

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**BALIKESİR SARIMSAKLI TAŞININ RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
RADYOAKTİVİTE DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA CEM GERÇE

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ NURAY YAVUZKANAT
İKİNCİ DANIŞMAN
DOÇ. DR. ŞULE KARATEPE ÇELİK

AĞUSTOS 2025

BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**BALIKESİR SARIMSAKLI TAŞININ RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
RADYOAKTİVİTE DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA CEM GERÇE
ORCID: 0009-0006-7074-1033

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ NURAY YAVUZKANAT
DANIŞMAN
DOÇ. DR. ŞULE KARATEPE ÇELİK

AĞUSTOS 2025
BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim. Hazırlamış, olduğum **"Balıkesir Sarımsaklı Taşının Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin incelenmesi ve Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi"** başlıklı tezde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi; tüm bilgi, belge, değerlendirme sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu; tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı; bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 14/08/2025

İmza

Mustafa Cem GERÇE

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ YAZIM KILAVUZU UYGUNLUK BEYANI

"Balıkesir Sarımsaklı Taşının Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi ve Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezi Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır. 14/08/2025

Tezi Hazırlayan

İmza

Mustafa Cem GERÇE

Danışman

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT

İkinci Danışman

İmza

Doç. Dr. Şule KARATEPE ÇELİK

Fizik Anabilim Dalı Başkanı

İmza

Prof. Dr. Ahmet Fatih ÇELİK

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY SAYFASI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı öğrencisi Mustafa Cem GERÇE tarafından hazırlanan "**Balıkesir Sarımsaklı Taşının Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi ve Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi**" adlı Yüksek Lisans Tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 14/08/2025 tarihinde yapılmış ve tezin oy birliği/oy çokluğu ile kabul/reddedilmesine karar verilmiştir.

JÜRİ:

İMZA

Danışman: Dr. Öğ. Üyesi Nuray YAVUZKANAT
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Üye: Prof. Dr. Sultan ŞAHİN BAL
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Üye: Doç. Dr. Turan ŞAHMARAN
(Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi)

.....

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve.....sayılı kararıyla jüri tarafından kabul edilmiş bu çalışmanın yüksek lisans tezi olarak kabulü onaylanmıştır.

.../.../2025

Prof. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL
Enstitü Müdürü

T.C.

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

**BALIKESİR SARIMSAKLI TAŞ ININ RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE RADYOAKTİVİTE DÜZEYLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa Cem GERÇE

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT

İkinci Danışman: Doç. Dr. Şule KARATEPE ÇELİK

Ağustos 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yapı malzemesi olarak kullanılan iki farklı bölgenin doğal taşı olan Balıkesir Sarımsaklı Taşı ve Ahlat Taşı'nın doğal radyoaktivite düzeyleri ile radyasyon zırhlama potansiyelleri araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Badavut bölgesinden temin edilen Sarımsaklı Taşı'nın bulunduğu alanın doğal radyoaktivite düzeyleri, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak gama spektroskopisi yöntemiyle belirlenmiştir ve elde edilen veriler doğrultusunda bölgenin radyoaktivite haritası oluşturulmuştur. Devamında ise hem Sarımsaklı hem de Ahlat Taşı tozları belirli oranlarda (%5, %10 ve %15 ve %20) beton karışımlarına ilave edilerek numuneler hazırlanıp; bu numunelerin mekanik özellikleri ve gama ışınlarına karşı zırhlama performansları elde edilmiştir. Böylece, doğal taşların radyasyon zırhlama kapasitesi hakkında kapsamlı veriler elde edilerek yapı malzemesi ve radyasyondan korunma alanlarına katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sarımsaklı Taşı, Ahlat Taşı, Radyasyon zırhlama, Beton, Doğal radyoaktivite.

Republic of Türkiye
Bitlis Eren University Graduate School
Department of Physics
INVESTIGATION OF RADIATION SHIELDING PROPERTIES AND
DETERMINATION OF RADIOACTIVITY LEVELS IN BALIKESİR
SARIMSAKLI STONE

Master's Thesis

Mustafa Cem GERÇE

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nuray Yavuzkanat

Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şule KARATEPE ÇELİK

August 2025

ABSTRACT

In this thesis study, the natural radioactivity levels and radiation shielding potentials of two types of natural stones used as construction materials, Balıkesir Sarımsaklı Stone and Ahlat Stone, from different regions were investigated. In the first stage of the study, the natural radioactivity levels of the area where Sarımsaklı Stone was obtained, specifically from the Badavut region, were determined using gamma spectrometry with a high-purity germanium (HPGe) detector, and a radioactivity map of the region was created based on the collected data. Subsequently, powder forms of both Sarımsaklı and Ahlat Stones were added to concrete mixtures at specific proportions (5%, 10%, 15%, and 20%) to prepare samples. The mechanical properties and gamma radiation shielding performances of these samples were then evaluated. Through this research, comprehensive data on the radiation shielding capacities of natural stones were obtained, aiming to contribute to the fields of construction materials and radiation protection.

Keywords: Sarımsaklı Stone, Ahlat Stone, Radiation Shielding, Concrete, Natural Radio-Activity.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, BEBAP 2025.04 numaralı proje kapsamında Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Hocam Nuray YAVUZKANAT’a ve ikinci danışmanım Şule KARATEPE ÇELİK’e en içten teşekkürlerimi sunarım. Beton döküm sürecinde gösterdiği destek ve paylaştığı değerli bilgiler için Nusret BOZKURT’a katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
KISALTMALAR	X
SİMGELER	XI
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL BİLGİLER.....	5
2.1 Fotonun Madde ile Etkileşimi.....	5
2.1.1 İyonlaşma.....	5
2.1.2 Koherent Saçılma	5
2.1.3 Fotoelektrik olayı.....	6
2.1.4 Compton saçılması.....	7
2.1.5 Çift oluşum	8
2.2 Gama Spektrometri Sistemleri	9
2.2.1 Sintilasyon Dedektörleri ve NaI(Tl)	10
2.2.2 Yarı iletken Dedektörleri ve HPGe	14
2.3 Radyasyon ve Radyasyondan Korunma	17
2.3.1 Zırhlama Parametreleri	18
2.4 Doğal Taşlar ve Yapı Malzemesi Olarak Taşların Kullanımı.....	22
2.4.1 Sarımsaklı Taşı ve Ahlat Taşı	23
3 MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1 Toprak ve Taş Tozu Örneklerinin Doğal Radyaktivitesi	26
3.1.1 Numune Bölgesi ve Haritalandırma	26
3.1.2 Toprak Numunelerin Hazırlama.....	27

3.1.3	Gama Spektroskopik Analiz	28
3.1.4	Soğurulan Gama Doz Hızı (D)	29
3.1.5	Radyum Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq})	29
3.1.6	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE)	30
3.1.7	Yaşam Boyu Kanser Riski (ELCR)	30
3.1.8	Dış Tehlike İndeksi (Hex)	30
3.2	Taş Tozu Katkılı Beton Numunelerinin Hazırlanması ve Gama Zırhlama Özellikleri	31
3.2.1	Özgül Ağırlık Hesaplaması	31
3.2.2	Malzemelerin Hazırlanması	31
3.2.3	Yayılma Çapı Deneyi	33
3.2.4	Kalıplanma İşlemi	35
4	BULGULAR VE TARTIŞMA	38
5	SONUÇ VE ÖNERİLER	47
	KAYNAKLAR	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çalışma alanı koordinatları.....	27
Çizelge 3.2. Beton numunelerin karışım oranları	34
Çizelge 4.1. Ahlat ve Sarımsaklı taşlarının XRF ile belirlenen ana oksit ve iz element bileşimleri (%). (XRF analizi sonuçları).....	39
Çizelge 4.2. Eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneylerinin sonuçları	40
Çizelge 4.3. Beton içeriklerinin yüzde oranlarının ve yoğunluklarının teorik olarak elde edilen değerleri.....	41
Çizelge 4.4. Ahlat Taşı, Sarımsaklı taşı ve bölgenin toprak örneklerinden elde edilen radyoaktivite konsantrasyonları.	43
Çizelge 4.5. Toprak ve taş örneklerinin radyolojik risk değerleri	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Koherent saçılma [18]	6
Şekil 2.2. Basitçe fotoelektrik olayının gösterimi [18]	7
Şekil 2.3. Compton Saçılmasının gösterimi [20]	8
Şekil 2.4. Çift oluşum olayının şematik gösterimi [20, 22].	9
Şekil 2.5. Aromatik hidrokarbon olan organik sintilatörlerde foton etkileşimi sonrası gerçekleşen başlıca süreçlerin enerji düzeylerinin diyagramı. Temel (kararlı) durum S_0 'dır. Tekli uyarılmış durumlar; S_1 , S_2 , S_3 ve üçlü uyarılmış durumlar T_1 , T_2 , T_3 ile gösterilmiştir. Titreşim alt seviyeleri S_{00} , S_{10} , S_{11} olarak ifade edilmiştir [29].	11
Şekil 2.6. Saf ve aktivatör katkılı NaI kristallerinin enerji seviyelerinin gösterimi. (a) Saf NaI yaklaşık 200 nm dalga boyunda foton yayarken, (b) Talyum katkısı bu değeri 400 nm'ye çıkararak görünür bölgede daha fazla ışık üretimini sağlar [29].	13
Şekil 2.7. (a) Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarı'nda bulunan ORTEC marka 3"x3" boyutlarındaki NaI(Tl) dedektör sisteminin görseli. (b) Dedektörün bileşenlerinin gösterimi.	13
Şekil 2.8. (a) İletken, (b) yarı iletken ve (c) yalıtkan malzemelerin enerji band diyagramları [26].	14
Şekil 2.9. Yarı iletken dedektörün temel çalışma prensibini gösteren diyagram [30]. ...	15
Şekil 2.10. Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarında bulunan ORTEC marka HPGe dedektör sisteminin görseli.	16
Şekil 2.11. Farklı radyasyon türlerinin zırhlaması [22].	19
Şekil 2.12. Enerjiye göre yarı değer katman kalınlığı HVL değişimi [38].	21
Şekil 2.13. Enerjiye göre onda bir değer kalınlığı TVL değişimi [38].	22
Şekil 2.14. Balıkesir'in Ayvalık ilçesinde mimaride kullanılan Sarımsaklı taşı örnekleri.	24
Şekil 2.15. Bitlis'in Ahlat ilçesinde mimaride kullanılan Ahlat taşı örnekleri.	25

Şekil 3.1. Badavut bölgesi haritası ve numunelerin alındığı GPS koordinatları. Badavut bölgesi haritasında, sarı renkli noktalar toprak ve sarımsaklı taş numunelerinin alındığı GPS koordinatları göstermektedir.....	27
Şekil 3.2. Badavut bölgesinden temin edilen toprak numunelerinin görseli. (a) Sayıma hazır durumdaki numuneler (b) Marinelli kaplarına konulmuş toprak numuneleri.....	28
Şekil 3.3. İki farklı bölgeden alınan volkanik taş numunelerinin harita üzerindeki konumlarının gösterimi.	31
Şekil 3.4. Ahlat ve Sarımsaklı taşları ile toz haline getirilmiş numunelerin görüntüsü.	32
Şekil 3.5. Taş tozu katkılı beton numunelerin hazırlanması. (a) Sarımsaklı taşı tozunun 0.63 µm'lik elekten geçirilerek tozların hazırlanması. (b) Dere kumunun 1 mm'lik elekten geçirilip hazırlanması. (c) Hazırlanan dere kumu, Ahlat taşı tozunun çimento ile karıştırılması. (d) Karışımın su ile kıvamı tutana kadar karıştırılması ve kalıplara dökme hazır hale getirilmesi.	33
Şekil 3.6. Yayılma çapı deneyinin aşamalarının görseli. (a) Yağlanmış kalıbın yerleştirilmesi, (b) Harçla doldurulup yüzeyin düzeltilmesi, (c) Tablanın hareketiyle harcın yayılması ve yayılma çapı ile yükseklik ölçümü	34
Şekil 3.7. Beton numunelerin basınç dayanım testleri için kullanılan cihaz. (a) Eğilmede çekme dayanımı deney düzeneği, (b) eğilme deneyinden sonra kırılan blokların basınç dayanımı deneyinde kullanılmak üzere hazırlanması, (c) Basınç dayanımı deney düzeneği.	35
Şekil 3.8. Beton harcının döküldüğü üçlü kalıp seti. (a) Beton numunelerin kuruduktan sonra kalıplardan kolay çıkartılabilmesi için yağlanmış hali. (b)Vurma tablası uygulamasının ardından, kalıpların üst kısmında kalan fazla harcın sıyrılarak temizlenmesiyle elde edilen düzgün yüzey görünümü.	36
Şekil 3.9. Farklı oranlarda Sarımsaklı ve Ahlat Taş tozlarını içeren üçlü setler halindeki beton numunelerin kürleme süreci için su tankı içerisine bırakılmış halinin resmi.....	36
Şekil 3.10. 1,5 cm kalınlıklarda kesilmesi için kullanılan kesici cihaz	37
Şekil 3.11. Deneysel ölçüm için hazırlanan beton numunelerin görseli. (a) Sudan çıkartılan numunelerin 1,5 cm kalınlıklarda kesilerek etüvde 24 saatlik kurutulması. (b) Deneysel ölçüm için hazırlanan beton numuneler.	37

Şekil 4.1. NIST XCOM verilerine göre elde edilen zırhlama parametrelerinin sonuçları.

.....42



KISALTMALAR

^{137}Cs	: Sezyum-137
^{152}Eu	: Evropiyum-152
^{22}Na	: Sodyum-22
^{232}Th	: Toryum-232
^{238}U	: Uranyum-238
^{40}K	: Potasyum-40
^{60}Co	: Kobalt-60
AT	: Ahlat taşı
FWHM	: Tepe pikinin yarısındaki tam genişlik
HpGe	: Yüksek saflıkta Germanyum
HVL	: Yarım değer katmanı
LAC	: Doğrusal zayıflama katsayısı
MAC	: Kütle zayıflama katsayısı
MCA	: Çok kanallı analizör (Multi Channel Analyzer)
MFP	: Ortalama serbest yol
NaI(Tl)	: (Tl) katkılı sodyum iyodür
PMT	: Foto çoğaltıcı tüp
SiPM	: Silikon Fotomultiplierler
ST	: Sarımsaklı taşı
TVL	: Tam değer katmanı

SİMGELER

A	: Radyoaktif çekirdeğin aktivitesi
E	: Enerji
N	: Fotopik sayım sayısı
P	: Foton emisyon olasılığı
R	: Enerji çözünürlüğü
t	: Datanın alınma süresi
ε	: Dedektörün verimi
λ	: Fotonun dalga boyu
μ	: Fotonunun madde içindeki doğrusal zayıflama katsayısı

1 GİRİŞ

Radyasyon, doğal olarak çevremizde bulunan ve insan sağlığı üzerinde çeşitli riskler oluşturabilen bir olgudur. Toprak ve kayalarda bulunan uranyum, toryum ve potasyum gibi radyoaktif elementler, çevresel radyasyonun başlıca kaynakları arasında yer alır. Bu nedenle, radyasyonun doğal kaynaklarını ve etkilerini anlamak büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, etkin bir zırhlama, radyasyonun yayılımını sınırlandırarak hem çevresel hem de bireysel sağlığı koruma açısından kritik rol oynar. Radyasyonun zararlı etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen zırhlama çözümleri hem bireysel sağlığı hem de çevresel güvenliği koruma açısından kritik bir rol üstlenir.

Yerkabuğu, üstte toprak ve altta kaya tabakası olmak üzere iki ana katmandan oluşur. Kayaçlar, evrenin başlangıcından bu yana varlığını sürdüren doğal radyonüklidler ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdeklerini içerir. Bu elementlerin bozunmaları sonucu yayılan radyasyonun, özellikle toprağın ilk 30 cm'lik yüzey katmanında yoğunlaştığı bilinmektedir [1, 2]. Karasal radyasyona katkı sağlayan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi ilk radyonüklidlerin toprakta bulunma yoğunlukları toprak ve kaya çeşitliliğine göre değişir. Granit, fosfat gibi volkanik kayalar ve tuz kayalarında radyonüklit aktivitesi yüksektir. Tortul tipi kayalarda ise aktivite daha düşüktür [3]. Toprak ve kaya yapısında bulunan bu radyonüklidler, dış etkenler sonucu ayrılarak yer altı suları, akarsular ve rüzgar yoluyla farklı bölgelere taşınmakta ve çevresel radyoaktivite düzeylerinde farklılıklara yol açmaktadır. Ayrıca, tarımda kullanılan kimyasallar ile geçmişte yapılan nükleer silah denemeleri de topraktaki radyasyon seviyesinin artmasında önemli rol oynar [4]. Bu radyonüklidlerin ve bozunma ürünlerinin; toz taşınımı, yağışlar tortu birikimi (sedimentasyon), biyolojik süreçler ve diğer doğal mekanizmalar aracılığıyla biyolojik, hidrolojik ve jeolojik örneklerde bulunmaları beklenmektedir [5]. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada, Etiyopya'nın Lega Dembi bölgesinden 15 toprak örneği toplanmış ve doğal radyasyon seviyeleri ile insan sağlığına etkileri araştırılmıştır [6]. HPGe gama spektrometresi ile yapılan analizlerde, maden sahasında ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için ortalama aktivite değerleri sırasıyla $23,87 \pm 0,7$, $52,5 \pm 1,8$ ve $391,62 \pm 11,35$ Bq/kg olarak ölçülmüştür [6]. Yaşam alanlarında ise bu değerler sırasıyla $8,89 \pm 0,4$, $13,83 \pm 0,6$ ve $423,68 \pm 9,5$ Bq/kg'dır. Özellikle ^{232}Th değerinin maden sahasında dünya ortalamasının üzerinde olduğu tespit edilirken, ^{226}Ra ve ^{40}K düzeyleri daha düşüktür [6]. Yaşam alanlarında ise sadece ^{40}K konsantrasyonu dünya ortalamasının üzerinde bulunmuştur.

Ortalama yıllık etkin doz sınır değerlerin altında kalmış, ancak madencilik sahasında hesaplanan absorpsiyon doz oranı dünya ortalamasının üzerinde seyretmiştir. Benzer bir araştırma, Türkiye'nin Gümüşhane bölgesinde gerçekleştirilmiş ve 16 toprak rneği incelenmiştir. Doğal (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyoaktivite konsantrasyonları, yüksek znrlkl HPGe dedektörü ile belirlenmiştir. Ölçülen aktivite değerleri; ^{226}Ra için 17,3-48,3 Bq/kg (ortalama 26,1 Bq/kg), ^{232}Th için 9,70- 32,5 Bq/kg (ortalama 23,9 Bq/kg), ^{40}K için 236,8-889,6 Bq/kg (ortalama 519,9 Bq/kg) ve ^{137}Cs için 7,63-39,4 Bq/kg (ortalama 18,6 Bq/kg) olarak bulunmuştur [7].

Nükleer teknolojideki ilerlemelere paralel olarak, radyoaktif materyallerin tıp, enerji ve bilimsel araştırmalarda kullanımı artmıştır [8,9]. Ancak bu kullanımın artması, iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerine yönelik endişeleri beraberinde getirmiş ve koruyucu önlemlerin uygulanmasını zorunlu kılmıştır [10]. Alfa, beta, gama ve nötron parçacıklarını içeren iyonlaştırıcı radyasyon, her bir türün insan sağlığı ve evre için benzersiz riskler taşıyan geniş bir spektrumu kapsamaktadır [11]. Bu tür radyasyona doğrudan maruz kalma; organ yetmezliği, kanser, deri hastalıkları ve genetik bozukluklar gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir [12]. Radyasyondan korunmada temel parametreler; mesafe, maruziyet süresi ve zırhlama. Bu üç unsur arasında özellikle uygun malzeme seçimiyle sağlanan zırhlama, bireyleri ve çevreyi radyasyonun etkilerinden korumada hayati bir öneme sahiptir. Zırhlama malzemesinin seçimi ise, radyasyonun türü ve enerjisine göre belirlenmektedir. Geleneksel olarak yaygın şekilde kullanılan kurşun, toksik yapısı nedeniyle sağlık açısından ciddi riskler taşımakta; soluma, cilt teması veya yutma yoluyla vcoda alındığında birçok organ sisteminde zararlı etkilere yol açabilmektedir [13,14]. Ayrıca kurşunun işlenmesi ve kullanımı hem iç sağlığı hem de evre güvenliği açısından risklidir. Yüksek yoğunluğu taşıma ve uygulamada zorluk yaratırken, çevreye bırakıldığında kirliliğe neden olabilir. Geleneksel malzemelerin sınırlamaları nedeniyle, son yıllarda toksik olmayan ve çevreyle uyumlu yeni zırhlama malzemeleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır [15]. Radyasyon zırhlamada kullanılacak malzemelerin; yüksek atom numarasına sahip olması, ekonomik olması ve farklı tasarım ihtiyaçlarına uyarlanabilirliği gibi özellikler taşıması beklenmektedir. Bu bağlamda, çeşitli çalışmalar farklı materyalleri koruyucu olarak incelemiştir. Alaşımlar, elik, polimerler, doğal taşlar ve camlar, alternatif zırhlama malzemeleri arasında değerlendirilmektedir [16]. Literatürdeki alışmalar, radyasyondan korunmanın yanı sıra, yaşanılan çevredeki radyasyon seviyelerinin belirlenerek canlıların

maruz kaldığı doz miktarlarının tespit edilmesinin büyük önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu tür analizler hem insan sağlığını korumak hem de çevresel radyasyon risklerini en aza indirmek açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında, doğal taşlar olan Sarımsaklı taşı ve Ahlat taşının radyoaktivite seviyeleri ile radyasyon zırhlama potansiyelleri araştırılmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, sarımsaklı taşının yoğun olarak çıkarıldığı Balıkesir Badavut bölgesinden alınan toprak numuneleri üzerinde HPGe dedektörü kullanılarak gama spektroskopisi yöntemiyle uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları belirlenmiş; bu veriler doğrultusunda bölgenin doğal radyoaktivite haritası çıkarılmıştır. Aynı şekilde, deneysel çalışmalarda katkı maddesi olarak kullanılan Ahlat ve Sarımsaklı taş tozlarının da radyoaktif izotop içerikleri (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yıllık maruz kalınan doz, etkin doz ve kanser riski gibi parametrelerin hesaplanmasına olanak sağlayarak bölgenin çevresel risk analizine katkıda bulunmaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, Sarımsaklı taşı ve Ahlat taşının inceltilerek mikro boyuttaki elekten geçirilen toz numuneleri öncelikle Kayseri Erciyes Üniversitesi bünyesindeki Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri ile elementel içerikleri belirlenmiştir. Çimento, standart dere kumu ve su ile karıştırılarak elde edilen malzeme, her biri $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ boyutlarında olan üç adet aynı kalıba dökülerek beton referans numuneleri oluşturulmuştur. Daha sonra, çimento miktarı kademeli olarak azaltılmış ve bu eksilen kısım, belirli oranlarda (%5, %10 ve %15 ve %20) ayrı ayrı Sarımsaklı taşı ve Ahlat taşına ait mikro boyuttaki ince öğütülmüş tozlarla ikame edilerek diğer beton numuneleri hazırlanmıştır. Her bir karışımdan üçer adet olmak üzere toplam 27 adet beton numunesi, Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki İnşaat Mühendisliği Laboratuvar'ında dökülmüş; ardından 28 gün süreyle suda bekletilerek kür işlemi uygulanmıştır. Elde edilen beton numunelerin öncelikle fiziksel ve mekanik özellikleri laboratuvar ortamında test edilmiş; kür işleminin ardından basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda (%5-20) katkılandırılan Sarımsaklı ve Ahlat taşı tozlarının gama radyasyonuna karşı zırhlama kapasiteleri teorik olarak karşılaştırılmış; bu kapsamda zırhlama kat sayıları, MAC, LAC, HVL ve MFP gibi parametreler hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma Sarımsaklı ve Ahlat taşlarının radyoaktivite düzeylerini ve gama radyasyonu zırhlama kapasitelerini kapsamlı şekilde değerlendirerek, bu doğal taşların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini ve radyasyondan korunma açısından

taşıdığı potansiyeli ortaya koymuştur. Ayrıca, Sarımsaklı Taşı'nın çıkarıldığı Badavut bölgesine ait toprak numunelerinde gerçekleştirilen gama spektroskopisi analizleriyle, çevresel radyoizotop seviyeleri belirlenmiş ve bölgenin doğal radyasyon profili ortaya çıkarılmıştır. Yapılan analizler, taşın çevresel koşullarla ilişkili radyoaktivite özelliklerini ortaya koyarak hem yapısal güvenlik hem de radyasyondan korunma açısından önemli bir değerlendirme zemini sağlamıştır. Elde edilen bulgular, yapı sektörü ve radyasyondan korunma uygulamaları başta olmak üzere; çevre, sağlık ve malzeme bilimi gibi çeşitli disiplinlerde yeni uygulama alanlarının geliştirilmesine bilimsel katkı sunmaktadır.



2 GENEL BİLGİLER

2.1 Fotonun Madde ile Etkileşimi

Foton ile madde arasındaki etkileşim gama ışının ya da X ışının geçtiği ortama enerji aktarması ile olur. X veya gama ışınlarının bir madde ile etkileşimi sırasında, ışınlar enerji aktararak ortamın atomlarından elektronları koparır. Bu sürece "iyonizasyon" denir. İyonize edici radyasyon, enerjiye sahip fotonların atomlardaki elektronları yerinden koparmasıyla başlar. Bu kopan elektronlar, yüksek enerjili olarak yollarına devam ederken, ortamın diğer atomları ile çarpışarak onların da uyarılmasına ve iyonlaşmasına neden olur [18].

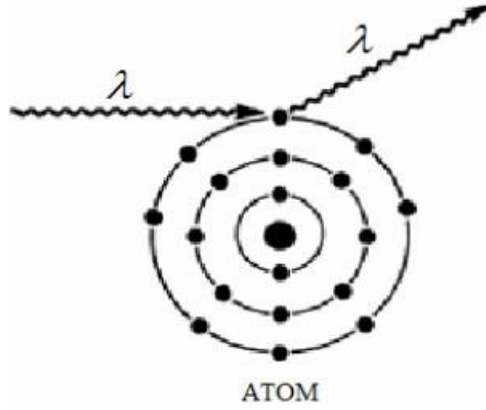
2.1.1 İyonlaşma

Nötr bir atomun pozitif ya da negatif yük kazanması durumuna iyonlaşma denir. Yörüngeden elektron sökülüp ayrılması ile atom pozitif yüklü olur. Bir nötr atom elektron yakalarsa atom negatif yüklü olur. Doğrudan iyonlaşma, yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi sonucunda meydana gelir. Bu yüklü parçacıklar arasında elektronlar, protonlar ve alfa parçacıkları bulunur. Dolaylı iyonlaşma, yüksüz parçacıkların madde ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkar. Yüksüz parçacıklar, doğrudan iyonlaşmaya neden olamazlar, ancak maddeyle etkileştiklerinde yüklü parçacıkların ortaya çıkmasına neden olabilirler. Bu yüklü parçacıklar daha sonra madde ile etkileşerek iyonlaşmaya sebep olabilirler. Fotonlar ve nötronlar, dolaylı iyonlaşmaya sebep olan parçacıklara örnek olarak verilebilir [18].

2.1.2 Koherent Saçılma

Klasik saçılma (Thomson saçılması) ve Rayleigh saçılması olarak bilinen iki tip koherent saçılma vardır. Thomson saçılması, elektromanyetik radyasyonun bir elektron tarafından saçılmasıdır ve elektromanyetik dalgaların dalga özelliği göstermesinin bir sonucudur. Bu saçılma sürecinde, gelen elektromanyetik dalga (örneğin bir X-ışını fotonu), bir atomun elektronlarıyla etkileşime girer. Rayleigh saçılması, özellikle molekül veya atom gibi daha büyük yapıların saçılmasıdır ve Thomson saçılmasının genelleştirilmiş halidir. Bu etkileşimde, elektromanyetik dalga, bir atom veya molekülün tüm elektronları ile etkileşime girer. Gelen dalga, atom veya molekülde bir polarizasyon yaratır ve bu polarizasyon sonucunda atom veya molekül, gelen dalganın frekansında elektromanyetik dalgalar yayar [18]. Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi titreşen elektron gelen

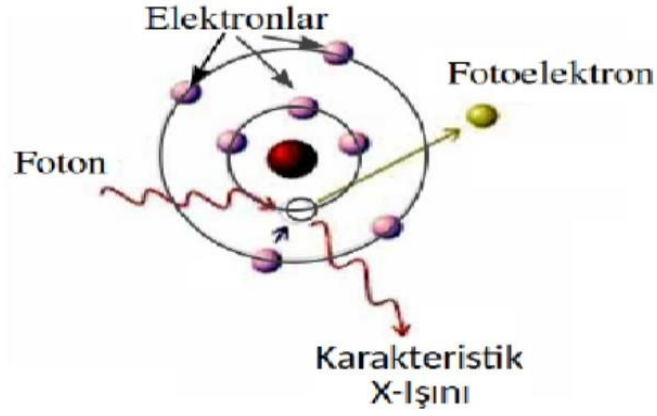
elektromanyetik dalgayla aynı frekansta titreşir ve ivmeli hareket yaptığından X-ışını yayar. Rayleigh saçılması ise, parçacıkların boyutu, gelen fotonun dalga boyundan daha küçük olduğu zaman gerçekleşir. Böylece Thomson saçılması ile karşılaştırıldığında Rayleigh saçılması, gelen ışığın frekansına çok daha bağlıdır [18].



Şekil 2.1. Koherent saçılma [18]

2.1.3 Fotoelektrik olayı

Fotoelektrik olayı, ışık ışınlarının foton adı verilen enerji paketlerinden oluştuğunu açıklar [19]. Fotoelektrik olayda, bir foton ile bir atom etkileşime girer ve fotonun tamamen yok olması sağlanır. Enerjisi düşük olan bir foton, bir atomun içinden geçerken K veya L yörüngesindeki bir elektrona enerjisinin tümünü vererek onu pozitif yüklü çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır ve dışarıya fırlatır. Bu dışarıya fırlatılan elektrona fotoelektron denir [20]. Fotoelektronların bir yüzeye çarpması sonucunda oluşan elektrik akımına fotoelektron akımı denir. Fotoelektron akımı serbest elektronların sayısı ile doğru orantılıdır. Burada elektron boşluğu oluşur. Bu oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki bir elektron tarafından doldurulur ve bu olay sırasında X ışını yayınlanır. Bu olay 0,5 MeV'den daha küçük enerjili fotonların ağır metaller tarafından soğrulması için önemlidir. Foton enerjisinin bir kısmını elektronu atomdan koparabilmek için kullanır ve geriye kalan enerjisini ise kopan elektrona kinetik enerji olarak denklem 2.1'deki aktarır. Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi herhangi bir metal atomu ile gelen düşük enerjili foton etkileşime girer.



Şekil 2.2. Basitçe fotoelektrik olayının gösterimi [18]

Böylelikle atomdan elektron serbest hale geçer. E_b fırlatılan elektronun bağlanma enerjisi, kopan elektronun kinetik enerjisi ile gelen fotonun enerjisine bağlı olarak aşağıdaki denklem 2.2'deki gibi yazılabilir.

$$E_f = E_b + E_k \quad (2.1)$$

$$E_k = h\nu - E_b \quad (2.2)$$

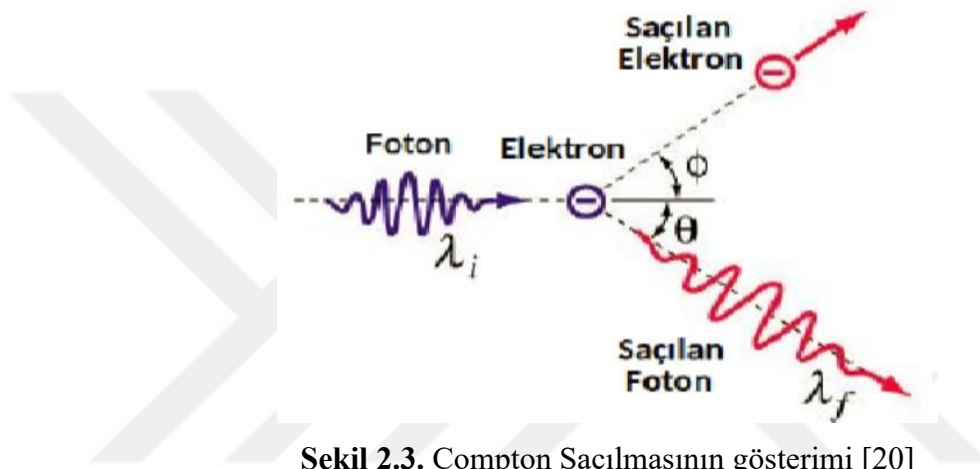
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

Burada denklem 2.3'teki h planck sabiti, c ışık hızı ve λ fotonun dalga boyudur. Karakteristik X ışını açığa çıkmasında, 0,5 MeV'den düşük enerjili fotonların ağır elementler tarafından emilimi oldukça önemlidir. Fotonun enerjisine bağlı olarak, fotoelektronun saçılma açısı değişir. Fotoelektronun gelme yönüne dik olarak saçılması fotonun düşük enerjisinin etkisidir. Metalin cinsine bağlı olarak bir frekans eşiği vardır ve bu eşik değerinden büyük değerlerde fotoelektron akımı oluşur. Fotoelektron akımı ışığın şiddeti ile doğru orantılıdır [20].

2.1.4 Compton saçılması

20. yy başlarına kadar klasik elektromanyetik teoride saçılan ışınların dalga boylarının değişmeyip, başlangıçtaki dalga boyuna sahip olacağı ve kinetik enerjisinin de değişmeyeceği düşünülmektedir. Ancak 20. yy'da yapılan yüksek enerjili deneylerde X ışınlarının ve gama ışınlarının etkileşimleri sırasında fotonların saçıldıklarında belirli bir saçılma açısının olduğunu ve fotonun dalga boyu ile bu açının ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca bu ilişkinin fotonun enerjisini de değiştirdiği ve bu saçılmanın esnek olmadığı görülmüştür [20]. Compton saçılması Arthur H. Compton tarafından 1923'te keşfedilmiştir. Einstein'ın yaptığı fotoelektrik olay ile ilgili gösterdiği, fotonların enerji-

sinin frekanslarına ve dalga boylarına bağlı olmasının haricinde Compton olayında parçacıklar gibi kuantalarının ve momentumlarının olacağını ileri sürmüştür [21]. Çok yüksek enerjili fotonların, atoma zayıf bir şekilde dış yörüngeye bağlanmış elektronu ile etkileşmeye girdiği zaman belirli bir açı ile saçılmasına Compton saçılması denilmektedir [20]. Foton enerjisinin bir kısmını elektrona vererek saçılır. Bu durum fotonların dalga özelliği ile açıklanamayıp, parçacık özelliğinin olduğunu gösterir. Gelen fotonun enerjisi soğurucu maddenin atom numarasına yani maddedeki serbest elektron sayısına bağlıdır. Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi elektron ile foton arasında oluşan saçılma açısı ise fotonun enerjisine bağlıdır.



Şekil 2.3. Compton Saçılmasının gösterimi [20]

Her foton bir elektron ile etkileşime girecek şekilde bir Denklem 2.4'deki matematiksel ifade ile tanımlanır.

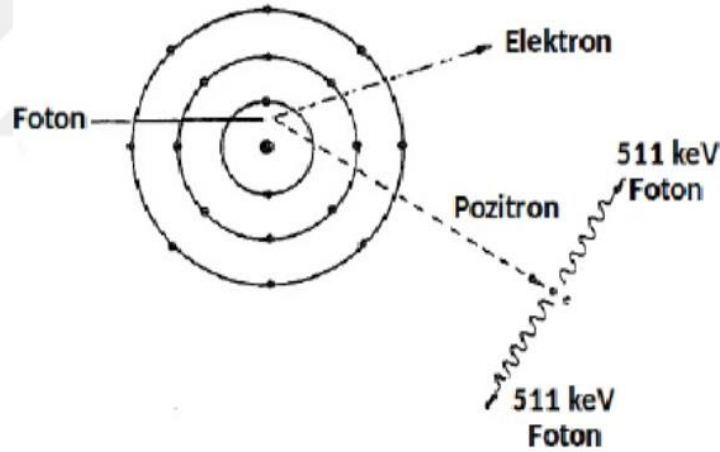
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e} (1 - \cos \theta) \quad (2.4)$$

Compton olayında yüksek enerjili fotonların enerjileri, belirli bir seviyeye düşene kadar enerji kaybeder ve bu andan itibaren fotoelektrik olay ile emilir [20].

2.1.5 Çift oluşum

Yüksek enerjili bir fotonun enerjisi 1,02 MeV'den daha büyük olduğu durumlarda atom çekirdeğinin yakınına yaklaşırken elektronun pozitrona dönüşmesi olayına çift oluşum denir [20, 21]. Çift oluşum olayı genelde yüksek enerjili (birkaç MeV'den fazla enerjili) gama ışınları ile gerçekleşir, bu olayı düşük enerjili gama ışınlarının gerçekleştirmesi düşük bir ihtimaldir [21]. Etkileşime girilen maddenin, çekirdeğindeki Z sayısının artması ve gama ışını enerjisinin bir elektronun durgun kütle enerjisini iki katı kadar aşması ile çift oluşum olayının gerçekleşme olasılığı artar [20, 21]. Çift oluşumda

birçok olayda olduğu gibi enerji ve momentum korunur. Yük toplamı elektronun ve pozitronun sıfırdır ve yüksüz olan fotonla aynıdır. Elektron ve pozitronun enerjileri toplamı; gelen fotonun enerjisi ve durgun kütle enerjileri toplamına eşittir [20]. Durgun haldeki bir pozitron ve bir elektronun enerjisi 0,511 MeV'dir. Çekirdeğin Coulomb alanında gerçekleşen bu etkileşimde, gama fotonu yok olur ve bunun sonucunda bir elektron-pozitron çifti oluşur. Bu olayın gerçekleşebilmesi için foton enerjisinin en az 1,02 MeV olması gerekir; eşik enerjinin üzerindeki fazla enerji ise elektron ve pozitron arasında paylaşılır ve bu enerji, parçacıkların kinetik enerjisine dönüşür [21]. Bu durumun sonunda pozitron madde içinde ilerlerken iyonlaşma ve uyarılma şeklinde enerjisini kaybeder ve sonunda pozitronun tüm enerjisi bittiğinde madde içindeki bir elektronla birleşerek 0,511 MeV enerjili iki tane yok olma fotonunun oluşmasına neden olur ve bu durum sonunda elektron ve pozitron kaybolur. Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi momentum korunumundan dolayı iki foton zıt yönlerde saçılır. Oluşan bu fotonlar, soğurucu malzeme içinde fotoelektrik etki ve Compton saçılması gibi mekanizmalarla yeniden maddeyle etkileşime girer [20].



Şekil 2.4. Çift oluşum olayının şematik gösterimi [20, 22].

2.2 Gama Spektrometri Sistemleri

Gama spektrometri sistemleri, çevredeki maddelerin radyoaktif özellik taşıyıp taşımadığını ve mevcutsa bu radyoaktivitenin hangi radyonüklidden kaynaklandığını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan yüksek güvenilirliğe sahip analiz yöntemlerindendir. Bu sistemler, özellikle düşük tespit sınırlarına sahip olmaları nedeniyle çevresel örneklerin analizinde tercih edilmektedir [23]. Radyoaktif bir kaynaktan yayılan gama radyasyonu dedektöre ulaştığında, dedektör materyali ile etkileşime girerek soğurulur ve bu etkileşim sonucu, radyasyon enerjisiyle orantılı bir

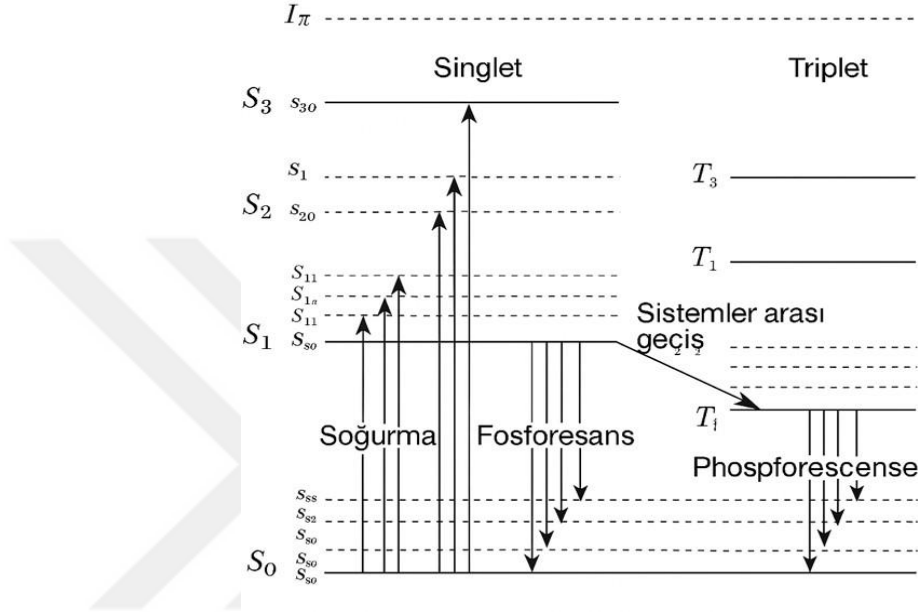
elektiriksel puls üretilir. Oluşan sinyal, sistemde bulunan yükselticiler aracılığıyla güçlendirilerek voltaj sinyaline dönüştürülür ve uygun şekilde şekillendirilip çok kanallı analizöre (MCA) aktarılır. Çok kanallı analizörde sayısal verilere dönüştürülen bu bilgiler, bilgisayar ekranında bir spektrum grafiği şeklinde görüntülenir. Elde edilen spektrum verileri, analizöre bağlı uygun giriş/çıkış birimleri aracılığıyla dış ortama aktarılır ve değerlendirilir [24]. Gama spektrometri sistemleri, örnek hazırlama sürecini hızlı ve pratik hale getirmesinin yanı sıra, tek bir numune ile birden fazla radyoaktif çekirdeğin eşzamanlı veya ayrı ayrı tespit edilmesine olanak tanır. Bu yönüyle sistem, malzeme, iç gücü ve zaman açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Çevresel radyoaktivite ölçümlerinde yaygın olarak NaI(Tl) sintilasyon dedektörleri ve HPGe (yüksek saflıkta germanyum) yarı iletken dedektörleri tercih edilmektedir [25]. Özellikle HPGe dedektörleri, üstün enerji  z n rl kleri sayesinde gama ışını ölçümleri için oldukça uygun özellikler sunmaktadır [26].

2.2.1 Sintilasyon Dedektörleri ve NaI(Tl)

Sintilasyon, iyonlaştırıcı radyasyonla etkileşen bir malzemenin görünür veya yakın ultraviyole bölgede foton yayması olayıdır. Sintilasyon dedektörleri, bu ışık emisyonlarını algılayarak radyasyonun varlığını tespit eder ve bu özellikleri sayesinde nükleer fizik, radyasyon güvenliği, tıbbi görüntüleme ve dozimetri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır [27]. Gama ışınları, sintilasyon malzemesini uyarak atomları daha yüksek enerji seviyelerine çıkarır; bu atomlar düşük enerji seviyelerine dönerken foton yayar. İnorganik sintilatörlerde, katkı maddeleri ( rneğin Sezyum (Ce), Talyum (Tl), Avrupyum (Eu)) tuzak seviyeleri oluşturarak ışık verimini artırır [28]. Oluşan fotonlar, Fotomultiplier Tüpleri (PMT) veya Silikon Fotomultiplierler (SiPM) ile algılanır ve elektiriksel sinyale dönüştürülür. Bu zayıf sinyaller y kselte lerle güçlendirilerek analiz edilir [27]. Analiz edilen enerji ve zaman spektrumları, radyasyonun türü ve enerjisi hakkında önemli bilgiler sunar. Sintilatörler organik ve inorganik olarak ikiye ayrılırlar.

Organik sintilatörlerde, iyonlaştırıcı radyasyon moleküler orbitallerdeki π elektronlarını uyarak foton yayılmasına neden olur. Bu süreçte oluşan emisyon spektrumu, geçişlerin kademeli gerçekleşmesi nedeniyle absorpsiyon spektrumundan farklıdır [28]. Genellikle aromatik halkalar içeren düşük atom numaralı bileşiklerden oluşan bu malzemeler, gama radyasyonunu yeterince soğuramadıkları için dedeksiyon açısından sınırlıdır. Üretilen ışık, fotoçoğaltıcılar aracılığıyla elektrik sinyaline

dönüştürülür [27, 29]. Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi, radyasyon bu yapılarda bir elektronun enerji veya titreşim seviyesini uyararak sintilasyon sürecini başlatır. Şekil 2.5.'de gösterildiği üzere, organik sintilatörlerde moleküler enerji seviyeleri tekli (singlet) ve üçlü (triplet) durumlar olarak sınıflandırılır; iyonlaştırıcı radyasyon bu yapılarla etkileşime girerek bir elektronun enerji ya da titreşim seviyesini uyarır ve böylece sintilasyon süreci başlatılmış olur.



Şekil 2.5. Aromatik hidrokarbon olan organik sintilatörlerde foton etkileşimi sonrası gerçekleşen başlıca süreçlerin enerji düzeylerinin diyagramı. Temel (kararlı) durum S_0 'dır. Tekli uyarılmış durumlar; S_1 , S_2 , S_3 ve üçlü uyarılmış durumlar T_1 , T_2 , T_3 ile gösterilmiştir. Titreşim alt seviyeleri S_{00} , S_{10} , S_{11} olarak ifade edilmiştir [29].

İyonlaştırıcı radyasyon, molekülü temel durumdan (S_0) uyarılmış bir singlet duruma (S_1 , S_2 ...) çıkarır (absorpsiyon veya soğurma). Bu yüksek enerji seviyesinden, molekül önce içsel vibrasyonel (non-radyatif) geçişlerle alt vibrasyon seviyelerine (örneğin S_{12} , S_{11}) iner. Ardından, S_1 seviyesinden temel durumun (S_0) bir vibrasyon alt seviyesine radyoaktif geçiş gerçekleşir ve bu süreçte floresans ışığı yayılır. Bu geçiş hızlıdır ve genellikle nanosaniyeler mertebesinde gerçekleşir. Alternatif olarak, molekül S_1 seviyesinden üçlü bir duruma (T_1) geçebilir; bu intersistem geçiş (inter-system crossing) olarak bilinir. Triplet durumundan temel duruma dönüş ise daha yavaş gerçekleşir ve bu geçiş fosforesans olarak adlandırılır (mikro saniye ila milisaniye arası zaman ölçeklerinde). Üst singlet (S_2 , S_3) ve triplet (T_2 , T_3) seviyeleri absorpsiyon sonrası oluşabilir, ancak bu seviyelerden de iç geçişlerle alt seviyelere inilir. Bu diyagram, sintilasyon sinyallerinin enerji geçişlerini ve zamanlama farklarını (floresans: hızlı,

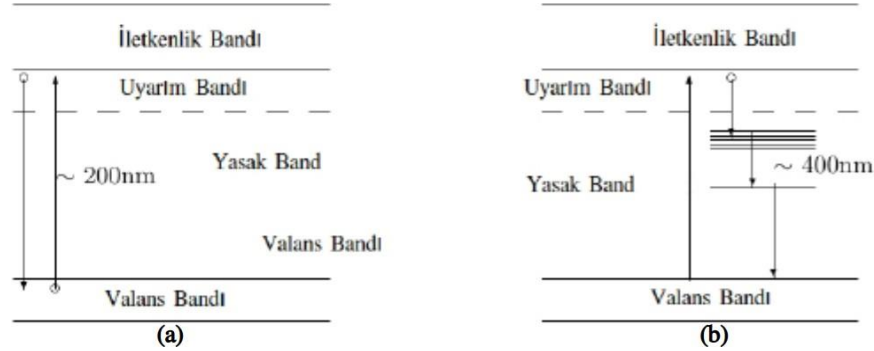
fosforesans: yavaş) açıklamaktadır. Organik sintilatörlerin düşük atom numarasına sahip olmaları, gama radyasyonunu yeterince soğuramamalarına neden olur; bu da dedeksiyon verimlerini sınırlar [27, 28]. Organik sintilatörlerin polimer tabanlı yapıları, ultraviyole ışımayı görünür ışığa dönüştürerek çeşitli radyasyon türlerinin algılanmasına olanak tanır. Özellikle plastik sintilatörler, düşük maliyetleri, hızlı yanıt süreleri (2-4 ns) ve esnek yapıları sayesinde nükleer tıp, parçacık izleme ve güvenlik sistemleri gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir. Hızlı bozunma süreleri, bu dedektörlerin özellikle hassas ve anlık ölçümlerde etkinliğini artırmaktadır [28].

İnorganik sintilatörler, yüksek gama soğurma kapasiteleri, iyi enerji çözünürlükleri ve yüksek ışık verimleri sayesinde nükleer fizik, tıbbi görüntüleme ve güvenlik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [28, 29]. Bu malzemeler, doğrusal enerji yanıtı ve hızlı bozunma süreleri ile hassas ve hızlı algılama sağlar. Sintilasyon mekanizmaları, moleküler değil kristal yapıdaki elektronik geçişlere dayanır. Ancak, nem alma eğilimleri nedeniyle özel şekillerde işlenmeleri zordur. Alkali halides olarak adlandırılan saf inorganik sintilatörler görünür bölgede ışık üretmekte sınırlı olabilir; çünkü değerlik (valans) bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji boşluğu genellikle görünür ışık aralığında değildir [29]. İnorganik sintilasyon mekanizması, kristal yapıdaki elektronik bant geçişlerine dayanırken; organik sintilatörlerde floresans, fiziksel yapıdan bağımsız olarak moleküler geçişlerle gerçekleşir [28].

Gelen iyonlaştırıcı radyasyon, valans bandındaki bir elektronu iletim bandına uyarır; bu elektron, daha sonra valans bandına geri dönerken aradaki enerji farkına karşılık gelen bir foton yayar. Ancak bu foton her zaman görünür ışık bölgesine denk gelmeyebilir [29]. Oluşan fotonlar, sintilatör tarafından ve fotosensörlerin cam yüzeyinde soğurulmadan önce sinyale dönüştürülmelidir. Bu nedenle, saf kristallere genellikle talyum gibi aktivatörler eklenerek daha fazla görünür ışık üretimi sağlanır. Saf kristallerdeki aktivatör atomları, enerji seviyeleri içinde tuzak görevi görerek düşük enerjili ve uzun dalga boylu fotonların yayılmasına olanak tanır. Bu sayede fotonlar kristal içinde soğurulmadan fotoçoğaltıcılar tarafından algılanabilir ve elektriksel sinyale dönüştürülerek dedeksiyon gerçekleştirilir [28].

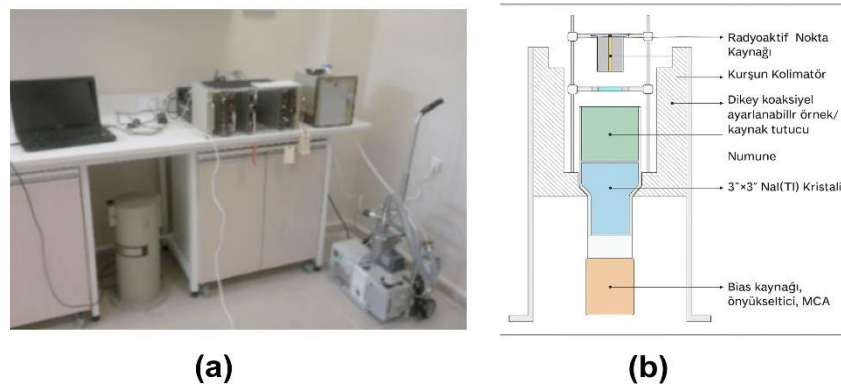
Saf ve aktivatör katkılı inorganik sintilatörlerin enerji seviyelerinin şematik gösterimi Şekil 2.6.'da sunulmuştur. Şekil 2.6.(a)'da saf NaI kristalinde, bant aralığı nedeniyle yayılan fotonların dalga boyu yaklaşık 200 nm civarındadır ve bu, görünür bölgenin dışında kalmaktadır. Şekil 2.6.(b)'de saf NaI kristaline talyum (Tl) gibi bir

aktivatör elementi eklendiğinde, bant yapısında yeni ara seviyeler oluşur ve bu sayede yayılan fotonların dalga boyu yaklaşık 400 nm'ye çıkar. Böylece görünür bölgede daha fazla optik foton üretimi sağlanarak sintilasyon verimi artırılmış olur [29].



Şekil 2.6. Saf ve aktivatör katkılı NaI kristallerinin enerji seviyelerinin gösterimi. (a) Saf NaI yaklaşık 200 nm dalga boyunda foton yayarken, (b) Talyum katkısı bu değeri 400 nm'ye çıkararak görünür bölgede daha fazla ışık üretimini sağlar [29].

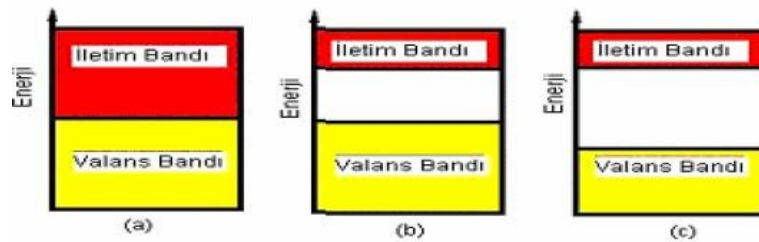
Şekil 2.7. (a)'da görseli verilen, 3 inç x 3 inç boyutlarındaki ORTEC marka NaI(Tl) sintilasyon dedektörü (Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Fizik Laboratuvarı) verilmiştir. Şekil 2.7. (b)'de kurşun zırh içine yerleştirilmiş NaI(Tl) dedektörü için gama zırhlama düzeneğinin şematik görünümü detaylandırılarak verilmiştir. Üstteki radyoaktif nokta kaynağı, kurşun kolimatör ve ayarlanabilir örnek tutucu yardımıyla araştırılan numuneye yönlendirilir; dedektörde üretilen ışık sinyalleri fotomultiplier tüpüyle toplanarak bias kaynağı (önyükseltici) MCA zinciri üzerinden sayısallaştırılır.



Şekil 2.7. (a) Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarı'nda bulunan ORTEC marka 3''x3'' boyutlarındaki NaI(Tl) dedektör sisteminin görseli. (b) Dedektörün bileşenlerinin gösterimi.

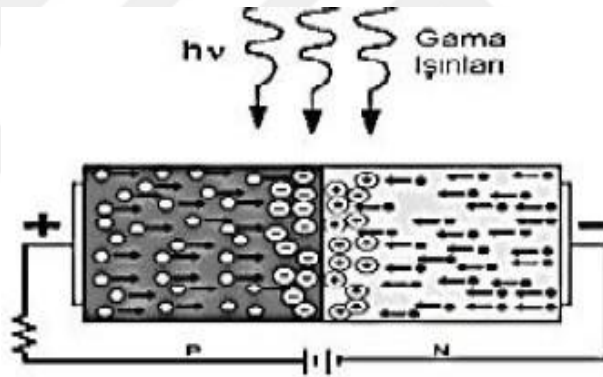
2.2.2 Yarı iletken Dedektörleri ve HPGe

Bir atom içerisindeki elektronlar, belirli kuantum durumlarında bulunur ve enerji bandı teorisi ile Fermi-Dirac istatistiklerine bağlı olarak atomik orbitalleri belirli kurallara göre doldururlar. Atomdaki dolmamış orbitallerde bulunan elektronların oluşturduğu enerji düzeyi, valans bandı olarak tanımlanır. Bu bantta yer alan bağlı elektronlara ise valans elektronları denir. Eğer bir elektrona, valans bandından kopup daha yüksek bir enerji düzeyine geçmesi için gerekli eşik enerji verilirse, bu elektron iletim bandına geçer ve serbestçe hareket edebilir. Valans bandı ile iletim bandı arasında bulunan enerji aralığı, yasak bölge olarak adlandırılır ve saf bir atomda bu enerji seviyesi boş durumdadır. İletken malzemelerde, valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji farkı yok denilecek kadar azdır; bu nedenle elektronlar çok kolaylıkla iletim bandına geçebilirler. Ancak yarı iletken ve yalıtkan malzemelere doğru ilerledikçe, bu iki bant arasındaki enerji aralığı giderek artar. Valans bandındaki bir elektrona koparabilmek için gerekli olan minimum eşik enerjisine sahip bir gama ışını maddeyle etkileşime girdiğinde, söz konusu elektron iletim bandına geçer ve valans bandında bir boşluk (deşik) oluşur. Bu etkileşim sonucunda bir elektron-boşluk çifti meydana gelir. Eğer bu süreç sırasında yarıiletken malzeme üzerine bir elektrik alan uygulanırsa, iletim bandındaki elektronlar elektrik alanına zıt yönde hareket ederken, valans bandında oluşan boşluklar ise elektron hareketine bağlı olarak alan yönünde yer değiştirir. Bu karşılıklı hareketlenme, dedektör içerisinde bir elektrik akımı oluşturur. Dedektör çıkışında gözlemlenen pulsun genliği, gelen gama ışınının enerjisiyle doğru orantılıdır [26]. Ş ekil 2.8.'da iletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin enerji bant seviyeleri gösterilmiştir. Yarı iletken dedektörler, katı haldeki bir iyonizasyon odası gibi davranır.



Şekil 2.8. (a) İletken, (b) yarı iletken ve (c) yalıtkan malzemelerin enerji band diyagramları [26].

Silikon veya germanyumdan üretilen tek kristal üzerine uygulanan potansiyel fark sayesinde kristal içinde bir elektrik alan oluşturulur. İyonlaştırıcı radyasyon kristale girdiğinde enerji transferi sonucu olarak elektron-boşluk çiftleri meydana gelir; serbest kalan elektronlar iletim bandında, boşluklar ise valans bandında ters yönde sürüklenir. Taşıyıcılar elektrotlara yeniden birleşmeden veya tuzaklanmadan ulaştığında oluşan akım, soğrulan enerjiyle orantılıdır. Bu nedenle dedektörün verimli çalışabilmesi için kristalin son derece saf olması ve elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşme olasılığının olabildiğince düşük tutulması kritik önem taşır [25]. Ge ve Si, yarı iletken dedektörlerde en yaygın kullanılan tek-kristal malzemeleridir; özel saflaştırma ve büyütme teknikleri sayesinde, taşıyıcıların yeniden birleşme olasılığı en aza indirecek düzeyde yüksek kristal saflığına ulaşılabilmektedir [25, 26]. Kristaldeki sızıntı akımını düşürmek ve böylece enerji çözünürlüğü korumak için bu dedektörler genellikle sıvı azotla soğutularak çalıştırılır [25]. Yüksek çözünürlük ve düşük gürültü kombinasyonu, yarı iletken dedektörleri hem temel araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez hale getirmiştir [25]. Çalışma prensipleri, Şekil 2.9.'de şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 2.9. Yarı iletken dedektörün temel çalışma prensibini gösteren diyagram [30].

Normal germanyum kristallerinde safsızlık oranı yaklaşık 10^{13} atom/cm³ düzeyindeyken, 1986 yılında geliştirilen yüksek saflıktaki germanyum kristallerinde bu oran 10^{10} atom/cm³'e kadar düşürülmüştür. Li katkısıyla üretilen Ge (Li) yarı iletken dedektörlerde ise, katkılama işlemi yapılmadan önce daha yüksek saflıkta kristaller elde edilmiştir. Bu yüksek saflıktaki germanyum kristalleriyle üretilen yarı iletken dedektörlerde, tüketim bölgesi (depletion region) daha büyük boyutlara ulaşabilmekte ve bu da dedektörün etkin hacmini artırmaktadır. Li katkısının kaldırılması, dedektörlerin sürekli olarak düşük sıcaklıkta tutulma gerekliliğini ortadan kaldırmıştır; bu tür dedektörlerin yalnızca kullanım süresi boyunca soğukta kalmaları yeterli olmaktadır. Yüksek saflıkta germanyum dedektörler, n tipi ya da p tipi kristal yapıların uçlarına uygulanan özel temaslarla oluşturulur.

Örneğin, n tipi bir kristalin sağ tarafına Li katkısı ile n tipi alıcı (n^+) kontak, sol tarafına ise bor katkısı ile p tipi verici (p^+) kontak oluşturularak dedektör tamamlanır. Bu yapıda, p kontağa negatif, n kontağa ise pozitif voltaj uygulanarak kristalin tamamının tüketim bölgesine dahil edilmesi sağlanır. Benzer biçimde, p tipi bir kristalin sağ tarafına p kontağı, sol tarafına ise n kontağı yerleştirilerek yüksek saflıkta p tipi dedektörler de üretilebilmektedir. Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlerinin en önemli özelliği, diğer dedektör türlerine kıyasla çok daha yüksek enerji çözünürlüğü sunmalarıdır. Normal bir germanyum kristalinde bir elektron-boşluk çifti oluşturmak için gereken eşik enerjisi, klasik yarı iletken dedektörlere göre oldukça düşüktür. Bu durum, sadece düşük enerjili gama ışınlarının yüksek hassasiyetle tespit edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda dedektörün sayım kapasitesini de önemli ölçüde artırır [26]. HPGe koaksiyal dedektörler, silindirik bir yapıya sahip olup günümüzde hem n tipi hem de p tipi olarak üretilebilen gelişmiş yarı iletken dedektörlerdir. Bu dedektörler, tüketim bölgesini (depletion region) genişletmek amacıyla özel olarak koaksiyal (eş eksenli) bir geometriyle tasarlanmıştır. Ayrıca, uygulama alanına bağlı olarak koaksiyal dedektörler farklı geometrik konfigürasyonlarda üretilebilmekte ve bu sayede çeşitli deneysel ihtiyaçlara uyum sağlamaktadır [26]. Şekil 2.10.'da görseli sunulan ORTEC marka HPGe dedektör sistemi, bu tez kapsamında toprak ve taş tozu numunelerindeki radyoizotopların gama spektroskopisi yöntemiyle tespiti amacıyla kullanılmıştır. Görselde; dedektörün sıvı azotla çalışan soğutucu ünitesi, kristal dedektör bölgesi, veri toplama elektroniği (data acquisition system) ve bilgisayar ekranında elde edilen gama spektrumu yer almaktadır.



Şekil 2.10. Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarında bulunan ORTEC marka HPGe dedektör sisteminin görseli.

Gama spektrometre sistemlerinde kullanılan elektronik altyapı, dedektör tarafından üretilen birincil sinyalleri algılayıp biçimlendirerek yüksek doğrulukla sayısallaştıran entegre donanım bileşenlerinden oluşur. Bu altyapı, spektrumun enerji çözünürlüğünü ve sistem hassasiyetini doğrudan belirler ve genellikle şu alt modülleri içerir [27]: Ön yükselticiler ve şekillendirici (shaping) amplifikatörler, Analog-dijital dönüştürücüler (ADC), Çok kanallı analizör (MCA) veya sayısal sinyal işleme birimleri, Zaman işaretleyici (TDC) / eş zamanlama devreleri, Veri toplama, depolama ve çevrim-içi analiz yazılımları. Dedektör (sintilasyon kristali, HPGe veya başka bir yarı iletken sensör) gama fotonunu soğurduğunda ürettiği analog darbe, önce düşük gürültülü ön yükselticide toplanır; shaping amplifikatör, darbenin gürültü-kazanç optimizasyonunu gerçekleştirir; ADC modülü darbe büyüklüğünü sayısal değerlere dönüştürerek MCA'da enerji kanallarına yerleştirir. Ardından, sayısal işlemci birimleri ve yazılımlar sinyali analiz ederek enerji spektrumunu üretir. Uygun biçimde tasarlanmış bu elektronik zincir, gama spektrometresinin enerji doğruluğunu, ayırt ediciliğini ve ölçüm hızını belirleyen kritik faktördür.

2.3 Radyasyon ve Radyasyondan Korunma

Radyasyon, doğada sürekli olarak bulunan ve yaşamın ayrılmaz bir parçası olan fiziksel bir olgudur. İnsanlar hem doğal hem de insan kaynaklı radyasyon türlerine sürekli olarak maruz kalmaktadır. Doğal radyasyon kaynakları başlıca iki gruba ayrılır: kozmik radyasyon ve karasal radyasyon. Kozmik radyasyon, uzaydan gelen yüksek enerjili ışınlar yoluyla atmosferimize ulaşırken; karasal radyasyon, yer kabuğundaki toprak, kaya ve minerallerde doğal olarak bulunan radyoaktif çekirdeklerden kaynaklanır [2,31]. Hatta insan vücudu bile doğal olarak belirli seviyelerde radyoaktivite içerir. Bu doğal maruziyetler, insan yapımı kaynaklardan gelen radyasyonla birleştiğinde bireylerin aldığı toplam radyasyon dozunu artırabilmektedir.

Dünya'nın oluşumundan itibaren, toprak ve kayalar Uranyum-238 ve Toryum-232, Potasyum-40 gibi doğal olarak radyoaktif elementler içermektedir ve bunlar çevresel doğal radyoaktivitenin başlıca kaynaklarıdır. Radyonüklit derişimi kayaç tipine göre değişir: granit, fosfat yatakları, volkanik kayaçlar ve tuz formasyonlarında bu değerler genellikle yüksektir; bu da söz konusu bölgelerde gama radyasyonunu artırır. Kayaçların ayrışması ve erozyonla toprağa karışması, yüzey toprağındaki radyoaktiviteyi yükseltir. Ayrıca, tarımsal faaliyetlerde kullanılan fosfor içerikli gübreler de bu radyoaktiviteye ek katkı sağlar. Yer altı suları ise özellikle termal kaynaklarda çökelek oluşturan radyumu (Ra) ve çözünmüş radon-222'yi içerebilirken, deniz-okyanus sularında radyonüklitler

genellikle çok düşük düzeydedir [32, 33].

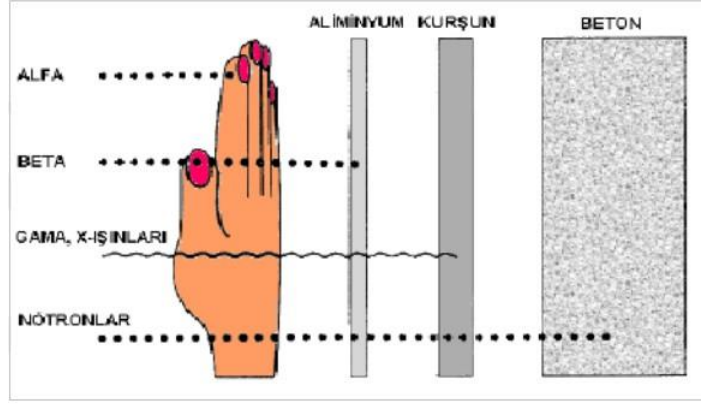
Günümüzde nükleer teknolojinin enerji üretimi, tıbbi uygulamalar ve endüstriyel süreçlerde yaygınlaşmasıyla birlikte, radyasyondan korunma konusu daha da önemli hale gelmiştir. Özellikle nükleer santrallerin artışı, nükleer silah kullanımı, Çernobil ve Fukushima gibi büyük kazalar ile radyoaktif atıkların yönetimi, zararlı ışınlarla karşı etkili korunma yöntemlerini zorunlu kılmaktadır [34]. Radyasyon, maruz kalma süresi ve şiddetine bağlı olarak vücuttaki hücrelerde çeşitli hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, radyasyondan korunmada üç temel ilkeye uyulması büyük önem taşır: maruziyet süresini azaltmak, radyasyon kaynağından uzak durmak ve etkili bir zırhlama sağlamak. Zırhlama; radyasyonun oluşumu, yayılımı, malzemelerle etkileşimi ve bu süreçlerin çevre üzerindeki mikroskobik etkilerini inceleyen önemli bir bilimsel alandır.

- **Zaman:** Radyasyonla ilgili çalışmalarda alınan dozun hesaplanması, doz hızı ile maruz kalınan zamanın çarpılmasıyla yapılır. Radyasyon alanında geçirilen süre arttıkça alınan doz da artar [34].
- **Mesafe:** Radyasyon şiddeti (veya doz hızı), kaynaktan olan uzaklık arttıkça azalır. Bu durum, özellikle noktadan yayılan kaynaklar için, ters kare yasası ile açıklanır [34].
- **Zırhlama:** Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için zırhlama yaygın bir yöntemdir.

2.3.1 Zırhlama Parametreleri

Zırhlama, iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı ile hedef arasına uygun malzemeler yerleştirilerek alınan dozun azaltılmasını amaçlayan temel bir korunma yöntemidir [35]. Kurşun, beton ve tuğla gibi yüksek yoğunluklu malzemeler gama ve X-ışınlarına karşı; düşük Z-değerli polimerler veya ince metal levhalar ise beta parçacıklarına karşı yaygın olarak kullanılır. Cihaz mahfazalarının içten kurşunlaması veya radyasyon odalarının duvar, tavan ve tabanlarında beton-kurşun kompozitlerin uygulanması hem işletim personelini hem de çevreyi ilave maruziyetten korur. Beta ışınları, alfa ışınlarından biraz daha yüksek zırhlama gerektir.

Şekil 2.11.'daki görseldeki gibi beta ışınlarını durdurmak için genellikle alüminyum veya daha kalın bir malzeme kullanılabilir. Gama ışınları ise diğerlerine kıyasla daha yüksek zırhlama gerektirir. Bu yüzden, gama ışınlarını durdurmak için daha yoğun ve daha yüksek atom numarasına sahip bir malzeme gerekir.



Şekil 2.11. Farklı radyasyon türlerinin zırhlaması [22].

Kurşun, yüksek yoğunluğa ve atom numarasına sahip olduğu için gama ışınlarını durdurmak için etkili bir malzemedir. Bu yüksek atom numarası, gama ışınlarının etkili bir şekilde absorbe edilmesini sağlar. Bu özellikleri nedeniyle kurşun, radyasyon zırhlaması için yaygın bir seçenektir [36]. Kurşunun bu özellikleri, tıbbi radyasyon alanından nükleer enerji santrallerine kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

Tek enerjili ve ince bir çizgi halinde dar kolime edilmiş bir gama demetinin, farklı kalınlıklardaki bir soğurucudan geçerek dedektöre ulaştığı iletim düzeni düşünüldüğünde, foton akısının üstel biçimde zayıflaması beklenir [21]. Gama fotonları, soğurucu içindeki soğurma (fotoelektrik etki, çift oluşumu) veya saçılma (Compton) süreçleriyle demetten uzaklaştırılır [37]. Bu zayıflama, soğurucunun kalınlığı x ve malzemeye özgü doğrusal zayıflama katsayısı μ ile ifade edilir. Bu katsayı, birim yol uzunluğunda fotonun etkileşime girme olasılığını tanımlar [21]. Böylece iletilen foton akısı I , soğurucu bulunmadığı durumdaki I_0 akısı ile Denklem 2.5’de verilen üstel bağıntıya uyar.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.5)$$

Denklem 2.6 bir gama fotonunun madde içindeki toplam doğrusal zayıflama katsayısının (μ, cm^{-1}) dört ayrı etkileşim bileşeninin cebirsel toplamı olduğunu göstermektedir.

$$\mu = T_{\text{fotoelektrik}} + K_{\text{Compton}} + \Pi_{\text{çift oluşum}} + \sigma_{\text{koherent}} \quad (2.6)$$

Gama fotonunun soğurucu içinde etkileşmeden katettiği ortalama mesafe, ortalama serbest yol λ (MFP) ile tanımlanır ve toplam doğrusal zayıflama katsayısının tersine eşittir (Denklem 2.7) [21].

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (2.7)$$

Ortalama serbest yol (MFP); bir gama veya X-ışını fotonunun malzeme içinde herhangi bir etkileşime uğramadan katettiği ortalama mesafe, katı malzemelerde foton enerjisine bağlı olarak birkaç milimetre ile onlarca santimetre arasında değişir (Denklem 2.8).

$$\text{Ortalama Serbest Yol (MFP)} = \frac{1}{\mu} \text{ (cm)} \quad (2.8)$$

Doğrusal zayıflama katsayısı (μ) malzemenin yoğunluğuna bağlı olduğundan, farklı yoğunluklu örnekler karşılaştırılırken sınırlı bir parametre olarak kalır [21]. Bu nedenle daha yaygın olarak kullanılan kütlece zayıflama katsayısı (μ/ρ), aynı malzemenin değişen yoğunluklardaki numuneleri için karşılaştırılabilir bir büyüklük sunar (Denklem 2.9).

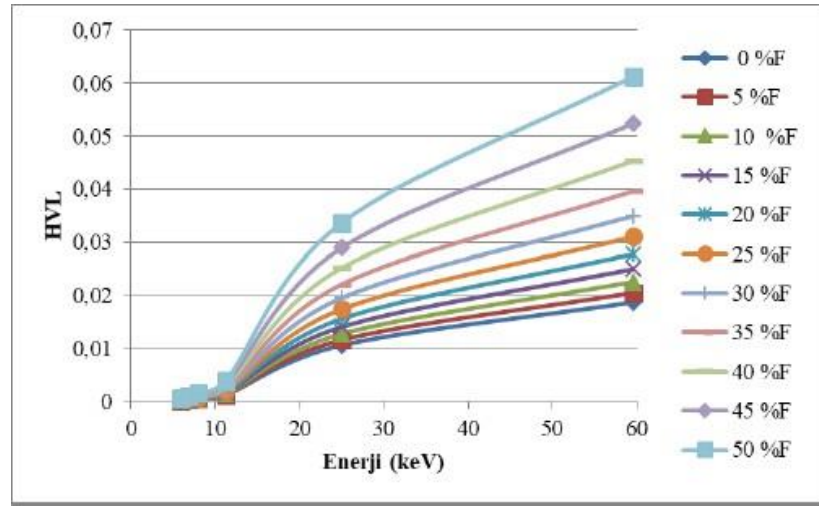
$$\text{Kütle Zayıflama Katsayısı} = \frac{\mu}{\rho} \text{ (cm}^2\text{g}^{-1}\text{)} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da ρ soğurucunun yoğunluğunu temsil eder. Kütle zayıflama katsayısı (μ/ρ), yalnızca foton enerjisine bağlıdır; dolayısıyla aynı kimyasal bileşiğin farklı fiziksel hâllerinde (örneğin su ile su buharı) aynı değeri alır. Bir elementin veya bileşiğin kütle zayıflama katsayısı ise Denklem 2.10'da verildiği üzere bileşimi oluşturan elementlerin ağırlıklı ortalamasıyla hesaplanır.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.10)$$

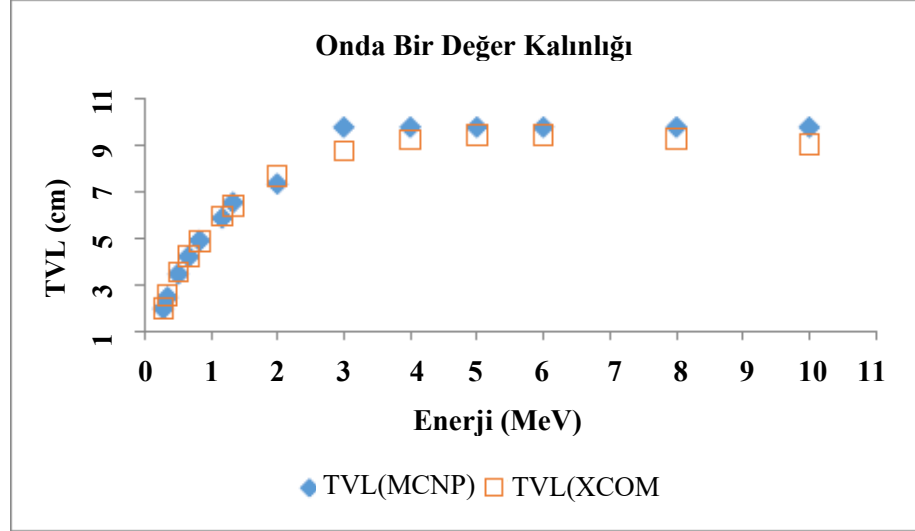
Burada w_i faktörü, bileşik veya karışımdaki i elementinin ağırlık fraksiyonunu ifade eder. Denklem (2.11)'de tanımlanan Yarım Değer Katmanı (HVL), bir X- veya γ demetinin şiddetini %50 azaltmak için gereken malzeme kalınlığıdır [38]. Genel olarak, malzemenin yoğunluğu ve atom numarası arttıkça HVL değeri düşer; dolayısıyla yüksek atom numaralı (Z) bir malzeme aynı zayıflatmayı daha ince bir tabaka ile sağlayabilir [40].

$$\text{Yarım Değer Katmanı (HVL)} = \frac{\ln 2}{\mu} \text{ (cm)} \quad (2.11)$$



Şekil 2.12. Enerjiye göre yarı değer katman kalınlığı HVL değişimi [38].

HVL, foton demetinin malzeme içindeki zayıflama davranışını nicel olarak tanımlayan kritik bir parametredir; bu nedenle radyasyon koruma, malzeme bilimi ve koruyucu tasarım stratejilerinde sıkça kullanılmaktadır [39]. Malzemenin etkin koruyuculuk performansını değerlendirmede temel gösterge olarak alınan HVL değeri, hem malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine hem de foton enerjisine bağlıdır; Şekil 2.12. artan enerjiyle birlikte HVL'nin nasıl değiştiğini göstermektedir. Tam Değer Katmanı (TVL-Tenth-Value Layer), bir malzemenin gelen X-ışını veya gama ışını demetinin şiddetini onda birine indirmek için gerekli kalınlığı ifade eder. Malzemenin koruyuculuk kapasitesini daha güçlü bir zayıflatma ile değerlendirmede kullanılır. TVL, radyasyonun malzemelerle etkileşimini ve zayıflatma özelliklerini anlamak için kritik bir parametredir ve özellikle daha yüksek derecede radyasyon koruması gereken durumlarda kullanılır [39]. TVL değerleri, malzemenin türüne ve Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi radyasyon enerjisine bağlı olarak değişir. Genellikle, daha yoğun ve yüksek atom numarasına sahip malzemeler daha düşük TVL değerlerine sahiptir. Bu da radyasyonu etkin bir şekilde zayıflattığını gösterir.



Şekil 2.13. Enerjiye göre onda bir değer kalınlığı TVL değişimi [38].

Bu kavram, radyasyon koruma ve malzeme bilimi alanlarında Yarım Değer Katmanı (HVL) gibi önemli bir kavramdır, ancak daha güçlü bir zayıflama etkisini tanımlar. HVL'ye kıyasla daha kalın bir katman gerektirir çünkü ışının şiddetini daha fazla azaltır [40]. Denklem 2.12'da gelen ışın demeti yoğunluğunu $\frac{1}{10}$ değerine düşürmesi için gereken malzeme kalınlığı TVL (Onuncu Değer Katmanı) ifade etmek için kullanılır.

$$\text{Onuncu Değer Katmanı (TVL)} = \frac{\ln 10}{\mu} \text{ (cm)} \quad (2.12)$$

2.4 Doğal Taşlar ve Yapı Malzemesi Olarak Taşların Kullanımı

Doğal taşlar, jeolojik kökenlerine (magmatik, metamorfik, sedimanter) ek olarak renk, sertlik, mineralojik bileşim, tane boyutu, doku ve yüzey işleme (parlatılmış/parlatılmamış) gibi çok yönlü ölçütlere göre sınıflandırılır [41, 42, 43]. Bu özellikler taşın iklimsel dayanımını belirler: demirce zengin mafik mineraller nemli ortamlarda paslanmaya yatkınken, felsik mineralli taşlar daha dirençlidir [44, 45]. Tarih boyunca sağlamlık, renk ve doku çeşitliliği nedeniyle anıt, köprü ve ibadethanelerde tercih edilen taşlar, günümüzde döşeme ve iç-dış dekorasyonda da yaygın kullanılır [44, 46, 47, 48, 49].

Türkiye'nin karmaşık tektonik geçmişi çok sayıda taş türü ve zengin rezerv oluşturmuş; ülke Ege %32, Marmara %26, İç Anadolu %11, diğer bölgeler %31 payla rezerv dağılımıyla küresel üretimde ilk üçte yer almıştır [43, 44, 50]. Yaklaşık 1 700 taş ocağı ve 2 000 mermer fabrikasıyla büyük bir endüstriyel kapasiteye sahip olan sektör, nüfus artışı ve hızlı şehirleşmenin inşaat talebi sayesinde büyümektedir [51, 52, 53]. Son

yıllarda geliştirilen kesme, işleme ve taşıma teknolojileri kaliteyi artırıp maliyetleri düşürmüştür; böylece doğal taş ticareti daha kârlı ve rekabetçi hâle gelmiştir [54, 55]. Sosyal, ekonomik ve sanatsal alanlardaki çok yönlü kullanımı, taşları hem kültürel mirasın restorasyonunda hem de modern mimaride stratejik bir malzeme konumuna yükseltmektedir [56-58].

2.4.1 Sarımsaklı Taşı ve Ahlat Taşı

Sarımsaklı ve Ahlat taşları, asidik patlamalı magmalarla oluşan ignimbirit grubuna dahildir [59, 60]. Türkiye'nin özellikle Ege, İç ve Doğu Anadolu bölgelerinde yaygın çıkarılan bu hafif, ısı-ses yalıtımlı ve kolay işlenebilen kayalar tarihi mimariden günümüz yapı taşına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir [61-63]. Sarımsaklı Taşı, Alt, Miyosen'e ait, pembe-kırmızı tonlarda, bol fiamme dokulu ve ponza bakımından zengin Ayvalık ignimbiritleri içinde yer alır; ıslakken daha canlı kırmızı görünen bu renk zamanla koyulaşır [64, 65]. Ahlat Taşı ise andezitik bileşimli bir volkanik tüf olup kırmızı, siyah, kül grisi, açık sarı ve beyaz gibi farklı tonlar sergiler; bu nedenle literatürde "andezit tüf" olarak sınıflandırılır [63]. Bu iki taş, mineral bileşim (asidik / andezitik), doku (fiamme- ponza vs. tüf) ve renk skalası bakımından farklılık gösterir; söz konusu farklar yoğunluk, su emme ile mekanik dayanım gibi mühendislik özelliklerine de yansır. İgnimbiritler, yanal yayılan sıcak piroklastik akımların sinterleşmesiyle kaynaklanmış tabakalar oluşturur; bu süreçte camsı parçalar fiamme, ilgili doku ise ötekisitik olarak tanımlanır. Kaynak derecesi matris bileşimi, gözeneklilik ve soğuma hızına bağlıdır. Pumisçe zengin, laminar çökelli ignimbiritler türbülanslı akıntı birimlerinden ince taneli ara seviyelerle ayrılır; pembemsi, çatlaklı pumisler ve sınırlı andezitik litikler tipiktir [64]. Bu nedenlerle türleri aynı olsa da oluşum süreçleri ve dış etkenlerinden dolayı Sarımsaklı Taşı ve Ahlat Taşı birçok konudan farklılık göstermektedir. Bu taş türleri ısı ve ses yalıtımı, hafiflik, kolay işlenebilirlik ve estetik görünümü gibi nedenlerle, bulundukları bölgelerde sıkça kullanılmış ve mimariye katkı sağlayarak bölgelerdeki birçok tarihi eserde bulunmaktadır [61].

Sarımsaklı Taşı: Sarımsaklı Taşı, Balıkesir-Ayvalık'ın Badavut yöresinde çıkarılan ignimbirit kökenli bir volkanik taştır [59]. Dokusunun sarımsak dişini andırması nedeniyle bu adı alır [64]. Badavut, uzun kumsalları ve flamingo dâhil çeşitli kuş türlerine ev sahipliği yapan sulak alanlarıyla tanınır [62]. Antik çağdan bu yana işletilen taş ocaklarından elde edilen gülkurusu renkli Sarımsaklı Taşı; kolay işlenmesi, yüksek dayanımı ve iyi ısı-ses yalıtımı sayesinde 18.&19. yüzyılda Ayvalık'taki Türk-Rum

yerleşimlerinin Neo-Klasik yapılarında yaygın kullanılmış, bölge mimarisine karakteristik bir görünümleri kazandırmıştır [61]. Osmanlı döneminde Orta Doğu'dan Balkanlar'a uzanan cami ve kiliselerde yaygın kullanılan bu taş, koruma düzenlemeleri nedeniyle günümüzde artık çıkarılmamaktadır [61]. Volkanik küllerin $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kaynaklanmasıyla oluşan bu iri kütleli ignimbirit, tüflere göre daha aşınma dirençli olup gözenekliliği sayesinde hafif, ısı-ses yalıtımlı ve estetik fiame dokusuyla yapı sektöründe halen değer görmektedir [66]. Şekil 2.14.'de Sarımsaklı taşının kullanıldığı bazı mimari örneklerinin görseli verilmiştir. Sarımsaklı Taşı, Badavut jeositinde yer alan Alt Miyosen yaşlı, ponza-zengin ve fiame dokulu Ayvalık ignimbiritinin bir üyesidir; lav akıntıları ve patlamalı volkanizma kökenlidir (20-22 milyon yıl önce) [62, 65]. Islakken kırmızımsı olan rengi kurudukça koyulaşır; yüksek su emme kapasitesi taşın ocakta kolay kesilmesini, kuruduktan sonraki sertliği ise dayanımını artırır. Bölgede yaygın düşey soğuma çatlakları doğal "kanal" işlevi görerek kanal-kama tekniğine ihtiyaç duymadan düzgün blokların çıkarılmasına imkan vermiştir.



Şekil 2.14. Balıkesir'in Ayvalık ilçesinde mimaride kullanılan Sarımsaklı taşı örnekleri.

Ahlat Taşı: Ahlat Taşı, Bitlis'in Ahlat-Adilcevaz yöresinde, özellikle Nemrut ve Süphan Dağı eteklerindeki ocaklarda çıkarılan ignimbirit kökenli volkanik bir kayadır [67, 68]. Lav ve piroklastik malzemenin ani soğumasıyla oluşan bu hafif taş, ilk çıkarıldığında yumuşak olup kolayca işlenir; içerdiği camsı faz sayesinde zamanla sertleşerek yüksek dayanım kazanır [69]. Toprak bileşimi ve mineral yoğunluğuna bağlı olarak koyu-açık kestane tonlarından gri-beyaza uzanan renk çeşitliliği gösterir [67]. Dayanıklılığı, hafifliği ve işlenebilirliği nedeniyle tarihi yapılardan güncel mimariye kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

Ahlat Taşı üzerinde yapılan fiziksel-mekanik incelemeler, koyu ve açık renkli örneklerde özgül kütlenin $2,60\text{--}2,64\text{ g cm}^{-3}$ aralığında olduğunu göstermiştir; bu değer

TS1910'un doğal yapı taşları için öngördüğü $2,55 \text{ g cm}^{-3}$ sınırını karşılar [70, 71]. Ancak porozitesi yüksek olduğundan su emme oranı da artmakta; bu durum hem dayanıklılık hem de basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmakta ve taşa nispeten düşük mekanik direnç kazandırmaktadır [67, 72, 73]. Ahlat yöresinde bol rezervi ve düşük maliyeti sayesinde Ahlat Taşı, özellikle külahlı kümbet ve türbe gibi tarihî yapılarda yaygın biçimde kullanılmıştır [60, 74]. Laboratuvar sonuçları yüksek gözenekliliğin basınç dayanımını düşürdüğünü gösterse de, yüzeyde sertleşen ve özenle seçilen bloklar uzun vadede yeterli dayanıklılık sağlamıştır. Tarihî yapılarda düşük poroziteli, homojen dokulu taş kullanımı, bu eserlerin günümüze sağlam ulaşmasında kritik rol oynamıştır [74]. Şekil 2.15.'de Ahlat taşının kullanıldığı bazı önemli mimari örneklerinin görseli verilmiştir.



Şekil 2.15. Bitlis'in Ahlat ilçesinde mimaride kullanılan Ahlat taşı örnekleri

3 MATERYAL VE YÖNTEM

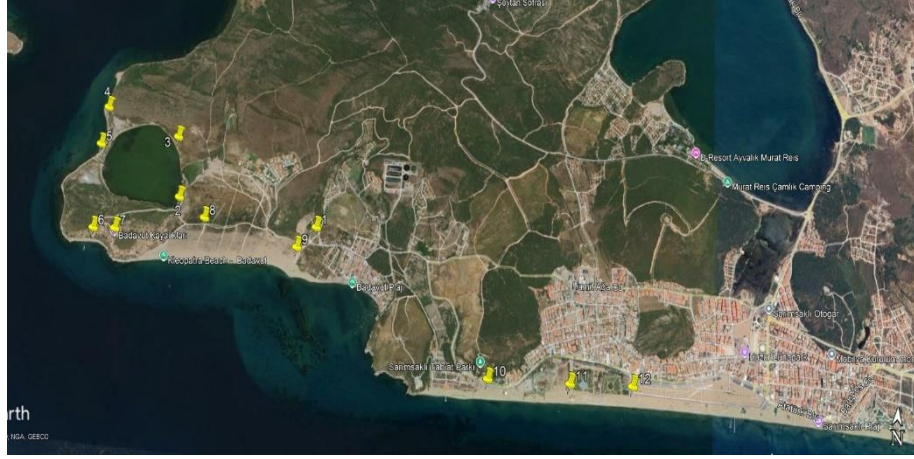
Bu tezde Sarımsaklı ve Ahlat taşlarının doğal radyoaktivitesi ile gama-radyasyon zırhlama potansiyeli birlikte değerlendirilmiştir. İlk aşamada, Balıkesir-Badavut yöresinden alınan 12 toprak örneği HPGe gama spektrometresiyle incelenerek ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K içerikleri saptanmış ve bölgenin doz-risk haritası çıkarılmıştır; aynı izotop analizi taş tozu numunelerine de uygulanmıştır. İkinci aşamada Sarımsaklı ve Ahlat taşları un inceliğinde öğütülmüş, Kayseri Erciyes Üniversitesi bünyesindeki Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri ile elementel içerikleri belirlenmiştir. Çimento, standart dere kumu ve su ile karıştırılarak elde edilen malzemeleri, her biri $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ boyutlarında üçlü setler halinde referans beton numuneleri üretilmiştir. Çimento miktarı belirli oranlarda (%5, %10 ve %15 ve %20) azaltılarak, yerine $0.63 \mu\text{m}$ elekten geçirilmiş Sarımsaklı ve Ahlat taş tozları ilave edilmiştir. Toplamda 27 numune hazırlanıp 28 gün su kürüne tabi tutulmuştur. Kür sonrası numuneler üzerinde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Teorik olarak, MAC, LAC, HVL, TVL ve MFP parametreleri hesaplanarak, taş tozu katkı oranlarına bağlı zırhlama performansları da karşılaştırılmıştır.

3.1 Toprak ve Taş Tozu Örneklerinin Doğal Radyoaktivitesi

Balıkesir Sarımsaklı taşının yoğun olarak bulunduğu ve eski taş ocaklarının yer aldığı Badavut bölgesinden rastgele seçilen 12 farklı toprak örneği ile Ahlat ve Sarımsaklı taşlarının un inceliğinde öğütülmüş tozları gama spektroskopisiyle analiz edilmiştir. Elde edilen spektrumlar üzerinden çalışma alanının ve her iki taş tipinin doğal radyoaktivite düzeyleri belirlenmiş; bunlara bağlı olarak emilen doz hızı, yıllık etkin doz, iç-dış tehlike indisleri ve ömür boyu kanser riski gibi radyolojik parametreler hesaplanmıştır.

3.1.1 Numune Bölgesi ve Haritalandırma

Sarımsaklı Taşı, Balıkesir'in Ayvalık ilçesine bağlı Badavut bölgesinden çıkarılan, yöreye özgü volkanik kökenli bir taş türüdür [59]. Bu çalışmada, Sarımsaklı Taşı ve çıkarıldığı bölgeye ait toprağın radyoaktivite seviyelerini belirlemek amacıyla, un inceliğinde toz haline getirilmiş taş örnekleri ile birlikte toplam 12 adet toprak numunesi bölgeden temin edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi amacıyla, farklı bir coğrafi konumda yer alan Ahlat bölgesinden alınan ve yine toz haline getirilen Ahlat taş örnekleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Tüm numunelerin alındığı noktalar GPS ile konumlandırılmış olup, bu noktaların enlem-boylam bilgileri harita üzerinde Şekil 3.1.'de, sayısal olarak ise Çizelge 3.1.'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Badavut bölgesi haritası ve numunelerin alındığı GPS koordinatları. Badavut bölgesi haritasında, sarı renkli noktalar toprak ve sarımsaklı taş numunelerinin alındığı GPS koordinatları göstermektedir.

Çizelge 3.1. Çalışma alanı koordinatları.

Numune Adı	Enlem	Boylam
T1	39°16'28.362" N	26°37'48.537" N
T2	39°16'31.547" N	26°37'6.7391" N
T3	39°16'43.770" N	26°37'3.887" N
T4	39°16'48.452" N	26°36'41.313" N
T5	39°16'40.716" N	26°36'40.758" N
T6	39°16'23.700" N	26°36'42.509" N
T7	39°16'23.979" N	26°36'49.080" N
T8	39°16'27.968" N	26°37'14.940" N
T9	39°16'24.065" N	26°37'43.362" N
T10	39°16'2.8495" N	26°38'42.059" N
T11	39°16'3.5803" N	26°39'5.698" N
T12	39°16'4.3362" N	26°39'23.621" N

3.1.2 Toprak Numunelerin Hazırlama

Badavut bölgesinden temin edilen toprak örnekleri ve taş tozları, kilitli poşetlerde numaralandırılarak laboratuvar ortamına taşınmıştır. Ölçüm öncesi hazırlık kapsamında, numuneler önce 80°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek nemden arındırılmıştır. Ardından, 100 mesh (150 µm) boyutlu eleklerden geçirilerek homojen hale getirilmiş ve her biri 1 kg'lık Marinelli kaplara alınarak etiketlenmiştir. Hazırlanan numunelerin görseli Şekil 3.2.'de verildiği gibidir. Numunelerin seküler dengeye ulaşması amacıyla 40 gün süreyle bekletilmesinin ardından gama spektrometri ölçümlerine geçilmiştir. Toprak numuneleri için uygulanan hazırlık süreci, Sarımsaklı ve Ahlat taşı tozları için de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece toplam 14 numune, radyoizotop analizine uygun şekilde hazırlanmıştır. Ölçümler, Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji

Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarı'nda yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Badavut bölgesinden temin edilen toprak numunelerinin görseli. (a) Sayıma hazır durumdaki numuneler (b) Marinelli kaplarına konulmuş toprak numuneleri.

3.1.3 Gama Spektroskopik Analiz

Bu çalışmada, taş ve toprak örneklerinin gama spektroskopik analizleri, ORTEC marka GEM50P4-83 model yüksek saflıkta (High Purity) koaksiyel tip HPGe dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dedektör, 1332.5 keV enerji pikinde 1.9 keV tam genişlikte yarım maksimum (FWHM) enerji çözünürlüğüne ve %50 bağlı etkinliğe sahiptir [75]. Sistem, 40 keV ile 10 MeV arasındaki enerji aralığında ölçüm yapma kapasitesine sahiptir. Enerji ve etkinlik kalibrasyonları ise, 80-1400 keV aralığında karakteristik gama emisyonlarına sahip olan ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co izotoplarını içeren standart noktasal kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dedektör sistemi; ön yükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sinyalleri dijital forma dönüştüren ADC (Analog-to-Digital Converter) birimi ve çok kanallı analizör (MCA) bileşenlerinden oluşmaktadır. Örneklerin spektrumları, her biri 50.000 saniyelik gerçek zamanlı ölçümlerle elde edilmiştir. Spektrumların analizinde, ORTEC marka GammaVision yazılımı kullanılmıştır [75]. Bu çalışma kapsamında ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyoizotoplarının spektral çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin radyoaktivite değerleri aşağıdaki Denklem 3.1 ile belirlenmiştir.

$$A = \frac{N_s - N_B}{\epsilon P_Y t} \cdot \frac{1}{m} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de yer alan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır: A, birim kütle başına aktiviteyi ifade eder (Bq/kg), N_S, analiz edilen örneğe ait net pik alanı, N_B, aynı enerji seviyesindeki arka plan (background) net pik alanı, ε , ilgili gama enerjisine karşılık gelen dedektör verimi, P_γ , gama fotonunun ilgili enerji seviyesindeki yayımlanma olasılığı (dallanma oranı), t ölçüm süresini (saniye cinsinden) ve m ise ölçülen örneğin kütlesini (kg) temsil etmektedir. Radyoaktif çekirdeklerin aktivitelerini belirlemek amacıyla yapılan spektrum analizlerinde, aşağıdaki enerji değerleri kullanılmıştır: ²²⁶Ra için 351,9 keV , ²³²Th için 911,2 keV ve ⁴⁰K için 1460,8 keV kullanılmıştır. Dedektörün belirli bir enerji seviyesindeki minimum algılama değeri, aşağıda verilen denklem 3.2 ile hesaplanmıştır [76].

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N_B}}{\epsilon P_\gamma t} \quad (3.2)$$

3.1.4 Soğurulan Gama Doz Hızı (D)

²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K için sırasıyla 0,462, 0,604 ve 0,0417 olarak alınan spesifik aktivite dönüşüm katsayıları kullanılarak, yüzeyden 1 metre yükseklikteki gama ışınlarının soğurulan doz hızı (D) aşağıdaki 3.3’deki denklemle hesaplanır [77, 78].

$$D(n\text{ Gy h}^{-1}) = (0,462 A_{Ra}) + (0,604 A_{Th}) + (0,0417 A_K) \quad (3.3)$$

A_{Ra}, A_{Th} ve A_K sırasıyla; ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonlarını Bq kg⁻¹ biriminden ifade eder [48].

3.1.5 Radium Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq})

Radium eşdeğer aktivitesi, radyolojik risklerin değerlendirilmesinde sıkça başvurulmuş bir endekstir. Doğal radyonüklidlerin çevresel dağılımı homojen olmadığı için, bu düzensizliklerin yol açabileceği potansiyel radyolojik tehlikeleri değerlendirebilmek amacıyla bu kavram geliştirilmiştir. Radium eş değeri aktivitesi (R_{eq}) [25] Denklem 3.4’de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$R_{eq} (\text{Bq/kg}) = A_{Ra} + 1.43 A_{Th} + 0.077 A_K \quad (3.4)$$

Buradaki A_{Ra}, A_{Th} ve A_K sırasıyla radium, toryum ve potasyumun spesifik (birim kütledeki) aktivite düzeylerini temsil etmektedir. Radium eş değeri aktivitesi, 370 Bq kg⁻¹ ²²⁶Ra , Bq kg⁻¹ ²³²Th ve 4810 Bq kg⁻¹ ⁴⁰K izotoplarının eşit gama dozuna neden olduğu varsayımına dayalı olarak tanımlanmıştır. Bu hesaplama göre, radyolojik risklerin

kabul edilebilir sınırlar içinde tutulabilmesi için bu değerin 370 Bq/kg'ı aşmaması gerektiği belirtilmektedir [79].

3.1.6 Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE)

Bir bireyin bir yıl boyunca maruz kaldığı radyasyon miktarı, yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanarak belirlenir. Etkin doz eş değerinin havada soğurulan doza oranı 0,7 Sv/Gy olarak tanımlanmaktadır. İnsanların bu ışınlara ne kadar süre boyunca maruz kaldığı, yapılan hesaplamaların açısından büyük önem taşır. Kişilerin dış ortamda geçirdiği sürenin oranı, maruz kalma faktörüyle belirlenir ve bu oran %20 olarak ele alınmaktadır. Yıllık etkin doz eş değeri, Denklem 3.5'deki ifade kullanılarak hesaplanır [48]. Denklem 3.5'de D soğurulan gama doz hızını, h saat cinsinden zamanı temsil etmektedir. 0,2 dış mekan kullanım faktörü ve 0,7 ise Gy'den Sv 'ye dönüşüm faktörüdür.

$$AEDE_{dış} (\mu Sv y^{-1}) = D (nGy h^{-1}) \times 8760 (hy^{-1}) \times 0.2 \times 0.7 (Sv/Gy) \times 10^{-3} \quad (3.5)$$

3.1.7 Yaşam Boyu Kanser Riski (ELCR)

Yaşam boyu kanser riski, yani bireyin hayatı boyunca kansere yakalanma ihtimali, Denklem 3.6 ile hesaplanır [48].

$$ELCR = AEDE \times RF \times DL \quad (3.6)$$

Burada RF risk faktörünü temsil eder ve bu değer ICRP tarafından $0,05 Sv^{-1}$ olarak belirlenmiştir. DL, bireyin ortalama yaşam süresini temsil eder. Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre, bu süre kadınlar için 81,2 yıl, erkekler için ise 75,6 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, kadınlar ve erkekler için yaşam boyu kanser riski ayrı ayrı hesaplanmıştır [48]. Dünya genelinde bu riskin ortalama değeri ise $0,29 \times 10^{-3}$ olarak belirtilmektedir [2].

3.1.8 Dış Tehlike İndeksi (Hex)

Dış tehlike indeksi, yayılan gama radyasyonunun çevrede oluşturabileceği dış riskleri ölçmek için kullanılır. Denklem 3.7 ile hesaplanır [48, 79]. Denklem 3.7'de verilen A_{Ra} , A_{Th} ve A_K sırasıyla; ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını Bq/kg⁻¹ biriminden ifade eder [48].

$$Hex = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (3.7)$$

3.2 Taş Tozu Katkılı Beton Numunelerinin Hazırlanması ve Gama Zırhlama Özellikleri

Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında, Balıkesir Badavut bölgesinden elde edilen Sarımsaklı Taşı ile Bitlis Ahlat yöresine özgü Ahlat Taşı'nın gama radyasyonuna karşı zırhlama performansları deneysel olarak incelenmesi için beton numuneler hazırlanmıştır. Bu kapsamda, Türkiye'nin batı ve doğu uçlarından temin edilen volkanik kökenli bu taşlara ait tozlar kullanılarak hazırlanan beton numuneleri değerlendirilmiştir. Şekil 3.3.'de, taş numunelerinin alındığı bölgelerin Türkiye haritası üzerindeki konumsal dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İki farklı bölgeden alınan volkanik taş numunelerinin harita üzerindeki konumlarının gösterimi.

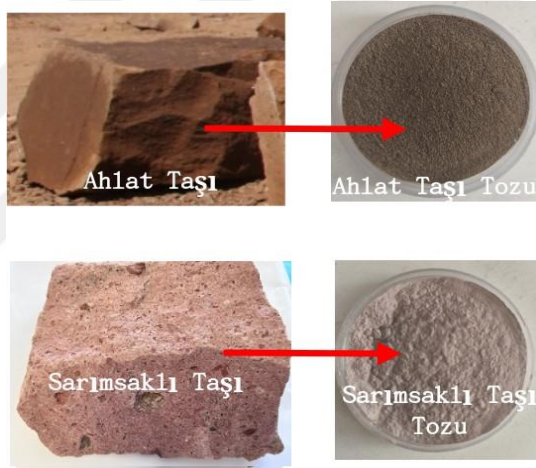
3.2.1 Özgül Ağırlık Hesaplaması

Harçta kullanılan malzemelerin yoğunluk hesaplaması, her bileşenin kütlesinin kapladığı hacmi, su ve katkı olarak eklenen taş tozlarının (Ahlat ve Sarımsaklı) kütleleri hassas teraziyle $\pm 0,5$ gram doğrulukla tartılmıştır. Ardından, her malzeme ayrı ayrı mezür benzeri hacim kaplarına alınarak hacimleri ölçülmüş ve yoğunlukları $\rho = m/v$ formülüyle hesaplanmıştır. Hesaplanan bu yoğunluk değerleri, nihai beton numunelerinin teorik yoğunluklarının belirlenmesinde ve katkı maddelerinin toplam karışıma etkisinin analiz edilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen veriler, özellikle katkı oranlarının artmasıyla oluşan porozite değişimlerinin değerlendirilmesinde temel parametre olarak dikkate alınmıştır.

3.2.2 Malzemelerin Hazırlanması

Şekil 3.1.'de gösterilen koordinat noktalarından toplanan Sarımsaklı taşı örnekleri, öncelikle çimento fabrikasına gönderilerek mikron boyutlarda inceliğinde öğütülmüştür. Burada, taş örnekleri öncelikle yıkanarak üzerlerindeki toprak ve yabancı

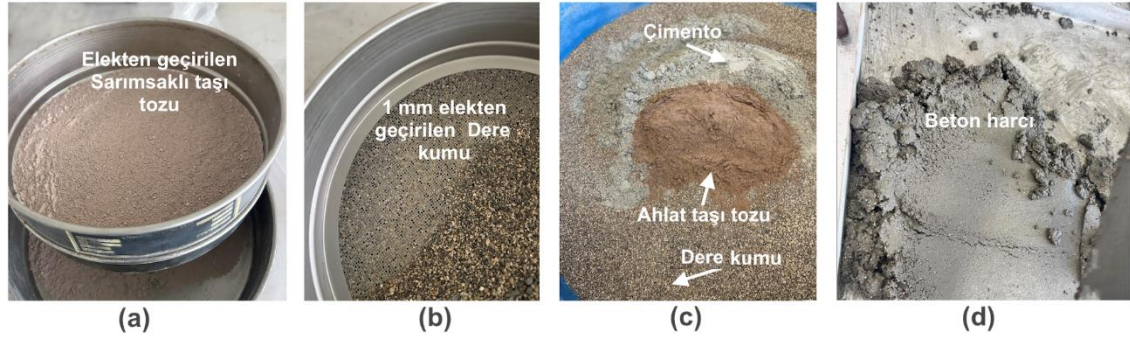
maddelerden arındırılmış; ardından yüksek basınçlı çekiç değirmeninde kırma işlemine tabi tutularak daha küçük parçalara ayrılmıştır. Elde edilen kırılmış malzeme, öğütücü makinelere aktarılmış ve uzun süreli öğütme sürecinin ardından mikron boyutlarında ince bir toz haline getirilmiştir. Tozun homojenliğini sağlamak amacıyla, laboratuvar ortamına getirilen taş tozları 0.63 μm boyuttaki elekten geçirilmiştir. Bu sayede beton karışımında kullanılacak malzemenin her bölümünün aynı özellikte olmasına dikkat edilmiştir. Aynı prosedür, Ahlat yöresine özgü Ahlat taşı için de eksiksiz olarak uygulanmıştır. Ahlat taşı örnekleri, toplandıktan sonra fabrikaya ulaştırılmış, yıkanma ve kırma işlemlerinden geçirilmiş, son olarak mikron ölçeğinde toz haline getirilmiştir. Çalışmada kullanılan Ahlat ve Sarımsaklı taşı tozlarının görüntüleri Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Böylece her iki taş türündeki malzeme, standart beton numunelerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere aynı koşullarda işlenmiştir.



Şekil 3.4. Ahlat ve Sarımsaklı taşları ile toz haline getirilmiş numunelerin görüntüsü.

Hazırlanan mikron boyutlu taş tozları, beton döküm çalışmalarında agregalarla karıştırılarak dayanıklılığı ve mekanik mukavemeti optimize etmek amacıyla deneysel karışım oranlarında teste tabi tutulmuştur. Öncelikle 1 mm'lik elekten geçirilip etüvde kurutularak nemden arındırılmış $860 \pm 0,5$ gr standart dere kumu; ardından $450 \pm 0,5$ gr çimento ve $250 \pm 0,5$ gr su ile karıştırılarak referans beton numunesi hazırlanmıştır. Şekil 3.5.'de, taş tozu katkılı beton numunelerinin hazırlanma sürecine ait görsellere yer verilmiştir. Görselde, Sarımsaklı taşı tozunun 0.63 μm 'lik elekten geçirilmesiyle elde edilen ince tozların hazırlanışı (a), standart dere kumunun 1 mm'lik elekten geçirilerek elenmesi (b), Ahlat taşı tozu ve dere kumunun belirli oranlarda çimento ile karıştırılması (c) ve son olarak karışıma suyun kademeli olarak ilave edilerek kıvamın ayarlanması ve kalıplara döküme hazır hale getirilmesi süreci (d) adım adım gösterilmiştir. Bu süreçte

tüm malzemeler homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Beton numunelerin hazırlanması sürecinde, su yavaş yavaş ilave edilerek karışımın kıvamı dikkatle kontrol edilmiş; böylece yalnızca işlenebilirliği sağlayacak miktarda su kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Taş tozu katkıli beton numunelerin hazırlanması. (a) Sarımsaklı taşı tozunun 0.63 µm'lik elekten geçirilerek tozların hazırlanması. (b) Dere kumunun 1 mm'lik elekten geçirilip hazırlanması. (c) Hazırlanan dere kumu, Ahlat taşı tozunun çimento ile karıştırılması. (d) Karışımın su ile kıvamı tutana kadar karıştırılması ve kalıplara dökme hazır hale getirilmesi.

Bu sayede, su/çimento (w/c) oranı 0.40-0.60 aralığında tutulmuş ve karışımda herhangi bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmamıştır [80]. Hazırlanan tüm karışımlar, parlak ve yağlımsı kıvam elde edilene kadar homojen biçimde karıştırılmış ve kalıplara dökülmüştür. Katkıli beton numuneleri için, çimento miktarı kademeli olarak %5, %10, %15 ve %20 oranlarında azaltılmış; eksilen kısım, 0.63 µm elek açıklığından geçirilmiş Sarımsaklı ve Ahlat taşı tozlarıyla ilavesi yapılmıştır. Her katkı oranı için üçlü setler halinde beton numuneleri hazırlanarak toplamda Çizelge 3.2.'de verildiği gibi 27 beton numune üretilmiştir.

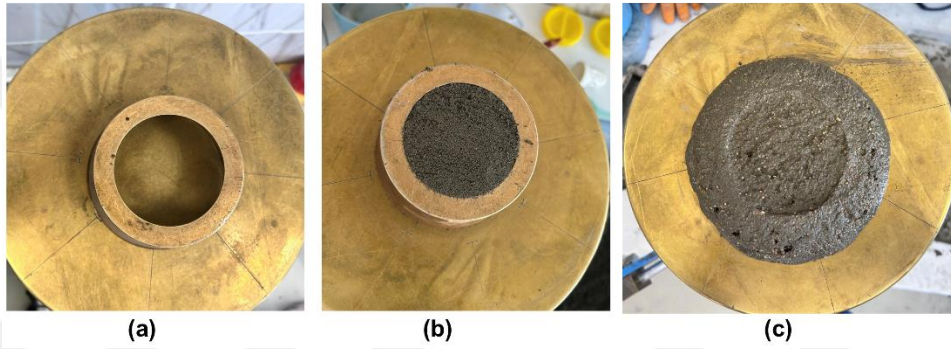
3.2.3 Yayılma Çapı Deneyi

Harcın işlenebilirliğini değerlendirmek amacıyla, TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yayılma çapı deneyi gerçekleştirilmiştir [81]. Şekil 3.6.'da yayılma çapı deneyine ilişkin görseller sunulmuştur. Deney öncesinde Şekil 3.6.(a)'da görülen yuvarlak kalıbın iç yüzeyi ile alt ve üst yüzeyleri, harcın yapışmasını önlemek amacıyla yağlanmış ve düz bir zemin üzerine yerleştirilmiştir. Kalıp, öncelikle yarıya kadar harçla doldurulmuş ve tokmakla 20 kez sıkıştırılmış; ardından kalan kısmı da doldurularak aynı işlem tekrar edilmiştir. Harç düzgün bir şekilde sıkıştırıldıktan sonra üst yüzeydeki fazla malzeme alınarak temizlenmiş ve deney yüzeyi hazırlanmıştır (Şekil 3.6.(b)). Kalıp dikkatlice çıkarıldıktan sonra harç kütlesi tabla merkezinde bırakılmış, yayılma tablası

üçer saniyelik aralıklarla 15 kez yukarı-aşağı hareket ettirilerek harcın yatayda yayılması sağlanmıştır (Şekil 3.6.(c)). Deney sonucunda oluşan harç diskinin çapı ve yüksekliği ölçülerek ortalama yayılma çapı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.2. Beton numunelerin karışım oranları

Numune Adı	Kum (gr)	Çimento (gr)	AT (gr)	ST (gr)	Su (gr)
Referans	860	450	-	-	250
ST1	860	427,5	-	22,5	250
ST2	860	405	-	45	250
ST3	860	382,5	-	67,5	250
ST4	860	360	-	90	250
AT1	860	427,5	22,5	-	250
AT2	860	405	45	-	250
AT3	860	382,5	67,5	-	250
AT4	860	360	90	-	250

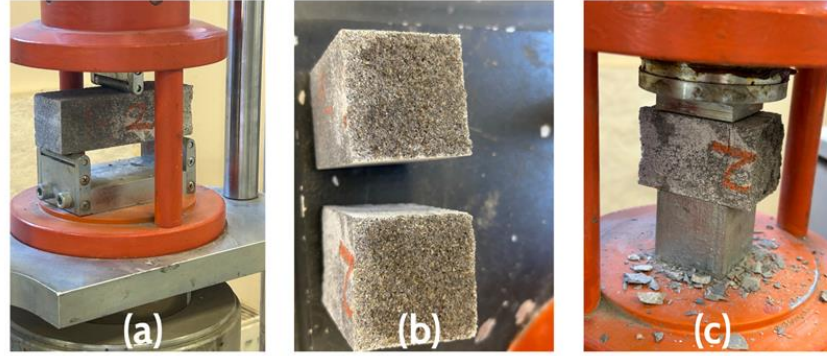


Şekil 3.6. Yayılma çapı deneyinin aşamalarının görseli. (a) Yağlanmış kalıbın yerleştirilmesi, (b) Harçla doldurulup yüzeyin düzeltilmesi, (c) Tablanın hareketiyle harcın yayılması ve yayılma çapı ile yükseklik ölçümü

Beton numunelerin basınç dayanım testleri, malzemenin yük taşıma kapasitesini ve mekanik dayanıklılığını belirlemek amacıyla yapılan en temel mekanik deneylerden biridir. Bu testlerde standart boyutlarda hazırlanmış küp beton numuneler, kontrollü bir şekilde artan basınç yüküne maruz bırakılır. Yükleme, numunenin kırılmasına veya belirgin bir deformasyon oluşmasına kadar devam eder ve bu sırada elde edilen maksimum yük değeri, numunenin kesit alanına bölünerek basınç dayanımı hesaplanır. Testler, ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda, belirli kür sürelerini tamamlamış (28 gün suda bekletilen) numuneler üzerinde, Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi İnşaat laboratuvarındaki Şekil 3.7’de görseli verilen hassas yükleme cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, betonun kalitesi, tasarım uygunluğu ve servis ömrü hakkında güvenilir veriler elde edilmesinde kullanılır.

Hazırlanan 4x4x16 cm³ boyutlarındaki üçerli beton numuneler 28 gün kür yaşını tamamladıktan ve laboratuvar sıcaklığına geldikten sonra eğilmede çekme deneyi

yapılmıştır. Numuneler cihaza aynı hassasiyetle yerleştirilip deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği ve uygulama adımları Şekil 3.7.(a)'da verilmiştir. Eğilme deneyi sonrasında iki parçaya ayrılan blokların sağlam kalan kısımları, basınç dayanımı deneyinde kullanılmak üzere ayrılmıştır (Şekil 3.7. (b).).



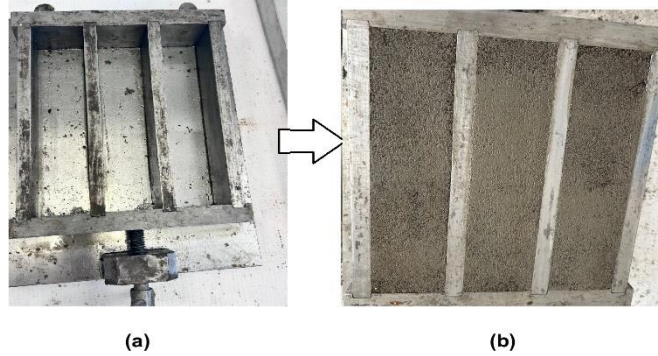
Şekil 3.7. Beton numunelerin basınç dayanım testleri için kullanılan cihaz. (a) Eğilmede çekme dayanımı deney düzeneği, (b) eğilme deneyinden sonra kırılan blokların basınç dayanımı deneyinde kullanılmak üzere hazırlanması, (c) Basınç dayanımı deney düzeneği.

İki parçaya ayrılan numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Numuneler cihazın çeneleri arasına uygun şekil ve hassasiyetle yerleştirildikten sonra deney yapılmıştır. Her numune için elde edilen basınç dayanım değeri kaydedilmiştir. Basınç dayanımı deney düzeneği Şekil 3.7. (c)'de gösterildiği gibidir.

3.2.4 Kalıplanma İşlemi

Elde edilen homojen ve uygun kıvamdaki beton harcı, her biri 4x4x16 cm³ boyutlarında olan üçlü set halindeki yağlanmış kalıplara dökülmüştür (Şekil 3.8.). İlk olarak, kalıpların yarısı harçla doldurulmuş ve içeride hava boşluğu kalmaması için 25 kez tokmakla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra kalan kısım eklenerek kalıplar tamamen doldurulmuş, aynı sıkıştırma işlemi tekrar edilmiştir. Tamamen doldurulan kalıplar, vurma tablası üzerine yerleştirilir, cihaz kilitlenerek tabla 12 defa yukarıdan serbest bırakılarak betonun düzgün yerleşmesi ve hava boşluklarının giderilmesi sağlanmıştır. Kalıpların yüzeyinde kalan fazla harç, düzgün bir yüzey elde edilecek şekilde sıyrılarak temizlenmiş (Şekil 3.8.(b)); ardından üst yüzey, harçla doğrudan temas etmeyecek biçimde nemli bir bezle örtülerek priz sürecinin tamamlanması için 24 saat beklemeye bırakılmıştır. Priz burada çimentolu karışımın katılaşmaya sertleşmeye başlama süreci olarak ifade edilir. İlk priz sürecinin ardından kalıplar hafif darbelerle dikkatlice açılmış, numuneler hasar görmeden çıkarılmış ve her birine tanımlama

amacıyla yağlı pastel boya ile etiketleme yapılmıştır. Elde edilen üçlü beton numune setleri, en az 5 cm suyun altında kalacak şekilde su tankına yerleştirilmiş ve 28 gün süreyle kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.9.).



Şekil 3.8. Beton harcının döküldüğü üçlü kalıp seti. (a) Beton numunelerin kuruduktan sonra kalıplardan kolay çıkartılabilmesi için yağlanmış hali. (b) Vurma tablası uygulamasının ardından, kalıpların üst kısmında kalan fazla harcın sıyrılarak temizlenmesiyle elde edilen düzgün yüzey görünümü.

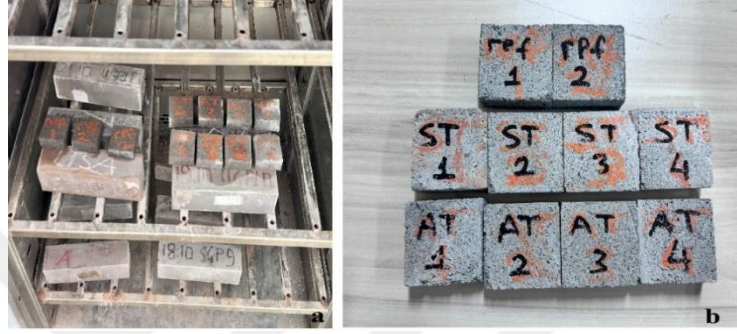


Şekil 3.9. Farklı oranlarda Sarımsaklı ve Ahlat Taş tozlarını içeren üçlü setler halindeki beton numunelerin kürleme süreci için su tankı içerisine bırakılmış halinin resmi

Kür sürecinin tamamlanmasının ardından, Şekil 3.10'deki cihaz ile sudan çıkarıldıktan sonra 2 cm kalınlıkta kesilmiş. Şekil 3.11(a) etüvde 24 saat numuneler kurutulmuştur. Şekil 3.11(b)'deki gösterilen numuneler zırhlama performanslarının deneysel olarak ölçülmesi amacıyla hazırlanmıştır. Ancak, proje kapsamında ölçüm için teslim edilen bu numunelerin NaI(Tl) dedektörü ile planlanan testleri, Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin yoğunluğu nedeniyle gerçekleştirilememiştir. Daha sonra bu numunelerden elde edilen kesitlerin teorik olarak radyasyon zırhlama parametreleri olan MAC (kütle zayıflatma katsayısı), LAC (doğrusal zayıflatma katsayısı), HVL (yarı değer tabakası), TVL (on değer tabakası) ve MFP (ortalama serbest yol) gibi parametreleri hesaplanarak, taş tozu katkı oranlarına bağlı zırhlama performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.10. 1,5 cm kalınlıklarda kesilmesi için kullanılan kesici cihaz



Şekil 3.11. Deneysel ölçüm için hazırlanan beton numunelerin görseli. (a) Sudun çıkartılan numunelerin 1,5 cm kalınlıklarda kesilerek etüvde 24 saatlik kurutulması. (b) Deneysel ölçüm için hazırlanan beton numuneler.

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

Taş numunelerinin elementel bileşimleri, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) bünyesinde bulunan dalga boyu dağılımlı X-ışını floresan (WD-XRF) spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Analizlerde, Panalytical markalı Axios Advanced model cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz, Bor (B) ile Uranyum (U) arasında yer alan elementleri sub-ppm seviyesinden %100 konsantrasyona kadar geniş bir aralıkta tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Mineral, metal, polimer gibi katı; su, yağ ve petrol türevleri gibi sıvı; ince film ya da preslenmiş toz gibi çeşitli formdaki numuneler, standart referans setine ihtiyaç duyulmaksızın yarı kantitatif olarak analiz edilebilmektedir. Kil, seramik ve çimento grubu malzemelerde ise analizler, WROXI standart seti kullanılarak kantitatif olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, cihazın tamamen çalışır durumda olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Kızdırma Kaybı(LOI), numunenin yüksek sıcaklıkta (genellikle 950-1050 °C) ısıtılması sırasında meydana gelen kütle kaybını ifade eder. Bu kayıp; nem, yapısal su, karbonatların bozunması sonucu açığa çıkan CO₂ ve organik maddelerin yanması gibi uçucu bileşenlerden kaynaklanmaktadır. XRF analizinde doğrudan tespit edilemeyen hafif elementlerin etkisini telafi etmek amacıyla LOI değeri ölçülmüştür. Analiz sonuçları Çizelge 4.1.'de yüzde değerleri olarak verilmiştir. Yapılan XRF analizlerinin sonuçları, bileşiklerin yüzde cinsinden kütle oranları olarak Çizelge 4.1.'de sunulmuştur. Ahlat taşı için LOI değeri %3,04 ve Sarımsaklı taşı için ise %2,99 olarak ölçülmüştür. Ahlat ve Sarımsaklı taşları kimyasal bileşim açısından bazı temel farklılıklar göstermektedir. Sarımsaklı taşı, daha yüksek SiO₂ içeriğine sahipken, Ahlat taşı Al₂O₃, Fe₂O₃ ve Na₂O bakımından daha zengindir. Bu farklılıklar, her iki taşın mineralojik bileşiminin ve oluşum koşullarının farklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, LOI değerlerinin birbirine yakın olması, her iki örnekte uçucu bileşenlerin benzer düzeyde olduğunu göstermektedir.

Beton numunelerinin hazırlanması sürecinde uygulanan yayılma çapı deneyi sonucunda elde edilen ortalama 11,5 cm'lik değer, karışımın ne aşırı akışkan ne de fazla kuru olduğunu, dolayısıyla homojen ve işlenebilir bir kıvam sergilediğini göstermektedir. Literatürde önerilen yayılma çapı aralığı genellikle 12-18 cm olup bu aralık, iyi yerleşme kabiliyeti ve yeterli dayanım arasında denge sağlar [81, 82]. Bu bağlamda, elde edilen 11,5 cm'lik değer, az akışkan ama kompakt yapıda bir karışıma işaret etmektedir. Çalışmada herhangi bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmamış olması ve yalnızca gerekli miktarda su ilavesiyle kıvamın sağlanmış olması, bu sonucu desteklemektedir.

Çizelge 4.1. Ahlat ve Sarımsaklı taşlarının XRF ile belirlenen ana oksit ve iz element bileşimleri (%). (XRF analizi sonuçları).

Bileşik	Ahlat Taşı (%)	Sarımsaklı Taşı (%)
PbO	0.007	0.013
HfO ₂	0.001	0.000
ZnO	0.015	0.003
CuO	0.000	0.000
NiO	0.039	0.058
Fe ₂ O ₃	4.845	2.855
Mn ₃ O ₄	0.146	0.049
Cr ₂ O ₃	0.004	0.003
V ₂ O ₅	0.000	0.002
BaO	0.041	0.143
TiO ₂	0.641	0.391
CaO	1.382	1.410
K ₂ O	5.461	5.765
SO ₃	0.058	0.075
ZrO ₂	0.075	0.047
P ₂ O ₅	0.084	0.095
SrO	0.014	0.037
SiO ₂	62.563	66.694
Al ₂ O ₃	14.776	13.677
MgO	0.206	0.483
Na ₂ O	6.608	5.211

Hazırlanan beton numunelerinin her biri, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre: Ahlat ve Sarımsaklı taşlarının yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri, pozolanik reaksiyonla ek C-S-H jeli oluşumunu destekleyerek betonun dayanımını artırmaktadır. Dolayısıyla, kimyasal açıdan bu taş tozları betonda mineral katkı olarak kullanılmaya uygundur. 28 günlük kür sonrası sonuçların ortalamasına göre, referans betonun basınç dayanımı düşük kalmıştır (basınç 12,6 N/mm², eğilme 5,1 N/mm²). Ahlat taşı tozu ve Sarımsaklı taşı tozu katkılı beton serilerinde, referansa kıyasla basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin iyileşmeler görülmüştür. %20 Ahlat taşı tozu (AT4) katkıda eğilme 8,1 N/mm² ile zirve değerine ulaşmış, fakat basınç dayanımı 17,7 N/mm²’ye gerilemiştir. %10 Ahlat taşı tozu (AT2) katkıda ise basınç dayanımının 19,4 N/mm² ile en yüksek seviyeye ulaşmış, ancak eğilme 6,1 N/mm²’ye düşmüştür. Sarımsaklı taşı tozu katkılı beton serisine bakıldığında ise ortalama eğilme dayanımı 7,4-7,9 N/mm² arasında yakın değerler göstermiş, %10 Sarımsaklı taşı tozu (ST2) katkılı beton numunelerinde basınç 21,0 N/mm²’ye yükselerek en yüksek değere ulaşmıştır.

Genel olarak, her iki taş tozu da referans betona kıyasla belirgin dayanım artışı sağlamış; Sarımsaklı taşı (ST2) basınçta, Ahlat taşı (AT4) ise eğilmede daha etkili olmuştur. Genel olarak, her iki taş tozu da betonun mekanik performansını iyileştirmiş ve çimento ikamesi olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Çizelge 4.2. Eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneylerinin sonuçları

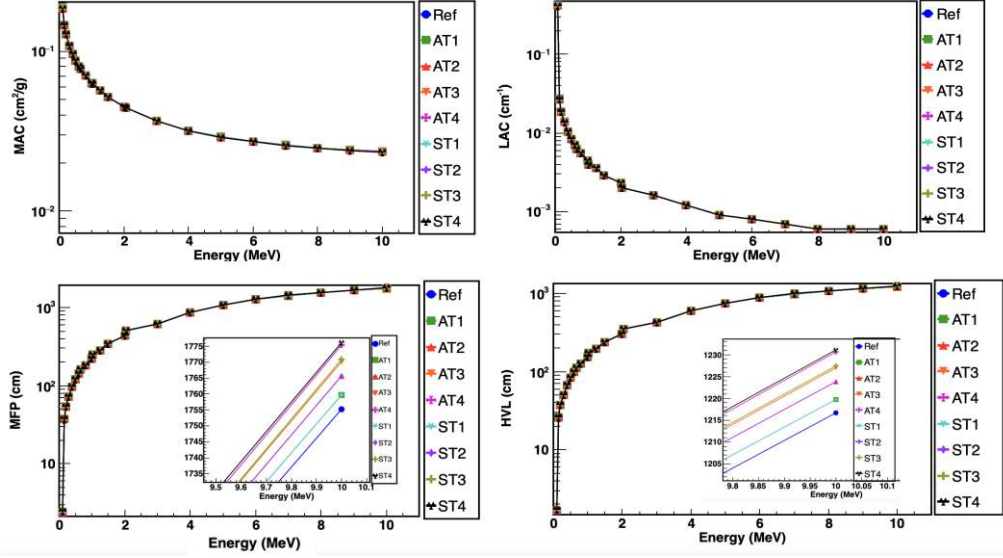
Materials		Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Kırılma Yüğü (N)	Materials		Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Kırılma Yüğü (N)
Referans	Blok1	5.50	2338	12.50	20017	ST1	Blok1	8.64	3687	20.56	32903
				14.30	22842					19.96	31933
	Blok2	4.70	2024	13.50	21614		Blok2	6.97	2973	19.28	30853
				13.38	21400					19.49	31179
	Blok3	5.10	2168	10.59	16939		Blok3	7.82	3337	19.28	30846
				11.30	18109					19.83	31723
AT1	Blok1	6.75	2882	18.53	29654	ST2	Blok1	8.61	3674	20.55	32873
				18.30	29350					21.31	34089
	Blok2	6.98	2980	19.28	30853		Blok2	7.57	3229	20.56	32896
				12.79	20463					21.27	34028
	Blok3	7.35	3134	18.75	30000		Blok3	7.24	3088	21.63	34609
				20.50	32799					20.67	33071
AT2	Blok1	6.36	2715	20.78	33245	ST3	Blok1	8.01	3419	17.42	27879
				20.12	32191					19.87	31797
	Blok2	5.81	2479	18.50	29595		Blok2	7.83	3340	20.95	33514
				19.05	30475					20.93	33484
	Blok3	6.00	2561	19.69	31496		Blok3	7.91	3376	19.33	30924
				18.29	29259					16.20	25917
AT3	Blok1	7.61	3245	18.96	30342	ST4	Blok1	7.05	3009	19.81	31690
				19.53	31254					18.97	30349
	Blok2	7.55	3222	19.63	31415		Blok2	7.54	3219	21.25	34002
				20.12	32188					21.17	33879
	Blok3	8.25	3520	18.05	28875		Blok3	7.73	3298	19.50	31192
				18.40	29440					20.90	33442
AT4	Blok1	6.79	2898	19.11	30568						
				19.03	30442						
	Blok2	9.55	4074	15.11	24181						
				17.34	27746						
	Blok3	7.98	3406	18.33	29321						
				17.27	27633						

Gama radyasyonuna karşı zırhlama kapasitesi, esasen betonun yoğunluğu ve homojenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum, özellikle bu tez kapsamında incelenen MAC, LAC, HVL, TVL ve MFP gibi gama radyasyonu zırhlama parametreleri açısından önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Teorik olarak elde edilen hesaplanmış Ahlat taşı tozu ve Sarımsaklı taşı tozu katkılı beton numunelerinin her birinin içeriklerinin oranları ve yoğunlukları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Beton içeriklerinin yüzde oranlarının ve yoğunluklarının teorik olarak elde edilen değerleri.

İçerik adı	Referans	AT1	AT2	AT3	AT4	ST1	ST2	ST3	ST4
PbO	0.00000	0.00012	0.00025	0.00037	0.00050	0.00023	0.00046	0.00069	0.00092
HfO₂	0.00000	0.00002	0.00004	0.00005	0.00007	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ZnO	0.00000	0.00027	0.00053	0.00080	0.00106	0.00005	0.00011	0.00016	0.00021
CuO	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NiO	0.00000	0.00069	0.00138	0.00207	0.00276	0.00103	0.00205	0.00308	0.00411
Fe₂O₃	2.90148	2.91569	2.92982	2.94400	2.95816	2.88041	2.85928	2.83818	2.81708
Mn₂O₄	0.03338	0.03596	0.03855	0.04113	0.04372	0.03424	0.03511	0.03598	0.03685
Cr₂O₃	0.00000	0.00007	0.00014	0.00021	0.00028	0.00005	0.00011	0.00016	0.00021
V₂O₅	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00004	0.00007	0.00011	0.00014
BaO	0.00000	0.00073	0.00145	0.00218	0.00290	0.00253	0.00506	0.00760	0.01013
TiO₂	0.26700	0.27836	0.28971	0.30106	0.31242	0.27393	0.28085	0.28777	0.29469
CaO	22.93728	21.87532	20.81272	19.75045	18.68810	21.87581	20.81369	19.75190	18.69004
K₂O	0.98919	1.06987	1.15048	1.23113	1.31177	1.07521	1.16116	1.24715	1.33313
SO₃	1.15880	1.10191	1.04498	0.98807	0.93115	1.10221	1.04558	0.98897	0.93236
ZrO₂	0.00000	0.00133	0.00266	0.00399	0.00531	0.00083	0.00166	0.00250	0.00333
P₂O₅	0.06675	0.06824	0.06973	0.07121	0.07270	0.06843	0.07011	0.07180	0.07348
SrO	0.00000	0.00025	0.00050	0.00074	0.00099	0.00066	0.00131	0.00197	0.00262
SiO₂	63.82604	64.59355	65.36029	66.12744	66.89451	64.66621	65.50556	66.34535	67.18505
Al₂O₃	5.71932	5.88208	6.04465	6.20732	6.36997	5.86250	6.00549	6.14859	6.29166
MgO	1.62620	1.58527	1.54431	1.50336	1.46241	1.59017	1.55411	1.51807	1.48202
Na₂O	0.47456	0.59128	0.70793	0.82461	0.94129	0.56648	0.65835	0.75025	0.84214
Yoğunluk	2.27925	2.27353	2.26787	2.26221	2.25659	2.25938	2.23990	2.22072	2.20187

NIST XCOM kullanarak elde edilen teorik olarak gama radyasyonu zırlama parametrelerinin sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. NIST XCOM verilerine göre elde edilen zırhlama parametrelerinin sonuçları.

0.1-10 MeV enerjideki değerlerin ortalaması alınarak aşağıda verilen MAC değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Referans}=0.066367826$$

$$ST_1=0.06632$$

$$AT_1=0.066319565$$

$$ST_2=0.066271739$$

$$AT_2=0.066270435$$

$$ST_3 = 0.066223913$$

$$AT_3=0.066218261$$

$$ST_4=0.066167826$$

$$AT_4=0.066164783$$

Bu sonuçlara göre birbirlerine benzer değerlerin elde edilmesinin yanında çok ufak farklılıkları bulunmaktadır. Enerjiden bağımsız ortalama MAC değerleri dikkate alındığında sıralama Referans > AT₁=ST₁ > ST₂=AT₂ > ST₃=AT₃ > ST₄=AT₄ şeklinde elde edilmiş olup bu sonuç grafiklerle de uyumludur. MFP ve HVL değerleri büyüdükçe fotonların malzeme içinde kat ettiği mesafe artar ve bu da zayıflatma katsayısının düşük, dolayısıyla koruma etkinliğinin az olduğu anlamına gelir. Bu nedenle en yüksek değerleri veren ST4 ve AT4 en az korumayı, en düşük değerlere sahip referans beton ise en iyi korumayı sağlamıştır. MFP ve HVL'nin aksine, MAC değerinin yüksek olması daha iyi zırhlama kapasitesine işaret etmektedir. Bununla birlikte, sonuçlar anlamlı değişimin 0.066 değerinden sonra başladığını ortaya koymakta olup, bu durum beton numunelerinin zırhlama parametrelerinin birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın bir diğer kısmında, Balıkesir ili Sarımsaklı bölgesinde bulunan Sarımsaklı taşı ile bölgenin çevresinden temin edilen toprak örneklerinin doğal radyoaktivite konsantrasyon seviyeleri araştırılmıştır. Ölçüm sonuçları ayrıntılı olarak

Çizelge 4.3.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Ahlat Taşı, Sarımsaklı taşı ve bölgenin toprak örneklerinden elde edilen radyoaktivite konsantrasyonları.

Örnek No	Radyoizotop konsantrasyonları (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra (352keV) (609keV)	²³² Th (911keV)	⁴⁰ K (1462keV)	¹³⁷ Cs (662keV)
1	121,64±2,98	292,28±7,31	2520,84±28,44	<MDA
2	63,84±1,78	183,04±4,70	2191,36±19,78	<MDA
3	33,44±1,36	67,59±3,10	2569,08±17,78	6,87±0,63
4	32,97±1,07	84,40±2,51	1602,03±12,81	<MDA
5	37,56±0,93	76,87±1,90	1278,06±9,32	<MDA
6	22,72±0,88	40,67±1,79	1905,06±12,51	<MDA
7	102,46±1,74	220,96±3,60	2107,02±14,73	2,22±0,66
8	26,38±0,97	53,72±2,12	2028,96±11,87	5,18±0,45
9	26,03±0,91	72,19±2,12	1657,86±10,16	1,60±0,31
10	36,67±1,16	154,48±3,10	1670,54±11,77	<MDA
11	25,84±0,97	95,67±2,28	1648,90±10,60	<MDA
12	23,29±1,00	51,62±2,38	1907,62±12,13	<MDA
AT	69,75±1,55	86,91±3,15	2304,86±15,90	<MDA
ST	99,02±2,32	225,88±4,87	2683,95±21,17	<MDA
Min.	22,72	40,67	1278,06	1,60
Mak.	121,64	292,28	2683,95	6,87
Ort.	51,54	121,88	2005,44	3,97
MDA	0,48	0,73	8,02	0,01
World mean (UNSCEAR 2000)	35	30	400	-

Çizelge 4.4. incelendiğinde, toplam 12 toprak ve sarımsaklı taşı ve farklı bir bölgeden çıkarılmış olan Ahlat taşı örneğinde ²²⁶Ra konsantrasyon seviyesi 22,7–121,6 Bq/kg arasında değişmiş ve ortalama 51,5 Bq kg⁻¹ bulunmuştur. ²³²Th konsantrasyon seviyesi için bu aralık 40,7–292,3 Bq/kg olup ortalaması 121,9 Bq/kg'dır; dolayısıyla Th-232, Ra-226'a göre daha geniş bir dağılım gösterdiği düşünülmektedir. Benzer şekilde ⁴⁰K konsantrasyon değerleri ise 1278–2684 Bq/ kg aralığında yoğunlaşmış, ortalama olarak 2005 Bq/kg ile en fazla elde edilen doğal radyoizotop olmuştur. UNSCEAR'ın dünya ortalaması ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K konsantrasyon değerleri sırasıyla 35 Bq/kg, 30 Bq/kg ve 400 Bq/kg olarak rapor edilmiştir (UNSCEAR 2000). Elde edilen sonuçlar dünya ortalama değerleri ile karşılaştırıldığı zaman; ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K konsantrasyon değerleri dünya ortalamasının üzerinde elde edildiği görülmektedir. ¹³⁷Cs konsantrasyon değerleri yalnızca dört örnekte belirlenebilir düzeyde saptanmış (1,6–6,9 Bq kg⁻¹); diğer örneklerde tespit sınırının altında kalmıştır. En yüksek ²²⁶Ra ve ²³²Th değerleri 1 no'lu

örnekte, en yüksek ^{40}K ise 14 no'lu örnekte görülmüştür; en düşük radyoaktivite konsantrasyon değeri genel olarak 6 no'lu örnekte yer almıştır.

Çalışma alanı, Mio-Pliyosen yaşlı pembe “Sarımsak taşı” ignimbiritleri ile kaplıdır. Bu kayalar potasyum açısından zengin feldispat ve mika içerdiğinden ^{40}K etkinliklerinin yüksek çıkması doğal bir sonuçtur. Monazit gibi toryumlu aksesuar mineraller de ^{232}Th seviyelerini yükseltir; nitekim 1, 7 ve 14 numaralı örneklerde hem ^{232}Th hem de ^{226}Ra değerlerinin yüksek olması bu minerallerin yoğunluğunu işaret eder. ^{226}Ra 'nın daha düzensiz dağılması ise radon gazının kayadan sızması ve ince kil-organik fazlara bağlanması gibi süreçlerle açıklanabilir. Sahil kumullarının ana kaya malzemesiyle karışması da özellikle ^{232}Th değerlerindeki değişkenliği artırmaktadır.

Genel olarak, Sarımsaklı yöresinde ^{40}K 'ın baskın olduğu güçlü bir doğal radyoaktivite arka planı saptanmıştır. ^{232}Th ve ^{226}Ra değerlerindeki farklılıklar ise kaya bileşimi ve yüzey süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan ^{137}Cs düzeylerinin çoğu örnekte tespit sınırının altında kalması, bölgenin insan kökenli serpintiyle anlamlı bir şekilde kirlenmediğini göstermektedir.

Çizelge 4.5. Toprak ve taş örneklerinin radyolojik risk değerleri

Örnek No	Radyolojik Risk Değerleri					ELCR ($\times 10^{-3}$)
	R_{eq}	D ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	AED ($\mu\text{Sv}/\text{y}$)	H_{in}	H_{ex}	
1	733.71	337.85	414.34	2.31	1.98	1.45
2	494.32	231.43	283.83	1.51	1.33	0.99
3	327.91	163.4	200.4	0.98	0.89	0.7
4	277.02	133.01	163.13	0.84	0.75	0.57
5	245.89	117.08	143.58	0.77	0.66	0.5
6	227.57	114.5	140.43	0.68	0.61	0.49
7	580.67	268.66	329.48	1.85	1.57	1.15
8	259.43	129.24	158.5	0.77	0.7	0.55
9	256.92	124.76	153.01	0.76	0.69	0.54
10	386.21	179.91	220.64	1.14	1.04	0.77
11	289.61	138.48	169.83	0.85	0.78	0.59
12	243.99	121.49	148.99	0.72	0.66	0.52
AT	371.51	180.83	221.77	1.19	1	0.78
ST	628.69	294.1	360.68	1.97	1.7	1.26
Min.	227.57	114.50	140.43	0.68	0.61	0.49
Mak.	733.71	337.85	414.34	2.31	1.98	1.45
Ort.	380.25	181.05	222.04	1.17	1.03	0.78
World mean (UNSCEAR 2000)	370	59	70	<1	<1	0.29

Çizelge 4.5.'de çalışma alanından elde edilen toprak/kum örnekleri üzerinde hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri, Sarımsaklı Plajı çevresinde doğal radyoaktivitenin küresel ortalamaların belirgin biçimde üzerinde seyrettiğini ortaya koymaktadır. Radium eşdeğer aktivitesi (R_{eq}) 227,6–733,7 Bq kg⁻¹ aralığında değişmiş ve ortalama 380,3 Bq kg⁻¹ olarak belirlenmiştir; bu değer, UNSCEAR (2000) raporunca bildirilen 370 Bq kg⁻¹ küresel ortalamayı bir miktar aşmakta ve kimi örneklerde iki katına varan yükselmelere işaret etmektedir. R_{eq} 'ye bağlı olarak türetilen soğurulmuş gama doz hızı (D) ortalama 181 nGy h⁻¹ olup dünya ortalamasının (≈ 59 nGy h⁻¹) yaklaşık üç katına ulaşmıştır. Elde edilen dış ortam yıllık etkin doz değerleri ortalaması 222.04 μ Sv y⁻¹ UNSCEAR (2000) tarafından önerilen küresel ortalama 70 μ Sv y⁻¹'in değerinin üzerindedir.

Dış (H_{ex}) ve dahili (H_{in}) tehlike indeksleri incelendiğinde, H_{ex} 0,61–1,98 ve H_{in} ise 0,68–2,31 aralığında olduğu görülmektedir. Ortalama değerler sırasıyla 1,03 ve 1,17 olup özellikle 1, 2, 7, 10, AT ve ST kodlu örneklerde birim eşik değerin aşıldığı dikkati çekmektedir. Bu durum, söz konusu örneklerin yapı malzemesi olarak kullanılmaları hâlinde ek koruyucu önlemler gerektirebileceğini göstermektedir. Yaşam boyu kanser riski (ELCR) 0,49–1,45 $\times 10^{-3}$ aralığında dağılıp ortalama 0,78 $\times 10^{-3}$ değerine ulaşmıştır; bu seviye, küresel ortalamanın yaklaşık üç katı olsa da doğal background değerlendirmesinde “düşük-orta” risk bandında değerlendirilmektedir.

Örnekler arasındaki yüksek değişkenlik, potasyum ve toryumca zengin ignimbirit (Sarımsak taşı) kayaçlarının mineralojisi ile bu kayaçları yer yer örten rüzgâr kökenli kumların karışmasından doğan litolojik-jeomorfolojik çeşitliliği yansıtmaktadır. Özellikle Ra-Th eş yükselmesine neden olan monazit ve benzeri aksesuar mineraller ile ⁴⁰K'ı baskın kılan potasyumlu feldispat/mika kristalleri, yüksek R_{eq} ve doz hızlarını açıklamaktadır. Radon kaçıışı ve ince kil-organik fraksiyonlara seçici adsorpsiyon süreçleri ise ²²⁶Ra dağılımını daha düzensiz hâle getirmekte, iç tehlike indekslerini yükseltmektedir.

Sonuç olarak, Sarımsaklı bölgesindeki doğal radyonüklid zenginleşmesi küresel ortalamalara göre belirgin bir artış ortaya koysa da yıllık etkin doz sınırlarının altında kalmaktadır. Bununla birlikte, H_{ex} ve H_{in} değerleri 1'in üzerinde olan örneklerde yapı malzemesi kullanımında hacimsel seyreltilme veya yüzey kaplama gibi mühendislik

önlemlerinin değerlendirilmesi; ayrıca radon kaynaklı iç maruziyetin izlenmesi amacıyla kapalı ortamlarda uzun süreli ölçümlerin yürütülmesi önerilmektedir. Bölgenin turistik ve tarımsal kullanım potansiyeli dikkate alındığında, detaylı gama-doz haritalaması ve jeokimyasal modellemelerle desteklenecek risk odaklı yönetim stratejileri geliştirmek çevresel ve halk sağlığı açısından önem arz etmektedir.



5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Ahlat ve Sarımsaklı taşlarının kimyasal bileşimleri karşılaştırıldığında, bazı dikkat çekici farklılıklar gözlemlenmiştir. Öncelikle, Sarımsaklı taşı %66.694 oranında SiO_2 içeriğine sahipken, Ahlat taşında bu oran %62.563'tür. Bu durum, Sarımsaklı taşının daha kuvarsça zengin ve silisli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Ahlat taşı Al_2O_3 (%14.776) ve Na_2O (%6.608) bakımından daha yüksek değerlere sahiptir; bu da feldspat minerallerinin Ahlat taşında daha baskın olabileceğine işaret etmektedir. Bu mineraller kayaçların sertlik, kimyasal dayanıklılık ve aşınma direncini etkileyerek, endüstriyel açıdan seramikte parlaklık ve camsılık sağlar Demir oksit (Fe_2O_3) açısından da Ahlat taşı (%4.845) Sarımsaklı taşına (%2.855) göre daha yüksek değerlere sahiptir. Bu farklılık, Ahlat taşının daha koyu renkli olması ya da oksidasyon potansiyelinin daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir. Her iki taşta da uçucu bileşen miktarını gösteren igrasyon kaybı (LOI) değerleri birbirine oldukça yakındır (Ahlat taşı: %3.04; Sarımsaklı taşı: %2.99), bu da uçucu içerik açısından benzer karakter gösterdiklerini ortaya koymaktadır. Son olarak, PbO , ZnO ve BaO gibi iz elementlerde düşük düzeyde olsa da bazı anlamlı farklar gözlenmiştir. Bu iz element farklılıkları, taşların oluştuğu jeolojik ortamlar, ana kayaç özellikleri ve olası hidrotermal süreçlerle ilişkili olabilir. Ahlat ve Sarımsaklı taş tozlarının yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içerikleri sayesinde puzolanik reaksiyonla betonun dayanımını artırdığı ve mineral katkı olarak kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür. Deneyler, her iki taş tozunun da referans betona göre basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin artış sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle Sarımsaklı taşı %10 katkıda (ST_2) basınç dayanımında en yüksek değeri verirken, Ahlat taşı %20 katkıda (AT_4) eğilme dayanımında öne çıkmıştır. Bu bulgular, taş tozlarının çimento ikamesi olarak kullanılabileceğini göstermekte olup, ilerleyen çalışmalarda farklı oranlar, uzun süreli dayanım ve dayanıklılık performanslarının da araştırılması önerilmektedir. Teorik olarak elde edilen gama radyasyonu zırhlama performansına göre, referans beton diğer beton numunelerine kıyasla daha iyi bir koruma sağlamıştır. Sonuçlar anlamlı değişimin 0.066 değerinden itibaren başladığını ortaya koymakta olup, bu durum beton numunelerinin zırhlama parametrelerinin birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Ayrıca hazırlanan beton numunelerin SEM analizleri ile NaI(Tl) dedektörü kullanılarak yapılacak deneysel ölçümlerin, ilerleyen çalışmalarda gerçekleştirilmesi planlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. Değerlier, *Adana ili ve çevresinin çevresel doğal radyoaktivitesinin saptanması ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması*, Yüksek lisans tezi, 2007.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*, New York: United Nations, 2000.
- [3] G. Özger, Ceyhan, Yumurtalık ve Pozantı bölgelerinin doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [4] National Committee on Radiation Protection and Measurements (NCRP), *NCRP Report*, National Council on Radiation Protection and Measurements, 1975.
- [5] S. Holm, A. Maroudas, J. P. G. Urban, G. Selstam, and A. Nachemson, “Omurlar arası disklerin beslenmesi: çözünen madde taşınması ve metabolizması,” *Bağ Dokusu Araştırması*, vol. 8, no. 2, pp. 101–119, 1981.
- [6] G. Yachiso, A. K. Chaubey, and B. Turi, “Measurements of natural radioactivity levels in soil samples and hazards in Lega Dembi gold mining, East Guji, Oromia, Ethiopia,” 2022.
- [7] S. Kaya, S. M. Karabıdak, and U. Çevik, “Gümüşhane ili çevresinde toplanan toprak ve karayosunu örneklerinde doğal (^{222}Ra , ^{232}Th ve K) ve yapay (^{137}Cs) radyoaktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi,” *GÜFBED/GUSTIJ*, vol. 5, no. 1, pp. 24–33, 2015.
- [8] R. A. Smith, K. S. Andrews, D. Brooks, S. A. Fedewa, D. Manassaram-Baptiste, D. Saslow, and R. C. Wender, “Cancer screening in the United States, 2019: A review of current American Cancer Society guidelines and current issues in cancer screening,” *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 69, no. 3, pp. 184–210, 2019.
- [9] H. Henderson, *Nuclear power: A reference handbook*, Bloomsbury Publishing, 2014.
- [10] Brown, *Radiation protection in the modern world*, Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [11] B. Jones and D. R. White, *Radiological protection: A systematic approach for the assessment of exposure risks*, IOP Publishing, 2017.

- [12] Wang, J. Smith, R. Anderson, S. Thompson, and C. Johnson, “Comparative analysis of gamma shielding properties of different materials for radiation protection,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 137, p. 103964, 2021.
- [13] Y. Al-Hadeethi and S. A. Tijani, “The use of lead-free transparent 50BaO-(50-x) borosilicate-xBi₂O₃ glass system as radiation shields in nuclear medicine,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 803, pp. 625–630, 2019.
- [14] L. Wani, J. Smith, R. Anderson, S. Thompson, and C. Johnson, “Toxicity of lead: A review with recent updates,” *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 8, no. 2, pp. 55–64, 2015.
- [15] R. Li, Y. Gu, G. Zhang, Z. Yang, M. Li, and Z. Zhang, “Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide,” *Composites Science and Technology*, vol. 143, pp. 67–74, 2017.
- [16] T. Şahmaran and N. Yavuzkanat, “Evaluation of gamma and neutron radiation shielding parameters of some glass materials by Monte Carlo and theoretical method,” *Radiation Effects and Defects in Solids*, vol. 179, no. 3–4, pp. 489–500, 2024.
- [17] İnşaat.net, “Sarımsaklı taşı hala çok etkileyici,” 2 Ocak 2025. [Çevrimiçi]. Available: <https://insaat.net/sarimsakli-tasi-hala-cok-etkileyici/>
- [18] N. Yavuzkanat, *The comparison of gamma-rays transmissions of shielding blocks with lead marbles and shielding blocks used in radiotherapy*, Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fizik Bölümü, Ankara, Türkiye, 2010.
- [19] TÜBİTAK Bilim Genç, “Fotoelektrik olay,” 10 Mayıs 2024. [Çevrimiçi]. Available: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/fotoelektrik-olay>
- [20] H. B. Saraç Kürem, *Radyoterapide kullanılan cerrobend bloklara alternatif olarak geliştirilen koruyucu blokların gama ışını geçirgenliklerinin deneysel sonuçlarıyla simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması*, Yüksek lisans tezi, Bitlis ren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [21] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [22] İ. Türk Çakır, “TAEK Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi,” 2020. [Çevrimiçi]. Available: https://indico.tarla.org.tr/event/28/contributions/116/attachments/812/313/ilkay_Tuerk_Cakir.pdf

- [23] N. Tsoulfanidis and S. Landsberger, *Measurement and detection of radiation*, CRC Press, 2015.
- [24] İ. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, Ş. Kılınçarslan, and C. Başyığıt, “Betonun foton zayıflama katsayıları farklı oranlarda barit içermektedir,” *Nükleer Enerji Yıllıkları*, vol. 37, no. 7, pp. 910–914, 2010.
- [25] L. Uluç, *Konya Beyşehir Gölü çevresinden alınan toprak örneklerinde radyoaktivitenin belirlenmesi*, 2024.
- [26] F. Gönültaş, *Bitlis’te yetişen bazı tıbbi ve aromatik bitkilerde radyoizotop aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [27] M. Kaplan, *Gate simülasyonunda dedektör modellemesi ve dedektör verimi*, Yüksek lisans tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
- [28] M. S. Budak, *Yeni nesil pozitron tomografi (PET) cihazlarında kullanılabilecek sintilasyon dedektörler sistemlerinin Geant4 tabanlı Gate simülasyon programında araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022.
- [29] N. Yavuzkanat, *Development of novel scintillation detection techniques for use in nuclear physics and medical applications*, Doktora tezi, The University of York, York, UK, 2016.
- [30] S. Akkoyun, *Uzayda gama ışını ölçümleri bir GEANT simülasyonu*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [31] N. C. Yılmaz, *Yozgat ili ve çevresinin yüzeysel toprak yapısındaki doğal radyoaktivitenin belirlenerek yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [32] N. W. S. Kam, T. C. Jessop, P. A. Wender, and H. Dai, “Nanotüp moleküler taşıyıcıları: karbon nanotüp-protein konjugatlarının memeli hücrelerine içselleştirilmesi,” *American Chemical Society Journal*, vol. 126, no. 22, pp. 6850–6851, 2004.
- [33] O. Üner and Y. Bayrak, “The effect of carbonization temperature, carbonization time and impregnation ratio on the properties of activated carbon produced from *Arundo donax*,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 268, pp. 225–234, 2018.
- [34] Ş. Kılınçarslan, C. Başyığıt, T. Molla, and S. Sancar, “Radyoaktif ışınlardan korunaklı ekolojik yapılar,” *Politeknik Dergisi*, vol. 14, no. 2, pp. 93–99, 2011.

- [35] G. Yülek, *Radyasyon fiziği ve radyasyonda korunma*, Yayın No. 14, SEK Yayınları, 1992.
- [36] J. Shapiro, *Practical aspects of the use of radionuclides (Part V)*, in *Radiation protection*, Cambridge, MA, 1972.
- [37] Y. Kavun, S. Kerli, H. Eskalen, and M. Kavgacı, “Characterization and nuclear shielding performance of Sm doped In_2O_3 thin films,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 194, p. 110014, 2022.
- [38] S. Tekerek, “Sprey piroliz yöntemiyle $\text{SnO}_2\text{:F}$ camların üretimi, optiksel karakterizasyonun belirlenmesi ve kütle soğurma katsayısının hesaplanması,” *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 4, no. 3, pp. 261–273, 2021.
- [39] N. K. I. Widianingsih, G. N. Sutapa, I. G. A. Kasmawan, I. N. Sandi, W. T. Baskoro, N. Wendri, and I. M. A. Prayuda, “Determination of half and tenth value layer primary and secondary walls of x-ray room in Bali Jimbaran General Hospital,” *Indonesian Physical Review*, vol. 6, no. 3, pp. 294–305, 2023.
- [40] A. Akkas, “Determination of the tenth and half value layer thickness of concretes with different densities,” *Acta Physica Polonica A*, vol. 129, no. 4, pp. 770–772, 2016.
- [41] Stone Care International Inc., “Stone history and fact guide,” 2002. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.naturalstone.com/stonefacts.html>
- [42] T. Onargan, H. Köse, and H. Deliormanlı, *Mermer*, Yayın No. 324, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2006.
- [43] D. S. Karahan, *Dünya’da ve Türkiye’de doğal taşlar*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı Raporu, Ankara, 2018.
- [44] C. Yalçın, *Doğal taşların inşaat endüstrisindeki kullanım alanları*, t.y.
- [45] Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), *Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri II çalışma grubu raporu*, Ankara, p. 14, 2001.
- [46] G. Aydın, İ. Karakurt, and K. Aydın, “Performance of abrasive waterjet in granite cutting: Influence of the textural properties,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 7, pp. 944–949, 2012.
- [47] G. Aydın, İ. Karakurt, and K. Aydın, “Prediction of cut depth of the granitic rocks machined by abrasive waterjet (AWJ),” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 1223–1235, 2013.

- [48] G. B. Cengiz and E. Öztanrıöver, “Analysis of natural radioactivity levels in soil samples and dose assessment for Digor district, Kars, Turkey,” *Caucasian Journal of Science*, vol. 5, no. 1, pp. 30–39, 2018.
- [49] D. Pereira and B. Marker, “The value of original natural stone in the context of architectural heritage,” *Geosciences*, vol. 6, no. 13, pp. 1–9, 2016.
- [50] Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, “Natural stones,” 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.enerji.gov.tr/en-US/Pages/Natural-Stones>
- [51] M. Akın, Eskipazar (Karabük) travertenlerinin bozunmasının araştırılması, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 2008.
- [52] İ. Karakurt, G. Aydın, and K. Aydın, “An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 7, no. 7, pp. 2923–2932, 2014.
- [53] D. Erkanol and A. Aydınoğlu, “Türkiye geneli doğal taş potansiyel alanlarının belirlenmesi projesi,” 2013. [Çevrimiçi].
- [54] M. İ. Ulu, Dünya doğal taş ticaretinde Türkiye’nin konumu, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2007.
- [55] M. C. B. Gadioli, V. M. Ponciano, B. D. H. Rocha Bessa, J. L. Camargo, and P. P. Pizeta, “Characterization of ornamental stones wastes for use in ceramic materials,” *Materials Science Forum*, vol. 958, pp. 129–134, 2019.
- [56] N. Taşlıgil and G. Şahin, “Yapı malzemesi olarak kullanılan Türkiye doğal taşlarının iktisadi coğrafya odağında analizi,” *Marmara Coğrafya Dergisi*, no. 33, pp. 607–640, 2016.
- [57] N. Kazancı and A. Gürbüz, “Jeolojik miras nitelikli Türkiye doğal taşları,” *Türkiye Jeoloji Bülteni*, vol. 57, no. 1, pp. 19–44, 2014.
- [58] L. Farrelly, Mimarlığın temelleri, N. Şık, Trans., İstanbul: Literatür Yayınları, Akademik Temeller Dizisi 01, 2011.
- [59] Vikipedi, “Sarımsak taşı,” 28 Temmuz 2024. [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sarımsak-taşı>
- [60] A. Biçer, “Ahlat Malazgirt yapı taşlarının ısı ve mekanik özellikleri,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 31, no. 2, pp. 301–307, 2019.

- [61] Gazete Ayvalık, “Ayvalık’ın tarihsel ve kültürel belleğinin ana kaynağı Badavut tarihi sarımsak taşı ocakları,” 22 Haziran 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.gazeteayvalik.com/2019/06/22/>
- [62] NTV, “Balıkesir’deki tarihi Sarımsak taşı ocaklarına turist ilgisi,” 11 Haziran 2019.[Çevrimiçi]. Available: <https://www.ntv.com.tr/galeri/seyahat/balikesirdeki>
- [63] M. Akın, T. Topal, İ. Dinçer, M. K. Akın, A. Özvan, and A. Orhan, “İgnimbiritlerde pomza şekli ile fiziksel mekanik özellikler arasındaki ilişkilerin incelenmesi,” *Geosound (Yerbilimleri) Dergisi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 2022.
- [64] B. Akın, “Ayvalık evlerinin cephe karakterinin oluşumuna etki eden faktörlerin değerlendirilmesi,” *Sanat Tarihi Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 121–138, 2015.
- [65] NTV, “Balıkesir’deki tarihi Sarımsak taşı ocaklarına turist ilgisi,” 11 Haziran 2019.[Çevrimiçi]. Available: <https://www.ntv.com.tr/galeri/seyahat/balikesirdeki>
- [66] Ayvalık Miras, “Antik taş ocakları,” Haziran 2024. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ayvalikmiras.com/ayvalik-miras/antik-tas-ocaklari/>
- [67] Ahlattasi.com, “Ahlat taşı özelliği,” 21 Haziran 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ahlattasi.com/index.php/2022/06/21/ahlattasiozelligi/>
- [68] A. İ. Gevrek and N. Kazancı, “İgnimbirit: oluşumu ve özellikleri,” *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, no. 38, pp. 39–42, 1991.
- [69] Namık Kemal Üniversitesi Coğrafya Bölümü, “İgnimbirit,” Haziran 2024. [Çevrimiçi]. Available: <http://fened-c.web.nku.edu.tr/ignimbirit>
- [70] Ö. G. N. Işık, “Geleneksel yapılardaki taş malzemenin fiziksel kullanım alanları ve özelliklerinin belirlenmesi: Ahlat taşı ve Diyarbakır Karacadağ bazaltı karşılaştırma örneği,” t.y.
- [71] A. Boran, *Van Gölü çevresindeki tek kubbeli camilerin Türk sanatındaki yeri*, Yüksek lisans tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 1994.
- [72] Kültür Bakanlığı, *Yaşayan kültür: Ahlat yöresi halk mimarisi Taş ustaları*, Ankara: Kültür Bakanlığı Yayınları, 2007.
- [73] O. Şimşek and M. Erdal, “Ahlat taşının (ignimbirit) bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, pp. 71–78, 2004.
- [74] Türk Standartları Enstitüsü, *TS 1910 Kaplama olarak kullanılan doğal taşlar*, Ankara: TSE, 1977.

- [75] F. Tarhan, *Mühendislik teknolojisi prensipleri*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi, Trabzon, 1996.
- [76] K. Güleç, *Mühendislikte jeoloji*, Sakarya Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Yayınları No. 4, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1980.
- [77] A. Tekin, “Ahlat Selçuklu Rönesansının yaşandığı kent,” *Selçuklu Bildiriler Kitabı*, p. 33, Antalya, 1998.
- [78] A. Büyüksaraç, E. Avşar, M. F. Kuluöztürk, and M. Günay, “Bitlis ignimbiritlerinin özellikleri ve çevresel etkileri,” *Materiales de Construcción*, vol. 70, no. 338, e214, 2020. doi: 10.3989/mc.2020.06419.
- [79] E. Karakaya and P. Sriwannawit, “Fotovoltaik sistemlerin benimsenmesinin önündeki engeller: Son teknoloji,” *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, vol. 49, pp. 60–66, 2015.
- [80] A. D. Bajoga, N. Alazemi, P. H. Regan, and D. A. Bradley, “Radioactive investigation of NORM samples from southern Kuwait soil using high-resolution gamma-ray spectroscopy,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 116, pp. 305–311, 2015.
- [81] G. B. Cengiz and E. Öztanrıöver, “Analysis of natural radioactivity levels in soil samples and dose assessment for Digor district, Kars, Turkey,” *Caucasian Journal of Science*, vol. 5, no. 1, pp. 30–39, 2018.
- [82] J. Beretka and P. J. Mathew, “Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products,” *Health Physics*, vol. 48, no. 1, pp. 87–95, 1985.
- [83] Wikipedia, “Su /çimento oranı,” 2024. [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Water%E2%80%93cement_ratio
- [84] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12350-5: Taze Beton Deneyleri Bölüm 5: Yayılma Deneyi, Ankara: TSE, 2012.
- [85] A. M. Neville, Beton Teknolojisi, Çev. Ed. T. Y. Erdoğan, İstanbul: Literatür Yayıncılık, 2011. (Orijinal eser 1995).