

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU

## TEKNİK RAPOR

TÜRKİYE'DE KULLANILAN  
YAPI MALZEMELERİNDEKİ DOĞAL  
RADYOAKTİVİTEDEN KAYNAKLANAN  
RADYASYON DOZUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ



## TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU

2690 sayılı Kanun ile kurulmuş olan Türkiye Atom Enerjisi Kurumunun ana görevi; atom enerjisinin barışçıl amaçlarla ülke yararına kullanılmasında izlenecek ulusal politikanın esaslarını ve bu konudaki plan ve programları belirlemek; ülkenin bilimsel, teknik ve ekonomik kalkınmasında atom enerjisinden yararlanılmasını mümkün kılacak her türlü araştırma, geliştirme, inceleme ve çalışmayı yapmak ve yaptırmak, bu alanda yapılacak çalışmaları koordine ve teşvik etmektir.

Bu çalışma TAEK personeli tarafından gerçekleştirilmiş araştırma, geliştirme ve inceleme sonuçlarının paylaşımı amacıyla Teknik Rapor olarak hazırlanmış ve basılmıştır.



Teknik Rapor No: 2008-7  
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu yayınıdır.  
İzin alınmaksızın çoğaltılabilir.  
Referans verilerek kullanılabilir.  
2009 yılında basılmıştır.

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU  
Adres : Eskişehir Yolu 9. km 06530 Ankara/Türkiye  
Tel : +90 (312) 295 87 00  
Fax : +90 (312) 287 87 61  
Web : www.taek.gov.tr

## ÖNSÖZ

*Yapı işlerinde kalıcı olarak kullanılan malzemelerde doğal olarak var olan ve bölgeden bölgeye değişiklik gösteren radyonüklit dağılımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sonuçlarının sunulduğu bu rapor, Türkiye’de ev ve işyeri binalarının yapımında kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan olası radyolojik tehlikelerin değerlendirilmesine ilişkin ilave dozun belirlenmesine ve bu malzemelerin yönetimi, kullanılması, ilgili standartların hazırlanması ve geliştirilmesine yönelik olarak yol gösterici bilgi sağlayacak mahiyette hazırlanmıştır.*

*Bu rapora esas teşkil eden çalışmalarda, ocaklardan, fabrikalardan, inşaat sahalarından ve inşaat sektöründeki firmalardan temin edilen veya Kurumumuza analiz için gönderilen 33 farklı yapı malzemesini temsil eden toplam 1033 adet numune analiz sonucu değerlendirilmiştir. Çalışmalar; RSGD, SANAEM ve ÇNAEM işbirliği ile gerçekleştirilmiştir.*



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

Tablolar Dizini.....	i
Şekiller Dizini.....	iii
Yönetici Özeti.....	v
Executive Summary.....	vii
Kısaltmalar ve Simgeler.....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	4
2.1 Numunelerin Toplanması ve Hazırlanması .....	4
2.2 Doğal Radyoaktivitenin Ölçülmesi.....	5
3. ÖLÇME SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	7
3.1 Aktivite Derişimi.....	7
3.2 Radyolojik Açından Değerlendirme.....	8
3.2.1 Radium Eşdeğer Aktivite Derişimi.....	8
3.2.2 Harici ve Dâhili Aktivite İndisleri.....	8
3.2.3 Soğurulmuş Gama Doz Hızı ve Yapı İçi Etkin Doz Hızı.....	15
4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME.....	19
5. KAYNAKÇA.....	20
Ek A.....	23



## Tablolar Dizini

### Sayfa No

<b>Tablo 1.</b> Türkiye'nin Farklı Bölgelerinden Temin Edilen Yapı Malzemeleri.....	5
<b>Tablo 2.</b> Yapı Malzemelerindeki Doğal Radyoaktivitenin Ölçülmesinde Esas Alınan Veriler.....	6
<b>Tablo 3.</b> Yapısal Malzemelerde Ölçülen $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $\text{Ra}_{\text{eq}}$ Aktivite Derişim Değerleri.....	10
<b>Tablo 4.</b> Kaplama Malzemelerinde Ölçülen $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $\text{Ra}_{\text{eq}}$ Aktivite Derişim Değerleri.....	11
<b>Tablo 5.</b> Katkı Ham Maddelerinde Ölçülen $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ Aktivite Derişim Değerleri.....	12
<b>Tablo 6.</b> Doz Ölçütünün Kontrolüne Yönelik Aktivite Derişim İndisi Değerleri.....	14
<b>Tablo 7.</b> Ölçülen Yapı Malzemelerine İlişkin $I_{\gamma}$ ve $I_{\alpha}$ Değerleri.....	16
<b>Tablo 8.</b> Yapısal ve Kaplama Malzemeleri İçin Değerlendirilen $D_R$ ve $H_R$ Değerleri.....	18





## Şekiller Dizini

### Sayfa No

- Şekil 1.** Otuz Üç Farklı Yapı Malzemesinde Ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  Radyonüklitlerinin Ortalama Aktivite Derişim Değerleri ile Yer Kabuğu Ortalamasının Karşılaştırılması..... 13
- Şekil 2.** Yapısal ve Kaplama Malzemeleri İçin Hesaplanan  $R_{a_{eq}}$  Aktivite Derişiminin Ortalama Değerlerinin, Tavsiye Edilen Sınır Değer ile Karşılaştırılması..... 13
- Şekil A.1.** Odanın x (a), y (b) ve z (c) Düzlemlerinden Alınan Kesitleri.....23



## Yönetici Özeti

Yer kabuğu kökenli yapı malzemeleri, uranyum, toryum, aktinyum gibi doğal radyoaktif serilerdeki radyonüklitleri ve potasyum ( $^{40}\text{K}$ ) radyoizotopunu içermektedir. Yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin aktivite derişimleri normal değerin üzerinde olduğunda, radyonüklitlerden yayınlanan gama ışınlarının sebep olduğu dış ışınlama ve bu tür malzemelerden serbest kalması sonucunda solunum yoluyla vücuda girebilen radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) ve bunların yarılanma süreleri kısa olan bozunum ürünleri tarafından yayınlanan alfa ve beta ışınlarının sebep olduğu iç ışınlama önemli ölçüde artabilir. Yapı malzemelerindeki radyoaktivite seviyelerinin bilinmesi, yapı içi etkin dozun hesaplanması için çok önemli olmasının yanı sıra bu malzemelerin kullanılması ve ilgili standartların geliştirilmesine ilişkin yol gösterici bilgilerin oluşturulmasına da katkı sağlamaktadır.

Bu raporda, Türkiye'nin farklı jeolojik bölgelerinden temin edilen ve 33 farklı yapı malzemesinden oluşan toplam 1033 numunede gama spektrometrik yöntem ile ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimlerinin sonuçları sunulmuştur. Söz konusu numunelerde ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimleri, sırasıyla yapısal malzemeler için,  $4,3 \pm 0,5$  ile  $258,0 \pm 13,0$  Bq kg<sup>-1</sup>,  $1,3 \pm 0,1$  ile  $124,9 \pm 2,5$  Bq kg<sup>-1</sup> ve  $24,4 \pm 2,5$  ile  $1092,0 \pm 26,7$  Bq kg<sup>-1</sup> aralığında; kaplama malzemeleri için,  $0,5 \pm 0,1$  ile  $332,0 \pm 18,1$  Bq kg<sup>-1</sup>,  $0,6 \pm 0,1$  ile  $226,0 \pm 11,0$  Bq kg<sup>-1</sup> ve  $1,5 \pm 0,6$  ile  $1060,0 \pm 100,0$  Bq kg<sup>-1</sup> aralığında; katkı ham maddeleri için,  $1,6 \pm 0,3$  ile  $2972,0 \pm 148,6$  Bq kg<sup>-1</sup>,  $1,1 \pm 0,2$  ile  $393,5 \pm 4,2$  Bq kg<sup>-1</sup> ve  $4,0 \pm 0,4$  ile  $3548,0 \pm 75,0$  Bq kg<sup>-1</sup> aralığında değişmektedir.

Bu raporda, yapı malzemelerinin kullanılmasından kaynaklanabilen radyolojik riskleri değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) aktivite derişimi, aktivite derişim indisi ( $I_{\gamma}$ ), alfa indisi ( $I_{\alpha}$ ), dış ışınlamadan kaynaklanan soğurulmuş gama doz hızı ( $D_R$ ) ve yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ ) hesaplanmış ve ilgili ölçütler veya sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapısal malzemeler ve kaplama malzemeleri için hesaplanan  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  ortalama değerleri, sırasıyla  $39,0 \pm 4,4$  ile  $240,4 \pm 15,7$  Bq kg<sup>-1</sup> ve  $2,4 \pm 0,3$  ile  $276,0 \pm 20,0$  Bq kg<sup>-1</sup> aralığında değişmektedir. Yapısal malzemeler ve kaplama malzemelerine ilişkin ortalama  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  değerleri, ev ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemeleri için aşılmaması tavsiye edilen sınır değer olan 370 Bq kg<sup>-1</sup>'den daha küçüktür. Yapısal ve kaplama malzemeleri için hesaplanan aktivite derişim indisinin ortalama değerleri, yapısal ve kaplama malzemeleri için tavsiye edilen ölçüt değerlerden önemli ölçüde daha küçüktür. Yapısal malzemelerdeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yapı içi etkin doz hızının ortalama değerleri, briket için değerlendirilen ortalama değer ( $1,06 \pm 0,13$ ) hariç, aşılmaması tavsiye edilen sınır değer olan 1 mSv y<sup>-1</sup>'den, 1,5 ila 5 kat daha düşüktür.

Yapılan çalışmalar sonucunda, yapısal ve kaplama malzemelerinin yapı sektöründe kullanılmalarında, herhangi bir radyolojik tehlikenin olmadığı görülmüştür. Katkı ham maddelerinin kullanımı sınırlıdır ve sadece belli bir kısmı, çimento, beton, tuğla gibi yapısal malzemelerde kullanılmaktadır. Özellikle endüstriyel yan ürün olarak elde edilen uçucu kül ve fosfojips gibi katkı maddeleri için hesaplanan indis değerleri, ilgili ölçüt veya sınır değerlere göre daha yüksek olduğundan, bu tür katkı ham maddelerinin kullanıldığı yapısal malzemelerin radyasyon kontrolüne tabi tutulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

## Executive Summary

All building materials of terrestrial origin contain natural radionuclides in the series of uranium, actinium and thorium, and the radioactive isotope of potassium ( $^{40}\text{K}$ ). When the radioactivity concentrations of radionuclides in the building materials are much higher than the mean radioactivity level of earth's crust, the external exposure caused by gamma rays emitted from these radionuclides and the internal exposure caused by the inhalation of radioactive inert gases radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and toron ( $^{220}\text{Rn}$ ), and alpha and beta rays emitted from these gases and its short-lived secondary decay products can be considerably increased. Thus, knowledge of the natural radioactivity level in building materials is important to evaluate the indoor effective dose and to develop the standards and guidelines for use and the management of these materials.

In this report, the results of the radioactivity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in the total of 1033 samples representing 33 different building materials collected from various geological regions of Turkey measured by gamma spectrometric method are presented. The radioactivity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  measured in the investigated samples range from  $4.3 \pm 0.5$  to  $258.0 \pm 13.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $1.3 \pm 0.1$  to  $124.9 \pm 2.5 \text{ Bq kg}^{-1}$  and  $24.4 \pm 2.5$  to  $1092.0 \pm 26.7 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectively, for the structural building materials, and from  $0.5 \pm 0.1$  to  $332.0 \pm 18.1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $0.6 \pm 0.1$  to  $226.0 \pm 11.0 \text{ Bq kg}^{-1}$  and  $1.5 \pm 0.6$  to  $1060.0 \pm 100.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectively, for the covering building materials, and from  $6.0 \pm 0.3$  to  $2972.0 \pm 148.6 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $1.1 \pm 0.2$  to  $393.5 \pm 4.2 \text{ Bq kg}^{-1}$  and  $4.0 \pm 0.4$  to  $3548.0 \pm 75.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectively, for the building raw materials.

In this report, the radium equivalent activity ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), the activity concentration index ( $I_{\gamma}$ ), the alpha index ( $I_{\alpha}$ ), the absorbed gamma dose rate ( $D_R$ ) from the external exposure and the indoor effective dose rate ( $H_R$ ) were calculated and compared to related criteria and limit values to assess the radiological risk from the utilizing of the building materials. The values of the  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  calculated for the structural and covering materials vary from  $39.0 \pm 4.4$  to  $240.4 \pm 15.7 \text{ Bq kg}^{-1}$  and  $2.4 \pm 0.3$  to  $276.0 \pm 20.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectively. The mean values of the calculated  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  for the structural and covering materials are lower than the limit value of  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$  recommended for the building materials used in the construction of dwellings. The mean values of the calculated activity concentration index for the structural and covering materials are lower than the recommended criteria for these materials. The mean values of the indoor effective dose rate caused by the external exposure from the radionuclides in the structural materials, except brick samples (mean value of  $1.06 \pm 0.13$ ), are 1.5 - 5 times lower than the recommended dose criterion of  $1 \text{ mSv y}^{-1}$ .

According to the results of this study, it is seen that the structural and covering materials used in construction industry do not pose any radiological risk. The use of the building raw materials is limited and the only certain portion of these raw materials is used in the structural materials such as cement, concrete, brick, etc. Especially, as the values of index calculated for the building raw materials such as fly ash and phosphogypsum obtained as industrial by products are higher than the related criteria and limit values it is considered that the structural materials produced by using such building raw materials should be subjected to the radiological control.

## Kısaltmalar ve Simgeler

### Kısaltmalar

TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
RSGD	: Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği Dairesi
SANAEM	: Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
AK	: Avrupa Komisyonu
AB	: Avrupa Birliği
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
OECD- NEA	: Organisation for Economic Co-operation and Development- Nuclear Energy Agency
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum

### Simgeler

$Ra_{eq}$	: Radyum eşdeğer aktivite derişimi
$I_{\gamma}$	: Aktivite derişim indisi veya gama indisi
$I_{\alpha}$	: Alfa indisi
$D_R$	: Soğurulmuş gama doz hızı
$H_R$	: Yapı içi etkin doz hızı
$A_{Ra}$	: Radyumun aktivite derişimi
$A_{Th}$	: Toryumun aktivite derişimi
$A_K$	: Potasyumun aktivite derişimi
Sv	: Sievert

Gy	: Gray
Bq	: Becquerel
h	: Saat
y	: Yıl
m	: Mili ( $10^{-3}$ )
n	: Nano ( $10^{-9}$ )
s	: Saniye
SS	: Standart sapma
N	: Analiz edilen numune sayısı



## I. GİRİŞ

İnsanoğlu ve diğer canlılar, milyonlarca yıldan beri evrenden gelen kozmik ışınlar ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan farklı tipteki radyasyona maruz kalmaktadır. İnsanların maruz kaldığı radyasyon dozunun yaklaşık % 90'ı doğal radyoaktiviteden kaynaklanmaktadır. Doğal radyoaktiviteyi; atmosferdeki kozmik parçacıkların (esas olarak yüksek enerjili fotonların) etkileşmesi ile oluşan  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , vb. kozmojenik radyonüklitler ve yıldızlardaki nükleosentez süreci ile oluşan yer kabuğu kökenli radyonüklitler oluşturmaktadır.

Yer kabuğu kökenli ham maddelerde ve binalarda kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen bütün malzemelerde, uranyum ( $^{238}\text{U}$ ), toryum ( $^{232}\text{Th}$ ), aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler, potasyum ( $^{40}\text{K}$ ), rubidyum ( $^{87}\text{Rb}$ ), lantan ( $^{138}\text{La}$ ), samaryum ( $^{147}\text{Sm}$ ) ve lütesyum ( $^{176}\text{Lu}$ ) gibi radyoizotoplar mevcuttur. Ancak  $^{235}\text{U}$ 'in, yer kabuğundaki  $^{238}\text{U}$  içerisindeki izotopik bolluğunun (% 0,7) düşük olmasından dolayı aktinyum serisindeki radyonüklitlerin ve  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{176}\text{Lu}$  gibi radyoizotopların ışınlamaya katkısı çok düşük seviyededir. Bu çalışmada, uranyum serisindeki radyum ( $^{226}\text{Ra}$ ) ile başlayan bozunum ürünleri radyolojik açıdan çok önemli olduklarından uranyum serisi,  $^{238}\text{U}$  yerine uranyum-radyum ( $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$ ) olarak isimlendirilmiştir. Alfa, beta ve gama radyasyonu yayınlayan bu radyonüklitlerin miktarları veya derişimleri, esas olarak yapı malzemelerinin jeokimyasal özelliklerine ve bölgenin jeolojik yapısına bağlı olduğundan, bölgeden bölgeye değişmektedir [1].

Beton, tuğla veya taştan yapılan kâgir yapılarda, yapı malzemeleri dış ortamdaki gelen gama ve kozmik radyasyonları belli oranda tutarak zırh görevi yapmaktadır; ancak bu malzemeler içinde bulunan doğal radyonüklitlerden kaynaklanan farklı tipteki radyasyonlar, aynı zamanda yapı içi ışınlamalara sebep olmaktadır. Bu radyonüklitler, zamanının büyük bir kısmını mesken içinde geçiren bireylerin, iç ve dış olmak üzere iki farklı şekilde ışınlanmasına katkıda bulunur. Yapı malzemelerinden yayınlanan gama radyasyonu, doğrudan dış ışınlamaya sebep olurken bu malzemelerden serbest kalması sonucunda solunum yoluyla vücuda girebilen radon ( $^{222}\text{Rn}$ ;  $^{226}\text{Ra}$ 'nın ürün çekirdeği), toron ( $^{220}\text{Rn}$ ;  $^{224}\text{Ra}$ 'nın ürün çekirdeği) ve bunların yarılanma süreleri kısa olan bozunum ürünlerinden yayınlanan alfa ve beta radyasyonu ise iç ışınlamaya katkıda bulunmaktadır.

Bireylerin maruz kaldıkları radyasyon dozları, radyoaktivitesi normal düzeyin üzerinde olan yapı malzemelerinin kullanıldığı ev ve iş yerlerinde yaşamaları hâlinde artabilir. Bu yüzden yapı malzemelerindeki radynüklitlerin derişimlerinin bilinmesi,

- Bu tür malzemelerin kullanımı sonucunda bireyler için olası radyolojik riskin değerlendirilmesi,

- Çalışma yerlerinde ve evlerde, bireylerin doğal yollarla aldıkları radyasyon dozu içindeki yapı malzemelerinden gelen katkının hesaplanması,

- Yapı malzemeleri ile ilgili standartların oluşturulması, geliştirilmesi ve bu malzemelerin kullanımı ve yönetimi için yol gösterici bilgilerin hazırlanması açısından çok önemlidir.

Bugün birçok ülkede yapı malzemelerindeki aktivite derişiminin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [2-25]. Avrupa'da bazı ülkeler, yapı malzemelerinin radyoaktivitesi ile ilgili olarak kendilerine özgü düzenlemeler hazırlamışlardır. Ancak Avrupa Komisyonu (AK) tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi etkin doz hızı,  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  olarak sınırlandırılmış ve bu değerin üzerinde gama doz hızına sebep olabilecek miktarda radyoaktivite içeren yapı malzemelerinin, üye ülkelerde dolaşımının kısıtlanması öngörülmüştür [26]. Ülkemizde, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 08/09/2002 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Yapı Malzemeleri Yönetmeliği (89/106/EEC), yapı işlerine ilişkin gerekli kuralları oluşturmuştur. Ancak yer kabuğu kökenli ham maddelerin, endüstriyel işlemler sonucunda yan ürün olarak elde edilen katkı maddelerinin ve yapı işlerinde kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen bütün yapı malzemelerinin kullanılmasında radyolojik açıdan sınırlama getiren herhangi bir mevzuat henüz hazırlanamamış veya yapı malzemeleri ile ilgili mevzuata bu husus ilave edilmemiştir.

TAEK, 24/03/2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinin 29/09/2004 tarih ve 25598 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile değişik Doğal Radyasyon başlıklı 37. maddesindeki "Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin yapı malzemeleri nedeniyle artmasının önlenmesi ve toplum üyelerinin alacağı radyasyonun mümkün olan en düşük seviyede tutulması amacıyla bu malzemelerdeki radyoaktivitenin kontrolü esastır" hükmünden hareketle yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin tespitine ilişkin çalışmalarını sürdürmektedir. Bu amaca yönelik olarak bugüne kadar yapılan çalışmalarda, ocaklardan, fabrikalardan ve inşaat sahalarından temin edilen veya Kurumumuza intikal eden 33 farklı yapı malzemesini temsil eden, toplam 1033 numunenin her birindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimleri, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüne sahip gama spektrometreleri kullanılarak ölçülmüştür.

Bu raporun hazırlanmasının amacı, Türkiye’de kullanılan yapı malzemeleri ile ilgili olarak bugüne kadar yapılan radyoaktivite ölçme sonuçlarını değerlendirmek suretiyle, insanımızın yapı malzemelerinden aldığı yapı içi yıllık etkin dozu belirlemek ve verileri rapor hâline getirmektir. Aynı zamanda bu verileri, ilgili kurum ve kuruluşlar ile paylaşarak yapı malzemelerine ilişkin radyolojik hususların belirlenmesi ve ilgili standartların hazırlanmasında doğru ve güvenilir bilgi altyapısı oluşturmaktır.

Raporda, ölçülen numunelere ilişkin aktive derişim sonuçları ile birlikte yapı malzemelerinin kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskleri değerlendirmek amacıyla hesaplanan radyum eşdeğer ( $Ra_{eq}$ ) aktivite derişimi, aktivite derişim indisi ( $I_\gamma$ ), alfa indisi ( $I_\alpha$ ), dış ışınlamadan kaynaklanan soğurulmuş gama doz hızı ( $D_R$ ) ve yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ ) verileri, Tablo hâlinde verilmiştir. Yapı malzemelerinin olası radyolojik risk açısından değerlendirilmesinde, Avrupa Birliği (AB) tarafından kullanılması tavsiye edilen sınırlamalar esas alınmıştır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Numunelerin Toplanması ve Hazırlanması

Bu çalışmada, Türkiye'de kullanılan yapı malzemeleri; yapı içinde doğrudan kullanılan yapısal malzemeler, duvar ve zemin kaplanmasında kullanılan kaplama malzemeleri ile bina ve diğer inşaat mühendisliği işlerinde kalıcı olarak kullanılan yapı malzemelerinin içine katılan katkı ham maddeleri olarak üç ayrı grupta değerlendirilmiştir. Seramik, fayans, mermer, granit gibi kaplama malzemeleri, sadece banyo veya mutfakta kullanılmaktadır. Endüstriyel işlemler sonucu yan ürün olarak elde edilen uçucu kül, sepere edilmiş kül ve fosfojipsler, çimento ve hazır beton içerisine belli bir oranda katılmaktadır.

Tablo 1'de verilen her bir numune, 1- 1,5 kg olacak şekilde tedarik edilmiştir. Çimento ve küllerin dışındaki bütün numuneler, öğütücü kullanılarak toz hâline getirilmiş ve gözenek büyüklüğü 1 mm olan elekten geçirilmiştir. Böylece numuneler ile kullanılan kalibrasyon kaynaklarının geometrileri benzer duruma getirilmiştir. Daha sonra net ağırlıklarını belirlemek amacıyla, numuneler, sıcaklığı 105°C - 110°C olacak şekilde ayarlanmış fırın içinde, 20 - 24 saat süreyle bekletilerek kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kalibrasyon kaynakları ile aynı boyuta sahip numune kaplarının içine yerleştirilen numunelerin tartımı yapıldıktan sonra, numune kapları sızdırmaz bir şekilde kapatılarak <sup>226</sup>Ra ve ürün çekirdeği olan <sup>222</sup>Rn arasındaki kalıcı dengeyi oluşturmak için, 3 - 4 hafta bekletilmiştir. Böylece numuneler radyoaktivite ölçme işlemine hazır hâle getirilmiştir.

**Tablo I.** Türkiye'nin Farklı Bölgelerinden Temin Edilen Yapı Malzemeleri

Kategori	Malzeme	Numune sayısı
Yapısal malzeme	Çimento	164
	Hazır beton	25
	Gaz beton	7
	Tuğla	11
	Briket	4
	Ytong tuğla	3
	Çakıl	9
	Kum	34
	Kül katkılı beton	141
	<b>Toplam</b>	<b>398</b>
Kaplama malzemesi	Mermer	25
	Granit	35
	Seramik	18
	Traverten	2
	Mozaik	5
	Fayans	6
	Yer karosu	9
	Alçı/Alçıtaşı	39
	Kireç/Kireçtaşı	72
	Fayans yapıştırıcı	7
	Derz dolgusu	3
	<b>Toplam</b>	<b>221</b>
Katkı ham maddesi	Fosfojips	8
	Uçucu kül	193
	Sepere edilmiş kül	7
	Ponza	110
	Cüruf	17
	Kil	20
	Marl	7
	Tras	27
	Demir cevheri	4
	Boksit	3
	Kaolen	4
	Pirit külü	4
	Klinker (çimento ara maddesi)	10
	<b>Toplam</b>	<b>414</b>

## 2.2. Doğal Radyoaktivitenin Ölçülmesi

Her bir numunedeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimleri, bağıl verimleri %10, %50 ve %110 olan HPGe dedektöründen ve ilgili elektronik donanımdan oluşan gama spektrometreleri kullanılarak ölçülmüştür. Dedektörler, doğal fon radyasyonunu en aza indirmek amacıyla zırhlanmıştır. HPGe dedektörlerinin

mutlak verim kalibrasyonları, RGU-I (uranyum cevheri), RGTh-I (toryum cevheri), RGK-I ( $K_2SO_4$ ) referans malzemeleri ve  $^{210}Pb$ ,  $^{241}Am$ ,  $^{109}Cd$ ,  $^{57}Co$ ,  $^{139}Ce$ ,  $^{203}Hg$ ,  $^{113}Sn$ ,  $^{85}Sr$ ,  $^{137}Cs$ ,  $^{88}Y$  ve  $^{60}Co$  radyonüklitini içeren kalibrasyon kaynakları kullanılarak yapılmıştır.  $^{226}Ra$  ve  $^{232}Th$  aktivite derişimleri,  $^{226}Ra$  ile  $^{232}Th$ 'nin Tablo 2'de verilen bozunum ürünleri ile kalıcı dengede olduğu esas alınarak ve bu bozunum ürünlerinin aktivitelerinin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanmıştır. [27]. Ancak bazı durumlarda  $^{226}Ra$ 'nın aktivitesinin belirlenmesinde, kendisine ait 186,2 keV enerjili gama ışını da kullanılmıştır.  $^{40}K$  aktivite derişimi ise sadece bu radyonüklit tarafından yayınlanan 1460 keV enerjili gama piki kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 2).

**Tablo 2.** Yapı Malzemelerindeki Doğal Radyoaktivitenin Ölçülmesinde Esas Alınan Veriler [28]

Radyonüklit	Gama-ışını enerjisi keV	Gama ışınının yayınlanma ihtimali %	Gama ışını yayınlayan bozunum ürünü
$^{226}Ra$	186,2	3,6	$^{226}Ra$
	295,2	18,2	$^{214}Pb$
	351,9	35,1	$^{214}Pb$
	609,3	44,6	$^{214}Bi$
	1764,5	15,1	$^{214}Bi$
$^{232}Th$	583,2	30,6	$^{208}Tl$
	727,3		$^{212}Bi$
	338,4	11,3	$^{228}Ac$
	911,2	26,6	$^{228}Ac$
$^{40}K$	1460,8	10,7	$^{40}K$

## 3. ÖLÇME SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

### 3.1. Aktivite Derişimi

Türkiye’de kullanılan 33 farklı yapı malzemesini temsil eden 1033 adet numunedeki <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite derişimleri ölçülmüştür. Bu radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ortalama değerleri ve aralıkları (en küçük ve en büyük), istatistikî belirsizlikleri ( $1\sigma$ ) ile birlikte yapısal malzemeler için Tablo 3’te, kaplama malzemeleri için Tablo 4’de ve katkı ham maddeleri için Tablo 5’te verilmiştir.

UNSCEAR (2000) raporunda, yer kabuğundaki <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite derişimlerinin ağırlıklı dünya ortalaması sırasıyla, 32, 45 ve 420 Bq kg<sup>-1</sup> olarak verilmiştir [1]. İncelenen numunelerde ölçülen <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite derişimlerinin ortalama değerlerinin, yer kabuğu ortalama değerleri ile karşılaştırılması, Şekil 1’de gösterilmiştir. Yapısal malzeme numunelerinde ölçülen <sup>226</sup>Ra aktivite derişiminin ortalama değerleri, çimento, briket ve katkılı beton numuneleri hariç ve kaplama malzemesi numunelerinde ölçülen <sup>226</sup>Ra aktivite derişiminin ortalama değerleri ise, granit, seramik, fayans ve karo numuneleri hariç, yer kabuğu ortalamasından daha küçük iken, katkı ham maddesi numunelerinde ölçülen <sup>226</sup>Ra aktivite derişiminin ortalama değerleri, kil, marl, pirit külü ve klinker numuneleri hariç, yer kabuğu ortalamasından daha büyüktür. Çimento, briket ve katkılı betonda <sup>226</sup>Ra aktivite derişiminin, ortalamaya göre daha yüksek olması, bu malzemelere katılan ham maddelerden (cüruf, ponza, boksit, uçucu kül ve kaolen) ileri gelmektedir. Numunelerde ölçülen <sup>232</sup>Th aktivite derişiminin ortalama değerleri, briket, katkılı beton, granit, seramik, fayans, karo, uçucu kül, sepere kül, ponza, cüruf, tras, boksit ve kaolen numuneleri hariç, yer kabuğu ortalamasından daha küçük iken, briket, tuğla, fayans, seramik, granit, tras, kil, cüruf ponza, uçucu kül ve sepere kül numunelerinde ölçülen <sup>40</sup>K ortalama aktivite derişim değerleri, yer kabuğu ortalamasından daha büyüktür.

## 3.2. Radyolojik Açıdan Değerlendirme

### 3.2.1. Radyum Eşdeğer Aktivite Derişimi

Şekil 1'den de görülebileceği gibi yapı malzemesi numunelerindeki doğal radyonüklitler düzgün dağılımlı olmadıklarından, bu radyonüklitlerden kaynaklanan radyolojik tehlikeleri hesaba katmak ve  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un aktivite derişim seviyesini temsil etmek amacıyla radyum eşdeğer ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) aktivite indisi türetilmiştir [21].  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  aktivite derişimi (veya indisi), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + \left(\frac{10}{7}\right) \cdot A_{\text{Th}} + \left(\frac{10}{130}\right) \cdot A_{\text{K}} \quad (1)$$

Burada,  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  ve  $A_{\text{K}}$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'in sırasıyla,  $\text{Bq kg}^{-1}$  cinsinden aktivite derişimidir. OECD-NEA tarafından 1979 yılında yayımlanan raporda, ev ve işyeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemelere yönelik olarak  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  aktivite derişimi için  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$ , müsaade edilen en büyük değeri olarak belirlenmiştir.  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  aktivite derişiminin, bu değere eşit veya küçük olması durumunda, yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yapı içi yıllık etkin doz değerinin  $1,5 \text{ mSv}$ 'in altında olacağı kabul edilmiştir.

Yapısal ve kaplama malzemeleri için hesaplanan  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  değerleri, Tablo 3 ve Tablo 4'ün son sütununda verilmiştir. Yapısal malzemelere ilişkin ortalama  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  değerleri,  $39,0 \pm 4,4$  ile  $240,4 \pm 15,7 \text{ Bq kg}^{-1}$  aralığında ve kaplama malzemelerine ilişkin ortalama  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  değerleri ise  $2,4 \pm 0,3$  ile  $276,0 \pm 20,0 \text{ Bq kg}^{-1}$  aralığında değişmektedir. Bu malzemeler için hesaplanan ortalama değerler, aşılması tavsiye edilen sınır değerden ( $370 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) daha küçüktür (Şekil 2). Uzun yıllar radyolojik kontrole yönelik olarak kullanılan  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  aktivite derişim indisi ölçüt olarak alındığında incelenen yapısal ve kaplama malzemesi numunelerinin, ev ve işyeri binalarında kullanılmasının, radyolojik açıdan herhangi bir tehlike oluşturmayacağı açıktır. Ancak günümüzde bu indisin yerini gama indisi almıştır.

### 3.2.2. Harici ve Dâhili Aktivite İndisleri

Yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi gama radyasyon dozuna;  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi birden daha fazla radyonüklit katkıda bulunduğundan dolayı, bu radyonüklitleri içeren malzemelerin özgül aktivitelerini karşılaştırmak ve



uygulama sınırının aşıp aşılmadığını değerlendirmek amacıyla aktivite indislerinin türetilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Aktivite indisinin türetilmesinde, malzemenin tipi ve yapı içindeki miktarı dikkate alınmalıdır. Duvarların kalınlıkları, kapı ve pencerelerin yerleri ve radyonüklitlerin düzgün dağılım göstermesi, farklı doz hızı dağılımlarını oluşturabilir. Bu yüzden farklı modeller kullanılarak farklı indisler elde edilebilir. Bugüne kadar aktivite derişim indisi veya gama indisi ( $I_\gamma$ ), temsili (tipik) seviye indisi ( $I_{\gamma r}$ ) ve harici indis ( $H_{ex}$ ) olarak isimlendirilen bir çok aktivite indisi teklif edilmiştir [22-25].

**Tablo 3.** Yapısal Malzemelerde Ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  Aktivite Derişim Değerleri

Malzeme	N	Aktivite Derişimi ( $\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$ )				$\text{Ra}_{\text{eq}}$
		$\text{A}_{\text{Ra}}$	$\text{A}_{\text{Th}}$	$\text{A}_{\text{K}}$		
Çimento	Aralık	12,5 ± 0,3- 162,5 ± 1,7	6,7 ± 0,3- 124,9 ± 2,5	64,4 ± 2,3- 679,3 ± 18,2	37,2 ± 8,7- 331,1 ± 15,5	
	Ort.	42,0 ± 1,3	27,1 ± 1,4	269,4 ± 12,8	101,5 ± 13,1	
Hazır beton	Aralık	6,0 ± 2,0- 39,0 ± 12,0	1,3 ± 0,1- 21,5 ± 1,8	44,8 ± 1,1- 465,4 ± 9,3	16,9 ± 1,4- 93,4 ± 9,5	
	Ort.	18,8 ± 3,5	26,6 ± 10,7	170,1 ± 9,9	44,0 ± 10,9	
Gaz beton	Aralık	12,3 ± 0,6- 23,6 ± 1,6	6,6 ± 0,5- 36,7 ± 1,8	246,0 ± 20,1- 403,2 ± 6,1	50,2 ± 20,1- 100,7 ± 6,4	
	Ort.	17,2 ± 1,0	22,1 ± 1,4	325,3 ± 8,1	73,8 ± 8,1	
Tuğla	Aralık	24,7 ± 1,1- 49,0 ± 3,0	26,6 ± 2,1- 51,2 ± 4,3	587,3 ± 16,0- 1092,0 ± 26,7	111,0 ± 16,3- 206,1 ± 27,2	
	Ort.	31,2 ± 1,5	37,22 ± 2,3	775,8 ± 13,7	144,0 ± 14,0	
Briket	Aralık	65,8 ± 1,7- 74,7 ± 3,1	52,8 ± 3,1- 79,3 ± 2,9	723,0 ± 13,4- 1079,8 ± 19,6	197,7 ± 14,0- 265,4 ± 20,3	
	Ort.	69,9 ± 2,5	69,6 ± 3,5	923,4 ± 15,0	240,4 ± 15,7	
Ytong tuğla	Aralık	4,3 ± 0,3- 12,9 ± 0,7	6,4 ± 0,7- 16,6 ± 1,2	148,4 ± 3,5- 326,0 ± 5,8	30,3 ± 3,6- 48,0 ± 3,8	
	Ort.	8,8 ± 0,5	9,9 ± 0,9	208,3 ± 4,3	39,0 ± 4,4	
Çakıl	Aralık	14,0 ± 1,0- 28,3 ± 0,7	2,0 ± 0,2- 32,3 ± 1,4	27,0 ± 1,5- 551,6 ± 13,9	18,9 ± 1,8- 116,7 ± 6,1	
	Ort.	20,1 ± 1,0	20,6 ± 1,2	382,5 ± 7,1	78,9 ± 7,4	
Kum	Aralık	4,0 ± 0,5- 56,0 ± 1,9	2,2 ± 0,2- 67,0 ± 3,4	54,0 ± 1,0- 879,1 ± 14,7	14,2 ± 1,3- 203,3 ± 12,9	
	Ort.	16,1 ± 0,9	18,3 ± 1,2	363,9 ± 7,7	70,2 ± 7,8	
Katkılı beton <sup>a</sup>	Aralık	6,0 ± 0,5- 258,0 ± 13,0	2,0 ± 0,5- 26,7 ± 1,3	24,4 ± 2,5- 436,0 ± 7,0	18,5 ± 5,5- 271,4 ± 14,4	
	Ort.	49,2 ± 5,9	8,8 ± 1,5	93,1 ± 6,7	69,0 ± 9,5	

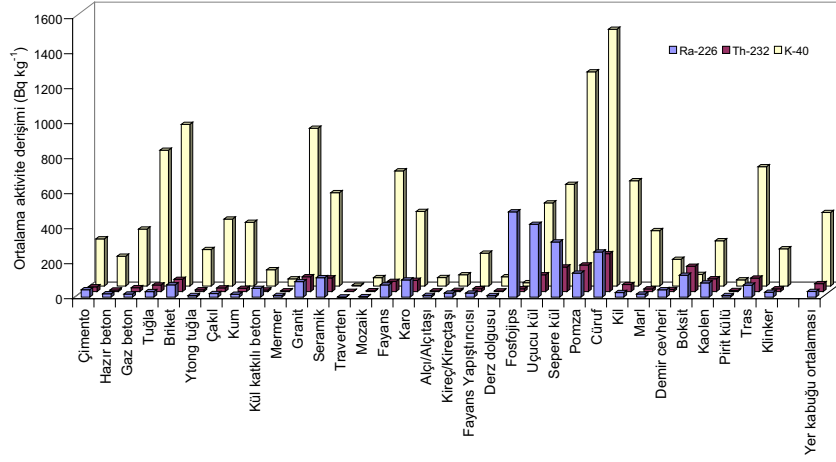
<sup>a</sup> Beton içine % 5 ila % 20 uçucu kıl katılmıştır

**Tablo 4.** Kaplama Malzemelerinde Ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  Aktivite Derişim Değerleri

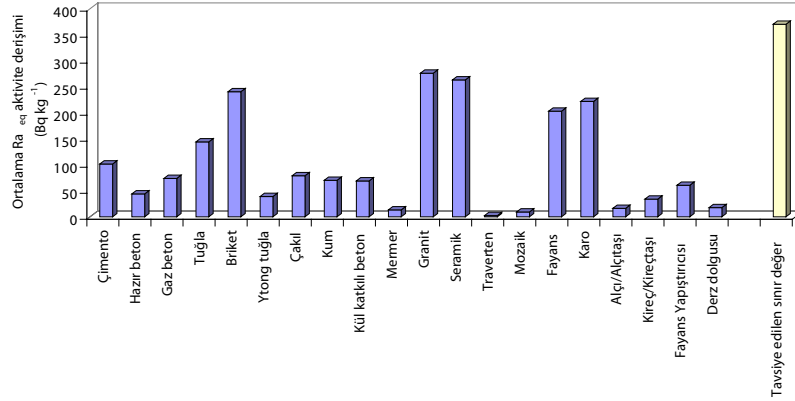
Malzeme	N	Aktivite Derişimi ( $\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$ )					$\text{Ra}_{\text{eq}}$
		$\text{A}_{\text{Ra}}$	$\text{A}_{\text{Th}}$	$\text{A}_{\text{K}}$			
Mermer	25	Aralık	0,5 ± 0,1- 55,8 ± 2,5	1,1 ± 0,1- 11,8 ± 1,0	1,5 ± 0,6- 366,7 ± 6,3		0,2 ± 0,1- 60,1 ± 3,9
		Ort.	9,2 ± 0,6	4,3 ± 0,5	40,8 ± 1,1		13,3 ± 1,6
Granit	35	Aralık	3,0 ± 0,3- 332,0 ± 13,0	1,2 ± 0,1- 226,0 ± 11,0	1,5 ± 0,6- 1925,0 ± 17,0		3,29 ± 1,4- 663,9 ± 17,4
		Ort.	88,2 ± 3,9	84,6 ± 4,4	901,3 ± 18,0		276,0 ± 20,0
Seramik	18	Aralık	38,0 ± 1,6- 326,3 ± 18,1	44,8 ± 2,2- 123,0 ± 7,0	10,8 ± 3,3- 1249,0 ± 21,0		143,8 ± 21,4- 486,1 ± 21,2
		Ort.	110,6 ± 7,2	78,0 ± 4,0	533,1 ± 12,6		263,1 ± 16,1
Traverten	2	Aralık	0,5 ± 0,1- 1,1 ± 0,1	0,6 ± 1,1- 1,1 ± 0,2	3,1 ± 0,1- 5,1 ± 0,2		2,2 ± 0,3- 2,5 ± 0,3
		Ort.	0,8 ± 0,1	0,9 ± 0,2	4,1 ± 0,2		2,4 ± 0,3
Mozaik	5	Aralık	0,7 ± 0,1- 3,8 ± 0,3	3,1 ± 0,3- 6,6 ± 0,4	3,3 ± 0,1- 110,8 ± 9,6		0,7 ± 0,1- 20,6 ± 1,9
		Ort.	2,4 ± 0,2	4,6 ± 0,4	47,8 ± 2,9		9,3 ± 0,8
Fayans	6	Aralık	40,2 ± 2,4- 96,0 ± 4,3	40,0 ± 9,0- 68,7 ± 5,0	289,7 ± 8,9- 1060,0 ± 100,0		138,7 ± 10,1- 237,2 ± 17,0
		Ort.	69,4 ± 3,1	58,1 ± 5,7	657,9 ± 40,0		203,0 ± 40,9
Karo	9	Aralık	38,0 ± 1,6- 294,0 ± 3,0	41,0 ± 3,0- 89,0 ± 2,0	170,0 ± 2,0- 640,0 ± 12,0		143,8 ± 21,4- 417,1 ± 3,7
		Ort.	97,7 ± 6,3	63,9 ± 2,9	426,0 ± 16,2		221,7 ± 18,0
Alçı/Alçıtaşı	39	Aralık	0,7 ± 0,1- 36,8 ± 1,0	0,6 ± 0,1- 18,2 ± 1,7	2,0 ± 0,1- 186,3 ± 4,5		0,7 ± 0,1- 56,5 ± 6,4
		Ort.	9,6 ± 0,4	3,8 ± 0,3	48,3 ± 2,6		16,2 ± 2,5
Kireç/Kireçtaşı	72	Aralık	1,0 ± 0,1- 125,0 ± 4,0	0,8 ± 0,1- 58,0 ± 2,0	4,0 ± 0,3- 493,0 ± 14,0		0,3 ± 0,2- 211,2 ± 5,4
		Ort.	22,6 ± 0,7	6,4 ± 0,5	64,3 ± 3,7		34,0 ± 3,7
F. Yapıştırıcısı	7	Aralık	6,0 ± 1,0- 69,4 ± 2,7	1,7 ± 0,2- 56,6 ± 3,3	11,9 ± 1,2- 816,0 ± 35,5		11,3 ± 0,6- 213,0 ± 35,8
		Ort.	22,9 ± 1,1	16,3 ± 1,1	187,5 ± 6,6		60,6 ± 7,0
Derz dolgusu	3	Aralık	7,3 ± 1,0- 10,5 ± 0,9	1,6 ± 0,2- 5,7 ± 0,6	13,1 ± 1,3- 110,7 ± 3,7		15,0 ± 5,5- 21,2 ± 3,9

**Tablo 5.** Katkı Ham Maddelerinde Ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  Aktivite Değişimi

Malzeme	N	Aktivite Değişimi ( $\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$ )		
		$A_{\text{Ra}}$	$A_{\text{Th}}$	$A_{\text{K}}$
Fosfojips	8	Aralık	$5,0 \pm 3,0- 37,0 \pm 3,0$	$4,0 \pm 0,4- 38,6 \pm 3,9$
		Ort.	$15,7 \pm 14,0$	$18,8 \pm 1,9$
Uçucu kül	193	Aralık	$9,0 \pm 1,0- 253,0 \pm 15,2$	$10,0 \pm 1,0- 2511,0 \pm 262,0$
		Ort.	$95,7 \pm 5,8$	$474,8 \pm 22,40$
Sepere kül	7	Aralık	$137,0 \pm 2,0- 142,0 \pm 2,0$	$477,1 \pm 6,6- 634,0 \pm 15,0$
		Ort.	$140,0 \pm 2,8$	$580,9 \pm 12,6$
Ponza	110	Aralık	$12,0 \pm 1,0- 295,1 \pm 1,9$	$289,0 \pm 10,0- 1899,0 \pm 30,8$
		Ort.	$151,7 \pm 4,7$	$1223,7 \pm 28,6$
Cüruf	17	Aralık	$77,9 \pm 5,6- 337,5 \pm 15,7$	$219,7 \pm 9,5- 3548,0 \pm 75,0$
		Ort.	$216,5 \pm 8,0$	$1466,9 \pm 15,5$
Kil	20	Aralık	$4,0 \pm 1,0- 113,4 \pm 6,0$	$75,0 \pm 9,0- 1103,6 \pm 24,8$
		Ort.	$39,9 \pm 1,6$	$601,6 \pm 23,9$
Marl	7	Aralık	$5,3 \pm 0,6- 24,2 \pm 2,2$	$105,5 \pm 6,0- 437,5 \pm 5,9$
		Ort.	$15,0 \pm 1,7$	$316,3 \pm 7,6$
Tras	27	Aralık	$1,3 \pm 0,5- 363,7 \pm 11,3$	$114,4 \pm 4,4- 1505,9 \pm 14,1$
		Ort.	$76,7 \pm 3,6$	$681,6 \pm 11,1$
Demir cevheri	4	Aralık	$1,5 \pm 0,3- 26,2 \pm 1,6$	$8,0 \pm 0,4- 353,5 \pm 7,0$
		Ort.	$11,4 \pm 0,8$	$152,6 \pm 2,8$
Boksit	3	Aralık	$19,1 \pm 0,9- 393,5 \pm 4,2$	$11,1 \pm 0,3- 111,6 \pm 11,6$
		Ort.	$144,4 \pm 2,0$	$66,0 \pm 4,5$
Kaolen	4	Aralık	$56,0 \pm 6,0- 92,4 \pm 3,8$	$28,0 \pm 3,0- 694,9 \pm 14,4$
		Ort.	$72,9 \pm 4,1$	$258,6 \pm 6,1$
Pirit külü	4	Aralık	$1,1 \pm 0,2- 16,1 \pm 2,2$	$15,8 \pm 0,6- 57,6 \pm 2,5$
		Ort.	$5,9 \pm 0,9$	$35,2 \pm 1,3$
Klinker	10	Aralık	$10,7 \pm 0,7- 19,6 \pm 1,0$	$144,6 \pm 3,7- 294,4 \pm 5,2$
		Ort.	$15,6 \pm 1,2$	$212,7 \pm 5,2$



**Şekil 1.** Otuz Üç Farklı Yapı Malzemesinde Ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  Radyonüklitlerinin Ortalama Aktivite Derişim Değerleri ile Yer Kabuğu Ortalamasının Karşılaştırılması



**Şekil 2.** Yapısal ve Kaplama Malzemeleri İçin Hesaplanan  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  Aktivite Derişiminin Ortalama Değerlerinin, Tavsiye Edilen Sınır Değer ile Karşılaştırılması

Bu çalışmada, AK tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, tavsiye edilen aktivite derişim indisi dikkate alınmış ve raporda açıklandığı gibi hesaplanmıştır [26]. Ayrıca Türkiye'deki tipik ev ve işyeri binaları için aktivite derişim

indisi türetilmiştir. Bu indisin türetilmesi için kullanılan yöntem, Ek A'da açıklanmıştır.

Aktivite derişim indisi, ev ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemeler için aşağıda eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{\gamma} = \frac{A_{Ra}}{300 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_K}{3000 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (2)$$

Burada,  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın sırasıyla,  $\text{Bq kg}^{-1}$  cinsinden aktivite derişimidir. Aktivite derişim indisi, doz sınırına, malzemenin yapı içinde kullanılma şekline ve miktarına bağlı olarak Tablo 6'da verilen değerleri aşmamalıdır.  $I_{\gamma} \leq 1$  olduğu durumlarda, yapı malzemesi herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir.

**Tablo 6.** Doz Ölçütünün Kontrolüne Yönelik Aktivite Derişim İndisi Değerleri [26]

Doz ölçütü	0,3 mSv y <sup>-1</sup>	1 mSv y <sup>-1</sup>
Yapısal malzemeler (beton, tuğla, vb.)	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Yüzeysel olarak ve sınırlı kullanıma sahip diğer malzemeler (kiremit, vb.)	$I \leq 2$	$I \leq 6$

Uranyum-radyum serisinden radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ve toryum serisinden toron ( $^{220}\text{Rn}$ ), alfa radyasyonu yayınlayan radyonüklitlerdir. Her ikisi de asal gaz olduklarından, yapı malzemeleri gibi gözenekli ortamlarda serbestçe hareket edebilir ve malzemede oluşan  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$ 'nin bir kısmı yüzeye ulaşır ve ev ve işyeri binalarının içine nüfuz edebilirler. Binalar içindeki en önemli  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$  kaynağı, binaların temelinde bulunan topraktır; ancak bazı durumlarda yapı malzemeleri de önemli kaynak hâline gelebilir. Bununla birlikte  $^{220}\text{Rn}$ , yarılanma süresinin (55,6 s) çok kısa ve derişiminin de düşük olması sebebiyle genellikle radyolojik değerlendirmelerde dikkate alınmaz.

Ev ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan ve solunum yolu ile vücuda giren  $^{222}\text{Rn}$  ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa ve beta radyasyonları, iç ışınlamaya sebep olur. AK tarafından 1990 yılında yayımlanan tavsiye kararında yapı içi radon derişim sınırı, eski binalar için  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  ve yeni binalar için ise  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  olarak belirlenmiştir [30].

Bugüne kadar  $^{222}\text{Rn}$  gazının solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunun değerlendirilmesiyle ilgili olarak birkaç indis (alfa-indisleri ve dâhili indisler ( $H_{in}$ ))

türetilmiştir [10, 22]. Bu çalışmada esas alınan alfa indisi ( $I_\alpha$ ), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (3)$$

Burada,  $A_{Ra}$ , yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ 'nın  $\text{Bq kg}^{-1}$  cinsinden aktivite derişimidir.  $I_\alpha > 1$  olduğu durumlarda, ev içi  $^{222}\text{Rn}$  aktivite derişimi sınırı olan  $200 \text{ Bq m}^{-3}$ 'ün aşılması olasıdır.

Radyoaktivite ölçümü yapılan yapı malzemeleri için hesaplanan aktivite derişim indisi ( $I_\gamma$ ) ve alfa indisi ( $I_\alpha$ ) değerleri, Tablo 7'de verilmiştir. Yapısal malzemelerin 7 tipine (çimento, hazır beton, gaz beton, ytong tuğla, çakıl, kum ve kül katkılı beton) ait ortalama  $I_\gamma$  değeri, 0,5 'den küçüktür. Bu malzemelerden tuğlaya ait değer, yaklaşık olarak 0,5'e eşit iken brikete ait değer 1'den küçüktür. Kaplama malzemelerine ait  $I_\gamma$  değerleri, 1'e eşit veya daha küçüktür. Bu malzemelerden mermer, traverten, mozaik, alçı, kireç, yapıştırıcı ve derz dolgusunun  $I_\gamma$  değerleri, 0,5 değerinden bile çok düşüktür. Katkı ham maddelerinden endüstriyel işlemlerden yan ürün olarak elde edilenlere (fosfojips, uçucu kül, sepere edilmiş kül ve cüruf) ve ponzaya ait  $I_\gamma$  değerleri, 2'ye eşit veya biraz daha büyüktür.

Fosfojips, uçucu kül, sepere edilmiş kül ve cürufun dışındaki bütün yapısal malzemeler, kaplama amaçlı kullanılan malzemeler ve katkı ham maddeleri için hesaplanan  $I_\alpha$  değerleri, sınır değerden önemli ölçüde küçük olduğundan, bu malzemelerden kaynaklanan radon gazı derişiminin,  $200 \text{ Bq m}^{-3}$ 'ü aşması mümkün değildir.

### 3.2.3. Soğurulmuş Gama Doz Hızı ve Yapı İçi Etkin Doz Hızı

Yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yapı içi soğurulmuş gama doz hızı ( $D_R$ ), AB tarafından hazırlanan raporda ve Markkanen (1995) tarafından yapılan çalışmada esas alınan veriler ve formül kullanılarak değerlendirilmiştir [25-26]. Doz hızının hesaplanmasında, doz hızı dönüşüm kat sayıları olarak;  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için sırasıyla,  $0,92 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ ,  $1,1 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$  ve  $0,08 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$  değerleri alınmıştır.

**Tablo 7.** Ölçülen Yapı Malzemelerine İlişkin  $I_\gamma$  ve  $I_\alpha$  Değerleri

Malzeme	N	$I_\gamma$		$I_\alpha$	
		Aralık	Ort. $\pm$ SS	Aralık	Ort. $\pm$ SS
Çimento	164	0,13- 1,15	0,37 $\pm$ 0,20	0,06- 0,81	0,21 $\pm$ 0,14
Hazır beton	25	0,06- 0,35	0,16 $\pm$ 0,08	0,03- 0,20	0,09 $\pm$ 0,05
Gaz beton	7	0,19- 0,38	0,28 $\pm$ 0,08	0,06- 0,12	0,09 $\pm$ 0,02
Tuğla	11	0,40- 0,78	0,55 $\pm$ 0,11	0,12- 0,25	0,16 $\pm$ 0,04
Briket	4	0,73- 0,99	0,89 $\pm$ 0,11	0,33- 0,37	0,35 $\pm$ 0,02
Ytong tuğla	3	0,11- 0,18	0,15 $\pm$ 0,03	0,02- 0,06	0,04 $\pm$ 0,02
Çakıl	9	0,07- 0,44	0,30 $\pm$ 0,14	0,07- 0,14	0,10 $\pm$ 0,02
Kum	34	0,05- 0,75	0,27 $\pm$ 0,20	0,02- 0,28	0,08 $\pm$ 0,06
Katkılı beton	141	0,07- 0,91	0,24 $\pm$ 0,15	0,03- 1,29	0,25 $\pm$ 0,23
Mermer	25	0,001- 0,208	0,047 $\pm$ 0,023	0,003- 0,279	0,046 $\pm$ 0,020
Granit	35	0,01- 2,42	1,01 $\pm$ 0,58	0,02- 1,66	0,44 $\pm$ 0,32
Seramik	18	0,52- 1,65	0,94 $\pm$ 0,38	0,19- 1,63	0,55 $\pm$ 0,36
Traverten	2	0,008- 0,009	0,008 $\pm$ 0,001	0,003- 0,006	0,004 $\pm$ 0,002
Mozaik	5	0,002- 0,079	0,034 $\pm$ 0,032	0,004- 0,019	0,012 $\pm$ 0,006
Fayans	6	0,50- 0,85	0,74 $\pm$ 0,13	0,22- 0,48	0,35 $\pm$ 0,09
Karo	9	0,52- 1,42	0,79 $\pm$ 0,29	0,19- 1,47	0,49 $\pm$ 0,38
Alçı/Alçıtaşı	39	0,003- 0,202	0,058 $\pm$ 0,055	0,004- 0,184	0,048 $\pm$ 0,025
Kireç/Kireçtaşı	72	0,001- 0,721	0,119 $\pm$ 0,001	0,005- 0,625	0,113 $\pm$ 0,091
F. Yapıştırıcısı	7	0,04- 0,79	0,22 $\pm$ 0,17	0,030- 0,347	0,114 $\pm$ 0,100
Derz dolgusu	3	0,05- 0,08	0,06 $\pm$ 0,01	0,037- 0,052	0,043 $\pm$ 0,008
Fosfojips	8	1,19- 2,29	1,68 $\pm$ 0,43	1,79- 3,15	2,43 $\pm$ 0,58
Uçucu kül	193	0,52- 10,20	2,02 $\pm$ 1,51	0,09- 14,86	2,08 $\pm$ 1,36
Sepere kül	7	1,84- 2,15	1,94 $\pm$ 0,15	1,38- 1,95	1,57 $\pm$ 0,26
Ponza	110	0,20- 2,79	1,62 $\pm$ 0,78	0,05- 1,35	0,68 $\pm$ 0,38
Cüruf	17	1,38- 4,58	2,43 $\pm$ 0,88	0,86- 2,68	1,29 $\pm$ 0,44
Kil	20	0,08- 1,19	0,49 $\pm$ 0,27	0,04- 0,45	0,13 $\pm$ 0,10
Marl	7	0,13- 0,36	0,24 $\pm$ 0,08	0,03- 0,14	0,09 $\pm$ 0,04
Tras	27	0,05- 3,21	0,84 $\pm$ 0,74	0,01- 2,07	0,34 $\pm$ 0,25
Demir cevheri	4	0,03- 0,46	0,25 $\pm$ 0,21	0,03- 0,35	0,31 $\pm$ 0,26
Boksit	3	0,17- 3,14	1,16 $\pm$ 1,01	0,08- 1,70	0,62 $\pm$ 0,34
Kaolen	4	0,36- 0,93	0,72 $\pm$ 0,26	0,10- 0,63	0,40 $\pm$ 0,23
Pirit külü	4	0,02- 0,12	0,07 $\pm$ 0,05	0,01- 0,11	0,04 $\pm$ 0,03
Klinker	10	0,16- 0,34	0,24 $\pm$ 0,07	0,07- 0,24	0,14 $\pm$ 0,07



Yapısal ve kaplama malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklan dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama doz hızı,

$$D_R (\text{nGy h}^{-1}) = 0,92 \times A_{\text{Ra}} + 1,1 \times A_{\text{Th}} + 0,08 \times A_K \quad (4)$$

eşitliği kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  ve  $A_K$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'in sırasıyla,  $\text{Bq kg}^{-1}$  cinsinden aktivite derişimidir.

Yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama dozu hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması, UNSCEAR tarafından 2000 yılında yayımlanan raporda,  $84 \text{ nGy h}^{-1}$  ( $40 - 200 \text{ nGy h}^{-1}$ ) olarak verilmiştir [1].

Yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ ), havada soğurulmuş gama dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı  $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$  alınarak ve bireylerin zamanının % 80'ini kapalı mekanlarda geçirdiği kabul edilerek aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$H_R (\text{mSv y}^{-1}) = D_R (\text{nGy h}^{-1}) \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (5)$$

Burada,  $D_R$  ( $\text{nGy h}^{-1}$ ), Eş. (4)'de verilen soğurulmuş gama doz hızıdır.

AB tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, binalarda kullanılan yapı malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklanan gama radyasyonu sebebiyle halkın maruz kaldığı yapı içi etkin doz hızı için uygulama sınırı olarak  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  tavsiye edilmiştir [26]. Raporda, doz hızına yönelik yapılacak kontrollerde,  $0,3-1 \text{ mSv y}^{-1}$  aralığındaki bir değerin esas alınması gereği de tavsiye edilmiştir. AB üye ülkelerinde, radyasyondan korunma açısından  $1 \text{ mSv y}^{-1}$ 'i aşan doz hızları dikkate alınmaktadır. Yapı malzemelerinden kaynaklanan gama radyasyonu, bireyin yapı içi yıllık etkin dozunu en fazla  $0,3 \text{ mSv y}^{-1}$  kadar artırıyor, söz konusu malzemeler radyoaktivite ile ilgili bütün sınırlamalardan muaftır.

Yapısal ve kaplama malzemeleri için değerlendirilen  $D_R$  ve  $H_R$  sonuçları, Tablo 8'de verilmiştir. Yapısal malzemeler için değerlendirilen  $D_R$ 'nin ortalama değerleri, çimento, tuğla ve briket hariç ve kaplama malzemeleri için değerlendirilen  $D_R$ 'nin ortalama değerleri ise granit, seramik, fayans ve karo hariç, ağırlıklı ortalamadan ( $84 \text{ nGy h}^{-1}$ ) daha küçüktür. Yapısal malzemeler için değerlendirilen  $H_R$ 'nin ortalama değerleri, briketin dışında, aşılmaması tavsiye edilen sınır değerden ( $1 \text{ mSv y}^{-1}$ ) önemli ölçüde daha küçüktür.

**Tablo 8.** Yapısal ve Kaplama Malzemeleri İçin Değerlendirilen  $D_R$  ve  $H_R$  Değerleri

Malzeme	N	$D_R$ (nGy h <sup>-1</sup> )		$H_R$ (mSv y <sup>-1</sup> )	
		Aralık	Ort. $\pm$ SS	Aralık	Ort. $\pm$ SS
Çimento	164	33,5- 280,2	90,1 $\pm$ 49,6	0,16- 1,38	0,44 $\pm$ 0,24
Hazır beton	25	15,1- 85,6	40,2 $\pm$ 19,2	0,17- 0,42	0,20 $\pm$ 0,09
Gaz beton	7	47,0- 88,5	66,2 $\pm$ 17,0	0,23- 0,44	0,33 $\pm$ 0,08
Tuğla	11	101,8- 188,7	131,7 $\pm$ 25,7	0,50- 0,93	0,65 $\pm$ 0,13
Briket	4	177,3- 238,0	214,8 $\pm$ 26,4	0,87- 1,17	1,06 $\pm$ 0,13
Ytong tuğla	3	27,8- 42,0	35,6 $\pm$ 7,2	0,14- 0,21	0,18 $\pm$ 0,04
Çakıl	9	17,2- 105,6	71,7 $\pm$ 31,9	0,08- 0,52	0,35 $\pm$ 0,16
Kum	34	13,3- 182,0	64,0 $\pm$ 47,4	0,07- 0,89	0,31 $\pm$ 0,23
Katkılı beton	141	16,5- 248,6	62,4 $\pm$ 42,2	0,18- 1,22	0,31 $\pm$ 0,21
Mermer	25	0,2- 54,6	12,0 $\pm$ 5,9	0,001- 0,269	0,059 $\pm$ 0,028
Granit	35	2,9- 580,2	244,1 $\pm$ 139,8	0,01- 2,85	1,20 $\pm$ 0,69
Seramik	18	118,8- 208,7	180,4 $\pm$ 32,5	0,58- 1,03	0,89 $\pm$ 0,16
Traverten	2	2,0- 2,1	2,0 $\pm$ 0,1	0,019- 0,010	0,010 $\pm$ 0,001
Mozaik	5	0,7- 18,5	8,3 $\pm$ 7,6	0,003- 0,091	0,041 $\pm$ 0,037
Fayans	6	118,8- 208,7	180,4 $\pm$ 32,5	0,58- 1,03	0,89 $\pm$ 0,16
Karo	9	124,4- 368,8	194,2 $\pm$ 76,0	0,61- 1,81	0,95 $\pm$ 0,37
Alçı/Alçıtaşı	39	0,8- 50,04	14,6 $\pm$ 10,1	0,004- 0,248	0,072 $\pm$ 0,028
Kireç/Kireçtaşı	72	0,3- 182,3	30,7 $\pm$ 25,3	0,002- 0,896	0,151 $\pm$ 0,125
F. Yapıştırıcısı	7	10,2- 191,4	54,0 $\pm$ 45,7	0,05- 0,94	0,27 $\pm$ 0,12
Derz dolgusu	3	13,5- 20,2	15,9 $\pm$ 3,7	0,07- 0,10	0,08 $\pm$ 0,02

## 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu rapora esas teşkil eden çalışmalarda, Türkiye’de yaygın olarak kullanılan ve farklı bölgelerden 33 farklı yapı malzemesine ait toplam 1033 numunenin her birindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite derişimi ölçülmüştür. Aktivitesi ölçülen bu malzemelerden kaynaklanabilecek olası radyolojik riskin değerlendirilmesi amacıyla radyum eşdeğer aktivitesi, aktivite derişim indisi, alfa indisi, yapı içinde dış ışınlamadan kaynaklanan soğurulmuş gama doz hızı ve etkin doz hızı hesaplanmış ve sonuçlar, ilgili sınır veya ölçüt değerler ile karşılaştırılmıştır. Ölçme sonuçları, yapısal malzemeler, kaplama malzemeleri ve katkı ham maddeleri gibi üç kategoride değerlendirilen yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin aktivite derişimleri arasında kayda değer farklılıkların olduğunu göstermiştir (Şekil 1). Radyolojik açıdan yapılan değerlendirmeler, çimento, hazır beton, gaz beton, ytonğ tuğla, çakıl, kum, kül katkılı beton ve tuğla gibi yapı içinde doğrudan kullanılan malzemelerden kaynaklanan yapı içi etkin doz hızının, tavsiye edilen sınır değeri ( $1 \text{ mSv y}^{-1}$ ) aşmadığını ve briket için değerlendirilen yapı içi etkin doz hızının da sınır değere yakın olduğunu göstermiştir. Kullanımı yapısal malzemelere göre daha sınırlı olan kaplama amaçlı kullanılan malzemelerden kaynaklanan yapı için etkin gama doz hızının da sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür. Ancak endüstriyel işlemler sonucunda yan ürün veya atık olarak elde edilen katkı ham maddelerine ait aktivite derişim indisi ve alfa indisi sonuçları, ölçüt değerlere göre önemli ölçüde daha büyüktür. Bilindiği gibi bu malzemelerin belli oranları, son ürün olarak kullanılan yapısal malzemelerin içine katılmaktadır. Bununla birlikte, doz sınırlaması nihai ürüne uygulanmakta olduğundan, endüstriyel yan ürünlerin kullanıldığı yapı malzemelerinin aktivite derişimlerinin tespit edilmesi önemlidir. Böylece bu malzemelerin katkı yüzdeleri kontrol edilerek, kullanılmalarının radyolojik açıdan bir risk oluşturup oluşturmayacağı belirlenebilir. Uçucu kül katkılı betona ait ortalama aktivite derişim indisi ( $0,24 \pm 0,15$ ) ve alfa indisi ( $0,25 \pm 0,23$ ) değerleri, ölçüt değerden 4 kat daha düşüktür.

Sonuç olarak rapor kapsamında incelenen yapı malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklanan yapı içi gama dozları tavsiye edilen sınır değerden daha düşük olduğundan, bu malzemelerin yapı işlerinde kullanılmalarının radyolojik açıdan herhangi bir tehdit oluşturmayacağı değerlendirilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA.
- [2] Alam, M. N., Miah, M. M. H. Chowdhury, M. I., Kamal, M., Ghose, S., Islam, M. N., Mustafa, M. N, Miah, M. S. R., 1999. Radiation dose estimation from the radioactivity analysis of lime and cement used in Bangladesh. J. Environ. Radioact. 42, 77-85.
- [3] Ibrahim, N., 1999. Natural activities of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in building materials, J. Environ. Radioact. 43, 255-258.
- [4] Kumar, V., Ramachandran, T. V., Prasad, R., 1999. Natural radioactivity of Indian building materials and by-products. Appl. Radiat. Isot. 51, 93-96.
- [5] Sharaf, M., Mansy, M., El Sayed, A., Abbas, E., 1999. Natural radioactivity and radon exhalation rates in building materials used in Egypt. Radiat. Meas. 31, 491-495.
- [6] Higgy, R. H., El-Tahawy, M. S., Abdel-Fattah, A. T., Al-Akabawy, U. A., 2000. Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings. J. Environ. Radioact. 50, 253-261.
- [7] Amrani, D., Tahtat, M., 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials. Appl. Radiat. Isot. 54, 687-689.
- [8] Rizzo, S., Brai, M., Basile, S., Bellia, S., Hauser, S., 2001. Gamma activity and geochemical features of building materials: estimation of gamma dose rate and indoor radon levels in Sicily. Appl. Radiat. Isot. 55, 259-265.
- [9] Kovler K., Haquin, G., Manasherov, V., Ne'eman, E., Lavi, N., 2002. Natural radionuclides in building materials available in Israel. Building and Environ. 37, 531-537.
- [10] Stoulos, S., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., 2003. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. J. Environ. Radioact. 69, 225-240.
- [11] Kumar, A., Kumar, M., Singh, B., Singh, S., 2003. Natural activities of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in some Indian building materials. Radiat. Meas. 36, 465-469.
- [12] Roy, S., Alam, M. S., Begum, M., Alam, B., 2005. Radioactivity in building materials used in and around Dhaka city. Radiat. Protect. Dosim. 114, 527-532.

- [13] Xinwei, L., 2005. Radioactive analysis of cement and its products collected from Shaanxi, China. *Health Phys.* **88**, 84-86.
- [14] Ahmed, N. K., 2005. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. *J. Environ. Radioact.* **83**, 91-99.
- [15] Papastefanou, C., Stoulos, S., Manolopoulou, M., 2005. The radioactivity of building materials. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **266** (3), 367-372.
- [16] Hizem, N., Fredj, A. B., Ghedira, L., 2005. Determination of natural radioactivity in building materials used in Tunisian dwellings by gamma ray spectrometry. *Radiat. Prot. Dosim.* **114**, 533-537.
- [17] Farai, I. P., Ademola, J. A., 2005. Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria. *J. Environ. Radioact.* **79**, 119-125.
- [18] El Afifi, E. M., Hilal, M. A., Khalifa, S. M., Aly, H. F., 2006. Evaluation of U, Th, K and emanated radon in some NORM and TENORM samples. *Radiat. Meas.* **41**, 627-633.
- [19] Righi, S., Bruzzi, L., 2006. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *J. Environ. Radioact.* **88**, 158-170.
- [20] Pavlidou, S., Koroneos, A., Papastefanou, C., Christofides, G., Stoulos, S., Vavelides, M., 2006. Natural radioactivity of granites used as building materials. *J. Environ. Radioact.* **89**, 48-60.
- [21] Beretka, J., Mathew, P. J., 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product. *Health. Phys.* **48**, 87-95.
- [22] Krieger, V. R., 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteil Technology*, **47**, 468.
- [23] Krisiuk, E. M., Tarasov, S. I., Shamov, V. P., Shalak, N. I., Lisa chenko E. P., Gomelsky, L. G., 1971. A study on radioactivity in building materials. Research Institute for Radiation Hygiene, Leningrad.
- [24] Strandén, E., 1976. Some aspects on radioactivity of building materials. *Physica Norvegica* **8**, 167-177.
- [25] Markkanen M., 1995. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity. Report STUK-B-STO 32, Radiation and Nuclear Safety Authority- STUK, 1995.
- [26] 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.

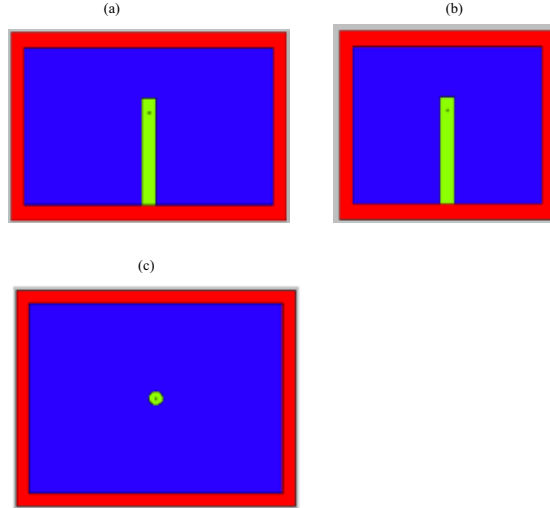
- [27] Turhan Ş., Gündüz L., 2008. Determination of specific activity of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  for assessment of radiation hazards from Turkish pumice samples. *J. Environ. Radioact.*, 99, 332-342
- [28] Debertin, K., Helmer, R. G., 1988. *Spectrometry with Semiconductor Detectors*, North-Holland, Amsterdam.
- [29] NEA- OECD, 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Paris.
- [30] EC (European Commission), 1990. Commission recommendation 90/143/Euratom of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. Official Journal L-80 of 27/03/90. European Commission, Brussels.
- [31] Judith F. Briesmeister, 1997. MCNP – A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Los Alamos, ABD.

## EK A

### Türkiye’de Kullanılan Tipik Oda Modeli İçin Monte Carlo Kodu MCNP ile Doz Hızı Dönüşüm Kat Sayılarının Türetilmesi ve Aktivite Derişim İndisinin Hesaplanması

#### A.1 Doz Hızı Dönüşüm Kat Sayılarının Türetilmesi

Ülkemizdeki kullanılan tipik oda modeli için doz hızı dönüşüm kat sayıları, nötron, foton ve yüklü parçacıkların taşınması için kullanılan, genel amaçlı bir Monte Carlo Kodu olan MCNPX 2.4.0 kullanılarak türetilmiştir. Model olarak  $3 \times 4 \times 2,5$  m boyutlarında, tavan ve tabanda 25 cm, yan duvarlarda 20 cm kalınlığında, yoğunluğu  $2,3 \text{ g cm}^{-3}$  olan hazır beton kullanılan bir oda seçilmiştir. Odanın MCNP modelinin x, y ve z düzlemlerinden alınan kesitleri Şekil A.1’de verilmiştir.



Şekil A.1 Odanın x (a), y (b) ve z (c) Düzlemlerinden Alınan Kesitleri

Yapı malzemelerinde mevcut olan radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamaya maruz kalan insan, boyu 170 cm, ağırlığı 70 kg, çapı 22,9 cm olan ve içi doku yoğunluğuna eş değer olan su ile doldurulmuş silindir şeklindeki bir fantom ile modellenmiştir. Oda, oda sıcaklığında, basıncı 1 atmosfer olan hava ile dolu olarak kabul edilmiştir.

Kesitleri yukarıda verilen oda modelinin duvarlarında, Tablo 3'te hazır beton için verilen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimlerine karşılık gelen homojen dağılımlı foton kaynağı tanımlanmıştır. Uranyum, toryum serileri ve  $^{40}\text{K}$  için gama yayımlanma enerjileri ve olasılıkları Markkanen (1995) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır [25].

MCNP kodu, duvarlarda tanımlanan kaynaklardan yayımlanan fotonları izleyerek, insan modeli olarak oluşturulan silindir içerisindeki ortalama foton akısını ve akıdan kaynaklanan, ortalama doz hızını hesaplar. Foton akısından doz hızı hesaplanırken kullanılan ilgilenilen enerji aralıkları için akıdan doz hızına dönüşüm kat sayıları, Judith F. Briesmeister (1997) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır [31].

Hesaplanan doz hızları  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite derişimlerine bölünerek doz hızı dönüşüm kat sayıları,  $^{226}\text{Ra}$  için,  $1,042 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  için  $1,417 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$  ve  $^{40}\text{K}$  için  $0,106 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$  olarak elde edilmiştir.

## A.2 Aktivite Derişim İndisinin Hesaplanması

Aktivite derişim indisi ( $I_\gamma$ ), binada kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi yıllık etkin doz sınırı  $1 \text{ mSv}$ , etkin doz dönüşüm kat sayısı  $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ , bina dışındaki soğurulmuş gama doz hızı  $59 \text{ nGy h}^{-1}$  ve bireylerin zamanının % 80'ini ev içinde geçirdiği kabul edilerek ve yukarıda verilen doz hızı dönüşüm kat sayıları kullanılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır:

$$10^{-3} \text{ Sv y}^{-1} = (1,042 \times A_{\text{Ra}} - 59) \cdot 10^{-9} \text{ Gy h}^{-1} \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7008 \text{ h y}^{-1}$$

Buradan  $A_{\text{Ra}} = 252 \text{ Bq kg}^{-1}$  olarak bulunur.

$$10^{-3} \text{ Sv y}^{-1} = (1,417 \times A_{\text{Th}} - 59) \cdot 10^{-9} \text{ Gy h}^{-1} \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7008 \text{ h y}^{-1}$$

Buradan  $A_{\text{Th}} = 185 \text{ Bq kg}^{-1}$  olarak bulunur.

$$10^{-3} \text{ Sv y}^{-1} = (1,106 \times A_{\text{K}} - 59) \cdot 10^{-9} \text{ Gy h}^{-1} \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7008 \text{ h y}^{-1}$$

Buradan  $A_{\text{K}} = 2480 \text{ Bq kg}^{-1}$  olarak bulunur.

Sonuç olarak, aktivite derişim indisi,

$$I_\gamma = \frac{A_{\text{Ra}}}{252 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_{\text{Th}}}{185 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_{\text{K}}}{2480 \text{ Bq kg}^{-1}}$$

eşitliği ile hesaplanır. Ancak, Avrupa Komisyonu tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, aktivite derişim indisi hesaplanırken bu değerler, en yakın olan  $100 \text{ Bq kg}^{-1}$  (radyum ve toryum için) veya  $1000 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'a (potasyum için) yuvarlatılmıştır [26].