	1922	100
^{22}Na	1274,5	946	100
^{60}Co	1332,5	1922	100

Dedektör yardımı ile enerji kalibrasyonu için standart kaynağın spektrumu elde edilerek enerjilerin hangi kanallara karşılık geldiği tespit edildi. Enerjinin kanallara göre değişim grafiği Şekil 13’te gösterilmiştir.



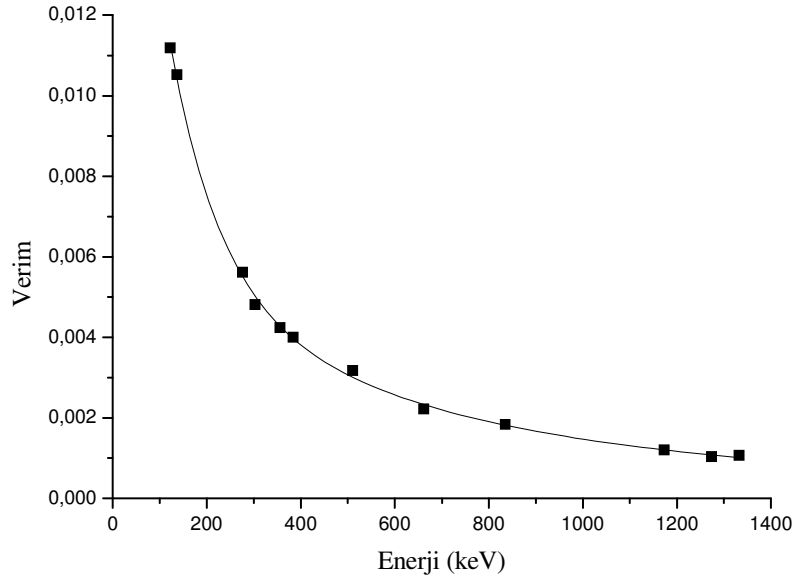
Şekil 13. Enerji-Kanal grafiği

2.5.3.2. Verim Kalibrasyonu

Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların sayısının, dedektöre gelen fotonların sayısına oranı yada dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır. Dedektörün saydığı gama sayımlarının gerçek değerini bulabilmek için dedektöre ait verim düzeltmesinin yapılması gerekir. İlgilenilen enerjilerdeki dedektör verimi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\varepsilon = \frac{s}{(I_{\gamma}) \cdot N \cdot t} \quad (40)$$

Burada HPGe dedektörünün ilgilenilen gama enerjisindeki verimi ε , pikin net alanı s , sayma süresi t , gama ışınının salma hızı I_{γ} ve N kullanılan standart kaynağın sayım günündeki aktivitesidir. Böylece farklı gama enerjileri için hesaplanan ε değerlerine karşılık gelen enerji verim eğrisi elde edilmiştir (Şekil 14). Verimin güvenilirliği Uluslararası Atom Enerji kurumunun (IAEA- 375) nolu referans materyali ile periyodik olarak test edilmiştir.



Şekil 14. Enerji-Verim eğrisi

2.5.4. Spektrumların Alınması

Radyoaktif dengenin sağlanması için bir aylık bekleme süresinden sonra ölçümlere geçildi. Sayımlarda kullanılan HPGe dedektörünün besleme voltajı 3600 V'tur. Sayım programı olarak Genie-2000 kullanıldı. Numuneler, dedektörün hemen önündeki kurşunla kaplı numune odasına konuldu. Numune sayım süresi 50000 s olarak seçildi. Bu süre sonunda numunelerden yayınlanan radyoaktif izotoplara ait spektrumlar elde edildi.

2.5.4.1. Pik Belirleme ve Değerlendirme

Spektrumdaki her bir pik için ilgili alan bölgeleri seçilerek en küçük hataya sahip net alanı verecek şekilde pik alanı işaretlendi. Daha sonra kalibrasyon katsayıları bilgisayar programına verilerek piklerin merkez kanalına karşılık gelecek enerji değerleri bulundu.

Tablo 7'de ^{238}U (^{226}Ra) ve ^{232}Th serileri ile ^{40}K için alınan enerjiler ve salma hızları gösterilmiştir. ^{238}U (^{226}Ra) serisi için ^{214}Pb (295,2 keV), ^{214}Pb (352,0 keV) ve ^{214}Bi (609,4 keV) enerjilerindeki, ^{232}Th serisi için ^{212}Pb (238,6 keV), ^{208}Tl (583,1 keV), ^{228}Ac (911,1 keV) enerjilerindeki piklerinin alanları ve ^{40}K için (1460,8 keV) enerjisindeki pikin alanı alınmıştır.

Tablo 7. Aktivitesi hesaplanan radyoaktif çekirdekler ve salma hızları

İzotop		Gama	Salma hızı (%)
²³⁸ U	²¹⁴ Pb	295,2	18,2
	²¹⁴ Pb	352,0	35,1
	²¹⁴ Bi	609,4	44,6
²³² Th	²¹² Pb	238,6	43,5
	²⁰⁸ Tl	583,1	30,0
	²²⁸ Ac	911,1	26,6
⁴⁰ K		1460,8	10,7

2.5.4.2. Aktivite Hesabı

Piklerin altında kalan net alanlar toplam alandan background çıkarılarak elde edilen sayma sayılarının toplamıdır. Saniyedeki sayma (cps), pik altında kalan alanın pik elde etmek için geçen süreye bölümüdür. Dedektör verimi de hesaba katılarak aktivite için,

$$A = \frac{s}{(I_{\gamma}) \cdot w \cdot t \cdot \epsilon} \quad (41)$$

dır. Burada A(Bq/kg) aktivite, s net alan, I_{γ} gama ışınının salma hızı, w kg olarak numune miktarı ve ϵ verim'dir.

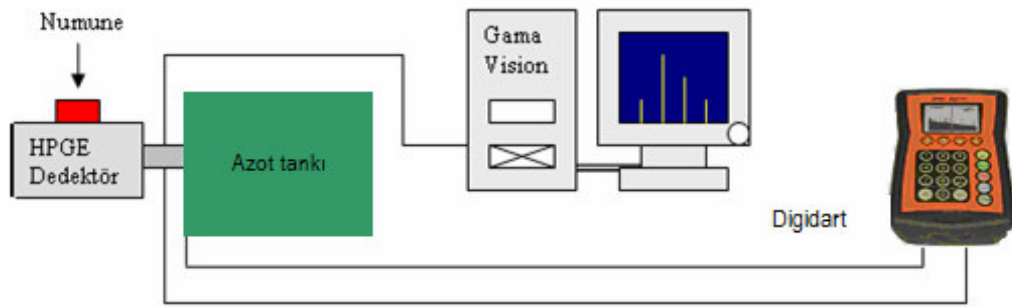
2.6. Kütle Soğurma Katsayısı Ölçümleri

2.6.1. Deney Sistemi

Numunelerin deneysel kütle soğurma katsayıları Ortek marka GEM55P4 Model HPGe dedektörü kullanılarak yapılmıştır. HPGe dedektörü özden yarı iletkenlik prensibine göre çalışan yarıiletken kristalden oluşmaktadır. Özden yarıiletken, içerisine yapay safsızlıkların bulunmadığı bir çeşit yarıiletkendir. HPGe dedektörde cm^3 te yaklaşık olarak 10^{10} safsızlık atomu vardır. Özden yarıiletkenler için elektron ve delik oranı yaklaşık 1'dir.

HPGe dedektörü çalıştırılırken, karakteristik özelliği gereğince yarıiletken kristal düşük sıcaklıklarda tutulmaktadır. Çünkü düşük sıcaklıklarda tutulursa termal gürültü

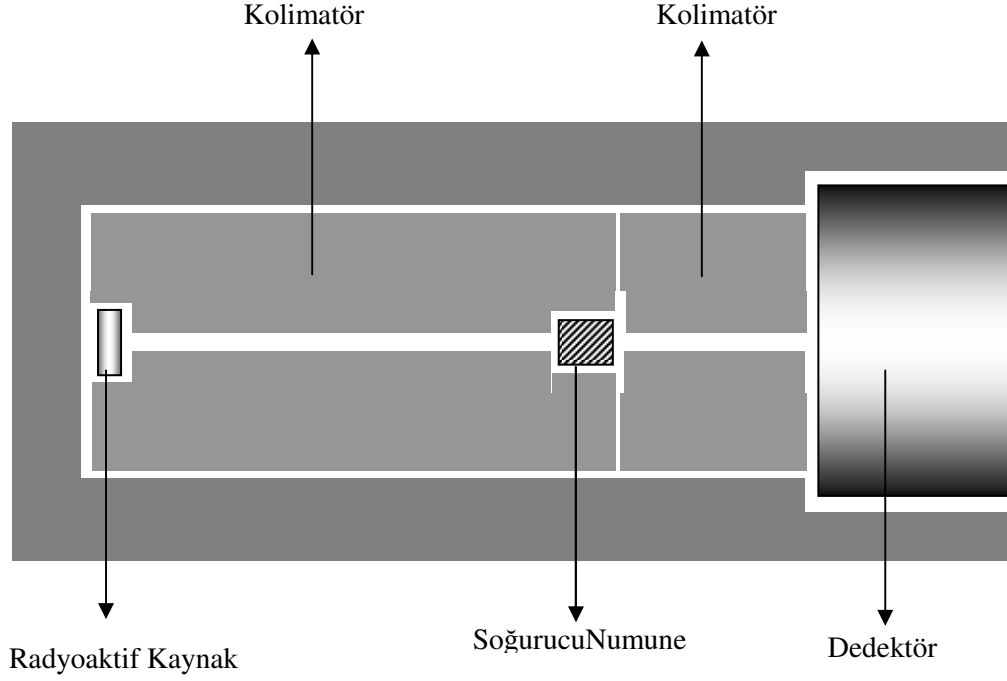
azalmakta bu da piklerin düzgün oluşmasına neden olmaktadır. HPGe dedektörü %55 relatif verime sahip olup 1700 voltta çalışmaktadır. Enerji rezülosyonu (FWHM) ^{60}Co kaynağı için 1332 keV'de 1,9 keV'dir. Şekil 15'de deneysel sistem verilmekte olup, önyükseltici, yüksek voltaj kaynağı, analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA) bir sistemde bulunup aynı zamanda dedektörün portatif olarak kullanılmasına imkan vermektedir. Alınan ölçümler Gama Vision yazılım programı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 15. Soğurma ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin genel görünüşü

Türkiye'de kullanılan bazı inşaat malzemelerinin, çeşitli enerjilerdeki gama ışınlarını soğurma katsayıları Şekil 16'da gösterilen deney düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Toz haline getirilen inşaat malzemeleri preslenip 13 mm çapında tabletler haline getirilerek soğurucu numuneler elde edildi. Bu malzemelerin kütle soğurma katsayılarını deneysel olarak belirlemek için, enerjileri 80-1400 keV arasında değişen ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co radyoaktif nokta kaynaklar kullanılmıştır. Bu kaynakların saldıdığı gama ışınlarının paralel bir demet halinde dedektöre gelmesi, istenmeyen saçılmaları engellemek ve numune ve kaynakları yerleştirmek için her biri üzerinde 1 mm çaplı delikler bulunan kurşun kolimatörler kullanılmıştır. Deneysel düzenek ve numuneleri hazırladıktan sonra ölçüm işlemine geçilmiştir. Ölçümler önce düzenekte numune yok iken radyoaktif kaynaktan yayınlanan gama ışınları ile 10000 s süre için dörder defa gerçekleştirildi. Daha sonra aynı işlem numuneler kaynak ile dedektör arasına yerleştirilerek yapıldı. Bu deneyler sonucunda elde edilen ilgili piklerin altında kalan alanlar kullanılarak numuneye gelen ve numuneden geçen gama ışınlarının şiddetleri bulundu. Bu veriler kullanılarak malzemelerin kütle soğurma katsayıları deneysel olarak hesaplandı.

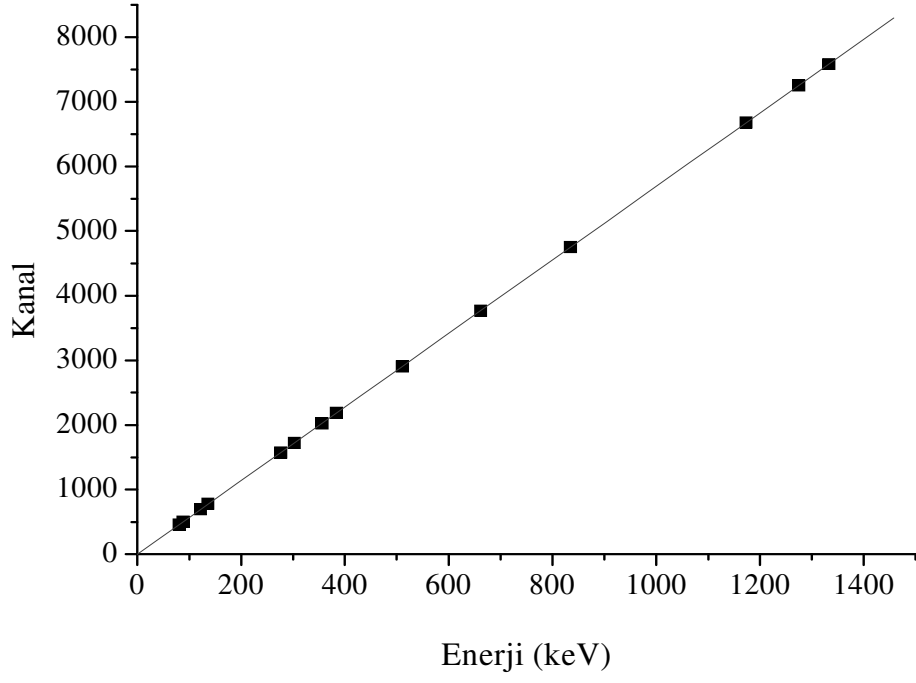
Kütle soğurma katsayılarının teorik değerleri denklem 39'u temel alan Berger ve Hubbell tarafından geliştirilen XCOM programı ile hesaplandı (Berger ve Hubbel, 1999).



Şekil 16. Gama ışınları soğurma ölçümleri için kullanılan deney geometrisi

2.6.1.1. Enerji Kalibrasyonu

GEM55P4 Model HPGe dedektörünün enerji kalibrasyonu için enerjileri 80–1400 keV arasında değişen ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ve ^{60}Co radyoizotoplarının standart nokta kaynaklar kullanıldı. Tablo 7’de kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir. Şekil 17’de bu kaynaklarla elde edilen enerji kanal grafiği çizilmiştir.

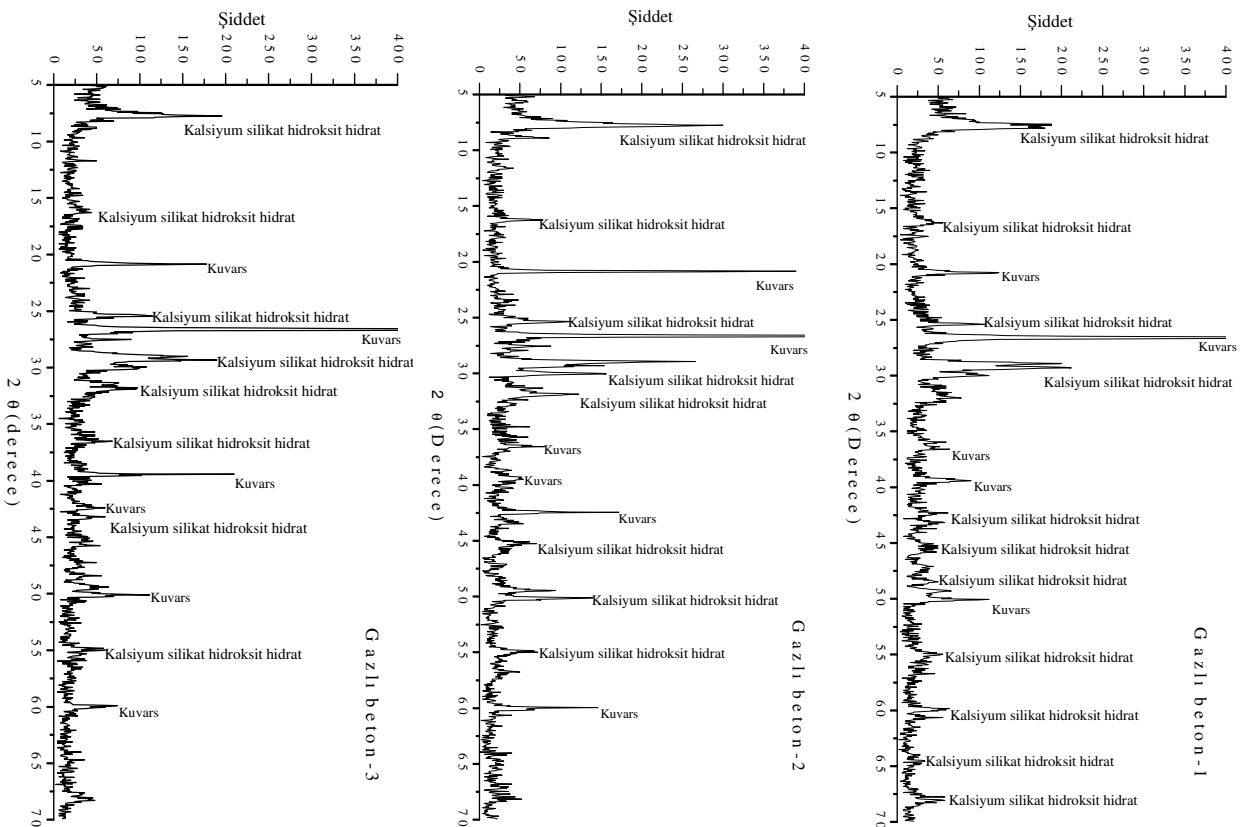


Şekil 17. Enerji-Kanal grafiği

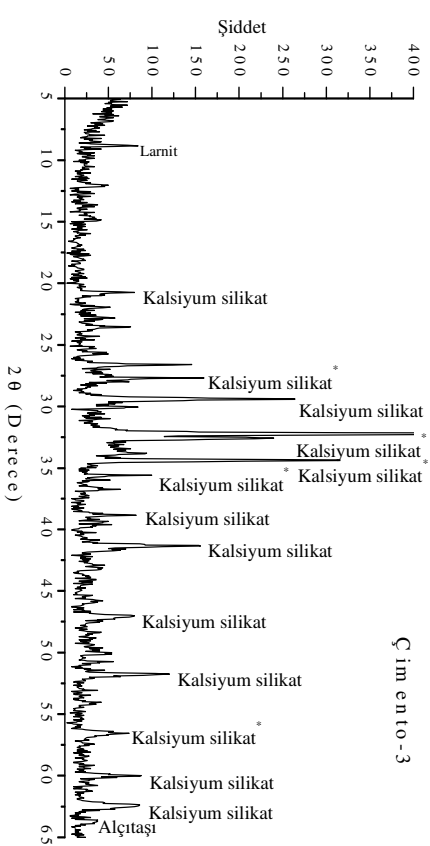
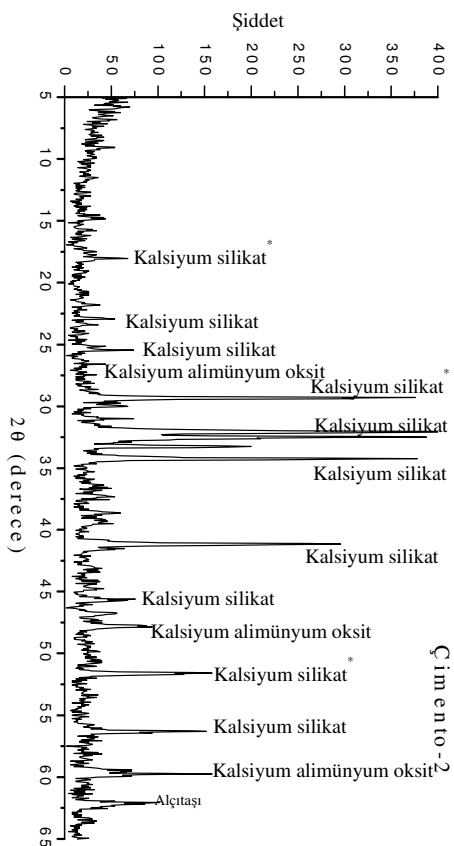
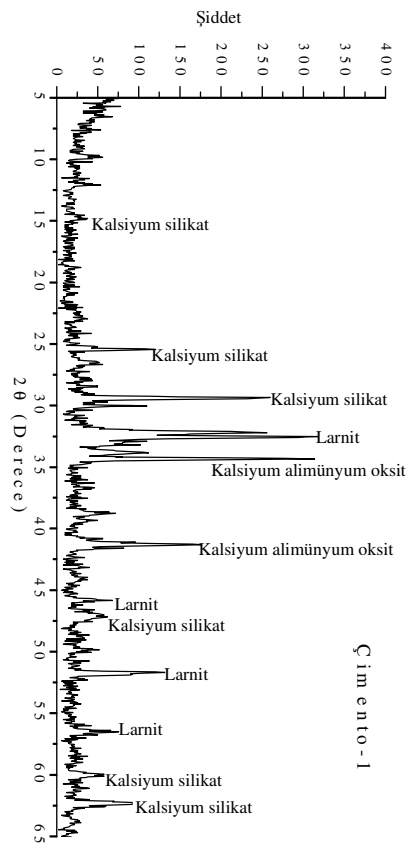
3. BULGULAR

3.1. Yapısal Analiz

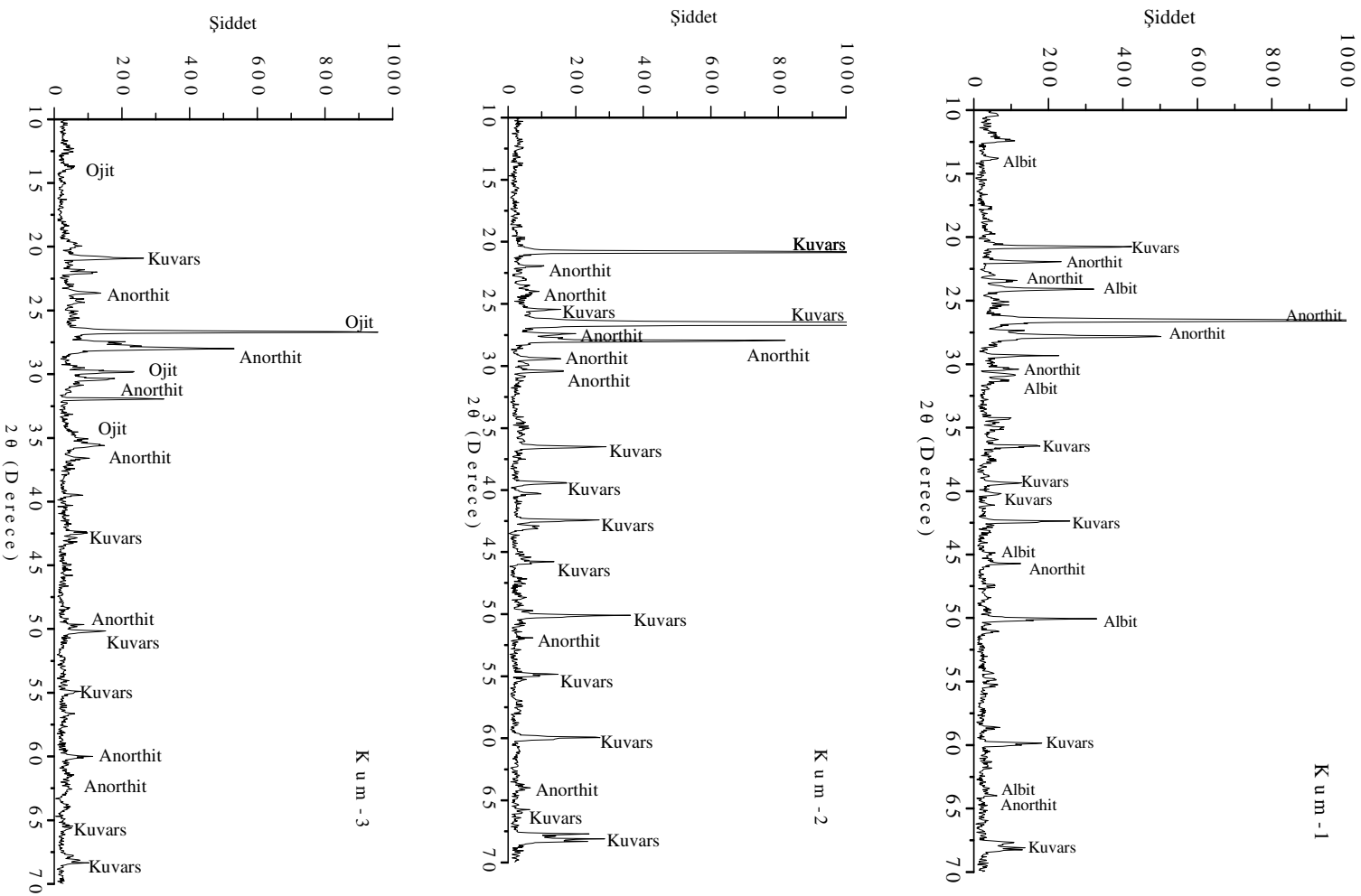
Türkiye’de inşaat malzemesi olarak kullanılan bazı gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerinin X-ışını kırınım desenleri Şekil 18-25’te ve bu desenlerden elde edilen mineraller ve kimyasal formüller Tablo 8’de özetlenmiştir.



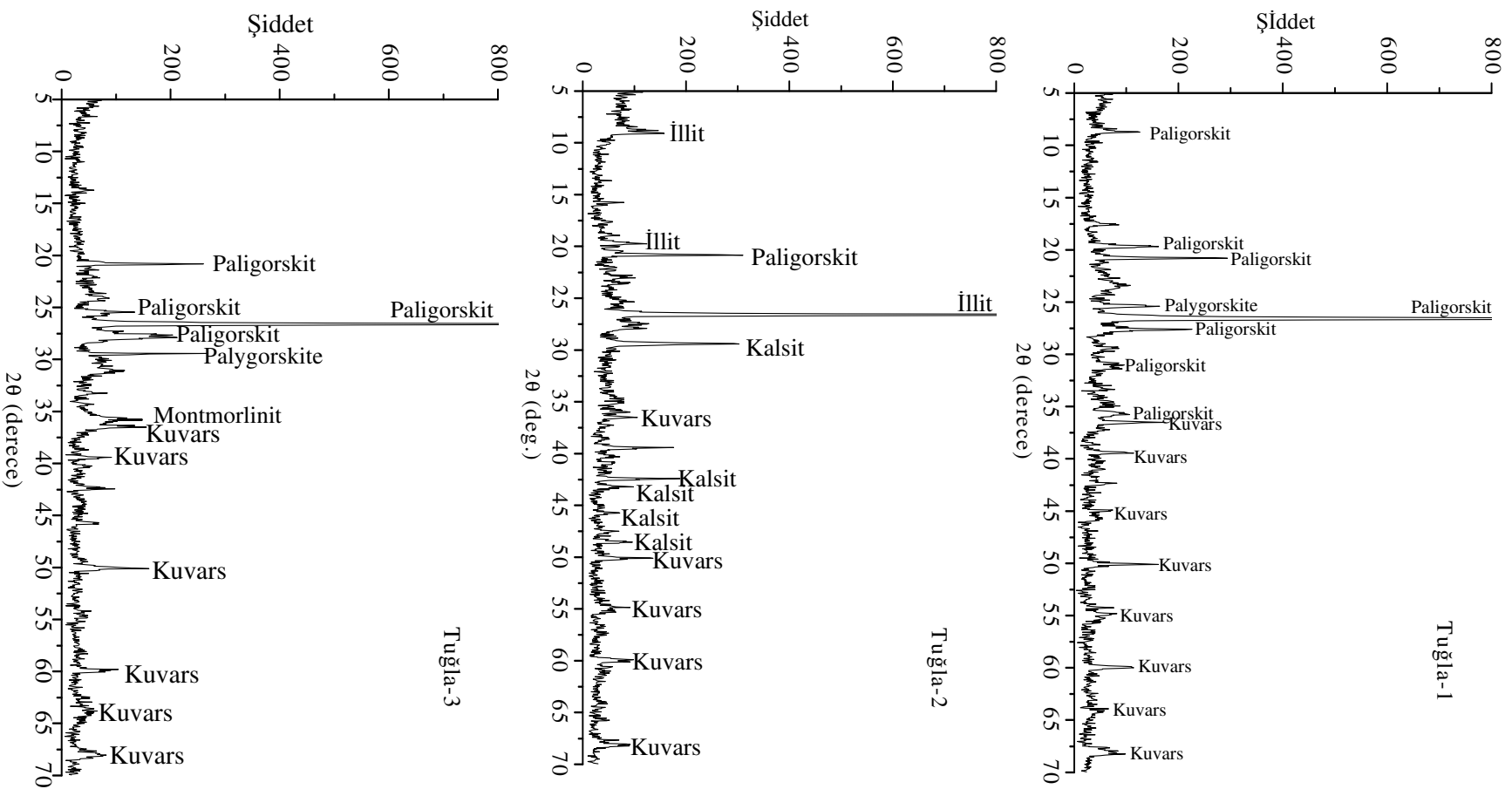
Şekil 18. Gazlı beton numunelerinin X-ışını kırınım desenleri



Şekil 19. Çimento numunelerinin X-ışın kırınım desenleri

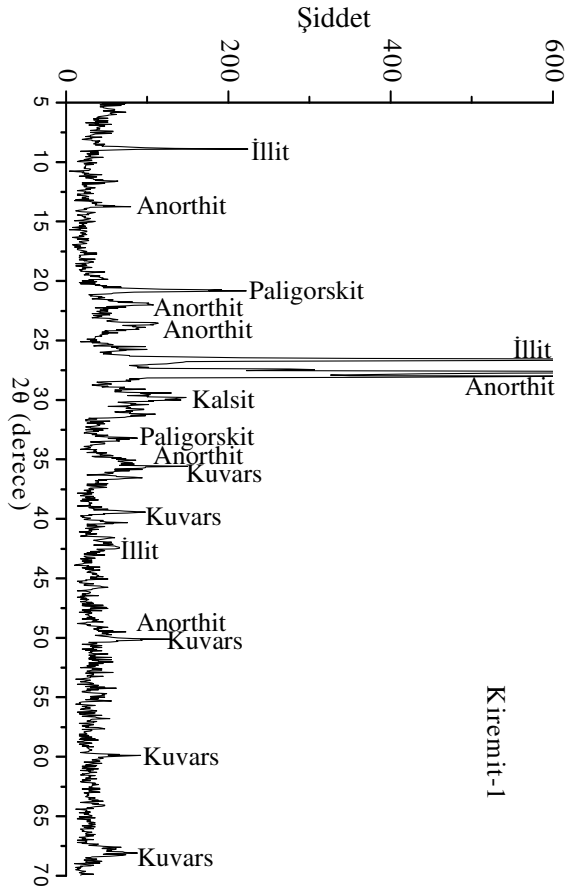
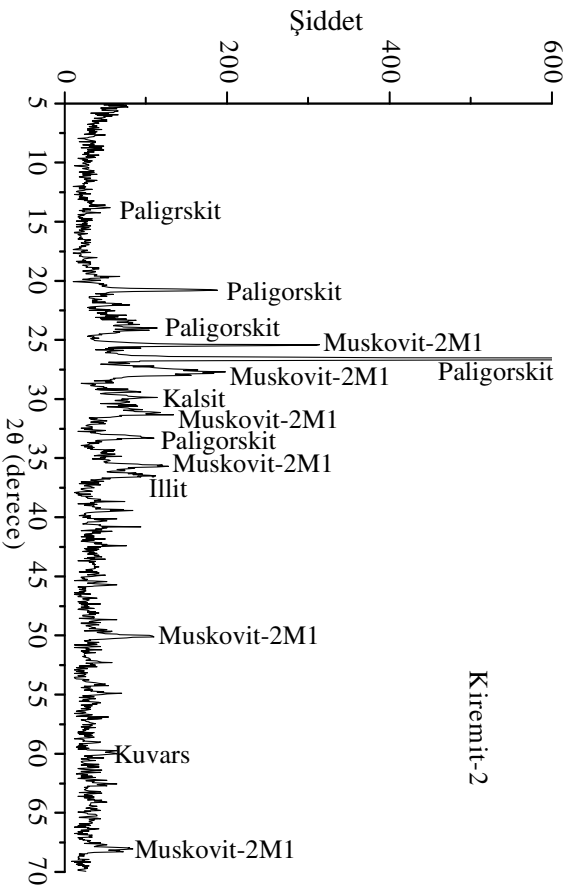
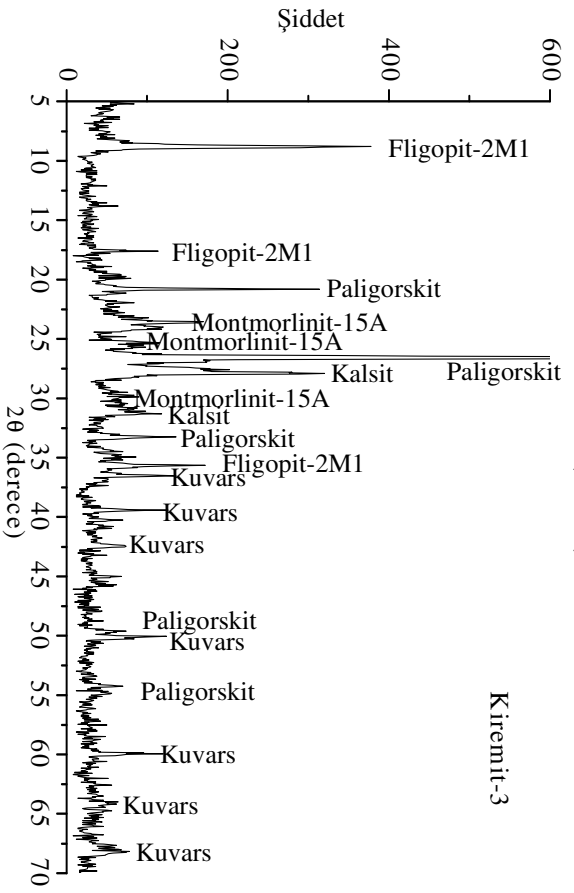


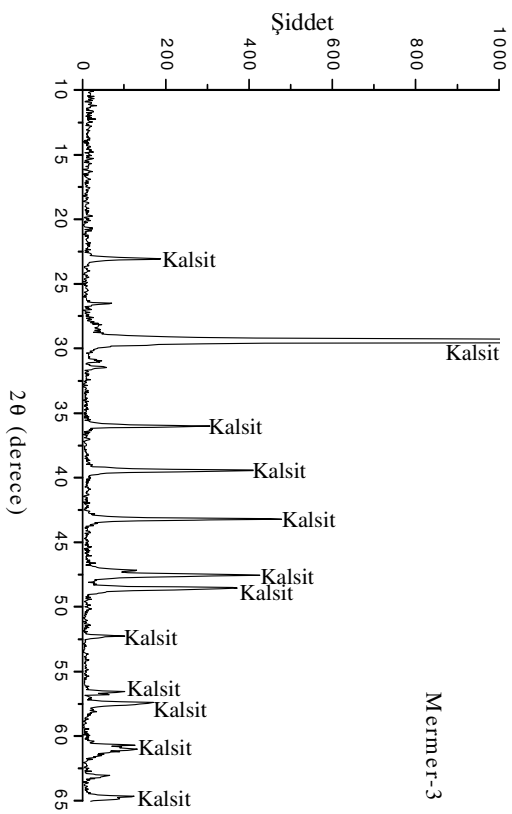
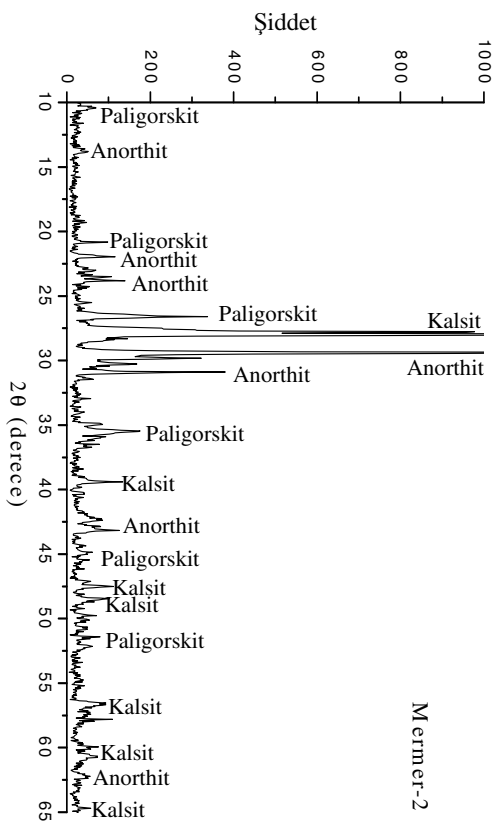
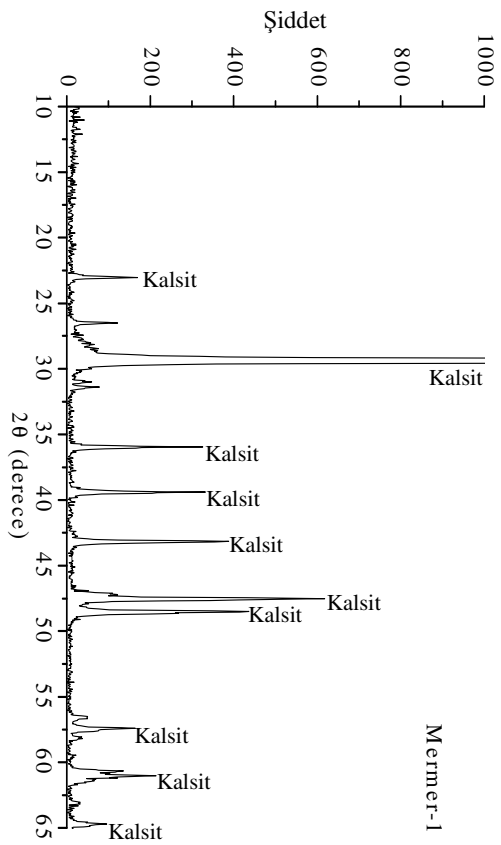
Şekil 20. Kum numunelerinin X-ışını kırınım desenleri



Şekil 21. Tuğla numunelerinin X-ışın kırınım desenleri

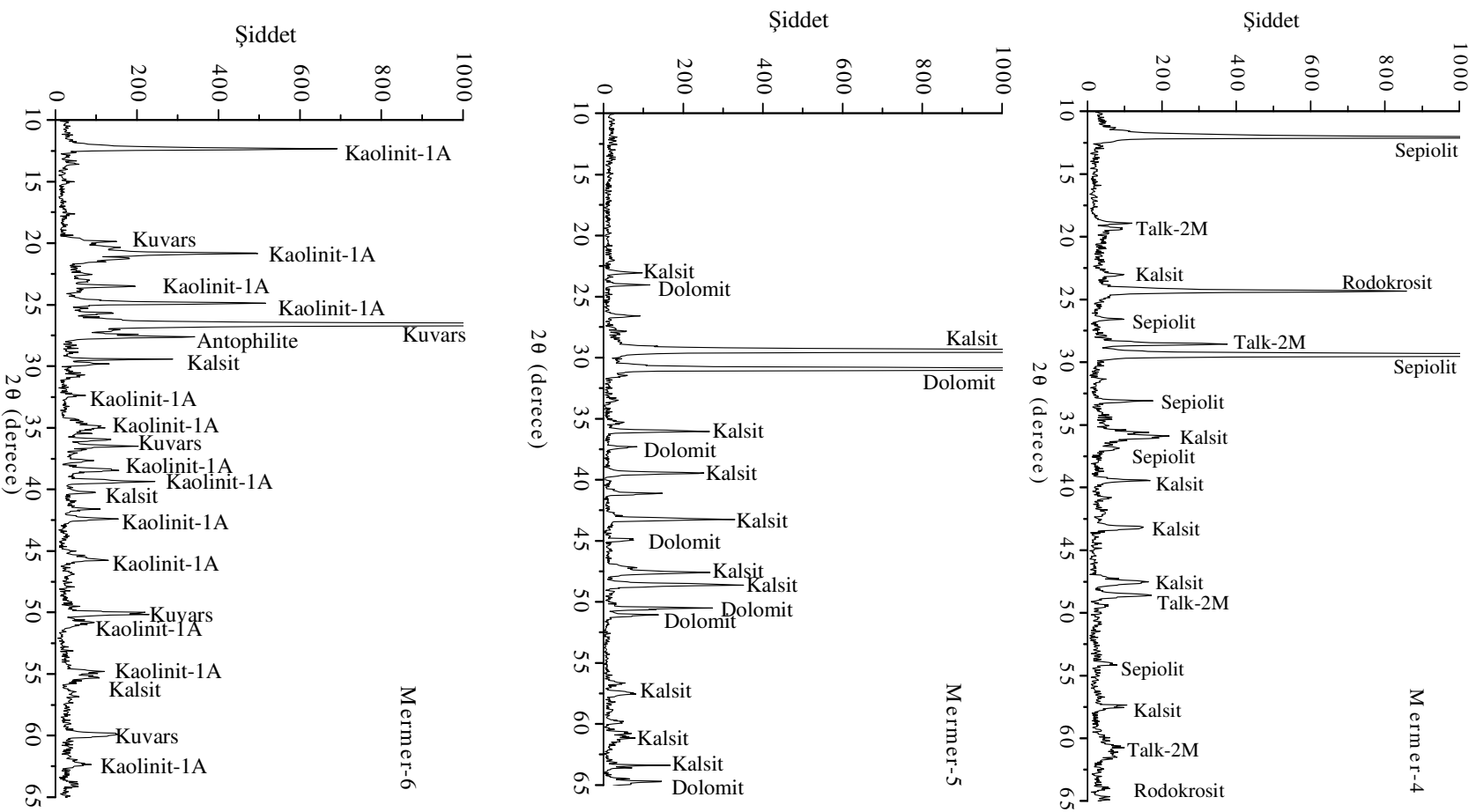
Şekil 22. Kiremit numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

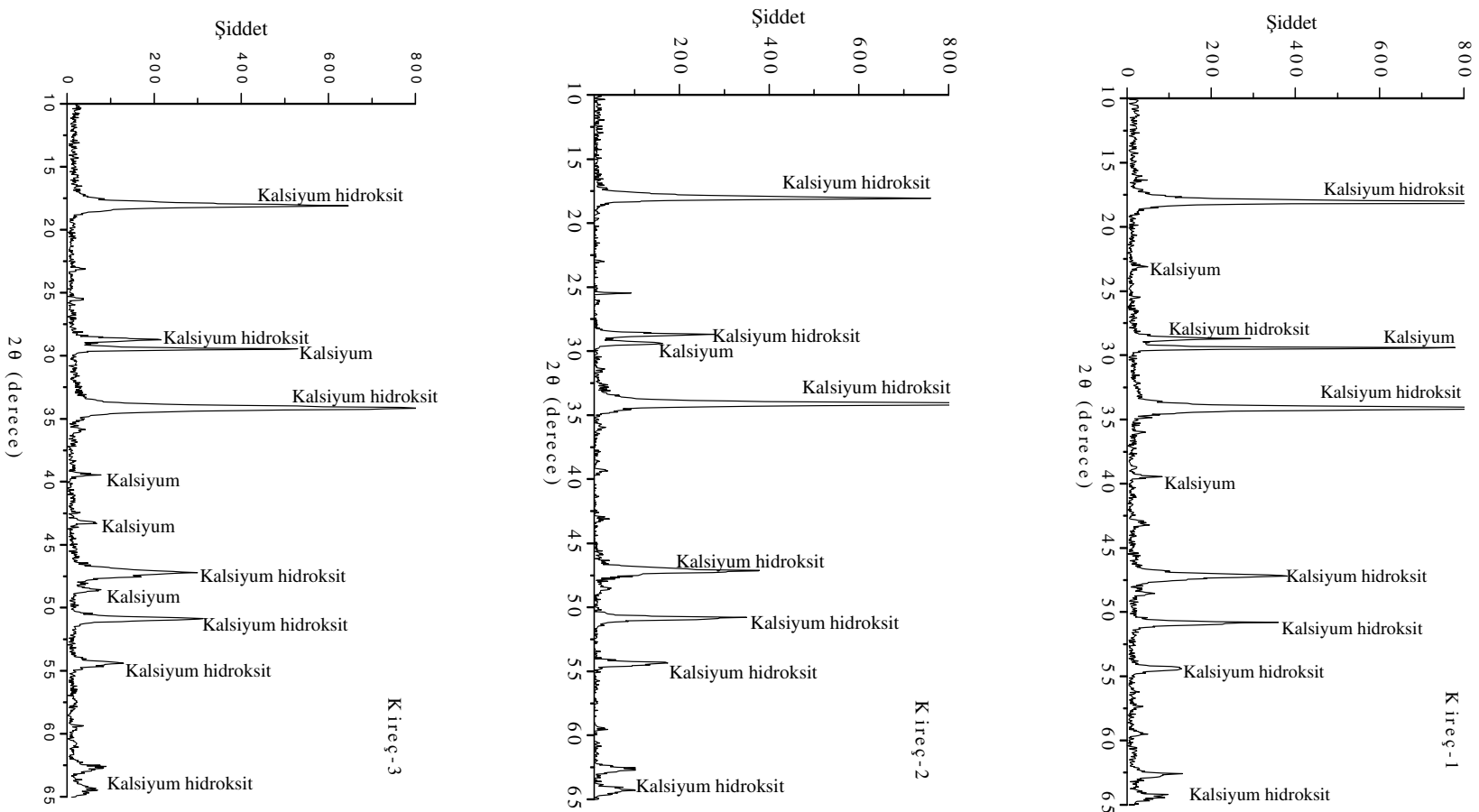




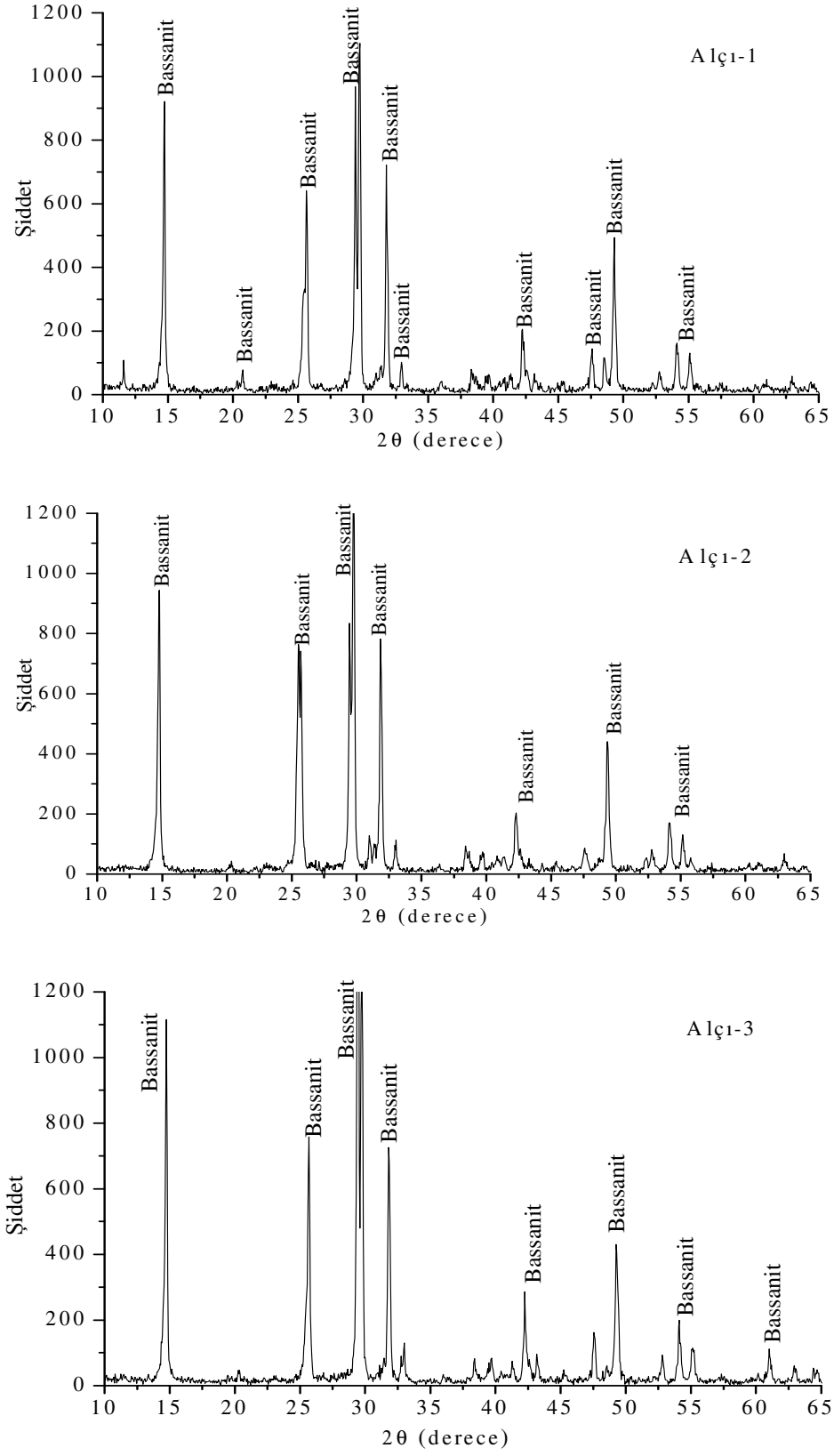
Şekil 23. Mermer numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

Şekil 23'ün devamı





Şekil 24. Kireç numunelerinin X-ışını kırınım desenleri



Şekil 25. Alçı numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

Tablo 8. X-Işını kırınım desenleriyle belirlenen mineraller

İnşaat Malzemesi	Mineral Adı	Kimyasal Formülü
Gazlı beton	Kuvars	SiO ₂
	Kalsiyum silikat hidroksit hidrat	Ca _{4.5} Si ₆ O ₁₅ (OH) ₃ 2H ₂ O
Çimento	Kalsiyum silikat	Ca ₂ SiO ₄ , Ca ₃ SiO ₅
	Kalsiyum alimünyum oksit	Ca ₃ Al ₂ O ₆
	Larnit	CaSO ₄ 2H ₂ O
Kum	Kuvars	SiO ₂
	Anorthit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
	Ojit	Ca(Fe, Mg)Si ₂ O ₆
	Kalsit	CaCO ₃
	Albit	NaAlSi ₃ O ₈
Tuğla	Kuvars	SiO ₂
	Paligorskit	Mg ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ 8H ₂ O
	Montmorlinit	Ca _{0.2} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	İllit	KAl ₂ (Si ₃ AlO ₁₀)(OH) ₂
Kiremit	Kuvars	SiO ₂
	Paligorskit	Mg ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ 8H ₂ O
	Montmorlinit-2M1	Ca _{0.2} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ 4(OH) ₂
	İllit-2M1	(K, H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂
	Fligopit-2M1	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Muskovit-2M1	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂
Mermer	Kalsit	CaCO ₃
	Kuvars	SiO ₂
	Paligorskit	Mg ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ 8H ₂ O
	Anorthit	(Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈
	Talk-2M	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Sepiolit	Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ 6H ₂ O
	Kaolinit-1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Rodokrosit	MnCO ₃
Kireç	Kalsiyum hidroksit	Ca(OH) ₂
	Kalsit	CaCO ₃
Alçı	Bassanit	CaSO ₄ 0.5H ₂ O

3.2. Kimyasal Analiz

Numunelerin kimyasal analizleri gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, alçı ve kireç için sırasıyla Tablo 9-16'da verilmiştir. Gazlı beton, çimento, kum, tuğla ve kiremit numunelerinde % olarak çoğunlukla Al_2O_3 , SiO_2 , CaO ve Fe_2O_3 , mermer numunelerinde Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SO_3 ve CaO , kireç numunelerinde CaO ve alçı numunelerinde SO_3 ve CaO olduğu tespit edilmiştir. Diğer bileşik ve elementler ppm mertebesindedir. Ayrıca ^{226}Ra ve ^{232}Th aktiflik konsantrasyonlarından yararlanarak ppm olarak U ve Th elementlerinin konsantrasyonları hesaplanmıştır.

Tablo 9. Gazlı beton numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
MgO	%	<DL	1,39	1,25
Al_2O_3	%	4,39	9,27	6,64
SiO_2	%	40,5	47,9	43,7
SO_3	%	2,34	6,48	4,32
K_2O	%	0,74	2,02	1,55
CaO	%	23,7	31,5	27,7
TiO_2	%	0,13	0,23	0,16
V_2O_5	ppm	130	367	203
Cr_2O_3	ppm	144	367	238
MnO	ppm	123	293	199
Fe_2O_3	%	2,36	3,06	2,72
NiO	ppm	<DL	128	82
CuO	ppm	20	52	32
ZnO	ppm	22	59	37
Rb	ppm	14	37	25
SrO	ppm	488	670	546
ZrO_2	ppm	<DL	347	189
BaO	ppm	127	357	181
La_2O_3	ppm	<DL	44	15
PbO	ppm	5	15	10
Th*	ppm	4	11	7
U*	ppm	3	12	7

DL: Dedeksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 10. Çimento numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
Na ₂ O	%	<DL	2,11	1,23
MgO	%	<DL	3,71	1,70
Al ₂ O ₃	%	7,69	15,46	11,95
SiO ₂	%	25,93	43,79	35,12
SO ₃	%	2,57	6,19	4,16
K ₂ O	%	0,33	1,58	0,99
CaO	%	30,90	56,33	42,0
TiO ₂	%	0,11	0,92	0,39
V ₂ O ₅	ppm	59	473	185
Cr ₂ O ₃	ppm	32	501	150
MnO	ppm	42	3900	1005
Fe ₂ O ₃	%	0,18	4,87	2,59
NiO	ppm	<DL	307	63
CuO	ppm	5	179	39
ZnO	ppm	5	398	87
Rb	ppm	<DL	86	36
SrO	ppm	356	1477	785
ZrO ₂	ppm	<DL	240	124
BaO	ppm	239	1767	789
La ₂ O ₃	ppm	<DL	136	58
CeO	ppm	<DL	198	80
PbO	ppm	<DL	164	26
Th*	ppm	3	28	10
U*	ppm	1	8	4

DL=Dedeksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 11. Kum numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
Na ₂ O	%	ND	2,83	1,28
MgO	%	1,82	6,37	3,89
Al ₂ O ₃	%	12,28	18,42	15,25
SiO ₂	%	57,0	72,4	64,6
SO ₃	ppm	ND	3254	648
K ₂ O	%	0,83	1,65	1,37
CaO	%	2,87	18,06	8,22
TiO ₂	%	0,37	0,62	0,50
V ₂ O ₅	ppm	54	208	140
Cr ₂ O ₃	ppm	209	2930	903
MnO	ppm	380	848	631
Fe ₂ O ₃	%	2,18	5,23	3,98
NiO	ppm	44	477	213
CuO	ppm	18	42	27
ZnO	ppm	31	77	53
As ₂ O ₃	ppm	4	29	13
Br	ppm	ND	44	10
Rb	ppm	30	75	51
SrO	ppm	167	588	343
Y ₂ O ₃	ppm	18	27	21
ZrO ₂	ppm	142	450	292
BaO	ppm	452	922	721
La ₂ O ₃	ppm	68	104	84
CeO	ppm	86	165	114
Nd ₂ O ₃	ppm	ND	46	29
PbO	ppm	11	34	23
Th*	ppm	3	33	7
U*	ppm	1	8	4

DL=Dedeksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 12. Tuğla numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
Na ₂ O	%	0,88	1,56	1,17
MgO	%	1,78	4,65	3,84
Al ₂ O ₃	%	17,2	25,71	20,40
SiO ₂	%	55,75	59,86	57,88
SO ₃	%	1,49	2,67	2,01
Cl	ppm	<DL	107	27
K ₂ O	%	1,62	2,55	2,00
CaO	%	3,45	10,43	5,95
TiO ₂	%	0,52	0,88	0,68
V ₂ O ₅	ppm	96	224	159
Cr ₂ O ₃	ppm	129	442	348
MnO	ppm	552	1046	786
Fe ₂ O ₃	%	4,56	6,56	5,25
NiO	ppm	54	355	221
CuO	ppm	26	58	39
ZnO	ppm	69	92	80
As ₂ O ₃	ppm	27	170	76
Rb	ppm	74	145	108
SrO	ppm	189	654	322
Y ₂ O ₃	ppm	23	40	31
ZrO ₂	ppm	233	331	280
BaO	ppm	581	1099	894
La ₂ O ₃	ppm	88	201	134
CeO	ppm	135	264	202
Nd ₂ O ₃	ppm	38	62	52
PbO	ppm	<DL	16	8
Th*	ppm	3	23	9
U*	ppm	1	10	3

DL=Deleksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 13. Kiremit numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
Na ₂ O	%	<DL	1,69	0,82
MgO	%	2,52	3,59	2,94
Al ₂ O ₃	%	17,92	22,39	19,63
SiO ₂	%	54,99	63,16	59,14
SO ₃	%	0,77	6,17	2,37
K ₂ O	%	1,56	2,4	1,89
CaO	%	3,81	9,72	6,31
TiO ₂	%	0,47	0,78	0,63
V ₂ O ₅	ppm	137	214	169
Cr ₂ O ₃	ppm	144	297	222
MnO	ppm	672	872	754
Fe ₂ O ₃	%	3,97	5,81	4,96
NiO	ppm	106	158	134
CuO	ppm	37	54	42
ZnO	ppm	74	95	87
As ₂ O ₃	ppm	13	76	44
Rb	ppm	72	125	103
SrO	ppm	225	447	321
Y ₂ O ₃	ppm	22	35	27
ZrO ₂	ppm	207	315	243
Cs	ppm	<DL	51	13
BaO	ppm	662	1171	907
La ₂ O ₃	ppm	81	118	100
CeO	ppm	115	191	147
Nd ₂ O ₃	ppm	35	56	44
PbO	ppm	12	27	19
Th*	ppm	2	19	8
U*	ppm	1	7	3

DL=Deleksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 14. Mermer numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
Na ₂ O	%	<DL	2,32	0,23
MgO	%	<DL	24,47	4,22
Al ₂ O ₃	%	0,07	22,44	10,84
SiO ₂	%	1,48	71,54	20,57
SO ₃	ppm	<DL	1402	140
K ₂ O	ppm	<DL	1233	227
CaO	%	0,59	75,26	53,35
TiO ₂	ppm	<DL	7508	1230
V ₂ O ₅	ppm	<DL	237	46
Cr ₂ O ₃	ppm	<DL	1337	230
MnO	ppm	63	1088	378
Fe ₂ O ₃	%	0,13	8,59	2,11
NiO	ppm	<DL	1354	159
CuO	ppm	10	549	124
ZnO	ppm	12	287	81
As ₂ O ₃	ppm	<DL	10	3
Rb	ppm	<DL	91	17
SrO	ppm	80	408	267
Y ₂ O ₃	ppm	<DL	14	3
ZrO ₂	ppm	<DL	254	25
BaO	ppm	<DL	983	146
La ₂ O ₃	ppm	<DL	110	18
CeO ₂	ppm	<DL	147	22
PbO	ppm	<DL	41	14
Th*	ppm	3	23	6
U*	ppm	0,3	10	1

DL=Deleksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 15. Kireç numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
MgO	%	<DL	2,03	0,76
Al ₂ O ₃	%	<DL	6,69	3,14
SO ₃	%	0,78	0,99	0,89
Cl	%	<DL	0,24	0,06
CaO	%	78,75	81,83	79,94
V ₂ O ₅	ppm	376	1545	7112
Cr ₂ O ₃	ppm	<DL	37	9
MnO	ppm	<DL	138	72
Fe ₂ O ₃	ppm	224	2100	1185
NiO	ppm	<DL	612	153
CuO	ppm	<DL	4	2
ZnO	ppm	3	15	9
As ₂ O ₃	ppm	<DL	3	1
Br	ppm	<DL	12	3
Rb	ppm	<DL	4	1
SrO	ppm	341	744	483
ZrO ₂	ppm	<DL	29	7
PbO	ppm	<DL	3	2
Th [*]	ppm	1	13	5
U [*]	ppm	1	6	3

DL=Deleksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

Tablo 16. Alçı numunelerinin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama
SO ₃	%	58,84	63,01	60,44
CaO	%	35,98	40,65	38,76
Cr ₂ O ₃	ppm	<DL	129	129
Fe ₂ O ₃	ppm	209	629	467
CuO	ppm	5	7	6
ZnO	ppm	3	5	4
SrO	ppm	1568	4550	3208
Th *	ppm	1	8	3
U *	ppm	0,4	4	1

DL=Dedeksiyon Limiti, * Hesaplanan değer

3.3. Radyoaktiflik Ölçümleri

Bina içinde insanların radyasyona maruz kaldığı önemli radyasyon kaynaklarından biri bina materyallerindeki doğal radyoaktif çekirdeklerdir. Bu radyasyon, bina materyallerindeki ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'dan kaynaklanmaktadır. Gama spektroskopisi sisteminde HPGe dedektörünün kullanılmasıyla Türkiye'de inşaat malzemesi olarak kullanılan bazı gazlı beton, kum, çimento, tuğla, kiremit, mermer, alçı ve kireç numunelerinde ölçülen ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K radyoaktif çekirdeklerinin konsantrasyonları Tablo 17-24'te verilmiştir. Sonuçlar Bq/kg cinsinden ifade edilmiştir. Ölçümler neticesinde, yapay radyoaktif çekirdek olan ve muhtemelen nükleer silah denemeleri ve Chernobyl nükleer kazası sonrası ülkemize ulaşan ¹³⁷Cs radyoaktif çekirdeğine üç numune hariç rastlanmamıştır. Bu üç numunede de 10 Bq/kg civarında bir aktiflik konsantrasyon tespit edilmiştir.

Tablo 17. Gazlı beton numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

İller	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
İstanbul-1	133±10	23±2	179±7
İstanbul-2	66±5	43±4	407±17
Kocaeli	115±9	25±2	252±11
Yalova	130±11	34±3	138±6
Tekirdağ	44±3	23±2	475±24
Edirne	41±3	20±2	562±26
Gümüşhane	51±4	36±4	468±19
Trabzon	143±11	30±3	523±22
Gaziantep	47±4	28±3	344±17
Batman	74±6	23±2	466±21
Mardin	85±7	24±2	255±12
Siirt	67±4	21±2	474±20
Şanlıurfa	40±2	41±4	501±23
Ankara	53±4	15±1	193±81
Konya	97±9	27±3	607±27
Kırıkkale	102±8	26±3	514±22
Antalya	71±4	29±3	138±7
İzmir	119±10	41±4	414±18
Erzincan	84±7	29±4	380±15
Minimum	41	15	138
Maksimum	143	43	607
Ortalama	82	28	384

Tablo 17’de görüldüğü gibi gazlı beton numunelerindeki ortalama ^{226}Ra aktiflik konsantrasyonu 82 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Ortalama ^{232}Th aktiflik konsantrasyonu 28 Bq/kg olup minimum değeri 15 Bq/kg, maksimum değeri ise 43 Bq/kg’dir. ^{40}K aktiflik konsantrasyonu 138-607 Bq/kg arasında değişmektedir ve ortalama olarak 384 Bq/kg’lık bir aktiflik konsantrasyonuna sahiptir. Diğer numunelerden farklı olarak gazlı beton sadece belli illerden temin edilebilmiştir. Bu yüzden Türkiye haritası üzerinde bir indisleme yapılamamıştır.

Tablo 18. Çimento numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	24±1	80±4	51±16	16±1	69±5	37±15	119±5	453±23	296±110
Ege	27±2	102±9	68±23	31±2	113±10	51±29	165±6	624±25	353±160
Akdeniz	31±2	101±8	71±24	22±1	110±9	56±27	82±3	467±18	327±130
Karadeniz	14±1	80±4	44±20	25±1	62±3	37±10	163±6	695±28	361±160
İç Anadolu	14±1	87±3	50±22	25±1	46±3	34±7	264±9	433±18	324±60
Doğu Anadolu	27±2	54±3	38±11	17±1	37±2	25±7	167±7	299±13	253±52
Güney Doğu Anadolu	30±2	47±3	36±7	11±1	44±4	25±12	139±5	529±21	312±140
Türler									
CEM I	14±1	77±5	47±20	18±1	67±5	35±14	119±5	529±21	306±113
CEM II	25±2	89±6	48±17	17±1	83±6	37±14	137±5	695±26	320±112
CEM IV	14±1	102±9	52±26	11±1	113±10	45±31	208±8	769±28	391±147
CEM V	71±5	101±8	85±11	34±3	69±5	45±14	304±12	445±17	368±53
SDC	25±2	95±8	47±28	16±1	110±9	48±37	163±6	285±9	211±51
BPC	31±2	60±4	44±12	22±2	48±4	33±10	82±3	381±12	194±116
Minimum	14			11			82		
Maksimum	102			113			769		
Ortalama	52			40			324		
Standart Sapma	22			20			121		

Tablo 19. Kum numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	24±2	82±5	44±18	15±1	57±5	30±12	225±10	877±35	591±169
Ege	23±2	53±3	34±9	16±1	53±5	25±13	139±6	772±31	414±278
Akdeniz	21±1	96±7	39±26	10±1	133±12	29±42	150±5	955±37	360±268
Karadeniz	18±1	74±6	42±18	13±1	42±4	25±8	180±9	804±32	475±164
İç Anadolu	20±1	97±7	55±26	12±1	97±8	30±26	116±5	891±27	440±194
Doğu Anadolu	19±1	89±6	42±20	18±2	38±4	26±6	191±8	536±21	401±95
Güney Doğu Anadolu	17±1	73±4	41±21	10±1	27±3	18±6	204±8	477±19	348±83
Minimum	17			10			116		
Maksimum	97			133			955		
Ortalama	44			26			441		
Standart Sapma	20			18			188		

Tablo 20. Tuğla numunelerindeki ^{226}Ra ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	23±2	73±4	42±12	24±2	42±4	34±6	337±10	724±19	564±121
Ege	21±2	67±4	42±12	21±2	68±6	43±15	291±7	1060±25	691±226
Akdeniz	19±1	35±3	27±4	16±1	50±4	26±8	114±3	534±16	341±86
Karadeniz	16±1	48±3	30±9	18±2	57±5	35±10	250±7	916±25	400±138
İç Anadolu	20±2	56±4	34±11	13±1	79±6	41±19	201±6	870±21	523±189
Doğu Anadolu	16±1	117±6	42±27	26±2	56±5	36±9	320±12	718±16	448±117
Güney Doğu Anadolu	17±1	39±3	26±7	13±1	41±4	26±8	134±4	450±13	370±71
Minimum	16			13			114		
Maksimum	117			79			1060		
Ortalama	34			34			462		
Standart Sapma	14			13			175		

Tablo 21. Kiremit numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	22±2	57±5	34±13	22±2	47±4	35±7	220±7	659±18	408±196
Ege	25±2	92±8	45±20	27±2	43±4	37±5	376±11	774±20	555±139
Akdeniz	18±1	40±4	27±7	22±2	31±3	25±3	114±3	533±17	333±150
Karadeniz	20±2	57±5	32±10	24±2	68±6	33±12	301±11	596±15	414±84
İç Anadolu	13±1	62±5	32±16	9±1	75±6	33±21	129±4	870±22	378±246
Doğu Anadolu	20±2	58±6	34±13	24±2	56±5	34±11	320±9	586±15	454±83
Güney Doğu Anadolu	21±2	32±3	28±2	20±2	30±3	25±4	339±10	523±14	425±51
Minimum	13			9			114		
Maksimum	92			75			870		
Ortalama	34			33			429		
Standart Sapma	14			12			161		

Tablo 22. Mermer numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	10±1	39±4	20±8	4±1	20±2	11±4	55±2	205±8	105±46
Ege	10±1	28±3	16±4	4±1	18±2	10±4	42±2	125±5	82±26
Akdeniz	14±1	39±2	20±7	5±1	15±1	9±3	60±3	170±3	102±41
Karadeniz	16±1	92±17	33±20	5±1	122±18	25±33	94±4	535±19	201±109
İç Anadolu	10±1	46±4	26±10	4±1	71±7	19±21	57±3	676±30	273±266
Doğu Anadolu	15±1	34±3	22±7	4±1	17±2	10±4	55±2	161±5	110±39
Güney Doğu Anadolu	13±1	30±3	21±7	9±1	22±2	12±4	28±1	142±5	68±46
Minimum	10			4			28		
Maksimum	92			122			676		
Ortalama	23			15			149		

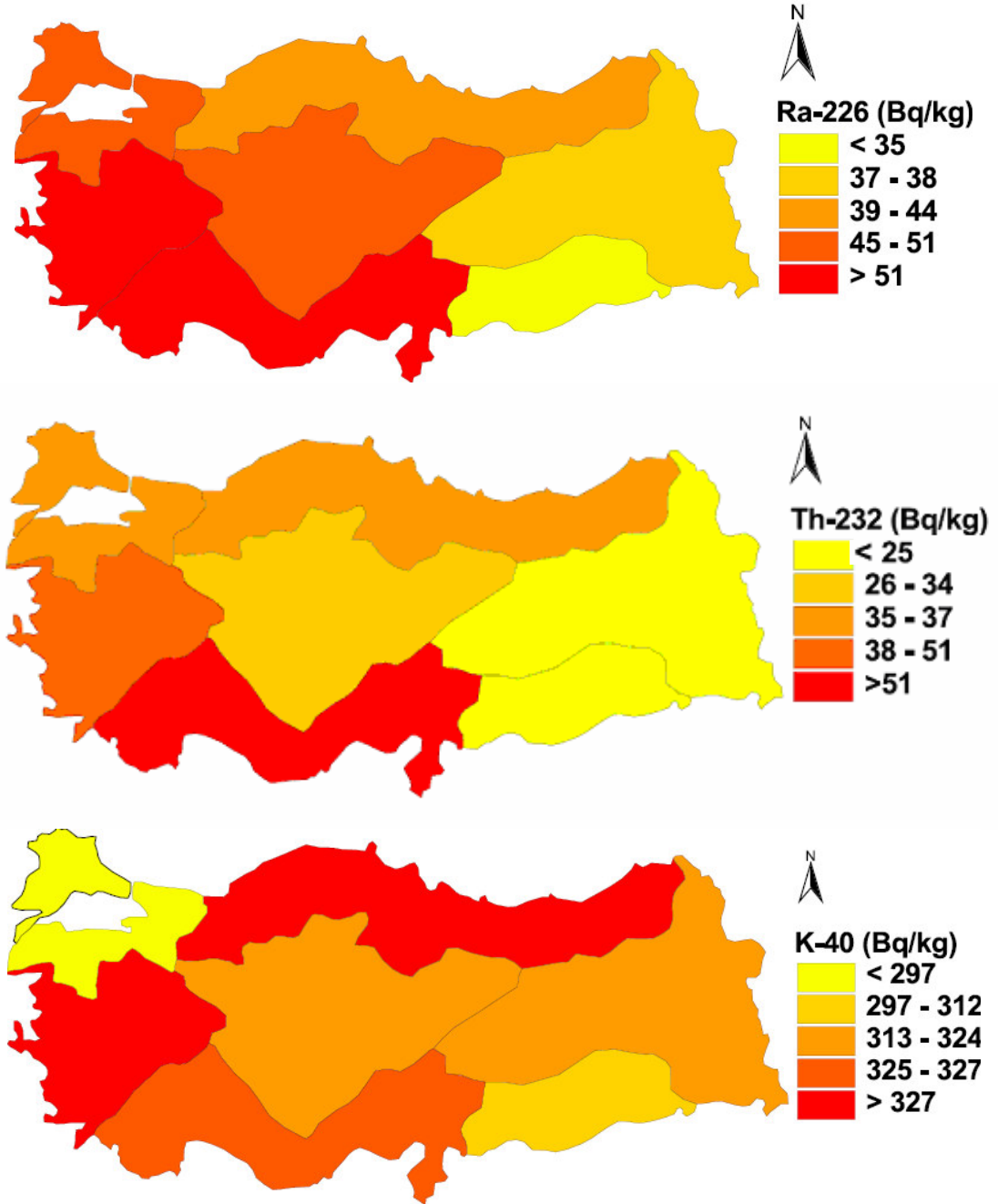
Tablo 23. Kireç numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	37±3	69±5	50±11	15±1	53±5	28±13	60±2	158±4	95±36
Ege	14±1	32±2	23±6	10±1	27±3	20±6	89±3	178±4	122±31
Akdeniz	17±1	70±5	46±23	9±1	25±2	13±4	76±3	228±6	148±50
Karadeniz	12±1	66±5	38±16	8±1	27±3	17±6	93±3	268±8	174±52
İç Anadolu	15±1	38±3	28±7	14±1	29±3	24±4	152±4	242±7	201±31
Doğu Anadolu	23±2	52±4	41±9	4±1	35±3	18±11	125±3	249±7	189±47
Güney Doğu Anadolu	32±2	50±4	46±6	16±1	29±3	23±4	129±4	198±6	168±21
Minimum	12			4			60		
Maksimum	70			53			268		
Ortalama	38			20			156		
Standart Sapma	16			9			54		

Tablo 24. Alçı numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları

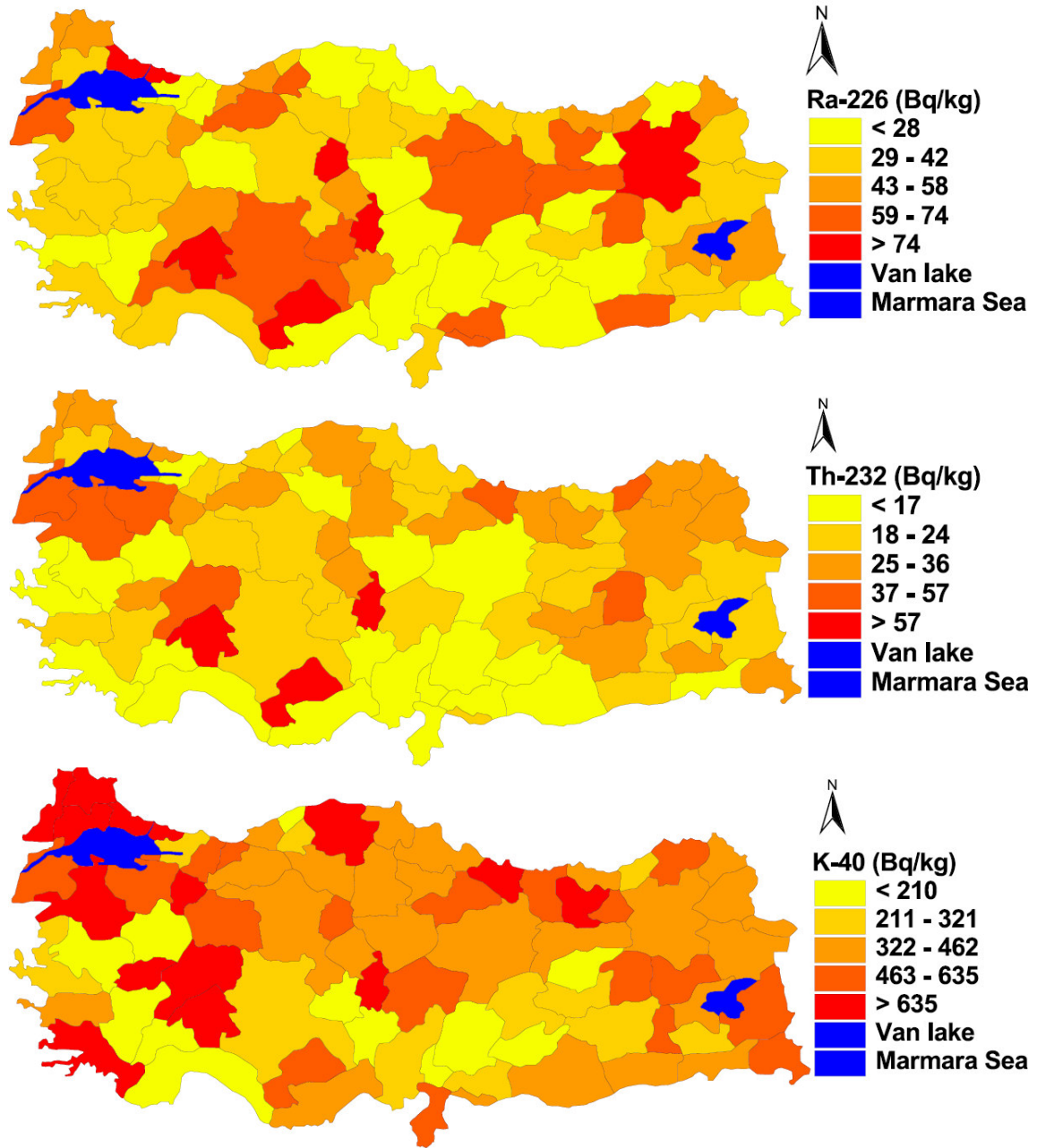
Bölgeler	^{226}Ra (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			^{40}K (Bq/kg)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Marmara	18±1	22±2	21±2	4±1	8±1	6±2	69±2	86±2	76±6
Ege	5±1	46±4	20±12	10±1	33±3	17±7	42±1	120±3	90±31
Akdeniz	15±1	22±2	17±3	13±1	18±2	15±2	46±1	71±2	59±8
Karadeniz	11±1	21±2	17±4	11±1	18±2	15±3	32±1	142±4	74±37
İç Anadolu	9±1	25±2	14±5	8±1	18±2	12±4	59±2	79±2	67±6
Doğu Anadolu	15±1	18±2	16±1	12±1	17±2	14±2	20±1	76±2	41±22
Güney Doğu Anadolu	15±1	19±2	17±1	8±1	18±2	15±3	67±2	89±3	81±8
Minimum	5			4			20		
Maksimum	46			33			142		
Ortalama	17			13			70		
Standart Sapma	6			5			24		

Tablo 18’de görüldüğü gibi çimento numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları aralıklarının sırayla 14-102 Bq/kg, 11-113 Bq/kg ve 82-769 Bq/kg arasında değiştiği belirlenmiştir. Çimento türlerine göre ortalama ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonlarının en düşük BPC türünde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 26). Şekil 26’ya göre ^{226}Ra ve ^{232}Th aktiflik konsantrasyonları en yüksek Akdeniz bölgesinde, ^{40}K aktiflik konsantrasyonu ise en yüksek Karadeniz ve Ege bölgelerinde gözlenmiştir.



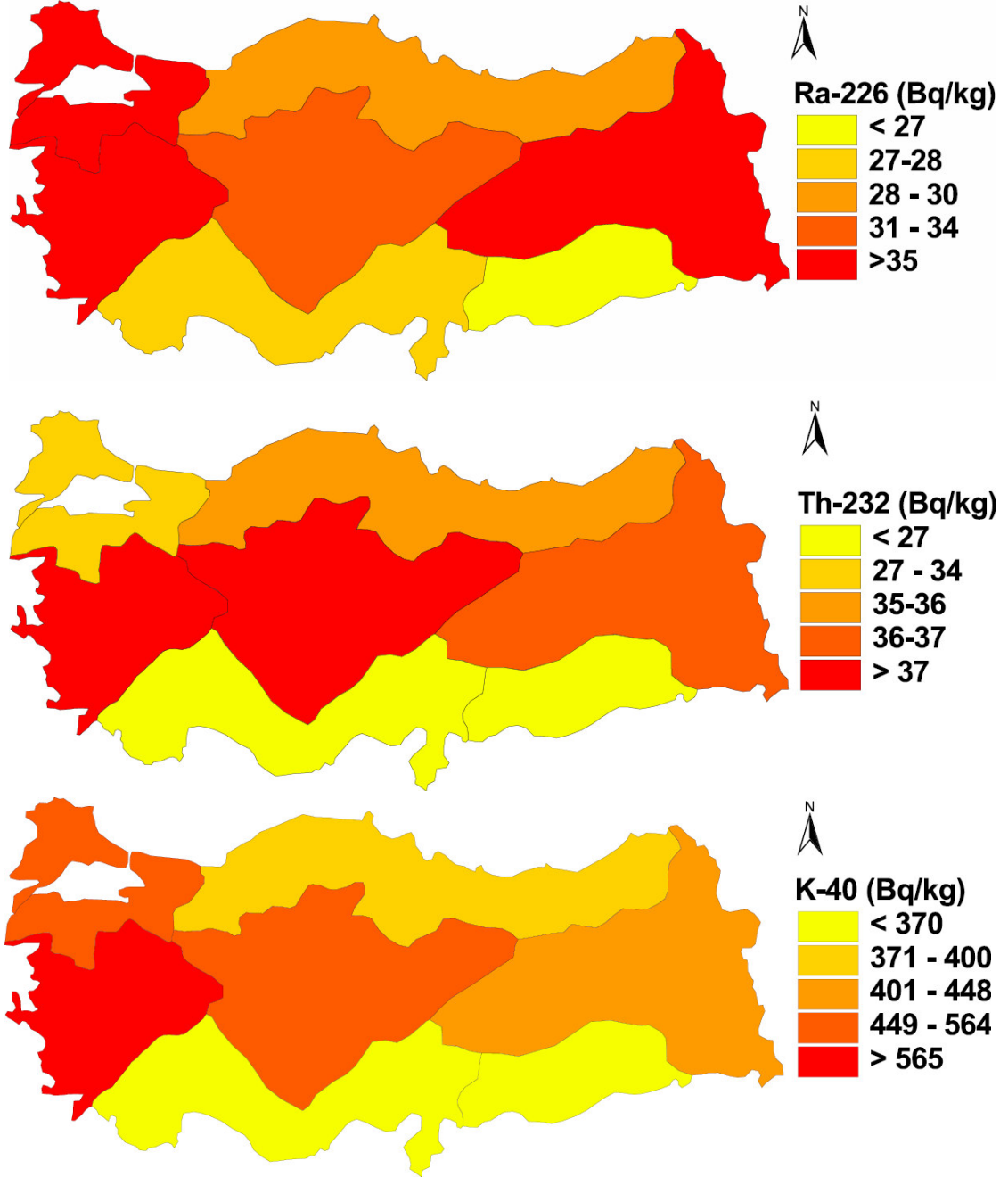
Şekil 26. Çimento numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 19'daki verilere göre kum numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonlarını ortalama olarak sırayla 44, 26 ve 441 Bq/kg ve standart sapmaları sırayla 20, 18 ve 188 Bq/kg'dır. İç Anadolu bölgesinin en yüksek ^{226}Ra aktiflik konsantrasyonuna ve Güneydoğu Anadolu bölgesinin en düşük ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonuna sahip olduğu deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 27). Şekilde görüldüğü gibi genel olarak ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları en yüksek Nevşehir ve Isparta illerindedir.



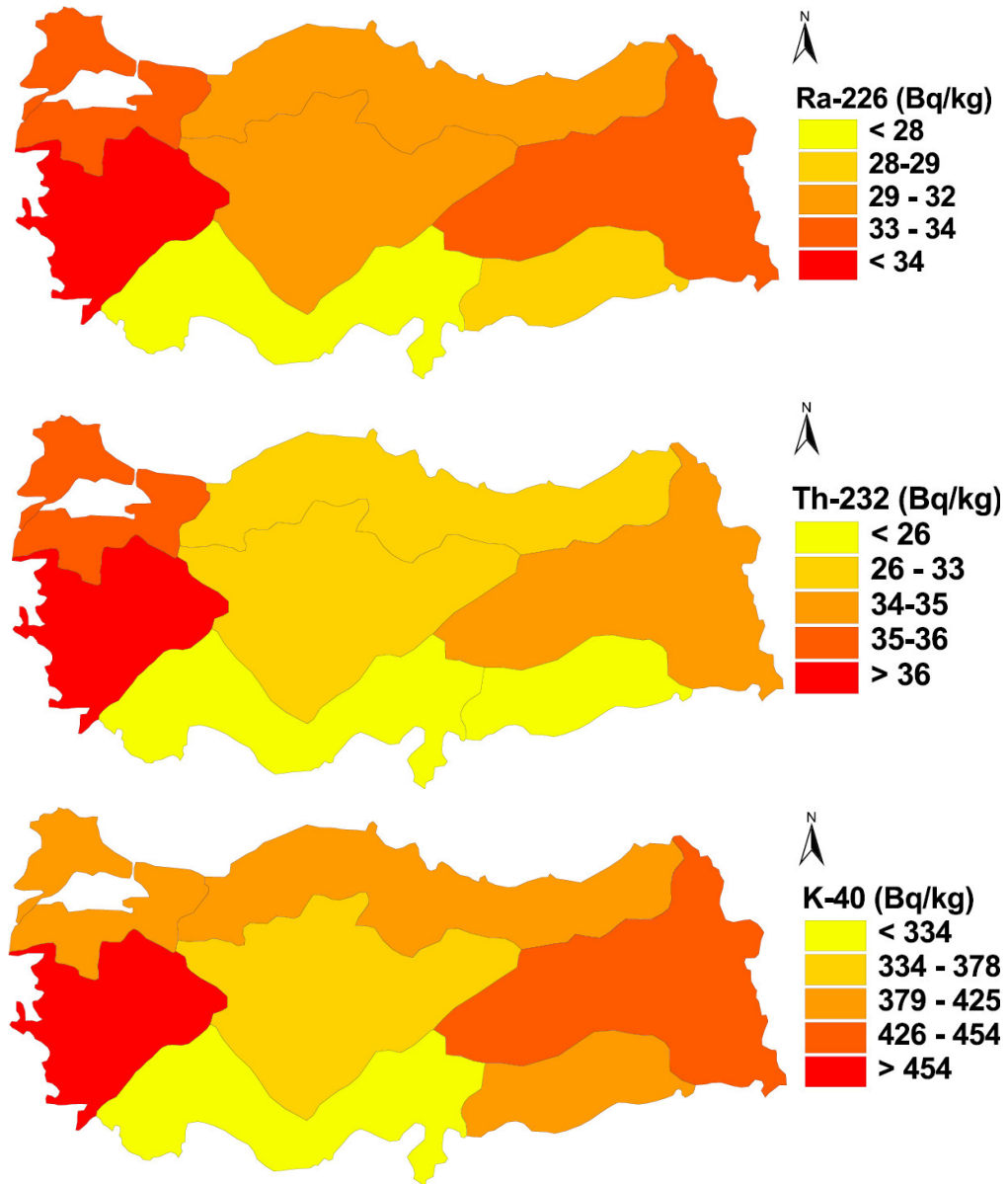
Şekil 27. Kum numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 20’de tuğla numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları gösterilmiştir. Tablodan anlaşıldığı üzere ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 34, 34 ve 462 Bq/kg’dır. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 28). Şekil 28’e göre, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın en yüksek aktiflik konsantrasyonlarının Türkiye’nin batısı ile doğu arasında değiştiği görülmüştür.



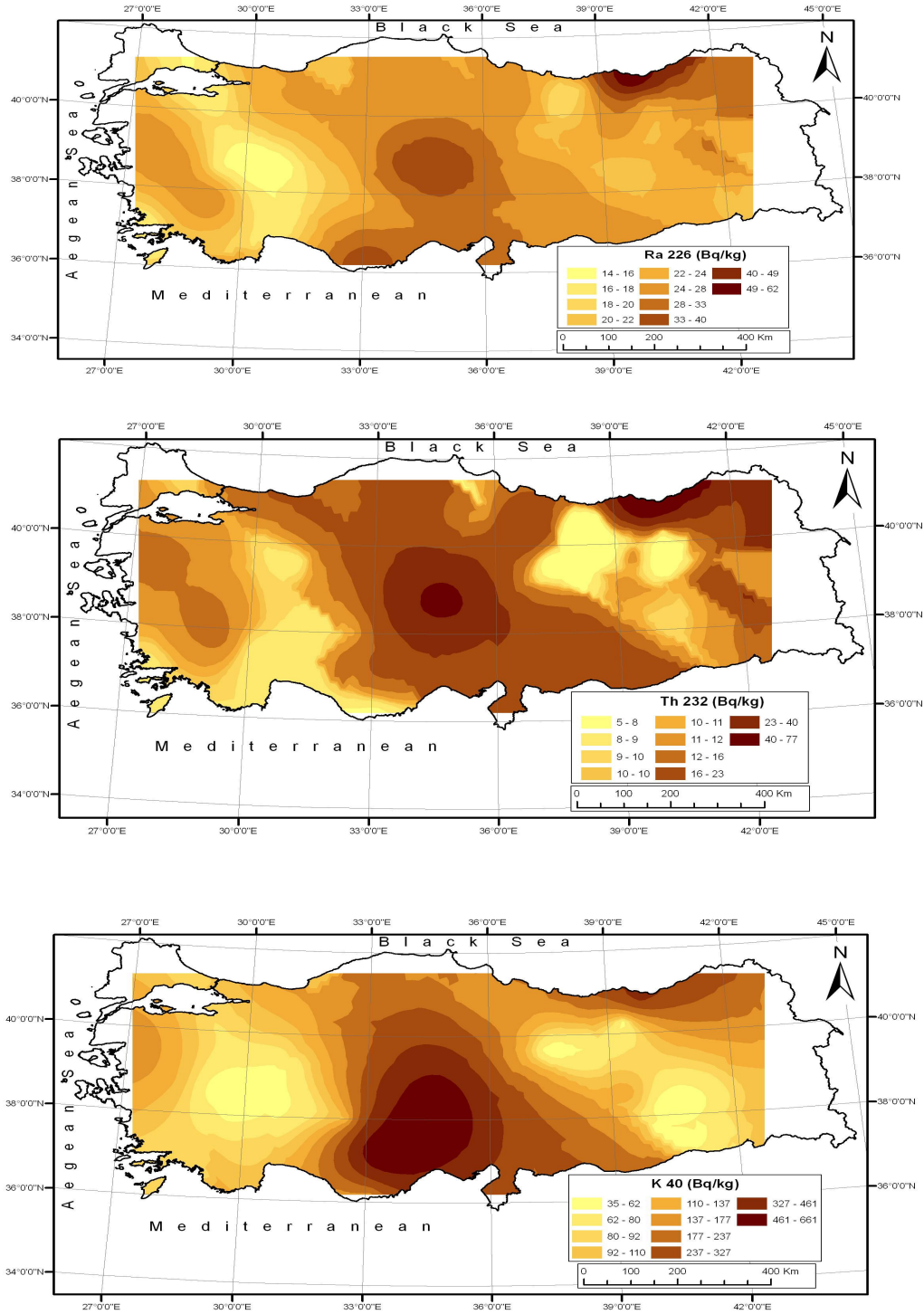
Şekil 28. Tuğla numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 21’de kiremit numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi ^{226}Ra aktiflik konsantrasyonunun minimum değeri 13 Bq/kg maksimum değeri 92 Bq/kg, ^{232}Th aktiflik konsantrasyonunun minimum değeri 9 Bq/kg maksimum 75 Bq/kg ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonunun minimum değeri 114 Bq/kg maksimum değeri 870 Bq/kg’dır. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 29). Şekil 29’daki haritalara göre ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflikleri genel olarak en yüksek Ege ile Doğu Anadolu bölgesinde olduğu görülmüştür.



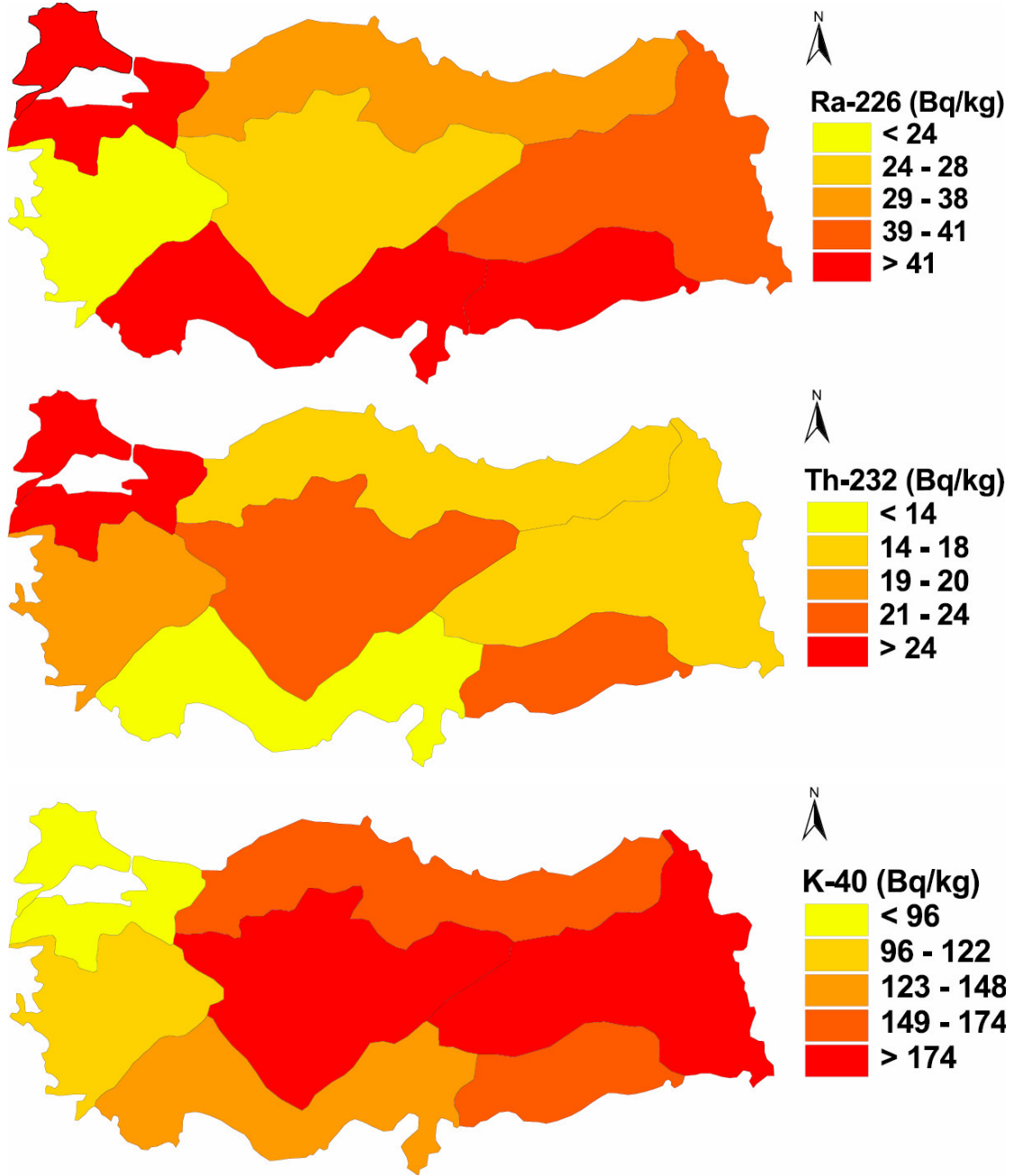
Şekil 29. Kiremit numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 22’de verilen sonuçlara göre mermer numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları sırayla 10-92, 4-122 ve 28-676 Bq/kg arasında değiştiği tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 30). Şekil 30’da en yüksek ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktifliklerinin Karadeniz ve İç Anadolu bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir.



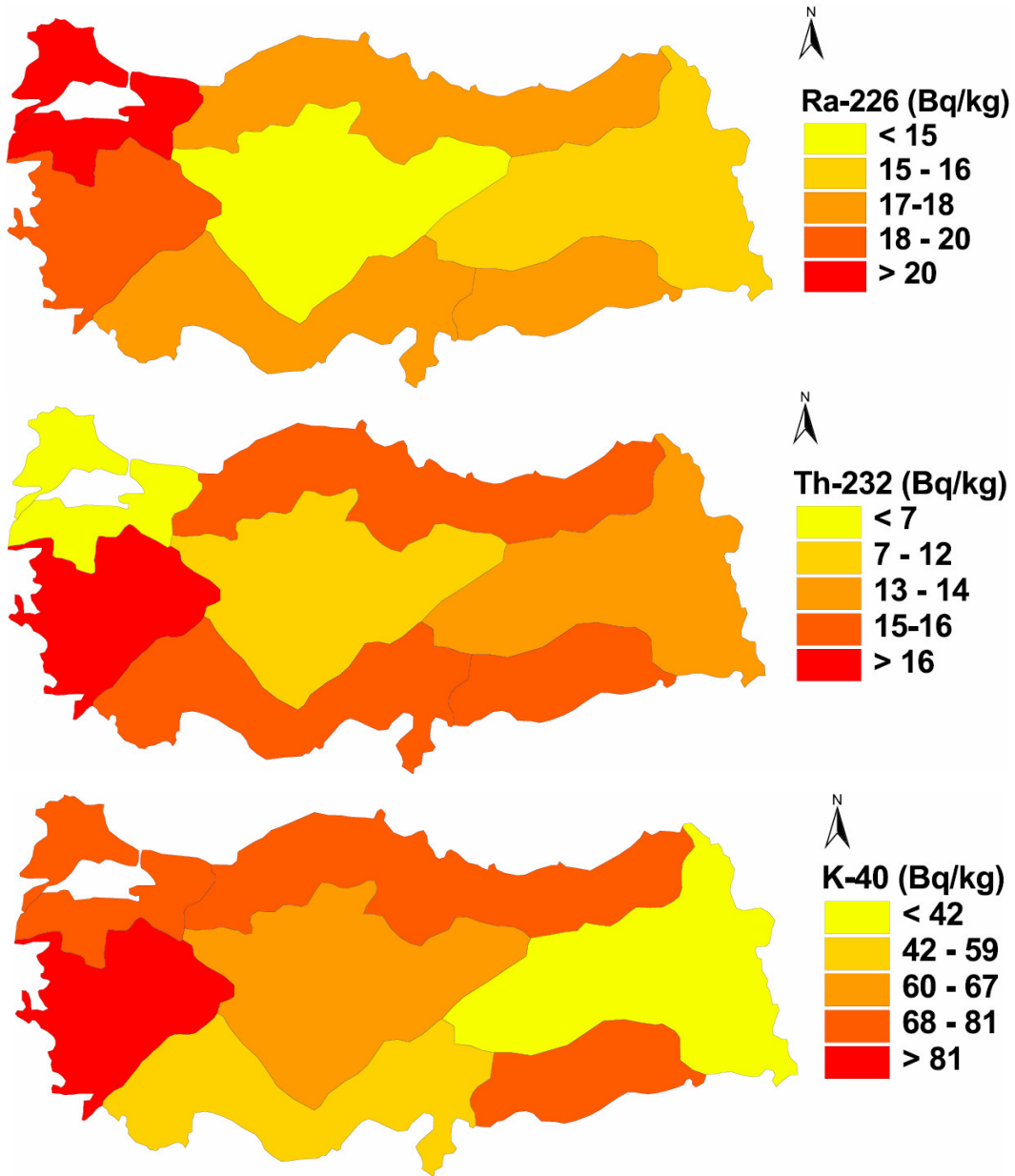
Şekil 30. Mermer numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 23 incelendiğinde kireç numunelerindeki ^{226}Ra ve ^{232}Th aktiflik konsantrasyonlarının 12-70 Bq/kg ve 4-53 Bq/kg arasında değiştiği ve ^{40}K aktifliğinin ise 28-676 Bq/kg arasında değiştiği görülmektedir. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 31). Elde edilen haritalara göre genel olarak ^{226}Ra ve ^{40}K aktiflikleri en yüksek Türkiye'nin doğu bölgelerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 31. Kireç numunelerinin radyoaktiflik haritaları

Tablo 24'teki verilere göre alçı numunelerindeki ^{226}Ra aktiflik konsantrasyonunun minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin sırasıyla 5, 46 ve 17 Bq/kg olduğu, ^{232}Th aktiflik konsantrasyonunun minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin sırasıyla 4, 33 ve 13 Bq/kg ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonunun minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin sırasıyla 20, 142 ve 70 Bq/kg olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Arc View GIS programının Kriging gridding yöntemini kullanan modülü ile haritaya aktarılmıştır (Şekil 32). Şekil 32'ye göre ^{226}Ra ve ^{40}K aktiflikleri genel olarak Türkiye'nin batısında yüksek yoğunluk göstermektedir.



Şekil 32. Alçı numunelerinin radyoaktiflik haritaları

3.4. Kütle Soğurma Katsayıları Ölçümleri

İnşaat malzemesi olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerininin 81-1333 keV arasında değişen enerjilerdeki deneysel ve teorik kütle soğurma katsayıları sırayla Tablo 25-32’de verilmiştir. Deneysel değerler, “Lambert Beer” yasasından türetilen,

$$\frac{\mu}{\rho} = d^{-1} \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (42)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Kütle soğurma katsayılarının teorik değerleri XCOM programından elde edilmiştir.

Deneysel kütle soğurma katsayıların teorik kütle soğurma katsayılarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Aynı malzemenin aynı enerjideki kütle soğurma katsayılarının değerleri arasında çok az bir fark olduğu ve bu farkında kimyasal analizlerindeki küçük değişmelerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Gazlı beton için elde edilen verilerde ise hem kimyasal analizden hem de yoğunluk tespitinden kaynaklanan hatalardan dolayı teorik ve deneysel veriler arasında yaklaşık %15’lik bir fark mevcuttur.

Tablo 25. Gazlı beton numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,207-0,241±0,008	0,202-0,218
88	0,198-0,215±0,008	0,185-0,198
122	0,180-0,197±0,007	0,143-0,151
136	0,166-0,183±0,007	0,134-0,141
276	0,125-0,145±0,007	0,096-0,101
302	0,111-0,131±0,006	0,093-0,097
356	0,098-0,115±0,005	0,087-0,091
383	0,088-0,111±0,005	0,084-0,088
511	0,072-0,082±0,005	0,075-0,078
661	0,053-0,070±0,004	0,067-0,070
834	0,045-0,063±0,003	0,060-0,063
1173	0,045-0,055±0,003	0,051-0,053
1275	0,043-0,048±0,002	0,048-0,051
1332	0,043-0,046±0,002	0,047-0,050

Tablo 26. Çimento numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	DeneySEL (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,232-0,267±0,004	0,239-0,260
88	0,200-0,238±0,006	0,218-0,234
122	0,162-0,182±0,007	0,166-0,173
136	0,149-0,165±0,007	0,155-0,160
276	0,106-0,119±0,003	0,109-0,113
302	0,100-0,112±0,002	0,105-0,109
356	0,095-0,104±0,002	0,098-0,101
383	0,092-0,101±0,001	0,095-0,098
511	0,080-0,092±0,002	0,084-0,087
661	0,073-0,079±0,001	0,075-0,077
834	0,064-0,073±0,001	0,067-0,069
1173	0,054-0,063±0,001	0,057-0,059
1275	0,052-0,059±0,003	0,055-0,056
1332	0,050-0,054±0,001	0,053-0,055

Tablo 27. Kum numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	DeneySEL (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,192-0,212±0,006	0,200-0,222
88	0,182-0,200±0,012	0,187-0,204
122	0,148-0,163±0,006	0,154-0,161
136	0,141-0,150±0,009	0,146-0,151
276	0,104-0,116±0,005	0,109-0,111
302	0,101-0,107±0,003	0,105-0,107
356	0,093-0,103±0,002	0,099-0,100
383	0,091-0,097±0,004	0,096-0,097
511	0,084-0,091±0,002	0,085-0,086
661	0,072-0,080±0,002	0,076-0,077
834	0,062-0,073±0,003	0,068-0,069
1173	0,054-0,059±0,001	0,058
1275	0,052-0,056±0,002	0,055-0,056
1332	0,050-0,055±0,001	0,054-0,055

Tablo 28. Tuğla numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,220-0,225±0,006	0,216-0,222
88	0,195-0,210±0,011	0,200-0,204
122	0,150-0,156±0,006	0,159-0,160
136	0,145-0,148±0,009	0,150-0,151
276	0,109-0,114±0,006	0,110-0,111
302	0,102-0,109±0,004	0,106-0,107
356	0,095-0,098±0,003	0,099-0,100
383	0,092-0,095±0,004	0,096-0,097
511	0,080-0,083±0,002	0,085-0,086
661	0,074-0,075±0,002	0,076-0,077
834	0,067-0,070±0,003	0,068-0,069
1173	0,057-0,058±0,002	0,058
1275	0,055-0,056±0,002	0,055-0,056
1332	0,053-0,055±0,001	0,054-0,055

Tablo 29. Kiremit numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel(cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,209-0,214±0,006	0,211-0,219
88	0,191-0,205±0,011	0,196-0,202
122	0,155-0,164±0,006	0,157-0,160
136	0,150-0,156±0,009	0,148-0,151
276	0,107-0,116±0,006	0,110
302	0,104-0,110±0,004	0,105-0,106
356	0,094-0,105±0,003	0,099-0,100
383	0,091-0,097±0,004	0,096-0,097
511	0,075-0,088±0,002	0,085-0,086
661	0,074-0,076±0,002	0,076
834	0,064-0,069±0,003	0,068-0,069
1173	0,056-0,059±0,001	0,058
1275	0,055-0,056±0,002	0,055-0,056
1332	0,054-0,055±0,001	0,054

Tablo 30. Mermer numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,210-0,265±0,009	0,202-0,273
88	0,185-0,250±0,008	0,189-0,244
122	0,150-0,180±0,006	0,155-0,176
136	0,144-0,167±0,006	0,147-0,162
276	0,108-0,114±0,005	0,110-0,112
302	0,104-0,105±0,004	0,106-0,108
356	0,096-0,100±0,004	0,100-0,101
383	0,095-0,096±0,003	0,096-0,097
511	0,086-0,089±0,004	0,086
661	0,075±0,003	0,076-0,077
834	0,067-0,070±0,003	0,069
1173	0,057-0,060±0,004	0,058
1275	0,055-0,057±0,003	0,056
1332	0,053-0,055±0,003	0,054-0,055

Tablo 31. Kireç numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,249-0,252±0,008	0,249-0,257
88	0,224-0,230±0,007	0,220-0,228
122	0,150-0,157±0,005	0,153-0,160
136	0,142-0,148±0,005	0,140-0,147
276	0,092-0,100±0,003	0,094-0,099
302	0,090-0,098±0,003	0,091-0,096
356	0,083-0,090±0,003	0,084-0,089
383	0,080-0,087±0,003	0,082-0,086
511	0,070-0,075±0,003	0,072-0,076
661	0,063-0,007±0,003	0,064-0,068
834	0,058-0,063-0,002	0,058-0,061
1173	0,050±0,002	0,049-0,051
1275	0,048-0,050±0,002	0,047-0,049
1332	0,045-0,048±0,002	0,046-0,048

Tablo 32. Alçı numunelerindeki kütle soğurma katsayıları

Enerji (keV)	Deneysel (cm ² /g)	Teorik (cm ² /g)
81	0,235-0,250±0,007	0,0242-0,246
88	0,216-0,230±0,006	0,220-0,223
122	0,165-0,172±0,004	0,167-0,169
136	0,154-0,162±0,005	0,156-0,157
276	0,109-0,115±0,004	0,11-0,112
302	0,105-0,108±0,004	0,107-0,108
356	0,101-0,104±0,003	0,101
383	0,097-0,102±0,004	0,098
511	0,084-0,091±0,004	0,086-0,087
661	0,074-0,077±0,003	0,077
834	0,069-0,071±0,002	0,069
1173	0,057-0,061±0,002	0,058-0,059
1275	0,055-0,057±0,002	0,056
1332	0,054-0,055±0,002	0,055

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İnsanoğlu zamanının çoğunu (%80'nini) kapalı mekanlarda geçirdiği için buralarda kullanılan malzemelerin radyoaktif içerikleri ve kütle soğurma katsayılarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bilgiler, alınacak dozların hesaplanması ve standartların geliştirilmesi açısından çok önemlidir.

Bu alışmada, Türkiye'de inşaat malzemesi olarak kullanılan bazı gazlı beton, imento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç alçı numunelerindeki doğal radyoaktiflik seviyeleri ve kütle soğurma katsayıları belirlenmiştir. Malzemelerdeki radyoaktif çekirdek içeriklerinden yararlanılarak bazı radyolojik parametreler hesaplanmıştır. Ayrıca bu malzemelerin yapısını tayin etmek için EDXRF ve XRD analizleri de yapıldı. Elde edilen sonuçlar, dünyada yapılan diğer çalışmaların verileriyle karşılaştırılmış ve uluslararası kuruluşlar tarafından izin verilebilir seviyelerde olup olmadığı araştırılmıştır.

4.1. EDXRF ve XRD Analiz Sonuçları

Malzemelerin XRD analizi sonucunda elde edilen kırınım desenleri Bulgular bölümünde Şekil 17-24'te verilmiştir. Gazlı beton, imento, kum, tuğla, kiremit, kireç ve alıda aynı malzemelerin X-ışını kırınım desenlerinden elde edilen minerallerin birbiriyle uyumlu olduğu gözlenirken, mermer numunelerinde farklı olduğu görülmektedir. EDXRF ile yapılan kimyasal analiz sonuçları Bulgular bölümünde Tablo 9-16'de özetlenmiş olup Tablolarda da görüldüğü gibi gazlı beton, imento, kum, tuğla, kiremit, kireç ve alıda aynı malzemelerin kimyasal analizleri arasında da çok az bir farklılık gözlenirken mermer numunelerinde çok büyük farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Hem XRD hem de EDXRF elde edilen sonuçlardan mermerlerin türlerinin birbirinden farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Kimyasal analizlerde CaO oranının yüksek olduğu ve X-ışını kırınım desenlerinde de sadece CaCO₃(Kalsit)'in çıktığı mermerler jeolojik mermer olarak adlandırılmaktadır. Diğer mermerler ise ticari mermer olarak adlandırılmaktadır. X-ışını kırınım desenlerinden tespit edilen minerallerin genel olarak ölçülen kimyasal analizle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Kimyasal analizlerdeki ²³⁸U ve ²³²Th değerleri, ²²⁶Ra ve ²³²Th'mun radyoaktiflik konsantrasyonlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin ppm mertebesinde olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Radyoaktiflik Sonuçları

Gazlı beton numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 17’de özetlenmiştir. Tabloda gösterildiği gibi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 82, 28 ve 384 Bq/kg’dır. İnşaat malzemeleri için UNSCEAR (UNSCEAR, 1993)’ın önermiş olduğu dünya ortalaması, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için sırayla 50, 50 ve 500 Bq/kg’dır. Gazlı beton numunelerinin sonuçlarına göre ortalama ^{226}Ra aktiflik konsantrasyonu dünya ortalamasının ve literatür değerlerinin üstünde olduğu tespit edilmiştir. ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları ise genel olarak literatürdeki değerlerden düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 33).

Tablo 33. Gazlı beton numunelerinin literatürdeki hafif betonlarla karşılaştırılması

Ülkeler	^{226}R (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Referanslar
Hong Kong	38	47	141	(Stranden, 1979)
Norveç	52	56	810	(Yu vd., 2000)
Polonya	11	16	418	(Zalewski vd., 2001)
İsrail	66	58	1149	(Kovler vd., 2002)
Türkiye	82	28	384	Bu çalışma

Çimento numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 18’de gösterilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 52, 40 ve 324 Bq/kg’dır. ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflikleri UNSCEAR’ın önermiş olduğu dünya ortalaması değerlerinin altındadır. Bu değerler literatürde diğer Ülkeler için yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Türkiye için ölçülen ortalama ^{226}Ra aktifliği İran, Norveç, Avusturya, Finlandiya, Hollanda, Pakistan, Hindistan, Japonya, Cezayir ve Kamerun için ölçülen ortalama aktifliklerinden yüksek olmasına rağmen ^{232}Th için bu ülkelerden ölçülen değerlerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. ^{40}K için ölçülen ortalama aktiflik konsantrasyonu İran, Norveç, Malezya, Avusturya, Finlandiya, İtalya, Avustralya, Hollanda, Pakistan, Japonya, Yunanistan ve İrlanda için ölçülen

konsantrasyonlarından yüksek olmasına rağmen, Çin, Mısır, İran, Kamerun, Ürdün, Brezilya, Hindistan, Bangladeş ve Cezayir için ölçülen konsantrasyonlardan daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 34).

Tablo 34. Çimento numunelerinin literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Referanslar
Norveç	30	19	259	(Stranden ve Berteiz ,1980)
Malezya	81	59	204	(Chong, 1982)
Avusturya	27	14	210	(Sorantin ve Steger. 1984)
Finlandiya	40	20	251	(Mustonen, 1984)
İtalya	46	42	316	(Sciocchetti vd.,1984)
Avustralya	52	48	115	(Beretka ve Mathew ,1985)
Hollanda	27	19	230	(Ackers vd., 1985)
Brezilya	62	59	564	(Malanca vd., 1993)
Ürdün	46	12	201	(Ahmad ve Hussein, 1997)
Hindistan	37	24	432	(Kumar vd., 1999)
Japonya	36	21	139	(Suzuki vd., 2000)
Cezayir	41	27	422	(Amrani ve Tahtat, 2001)
Pakistan	26	29	273	(Khan ve Khan, 2001)
Yunanistan	92	31	310	(Stoulos vd., 2003)
İrlanda	66	11	130	(Lee vd., 2004)
Mısır	35	19	93	(El-Bahi, 2004)
Tunus	22	10	176	(Hizem vd., 2005)
Bangladeş	61	80	1133	(Roy vd., 2005)
Çin	57	37	173	(Xinwei, 2005)
İran	31	12	121	(Fathivand ve Amidi, 2006)
Kamerun	27	15	277	(Ngachin vd., 2007)
Ortalama	45	30	287	
Türkiye	52	40	324	Bu çalışma

Kum numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 19’da verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’in ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 44, 26 ve 441 Bq/kg’dır. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’in ortalama aktiflikleri UNSCEAR’ın önermiş olduğu dünya ortalaması değerlerinin altındadır. Bu veriler literatürde diğer ülkeler için yapılan çalışmalar için Tablo 35’te karşılaştırılmıştır. Tabloda görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen veriler genel olarak literatürle uyum içindedir.

Tablo 35. Kum numunelerinin literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Referanslar
İtalya	24	27	528	(Sciocchetti vd., 1984)
Avustralya	4	41	44	(Beretka ve Mathew, 1985)
Hollanda	8	11	200	(Ackers vd., 1985)
Hong Kong	24	27	842	(Chung-Keung vd., 1989)
Suriye	9	2	21	(Othman vd., 1994)
Zambiya	24	26	714	(Hayumbu vd., 1995)
Brezilya	10	13	51	(Malanca vd., 1995)
Ürdün	25	8	188	(Khatibeh vd., 1997)
Bangladeş	14	25	158	(Chowdury vd., 1998)
Hindistan	44	64	456	(Kumar vd., 1999)
Malezya	60	13	750	(İbrahim, 1999)
Cezayir	12	7	74	(Amrani ve Tahtat, 2001)
Yunanistan	18	17	367	(Stoulos vd., 2003)
Küba	17	16	188	(Bridgo Flores vd., 2004)
Kamerun	14	31	586	(Ngachin vd., 2007)
Çin	23	36	891	(Xinwei ve Zhang, 2008)
Ortalama	21	23	379	
Türkiye	44	26	441	Bu çalışma

Tuğla ve kiremit numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 20-21’de gösterilmiştir. Tuğla için ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 34, 34 ve 462 Bq/kg, kiremit için ise bu konsantrasyonları sırayla 34, 33 ve 429 Bq/kg’dır. Bu değerler UNSCEAR’ın önermiş olduğu dünya ortalaması değerlerinin altındadır. Ayrıca bu veriler literatürde diğer ülkeler için yapılan çalışmalar için Tablo 36’da karşılaştırılmıştır. Tabloda görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen veriler genel olarak literatür değerlerinin altındadır.

Tablo 36. Tuğla ve kiremit numunelerinin literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Referanslar
Norveç	104	62	1058	(Stranden, 1976)
İngiltere	52	44	703	(OECD, 1979)
Almanya	59	67	673	(OECD, 1979)
İsveç	96	127	962	(OECD, 1979)
Malezya	233	229	685	(Chong vd., 1982)
Avusturya	38	45	635	(Sorantin vd., 1984)
Hollanda	39	41	560	(Ackers vd., 1985)
Avustralya	41	89	681	(Beretka ve Mathew, 1985)
Brezilya	52	65	747	(Malanca vd., 1993)
Hong Kong	78	100	627	(Ng vd., 1985)
Zambiya	32	81	412	(Hayumbu vd., 1995)
Kuveyt	7	7	332	(Bau-Rabee ve Bem, 1996)
Kenya	17	52	379	(Mustapha vd., 1997)
Bangladeş	29	53	292	(Chowdury vd., 1998)
Mısır	25	24	258	(Sharaf vd., 1999)
Hindistan	48	52	381	(Kumar vd., 1999)
Cezayir	65	51	675	(Amrani ve Tahtat, 2001)
Sri Lanka	35	72	585	(Hewamanna vd., 2001)
Polonya	50	50	963	(Zalewski vd., 2001)
Yunanistan	35	45	710	(Stoulos vd., 2003)
Küba	57	12	785	(Bridigo Flores vd., 2005)
İtalya	58	51	473	(Righi ve Bruzzi, 2006)
Kamerun	50	91	172	(Ngachin vd., 2007)
Pakistan	46	62	693	(Tufail vd., 2007)
İran	33	30	700	(Fathivand vd., 2007)
Çin	38	47	697	(Lu ve Zhang, 2008)
Ortalama	55	63	676	
Türkiye (Tuğla)	34	34	462	Bu çalışma
Türkiye (Kiremit)	34	33	429	Bu çalışma

Mermer numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 22’de özetlenmiştir. Tabloda gösterildiği gibi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 23, 15 ve 149 Bq/kg’dır. Bu veriler UNSCEAR’ın önermiş olduğu dünya ortalaması değerlerinin oldukça altındadır. Bu değerler literatürde diğer ülkeler için yapılan çalışmalar için Tablo 38’de karşılaştırılmıştır. Tabloda görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen veriler genel olarak literatürle uyum içindedir.

Tablo 37. Mermer numunelerinin literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Referanslar
Jordan	12-370	4-18	52-113	(Khatibeh vd., 1997)
Jordan	20	11	85	(Ahmad ve Hussein, 1997)
Cezayir	23	18	310	(Amrani ve Tahtat, 2001)
Pakistan	4-63 (33)	9-40 (32)	7-105 (57)	(Iqbal vd., 2000)
Pakistan	6-160 (8)	1-29(3)	1-160 (26)	(Aslam vd., 2002)
Mısır	88	115	671	(Abbady, 2006)
Çin	8-157	6-166	44-1353	(Lu, 2007)
Kamerun	8	0.4	19	(Ngachin vd., 2007)
Nijerya	2	1	7	(Ademola vd., 2008)
Türkiye	10-92 (23)	4-122 (15)	28-676 (149)	Bu çalışma

Kireç ve alçı numunelerinin doğal radyoaktiflik sonuçları Tablo 23-24’te gösterilmiştir. Kireç için ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktiflik konsantrasyonları sırayla 38, 20 ve 156 Bq/kg, alçı için ise bu değerler sırasıyla 17, 13 ve 70 Bq/kg’dır. Bu değerler UNSCEAR’ın önermiş olduğu dünya ortalaması değerlerinin oldukça altındadır. Bu değerler literatürde diğer ülkeler için yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Tablo 38). Tabloda gösterildiği gibi ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiflik konsantrasyonları genel olarak literatür değerlerinin altındadır.

Tablo 38. Kireç ve alçı numunelerinin literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Referanslar
Avustralya*	-	11	-	(Beretka ve Mathew, 1985)
Bangladeş*	68	107	1660	(Alam vd., 1990)
Çin*	26	21	114	(Lu vd., 2007)
Avustralya**	-	11	-	(Beretka ve Mathew, 1985)
Avusturya**	48	5	151	(Sorantin ve Steger, 1983)
Mısır**	22-660	3-162	43-145	(Ahmad, 2007)
Türkiye*	38	20	156	Bu çalışma
Türkiye**	17	13	70	Bu çalışma

*Kireç, ** Alçı

4.2.1. Radyum Eşdeğer Aktifliği

²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'in inşaat malzemelerindeki dağılımı birbirlerinden farklıdır. Farklı miktarlardaki bu spesifik aktifliklerinden radyasyona maruz kalmayı standartlaştırmak için radyum eşdeğer aktifliği (Ra_{eq}) aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır (Beretka ve Mathew, 1985)

$$Ra_{eq}(Bq/kg) = C_{Ra} + 1,43 C_{Th} + 0,077 C_K \quad (43)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'in Bq/kg biriminde spesifik aktiflikleridir.

4.2.2. Soğurulan Gama Doz Hızı (D)

Avrupa Komisyonu tarafından 4 m x 5 m x 2,8 m ebatlarındaki oda modeline göre havada soğurulmuş doz oranı aşağıdaki formülle belirlenmiştir (EC, 1999):

$$D (nGy/saat) = 0,92C_{Ra} + 1,1 C_{Th} + 0,08C_K \quad (44)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde spesifik aktiflikleridir.

4.2.3. Yıllık Etkin Doz

Soğrulan doz için dönüşüm faktörü (0,7 Sv/Gy) ve iç ortamlarda maruz kalma faktörü (0,8) (UNSCEAR, 2000) dikkate alınarak etkin doz aşağıdaki formülle hesaplanmıştır;

$$YED \text{ (mSv/yıl)} = D \text{ (nGy/saat)} \times 8760 \text{ saat} \times 0.8 \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6} \quad (45)$$

4.2.4. Gama İndeksi (I_γ)

İnşaat malzemelerinden kaynaklanan iç ve dış tehlike indekslerini değerlendirmek için birçok araştırmacı değişik indeksler önermişlerdir (EC, 1999; Beretka ve Mathew, 1985, OECD, 1979; Krieger, 1981). Bu çalışmada, Avrupa komisyonu tarafından önerilen gama indeksi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (EC, 1999).

$$I_\gamma = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} \quad (46)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde spesifik aktiflikleridir.

4.2.5. Alfa İndeksi (I_α)

İnşaat malzemelerinden yayılan radon yüzünden Avrupa komisyonu tarafından önerilen indeks alfa indeksi olarak tanımlanmaktadır. Bu indeks aşağıdaki formülle belirlenmiştir.

$$I_{\alpha} = \frac{C_{Ra}}{200 \text{ (Bq.kg}^{-1}\text{)}} \quad (47)$$

Burada C_{Ra} , ^{226}Ra 'ın Bq/kg biriminde spesifik aktifliğidir.

Türkiye'de inşaat malzemesi olarak kullanılan bazı gazlı beton, kum, çimento, tuğla, kiremit, mermer, alçı ve kireç numunelerinde ölçülen ^{226}R , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerin konsantrasyonlarından yararlanarak radyum eşdeğer aktifliği (Ra_{eq}), havada soğurulan doz hızı (D), yıllık etkin doz (YED), gama indeksi (I_{γ}) ve alfa indeksi (I_{α}) hesaplanmıştır. Bu değerler gazlı beton, kum, çimento, tuğla, kiremit, mermer, alçı ve kireç numuneleri için sırayla Tablo 40-47'de özetlenmiştir.

Tablo 39'da gazlı beton numuneleri için hesaplan Ra_{eq} , D, YED, I_{γ} ve I_{α} , değerlerinin maksimum değerlerin Trabzon ilinde, minimum değerlerinin ise Ankara ilinde olduğu tespit edilmiştir.

Kum ve mermer numuneleri için en düşük hesaplanan ortalama Ra_{eq} , D, YED, I_{γ} ve I_{α} , değerlerinin olduğu bölgenin Güney Doğu Anadolu Bölgesi olduğu belirlenmiştir (Tablo 41 ve 44).

Tablo 42, 43 ve 46'da görüldüğü gibi tuğla, kiremit, alçı numuneleri için hesaplanan ortalama Ra_{eq} , D, YED, I_{γ} ve I_{α} , değerlerin en yüksek Ege bölgesinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 40 ve 45'e göre çimento ve kireç numuneleri için hesaplanan ortalama Ra_{eq} , D, YED, I_{γ} ve I_{α} , değerlerinin en düşük olduğu bölge Doğu Anadolu bölgesidir.

OECD'in inşaat malzemeleri için önermiş olduğu maksimum Ra_{eq} değeri 370 Bq/kg, UNSCEAR'ın D değeri için önermiş olduğu ağırlıklı dünya ortalaması 84 nGy/saat, Avrupa komisyonu (EC, 1999)'nun önermiş olduğu maksimum YED değeri 1 mSv, I_{γ} ve I_{α} değerleri için önermiş olduğu maksimum değerler 1'dir. Gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numuneleri için hesaplanan ortalama Ra_{eq} , YED, I_{γ} ve I_{α} , değerleri UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) ve Avrupa komisyonu (EC, 2000)'nun önermiş olduğu üst limitlerin altında olduğu tespit edilmiştir. Gazlı beton, çimento, kum, kiremit ve tuğla numuneleri için hesaplanan ortalama D değerleri UNSCEAR'ın önermiş olduğu ağırlıklı dünya ortalamasının üstünde fakat. mermer, kireç ve alçı numuneleri için hesaplanan ortalama D değerlerinin ise ağırlıklı dünya ortalamasının altında olduğu belirlenmiştir.

Table 39. Gazlı beton numunelerinde hesaplanan $R_{a_{eq}}$, D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Numune alınan yerler	$R_{a_{eq}}$ (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
İstanbul-1	180±13	162±12	0,79±0,06	0,62±0,05	0,67±0,05
İstanbul-2	159±12	141±10	0,69±0,05	0,57±0,04	0,33±0,03
Kocaeli	171±13	153±11	0,75±0,06	0,59±0,04	0,58±0,05
Yalova	189±16	168±14	0,82±0,07	0,65±0,05	0,65±0,06
Tekirdağ	113±8	104±7	0,51±0,03	0,42±0,03	0,22±0,02
Edirne	112±8	105±7	0,51±0,03	0,42±0,03	0,21±0,02
Gümüşhane	138±11	124±10	0,61±0,05	0,51±0,04	0,26±0,02
Trabzon	225±17	206±15	1,01±0,07	0,80±0,06	0,72±0,06
Gaziantep	114±10	102±8	0,50±0,04	0,41±0,03	0,24±0,02
Batman	143±10	131±9	0,64±0,05	0,52±0,04	0,37±0,03
Mardin	139±11	125±10	0,61±0,05	0,49±0,04	0,43±0,04
Siirt	133±8	123±7	0,60±0,04	0,49±0,03	0,34±0,02
Şanlıurfa	137±9	122±8	0,60±0,04	0,51±0,03	0,20±0,01
Ankara	89±12	81±11	0,40±0,06	0,32±0,05	0,27±0,02
Konya	182±15	168±14	0,82±0,07	0,66±0,05	0,49±0,05
Kırıkkale	179±14	164±12	0,80±0,06	0,64±0,05	0,51±0,04
Antalya	124±9	108±8	0,53±0,04	0,43±0,03	0,36±0,02
İzmir	209±17	188±15	0,92±0,07	0,74±0,06	0,60±0,05
Erzincan	155±14	140±12	0,68±0,06	0,55±0,05	0,42±0,04
Minimum	89	81	0,40	0,32	0,20
Maksimum	226	206	1,01	0,80	0,72
Ortalama	152	137	0,67	0,54	0,41

Tablo 40. Çimento numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	127±42	111±36	0,55±0,18	0,45±0,15	0,25±0,08
Ege	168±72	147±61	0,72±0,30	0,60±0,26	0,34±0,12
Akdeniz	176±64	153±54	0,75±0,27	0,65±0,23	0,37±0,12
Karadeniz	125±33	110±30	0,54±0,15	0,45±0,12	0,22±0,10
İç Anadolu	124±34	109±29	0,54±0,15	0,46±0,12	0,24±0,10
Doğu Anadolu	93±10	83±9	0,41±0,04	0,34±0,04	0,19±0,06
Güney Doğu Anadolu	96±32	86±28	0,42±0,14	0,35±0,12	0,18±0,03
Minimum	62	55	0,27	0,23	0,07
Maksimum	312	268	1,32	1,11	0,51
Ortalama	133	117	0,57	0,48	0,26

Tablo 41. Kum numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	128	121	0,59	0,49±0,18	0,22±0,09
Ege	99	92	0,45	0,38±0,19	0,17±0,05
Akdeniz	106	97	0,47	0,40±0,19	0,20±0,05
Karadeniz	111	104	0,51	0,43±0,15	0,21±0,09
İç Anadolu	129	119	0,58	0,48±0,21	0,28±0,13
Doğu Anadolu	107	99	0,49	0,40±0,13	0,21±0,10
Güney Doğu Anadolu	97	85	0,42	0,34±0,13	0,20±0,11
Minimum	46	43	0,21	0,17	0,09
Maksimum	353	311	1,53	1,30	0,49
Ortalama	112	104	0,51	0,42	0,22

Tablo 42. Tuğla numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	133±21	121±19	0,59±0,09	0,50±0,08	0,21±0,06
Ege	157±44	142±40	0,69±0,19	0,59±0,17	0,21±0,06
Akdeniz	90±16	80±14	0,39±0,07	0,33±0,06	0,13±0,02
Karadeniz	110±29	98±25	0,48±0,12	0,41±0,11	0,15±0,04
İç Anadolu	133±49	118±43	0,58±0,21	0,49±0,18	0,17±0,05
Doğu Anadolu	128±30	114±27	0,56±0,13	0,47±0,10	0,21±0,13
Güney Doğu Anadolu	93±21	83±18	0,41±0,09	0,34±0,07	0,13±0,04
Minimum	60	53	0,26	0,21	0,08
Maksimum	254	226	1,11	0,94	0,59
Ortalama	119	106	0,52	0,44	0,17

Tablo 43. Kiremit numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	115±33	102±31	0,50±0,15	0,42±0,13	0,17±0,07
Ege	141±29	126±28	0,62±0,14	0,52±0,11	0,22±0,10
Akdeniz	89±15	79±15	0,39±0,07	0,33±0,06	0,14±0,04
Karadeniz	112±25	100±21	0,49±0,10	0,41±0,09	0,16±0,05
İç Anadolu	108±60	96±53	0,47±0,26	0,40±0,22	0,16±0,08
Doğu Anadolu	118±29	105±25	0,52±0,12	0,44±0,10	0,17±0,06
Güney Doğu Anadolu	96±8	87±6	0,43±0,03	0,36±0,03	0,14±0,02
Minimum	52	39	0,19	0,16	0,07
Maksimum	216	191	0,94	0,81	0,46
Ortalama	114	101	0,50	0,42	0,17

Tablo 44. Mermer numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	44±15	38±13	0,19±0,07	0,16±0,05	0,10±0,04
Ege	38±8	33±7	0,16±0,04	0,13±0,03	0,08±0,02
Akdeniz	40±10	36±10	0,18±0,05	0,14±0,04	0,10±0,03
Karadeniz	84±70	74±58	0,36±0,28	0,30±0,24	0,17±0,10
İç Anadolu	75±55	67±49	0,33±0,24	0,27±0,21	0,13±0,49
Doğu Anadolu	45±9	40±7	0,30±0,04	0,26±0,03	0,11±0,04
Güney Doğu Anadolu	43±11	38±9	0,19±0,05	0,15±0,04	0,10±0,03
Minimum	23	21	0,10	0,08	0,05
Maksimum	284	237	1,17	0,99	0,46
Ortalama	56	49	0,24	0,20	0,12

Tablo 45. Kireç numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	97±23	84±19	0,41±0,09	0,34±0,08	0,25±0,06
Ege	61±11	53±9	0,26±0,04	0,22±0,04	0,13±0,03
Akdeniz	76±24	69±22	0,34±0,11	0,27±0,08	0,23±0,11
Karadeniz	75±22	67±20	0,33±0,09	0,27±0,08	0,19±0,09
İç Anadolu	78±11	68±10	0,33±0,05	0,28±0,04	0,14±0,03
Doğu Anadolu	81±14	73±11	0,36±0,05	0,29±0,05	0,21±0,05
Güney Doğu Anadolu	91±13	80±11	0,39±0,05	0,32±0,04	0,23±0,03
Minimum	31	27	0,13	0,11	0,06
Maksimum	137	115	0,57	0,47	0,35
Ortalama	79	70	0,34	0,28	0,19

Tablo 46. Alçı numunelerinde hesaplanan Ra_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri

Bölgeler	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
Marmara	36±5	32±4	0,16±0,02	0,13±0,02	0,10±0,01
Ege	51±22	44±19	0,22±0,09	0,18±0,08	0,10±0,06
Akdeniz	44±5	37±4	0,18±0,02	0,15±0,02	0,09±0,01
Karadeniz	44±8	38±7	0,18±0,04	0,15±0,03	0,09±0,02
İç Anadolu	36±9	31±8	0,15±0,04	0,13±0,03	0,07±0,02
Doğu Anadolu	39±4	33±3	0,16±0,02	0,14±0,01	0,08±0,01
Güney Doğu Anadolu	45±6	39±5	0,19±0,02	0,16±0,02	0,09±0,01
Minimum	27	24	0,12	0,09	0,025
Maksimum	101	87	0,43	0,35	0,23
Ortalama	42	36	0,18	0,15	0,09

4.3. Kütle Soğurma Katsayılarının Sonuçları

İnşaat malzemesi olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerinin 80-1400 keV arasında değişen enerjilerde hesaplanan deneysel ve teorik kütle soğurma katsayıları Bulgular bölümünde Tablo 25-32’de özetlenmiştir. Tablolarda görüldüğü gibi deneysel kütle soğurma katsayıları teorik kütle soğurma katsayılarıyla uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelerin aynı enerjideki kütle soğurma katsayılarının değerleri arasında çok az bir fark olduğu ve bu farkında kimyasal analizlerdeki küçük değişimlerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Kütle soğurma katsayılarının artan enerji ile azaldığı tespit edilmiştir. Tablo 47’de kütle soğurma katsayılarının deneysel ve teorik değerlerinin literatürle kıyaslanması verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi deneysel ve teorik değerler genel olarak literatürle uyum içindedir.

^{226}Ra ’un 352 ve 609 keV, ^{232}Th ’un 583 ve 609 keV, ^{137}Cs ’un 661 keV ve ^{40}K ’ın 1460 keV’teki % soğurma oranları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 48’de özetlenmiştir. Tabloda 49’da en yüksek % soğurma oranına sahip olan malzemenin çimento, en düşük % soğurma oranına sahip malzemenin ise kireç olduğu belirlenmiştir.

Tablo 47. Deneysel ve teorik kütle soğurma katsayılarının literatürle kıyaslanması

Enerji (keV)	Gazlı beton		Çimento		Kum			Tuğla		Kiremit		Mermer		Kireç				Alçı				
	D	T	D	T	D	T	(*)	D	T	D	T	(*)	(**)	D	T	D	T	(*)	(**)	D	T	(*)
81	0,220	0,210	0,243	0,250	0,205	0,210	-	0,222	0,218	0,212	0,216	-	-	0,240	0,236	0,256	0,253	-	-	0,245	0,244	-
88	0,207	0,191	0,218	0,226	0,195	0,195	-	0,203	0,201	0,198	0,200	-	-	0,219	0,215	0,226	0,224	-	-	0,224	0,222	-
122	0,189	0,146	0,171	0,170	0,154	0,157	-	0,155	0,160	0,158	0,159	-	-	0,165	0,165	0,155	0,157	-	-	0,170	0,168	-
136	0,175	0,137	0,156	0,158	0,146	0,148	0,111	0,147	0,150	0,153	0,150	-	-	0,155	0,154	0,145	0,143	-	-	0,157	0,157	-
276	0,139	0,098	0,113	0,112	0,112	0,110	0,107	0,112	0,111	0,113	0,110	0,111	-	0,110	0,111	0,098	0,097	0,092	-	0,112	0,112	0,111
302	0,122	0,095	0,106	0,108	0,103	0,106	0,099	0,105	0,107	0,107	0,106	0,103	0,116	0,105	0,107	0,094	0,093	0,088	0,113	0,107	0,108	0,103
356	0,109	0,089	0,100	0,101	0,098	0,100	0,097	0,097	0,100	0,099	0,100	0,098	0,095	0,098	0,100	0,087	0,087	0,081	0,107	0,102	0,101	0,098
383	0,102	0,086	0,096	0,098	0,094	0,096	-	0,094	0,097	0,094	0,096	0,095	-	0,095	0,097	0,083	0,084	0,078	-	0,100	0,098	0,095
511	0,078	0,076	0,087	0,086	0,088	0,085	0,077	0,082	0,086	0,081	0,085	-	-	0,088	0,086	0,073	0,074	-	-	0,089	0,087	-
661	0,063	0,068	0,076	0,077	0,076	0,076	-	0,074	0,077	0,075	0,076	0,074	0,078	0,075	0,077	0,066	0,066	0,060	0,086	0,075	0,077	0,074
834	0,056	0,061	0,067	0,069	0,068	0,068	0,058	0,068	0,069	0,067	0,068	-	-	0,069	0,069	0,060	0,059	-	-	0,070	0,069	-
1173	0,049	0,052	0,058	0,058	0,056	0,058	-	0,057	0,058	0,057	0,058	0,055	0,072	0,059	0,058	0,050	0,050	0,042	0,068	0,059	0,059	0,055
1275	0,046	0,049	0,055	0,056	0,054	0,056	0,054	0,056	0,056	0,056	0,055	-	0,071	0,056	0,056	0,049	0,048	-	0,059	0,056	0,056	-
1332	0,044	0,048	0,053	0,055	0,053	0,054	-	0,054	0,055	0,055	0,054	0,051	0,057	0,054	0,056	0,047	0,047	0,040	0,055	0,055	0,055	0,051

D: Deneysel, T: Teorik, * (Alam vd., 2001), ** (Awadallah ve Imran, 2007)

Tablo 48. İnşaat malzemelerin değişik enerjilerdeki % soğurma oranları

Numuneler	²²⁶ Ra		²³² Th		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
	352 (keV)	609 (keV)	583 (keV)	911 (keV)	661 (keV)	1460 (keV)
Gazlı beton	19	13	13	10	12	8
Çimento	23	18	19	15	18	12
Kum	12	10	10	8	9	6
Tuğla	13	10	10	8	10	7
Kiremit	13	10	10	8	9	7
Mermer	11	9	9	7	9	6
Kireç	8	6	6	5	6	4
Alçı	13	10	10	8	10	7

4.4. İstatistik Analiz

İnşaat malzemesi olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı numunelerinde hesaplanan ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktiflik konsantrasyonlarına göre yapılan tek yönlü varyans analizi (one way ANOVA) sonucunda %5 önem düzeyine göre P değerleri 0,05'ten küçük olduğundan dolayı malzemeler arasında anlamlı farklıklar ortaya çıkmıştır. Bu farklılığı tespit etmek amacıyla Post Hoc (Duncan) testi uygulanmıştır. Bu teste göre elde edilen sonuçlar Tablo 49'da gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi ²²⁶Ra ve ⁴⁰K için 5 grup oluşurken ²³²Th için 6 grup oluşmuştur.

Ayrıca Pearson istatistiği uygulanarak malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler arasındaki korelasyonlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 50'de gösterilmiştir. Tablo 51'de görüldüğü gibi ²²⁶Ra-²³²Th korelasyonu en yüksek çimento ve mermerde, ²²⁶Ra-⁴⁰K korelasyonu en yüksek kiremitte (0,57) ve ²³²Th-⁴⁰K korelasyonu en yüksek tuğlada (0,71) çıkmıştır.

Tablo 49. Tekyönlü varyans analizi sonuçları

Gruplar	²²⁶ Ra		
1	Alçı	Mermer	
2	Kireç	Tuğla	Kiremit
3	Kireç	Kum	
4	Çimento		
5	Gazlı beton		
	²³² Th		
1	Alçı	Mermer	
2	Kireç	Mermer	
3	Kum	Gazlı beton	
4	Kiremit	Gazlı beton	
5	Tuğla	Kiremit	
6	Tuğla	Çimento	
	⁴⁰ K		
1	Alçı		
2	Kireç	Mermer	
3	Çimento		
4	Kiremit	Gazlı beton	
5	Tuğla	Kiremit	Kum

Tablo 50. Malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler arasındaki korelasyon katsayıları

Gazlı beton			
N=19	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,10	1	
^{40}K	-0,24	0,12	1
Çimento			
N=96	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,68	1	
^{40}K	0,35	0,55	1
Kum			
N=259	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,48	1	
^{40}K	0,27	0,61	1
Tuğla			
N=159	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,41	1	
^{40}K	0,36	0,71	1
Kiremit			
N=80	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,47	1	
^{40}K	0,56	0,59	1
Mermer			
N=107	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,84	1	
^{40}K	0,42	0,51	1
Kireç			
N=87	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,41	1	
^{40}K	0,42	-0,24	1
Alçı numuneleri			
N=62	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
^{226}Ra	1		
^{232}Th	0,51	1	
^{40}K	0,34	0,27	1

5. ÖNERİLER

Kullanılan bütün inşaat malzemeleri içinde bulunan radyoaktif çekirdeklerin tam olarak tayin edilebilmesi için alfa, beta ve gama spektrometrik analizlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır.

Ülkemizde doğal kaynaklardan kaynaklanan radyoaktifliğin tam olarak bilinmemesi, insan sağlığı üzerine radyolojik risk tahminine yönelik bilgi eksikliği oluşturmaktadır. Bu yüzden, hem günümüzde hem de gelecekte radyoaktif kirliliğinin değerlendirilmesi açısından bu tür çalışmaların belirli periyotlarla tekrarlanması faydalı olacaktır.

Nevşehir ve Isparta illerinde hesaplanan radyolojik parametreler uluslararası kuruluşların önermiş olduğu maksimum değerleri zorladığından dolayı bu illerin ayrıntılı olarak incelenmesine ihtiyaç vardır.

Ayrıca inşaat malzemelerindeki radon soluma oranlarının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir.

6. KAYNAKLAR

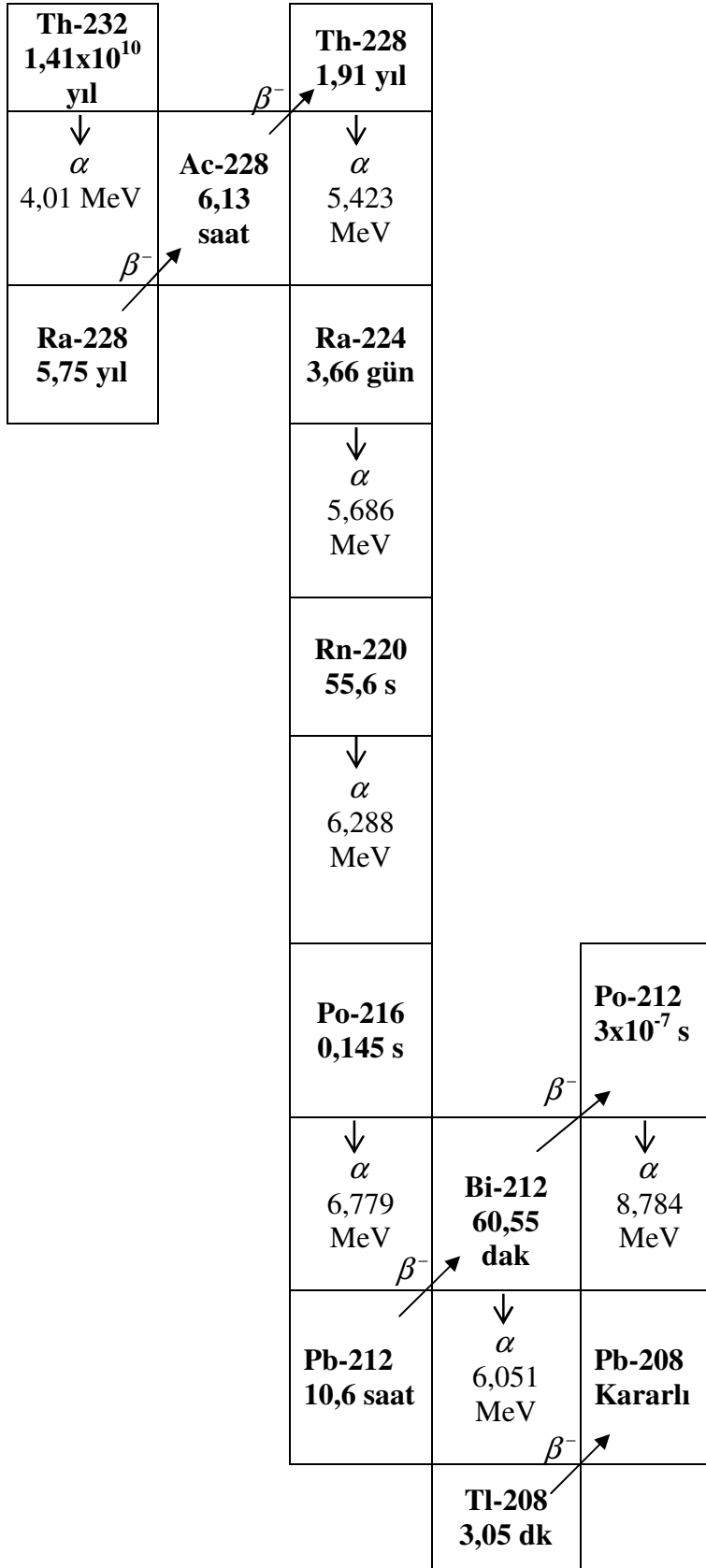
- Abbady, A., 2006. Radiological hazard and radiogenic heat production in some building materials in upper Egypt. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 268, 2, 243-246.
- Ackers, J. G., den Boer, J. F., de Jong, P. ve Wolschrijn, N., 1985. Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in The Netherlands. The Science of the Total Environment, 45, 151-156.
- Ademola, A. K., Hammed, O. S. ve Adejumbi, C. A., 2008. Radioactivity and dose assessment of marble samples from Igbeti Mines, Nigeria. Radiation Protection Dosimetry, 132, 1, 94-97.
- Ahmad, M. N. ve Hussein, A. J. A., 1997. Natural radioactivity in Jordanian building materials and the associated radiation hazards. Journal of Environmental Radioactivity, 39, 9-22.
- Ahmed, N. K., 2005. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. Journal of Environmental Radioactivity, 83, 1, 91-99.
- Alam, M. N., Miah, M. M. H., Chowdhury, M. I., Kamal, M., Ghose, S. ve Ruhi Rahman., 2001. Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. Applied Radiation and Isotopes, 54, 973-976.
- Al-Jundi, J., Salah, W., Bawa'aneh, M. S. ve Afaneh, F., 2005. Exposure to radiation from the natural radioactivity in Jordanian building Materials. Radiation Protection Dosimetry, 118, 93-96.
- Amrani, D. ve Tahtat, M., 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials. Applied Radiation and Isotopes, 54, 4, 687-689.
- Arya A P. (Edit: Şahin, Y.), 1999. "Çekirdek Fiziğinin Esasları", Aktif Yayın, Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul.
- Aslam, M., Orfi, S. D., Khan, K. and Jabbar, A., 2002. Radiological significance of Pakistani marble used for construction of dwellings. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 253, 3, 483-487.
- Awadallah, M. I. ve Imran, M. M. A., 2007. Experimental investigation of γ -ray attenuation in Jordanian building materials using HPGe-spectrometer. Journal of Environmental. Radioactivity, 94, 129-136.
- Bau-Rabee, K. ve Bem, H., 1996. Natural radioactivity in building materials utilized in the state of Kuwait. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters, 213, 2, 143-149.

- Beretka, J. ve Mathew, P. J., 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. Health Physics, 48, 1, 87-95.
- Berger, M. J. ve Hubbell, J. 1987/1999. XCOM: Photon cross sections database, Web Version 1.2., available at <http://physics.nist.gov/xcom>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA (1999). Originally published as NBSIR 87-3597 "XCOM: Photon Cross Section on a Personal Computer".
- Bilge, A. N., 2005. Nükleer Tekniklerin Endüstriye Uygulanması, Bilimsel Yayın No:1, TAEK/ÇNAEM Matbaası, İstanbul.
- Brigidio Flores, O., Montalvan Estrada, N. ve Tomas Zerquera, J., 2005. Natural radioactivity in some building materials in Cuba and their contribution to the indoor gamma dose rate. Radiation Protection Dosimetry, 113, 2, 218-222.
- Chong, C. S. ve Ahmad, G. U., 1982. Gamma activity of some building materials in West Malaysia. Health Physics, 43, 272-273.
- Chowdury, M. I., Alam, M. N. ve Ahmed, A. K. S., 1998. Concentration of radionuclides in building and ceramic materials of Bangladesh and evaluation of radiation hazard. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 231, 117-123.
- EC (European Commission), 1999. Radiation protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- El-Bahi, S. M., 2004. Assessment of radioactivity and radon exhalation rate in Egyptian cement. Health Physics, 86, 5, 517-522.
- Fathivand, A. A., Amidi, J. ve Najafi, A., 2007. The natural radioactivity in the bricks used for the construction of the dwelling in Tehran areas of Iran. Radiation Protection Dosimetry, 123, 3, 391-393.
- Hayumbu, P., Zaman, M. B., Lubaba, N. C. H., Munsanje, S. S. ve Nuleya, D., 1995. Natural radioactivity in Zambian building materials collected from Lusaka. Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry, 199, 229-238.
- Hewamanna, R., Sumithrarachchi, C. S., Mahawatte, P., Nanayakkara, H. L. C. ve Ratnayake, H. C., 2001. Natural radioactivity and gamma dose from Sri Lankan clay bricks used in building construction. Applied Radiation and Isotopes, 54, 365-369.
- Hizem, N., Fredj, A. B. ve Ghedira, L., 2005. Determination of natural radioactivity in building materials used in Tunisian dwellings by gamma ray spectrometry. Radiation Protection Dosimetry, 114, 4, 533-537.
- Ibrahim, N., 1999 Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in building materials. Journal of Environmental Radioactivity, 43, 255-258.
- Khatibeh, A. J. A. H., Maly, A., Ahmad, N. ve Matiullah 1997. Natural radioactivity in Jordanian construction materials. Radiation Protection Dosimetry, 69, 143-147.

- Khan, K. ve Khan, H. M., 2001. Natural gamma-emitting radionuclides in Pakistani Portland cement. Applied Radiation and Isotopes, 54, 5, 861-865.
- Kırkoğlu, M. S., 1990. “Endüstriyel Hammedeler”, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası Gümüşsuyu, İstanbul.
- Kumar, A., Kumar, M., Singh, B. ve Singh, S., 2003. Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K in some Indian building materials. Radiation Measurements, 36, 465-469.
- Kumar, V., Ramachandra, T. V. ve Prasad, R., 1999. Natural radioactivity of Indian building materials and by-products. Applied Radiation and Isotopes, 51, 1, 93-96.
- Kovler, K., Haquin, G., Manasherov, V., Ne’eman, E. ve Lavi, N., 2002. Natural radionuclides in building materials available in Israel. Building and Environment, 37, 531-537.
- Köktürk, U., 2002. “Endüstriyel Hammedeler”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yayınları No :205, İzmir.
- Krane, S. K. (Edit: Şarer, B.), 2001 Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı, Birinci Baskı, Palme Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., Ankara.
- Krieger, V. R., 1981. Radioactivity of construction materials. Betonwerk Fertigteil Technik, 47, 468-473.
- Kumar, V., Ramachandran, T. V. ve Prasad, R., 1999. Natural radioactivity of Indian building materials and by-products. Applied Radiation and Isotopes, 51, 93-96.
- Lee, E. M., Menezes, G. ve Fich, E.C., 2004. Natural radioactivity in building materials in the Republic of Ireland. Health Physics, 86, 378-382.
- Lu, X., 2007. Radiometric analysis and radiological hazards of Chinese commercial marble. Radiation Effects and Defects in Solids, 162, 6, 455-462.
- Lu, X. ve Zhang, X., 2008. Radionuclide content and associated radiation hazards of building materials and by-products in Baoji, China. Radiation Protection Dosimetry, 128, 471-476.
- Malanca, A., Pessina, V. ve Dallara, G., 1993. Radionuclide content of building materials and gamma-ray dose rates in dwellings of Rio-Grande Do-Norte Brazil. Radiation Protection Dosimetry, 48, 199-203.
- Mustapha, A. O., Narayana, D. G. S., Patel, J. P. ve Otswana, D., 1997. Natural radioactivity in some building materials in Kenya and their contributions to the indoor external doses. Radiation Protection Dosimetry, 71, 1, 65-69.
- Mustonen, R., 1984. Natural radioactivity and radon exhalation rate from Finnish building materials. Health Physics, 46, 6, 1195-1203.

- Ng, C. Y., Leung, J. K. C. ve Tso, M. Y. W., 1985. Modelling exposure to naturally occurring radionuclides in building materials. Radiation Protection Dosimetry, 59, 1, 43-48.
- Ngachin, M., Garavaglia, M., Giovani, C., Kwato Njock, M. G. ve Nourreddine, A., 2007. Assessment of natural radioactivity and associated radiation hazards in some Cameroonian building materials. Radiation Measurements, 42, 61-67.
- OECD, 1979. Organization for Economic Cooperation and Development. Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by a group of experts of the OECD Nuclear Energy Agency.
- Othman, I. ve Mahrouka, M., 1994. Radionuclide content in some building materials in Syria and their indoor gamma dose rate. Radiation Protection Dosimetry, 55, 4, 299-304.
- Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J. ve Simopoulos, S. E., 2005. Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials. Journal of Environmental Radioactivity, 61, 257-269.
- Righi, S. ve Bruzzi, L., 2006. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. Journal of Environmental Radioactivity, 88, 158-170.
- Roy, S. ve Alam, M. S., Begum, M. ve Alam, B., 2005. Radioactivity in building materials used in and around Dhaka city. Radiation Protection Dosimetry, 114, 4, 527-532.
- Sciocchetti, G., Scacco, F. ve Baldassini, P. G., 1984. Indoor measurement of airborne natural radioactivity in Italy. Radiation Protection Dosimetry, 7, 1-4, 347-351.
- Salinas, I. C. P., Conti, C. C. ve Lopes, R. T., 2006. Effective density and mass attenuation coefficient for building material in Brazil. Applied Radiation and Isotopes, 64, 13-18.
- Sharaf, M., Mansy, M., El Sayed, A. ve Abbas, E., 1999. Natural radioactivity and radon exhalation rates in building materials used in Egypt. Radiation Measurements, 31, 491-495.
- Singh, C., Singh, T, Kumar, A. ve Mudahar, G.S., 2004. Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefficients of building materials. Annals of Nuclear Energy, 31, 1199-1205.
- Sorantin, H. ve Steger, F., 1984. Natural radioactivity of building materials in Austria. Radiation Protection Dosimetry, 7, 59-61.
- Stoulos, S., Manolopoulou, M. ve Papastefanou, C., 2003. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. Journal of Environmental Radioactivity, 69, 3, 225-240.

- Stranden, E., 1976. Some aspects on radioactivity of building materials. Phys. Norv., 8, 167-173.
- Suzuki, A., Lida, T., Moriizumi, J. ve Sakuma, Y., 2000. The effects of different types of concrete on population doses. Radiation Protection Dosimetry 90, 4, 437-443.
- Tufail, M. Nasim-Akthar, Sabiha-Javed ve Tehsin-Hamid., 2007. Natural radioactivity hazards of building bricks fabricated from saline soil of two districts of Pakistan. Journal of Radiological Protection, 27, 481-492.
- UNSCEAR, 1993. Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, USA.
- UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, USA.
- Uğur, A., 1992. İzmir'de Konut inşaatlarında kullanılan çimento, tuğla ve kiremitlerde radyonüklid içeriğinin saptanması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- URL-1, <http://w3.gazi.edu.tr/~mkaradag/tezler/ebruseyrek.pdf>, 3 Mart 2009.
- URL-2, <http://www.bursacimento.com.tr/cihhek.htm>, 17 Ocak 2009.
- URL-3, http://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye_co%C4%9Frafyas%C4%B1, 5 Şubat 2009.
- Yu, K. N., Cheung, Z. J., Cheung, T., Cheung, T. T. K. ve Lo, T. Y., 2000. Light weight concrete: ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K contents and dose reduction assessment. Applied Radiation and Isotopes, 53, 975-980.
- Zalewski, M., Tomczak, M. ve Kapata, J., 2001. Radioactivity of building materials available in Northeastern Poland. Polish Journal of Environmental Study, 10, 3, 183-188.
- Zikovsky, L. ve Kennedy, G., 1992. Radioactivity of building materials available in Canada. Health Physics, 63, 4, 499-502.
- Zor, T., 1986. Uçucu Küller ve Betonda Kullanımı, 2. Uluslar arası Konferansı.
- Xinwei, L. ve Xiaolan, Z., 2008. Radionuclide content and associated radiation hazards of building materials and by-products in Baoji, west China. Radiation Protection Dosimetry, 128, 471-476.

Ek 2. Doğal radyoaktif ^{232}Th serisi

Ek 3. Aktinyum radyoaktif bozunma serisi

U-235 7,13x10 ⁸ yıl				
∇α 4,58 MeV	Pa-231 32,76 yıl			
	β ⁻ ↘			
Th-231 25,52 saat	∇α 4,05 MeV	Th-227 18,72 gün		
		β ⁻ ↘		
	Ac-227 21,77 yıl	∇α 6,03 MeV		
	∇α 4,9 MeV	Ra-223 11,44 gün		
		β ⁻ ↘		
	Fr-223 21,8 dk	∇α 5,86 MeV		
	∇α 5,3 MeV	Rn-219 18,4 dk		
	At-219 0,9 dk	∇α 6,03 MeV	At-215 10 ⁻⁴ s	
			β ⁻ ↘	
	∇α 6,27 MeV	Po-215 1,83 ms	∇α 8,00 MeV	Po-211 0,52 s
		β ⁻ ↘		
	Bi-215 8 dk	∇α 7,38 MeV	Bi-211 2,15 dk	∇α 7,43 MeV
			β ⁻ ↘	
		β ⁻ ↘		
	Pb-211 36,1 dk	∇α 6,62 MeV	Pb-207 Kararlı	
			β ⁻ ↘	
		Tl-207 4,8 dk		

ÖZGEÇMİŞ

01.01.1979 tarihinde Batman'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Batman'da tamamladı. 1997 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. Haziran 2001'de aynı bölümden mezun oldu. Eylül-2001'de Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. 17.12.2002 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Ocak-2005'te yüksek lisans eğitimini tamamlayıp Şubat 2005'te doktora eğitimine başladı. 17.03.2009 tarihinde Batman Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümüne Araştırma görevlisi olarak atandı. Evli ve bir çocuk sahibi olan Nevzat DAMLA iyi derecede İngilizce bilmektedir.