



**BOR KATKILI ÇİMENTONUN
NÖTRON VE GAMA IŞINLARINI
SOĞURMA KAPASİTESİNE ETKİSİ**

İhsan İŞ

**Yüksek Lisans Tezi
Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hayrettin EROĞLU**

2025

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BOR KATKILI ÇİMENTONUN NÖTRON VE GAMA IŞINLARINI SOĞURMA
KAPASİTESİNE ETKİSİ**

İhsan İŞ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hayrettin EROĞLU

Anabilim Dalı: Biyomedikal Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır.

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**BOR KATKILI ÇİMENTONUN NÖTRON VE GAMA IŞINLARINI SOĞURMA
KAPASİTESİNE ETKİSİ**

Doç. Dr. Hayrettin Eroğlu danışmanlığında, İhsan İŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 30/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak Oy birliği ile (3/3) kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ferhat BÜLBÜL	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Hayrettin Eroğlu	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Engin KOCADAĞISTAN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

30/ 04 / 2025

İhsan İŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOR KATKILI ÇİMENTONUN NÖTRON VE GAMA IŞINLARINI SOĞURMA KAPASİTESİNE ETKİSİ

İhsan İŞ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hayrettin Eroğlu

Bu çalışmada, Balıkesir–Bigadiç bölgesinden temin edilen tinkal ve üleksit cevherlerinin gama ve nötron radyasyonuna karşı soğurma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı oranlarda tinkal ve üleksit katkıları içeren çimento esaslı kompozit numuneler hazırlanmış ve geniş bir enerji aralığında gama ve nötron soğurma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak, numunelerin fiziksel ve mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla basınç testleri, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizleri uygulanmıştır. Gama soğurma ölçümleri 13,375 keV ile 385,851 keV enerji aralığında gerçekleştirilmiş olup, özellikle düşük ve orta enerji seviyelerinde mineral katkı oranlarının radyasyon geçirgenliği üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları, üleksit katkı numunelerin, tinkal katkı ve referans numunelere kıyasla daha yüksek gama zayıflatma performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Katkı oranının artışıyla birlikte üleksit içeren numunelerde soğurma katsayısının arttığı, tinkal katkı numunelerde ise bu artışın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Nötron soğurma deneyleri sonucunda hem tinkal hem de üleksit katkı oranlarının artmasıyla nötron soğurma kapasitesinin anlamlı biçimde yükseldiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Bigadiç bölgesine ait bu doğal bor minerallerinin çevre dostu, yerli ve alternatif radyasyon zırlama malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Çalışma, yerli kaynakların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi ve sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

2025, 67 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çimento, Üleksit, Tinkal, Bor, Radyasyon, Nötron ve gama soğurması.

ABSTRACT

MS. Thesis

EFFECT OF BORON ADDED CEMENT ON NEUTRON AND GAMMA RADIATION ABSORPTION CAPACITY

İhsan İŞ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biomedical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hayrettin Eroğlu

In this study, the absorption properties of tincal and ulexite ores obtained from the Balıkesir-Bigadiç region against gamma and neutron radiation were experimentally investigated. In this context, cement-based composite samples containing different ratios of tincal and ulexite additives were prepared, and gamma and neutron absorption experiments were carried out over a wide energy range. In addition to the experimental studies, pressure tests, Scanning Electron Microscopy (SEM), and X-ray Diffraction (XRD) analyses were applied to determine the physical and microstructural properties of the samples. Gamma absorption measurements were performed in the energy range of 13.375 keV to 385.851 keV, and it was determined that mineral dopant ratios had a significant effect on radiation transmittance, especially at low and medium energy levels. Experimental results showed that ulexite-doped samples exhibited higher gamma attenuation performance compared to tincal-doped and reference samples. It was observed that the absorption coefficient increased with increasing dopant ratio in ulexite-containing samples, while this increase remained limited in tincal-doped samples. Neutron absorption experiments revealed that increasing the doping rates of both tincal and ulexite significantly increased the neutron absorption capacity. These findings indicate that these natural boron minerals from the Bigadiç region can be evaluated as environmentally friendly, domestic, and alternative radiation shielding materials. This study makes a significant contribution to transforming domestic resources into value-added products and developing sustainable materials technologies.

2025, 67 page

Keywords: Cement, Ulexite, Tincal, Boron, Radiation, Neutron and Gamma Absorption

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca bilgi, birikim ve destekleriyle yanımda olan değerli hocalarıma, aileme ve hayatımın en özel insanına en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yetkinliğimi kaybettiğim anlarda fikirleriyle bana yol göstererek çalışmamın önünü açan, çalışma prensibini ve onurlu karakterini kendime rol model edindiğim, desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Hayrettin EROĞLU'na saygılarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin analiz aşamasında bana yol gösteren, akademik bilgi ve deneyimleriyle sürecime katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU, Prof. Dr. Ferhat BÜLBÜL, Prof. Dr. Ali GÜROL ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Engin KOCADAĞISTAN'a değerli destekleri için sonsuz teşekkür ederim. Katkıları, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynamıştır. Tez ölçümlerimin alınmasında yaptıkları katkılar için Arş. Gör. Sedanur KALECİK, Yüksek Lisans Öğrencileri Enisa YETİM ve Kürşat YAPAN'a teşekkür ederim.

Yaşantım süresince karşılaştığım tüm zorluklarda ve elde ettiğim tüm başarılarda yanımda olan sevgili aileme şükranlarımı sunar, içtenlikle teşekkür ederim.

Bu sürecin her anında yanımda olan, sabrıyla, anlayışıyla ve karşılıksız sevgisiyle bana güç veren sevgili nişanlım Arş. Gör. Zehranur KIZILDAĞ'a en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Varlığı, yalnızca bu çalışmanın değil, hayatımın da en büyük ilham kaynaklarından biri olmuştur.

İhsan İŞ
Nisan 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1.Radyasyon	2
1.2. Radyasyon Türleri	3
1.2.1. Alfa parçacıkları.....	4
1.2.2. Beta bozunması	4
1.2.3. Gama ışını	6
1.2.4. X ışınları.....	7
1.2.5. Nötronlar	9
1.3. Radyasyonun Günümüzdeki Yeri	9
1.3.1. Radyasyondan korunma yasaları.....	11
1.3.2. Radyasyondan korunmak için dikkat edilmesi gereken hususlar	12
1.4. Çimento	13
1.5. Bor	16
1.5.1. Boroksit (B_2O_3)	18
1.5.2. Tinkal ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)	20
1.5.3. Kolemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$)	20
1.5.4. Üleksit (sodyum kalsiyum borat) ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$).....	21
2. KAYNAK ÖZETLERİ	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM	27
3.1. Materyal	27
3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler.....	27
3.2. Yöntem.....	27
3.2.1. Betonların üretimi	27
3.2.2. Serbest basınç deneyi	28

3.2.3. Soğurma Deneyleri.....	29
3.2.4. X- ve γ -ışını soğurma ölçümleri.....	33
3.2.5. Nötron Ölçümleri	35
3.2.6. X-ray difraksiyon (XRD)	40
3.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	42
3.2.8. Isıl işlem	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	45
4.1. Üleksit Katkılı Çimentonun Gama Soğurma Deneyleri.....	45
4.2. Üleksit Katkılı Çimentonun Nötron Soğurma Deneyleri.....	47
4.3. Üleksit Katkılı Çimentonun Serbest Basınç Deneyi	48
4.4. SEM Analizi Bulguları (%5 Üleksit Katkılı Numune)	50
4.5. XRD Analizi Değerlendirmesi (%5 Üleksit Katkılı Numune)	51
4.6. Tinkal Katkılı Çimentonun Gama Soğurma Deneyleri.....	52
4.7. Tinkal Katkılı Çimentonun Nötron Soğurma Deneyleri.....	54
4.8. Tinkal katkılı çimentonun serbest basınç deneyi	55
4.9. SEM Analizi Bulguları (%5 Tinkal Katkılı Numune)	57
4.10. XRD Analizi Değerlendirmesi (%5 Tinkal Katkılı Numune).....	58
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR.....	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Dikalsiyum Silikat
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Trikalsiyum Alüminat
$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Trikalsiyum Silikat
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
A	Kesit Alanı
B_2O_3	Bor Oksit
dx	Kalınlık
I	Işın Şiddeti
NA	Avogadro Sayısı
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7. 10\text{H}_2\text{O}$	Tinkal
$\text{NaCaB}_5\text{O}_9. 8\text{H}_2\text{O}$	Üleksit
°	Derece
P	kırılma anında taşıdığı maksimum yük
Z	Atom Numarası
α	Alfa Işını
β	Beta Işını
μ	Lineer Soğurma Katsayısı
σ	Basınç dayanımı
τ	Fotoelektrik Soğurma Katsayısını
γ	Gama Işını

Kısaltmalar

BT	Bilgisayarlı Tomografi
CEM I	Portland Çimentosu
CEM II	Portland Kompoze Çimentosu
CEM III	Yüksek Fırın Cürufllu Çimento
CEM IV	Puzolanik Çimento
CEM V	Kompoze Çimento

CEN

Avrupa Standardizasyon Komitesi

MRG

Rezonans Görüntüleme

TSE

Türk standartlar Enstitüsü



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Radyasyon kaynakları.....	3
Şekil 1.2. Radyoaktif bozunmalarda gama ışınlarının yayımlanması.....	7
Şekil 1.3. Elektromanyetik spektrum (Kalecik, 2018).....	8
Şekil 1.4. Radyasyon kaynaklarının geçirgenlikleri	9
Şekil 3.1. Serbest basınç deneyi cihazı	29
Şekil 3.2. X- ve γ -ışını soğurma ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği.....	32
Şekil 3.3. Amersham AMC 2084 VEX kaynak	34
Şekil 3.4. Ölçümlerde kullanılan nötron kaynağı	38
Şekil 3.5. Nötron Dedektörü	39
Şekil 4.1. Üleksit katkılı çimentonun gama soğurma grafiği.....	46
Şekil 4.2. Karışım tipine göre basınç dayanımı (MPa).....	49
Şekil 4.3. Üleksit katkılı numunenin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri	50
Şekil 4.4. %5 Üleksit katkılı numunenin XRD analizi	51
Şekil 4.5. Tinkal gama soğurma deneyleri değerleri	54
Şekil 4.6. Karışım tipine göre basınç dayanımı (MPa).....	56
Şekil 4.7. Tinkal katkılı numunenin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüsü	57
Şekil 4.8. %5 Tinkal katkılı numunenin XRD analizi	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Beta bozunum değerleri (İrim, 2018).....	6
Tablo 1.2. Çimentonun ana bileşenleri.....	14
Tablo 1.3. Önemli bor mineralleri ve bulunduğu yerler.....	18
Tablo 1.4. Ülkemizde işletilen bor mineralleri.....	18
Tablo 4.1 Üleksit katkılı çimentonun kütle azaltma katsayıları (cm ² /g).....	45
Tablo 4.2. Üleksit nötron soğurma deneyleri değerleri.....	48
Tablo 4.3. Karışımların 7 günlük ortalama basınç dayanımları	49
Tablo 4.4. Çimento ve Tinkal katkılı numunelerin kütle azaltma katsayıları (cm ² /g). ..	53
Tablo 4.5 Tinkal nötron soğurma deneyi sonuçları.....	54
Tablo 4.6. Karışımların ortalama basınç dayanımları	55

1. GİRİŞ

Günlük yaşamda hem doğal kaynaklar hem de teknolojik ilerlemeler nedeniyle sürekli olarak radyasyona maruz kalınmaktadır. Bu durumdan korunmada, özellikle yaşam alanlarında tercih edilen inşaat malzemeleri büyük önem taşır. Malzemenin türü, kalınlığı ve yoğunluğu, radyasyonun soğurulmasında belirleyici faktörler arasında yer almaktadır (Yılmaz, 2011).

Radyasyon, atomların enerji yayılımı sonucu ortaya çıkan ve bu enerjinin elektromanyetik dalgalar ya da parçacıklar aracılığıyla boşlukta taşınması süreci olarak tanımlanabilir. Bu enerji türü hem parçacık formunda hem de elektromanyetik dalga şeklinde olabilir ve spektrumu uzun radyo dalgalarından başlayarak kozmik ışınlara kadar oldukça geniş bir aralıkta yer alır. Başlangıçta tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılan radyasyon, günümüzde kullanım alanlarını genişleterek farklı ortamlarda ve çeşitli sektörlerde yaygın biçimde değerlendirilmektedir (Sehhatigdiri, 2014).

1896 yılında Becquerel'in uranyum tuzları üzerinde gerçekleştirdiği ısıldama deneyleri sırasında radyoaktiviteyi keşfetmesiyle birlikte nükleer fizik alanı ortaya çıkmıştır. Yıllar içerisinde J.J. Thomson, elektronun atomun yapısal bir bileşeni olduğunu ortaya koymuştur. Thomson'un ortaya koyduğu atom modeli ile atomun, büyük pozitif yüklü bir kütle içerisinde bulunan negatif yüklü parçacıklardan oluştuğu kabul edilmiştir. Aynı dönemlerde alfa (α), beta (β) ve gama (γ) ışınları da keşfedilerek nükleer fiziğin gelişmesinde deneysel ve kuramsal çalışmalara temel oluşturulmuştur. Günümüzde nükleer fizik alanındaki deneysel veriler, kuarklar arası etkileşimlerin incelenmesi ve Büyük Patlama (Big Bang) sonrası evrenin ilk oluşum sürecinde ortaya çıkan kompleks yapıların anlaşılması açısından önemli katkılar sunmaktadır (Akcaalan, 2015).

Beton, temel olarak çimento, su, kum ile birlikte silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli mineral katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen çok bileşenli bir yapı malzemesidir. Beton üretiminde en yüksek maliyet kalemlerinden biri çimentodur ve yaygın olarak Portland çimentosu tercih edilmektedir. Günümüzde beton karışımlarında çoğunlukla mineral katkı maddeleri de yer almakta

1. GİRİŞ

olup, bu katkıları betonun hem taze hem de sertleşmiş halindeki performansını iyileştirme amacıyla kullanılmaktadır (Yılmaz, 2011).

Bor elementi doğada serbest halde bulunmamaktadır. Genellikle kristal veya amorf yapıları bileşikler içerisinde yer almaktadır. Yer kabuğunda toprak, kayalar ve su gibi ortamlarda ortalama 10 ppm seviyesinde bor mevcuttur. Doğal bor, kütle numaraları sırasıyla 10 (%19,8) ve 11 (%80,2) olan iki kararlı izotoptan oluşan bir karışım hâlinde bulunmaktadır. Yapılan bilimsel değerlendirmelere göre, canlıların evrimi sürecinde borun varlığı önemli bir rol oynamıştır. Bor, doğada 150'den fazla mineralin yapısında, genellikle bor oksit (B_2O_3) formunda farklı oranlarda bulunmaktadır. Ekonomik açıdan önemli olan bor mineralleri, kalsiyum, sodyum ve magnezyum gibi elementlerle oluşturduğu hidrat bileşikler şeklinde oluşur ve bu elementlere bağlı olarak sınıflandırılır. Endüstriyel değere sahip başlıca bor mineralleri arasında tinkal, kolemanit, üleksit, probertit, borasit, pandemit, szaybelit, hidroborasit ve kernit yer almaktadır. Bu mineraller, madenden çıkarıldıktan sonra genellikle yıkanarak ve öğütülerek kullanım için uygun hâle getirilmektedir (TMMOB, 2003).

Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı, bor katkıları çimento numunelerinin gama ve nötron ışınlarına karşı zırlama performanslarını değerlendirmek ve bor oranındaki değişimlerin bu performans üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Ayrıca katkının malzemenin yoğunluğu, mikroyapısı, dayanımı gibi fiziksel özelliklerine olan etkileri de incelenerek, çok yönlü bir değerlendirme yapılması hedeflenmiştir.

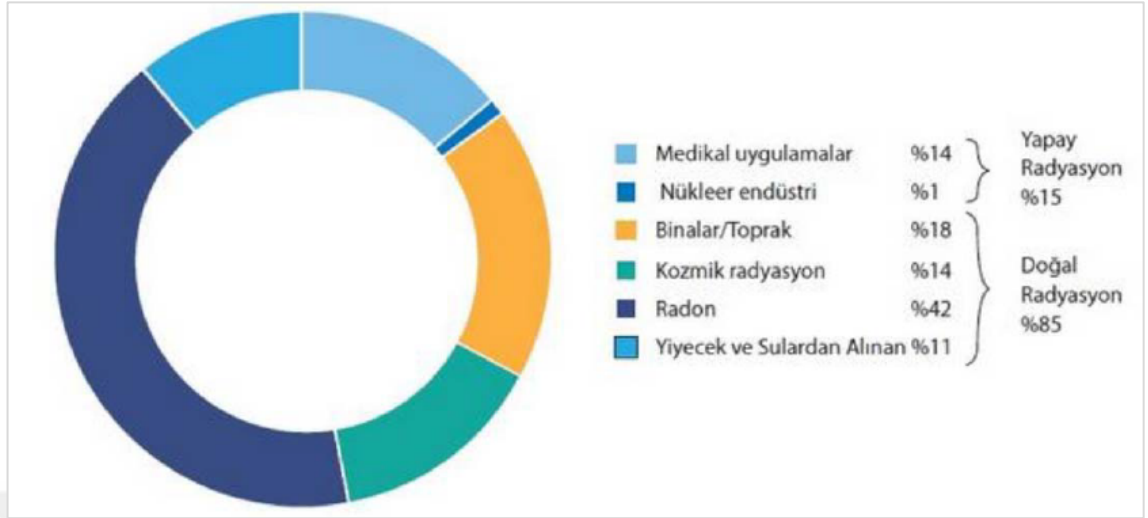
1.1.Radyasyon

Radyasyon, kaynağından doğru çizgiler boyunca ıraksayan parçacık veya dalga formundaki enerjidir ve her zaman tabiatta yer alan ve iç içe olduğumuz bir durumdur. İletişim araçlarını kullanmamızda fayda sağlayan dalgalar; sağlık alanında, sanayide, endüstri alanlarında kullanımı olan ısımlar, güneşten elde ettiğimiz ışınlar normal hayatımızda sürekli karşılaştığımız radyasyon türleridir (Berk, 2002; Eroğlu, 2009).

Radyasyon kaynakları genellikle doğal ve yapay kaynaklar olmak üzere iki ana grupta ayrılabilir. Şekil 1'de, çeşitli radyasyon kaynaklarının yüzdesel olarak değerleri

1. GİRİŞ

verilmiştir (Doğruluk vd., 2018).



Şekil 1.1. Radyasyon kaynakları

Doğal radyasyon kaynakları yüksek enerjili kozmik ışınları, yer kabuğundaki hava, su, toprak ve bitkilerde bulunan radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyonu içermektedir. Öte yandan, insanlar tarafından teknolojik yöntemlerle üretilen kaynaklardan yayınlanan radyasyon ise yapay radyasyondur. Yapay radyasyon, sağlık, tarım ve sanayi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan, nükleer alanda da önemli ölçüde yer alan radyasyon maddeleriyle temsil edilen temel yapay radyasyon ürünleridir (Doğruluk vd 2018).

1.2. Radyasyon Türleri

Radyasyonun en yaygın sınıflandırılma biçimi atomlardan elektron koparma durumuna göre yapılır. Buna göre radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Radyo dalgaları, mikrodalgalar ve kızıl ötesi ışık gibi elektromanyetik dalgaları kapsayan iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, madde ile etkileştiğinde doğrudan bir etkiye sahip değildir. Alfa ve beta parçacıklarının yanı sıra X- ve gama ışınları ile birlikte nötronları içeren iyonlaştırıcı radyasyon ise, madde ile etkileştiğinde maddenin iyonlaşmasına neden olmakta ve çevreye ve insan sağlığına zarar veren kaynağı oluşturmaktadır.

1. GİRİŞ

1.2.1. Alfa parçacıkları

Alfa parçacıkları iki kere iyonlaşmış helyum atomudur. Bu nedenle 2 proton ile 2 nötrondan oluşan helyum ${}^4_2\text{He}$ çekirdeğidir ve pozitif yüklüdür. α işaretiyle gösterilmektedir. Atom numarası büyük olan kararsız bir çekirdek kendiliğinden bir alfa parçacığı yayımlayabilir. Alfa parçacıkları çok ince malzemelerle (örneğin ince bir kâğıt tabaka ile) durdurmak mümkündür. Bu durumun nedeni, elektrona kıyasla çok büyük kütle ve büyük elektrik yüklerine sahip olmalarıdır. Bu, alfa parçacıklarının izledikleri yol boyunca çok fazla iyonlaşma oluşturmalarına ve bu sebepten ötürü de enerjilerini hızlı bir şekilde yitirmelerine sebep olmaktadır. Enerjilerini bu şekilde hızlıca bitiren alfa partiküllerinin aralıkları da oldukça azdır. Bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan alfa parçacıklarının insan sağlığına tehdit oluşturması için bu kaynakların solunum, mide ve açık yaralar aracılığıyla insan vücuduna girmeleri gerekir (Köklü ve Yılmaz, 2006; Ege Üni. Radyasyon Güvenliği, 2023).

Ağır bir atom çekirdeğinde nötron sayısının proton sayısına oranının birden fazla olması durumunda, elektrostatik itme kuvveti, güçlü nükleer kuvvetin etkisini aşmaya başlar. Bu durumda, çekirdeğin kararsız hâle gelmesine neden olur ve çekirdek, alfa parçacığı yayarak bozunma eğilimi gösterir. Alfa bozunumu sonucunda kararsız olan ana çekirdek A_ZX , iki proton ve iki nötron içeren bir alfa parçacığı yayarak bu bileşenleri kaybeder ve atom numarası iki ve kütle numarası ise dört birim azalmış bir ürün çekirdek ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ meydana gelir. Bu bozunma süreci, Eşitlik 1.1 ile gösterilmektedir.

$${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He} + Q \quad (1.1)$$

Burada Q radyoaktif bozunma neticesinde açığa çıkan enerjidir ve parçalanma enerjisi olarak tanımlanır. Bu enerji ürün çekirdek ve ürün parçacık olarak adlandırılan ${}^4_2\text{He}$ arasında kütleleri ile ters orantılı olarak paylaşılır (Akkaş, 2015).

1.2.2. Beta bozunması

Uyarılmış enerji seviyesinde bulunan bir çekirdek kararlı hale geçmek için beta ışıması yapabilir. Beta ışıması üç farklı şekilde olabilir. İlki elektronun anti parçacığı olan

1. GİRİŞ

ve pozitron olarak adlandırılan “ β^+ ” yayınlanmasıdır. Bu bozunmada çekirdekte bulunan bir proton kararlı hale gelmek için bir nötrona dönüşür ve çekirdekten dışarıya bir pozitron yayınlanır ve bozunma

$$p^1 \rightarrow n^0 + \beta^+ + \nu \quad (1.2)$$

şeklindedir. Burada p protonu, n nötronu ve ν nötrinoyu gösterir. Nötrino yüksüz ve kütsüz bir parçacıktır ancak enerji ve açısal momentuma sahiptir. İkinci tip beta bozunması ise β^- (elektron) bozunmasıdır. Bu bozunmada atom çekirdeğindeki bir nötron kendiliğinden bir proton ve elektrona dönüşür ve bozunma

$$n^0 \rightarrow p^1 + \beta^- + \bar{\nu} \quad (1.3)$$

şeklinde gerçekleşir. Burada $\bar{\nu}$ antinötrinodur. Her iki bozunmada parçalanma enerjisinin neredeyse tamamı pozitron ve elektron tarafından alınabilir bu parçacıklar tarafından alınan enerji minimum bir değerden son nokta enerjisi olarak adlandırılan bir maksimum enerji değerine kadar olan aralıkta yer alabilir. Bu Beta parçacıkları alfa partikülleri gibi belirli bir kütle ve yüke sahip olduklarından malzemelerden geçerken iyonlaşmaya neden olmaktadır. Oluşan bu iyonlaşma alfa parçacıklarına göre oldukça azdır. Beta parçacıklarını durdurmak için oldukça ince bir alüminyum malzemeden yapılmış bir zırh bile yeterlidir (Dellaloğlu, 2024).

Üçüncü tür beta bozunması ise elektron yakalaması (electron capture) olarak adlandırılır. Bu olayda kararsız bir atom çekirdeği, çekirdek etrafında yer alan atomik yörüngelerde bulunan bir elektronu yakalayarak kararlı hale geçer. Atom çekirdeğinde serbest elektron bulunamayacağı için bir proton ve bu elektron birleşerek bir nötron oluşturur ve bu bozunma

$$p^1 + e^- \rightarrow n^0 + \nu \quad (1.4)$$

ile verilir. Bu olayda çekirdeğin toplam pozitif yükü bir birim azalır ve böylece protonlar arasındaki elektrostatik itme kuvveti de düşüş gösterir. Bu olaydan sonra ürün çekirdeğin atomik yörüngelerinde ortaya çıkan elektron boşluğunu doldurmak için karakteristik X-

1. GİRİŞ

ışınları yayınlar (Akkaş, 2015). Tablo 1.1’de bazı çekirdeklerin beta bozunuma ait bilgiler verilmiştir.

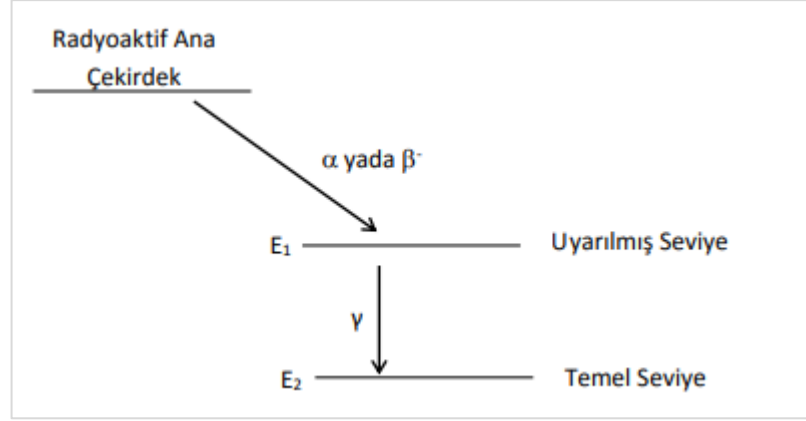
Tablo 1.1. Beta bozunum değerleri (İrim, 2018)

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (Mev)
${}^3_1\text{H}$	12,26 y	0.018
${}^{14}\text{C}$	5730 y	0.156
${}^{32}\text{P}$	14,28 d	1.710
${}^{33}\text{P}$	24,4 d	0.248

1.2.3. Gama ışını

Gama ışınları, kararsız bir atom çekirdeğinin enerji seviyeleri arasındaki geçişler sonucunda ortaya çıkan büyük enerjili elektromanyetik radyasyonlardır. Gama ışınlarının yayınlanması gama bozunması olarak adlandırılır. Gama bozunması için çekirdeğin uyarılmış bir enerji seviyesinde olması gereklidir. Bu durum genellikle alfa veya beta bozunmalarından sonra ürün çekirdeğin kararlı halde kalması ile mümkün olmaktadır. Gama ışınları, alfa ve beta ışınlarına kıyasla çok daha yüksek enerjiye ve daha fazla penetrasyon kabiliyetine sahiptir; bu nedenle γ sembolü ile temsil edilirler. Gama ve X ışınlarının maddeler içerisine penetrasyonları (girmeleri), alfa ve beta parçacıklarına göre çok daha derindir; bu tür ışınların soğurulması için genellikle yüksek yoğunluklu malzemeler, özellikle kurşun esaslı bariyerler kullanılmaktadır, ancak bu bile yalnızca ışınların bir kısmını durdurabilmektedir. Gama ışınları maddeden geçerken yoğunluk ve kalınlığa bağlı olarak üstel bir azalma eğilimi gösterir. Elektriksel yük taşımadıkları için elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmeyen doğrusal yollar izlerler (Köklü ve Yılmaz, 2006)

Şekil 1.2’de alfa ya da beta takiben gama bozunması şematize edilmiş ve gama ışınının enerjisinin temel seviye ile uyarılmış seviyenin enerjileri arasındaki farka eşit olduğu gösterilmiştir (Akkaş, 2015).



Şekil 1.2. Radyoaktif bozunmalarda gama ışınlarının yayımlanması (Akkaş, 2015)

Foton enerjisi, Eşitlik 1.6' da verilmiştir.

$$E_{\gamma} = E_1 - E_2 \quad (1.6)$$

Eğer bir çekirdek ya da atom, uyarılmış enerji düzeyinden doğrudan temel enerji düzeyine geçiş yapıyorsa, bu geçiş sırasında yayılan foton, uyarılmış seviyedeki enerjinin tamamını taşımaktadır (Akkaş, 2015).

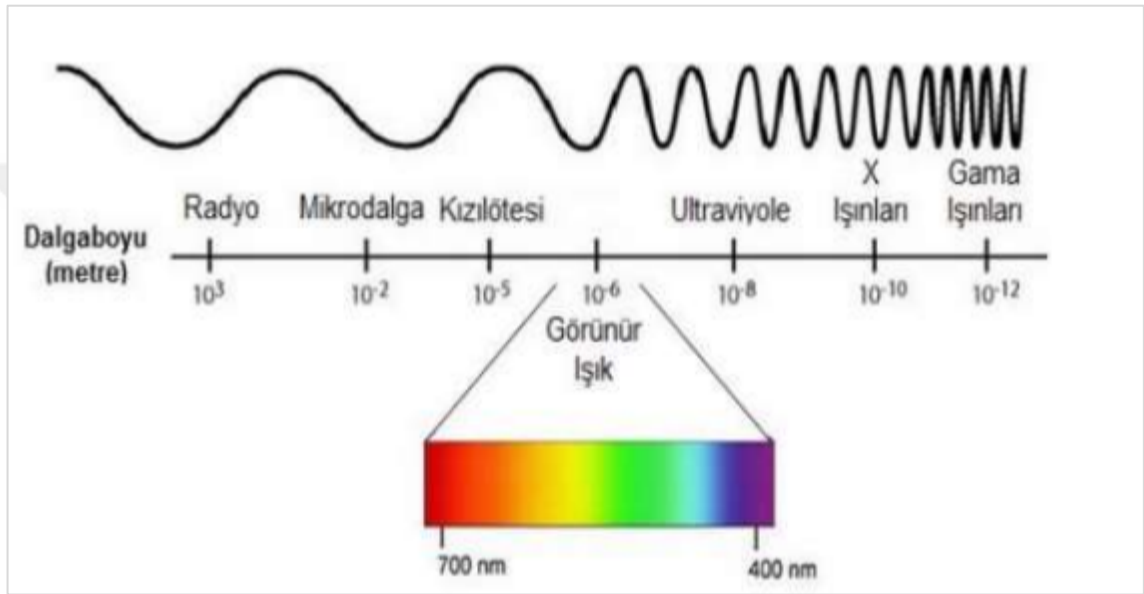
1.2.4. X ışınları

X ışınları, diğer adıyla Röntgen ışınları, mor ötesi ışınlar ve görünür ışık gibi elektromanyetik dalga formunda olup, yüksek enerjili elektronların bir atoma çarpmasıyla oluşur. Bu süreçte, gelen enerjik elektronlar atomun iç enerji seviyelerinde bulunan elektronları yerlerinden koparabilir. Bu elektronların ayrılmasıyla oluşan elektron boşluğu, daha yüksek enerji seviyelerinden gelen elektronlar tarafından doldurulur. Elektronların bu geçişi sırasında açığa çıkan enerji, genellikle X ışını olarak yayılır. Ayrıca, elektron yakalanması sonucunda, iç kabukta oluşan boşluk başka bir kabuktaki elektronun geçişiyle doldurulduğunda da X ışını meydana gelebilir (Dellaloğlu, 2024).

Bir kristalin yapısal özelliklerini belirleyebilmek için, o kristale ait X-ışını kırınım desenlerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Kırınım deseninde elde edilen yönelimler ve şiddet değerleri ölçülerek kristalin iç yapısına dair çeşitli bilgiler elde edilir. Bu bilgiler arasında; atomların kristal içindeki konumları, birim hücre parametreleri (kristal sistemi,

1. GİRİŞ

uzay grubu, a, b, c kenar uzunlukları ile α , β , γ açıları), bağ uzunlukları, bağ açıları, burulma açıları ve atomların termal titreşim hareketleri yer almaktadır. X-ışını kırınımı, kristal yapıların aydınlatılmasında kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Bu yöntemde kullanılan X-ışınlarının dalga boyu aralığı genellikle 0.1 Å ile 25 Å arasında değişmektedir. Nüfuz etme özelliği, normal ışıktan daha fazladır ve bu nedenle canlı hücrelerin mutasyon geçirmesine yani hücre dokusunun bozulmasına sebep olma ihtimalleri vardır (Kalecik, 2018).



Şekil 1.3. Elektromanyetik spektrum (Kalecik, 2018)

X-ışınları, havası boşaltılmış bir ortamda çalışan X-ışını tüplerinde üretilmektedir. Bu tüplerde, elektron emisyonu genellikle tungsten telden yapılmış bir filamanın ısıtılmasıyla sağlanır. Katot tarafından salınan elektronlar, uygun bir şekilde odaklanarak, katot ve anot arasında oluşturulan yüksek gerilim farkı sayesinde hızlandırılır ve anoda doğru yönlendirilir. Yüksek enerjili bu elektronlar, anot yüzeyine çarptıklarında kinetik enerjilerinin bir kısmını kaybederek elektromanyetik radyasyon, yani X-ışınları üretirler. Bu süreçte genellikle hedef malzeme olarak rodyum, krom, molibden, tungsten, demir, kobalt, gümüş, skandiyum ya da bakır gibi metaller tercih edilir. Elektronlar hedef metale çarptıklarında, atom çekirdekleriyle veya yörüngedeki elektronlarla etkileşime girerek yavaşlatılır ve bu frenleme sırasında enerjilerinin bir bölümünü foton olarak kaybederler. Bu yayılan fotonlar X-ışını olarak tanımlanır. Dolayısıyla X-ışınları, yeterli kinetik enerjiye sahip elektronların atom çekirdeği veya atomun iç yörünge elektronları ile etkileşime girmesi sonucu oluşur (Kalecik, 2018).

1. GİRİŞ

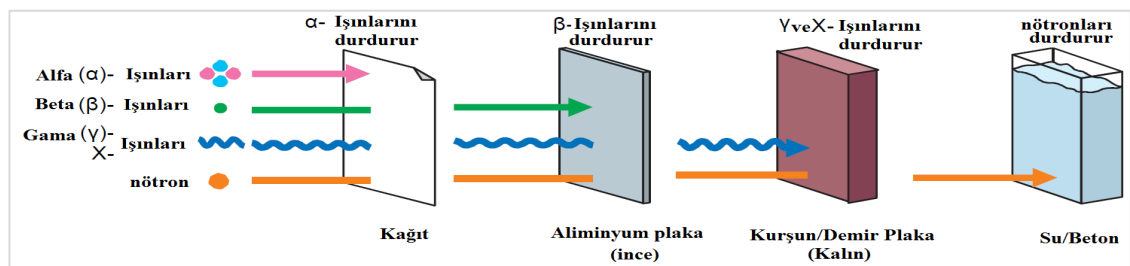
1.2.5. Nötronlar

Nötronların yükü bulunmamaktadır. Bu özelliğinden ötürü herhangi bir malzeme içerisine daha kolay bir şekilde hareket ederler. Doğrudan iyonlaşmaya neden olmazlar, fakat özellikle küçük atom numaralı çekirdekler ile nükleer reaksiyon meydana getirebilirler ve bu tepkilemelerin ürünü olarak alfa, beta, gama ve X ışınlarının açığa çıkmasına sebep olabilmektedirler. Sadece kalın beton, ağır su veya parafin kullanılarak zırhlanmaktadır (Dellaloğlu 2024).

Nötronlar, protonlarla birlikte atom çekirdeği içindeki temel parçacıklardan biridir. Kütlesi protona yaklaşık olarak eşittir, ancak net yükleri yoktur. Nötronlar, enerjilerine göre 5 grupta incelenir.

- $E > 100 \text{ MeV}$: Yüksek enerjili nötronlar
- $10\text{-}20 \text{ MeV} > E > 100\text{-}200 \text{ keV}$: Hızlı nötronlar
- $100 \text{ keV} > E > 0.1 \text{ eV}$: Epitermal nötronlar
- $E \sim kT \sim 1/40 \text{ eV}$: Termal/Yavaş nötronlar
- $E \sim \text{meV} \sim \mu\text{eV}$: Soğuk ve ultrasoğuk nötronlar

Şekil 1.4'te, farklı tip radyasyonun durdurulmasını açıklamaktadır.



Şekil 1.4. Radyasyon kaynaklarının geçirgenlikleri

1.3. Radyasyonun Günümüzdeki Yeri

Günümüzde radyasyon birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Radyasyonun kullanımı, sonuçları, enerji üretimi, tıbbi, sanayi, araştırma ve güvenlik dahil olmak üzere birçok alanda araştırılmaktadır. Tıpta radyasyonun teşhis ve tedavi amaçlı kullanımı

1. GİRİŞ

oldukça yaygındır. Röntgen cihazı, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve bilgisayarlı tomografi (BT) gibi görüntüleme teknolojileri, bireysel tanı ve tedavilerin yapılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca radyasyon tedavisi, kanser tedavisinin hedefe yönelik dağıtımını içeren bir yöntemdir. Nükleer enerji, elektrik enerjisi üretiminin önemli bir kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bir nükleer tesiste radyoaktif nükleer fisyon veya kaynaşma koşullarından elde edilen enerji, elektriğe dönüştürülür. Nükleer enerji, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük karbon emisyonu nedeniyle sürdürülebilir enerji seçeneklerinden biridir. Endüstriyel uygulamalarda radyasyonun farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Radyasyon, sterilizasyon işlemi sırasında mikroorganizmaları öldürmek için kullanılır. Gıda tüketimi, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve zararlı mikroorganizmaları yok etmek için radyasyondan yararlanılmaktadır. Radyoizotoplar fizik, kimya, biyoloji, arkeoloji ve malzeme bilimi gibi birçok alanda araştırma yapmak için kullanılmaktadır. Tüm bunları yaparken radyasyon güvenliği ve kontrolü çok önemlidir. Radyasyonun olumsuzluklarını en aza indirmek için uluslararası standartlar ve kılavuzlar geliştirilmiştir. Radyasyondan korunma önlemleri, insanların radyasyona maruz kalma sınırlaması için tasarlanmıştır (ICRP, 2007; Karakoç, 2024).

1. Tıpta Radyasyon: Radyasyonun tıpta kullanımı çeşitli alanlarda devam etmektedir. Özellikle Nükleer tıp, Radyasyon Onkolojisi, Radyoloji, Kardiyoloji gibi bir çok alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde Nükleer tıp, çeşitli hastalıkların teşhis ve tedavisi için radyoaktif izotopları kullanır. PET ve Sintigrafi gibi görüntüleme teknolojileri, kanser taramasında, hastalık teşhis ve analizinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca radyasyon tedavisinde, kanser gelişimini yok etmek veya kontrol etmek için yüksek enerjili ışınlar kullanır. (ICRP, 2007; Karakoç, 2024).

2. Nükleer Enerji: Radyasyonun en yaygın kullanım alanlarından biri enerji üretimidir. Bir nükleer rejimde nükleer fisyon veya füzyon reaksiyonlarından elde edilen enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür. Nükleer enerji, yüksek verimlilik, sürekli enerji üretimi ve düşük karbon emisyonu gibi nedenlerle enerji kapasiteleri karşılaştırıldığında diğer kaynaklara göre potansiyeli çok yüksek bir seçenek olarak görülmektedir (ICRP, 2007; Karakoç, 2024).

3.Endüstriyel Uygulamalar: Radyasyon endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sterilizasyon sırasında radyasyon, tedavi prosedürleri, farmasötik ürünler, ambalajlar ve tüketim malları dahil olmak üzere çeşitli ürünlerdeki mikroorganizmaları düzenlemek için kullanılır. Işınlama; gıda ekonomisi, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve zararlı mikroorganizmaları yok etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca malzeme analizi, arkeolojik araştırma, endüstriyel genişleme ve kontrol gibi alanlarda da faydalanılmaktadır (ICRP, 2007; Karakoç, 2024).

4.Araştırma: Radyasyon, bilimsel açıdan önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Fizik, kimya, biyoloji ve malzeme bilimi gibi alanlarda kullanarak temel bilimin ilerlemesine katkı sağlar. Örneğin; X-ışınının kristalografisi önemli bir yöntemdir. Bu yöntem Temel fizik araştırmaları, Metalürjide alaşım analizleri, Maden filizlerinin analizleri, Radyoaktif cevher analizleri, DNA analizleri gibi pek çok sektörde geniş uygulama alanı bulmuştur (ICRP, 2007; Karakoç, 2024; Kabak, 2004; Aygün ve Zengin 1998; Cullity, 1978).

Radyasyon güvenliği ve kontrolü çok önemlidir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve diğer ilgili kuruluşlar, emisyonun güvenli kullanımına yönelik standartlar ve kılavuzlar geliştirmektedir. Radyasyondan korunma önlemleri, canlıların ve insanların radyasyona maruz kalma sınırlaması için tasarlanmıştır. Radyasyon dozunun salınımı güvenliği için önemli bir önlemdir (ICRP, 2007; Karakoç, 2024).

1.3.1. Radyasyondan korunma yasaları

Radyasyondan korunmanın temel ilkesi ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibidir. Bu prensibe göre kişilerin mümkün olduğunca düşük seviyede radyasyon maruziyeti istenmektedir. ALARA prensibine dayalı olarak hazırlanarak radyasyondan korunma yasaları, olumsuz etkilere yönelik tedbirleri içeren kanunlar ve düzenlemelerdir. Bu kurallar, halkın ve çevrenin radyasyonun yayılmasına maruz kalma sınırlamasını kontrol etmek için konulmuştur (Karakoç, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

1.Radyasyon Güvenliği Kanunu: Bir ülke veya bölgesel yayılmanın sağlanması amacıyla radyasyonun kullanılması ile ilgili kanunlar oluşturulmaktadır. Bu salınımlara

1. GİRİŞ

maruz kalma konusunda, ayrıntılarını düzenler, eğitim ve lisans gerekliliklerini belirler. Ayrıca radyasyonun kontrol edilmesi, radyasyon kazalarının serbest bırakılması ve saklanması gibi konuları da kapsar (Karakoç 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

2.Radyasyon Dozu Sınırı: Radyasyonun korunması açısından, salınan dozların belirli kapasitelerinin içinde yapılmasını gerektirir. Bu işlem, çalışanların mesleki maruziyetini kontrol etmek ve insanlara radyasyona maruz kalması için sınırlıdır. Radyasyon dozu limitleri, farklı meslek gruplarının ve genel olarak insanların maruz kaldıkları seviyede kalmalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Karakoç, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

3.Radyasyonun Doğru Kullanımı: Radyasyonun güvenli ve uygun kullanıma yönelik yasal gereklilikler vardır. Bu düzenlerin, güvenli olduğu, radyasyon çalışanların eğitimini, profesyonelleşmesini, salınım işlemlerinin düzenli dağılımını ve bakımını içermektedir. Radyasyonla ilgili araştırmaların da kaydedilmesi ve belgelenmesi gerekmektedir (Karakoç, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

4.Radyasyon Kazaları ve Acil Durumlar: Radyasyon kazaları veya acil durumlar ile ilgili yasa ve düzenlemeler; bu tür olaylara hızlı ve etkili bir şekilde müdahale edilmesini sağlar. Bu sistemler arasında salınımların raporlanması, acil durum planlarının uygulanması ve tehlikeli radyasyona bağlı durumların korunması ve kayıt edilmesi yer almaktadır (Karakoç, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

1.3.2. Radyasyondan korunmak için dikkat edilmesi gereken hususlar

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmanın üç temel yöntemi; zaman, mesafe ve zırhlamadır.

Zaman: Uzun süreli işlemlerde zaman arttıkça maruz kalınan doz da artacağından, doğru orantılı bir etkilenme söz konusudur. Bu nedenle kaynağın bulunduğu ortamda geçirilen süre olabildiğince kısa tutulmalıdır (Keskin, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

Mesafe: Radyasyon kaynağına yaklaştıkça maruz kalınan doz miktarı da artmaktadır. Radyasyonun şiddeti, mesafenin karesi ile ters orantılıdır ve bu durum ters kare kanunu olarak adlandırılmaktadır. Radyasyon kaynağına yakın alanlarda uygun uyarı ve işaretlemeler yapılmalıdır (Keskin, 2024; IAEA, 2010; TAEK, t.y.).

Zırhlama: Radyasyon kaynağının önüne konularak onu çevreleyen ve bu sayede radyasyonun şiddetini azaltan materyallere zırh denir. Radyasyon kaynağının geçişini engelleyen malzemeler ile bariyer oluşturularak korunma sağlanır. Her radyasyonun türüne, enerjisine, cinsine ve şiddetine uygun malzemeler ve kalınlık ile zırhlama yapılmalıdır. Radyasyonla çalışılan birimlerde, kurşunlu bariyer ve kurşunlu kişisel koruyucu ekipmanlar iyonlaştırıcı radyasyonu etkin bir şekilde durdurabilir (Keskin, 2024; Çimen, 2017; Kılınçarslan, 2007)

1.4. Çimento

Çimento denildiğinde, en yaygın ve bilinen tür olarak Portland çimentosu ön plana çıkmaktadır. Ancak son yıllarda, doğal ve yapay kökenli çeşitli puzolanik malzemelerin belirli oranlarda klinkere ilave edilmesiyle, Portland çimentosundan farklı özelliklere sahip alternatif çimento türleri geliştirilmiştir (Yalçın ve Gürü, 2006).

Portland çimentosu, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen pişirme işlemi sonucunda oluşan klinker adlı ara ürünün, belirli oranlarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimento üretim süreci, kalker (kalsiyum karbonat) ve kil gibi silikatça zengin hammaddelerin uygun oranlarda karıştırılarak yaklaşık 1400–1500°C sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilmesini içerir. Bu pişirme sonucunda meydana gelen klinker, çimentonun hidratasyon özelliklerini belirleyen temel bileşenleri barındırmaktadır. Klinker yapısının bileşenleri, çimentonun mekanik ve kimyasal performansını doğrudan etkilemektedir (Uzbaş, 2019; Pehlivanoğlu, 2014).

Tablo 1.2. Çimentonun ana bileşenleri

Ana Bileşen	Kimyasal Bileşen	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum Silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiyum Silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Trikalsiyum Alüminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum Alümino Ferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tarihsel süreçte beton üretiminde farklı bağlayıcı malzemeler tercih edilmiştir. Eski dönemlerde yağlı kireç, doğal çimento türleri, alçı ve çeşitli puzolanlar gibi malzemeler kullanılmıştır. Ancak günümüzde, beton üretiminde en yaygın biçimde tercih edilen bağlayıcı malzeme Portland çimentosu dur.

Betonun ana bileşenlerinden biri olan çimento hamuru, agregaların yüzeylerini kaplayarak aralarındaki boşlukları doldurmakta ve taneler arasında güçlü bir bağ oluşturmak suretiyle sert ve dayanıklı bir yapı meydana getirmektedir. Portland çimentosu, genellikle kil, kalker ve demir oksit gibi hammaddelerin uygun oranlarda karıştırılarak yaklaşık 1400°C sıcaklıkta döner fırında pişirilmesiyle oluşan klinkerin, belirli miktarda alçı taşı ile birlikte yaklaşık $90\mu\text{m}$ inceliğe kadar öğütülmesi sonucu elde edilmektedir (Onaran, 2009).

Çimentonun su ile reaksiyona girerek sertleşmesini sağlayan temel kimyasal bileşenler; trikalsiyum silikat (Ca_3SiO_5), dikalsiyum silikat (Ca_2SiO_4), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu bileşenler, çimentonun hidrasyon sürecinde aktif rol oynayarak bağlayıcılığın gelişmesine ve malzemenin dayanım kazanmasına katkı sağlamaktadır (Özen, 2013).

Çimento üretimi, belirli ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Avrupa genelinde çimento standartlarının birleştirilmesi amacıyla, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) bünyesinde faaliyet gösteren Teknik Komite TC 51 tarafından 1973 yılında standart hazırlık çalışmalarına başlanmıştır. Bu

1. GİRİŞ

süreçte, farklı Avrupa ülkelerinde yerel standartlara göre kullanılan çeşitli çimento türleri dikkate alınarak, EN 197-1 standardı geliştirilmiştir. Bu standart, çok sayıda çimento tipini kapsamakta ve Avrupa çapında bir uyum sağlamayı hedeflemektedir.

Türkiye’de ise söz konusu Avrupa standardı, doğrudan Türk Standardı (TS) olarak kabul edilmiş ve TS EN 197-1 standardı kapsamında genel amaçlı çimento üretimine temel oluşturmuştur. Bu kapsamda yer alan çimento türleri, "CEM" ifadesi ile sınıflandırmakta ve beş ana grupta toplanmaktadır (Özen, 2013):

1. CEM I – Portland Çimentosu
2. CEM II – Portland Kompoze Çimento
3. CEM III – Yüksek Fırın Cürüflu Portland Çimentosu
4. CEM IV – Puzolanlı Çimento
5. CEM V – Kompoze Çimento

CEM tipi çimentolar, sertleşme süreçlerinde esas olarak kalsiyum silikatların hidratasyonu ile kimyasal bağ oluşturan, hidrolik özelliklere sahip bağlayıcı malzemelerdir. Bu çimentoların içeriğinde yer alan reaktif CaO ve reaktif SiO₂ miktarının, toplam kütleyle oranla en az %50 düzeyinde olması gerekmektedir. CEM çimentosunun ana bileşenleri; portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardır (Özen, 2013).

TS EN 197-1 standardı kapsamında CEM çimentoları, beş ana grup altında toplam 27 alt tip olacak şekilde sınıflandırılmıştır:

CEM I – Portland Çimentosu: Bu grupta yer alan çimentolar, yüksek oranda klinker içerir ve yalnızca az miktarda (ağırlıkça %0–5 arasında) mineral katkı maddesi ile birlikte öğütülür. Katkı olarak yalnızca kalsiyum sülfat ve minör bileşenler eklenir.

- Betonarme yapı elemanları,
- Yüksek katlı yapılar,
- Yol kaplamaları ve kaldırım betonları,

1. GİRİŞ

- Yer betonları ve kayar kalıp sistemleri,
- Köprü, viyadük, alt ve üst geçitler,
- Su deposu ve benzeri yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Özen, 2013).

CEM II – Portland Kompoze Çimentosu: Bu çimento türünde mineral katkı oranı %6 ila %35 arasında değişmektedir. Katkı türüne göre CEM II grubu; Portland cüruflu, Portland puzolanlı gibi adlarla da anılmaktadır (Özen, 2013).

CEM III – Yüksek Fırın Cüruflu Çimento: Bu gruptaki çimentoların en belirgin özelliği, yüksek oranda yüksek fırın cürufu içermelidir. Katkı oranı %36 ile %95 arasında değişmekte olup, özellikle sülfat dayanımının gerekli olduğu ortamlarda kullanıma uygundur (Özen, 2013).

CEM IV – Puzolanik Çimento: Adından da anlaşılacağı üzere puzolan esaslı katkılar içerir. Bu çimentolarda cüruf veya kalker kullanılmaz. Katkı maddesi olarak uçucu kül ve doğal puzolanlar tercih edilir ve bu katkıların oranı %11–55 arasında değişebilir. Puzolan katkısı sayesinde dayanım gelişimi uzun süreye yayılır ve dayanıklılık artar (Özen, 2013).

CEM V – Kompoze Çimento: Bu tür çimentolarda iki farklı katkı maddesi eş zamanlı olarak kullanılır: cüruf ve puzolan (veya uçucu kül). Cüruf oranı %18–50, puzolan veya uçucu kül oranı da %18–50 arasında tutulur. Klinker oranı ise %20–64 aralığında olacak şekilde ayarlanır (Özen, 2013).

1.5. Bor

Bor mineralleri, tarihsel süreç boyunca farklı medeniyetler tarafından çeşitli amaçlarla kullanılmış doğal kaynaklardır. Bugün, dünya genelinde bilimsel ve teknolojik gelişmelerin getirdiği çağdaş uygulamalara bakıldığında bor ürünlerinin 200'ü alternatifsiz olmak üzere 250'yi aşkın malzemede kullanıldığı görülmektedir. Bor minerallerinin hammadde olarak kullanım alanı, günümüzde yalnızca sanayi üretimiyle sınırlı kalmayıp, pek çok teknoloji ve sektör açısından doğrudan etkili bir "tekno-

1. GİRİŞ

ekonomik" unsur niteliği kazanmıştır. Türkiye'nin sahip olduğu zengin bor rezervleri dikkate alındığında, bu kaynağın stratejik öneme sahip olduğu ve ekonomik kalkınma açısından değerlendirilmesi açık bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir (Tübitak, 2003; TMMOB, 2003; Demirel, 2017; Durmuş, 2016).

Bor elementinin doğada farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) formunda ve 150'den fazla mineralin yapısında yer aldığı bilinmektedir. Ancak ekonomik açıdan değerlendirilebilecek bor mineralleri genellikle kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleriyle oluşturdukları hidratlı bileşikler şeklinde bulunmaktadır. Bu mineraller, içeriklerine göre sınıflandırılmak ve endüstriyel uygulamalarda bu sınıflama esas alınmaktadır. Ticari öneme sahip başlıca bor mineralleri arasında; tinkal ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), kolemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$), üleksit ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$), probertit, borasit, pandemit, szaybelit, hidroborasit ve kernit yer almaktadır. Yer altından çıkarılan bor cevherleri, yıkama ve kırma gibi fiziksel işlemlerden geçirilerek kullanım için uygun hâle getirebilmektedir (TMMOB, 2003).

Türkiye'de bilinen borat yataklarının tamamı Batı Anadolu bölgesinde yer almaktadır. Yaklaşık olarak doğu-batı yönünde 300 km, kuzey-güney yönünde ise 150 km'lik bir alana yayılan bu yataklar; Bigadiç, Sultançayır, Kestelek, Emet ve Kırka gibi önemli sahalarda yoğunlaşmıştır. Türkiye'deki bor mineralleri, içeriklerine göre sınıflandırılmış olup; sodyum içerenler "tinkal", kalsiyum içerenler "kolemanit" ve hem sodyum hem de kalsiyum içerenler ise "üleksit" olarak tanımlanmaktadır.

Dünya genelinde ekonomik değere sahip bor yatakları, genellikle borun oksijenle oluşturduğu bileşikler şeklinde ve kurak iklim koşullarına sahip, volkanik ve hidrotermal etkinliklerin gözlemlendiği bölgelerde yer almaktadır. Bu tür yataklar başta Türkiye olmak üzere; Amerika Birleşik Devletleri, Arjantin, Rusya, Kazakistan, Çin, Bolivya, Peru ve Şili gibi ülkelerde bulunmaktadır.

Küresel ölçekte ticari öneme sahip bor minerallerinin hangi ülkelerde bulunduğu Tablo 1.3'de; Türkiye'de hâlihazırda işletilen başlıca bor mineralleri ve bunların çıkarıldığı sahalara ise Tablo 1.4'de sunulmuştur (TMMOB, 2003).

1. GİRİŞ

Tablo 1.3. Önemli bor mineralleri ve bulunduğu yerler

MİNERAL	FORMÜLÜ	B₂O₃, %	BULUNDUĞU ÜLKELER
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10H ₂ O	36, 5	Türkiye (Kırka,Emet,Bigadiç)-ABD-Arjantin
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ . 4H ₂ O	51, 0	Türkiye (Kırka)-ABD-Arjantin
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 5H ₂ O	50, 8	Türkiye (Emet, Bigadiç,Küçükler)-ABD-Meksika
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ . 8H ₂ O	43,0	Türkiye (Bigadiç, Kırka, Emet)-Arjantin
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ . 5H ₂ O	49, 6	Türkiye (Kestelek, Emet)-ABD
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41, 4	Kazakistan-Çin
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ . 7H ₂ O	49, 8	Türkiye (Sultançayır, Bigadiç)
Borasit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ . 7H ₂ O	62.2	Almanya
Hid.Borasit	CaMgBO ₁₁ .6H ₂ O	50.5	Türkiye (Emet)
Datolit	Ca ₂ B ₄ Si ₂ O ₁₂ . 2H ₂ O	26, 7	Kazakistan-Rusya
Sasolit	H ₃ BO ₃	56, 3	İtalya
Göl Suları	Erimiş Tuzlar		ABD-Şili-Bolivya

Tablo 1.4. Ülkemizde işletilen bor mineralleri

MİNERAL	BULUNDUĞU YER
Tinkal	Kırka /Eskişehir
Kolemanit	Emet/Kütahya, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa
Üleksit	Bigadiç/Balıkesir

1.5.1. Boroksit (B₂O₃)

Bor trioksit veya diboron trioksit, B₂O₃ formülüne sahip borun oksitidir. Bor trioksit (B₂O₃), bor kimyasının en önemli oksitlerinden biri olup cam, seramik ve bor

1. GİRİŞ

esaslı ileri malzemelerin üretiminde temel bir bileşik olarak değerlendirilmektedir. Bor trioksit, atomik düzenine ve oluşum koşullarına bağlı olarak üç farklı yapısal formda bulunabilmektedir. Bu formlardan biri amorf, diğer ikisi ise kristal yapıdadır. Yapısal formdaki bu farklılıklar, B_2O_3 'ün fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Greenwood & Earnshaw, 1997).

Amorf bor trioksit, B_2O_3 'ün en yaygın ve endüstriyel açıdan en önemli formudur. Genellikle borik asidin (H_3BO_3) ısıtılması sonucu elde edilen bu yapı, uzun menzilli kristal düzen içermeyen camsı bir yapı sergilemektedir. Amorf B_2O_3 'ün temel yapı birimi, düzlemsel BO_3 üçgenleridir; ancak bu birimler düzensiz bir ağ yapısı oluşturarak rastgele bağlanmaktadır. Bu düzensizlik, bor trioksitin cam oluşturma yeteneğinin temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmekte ve borat camlarının ana bileşeni olmasını sağlamaktadır (Housecroft & Sharpe, 2012). Amorf yapı, kristal formlara kıyasla farklı optik ve termal özellikler göstermekte olup özellikle cam ve seramik endüstrisinde tercih edilmektedir (Kreidl, 1970).

Bor trioksitin kristal formlarından ilki α - B_2O_3 (alfa bor trioksit) olarak adlandırılmaktadır. Bu form, düşük sıcaklık koşullarında metastabil olarak bulunmakta ve tabakalı bir kristal yapı sergilemektedir. Kristal örgü içerisinde BO_3 üçgenleri düzenli bir şekilde dizilmiştir. Ancak α - B_2O_3 , termodinamik açıdan sınırlı kararlılığa sahiptir ve uygun koşullar altında amorf yapıya dönüşebilmektedir. Bu nedenle, α - B_2O_3 daha çok bor trioksitin yapısal geçişlerini ve kristallenme davranışını anlamak açısından önem taşımaktadır (Wells, 1984).

Bor trioksitin ikinci kristal formu olan β - B_2O_3 (beta bor trioksit) ise yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altında oluşmaktadır. Bu form, üç boyutlu ve daha yoğun bir kristal ağ yapısına sahiptir. β - B_2O_3 , α -forma kıyasla daha kompakt bir yapı sergilemekte ve termodinamik olarak daha kararlı kabul edilmektedir. Kristal örgünün üç boyutlu olması, bu formun mekanik ve yapısal özelliklerini belirgin şekilde etkilemektedir. Ancak oluşumu için özel koşullar gerektirmesi nedeniyle, β - B_2O_3 doğal ortamlarda ve endüstriyel uygulamalarda sınırlı olarak karşılaşılmaktadır (Cotton et al., 1999).

Sonuç olarak, bor trioksitin amorf ve kristal formları arasındaki yapısal farklılıklar, bu bileşiğin cam oluşturma yeteneği, yoğunluğu, termal kararlılığı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. (Greenwood & Earnshaw, 1997; Housecroft & Sharpe, 2012).

1.5.2. Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), yapısal olarak renksiz ve saydam bir mineral olmasına rağmen, içerdiği çeşitli safsızlıklar nedeniyle pembe, sarımtırak veya gri tonlarda da görülebilmektedir. Sertlik derecesi Mohs ölçeğine göre 2 ile 2,5 arasında değişmekte olup, özgül ağırlığı yaklaşık $1,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Tinkal, çevresel koşullara bağlı olarak kolaylıkla ayrışabilir, su kaybeder ve sinakalkonit mineraline dönüşebilir. Tinkalkonit ile birlikte üleksit minerali genellikle kil tabakaları içerisinde oluşmaktadır. Türkiye'de bu mineralin en önemli yataklarından biri Eskişehir-Kırka bölgesinde yer almaktadır. Boraks olarak da bilinen tinkal, evaporitlerin çökelişi sonucu tuzlu göl ortamlarında meydana gelmekte olup; karbonatlar, sülfatlar ve halit (kaya tuzu) gibi diğer evaporit mineralleri ile birlikte bulunur (DPT Raporu, 2008; Yılmaz, 2014).

Kırka yatak bölgesi, Türkiye'de boraksın en yoğun bulunduğu sahadır. Bu mineral, yalnızca bu alanda belirgin şekilde gözlenmiştir. Saf haldeyken boraks renksiz ve şeffaf bir görünüm sergilese de kil ile tabakalanmış ve ince taneli formda bulunduğu alanlarda, dışsal maddelerin etkisiyle açık pembe, sarımsı-turuncu ve gri renklere dönüşebilmektedir (Dırak, 2011).

1.5.3. Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), mineralojik açıdan oldukça zengin bir bor bileşiğidir ve monoklinik kristal sistemine sahip bir yapıda kristalleşmektedir. Genellikle renksizdir ve çizgi rengi beyazdır. Yarı elmas parlaklığında, camsı ve yarı saydam görünüme sahiptir. Yoğunluğu yaklaşık olarak $2,42 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Anthony et al., 2003; Deer et al., 2013). Kristal yapısı iyi gelişmiş olup, sıcak hidrolik asit içerisinde çözünme özelliğine sahiptir (Helvacı & Alonso, 2000). Balıkesir-Bigadiç bölgesinde kristal boyutlarının 10–20 cm'ye kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Türkiye'deki başlıca

kolemanit yatakları ise Balıkesir (Bigadiç ve Susurluk), Kütahya (Emet) ve Eskişehir (Kırka) bölgelerinde yoğunlaşmıştır (Helvacı, 2004; Kocadağıstan, 2024).

1.5.4. Üleksit (sodyum kalsiyum borat) ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Kimyasal formülü $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ olan üleksit, triklinik kristal sistemine sahiptir. Yoğunluğu $1,955 \text{ g/cm}^3$, sertlik 2.5 Mohs ve özgül ağırlık değeri 1,96'dır. Kırılgan bir yapıya sahip olan üleksit ayrıca beyaz, ipeksi ve camsı yapıdadır. Üleksit minerali seramik, cam, gübre, ses ve ısı yalıtımı endüstrisinde ayrıca borik asit ve boraks üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca üretim sürecinde Üleksit Mineralinin H_2SO_4 ile kimyasal tepkimeye girmesi sodyum sülfat, borik asit ve jips elde etmek mümkündür (Anthony et al., 2003; Deer et al., 2013; Bayrak, 2023).

Bu çalışmada bor katkısı kullanımının çimento malzemelerinin nötron ve gama radyasyonu soğurma kapasitesine etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Nötron ve gama radyasyonu, nükleer tesisler ve radyasyon koruma gerektiren alanlarda önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bor elementi, nötronlarla etkileşiminde yüksek soğurma kapasitesi göstermesi nedeniyle bu tür uygulamalarda öne çıkmaktadır.

Bu çalışma; bor katkılı çimento numunelerinin hazırlanması, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve radyasyon soğurma kapasitelerinin deneysel olarak incelenmesini kapsamaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışmasının kapsamı doğrultusunda yapılan literatür taramaları sonucunda, konuya ilişkin önemli araştırmalara ulaşılmıştır. Aşağıda, bu çalışmaların öne çıkanları özet hâlinde sunulmaktadır.

Boroksit, kolemanit ve bor içeren beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen bir araştırmada, betonun kimyasal bileşenlerinin radyasyona karşı zırhlama kapasitesi analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, bor katkılı ağır betonların yalnızca etkin zırhlama performansı açısından değil, aynı zamanda maliyet bakımından da avantaj sağladığı ortaya konmuştur (Henrie, 1962).

Sychev et al. (1967) tarafından yürülen çalışmada, hematit mineralleri kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin, berilyum kaynağından yayılan nötronlara karşı zırhlama performansı araştırılmıştır. Bu kapsamda, 170 MeV ile 660 MeV aralığında değişen beş farklı nötron enerji düzeyi dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Mubarak tarafından gerçekleştirilen çalışmada, zırhlama malzemelerinin radyasyona karşı koruyuculuk özellikleri ile bu özellikleri etkileyen parametreler incelenmiştir. Araştırmada, zırhlama performansının; radyasyonun enerjisi, kullanılan malzemenin atom numarası, kalınlığı ve yoğunluğu gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır (Mubarak, 1971).

Igashira et al. (1986) tarafından yürütülen araştırmada, %80 oranında parafin ve %20 oranında borik asit içeren karışımın, hızlı nötron deneylerinde kullanılan gama dedektörleri için potansiyel bir zırhlama malzemesi olup olamayacağı değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında gama ışını geçiş hesaplamaları yapılmış ve söz konusu karışım farklı zırh malzemeleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, bu karışımın kurşun zırh ile birlikte kullanılması durumunda, nötronlara karşı etkili bir koruma sağlayabileceğini göstermiştir.

Mollah et.al (1992) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, ilmenit ve manyetit agregaları içeren betonların nötron geçirim özellikleri ile zayıflatma katsayıları detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışmada nötron kaynağı olarak Cf-252 izotopu, dedektör olarak ise BF₃ tipi sayaç kullanılmıştır. Farklı beton kalınlıklarında yapılan ölçümler sonucunda, ilmenit agregalı beton için zayıflatma katsayısı 5 cm kalınlıkta 0,0936 cm⁻¹, 100 cm kalınlıkta ise 0,0346 cm⁻¹ olarak belirlenmiştir. Manyetit agregalı beton için bu değerler sırasıyla 0,990 cm⁻¹ ve 0,0366 cm⁻¹ olarak saptanmıştır. Elde edilen bulgular, her iki beton türünün de nükleer reaktörler ve parçacık hızlandırıcılarında nötron zırhı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

McAlister et al. (1955), radyasyona karşı koruyucu önlemlerin gerekli olduğu alanların zamanla artış göstermesiyle birlikte, bu doğrultuda yenilikçi ve etkili zırhlama malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların da ivme kazandığını belirtmiştir. Gama ışıınımı ve nötron saçılması, radyasyondan korunma açısından en kritik tehditler arasında yer almakta olup, bu tür radyasyonlara karşı alınacak önlemler büyük önem arz etmektedir. Gama radyasyonuna yönelik zırhlama uygulamalarında, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip birçok materyal tercih edilebilmektedir. Bu radyasyon türünün zayıflatılmasında etkinlik; temel olarak ışının enerjisine, zırhlama malzemesinin yoğunluğuna, atom numarasına ve kalınlığına bağlıdır. Söz konusu ilişkiler, hem deneysel bulgular hem de teorik modellemelerle desteklenmiştir. Kurşun, demir, beton ve su gibi geleneksel malzemeler, gama ışınlarının absorpsiyonunda yaygın olarak kullanılan zırhlama seçenekleri arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin radyasyon zayıflatma performansları, lineer ve kütleli absorpsiyon katsayıları üzerinden değerlendirilmektedir.

Gama ışınlarının bu ortamlardan geçişi sırasında karşılaşılan başlıca etkileşim mekanizmaları ise; fotoelektrik olay, Compton saçılması, çift oluşumu ve fotonükleer reaksiyonlar olarak tanımlanmıştır.

Erdoğan et al. (2000) yapılan çalışmada çimento içerisine öğütülmüş bor mineralleri ilave ederek farklı çimento türleri üretmiş ve bu çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, bor minerallerinin beton içerisinde nötron ışınlarına karşı zırhlama kapasitesini teorik yaklaşımlarla değerlendirmiştir. Elde edilen

bulgular doğrultusunda, bor minerali katkısının zırhlama performansını olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmıştır.

Kula et al. (2001), gerçekleştirdikleri araştırmada çimentoya kolemanit atığı, uçucu kül ve kömür alt külü ilave ederek, bu katkı malzemelerinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, Portland çimentosu yerine söz konusu katkılar farklı oranlarda eklenmiş ve elde edilen numunelerin priz süreleri, hacimsel genleşmeleri ve basınç dayanımları hem kontrol numuneleriyle hem de Türk Standartları (TS)'nde belirtilen kriterlerle karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, çimentoya %25 oranında uçucu kül veya yatak külü eklenmesi durumunda, kontrol numunelerine kıyasla daha iyi performans sergilendiği belirlenmiştir. Öte yandan, çimento içerisine %9 oranında kolemanit atığı ilavesi sonucu elde edilen numunelerde basınç dayanımında bir miktar azalma gözlemlenmiş olsa da, bu değerlerin TS tarafından belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı ifade edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, kolemanit atığı, uçucu kül ve kömür alt külünün çimento bileşeni olarak kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Erdoğan ve çalışma arkadaşları (2011), Portland çimentosu bünyesine farklı oranlarda ilave edilen kolemanit zenginleştirme atıkları ile Karabük kaynaklı yüksek fırın cürufunun çimentonun performans özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak değerlendirmiştir. Bunun yanı sıra, Na_2CO_3 katkısının değişen dozajlarda kullanılması durumunda çimentonun mekanik davranışında meydana gelen değişimler de araştırma kapsamına alınmıştır. Çalışmada kullanılan kolemanit konsantrasyon atığı, Kula cürufu, alçıtaşı ve klinker numunelerinin kimyasal bileşimleri X-ışını floresans (XRF) analizi ile belirlenmiştir. Deneysel değerlendirmelerde basınç dayanımı, prizlenme süresi, hacim kararlılığı (genleşme) ve normal kıvam suyu gereksinimi gibi temel mekanik ve fiziksel parametreler dikkate alınmıştır. Elde edilen deney sonuçları Türk Standartları (TS) ile karşılaştırılmış ve yapılan analizler sonucunda kolemanit konsantre atıkları ile Karabük cürufunun, uygun oranlarda kullanılması koşuluyla çimento üretiminde değerlendirilebilir alternatif hammaddeler olduğu ortaya konmuştur (Erdoğan vd., 2011).

Uğurlu ve arkadaşları (2004) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise tinkal üretim sürecinde boraks mineralinin zenginleştirilmesi sırasında açığa çıkan ve literatürde “kil pestili” olarak tanımlanan katı atıkların çimento ve beton sistemlerinde kullanım potansiyeli incelenmiştir. Bu kapsamda, öğütülmüş kil pestili atığı farklı oranlarda Portland çimentolu harç karışımlarına dahil edilmiş ve hazırlanan numuneler üzerinde hem taze hal hem de sertleşmiş durum özelliklerine yönelik deneyler yapılmıştır. Söz konusu deneyler aracılığıyla, kil pestili atığının çimentolu sistemler içerisindeki davranışı ve harç performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, referans numuneler ve Türk Standartları (TS) esas alınarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları, boraks içeren kil pestili atığının çimento ve beton karışımlarında priz geciktirici bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini ve düşük ikame oranlarında betonun su geçirimsizliğini iyileştirdiğini göstermiştir.

Morioka et al. (2007), 300°C sıcaklığa dayanabilen ve %6 bor içeren fenol bazlı bir nötron zırhı geliştirmişlerdir. Araştırmalarında, etkili bir nötron zırhı malzemesinin hem moderatör hem de soğurucu işlevini yerine getirmesi gerektiği vurgulanmıştır. En verimli moderatör olarak hidrojenin, hızlı nötronları tutmada etkili olduğu; bor elementinin ise termal nötronları emme kapasitesi nedeniyle en uygun soğurucu olarak tercih edildiği ifade edilmiştir. Nötron moderatörü, hızlı nötronları yavaşlatan ve onların enerjilerini düşüren bir maddeyi ifade eder. Bu işlem, nötronların daha düşük enerjili hale gelerek bir çekirdek reaksiyonuna, özellikle fisyon reaksiyonlarına daha uygun hale gelmesini sağlar. Moderatörler, genellikle hidrojen, ağır su (D₂O) veya grafit gibi maddeler olabilir. Bu maddeler, hızlı nötronların kinetik enerjisini azaltarak onları termal nötronlara dönüştürür. Termal nötronlar, genellikle daha verimli bir şekilde fisyon reaksiyonlarına yol açabilir ve bu nedenle nükleer enerji üretimi için önemlidir.

Kharita et al. (2008), Suriye'de yaygın olarak kullanılan agregalardan ürettikleri betonların, gama ışınları (¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co izotopları) ve nötronlar (Am-Be kaynağı) tarafından zayıflatılma katsayılarını incelemişlerdir. Betonlar, siyah kumsal kumu, hematit, dolomit, serpentin ve bu malzemelerin kumsal kumuyla farklı oranlarda karıştırılarak üretilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, hematit içeren betonların her iki radyasyon türüne karşı koruma sağlama konusunda daha etkili olduğu bulunmuştur.

Akkurt et al. (2010), barit kullanarak ürettikleri ağır betonlar ve kurşun ile gerçekleştirdikleri çalışmada, 0,662 MeV, 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerine sahip radyoaktif kaynaklar kullanarak lineer soğurma katsayılarını NaI(Tl) dedektörüyle ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar, XCOM verileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, barit ve barit katkılı ağır betonların iyi birer gama ışını soğurucu olduğunu, ancak zırhlama özelliklerinin kurşuna kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur.

Korkut et al. (2011), tarafından yapılan bir başka araştırmada, FLUKA Monte Carlo kodu kullanılarak ametist cevherinin zırhlama özellikleri incelenmiş ve lineer zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, ametist cevherinin radyasyona karşı zırhlama amacıyla kullanılabilecek potansiyel bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Akkurt et al. (2012), 511 keV ve 1275 keV enerjilerindeki gama ışınları için hafif beton sınıfına ait iki beton örneğinin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, hafif beton örneği sadece pomza içerirken, yarı hafif beton hem pomza hem de kum kullanılarak üretilmiştir. Sonuçlar, yarı hafif betonun sadece pomza kullanılan hafif betona göre daha yüksek soğurma katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, her iki enerji seviyesi için yarı tabaka kalınlığının hafif betondan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, nötron ve gama ışınlarının soğurma özelliklerini incelemek amacıyla iki temel bor minerali ele alınmıştır. Çalışmada incelenen bor mineralleri tinkal ve üleksittir. Bu mineraller, farklı uygulama alanlarında radyasyon soğurucu malzemeler olarak kullanılma potansiyeline sahip olabileceği öngörülmüştür.

Deneylerde kullanılan çimento Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen Portland çimentosu (CEM I 42.5 R)'dur.

Üleksit, yüksek bor içeriğine sahip bir bor minerali olup, Balıkesir ilinin Bigadiç ilçesinden temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmadan önce öğütme, kurutma ve elek analizi gibi ön hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonucunda, numuneler mikron boyutuna indirilmiş ve son olarakta 650 °C de ısıtılma tabi tutularak yabancı maddeler azaltılarak daha saf bir bor elde edilmiştir.

Tinkal, yüksek bor içeriğine sahip doğal bir borat minerali olup, Kırka-Eskişehir bölgesinden temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmadan önce öğütme, kurutma ve elek analizi gibi ön hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonucunda, numuneler mikron boyutuna indirilmiş ve son olarakta 650 °C de ısıtılma tabi tutularak yabancı maddeler azaltılarak daha saf bir bor elde edilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Betonların üretimi

Çalışmada incelenmiş olan betonların üretimi Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada standart

beton, üleksit ve tinkal katkılı beton olmak üzere 6 tip beton üretilmiştir. Öncelikle karşılaştırma yapmak için yalnızca çimento karışımli numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra her bir çimento numunesi içerisine sırasıyla ve ayrı ayrı olmak üzere %1, %5, %10'luk üleksit ve tinkal katılmıştır. Deneylerde su/bağlayıcı oranı 0.20 olarak belirlenmiştir. Numunenin sıcaklığı dijital termometre ile ölçülmüş ve karışım suyu sıcaklığının 25-30°C aralığında olması gerektiği belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler, 5×5×5cm boyutlarındaki küp numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarında 24 saat boyunca bekletilmiş ve ardından kalıptan çıkarılmıştır. Kür sürecinde sabit sıcaklıklı bir ortamda (24°C) muhafaza edilmiş ve ortam sıcaklığı ile bağıl nem düzenli olarak dijital termometre ile takip edilmiştir.

3.2.2. Serbest basınç deneyi

Çalışma kapsamında üretilen betonların Basınç deneyini Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğı Bölümünde ölçülmüştür.

Deneyisel alışmalar, TS EN 12390-3 (2010) standardı doğırtusunda gerçekleştirilmiş olup, numunelere maksimum yük kapasitesine ulaşınca kadar sabit yükleme hızı ile basınç uygulanmıştır (TS EN 12390-3, 2010, betonun dayanıklılığını ölçmek amacıyla yapılan basınç testinin yöntemlerini belirleyen resmi bir standarttır). Deney numunesi, deney makinesinin yükleme başlığı ile arasına yerleştirilmiş ve numunelerin beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Numuneler, makinenin alt yükleme başlığı üzerinde merkezi şekilde yerleştirilmiştir. Göstergeden okunan en yüksek yük kaydedilmiş ve aşağıdaki formül kullanılarak basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Burada, Basınç dayanımı (σ), numunenin kırılma anında taşıdığı maksimum yükün (P), basına maruz kalan kesit alanına (A) oranıdır (Uzbaş, 2019; Sancak, 2015; Ustabaş, 2008).



Şekil 3.1. Serbest basınç deneyi cihazı

3.2.3. Soğurma Deneyleri

X- ve γ -ışınlarının Azaltılması

Belli bir enerjiye sahip fotonlar, Z atom numarasına sahip bir madde ile etkileşime girdiğinde, fotonların bir kısmı maddenin öbür tarafına geçerken, bir kısmı da soğurulur, saçılır veya enerjisi yeterli ise çift oluşumu olayı oluşturur. Neticede gelen foton şuasının şiddetinde bir azalma meydana gelir. Bu azalma fotonların soğurucu maddenin atomları ile etkileşimi sonucunda meydana gelir. Bu etkileşme atomik elektronlarla, atom çekirdekleri ve bunların etraflarındaki Coulomb alanında (elektrik alanında) gerçekleşir. Gerçekleşen olaylar ise fotonun soğurulması ile fotonun koherent veya inkoherent saçılması şeklinde olmaktadır. Bu olayların her biri bir tesir kesiti ile ifade edilmektedir. Tesir-kesiti herhangi bir olayın meydana gelme ihtimaliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanır.

Bu etkileşimler göz önünde bulundurulduğunda, 1,02 MeV'den küçük enerjili fotonlar için toplam azaltma katsayısı

$$\mu = \tau + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} \quad (3.2)$$

biçiminde ifade edilir. Burada, τ fotoelektrik soğurma katsayısını, σ_{coh} koherent saçılma tesir kesitini ve σ_{incoh} inkoherent (Compton) saçılma tesir kesitini gösterir (Yılmaz, 2011).

Lineer azaltma katsayısı

Soğurma olayı ilk kez Röntgen tarafından açıklanmıştır. Bu açıklamaya göre, I_0 şiddetindeki bir foton (örneğin X-ışını veya gama ışını), t kalınlığındaki soğurucu bir maddeyi geçtiğinde I şiddetinde bir azalma meydana gelir (Yılmaz, 2011; Sunar, 2022).

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (3.3)$$

Bu eşitlik Lambert-Beer yasası olarak bilinir. Burada μ lineer azaltma katsayısıdır ve birimi cm^{-1} 'dir. t ise numune kalınlığı olup birimi cm olmalıdır. Buradan lineer azaltma katsayısı (μ),

$$\mu = -\left(\frac{1}{t}\right) \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.4)$$

eşitliği ile belirlenir. Kütle azaltma katsayısının birimi cm^{-1} 'dir.

Yarı kalınlık

İlk foton ışınının şiddetinde yarı kalınlık değeri $\frac{1}{2}$ ile azalır. Yarı kalınlık kabaca, gelen foton şiddetinin yarıya düştüğü kalınlık olarak tanımlanabilir (Yılmaz, 2011; Sunar, 2022).

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.5)$$

Kütle azaltma katsayısı

Bir maddeye ait lineer azaltma katsayısı (μ) maddenin fazına bağlı olduğundan dolayı madde fazına bağlı olarak değişmeyen kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısının (μ) numune yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır ve deney düzeneğinde ölçülen şiddet değerleri kullanılarak,

$$\mu = -\left(\frac{1}{\rho t}\right) \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.6)$$

eşitliğinden belirlenir. Burada ρ , numunenin yoğunluğudur ve ρt değeri ise kütle kalınlığı olarak adlandırılır. Kütle azaltma katsayılarının birimi cm^2/g 'dir. Çeşitli deneysel düzenlemeler ve tekniklerden ($\frac{\mu}{\rho}$) elde edilebilir. Özellikle son zamanlarda kristalografi ve dalgaboyu değişiminde, Hubbell ve Creagh tarafından uygulanmış ve değerlendirmişlerdir (Creagh, 1987; Hubbell, 1987). Bu, kristalografi için uluslararası tablolarda yeni tablolara yol gösterir (Creagh, 1987; Hubbell, 1995). Daha sonraları ($\frac{\mu}{\rho}$) Gerward tarafından yeniden incelenmiştir (Gerward, 1993). Ölçülmüş verilerin günün ihtiyaçlarına uygun hale getirilmiş bir bibliyografisi Hubbell tarafından verilmektedir (Hubbell, 1995; Hubbell, 1994; Sunar, 2022). Kütle azaltma katsayıları

$$\frac{\mu}{\rho} = \sigma_{top} N_A / (U A) \quad (3.7)$$

ile hesaplanabilir. N_A Avogadro sayısı ($6,022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), U atomik kütle birimi, A ise hedef atomun atomik kütlesi ile ilgili büyüklük ve σ_{top} fotonla bir etkileşme için toplam tesir kesitidir. Toplam tesir kesiti başlıca foton etkileşimlerinden gelen katkıların toplamı gibi yazılabilir.

$$\sigma_{top} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{ph.n} \quad (3.8)$$

Burada σ_{pe} atomik fotoelektrik tesir kesiti, σ_{coh} ve σ_{incoh} koherent (Rayleigh) ve inkoherent (Compton) saçılma tesir kesiti, σ_{pair} ve σ_{trip} çekirdeklerin ve atomik

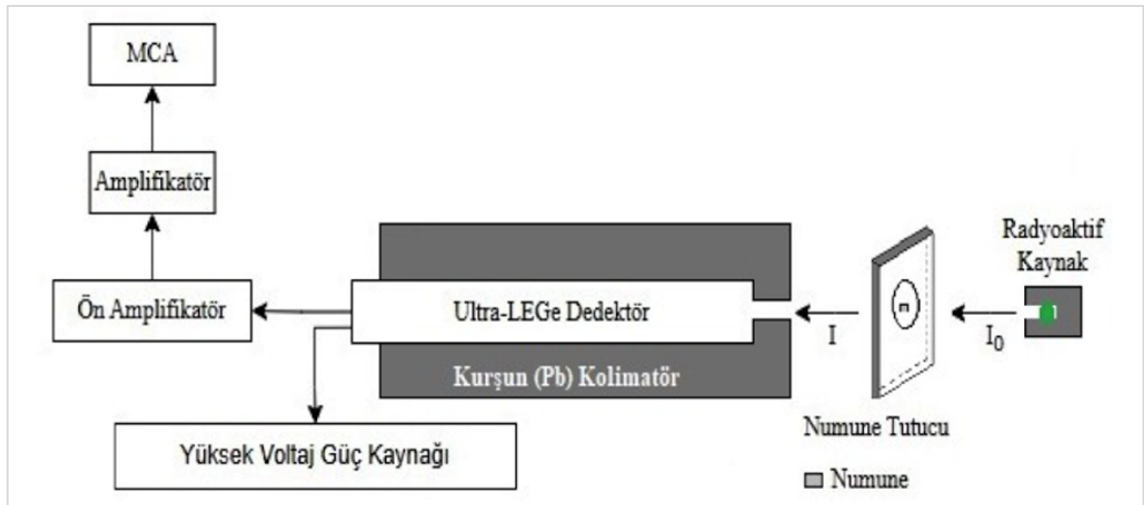
elektronların alanlarında elektron-pozitron oluşumu için tesir kesitleridir, $\sigma_{ph.n.}$ ise fotonükleer tesir kesitidir.

Atom çekirdekleri ile foton arasındaki fotonükleer soğurma, fotonlarla ya da genellikle nötronlarla dışa atılma işlemlerinde en etkili sonuçları verir. Bu etkileşim, hedef çekirdek üzerine düşen geniş rezonans bölgesini kapsayan 5 ile 40 MeV enerjileri arasında gerçekleşir ve oldukça dar bir enerji aralığında toplam foton etkileşim kesitine %5-10 oranında katkıda bulunabilir. Bu etkileşimin sonuçları toplam soğurma katsayısı ölçümlerinde gözlemlenebilir.

Z=1'den Z=92'ye kadar olan elementler için ve foton enerjileri 1 keV'den 20 MeV'e kadar olan elementler için sonuçlar bulunabilir (Hubbel and Seltzer, 1995). Bu sonuçlar aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\mu}{\rho} = (N_A/UA) (\sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip}) \quad (3.9)$$

Aynı zamanda, kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısının soğurucu malzemenin özgül ağırlığına bölünmesiyle elde edilir. Radyasyonun yoğunluğundaki azalma ile ilgili konuşulduğunda, bu durumun 'zayıflaması' ya da 'zayıflatılması' terimleri kullanılmaktadır. Etkileşime girdiği madde içerisinde kaybolan enerji söz konusu olduğunda ise 'soğurulma' terimi tercih edilir (Yılmaz, 2011; Sunar, 2022).



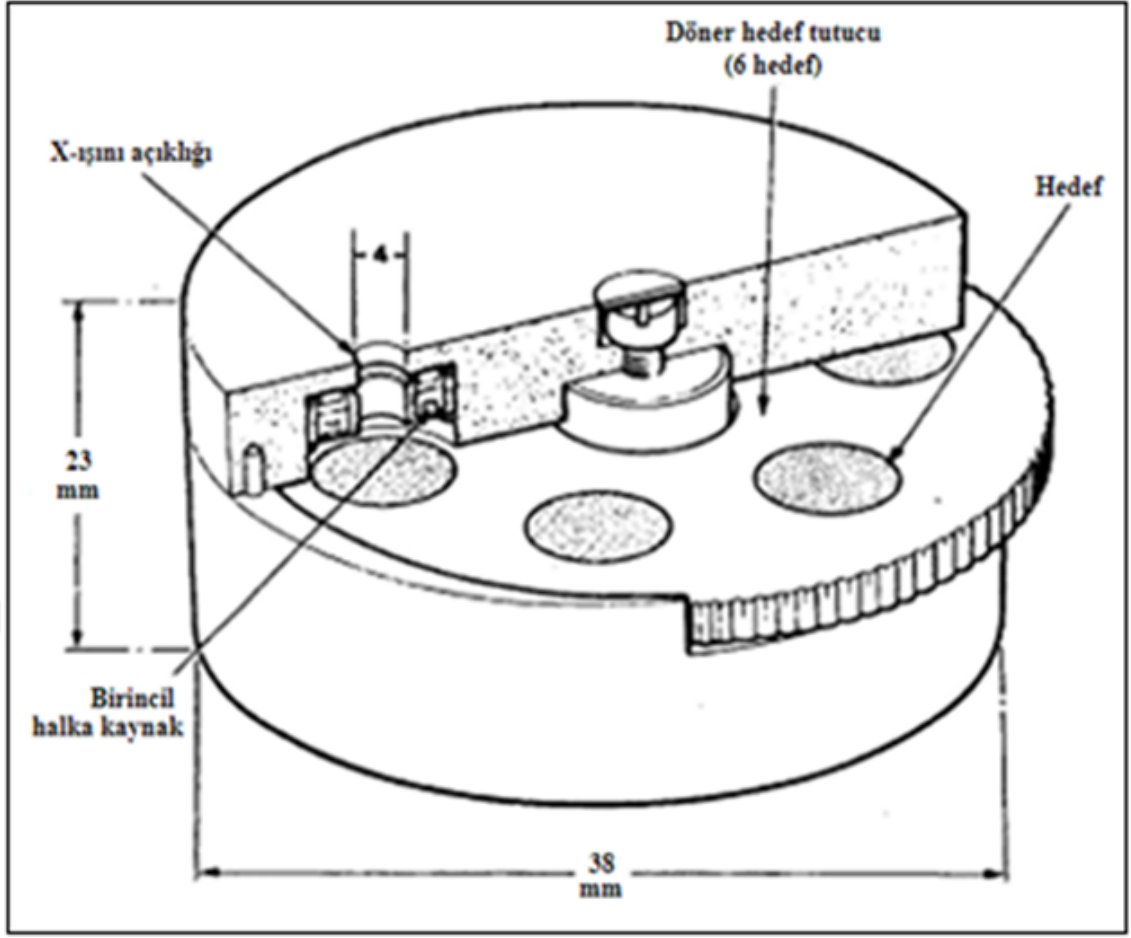
Şekil 3.2. X- ve γ-ışını soğurma ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği

3.2.4. X- ve γ -ışını soğurma ölçümleri

Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerinin zayıflatma katsayılarının belirlenmesine yönelik deneysel ölçümler, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği Anabilim Dalı bünyesinde bulunan Yüksek Enerji Spektroskopisi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmektedir.

Deneylerde radyasyon kaynağı olarak Değişken Enerjili X-Işını Kaynağı (Variable Energy X-ray Source, VEX) ve ayrıca Baryum-133 (^{133}Ba) radyoizotopu kullanılmıştır. VEX düzeneği, kapalı bir seramik birincil kaynak içeren ve altı farklı hedefin döndürülmesiyle karakteristik X-ışınlarının elde edilmesine olanak sağlayan AMC.2084 kodlu kompakt bir sistemden oluşmaktadır (Wheeler et al., 2018).

VEX düzeneğinin temel bileşeni olan Amerisyum-241 (^{241}Am) radyoizotopu, Neptünyum-237 (^{237}Np)'ye bozunurken yaklaşık 5,48 MeV enerjili alfa (α) parçacıkları ve 59,54 keV enerjili gama (γ) ışınları yaymaktadır. Bu radyasyonlar, döner bir mekanizma üzerine yerleştirilmiş metal hedeflere çarparak hedef elementlere özgü karakteristik X-ışınlarının oluşmasını sağlamaktadır (Wheeler et al., 2018; Knoll, 2010). VEX kaynağına ait şematik görünüm Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Amersham AMC 2084 VEX kaynak

Düzende, birincil halka kaynak olan ^{241}Am , paslanmaz çelik gövdenin sabit bölümünde yer almakta ve X-ışını emisyon açıklığını çevrelemektedir. Döner hedef tekerleği üzerinde Cu, Rb, Mo, Ag, Ba ve Tb olmak üzere altı farklı metal hedef bulunmaktadır. Alfa ve gama radyasyonunun bu hedeflerle etkileşimi sonucu hedef metallerin karakteristik X-ışınları üretilmektedir (Sunar, 2022; Turner, 2007). Her bir hedef sırasıyla birincil kaynağa döndürülmekte ve elde edilen karakteristik X-ışınları 4 mm çapındaki kolimatör açıklığından geçerek numunelere yönlendirilmektedir.

Bakır (Cu) hedefinden elde edilen karakteristik X-ışınlarının, çalışmada kullanılan beton numuneleri tarafından tamamen soğurulduğu gözlemlendiğinden, deneylerde Rb, Mo, Ag ve Tb K X-ışınları ile ^{241}Am kaynağından yayılan 59,54 keV enerjili gama ışınları kullanılmıştır. Daha yüksek enerji aralıklarında zayıflatma katsayısının belirlenmesi amacıyla ise VEX kaynağı yerine 2,73 mCi aktiviteye sahip ^{133}Ba radyoizotopu kullanılmıştır. Bu kaynaktan yayılan 53,16 keV, 81,00 keV, 276,40 keV, 302,85 keV,

356,01 keV ve 383,85 keV enerjili gama ışınları ölçümlerde değerlendirilmiştir (Knoll, 2010; Singh et al., 2019).

Elde edilen tüm spektrumlara ait pik alanları, spektral analiz ve enerji kalibrasyonu işlemleri için yaygın olarak kullanılan PyMCA yazılımı aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu yazılım, X-ışını ve gama spektroskopisi çalışmalarında güvenilir sonuçlar sunması nedeniyle literatürde sıklıkla tercih edilmektedir (Solé et al., 2007).

3.2.5. Nötron Ölçümleri

Nötronların yavaşlatılması ve durdurulması

Nötronların zırhlaması, diğer iyonlaştırıcı radyasyon türlerine kıyasla oldukça zordur. Bunun temel nedeni, nötronların elektriksel yük taşımamalarıdır. Elektrik yüklerinin olmaması nedeniyle nötronlar, soğurucu atomların elektrik alanlarından etkilenmeden doğrudan çekirdeğe kadar ulaşabilmekte ve bu durum nükleer reaksiyonların başlamasına ve ikincil radyasyon oluşumuna yol açabilmektedir (Knoll, 2010; Turner, 2007) Nötronlar, zırhlama malzemesi içerisinde enerjilerini çoğunlukla esnek (elastik) ve esnek olmayan (inelastik) çarpışmalar yoluyla kaybederler. Esnek çarpışmalarda, nötronlar hedef çekirdekle iki bilardo topunun çarpışmasına benzer şekilde etkileşime girerek saçılırlar. Bu etkileşim sırasında nötron, başlangıç enerjisinin başlangıçtaki enerjisinin $2m/(1+m)^2$ 'lik kısmını hedef çekirdeğe aktararak kaybeder. Burada m , nötron kütlelerinin çarpıştığı hedef çekirdeğin kütlesine oranını ifade etmektedir (Lamarsh & Baratta, 2001). Bu bağıntıya göre, enerjisi 1 MeV'den küçük olan bir nötronun bir hidrojen çekirdeği ile çarpışması durumunda enerjisinin yaklaşık yarısını kaybettiği görülmektedir. Bu durum, nötronların yavaşlatılmasında hafif elementlerin daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, hidrojen içeriği yüksek olan parafin, su, beton ve polimer bazlı malzemeler, nötron yavaşlatıcı (moderator) olarak zırhlama uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Turner, 2007; Knoll, 2010).

Nötronların yakalanması (absorpsiyonu) sürecinde ise genellikle bor ve lityum gibi yüksek nötron yakalama kesitine sahip elementler tercih edilmektedir. Enerjisi 1 MeV'den büyük olan nötronlar, hedef atomlarla inelastik çarpışmalar gerçekleştirir. Bu

tür etkileşimlerde meydana gelen (n,x) reaksiyonları sonucunda nötron, enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe aktararak onu uyarır. Uyarılmış durumda bulunan çekirdek, kararsız hâlden kurtulmak amacıyla gama ışınları yayarak daha kararlı bir duruma geçer (Knoll, 2010). Nötron yakalanması süreci, nötronun hedef çekirdek tarafından yutulması ile başlamakta; hedef atomun daha ağır bir izotopa dönüşmesi veya gama ışını yayarak uyarılmış hâlden çıkmasıyla son bulmaktadır. Bu amaçla hafniyum diborür (HfB₂), titanyum diborür (TiB₂), gadolinyum titanat, kadmiyum, bor ve hidrojen içeren bileşikler yaygın olarak nötron tutucu malzemeler olarak kullanılmaktadır (Lamarsh & Baratta, 2001). Nötron şiddeti, birim alan başına düşen nötron sayısı (n/cm²) veya birim zamanda birim alandan geçen nötron sayısı (n/cm²·s) ile ifade edilmektedir. Başlangıç şiddeti N_0 olan bir nötron demeti, kalınlığı t olan bir zırhlama malzemesinden geçerken, nötron saçılma ve soğurma olasılıklarını içeren makroskopik tesir kesiti (Σ)'ne bağlı olarak zayıflamaktadır. Fotonların soğurulmasında kullanılan Lambert–Beer yasasına benzer şekilde nötronlar için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır (Turner, 2007):

$$N = N_0 e^{-\Sigma t} \quad (3.10)$$

Burada N_0 , kaynaktan çıkan nötronların başlangıç şiddetini; N , herhangi bir etkileşme olmaksızın zırhlama malzemesinde t kalınlığı boyunca ilerleyebilen nötronların şiddetini ifade etmektedir. Σ ise nötronun madde içerisinde herhangi bir etkileşmeye girmeden ilerleme olasılığını temsil eden makroskopik tesir kesitidir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen nötron ölçümleri, Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde yer alan Prof. Dr. Gökhan Budak Nötron Ölçüm Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

(BF₃) orantılı sayaçları

Ölçümlerde kullanılan BF₃ orantılı sayaçları, ¹⁰B ile zenginleştirilmiş BF₃ gazı ile doldurulmuş bir dedektördür. Bu gaz, gelen nötronlar için aynı zamanda bir hedef malzeme görevi görmektedir. Dedektörde gerçekleşen temel reaksiyon aşağıdaki şekilde ifade edilir (Knoll, 2010):



Bu reaksiyon sonucunda ortaya çıkan lityum çekirdeği ve alfa parçacığı, gaz dolu ortamda ikincil iyonizasyonlara neden olacak kadar yüksek enerjiye sahiptir. İkincil iyonizasyonlar, dedektör tarafından algılanabilir. Bazı nötron reaksiyonlarında ise yaklaşık 0,48 MeV enerjili gama ışınları açığa çıkabilir. Bu nedenle, uygun ayırt edici devreler ve elektronik filtreleme kullanılarak, gelen nötronlar ve gama ışınları birbirinden ayrılmalıdır (Leo, 1994; Knoll, 2010).

BF₃ gazlı dedektörler, termal, orta ve yüksek enerjili nötronların (E = 100 eV – 200 keV ve E > 10 MeV) tespiti için kullanılabilir. Bu dedektörler, hem nötron sayımı hem de nötron spektroskopisi amaçlı deneylerde güvenilir sonuçlar sağlamaktadır (Knoll, 2010; Tsoulfanidis, 2010).

Nötron Kaynağı

Deneylerde kullanılan nötron kaynağı, radyoaktif ²⁴¹Am-Be kaynağıdır. Kaynaktaki alfa (α) parçacığı yayınlayıcısı olan ²⁴¹Am, yaklaşık 486 yıl yarı ömür değerine sahiptir. Alfa parçacıkları, nötron bağlanma enerjisi düşük olan berilyum hedefini bombardıman ederek, nötron parçacıklarının açığa çıkmasını sağlar. Kaynak, 0 – 11 MeV enerji aralığında nötron üretmekle birlikte, enerji spektrumunun etkin değeri yaklaşık 4,5 MeV'dir. Bu işlem sırasında açığa çıkan gama ışınları da dikkate alınmalı ve radyasyon güvenliği sağlanmalıdır (Knoll, 2010; Lamarsh & Baratta, 2001).

Kaynağın güvenli şekilde kullanılabilmesi için, nötronlara karşı parafin wax ve gama ışınlarına karşı kurşun levhalar kullanılarak bir zırh kutusu (68 × 68 × 68 cm) oluşturulmuştur (Şekil 3.4). Bu düzenek, deney sırasında operatörleri radyasyon etkilerinden korumaktadır (Knoll, 2010; Turner, 2007).



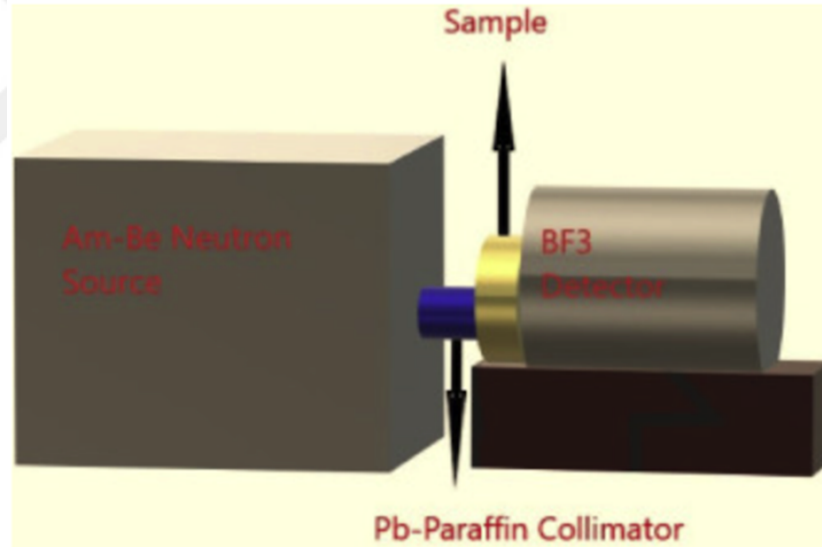
Şekil 3.4. Ölçümlerde kullanılan nötron kaynağı

Nötron Eşdeğer Doz Ölçümlerinde Kullanılan Dedektör Sistemi

Deneyisel çalışmalarda, ^{241}Am –Be nötron kaynağından yayılan nötronların tespiti için Canberra firmasına ait NP serisi BF_3 gazlı nötron dedektörü tercih edilmiştir. Dedektörün aktif hacminde bulunan bor atomları ile nötronlar arasında gerçekleşen nükleer etkileşimler sonucunda alfa parçacıkları ve lityum çekirdekleri oluşmaktadır. Bu yüksek enerjili parçacıklar, BF_3 gazı içerisinde yeterli düzeyde ikincil iyonlaşmaya yol açmaktadır. Meydana gelen iyonlaşma sonucunda ortaya çıkan serbest elektronlar, dedektörün merkezinde yer alan anot teline doğru hareket ederek ölçülebilir elektriksel sinyallerin oluşmasını sağlar. Oluşan bu sinyaller, hassas ön yükselticiler yardımıyla yükseltilmekte ve ADM 616 model seri dijital veri okuma sistemi aracılığıyla kaydedilip analiz edilmektedir (Knoll, 2010; Leo, 1994; Tsoulfanidis, 2010).

Deney Düzenegi

Deneyisel ölçümlerde kullanılan kurulum Şekil 3.5'te şematik olarak sunulmuştur. İncelenen numuneler, numune taşıyıcı aparatlar yardımıyla kaynak zırhlama kutusunun yan yüzeyinde yer alan ve 2,5 cm çapına sahip silindirik açıklığa sabitlenmiştir. Numunelerin yerleştirilmesini takiben, nötron dedektörü radyasyon kaynağına uygun mesafeye konumlandırılarak nötron eşdeğer doz ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Dedektör çıkışı, ADM-606 model analizöre bağlanmış ve elde edilen sayım sinyallerinin bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmıştır. Ölçüm verileri, RADACS yazılımı kullanılarak XLS formatında kaydedilmiştir. Her bir ölçüm 100 saniyelik sürelerde gerçekleştirilmiş olup, her periyot 10 tekrar içerecek şekilde uygulanmıştır. Her numune için toplamda 10 bağımsız ölçüm yapılmış ve sonuçların değerlendirilmesinde bu ölçümlerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır.



Şekil 3.5. Nötron Dedektörü

Bu ifadede Σ , nötronların ortam içerisinde soğurulma ya da saçılma süreçlerine uğrama olasılığını birim yol uzunluğu başına tanımlayan büyüklüğü temsil eder ve birimi cm^{-1} olarak ifade edilir. Σ parametresi, nötron zırhlama tasarımları ile radyasyon dozimetri analizlerinde kritik öneme sahip temel bir katsayıdır.

3.2.6. X-ray difraksiyon (XRD)

Çalışma kapsamında üretilen betonların XRD analizini Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Teknoloji Uygulama Ve Araştırma Merkezinden (YUTAM) ölçülmüştür.

Bileşik ya da faz bileşimlerinin oksit bileşenlerinden hesaplanması hem teorik hem de deneysel yöntemlerle gerçekleştirilebilir. X-ışını kırınımı (XRD) tekniği, uzun yıllardır mineral konsantrasyonlarının tayininde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. 1958 yılından itibaren ise XRD analiz yönteminin çimento bileşimlerinin belirlenmesinde kullanılmasına yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Winter, 2012; Cullity & Stock, 2001; Klug & Alexander, 1974; Pecharsky & Zavalij 2009).

Kompozit bir malzeme olan beton, yapısal olarak çimento içeriğinin yüksek olması nedeniyle, karmaşık bir davranış sergilemektedir. Özellikle çimento-agrega ara yüzeyinde, çimento hamurundan mikroyapısal farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Betonun çeşitli agresif çevresel koşullara maruz kalması sonucu yeni bileşiklerin meydana gelmesi ve betonun doğal bozulma süreçlerinde karakteristik yapıların oluşması, servis ömrü, dayanıklılık ve buna bağlı ürünlerin performanslarının araştırılmasında X-ışını kırınımı (XRD) analizinin önemli ve kaçınılmaz bir yöntem haline gelmesine neden olmuştur (Ramachandran et al., 1999).

X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, beton içerisindeki kalsiyum hidroksit (portlandit) ve etrenjit gibi kristal yapıya sahip fazların tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, özellikle etrenjit oluşumu gibi çimentonun erken dönem hidratasyon reaksiyonlarının izlenmesi açısından önemli bilgiler sunar. Ancak çimento fazlarının beton içerisinde belirlenmesi, hidratasyon ürünlerinin amorf yapıda olması nedeniyle zorluk arz edebilir ve bu durum, difraksiyon desenlerinde belirgin olmayan kırılma tepeleri ile sonuçlanabilir. Ayrıca agregalarda bulunan minerallerin oluşturduğu pikler, betonun XRD ile analizini karmaşık hale getirebilmektedir. Geçmişte çimentonun nicel faz analizinde XRD kullanımına ilişkin bazı sınırlamalar bulunsada, günümüzde gelişmiş bilgisayarlı difraktometre sistemleri sayesinde bu analizler daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, XRD yöntemi puzolanik malzemelerdeki

camsı yapıların miktarının belirlenmesi, hidrasyon derecesinin izlenmesi ve çimento esaslı bağlayıcılarda mekanik dayanımın öngörülmesi gibi pek çok uygulama alanına sahiptir (Winter, 2012).

X-ışını kırınımı (XRD), çimento içerisindeki kristal fazların doğrudan tespiti açısından etkili bir analiz yöntemidir. Ancak, kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) zayıf kristalli yapıları ve düzensiz dağılım eğilimleri, özellikle de kalsiyum hidroksitin düzensiz şekilde oluşumu ile etkileşimleri, çimento ve harçların hidrasyon sürecinde bu fazların net şekilde tanımlanmasını güçleştirmektedir. Bunun yanı sıra, agregalarda bulunan minerallerin oluşturduğu difraksiyon pikleri de XRD analizinde yorumlamayı karmaşık hale getirebilir. Kristal fazların tespit edilebilirliği, analiz edilen yüzeyin yapısal özelliklerine ve kristalografik düzene bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, kuvars gibi fazlar için teorik olarak %0,1 gibi düşük oranlarda bile tespit mümkünken, çimento hidrasyon ürünlerinin çoğu için güvenilir bir faz tayini genellikle %5'in üzerindeki miktarlar gerektirmektedir. Genel bir kılavuz olarak, XRD analizinde bir fazın içeriği %2'nin altında olduğunda, tespitinde ciddi güçlükler yaşanabilmektedir (Uzbaş, 2019; Cullity & Stock, 2001; Klug & Alexander, 1974; Pecharsky & Zavalij 2009).

Çimento hidrasyonu üzerine yapılan araştırmalar, geleneksel XRD analizlerinin ötesine geçerek, sinkrotron kaynaklı enerji dağıtıcı XRD teknikleriyle daha kapsamlı hale getirilmiştir. Bu gelişmiş yöntem, özellikle etrenjit oluşumu, kalsiyum alüminat hidratların hızlı faz dönüşümleri ve erken reaksiyon süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi gibi konularda detaylı analiz imkânı sunmaktadır. Ayrıca XRD, uçucu kül ve cüruf gibi puzolanik malzemelerde bulunan camsı yapıların karakterizasyonunda da kullanılmaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar, cüruf içeriğinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koyarak, bu katkı maddesinin çimento performansı açısından önemini vurgulamıştır.

Portland çimentosu hamurunda C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) miktarı, genellikle reaksiyona girmemiş çimento partikülleri ve kalsiyum hidroksit (CH) gibi bileşenlerin kantitatif X-ışını kırınımı (XRD) ile belirlenmesi gibi dolaylı yöntemler kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Ancak, C-S-H fazı hem amorf yapısı hem de belirsiz kimyasal bileşimi nedeniyle doğrudan ölçüm açısından büyük zorluklar yaratmaktadır. CH ile

mineral katkı maddeleri arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar, C-S-H oluşumuna neden olur; fakat bu süreçler dolaylı yöntemlerle kolaylıkla tespit edilemez çünkü hem C-S-H üretimi hem de değişken oranlarda kalsiyum tüketimi söz konusudur. Ayrıca, mineral katkı maddeleri kullanıldığında elde edilen C-S-H'nin Ca/Si oranı, saf çimento hamurunda oluşan C-S-H'ye kıyasla daha düşük olmaktadır (Uzbaş, 2019; Cullity & Stock, 2001; Klug & Alexander, 1974; Pecharsky & Zavalij 2009).

X-ışını kırınımı (XRD), çimento hamurunda hidratasyona uğramamış fazların nicel olarak belirlenmesine olanak tanıyan, hidratasyon derecesinin doğrudan ölçümüne yönelik etkili bir yöntemdir. Bununla birlikte, hidratasyon derecesi dolaylı olarak da belirlenebilir; bu amaçla hidratasyon ısısı, kimyasal olarak bağlanmış su miktarı, basınç dayanımı ve doymuş numunelerdeki kimyasal büzölmeye bağlı özgül hacim değişimi gibi çeşitli özellikler ölçülmektedir. Ancak, ürün özellikleri ile XRD aracılığıyla belirlenen gerçek hidratasyon derecesi arasında güvenilir bir ilişki kurmak çoğu zaman dolaylı yöntemlerin destekleyici olarak kullanılmasını gerektirmektedir (Uzbaş, 2019; Cullity & Stock, 2001; Klug & Alexander, 1974; Pecharsky & Zavalij 2009).

3.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Çalışma kapsamında üretilen betonların SEM görüntülerini Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (YUTAM) çekilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı, X-ışını mikro analizi ve dijital görüntü analizine olanak tanıyan donanımı sayesinde, bir numune üzerinde üç temel işlemin gerçekleştirilmesine imkân sağlar. Bu işlemler; SEM görüntüleri aracılığıyla numunenin mikroyapısının incelenmesi, X-ışını mikro analizi yoluyla kimyasal bileşenlerin belirlenmesi ve dijital görüntü analizi ile boyutsal ölçümlerin gerçekleştirilmesidir (Winter, 2012; Goldstein et al. 2017).

Çoğu taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek vakum koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak bazı SEM cihazları, düşük basınç altında hava ortamında çalışabilen özel bir bölmeye sahiptir ve bu tür cihazlar genellikle çevresel SEM

(ESEM) olarak adlandırılır. ESEM kullanımının iki temel avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, ESEM odasında bulunan hava, numune yüzeyinin yüzeysel yüklenmesini (şarj olmasını) önlemeye yardımcı olur. İkinci olarak ise, düşük basınçlı çalışma koşulları, nemli ya da ıslak numunelerin gözlemlenmesine olanak tanır (Winter, 2012; Goldstein et al. 2017).

Standart bir taramalı elektron mikroskobu (SEM), analiz edilecek numunenin iletken olmasını gerektirir. Örneğin, demir gibi bazı malzemeler doğal olarak yüksek iletkenliğe sahiptir ve herhangi bir ek işleme ihtiyaç duyulmaz. Ancak numune iletken değilse, elektron ışını yüzeye çarptığında negatif yük birikimi meydana gelir ve bu durum, elektron demetinin yüzeyden yansıtılmasına yol açarak görüntü kalitesini bozar ya da görüntü alınmasını tamamen engeller. Çimento ve beton gibi iletken olmayan malzemelerde bu sorunu önlemek amacıyla, numune yüzeyine ince bir iletken kaplama uygulanır. Bu kaplama genellikle karbon, altın ya da altın-paladyum alaşımı gibi malzemelerden oluşur (Winter, 2012; Goldstein et al. 2017).

Çevresel taramalı elektron mikroskobu (ESEM) ile yapılan incelemelerde, numunenin etrafındaki hava ortamı yük dağılımını sağlar, bu nedenle numune üzerine iletken bir kaplama uygulamaya gerek yoktur. Bu, örneğin bir beton parçasının kırılma yüzeyinin doğrudan bölmeye yerleştirilip, herhangi bir kaplama yapılmadan incelenebilmesi anlamına gelir. Kaplama, SEM görüntülerindeki ince detayları gizleyebilir ve numunenin enerji dispersif X-ışını (EDX) spektrumlarını etkileyebilir; dolayısıyla ESEM kullanımı, bu tür sorunların önüne geçilmesi açısından avantajlıdır (Winter, 2012; Goldstein et al. 2017).

Çimento bazlı numunelerin özellikle erken yaşlardaki kırılma yüzeylerinin morfolojik analizinde ESEM kullanımı önemli avantajlar sunmaktadır. ESEM cihazı, SEM ile karşılaştırıldığında daha karmaşık bir yapıya sahip olup, yüksek düzeyde uzmanlık ve beceri gerektiren bir ekipmandır. Sertleşmiş beton araştırmalarında ise, genellikle parlatılmış kesitlerin incelenmesinde normal SEM tercih edilmektedir (Winter, 2012; Goldstein et al. 2017).

Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), malzeme yüzeylerinin morfolojik özelliklerinin yanı sıra kimyasal bileşimlerinin de incelenmesine olanak tanıyan gelişmiş bir karakterizasyon yöntemidir. Günümüzde birçok SEM sistemi, elektron demeti ile uyarılan numuneden yayılan karakteristik X-ışınlarını algılayabilen Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) dedektörleri ile entegre olarak çalışmaktadır. SEM-EDS tekniği, beton deneylerine yönelik klasik standart test yöntemleri arasında yer almamakla birlikte, bu alanda kullanılan nispeten modern bir inceleme yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Yüksek çözünürlük, geniş büyütme aralığı ve büyük alan tarama yetenekleri sayesinde SEM, yüzey dokularının üç boyutluya yakın görselleştirilmesini mümkün kılmakta ve çimento ile beton esaslı malzemelerin detaylı analizlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Bu yöntem, çimento ve agreganın su ile etkileşimi sonucunda oluşan temel mikro yapının açıklanmasında önemli katkılar sunar. Ayrıca betonun mekanik davranışı, boşluk yapısının dağılımı, hidrate çimento matrisinin gözeneklilik özellikleri ve farklı puzolanik katkıların reaksiyon süreçleri mikroskobik ölçekte değerlendirilebilmektedir. SEM görüntüleri, malzemede meydana gelen yapısal bozulmaların nedenlerini, boyutlarını ve oluşum mekanizmalarını ortaya koymada da etkili bir araçtır. Elde edilen mikrografların kalitesi ise büyük ölçüde cihazın çözünürlük kapasitesine ve farklı fazların arka plandan ayırt edilmesini sağlayan yeterli görüntü kontrastına bağlıdır (Uzbaş, 2019; Goldstein ve ark., 2017).

3.2.8. Isıl işlem

Üleksit ve tinkal, kül fırınında 650 °C'de 6 saat susuzlaştırma işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonucunda, tinkal ve üleksit cevherlerinin ağırlık farkları alınarak içeriğinde bulunan kimyasal bağlı su giderimi oranı hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre her iki cevherde %98 oranında su giderimi gerçekleştirilmiştir.

Tinkal ve üleksite ait kimyasal analiz sonuçlarına göre tinkalin %47,2 üleksitin %35,4 H₂O içerdiği bilinmektedir. Ağırlık farkı hesaplamaları sonucu H₂O içerikleri ısıtıl işlem sonrasında %1 seviyelerine düşürülerek deneylerde kullanılmıştır (Ayşen, 2022; Ataç, 2024).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

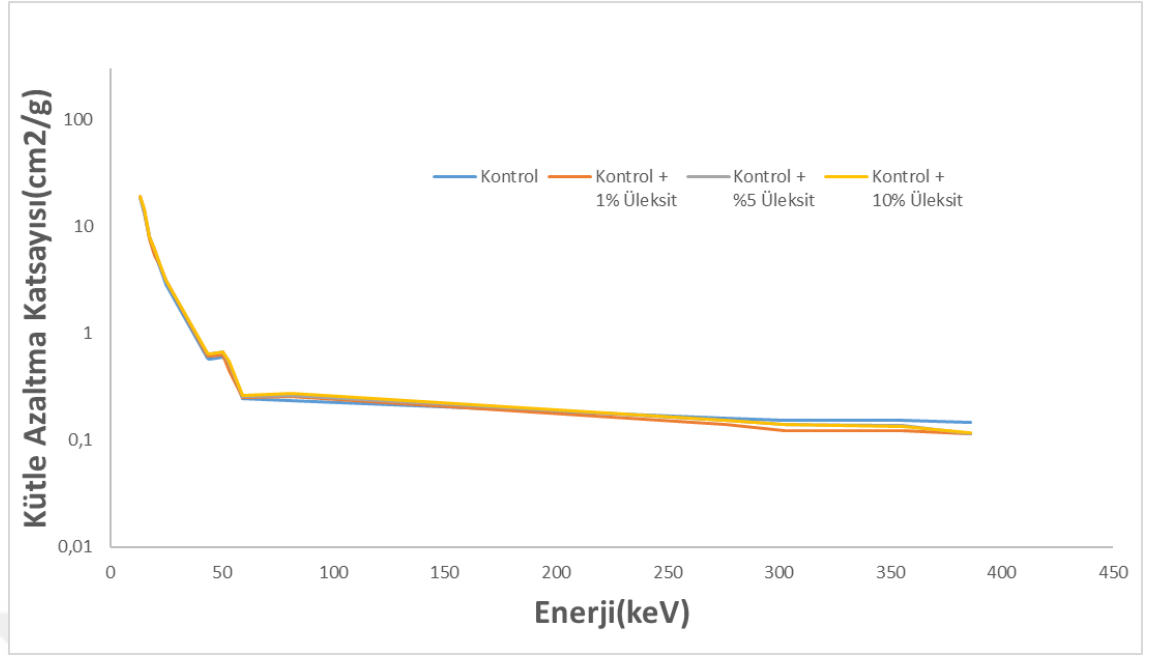
Çimento, Çimento ile %1, %5, %10 Üleksit ve Tinkal karışımları incelenmiş, bunlara ait Nötron ve Gama soğurmaları değerleri aşağıda verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde en iyi değerlerin %5 Üleksit ve Tinkal olduğu belirlenmiş bu değerler doğrultusunda SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Ayrıca en iyi soğurma değerlerini veren numunelerin Serbest basınç deneyleri incelenmiş yapı malzemesi olabilirliği değerlendirilmiştir.

4.1. Üleksit Katkılı Çimentonun Gama Soğurma Deneyleri

Karışımlara ait numunelerinin kütle azaltma katsayıları (μ/ρ) Tablo 4.1. ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Üleksit katkıli çimentonun kütle azaltma katsayıları (cm^2/g)

E (keV)	Kontrol	Kontrol + %1 Üleksit	Kontrol + %5 Üleksit	Kontrol + %10 Üleksit
13,375	18,7	19,1	18,9	19,1
14,98	13,5	14	14,2	14,5
17,443	8,02	7,67	7,96	8
19,607	5,6	5,4	6,09	6,16
22,103	4,16	4,4	4,43	4,44
24,942	2,87	3,10	3,11	3,13
43,737	0,580	0,616	0,647	0,656
44,47	0,575	0,610	0,642	0,647
50,391	0,596	0,632	0,663	0,673
53,155	0,521	0,452	0,525	0,546
59,537	0,243	0,248	0,257	0,263
81	0,236	0,257	0,261	0,275
276,39	0,160	0,141	0,153	0,154
302,85	0,154	0,122	0,140	0,142
356,01	0,153	0,124	0,136	0,135
385,851	0,148	0,114	0,115	0,118



Şekil 4.1. Üleksit katkılı çimentonun gama soğurma grafiği

Çalışmada, farklı oranlarda üleksit katkısı (1%, 5% ve 10%) içeren beton numunelerinin gama ışınlarına karşı kütle soğurma katsayısı (μ/ρ , cm^2/g) değerleri; 13,375 keV ile 385,851 keV arasındaki enerji seviyelerinde incelenmiştir.

Elde edilen veriler, kontrol numunesi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve aşağıda detaylı şekilde yorumlanmıştır.

Düşük Enerji Aralığı (13,375 – 25,942 keV): Bu enerji aralığında gama fotonlarının malzeme ile etkileşiminde fotoelektrik absorpsiyon baskın durumdadır. Tablo 4.1’de görüldüğü üzere, üleksit katkı oranı arttıkça bu enerji seviyelerinde soğurma katsayısı da artmaktadır. Örneğin: 13,375 keV’de kontrol numunesi için $\mu/\rho = 18,7 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken, %10 üleksit katkılı beton için bu değer $19,1 \text{ cm}^2/\text{g}$ ’ye yükselmiştir. Benzer şekilde, 24,942 keV’de kontrol grubu $2,87 \text{ cm}^2/\text{g}$ değeri sunarken, %10 üleksit katkısında bu değer $3,13 \text{ cm}^2/\text{g}$ olmuştur. Bu durum, üleksitin yapısında bulunan yüksek bor oranının, düşük enerjili gama ışınlarına karşı etkin bir soğurma sağlayarak gama ışını zayıflamasını artırdığını göstermektedir.

Orta Enerji Aralığı (43,737 – 81 keV): Bu bölgede, fotoelektrik absorpsiyon etkisi azalırken Compton saçılması daha baskın hâle gelmektedir. 50,391 keV’de kontrol

numunesi için $\mu/\rho = 0,596 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken, %10 üleksit katkısı ile bu değer $0,673 \text{ cm}^2/\text{g}$ seviyesine ulaşmıştır. 59,537 keV’de de benzer bir iyileşme söz konusudur: kontrol için $0,243 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan değer, %10 katkı ile $0,266 \text{ cm}^2/\text{g}$ ’ye çıkmıştır.

Bu sonuçlar, üleksitin sadece düşük enerjilerde değil, orta enerji aralıklarında da gama ışını soğurma etkinliğini artırdığını ortaya koymaktadır.

Yüksek Enerji Aralığı (276,39 – 385,851 keV): Bu bölgede çift etkileşim (pair production) henüz baskın olmamaktadır, ancak Compton saçılması hâkimdir ve genel olarak tüm malzemelerde soğurma katsayısı düşmektedir. Yüksek enerjide tüm numunelerde düşüş gözlenirse de, üleksit katkısı ile bu düşüş daha düşük bir seviyede kalmakta, yani soğurma performansı korunmaktadır.

Bu farklılıklar düşük görünse de, gama ışınlarının yüksek enerjili olduğu bu bölgelerde bile katkının etkisinin sürmesi, üleksitin yüksek yoğunluklu ve bor içeriği zengin bir yapı sunmasının bir göstergesidir.

4.2. Üleksit Katkılı Çimentonun Nötron Soğurma Deneyleri

Karışımlara ait numunelerinin Nötron soğurma deneyi sonuçlarının değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2’de, farklı oranlarda Üleksit katkısı içeren kompozit numunelere ait fiziksel özellikler ve radyasyon zayıflama parametreleri sunulmaktadır. Elde edilen veriler, Üleksit katkı oranının artmasıyla birlikte numunelerin radyasyon geçirgenliği ve zayıflama performanslarında meydana gelen değişimleri ortaya koymaktadır. I/I_0 oranları incelendiğinde, Üleksit katkısının artmasıyla birlikte bu oranda azalma gözlemlenmiştir. Kontrol numunesinde 0,875 olan I/I_0 oranı, %10 Üleksit katkısında 0,829’a düşmüştür. Bu durum, numunelerin radyasyonu daha fazla zayıflattığını ve Üleksit katkısının geçirgenliği azalttığını göstermektedir. Lineer zayıflama katsayısı (Σ), katkı oranına bağlı olarak anlamlı bir artış göstermektedir. Kontrol numunesinde $0,248 \text{ cm}^{-1}$ olan bu değer, %10 Üleksit katkısı ile $0,400 \text{ cm}^{-1}$ ’e ulaşmıştır. Benzer şekilde, kütlece zayıflama katsayısı (μ/ρ) da katkı oranı arttıkça artış göstermiş ve sırasıyla $0,136 \text{ cm}^2/\text{g}$ ’den $0,213$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

cm²/g değerine yükselmiştir. Bu artış, yoğunluktan bağımsız olarak malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesinin arttığını ifade etmektedir. Yoğunluk (ρ) değerleri de genel olarak katkı oranına paralel olarak artış eğilimindedir. Özellikle %5 Üleksit katkısı ile 1,9315 g/cm³'lük en yüksek yoğunluğa ulaşılmış, bu da lineer zayıflama katsayısındaki belirgin artışı desteklemektedir.

Tablo 4.2. Üleksit nötron soğurma deneyleri değerleri

Numune	Geçirilen Işın Şiddeti (I)	Bağıl Işın Şiddeti (I/I ₀)	Kalınlık (t,cm)	Kütle (M ,g)	Yoğunluk (ρ , g/cm ³)	Lineer Zayıflama Katsayısı Σ (cm ⁻¹)	Kütlece Zayıflama Katsayısı (Σ/ρ) cm ² /g
Kontrol	0,886	0,875	0,540	9,9676	1,8245	0,248	0,136
Kontrol + Üleksit %1	0,856	0,854	0,570	9,9815	1,7309	0,276	0,160
Kontrol + Üleksit %5	0,846	0,835	0,510	9,9659	1,9315	0,354	0,183
Kontrol + Üleksit %10	0,839	0,829	0,470	8,9180	1,8755	0,400	0,213

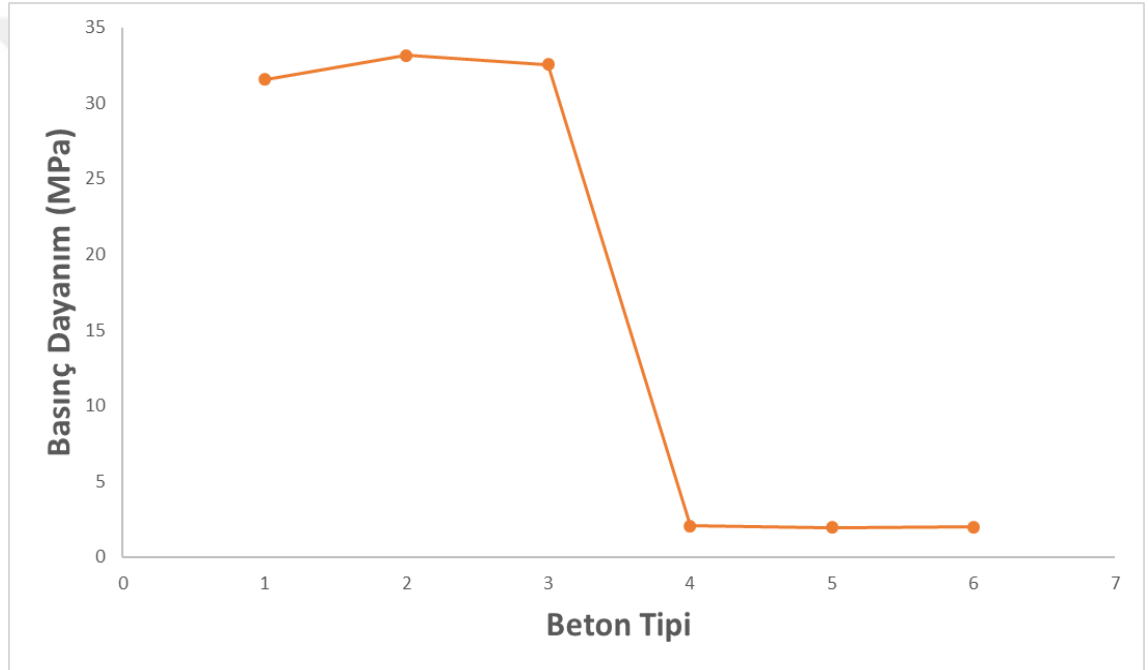
4.3. Üleksit Katkılı Çimentonun Serbest Basınç Deneyi

7 günlük doygun suda kür süresinden sonra her karışımdan 3'er adet numune alınarak basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Karışımlara ait numunelerinin basınç dayanım değerleri Tablo 4.3 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tabloda, kontrol grubu beton numuneleri ile %5 oranında Üleksit katkısı içeren beton numunelerinin 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. Elde edilen veriler, Üleksit katkısının betonun erken yaş mekanik performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

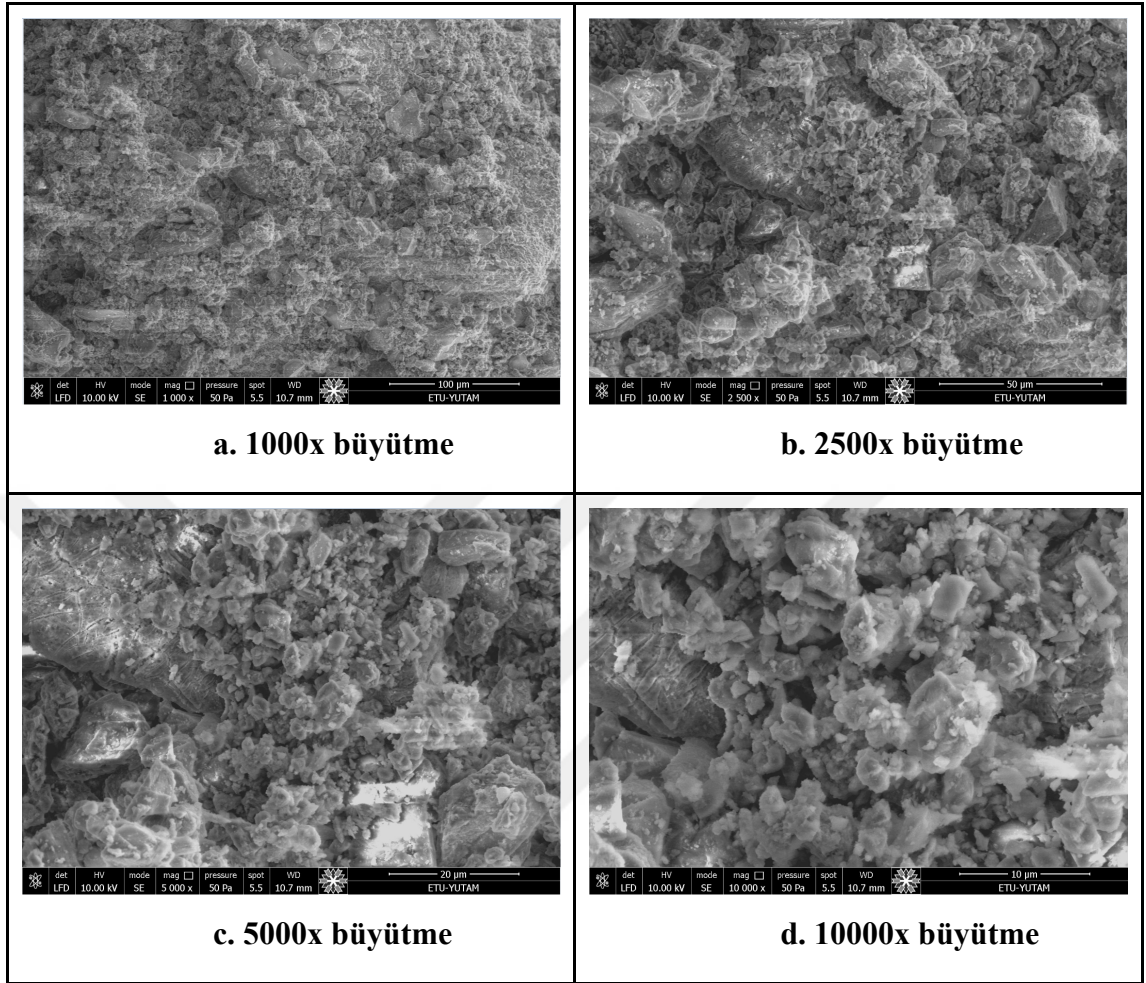
Tablo 4.3. Karışımların 7 günlük ortalama basınç dayanımları

Grup No	Beton Tipi	Basınç Dayanım MPA	Basınç Dayanım MPA Ortalama
1	Kontrol-1	31,54	32,4
2	Kontrol-2	33,14	
3	Kontrol-3	32,53	
4	Kontrol+Üleksit%5	2,05	1,99
5	Kontrol+Üleksit%5	1,94	
6	Kontrol+Üleksit%5	1,99	

**Şekil 4.2.** Karışım tipine göre basınç dayanımı (MPa)

Kontrol grubu numunelerinde 7 günlük ortalama basınç dayanımı 32,4 MPa olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, %5 oranında Üleksit katkısı içeren numunelerde bu değer 1,99 MPa seviyesine kadar düşmüştür. Söz konusu değerler, Üleksit katkısının betonun basınç dayanımı üzerinde son derece olumsuz bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Katkı sonrası basınç dayanımındaki azalma yaklaşık olarak %93,9 oranındadır.

4.4. SEM Analizi Bulguları (%5 Üleksit Katkılı Numune)



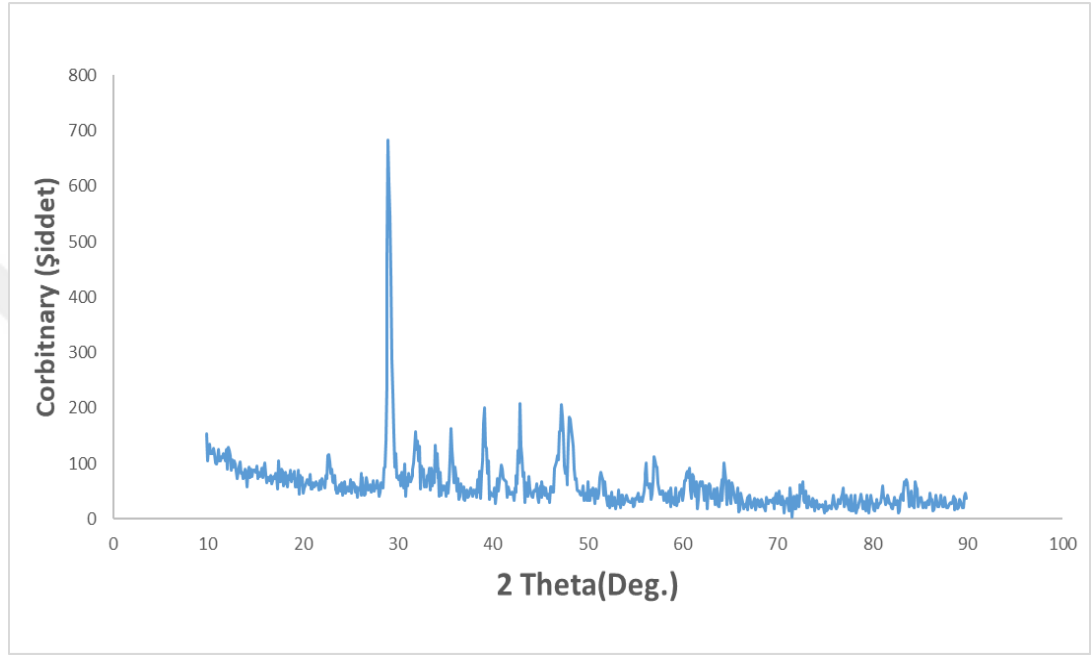
Şekil 4.3. Üleksit katkılı numunenin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

%5 Üleksit katkısı içeren çimento numunesine ait, 7 günlük kür süresi sonrası elde edilen SEM görüntüsü, malzemenin mikro yapısal karakteristikleri hakkında önemli veriler sunmaktadır. Görüntüler a’da 1.000x büyütme ve 100 µm ölçek çubuğu, b’de 2.500x büyütme ve 50 µm ölçek çubuğu, c’de 5.000x büyütme ve 20 µm ölçek çubuğu, d’de ise 10.000x büyütme altında elde edilmiştir ve 10 µm ölçek çubuğu içermektedir.

SEM görüntülerinde görüldüğü gibi literatürde belirtildiği üzere elde edilen mikro yapıların heterojen ve karmaşık tanecik yapısına sahip olduğu ve bu yüzden malzemenin davranışını temsil bakımından mikro yapının karakteristik bir modelle tanımlanması söz konusu değildir. Genel olarak 2-10 mikron arasında değişen boyutlarda tanecikler gözlenmektedir.

Beton içerisine katılan bileşik yapıların nicelik olarak çok düşük olması nedeniyle betonun mikro yapısı üzerinde baskın etki yapmadığı, dolayısıyla katkılı tüm numunelerin benzer mikro yapılar sergilediği anlaşılmaktadır.

4.5. XRD Analizi Değerlendirmesi (%5 Üleksit Katkılı Numune)



Şekil 4.4. %5 Üleksit katkılı numunenin XRD analizi

Şekil 4.4'te sunulan X-ışını kırınımı (XRD) spektrumu, %5 oranında Üleksit katkısı içeren beton numunesine aittir. XRD analizi, numunenin kristal yapısını, mevcut fazları ve katkı maddesinin çimento matrisindeki davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Grafikte, yaklaşık 28–30° (2θ) civarında belirgin ve yüksek yoğunluklu bir pik gözlemlenmiştir. Bu keskin tepe, örnekte kristalin yapının baskın olduğunu göstermektedir. Bu tür pikler genellikle kuvars (SiO₂) veya benzeri silikat fazlara karşılık gelmektedir. Piklerin bu denli yoğun ve dar yapıda olması, söz konusu fazların yüksek oranda kristalleşmiş olduğunu göstermektedir. Spektrumun 40°-55° aralığında çok sayıda orta şiddette kırınım tepe noktası bulunmaktadır. Bu çoklu faz yapısı, numunede birden fazla kristalin fazın bulunduğuna işaret etmektedir. Bu fazların çimento ürünleri (örneğin kalsit, portlandit) ya da Üleksit mineralinden kaynaklanan yapılar olması muhtemeldir. Zemin seviyesindeki düzensiz sinyal ve düşük şiddetli bölgeler ise, sistemde amorf yapıda bileşenlerin de bulunduğunu göstermektedir. Bu

durum, beton içerisinde kristal fazların yanı sıra hidratasyonun tam olarak gerçekleşmemiş veya kısmen kristalleşmiş bölgelerin de mevcut olabileceğini düşündürmektedir. Zira 650°C’ de gerçekleştirilen ısıt işlemlerde sıcaklığa bağlı olarak katıdaki kristal suyunun bir kısmı uzaklaşır ve gözenekli bir yapı oluşur. Kalsine edilmiş üleksit cevheri çimento ile karıştırıldığı zaman bu çatlak veya boşluklardan katı iç kısımlarına doğru daha kolay bir şekilde nüfuz edebilmektedir. Fakat ısıt işlem sırasında görülen kısmi sinterleme nedeniyle gözeneklerde tıkanmalarda oluşabilmekte, yapı amorf bir yapıya dönüşmektedir.

4.6. Tinkal Katkılı Çimentonun Gama Soğurma Deneyleri

Karışımlara ait numunelerinin kütle azaltma katsayıları (μ/ρ) değerleri Tablo 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.4’da, farklı Tinkal katkı oranlarına (%1, %5 ve %10) sahip numunelere ait foton enerjisine (E, keV) karşılık gelen lineer zayıflama katsayıları sunulmaktadır. Veriler, malzemenin elektromanyetik radyasyonla etkileşimi bağlamında değerlendirildiğinde, katkı maddesi içeriğinin artmasıyla birlikte lineer zayıflama katsayısının sistematik biçimde azaldığı görülmektedir. Bu durum, Tinkal katkısının artmasıyla malzemenin foton soğurma kapasitesinin azaldığını ortaya koymaktadır.

Düşük Enerji Aralığı (13,375 – 25,942 keV): Tinkal katkısı, lineer zayıflama katsayısı üzerinde daha belirgin bir etki göstermektedir. Örneğin, 13,375 keV enerjide, katkısız kontrol numunesi 18,7 değeri gösterirken, %10 Tinkal katkılı numunede bu değer 17,8’e düşmektedir. Bu durum, Tinkal katkısının özellikle düşük enerjili fotonların malzeme içindeki etkileşimini sınırladığını göstermektedir.

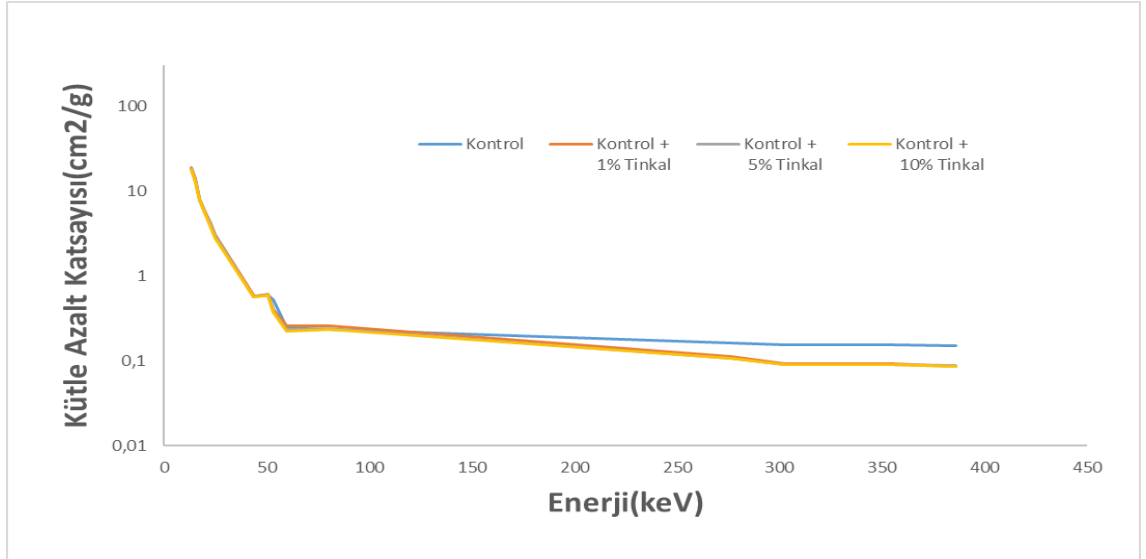
Orta Enerji Aralığı (43,737 – 81 keV): Tinkal Katkı etkisi devam etmekle birlikte farklar daha sınırlı seviyelerdedir. Bu aralıkta katkı oranındaki artış, lineer zayıflama katsayısında hafif bir azalmaya yol açmıştır.

Yüksek Enerji Aralığı (276,39 – 385,851 keV): Tinkal katkı etkisi minimal düzeye ulaşmış ve ölçülen katsayılar arasındaki fark oldukça azalmıştır.

Tablo 4.4. Çimento ve Tinkal katkılı numunelerin kütle azaltma katsayıları (cm²/g).

E (keV)	Kontrol	Kontrol + %1 Tinkal	Kontrol + %5 Tinkal	Kontrol + %10 Tinkal
13,375	18,7	18,6	18,4	17,8
14,98	13,5	13,6	12,9	12,7
17,443	8,02	7,95	7,71	7,70
19,607	5,6	5,77	5,63	5,53
22,103	4,16	4,34	4,33	3,91
24,942	2,87	3,05	2,95	2,77
43,737	0,580	0,589	0,570	0,568
44,47	0,575	0,583	0,573	0,562
50,391	0,596	0,605	0,598	0,586
53,155	0,521	0,400	0,379	0,375
59,537	0,243	0,260	0,232	0,222
81	0,236	0,256	0,240	0,233
276,39	0,160	0,113	0,107	0,107
302,85	0,154	0,091	0,089	0,090
356,01	0,153	0,091	0,090	0,090
385,851	0,148	0,085	0,087	0,086

Genel bir değerlendirme yapıldığında, Tinkal katkısının çimento esaslı kompozit malzemelerin foton absorpsiyon özelliklerinde değişim oluşturduğu ve bu değişimin foton enerjisiyle ilişkili olarak farklılık gösterdiği gözlemlenmektedir. Özellikle düşük enerjili fotonlar söz konusu olduğunda, Tinkal oranındaki artışın malzemenin foton soğurma kapasitesinde azalmaya yol açtığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, Tinkal katkısının radyasyona karşı geçirgenlik özellikleri ve yapısal zırhlama uygulamalarındaki potansiyel rolüne dair önemli ipuçları sunmaktadır.



Şekil 4.5. Tinkal gama soğurma deneyleri değerleri

4.7. Tinkal Katkılı Çimentonun Nötron Soğurma Deneyleri

Karışımlara ait numunelerinin Nötron soğurma deneyi sonuçlarının değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 Tinkal nötron soğurma deneyi sonuçları

Numune	Geçirilen Işın Şiddeti (I)	Bağlı Işın Şiddeti (I/I ₀)	Kalınlık (t,cm)	Kütle (M ,g)	Yoğunluk (ρ, g/cm ³)	Lineer Zayıflama Katsayısı Σ (cm ⁻¹)	Kütlece Zayıflama Katsayısı (Σ/ρ) cm ² /g
Kontrol	0,886	0,875	0,540	9,9676	1,8245	0,248	0,136
Kontrol + Tinkal %1	0,856	0,845	0,540	9,8815	1,8087	0,313	0,173
Kontrol + Tinkal %5	0,846	0,839	0,540	9,9705	2,1424	0,381	0,178
Kontrol + Tinkal %10	0,839	0,830	0,540	9,3464	1,8476	0,373	0,202

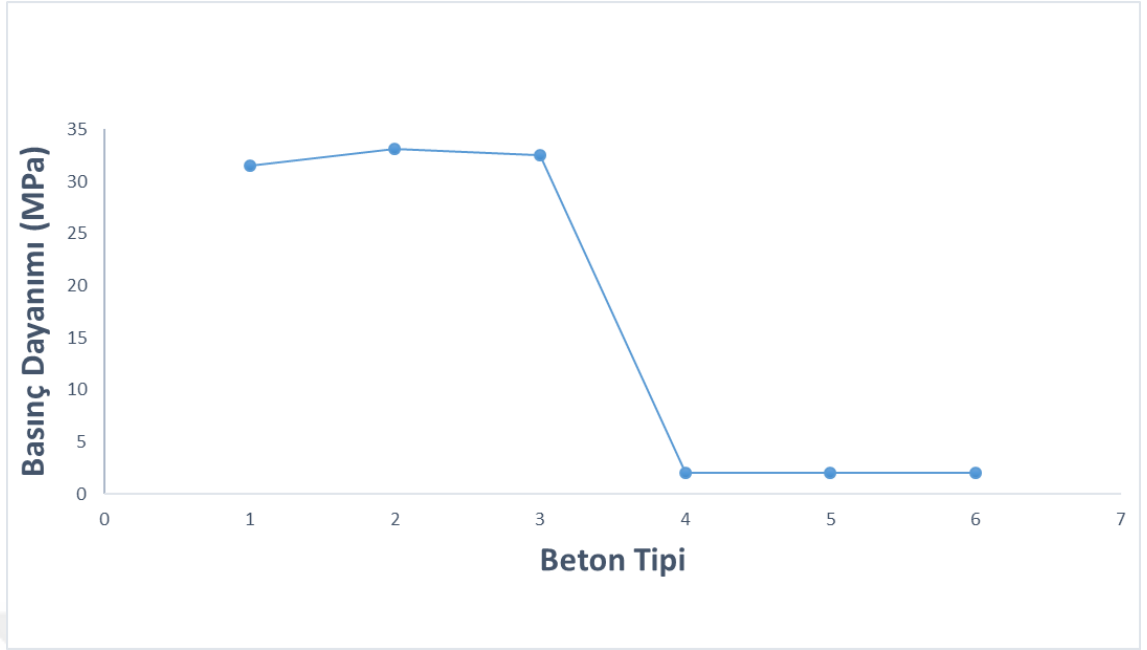
Tablo 4.5'teki veriler, Tinkal katkısının çimento esaslı numunelerin nötron zayıflama davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Tinkal katkı oranı arttıkça, geçirilen ışın şiddetinde azalma gözlemlenmekte, bu da malzemenin nötronlara karşı daha etkin bir zayıflatıcı özellik kazandığını göstermektedir. Özellikle %5 ve %10 Tinkal ilavelerinde bağıl ışın şiddeti daha düşük değerlere ulaşmakta ve buna paralel olarak lineer zayıflama katsayısı anlamlı biçimde artmaktadır. Bu durum, nötronların malzeme içindeki etkileşimlerinin arttığını ve zayıflama kapasitesinin yükseldiğini göstermektedir. Yoğunluk değerlerindeki değişim, katkı oranına bağlı olarak dalgalanma göstermekte, özellikle %5 Tinkal katkısında en yüksek yoğunluk değeri kaydedilmiştir. Bu artış, nötronların saçılması ve soğurulması açısından zayıflama performansına katkı sağlayabilir. Kütlece zayıflama katsayısındaki artış da bu durumu destekler niteliktedir. Sonuç olarak, Tinkal katkısı, nötron radyasyonuna karşı çimento bazlı kompozitlerin zayıflatıcı performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir.

4.8. Tinkal katkılı çimentonun serbest basınç deneyi

7 günlük doygun suda kür süresinden sonra her karışımdan 3'er adet numune alınarak basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Karışımlara ait numunelerinin ortalama basınç dayanım değerleri Tablo 4.6 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Karışımların ortalama basınç dayanımları

Grup No	Beton Tipi	Basınç Dayanım MPA	Basınç Dayanım MPA Ortalama
1	Kontrol-1	31,54	32,4
2	Kontrol-2	33,14	
3	Kontrol-3	32,53	
4	Kontrol+Tinkal %5	2,01	2,02
5	Kontrol+Tinkal%5	2,02	
6	Kontrol+Tinkal%5	2,03	



Şekil 4.6. Karışım tipine göre basınç dayanımı (MPa)

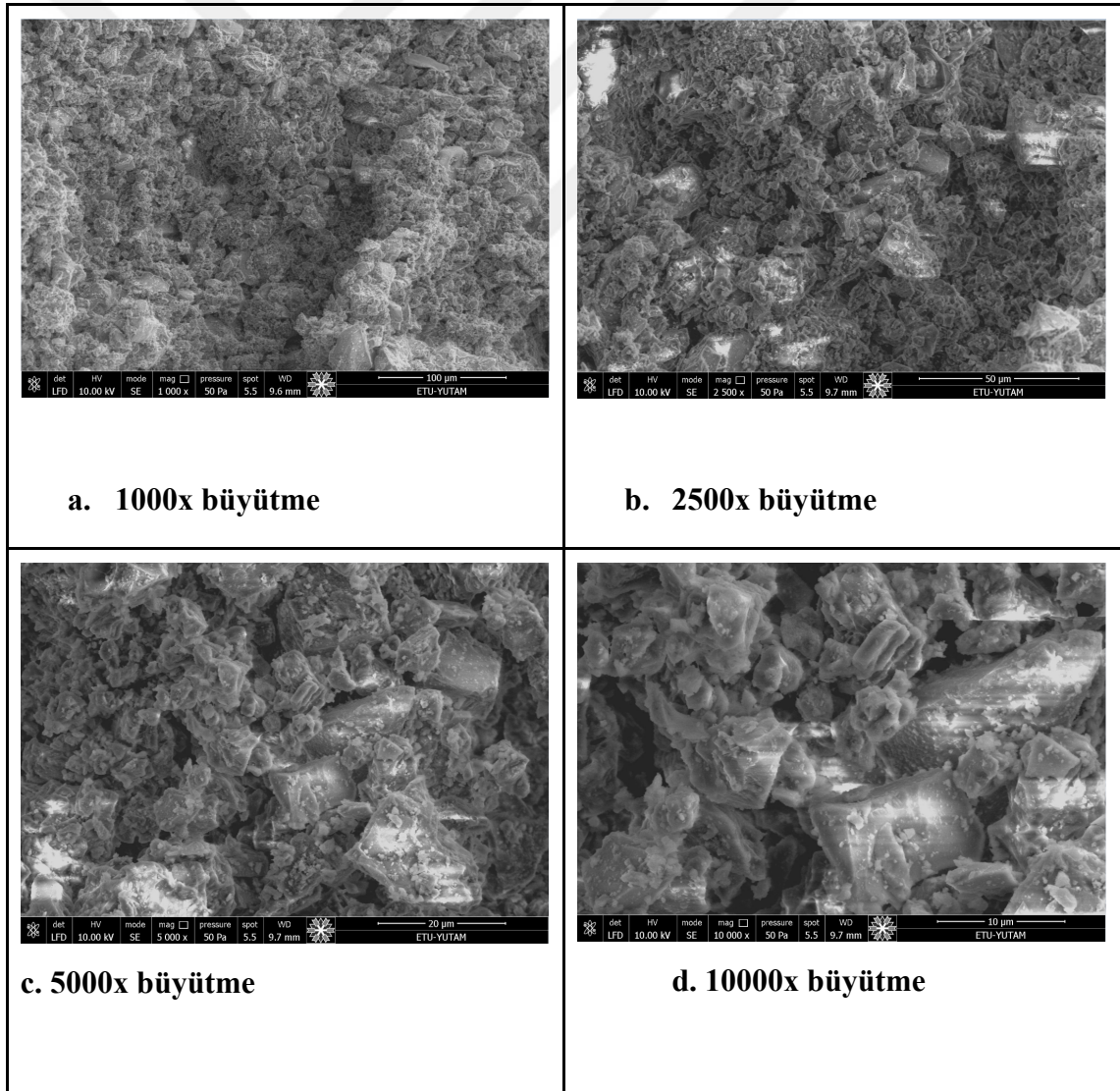
Tablo 4.6'deki veriler, %5 oranında Tinkal katkısı içeren çimento esaslı beton örneklerinin basınç dayanımı performanslarının kontrol grubu ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kontrol grubu numunelerinde ortalama basınç dayanımı 32,4 MPa olarak belirlenmişken, aynı koşullarda hazırlanmış Tinkal katkılı beton numunelerinde bu değer yalnızca 2,02 MPa seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, Tinkal katkısının erken yaşlarda mekanik dayanım üzerinde belirgin şekilde olumsuz etki yarattığını göstermektedir.

Bu ölçüdeki önemli dayanım kaybı, Tinkal'in çimento hidratasyon sürecine müdahale ettiğini veya bağlayıcı matrisin oluşumunu olumsuz etkilediğini düşündürmektedir. Muhtemel nedenler arasında Tinkal'in kimyasal bileşiminin çimento ile reaktif uyumsuzluğu ya da hidratasyon ürünlerinin gelişimini inhibe eden bir rol oynaması yer almaktadır. Elde edilen bulgular, Tinkal'in sadece foton veya nötron zayıflatıcı potansiyeli açısından değil, aynı zamanda betonun yapısal performansı üzerindeki etkileri bakımından da kapsamlı olarak incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.9. SEM Analizi Bulguları (%5 Tinkal Katkılı Numune)

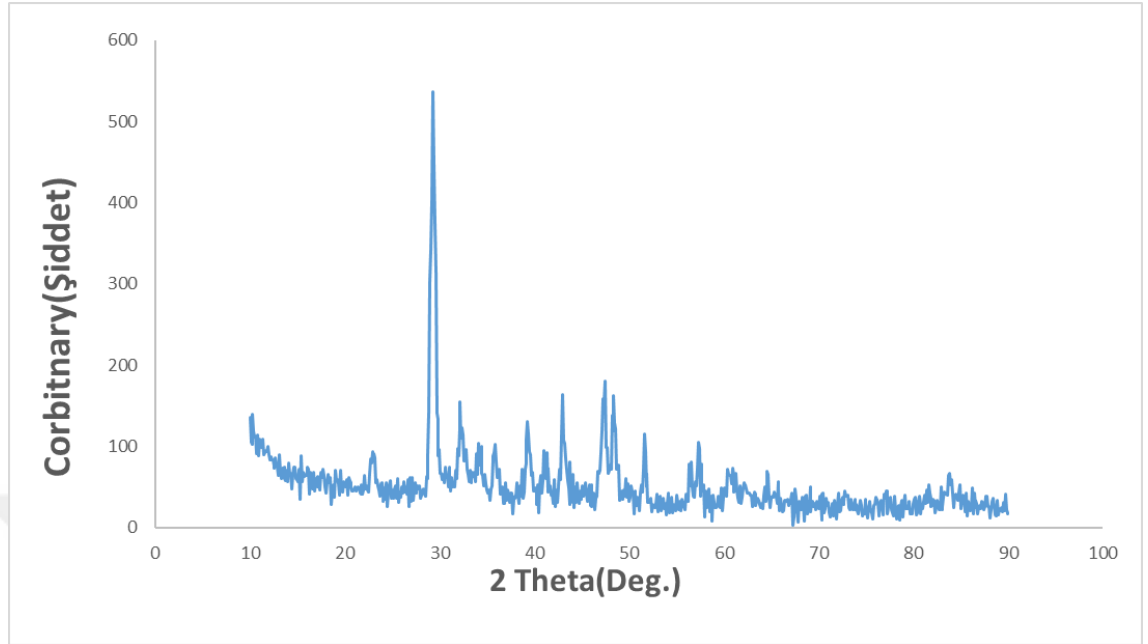
%5 Tinkal katkısı içeren çimento numunesine ait, 7 günlük kür süresi sonrası elde edilen SEM görüntüsü, malzemenin mikro yapısal karakteristikleri hakkında önemli veriler sunmaktadır. Görüntüler a’da 1.000x büyütme ve 100 µm ölçek çubuğu, b’de 2.500x büyütme ve 50 µm ölçek çubuğu, c’de 5.000x büyütme ve 20 µm ölçek çubuğu, d’de ise 10.000x büyütme altında elde edilmiştir ve 10 µm ölçek çubuğu içermektedir.

SEM görüntülerinde, tinkal cevher yapısının genellikle kısa prizmatik kristalli, kısmen levhamsı ve yassı kristalli olduğu, tanelerin ise düzgün yüzeyli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Tinkal katkıli numunenin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüsü

4.10. XRD Analizi Değerlendirmesi (%5 Tinkal Katkılı Numune)



Şekil 4.8. %5 Tinkal katkılı numunenin XRD analizi

%5 Tinkal katkılı çimento numunesine ait X-ışını kırınım (XRD) deseni, numunenin kristal yapısını ve mineralojik bileşimini belirlemeye olanak tanımaktadır. Grafikte, 2θ açısına karşılık gelen şiddet (yoğunluk) değerleri sunulmakta olup, bu veriler numune içerisindeki kristal fazların tanımlanmasında kullanılmaktadır.

Tinkal cevherinin XRD spektrumunda yer alan ve belirgin piklere karşılık gelen düzlemlerde tinkal, dolomit, smektit ve kalsit görülmektedir. Elde edilen difraktogram, yaklaşık $29^\circ 2\theta$ açısında belirgin bir şekilde gözlemlenen yüksek yoğunluklu pik, numune içerisinde Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve kalsit (CaCO_3) fazının baskın olarak bulunduğunu ortaya koymaktadır. Kalsit, çimento matrisinde yaygın olarak görülen bir bileşen olup, bu fazın varlığı ya klinker yapısından ya da çimento matrisinin karbonatlaşma süreci sonucu oluşmuş olabilir. Ayrıca, $32\text{--}34^\circ 2\theta$ aralığında gözlenen diğer yoğun pikseller, çimento hidratasyon ürünleri olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve ettringite fazlarının varlığını işaret etmektedir.

Grafikte düşük şiddetle ancak ayırt edilebilir düzeyde tespit edilen bazı pikseller, katkı maddesi olarak kullanılan Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) mineraline ait kristal yapının

X-ışını yansımaları ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, katkı malzemesinin çimento matrisinde fiziksel ya da kimyasal formda korunduğunu ve yapıya entegre olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 40° ile 50° 2θ aralığında ortaya çıkan difraksiyon pikselleri, Tinkal'ın çimento hidrasyon ürünleri ile etkileşime girerek yeni mineral fazların oluşumunu tetiklemiş olabileceğini düşündürmektedir.

Elde edilen bu veriler, %5 oranında Tinkal katkısının çimento matrisinde belirli kristal fazların oluşumuna yol açtığını ve bu yolla çimentonun mikroyapısında yapısal değişiklikler meydana getirebileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür yapısal değişimler, çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini (örneğin basınç dayanımı, dayanıklılık ve geçirimsizlik) doğrudan etkileyebilecek bir potansiyel taşımaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Balıkesir–Bigadiç bölgesinden elde edilen tinkal ve üleksit cevherleri üzerinde çeşitli deneysel yöntemler uygulanarak bu minerallerin gama ve nötron soğurma kapasiteleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, farklı parametreler altında Gama ve Nötron Soğurma Deneyleri, Basınç Testleri ile birlikte Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tinkal ve üleksit cevherlerinin radyasyon soğurma özellikleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

Tinkal ve üleksit cevherlerinin farklı oranlarda katkılanmasıyla oluşturulan kompozit numunelerin gama radyasyonu soğurma kapasiteleri deneysel olarak incelenmiştir. 13,375 keV ile 385,851 keV arasındaki enerji düzeylerinde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, özellikle düşük ve orta enerji aralıklarında katkı maddelerinin radyasyon geçirgenliği üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.

Üleksit katkılı numunelerin genel olarak Tinkal katkılı ve referans numunelere kıyasla daha düşük gama ışını geçirgenliği sergilediği, dolayısıyla zayıflatma performanslarının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Katkı oranının artışıyla birlikte üleksit mineralinde soğurma katsayısında artma gözükürsen, tinkal cevherinde azalma eğilimi gözlemlenmiş, bu durum yüksek enerjili gama ışınları karşısında daha az belirgin hâle gelmiştir.

Elde edilen bulgular, üleksit cevherlerinin belirli oranlarda katkı olarak çimentoya katıldığında gama radyasyonuna karşı etkili zayıflatıcı malzeme olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu açıdan, söz konusu mineralin nükleer güvenlik, radyasyon koruma ve yapı malzemelerinde değerlendirilme potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Üleksit cevherlerinin farklı oranlardaki katkılarla gama radyasyonu karşısındaki zayıflatma performanslarının ortaya konulması, bu doğal mineralin radyasyon koruma uygulamalarında alternatif zırhlama malzemesi olarak değerlendirilebileceğini

göstermektedir. Bu bulgu, özellikle kurşun gibi toksik ve çevresel açıdan zararlı materyallere olan bağımlılığı azaltabilecek çevre dostu çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlar.

Tinkal ve üleksit katkılı çimento numunelerinin nötron soğurma kapasiteleri incelendiğinde, her iki cevherinde numunelerdeki miktarlarının artışıyla nötron soğurma kapasitesinin anlamlı bir biçimde arttığı, bunun da nötron soğurma malzemesi olarak her iki cevherinde kullanılabileceği sonucunu doğurduğu söylenebilir.

Türkiye'nin önemli bor rezervlerinden biri olan Bigadiç bölgesinden temin edilen tinkal ve üleksit cevherlerinin değerlendirilmesi, yerli maden kaynaklarının katma değerli ürünlere dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, hem ekonomik açıdan sürdürülebilirliği desteklemekte hem de dışa bağımlılığın azaltılması yönünde stratejik bir katkı sunmaktadır.

Geniş bir enerji aralığında elde edilen zayıflatma katsayıları, yeni nesil radyasyon kalkanlama malzemelerinin tasarımı ve geliştirilmesinde kullanılabilecek önemli bir veri tabanı oluşturmaktadır. Bu veriler, ileri düzey araştırmalara temel teşkil etmesi açısından bilimsel literatür için referans niteliğindedir.

Doğal minerallerin kullanımıyla geliştirilen zayıflatıcı kompozitlerin, toksik atık üretimini minimize etmesi, çevre dostu malzeme teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir mühendislik uygulamaları kapsamında değerlendirilebilir.

Bu çalışma, başta lisansüstü tez çalışmaları olmak üzere, malzeme bilimi, radyasyon fiziği ve nükleer mühendislik alanlarında yürütülecek ileri düzey araştırmalar için kaynak teşkil edebilecek niteliktedir. Ayrıca, deneysel veri setleri ileride yapılacak karşılaştırmalı çalışmalar için temel oluşturabilir.

KAYNAKLAR

- Akçaalan, U. (2015). *Farklı Maddelere Katkılanmış Beton Malzemelerin Gama Soğurma Katsayılarının Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi* (Tez No. 398580) [Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi-Afyon]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Akkaş, A. (2015). *Alüminyum-Bor-Karbür Kompozit Malzemelerin Radyasyon Karşısındaki Davranışının Belirlenmesi, XCom Bilgisayar Programı İle İncelenmesi Ve Yeni Bir Hibrit Kompozit Radyasyon Zirh Malzemesi Önerisi* (Tez No. 416857) [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi-İstanbul]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Akkurt, I. Gündoğdu, K., Başığit, C., Akkaş, A. (2012). Hafif Betonların 511 ve 1275 keV' deki Radyasyon Zayıflatma Katsayılarının Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(3), 315-317.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C. (2010). Radiation shielding of concrete containing zeolite. *Radiation Measurements*, 45, 827– 830.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., & Nichols, M. C. (2003). *Handbook of mineralogy, volume V: Borates, carbonates, sulfates*. Mineral Data Publishing.
- Ataç, E. (2024). *Isıtma hızının tıkalı cevherinin bozunma sıcaklığına etkisi ve kalsinasyonu* (Tez No. 863924) [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi-Erzurum]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Aygün, E., Zengin, M. (1998). *Atom ve Molekül Fiziği*. Ankara: Bilim Yayınları.
- Ayşen, M. Z. (2022). *Erzincan Kemaliye Bölgesindeki Manganez Cevherinden Ferro Manganez Eldesindeki Boroksit Ve Üleksit Cevherlerinin Etkisinin Araştırılması* (Tez No. 767557) [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi-Erzurum]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Bayrak, T. (2023). *Üleksit Mineralinin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Tez No. 835705) [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi-Trabzon]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Berger, M. J., Hubbell, J. H. (1987). *XCOM: Photon cross section on a personal computer*. Department of Energy Office Health on Environmental Research, Washington.
- Berk, F. (2002). *Tek kullanımlık tıbbi malzemelerin gama radyasyonu ile sterilizasyonu ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması* (Tez No. 116021) [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi-Ankara]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Cotton, F. A., Wilkinson, G., Murillo, C. A., & Bochmann, M. (1999). *Advanced inorganic chemistry* (6th ed.). Wiley.

- Creagh, D. C. (1987). The resolution of discrepancies in tables of photon attenuation coefficients. *Nuclear Instrument and Methods*, 255, 1-16.
- Cullity B. D. (1978). *Elements of X-Ray Diffraction* (Second Edition). Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray diffraction* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Çimen, B., Erdoğan, M., Oğul, R. (2017). İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. *Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 43 (2), 139-147.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Dellaoğlu, M. (2024). *Halk Sağlığı İçin Afetlerde Nükleer Atık Ve Tıbbi Radyoaktif Atık Yöntemi* (Tez No. 902935) [Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi- Niğde]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Demirel, B., Nasıroğlu, S. (2017). Bor Mineralleri Ve Atıklarının Çimento Kullanılma Stratejileri. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 29(1), 95-100.
- Dırak, S. (2011). *Eti Maden Müdürlüğü Kırka Bor İşletmesi bor endüstri atıklarında eser elementlerin tayini ve lityumun kazanılması* (Tez No. 292554) [Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi-Kütahya]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Doğruluk, M., Doğan, A., Kalkan, N., Korkmaz, M. (2018). Nükleer Tehlikeler ve Afet Yönetimi: Türkiye’de Durum Değerlendirmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 1(2), 137-153.
- DPT Raporu. (2008). Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), kimya sanayii özel ihtisas komisyonu, bor-soda külü-krom kimyasalları çalışma grubu raporu (DPT:2776-ÖİK:705), 5-43, Ankara.
- Durmuş, C. (2016). *Bor Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi* (Tez No. 438878) [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi-İzmir]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Ege Üniversitesi. (2023). *Ege Üniversitesi Hastanesi Sağlık Uygulama Ve Araştırma Merkezi Radyasyon Güvenliği El Kitabı*, 53, İzmir.
- Erdoğan, Y., Zeybek, M. S., Demirbaş, A. (2000). Cement mixes containing colemanite from concentrator wastes. *Cement and Concrete Research*, 28, 605-609.
- Erdoğan, E., Erdoğan, Y., Gencel, O., Targan, S., Avcıata, U. (2011). Influence of colemanite admixture on Portland cement durability. *Advances in Cement Research*, 24, 155-164.
- Eroğlu, H. (2009). *Nükleer tıpta kullanılan radyoaktif talyum-201 ve galyum-67’nin adsorbsiyonu* (Tez No. 244755) [Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi- Erzurum]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

- Gerward, L. (1993). X-ray attenuation coefficients: current state of knowledge and availability. *Radiation Physics and Chemistry*, 41, 783-789.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. R. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Helvacı, C. (2004). Review of the mineralogy of Turkish borate deposits. *Mineral Resources of Turkey*, 105–124.
- Helvacı, C., & Alonso, R. N. (2000). Borate deposits of Turkey and Argentina; a summary and geological comparison. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 9(1), 1–27.
- Henrie, J. O. (1962). *Concrete for radiation shielding*. (2nd Ed., ss.31-40), American Concrete Institute.
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2012). *Inorganic chemistry* (4th ed.). Pearson Education.
- Hubbel, J. H., Seltzer, S. M. (1995). *US department of commerce, technology administration*. National Institute of Standards and Phys. Laboratory, 5692, Nistir.
- Hubbell, J. H., Trehan, P. N., Singh, N., Chand, B., Mehta, D., Garg, M. L., Garg, R. R., Singh, S., Puri, S. (1994). A review, bibliography, and tabulation of K, L, and higher atomic shell x-ray fluorescence yields. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 23(2), 339-364.
- IAEA, (4 th and 5th of March 2010). *Frequently Asked Questions on ALARA... optimization of doses for occupational exposure*. <https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/resources/frequentlyaskedquestions/Shared%20Documents/faq-list-en.pdf>
- ICRP. (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP Publication 103). Annals of the ICRP, 37, 2–4.
- Igashira, M., Kitazawa, H., Yamomuro, N. (1986). A heavy shield for the gamma-ray detector used in fast neutron experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 245, 432-437.
- İrim, Ş. G. (2018). *Nano-Bor Katkılı Kompozitlerin Nötron Ve Gama Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Belirlenmesi* (Tez No. 518591) [Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi-Antalya]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Kabak, M. (2004). *X-ışınları kristalografisi*. Ankara: Bıçaklar Kitabevi.
- Kalecik, S. (2018). *C₁₉H₁₄BrFN₂O, C₁₅H₁₁BrFNO ve C₂₁H₁₄BrFN₂O₂ Moleküllerinin X-ışınları Ve Bazı Spektroskopik Yöntemlerle Özelliklerinin İncelenmesi* (Tez No.

494815) [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi-Samsun].
Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Karakoç, A. (2024). *Radyasyon Dedektörü Yapımı Ve Çeşitli Malzemelerin Radyasyon Ölçümü* (Tez No. 911313) [Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi-Erzincan]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Keskin, N. U. (2024). *Türkiye’de Görev Yapan Anestezi Teknisyen/Teknikerlerinin İyonize Radyasyondan Korunma Hakkında Bilgi Düzeylerinin Ve Tutumlarının Değerlendirilmesi* (Tez No. 874432) [Yüksek Lisans Tezi, Ufuk Üniversitesi-Ankara]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Kharita, M. H., Takeyeddin, M., Alnassar, M., Yousef, S. (2008). Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. *Progress in Nuclear Energy*, 50, 33–36.

Kılınçarslan, Ş., Başıyigit, C., & Akkurt, İ. (2007). Barit agregalı ağır betonların radyasyon zırhlama amacıyla kullanımının araştırılması. *Gazi Üniv. Müh. Mim Fak. Der.*, 22(2), 393-399.

Klug, H. P., & Alexander, L. E. (1974). *X-ray diffraction procedures: For polycrystalline and amorphous materials* (2nd ed.). Wiley.

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Kocadağistan, M. E., Arslan, H. (2024). Advantageous approach for boron ores used in cement production: optimization of dehydration. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 15 (1), 7–19.

Korkut, T., Korkut, H., Karabulut, A., Budak, G. (2011). A new radiation shielding material: amethyst ore. *Annals of Nuclear Energy*, 38, 56-59.

Köklü, G., Yilmaz, Ö. (2006). Phytoprotection, erudit.org.

Kreidl, N. J. (1970). Boron oxide and borate glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 53(8), 417–424.

Kula, I., Olgun, A., Erdogan, Y., Sevinc, V. (2001). Effects of colemanite waste, cool bottom ash and the fly ash on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 31, 491-494.

Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed.). Prentice Hall.

Leo, W. R. (1994). *Techniques for nuclear and particle physics experiments: A how-to approach* (2nd ed.). Springer.

McAlister, D. R. (1955). *Gamma ray attenuation properties of common shielding materials*, PG Research Foundation. University Lane Lisle, IL 60532, USA.

- Mollah, A. S., Ahmad, G. U., Husain, S. R. (1992). Measurements of neutron shielding properties of heavy concretes using a Cf-252 source. *Nuclear Engineering and Design*, 135, 321–325.
- Morioka, A., Sakurai, S., Okuno, K., Sato, S., Verzirov, Y., Kaminaga, A., Nishitani, T., Tamai, H., Kudo, Y., Yoshida, S., Matsukawa M. (2007). Development of 300°C heat resistant boron-loaded resin for neutron shielding. *Journal of Nuclear Materials*, 367–370, 1085–1089.
- Mubarak, M. A. (1971). Gamma ray shielding. *Health Physics Division Pakistan Institute of Nuclear Science and Technology*, 15, Islamabad.
- Onaran, K., (2009). *Malzeme Bilimi*. Bilim Teknik Yayınevi, .383, İstanbul.
- Özen, Y. (2013). *Türkiye 'de çimento sanayi ve (Elazığ ilinde Altınova Çimento Fabrikası örneği)* (Tez No. 354922) [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi-Elazığ]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Pecharsky, V. K., & Zavalij, P. Y. (2009). *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials* (2nd ed.). Springer.
- Pehlivanoglu, H. E. (2014). *Bor Katkılı Portland Çimentosu İle Üretilen Betonların Mühendislik Özellikleri Ve Yüksek Sıcaklık Etkisi* (Tez No. 863924) [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi-Isparta]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (1999). *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*. Noyes Publications / William Andrew publishing, 964, New York.
- Sancak, E. (2015). Borlu Aktif Belet (bab) Çimentosu İle Üretilen Harçlarda Kısa Süreli Donatı Korozyonu Davranışının Araştırılması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), 89-98.
- Sehhatigdiri, A. (2014). *Farklı Killerin Radyoaktif Maddelere Karşı Zırhlama Özelliklerinin DeneySEL Olarak Araştırılması* (Tez No. 352103) [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi-Erzurum]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Singh, V. P., Badiger, N. M., & Chanthima, N. (2019). Gamma-ray shielding properties of concretes prepared using different aggregates. *Radiation Physics and Chemistry*, 160, 151–160.
- Solé, V. A., Papillon, E., Cotte, M., Walter, P., & Susini, J. (2007). A multiplatform code for the analysis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectra. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(1), 63–68.
- Sunar, A. (2022). *X-ışını ve gama ışını zayıflatma katsayılarının deneysel belirlenmesi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Atatürk Üniversitesi.
- Sunar, B. (2022). *Bazı Grafen Katkılı Betonların Gama Işınlarnı Soğurma Özellikleri* (Tez No. 724652) [Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi-Konya]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

- Sychev, B. S., Mal'kov, V. V., Komochkov, M. M., Zaitsev, L. I. (1967). Penetration of heavy concrete shields by high-energy neutrons. *Journal Of Nuclear Energy*, 21(3), 315-317.
- TAEK, <https://webim.ndk.gov.tr/file/7e4dfb97-0a5d-4be3-be75-b927cdeb392f>
- TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası. (2003). *Bor Raporu*, Ankara.
- Tsoufanidis, N. (2010). *Measurement and detection of radiation* (4th ed.). Taylor & Francis.
- Turner, J. E. (2007). *Atoms, radiation, and radiation protection* (3rd ed.). Wiley-VCH.
- Tübitak. (2003). Tübitak Bor Raporu. Ankara.
- Uğurlu, A., Özdemir, M., Topçu, İ. (2004). *Bor içeren kil atıkların çimento içerisinde değerlendirilmesi, Evaluation of Boron Containing Clay Wastes in Cement*. 2.Uluslararası Bor Sempozyumu, Anadolu Üniversitesi, 405-411, Eskişehir.
- Ustabaş, İ. (2008). *Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton Ve Harçların Performansını İncelenmesi* (Tez No. 222193) [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi-Trabzon]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Uzbaş, B. (2019). *Çimento Esaslı Silis Dumanlı Uçucu Küllü Kompozitlerin SEM ve XRD Destekli Görsel Analizlerin Yapay Sinir Ağları İle Modellemesi* (Tez No. 540634) [Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi-Erzurum]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Wells, A. F. (1984). *Structural inorganic chemistry* (5th ed.). Oxford University Press.
- Wheeler, D. M., Tickner, J. R., & Cullen, D. M. (2018). A variable-energy X-ray source for laboratory-based photon interaction measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 134, 121–127.
- Winter, N. B. (2012). *Scanning Electron Microscopy of Cementand Concrete*. WHD Microanalysis Consultants Ltd, pp.192, United Kingdom.
- Yalçın, H., Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. Palme Yayınları.
- Yılmaz, E. (2011). *Bazı İnşaat Malzemelerinde Gama Işını Soğurma Katsayısı Ve Nötron Soğurma Katsayısı Tesir Kesitinin Belirlenmesi* (Tez No. 291790) [Yüksek Lisans Tezi, Rize Üniversitesi-Rize]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Yılmaz, O. (2014). Tüvenan tinkalden kalsine tinkal üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2) 401-406.