

**T.C.  
RİZE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI İNŞAAT MALZEMELERİNDE GAMA İŞİNİ  
SOĞURMA KATSAYISI VE NÖTRON SOĞURMA TESİR  
KESİTİNİN BELİRLENMESİ**

**Esra YILMAZ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan BALTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**RİZE-2011**

T.C.  
RİZE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİMDALI

BAZI İNŞAAT MALZEMELERİNDE GAMA İŞİNİ SOĞURMA KATSAYISI VE  
NÖTRON SOĞURMA TESİR KESİTİNİN BELİRLENMESİ

Esra YILMAZ

Yüksek Lisans

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09.06.2011

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 28.06.2011

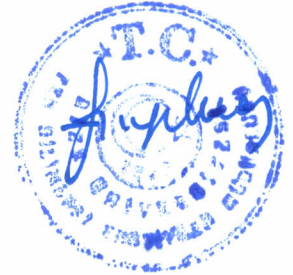
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan BALTAŞ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Gökhan APAYDIN

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mehmet ŞAHİN

*Hasan Baltaş*  
*Gökhan Apaydin*  
*Mehmet Şahin*

Enstitü Müdürü: Doç. Dr. Fatih YILMAZ



Rize 2011

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada inşaat malzemesi olarak kullanılan betona, farklı katkıları farklı yüzdelerle eklenerek bunların 59,5 ve 661 keV' de kütle soğurma parametreleri ve nötron soğurma tesir kesitleri hesaplandı.

Lineer ve kütle soğurma katsayılarının ölçümleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Çevre ve Radyasyon Fiziği laboratuvarında gerçekleştirildi.

Sadece tez aşamamda değil yüksek lisansa başladığım günden beri her konuda benden maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve bu tezin hazırlanmasıyla yakından ilgilenen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hasan BALTAŞ' a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Çevre ve Radyasyon Fiziği laboratuvarında çalışmam için her türlü imkanı sağlayan Sayın Prof. Dr. Uğur ÇEVİK, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Ahmet ÇELİK ve beton numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. İlker USTABAŞ hocalarıma teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca bu tezi hazırlarken karşılaştığım zorlukları çözmemde bana yardımcı olan Arş. Gör. Erkan KIRIŞ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doğduğum günden beri yanımda olan, bulunduğum yeri onlara borçlu olduğum canım ANNEM, BABAMA ve desteğini hep yanımda hissettiğim ikizime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Esra YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa No</b>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER .....	II
ÖZET .....	IV
SUMMARY.....	V
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ .....	IX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi .....	3
1.3. Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması.....	4
1.3.1. Fotoelektrik Olay .....	4
1.3.2. Çift Oluşumu .....	6
1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Saçılması .....	7
1.4.1. Koherent Saçılma .....	7
1.4.1.1. Rayleigh Saçılması .....	8
1.4.1.2. Delbrück Saçılması .....	9
1.4.1.3. Nükleer Rezonans Saçılma .....	9
1.4.1.4. Nükleer Thomson Saçılması.....	9
1.4.2. İnkohherent Saçılma .....	9
1.4.2.1. Compton Saçılması .....	9
1.4.2.2. Raman Saçılması .....	11
1.4.2.3. Nükleer Saçılma.....	11
1.5. Karışım Materyallerinin Özellikleri .....	12
1.5.1. Çimento.....	12
1.5.2. Yüksek Fırın Cürufu .....	12
1.5.3. Silis Dumanı .....	12
1.5.4. Uçucu Kül.....	13
1.5.5. Agrega (Kum).....	13
1.6. Gama Işınları .....	13

1.7. Nötronlar .....	15
1.8. Elastik Saçılma .....	15
1.9. İnelastik Saçılma .....	15
1.9.1. Hızlı Nötron Etkileşimleri .....	16
1.9.2. Nötron Soğurma Tesir Kesiti .....	17
1.10. Radyoizotop Kaynaklar .....	20
1.11. Soğurma .....	23
1.11.1. Lineer Soğurma Katsayısı .....	25
1.11.1.1. Yarı Kalınlık .....	26
1.11.2. Kütle Soğurma Katsayısı .....	26
1.11.3. Karışımlar ve Bileşikler İçin Kütle Soğurma Katsayısı .....	28
1.12. Gama Işını Dedektörleri .....	29
1.12.1.1. Yarıiletken Dedektörler .....	29
1.12.1.2. Sintilasyon Dedektörler .....	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	31
2.1. Numunelerin Hazırlanması .....	31
2.2. Kimyasal Analiz .....	32
2.3. Deneysel Yöntem .....	33
2.3.1. Enerji Kalibrasyonu .....	33
2.3.2. Verim Kalibrasyonu .....	35
2.4. Kütle Soğurma Katsayısı Ölçümleri .....	36
2.4.1. Deneysel Sistemi .....	36
3. BULGULAR .....	39
3.1. Kimyasal Analiz .....	39
3.2. Lineer Soğurma Katsayısı, Kütle Soğurma Katsayısı ve Yarı Kalınlık .....	46
3.3. Etkin Atom Numarası ve Elektron Yoğunluğunun Hesaplanması .....	52
3.4. Nötron (Etkin) Soğurma Tesir Kesiti .....	55
4. TARTIŞMA .....	62
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	65
KAYNAKLAR .....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	70

## ÖZET

Bu çalışmanın amacı inşaat malzemesi olarak kullanılan beton numunelerinin radyasyon zırlama özelliklerini belirlemektir. Mineral katkılı ve mineral katkısız on iki beton numunesi hazırlandı ve 59,5 ve 661 keV foton enerjilerinde gama ışını kullanarak kütle soğurma katsayıları, etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunlukları yönünden araştırıldı.

Hazırlanan beton numunelerinin deneysel gama ışını soğurma katsayıları tablolaştırılmış WinXcom sonuçlarına dayalı hesaplanmış değerler ile karşılaştırıldı. Deneysel ve hesaplanmış değerler arasında uyum gözlemlendi. Foton kütle soğurma katsayıları, etkin atom numaraları ve elektron yoğunlukları değerlerinin enerji ve beton numunelerinin bileşeni değişimi ile değiştiği gözlemlendi.

Buna ilaveten bu numunelerin ve gerekli bütün elementlerin soğurma tesir kesitleri ( $\Sigma_R, \text{cm}^{-1}$ ) NXcom programı kullanılarak hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler** : Soğurma katsayısı ,etkin atom numarası, elektron yoğunluğu, saçılma tesir kesiti, mineral katkılar

## SUMMARY

### **Determination of Gamma Ray Attenuation Coefficient and Neutron Removal Cross Section in Some Building Materials**

The aim of this study is to determine the radiation shielding properties of concrete samples used as building material. Therefore twelve concrete samples with and without mineral additives have been prepared and investigated in terms of mass attenuation coefficient, effective atomic numbers and effective electron densities by using gamma-ray at 59.5 and 661 keV photon energies.

Experimental gamma-ray attenuation coefficients of the prepared concrete samples have been compared with tabulations based upon the results of WinXcom. Reasonable agreement has been observed between experimental and calculated tabulations. The values of photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities have been found to change with energy and composition of the concrete samples.

In addition, attenuation of fast neutrons through the studied materials has been calculated using NXcom program and the removal cross-section ( $\Sigma_R$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ) database for all required elements.

**Keywords:** Attenuation coefficient, effective atomic number, electron density, removal cross- section, shielding, mineral additives.

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kütle numarası
$A_t$	: Bileşiğin bir molünün ağırlığı
$A_i$	: i. elementin atomik ağırlığı
c	: Işık hızı
d	: Birim alan başına düşen kütle miktarı
e	: Elektronun yükü
$E_b$	: Elektronun bağlanma enerjisi
f	: Bileşikteki elementlerin bolluk kesri
h	: Planck sabiti
I	: Soğurulup geçen fotonun şiddeti
$I_0$	: Gelen fotonun şiddeti
$I_\gamma$	: Gama ışını salma hızı
$K_e$	: Elektronun kinetik enerjisi
m	: Kütle
$m_e$	: Elektronun kütlesi
$m_0$	: Elektronun durgun kütlesi
N	: Aktivite
$N_A$	: Avagadro sayısı
S	: Pikin net alanı
$T_{1/2}$	: Yarı kalınlık
T	: Zaman
U	: Atomik kütle birimi
V	: Potansiyel
v	: Hız
$w_i$	: Ağırlık kesri
x	: Kalınlık
Z	: Atom numarası
$Z_{et}$	: Etkin atom numarası
A	: İnce yapı sabiti
$\lambda$	: Dalgaboyu



- $\mu$  : Lineer soğurma katsayısı  
 $\mu/\rho$  : Kütle soğurma katsayısı  
 $\rho$  : Yoğunluk  
 $\sigma_{t,a}$  : Toplam atomik tesir kesiti  
 $\sigma_{t,el}$  : Toplam elektronik tesir kesiti  
 $\sigma_{t,m}$  : Toplam moleküler tesir kesiti  
 $\phi$  : Elektronun bağlanma enerjisi  
 $\nu$  : Frekans  
 $\tau$  : Fotoelektrik soğurma katsayısı  
 $\Omega$  : Floresans verim  
 $\Sigma_R$  : Nötron saçılma tesir kesiti  
 $\varepsilon$  : Dedektör verimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Elektromanyetik radyasyonun maddeyle etkileşimi.....	3
Şekil 2. Elektromanyetik radyasyon etkileşmelerinin soğurucunun atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre değişimi.....	4
Şekil 3. Fotoelektrik olay.....	5
Şekil 4. Çift Oluşumu .....	7
Şekil 5. Rayleigh Saçılması .....	8
Şekil 6. Compton saçılması.....	10
Şekil 7. Elektron yakalama bozunmasına bir örnek olarak <sup>137</sup> Cs'in bozunma şeması .....	14
Şekil 8. <sup>241</sup> Am'un bozunma şeması.....	14
Şekil 9. Esnek olmayan saçılma.....	17
Şekil 10. Radyasyonlar ve çeşitli girme mesafeleri .....	22
Şekil 11. Mg'un kütle soğurma katsayılarının dalga boyu ile değişimi.....	24
Şekil 12. Elektromanyetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması.....	25
Şekil 13. Yarıiletken dedektör şeması.....	29
Şekil 14. Sintilyasyon dedektörlerinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 15. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı.....	33
Şekil 16. Enerji-Kanal grafiği .....	35
Şekil 17. Enerji-Verim eğrisi .....	36
Şekil 18. Gama ışınları soğurma ölçümleri için kullanılan deney geometrisi .....	37
Şekil 19. Soğurma ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin genel görünüşü.....	37
Şekil 20. 59,5 keV'de MO numunesi için elde edilen soğurma spektrum örneği .....	47
Şekil 21. 661 keV'de MO numunesi için elde edilen soğurma spektrum örneği.....	47
Şekil 22. Silika dumanı katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi.....	49
Şekil 23. Uçucu kül katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi.....	49
Şekil 24. Yüksek fırın cürufu katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi .....	50
Şekil 25. <sup>241</sup> Am kaynağıyla ölçülen standart numunenin yarı kalınlık grafiği.....	51
Şekil 26. <sup>137</sup> Cs kaynağıyla ölçülen standart numunenin yarı kalınlık grafiği.....	51

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Radyasyon tipleri ve özellikleri .....	21
Tablo 2. XRF analizi ile numunelerin uyarılmasında kullanılan radyoizotop kaynaklar ve özellikleri.....	22
Tablo 3. Beton numunelerinin içeriği .....	32
Tablo 4. Standart kaynakların özellikleri .....	34
Tablo 5. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları.....	40
Tablo 6. 12 beton numunesi için hesaplanmış kütle soğurma katsayıları (cm <sup>2</sup> /g).....	42
Tablo 7. 59,5keV ve 661 keV’de beton karışımlarının lineer soğurma, kütle soğurma ve yarı kalınlık değerleri.....	48
Tablo 8. 59,5 keV ve 661 keV’de beton karışımlarının atomik tesir kesitleri.....	54
Tablo 9. 59,5 keV ve 661 keV ‘de beton numunelerinin teorik ve deneysel etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunlukları.....	55
Tablo 10. Beton numunelerinde soğurma tesir kesitleri .....	56

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Günlük hayatımızın her alanında, gerek doğal yollardan gerekse teknolojik gelişmelerin sonucu olarak sürekli radyasyona maruz kalmaktayız. Yaşam alanlarımızda kullanılan bazı inşaat malzemeleri, dış radyasyondan korunmada oldukça önemli yer tutar. Kullanılan malzemenin cinsi, kalınlığı ve yoğunluğu radyasyonun soğrulmasında en önemli etkenlerdir.

En basit şekliyle beton; çimento, silika dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kum ve su gibi katkı materyallerinin birleşiminden oluşan bir inşaat malzemesidir. Betonun ana bileşenlerinden olan çimento beton maliyetinde önemli bir yer tutar ve betondaki ana materyal Portland çimentodur. Bugün, çoğu beton karışımları katkı malzemeleri (mineral katkılar) içermektedir. Bu katkı malzemeleri betonda belli oranlarda bulunur. Katkı malzemelerinin kullanılmasının sebebi; betonun tazeliğini ve sertliğini geliştirmektir.

Beton endüstrisinde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silika dumanı gibi mineral katkıları, yan ürün materyallerinin kullanımı için uygundur. Dahası bunların kullanımı betonun birim hacmindeki Portland çimentonun tüketimini azaltır. Portland çimento yüksek enerji tüketimine sahiptir ve bu enerjinin yayılımı betonun imalatıyla ilişkilidir. Bu yayılım da beton miktarının azalmasıyla azalır.

Harcın ısı iletkenlik basınç dayanımı, su emmesi (Türkmen ve ark., 2007), betonun geçirgenliği, ham betonda çelik çubukların korozyona karşı direncinde mineral katkıların etkisi hakkında birçok çalışma vardır (Hui ve ark., 2009; Wei ve ark., 2004; Demirboğa, 2007; Bentz ve ark., 2011). Ayrıca bazı yüzdeliklerde mineral katkıların betona eklenmesi, lineer soğurma katsayıları, kütle soğurma katsayıları, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve soğurma tesir kesitleri gibi soğurma parametrelerini değiştirir. Fakat önceki çalışmaların çoğu yalnızca foton soğurma katsayıları ile ilişkilidir ve deneysel olarak nötronların soğrulması ilgili bir çalışma mevcut değildir (Kurudirek ve ark., 2010; Kurudirek ve ark., 2009; Akkurt ve ark., 2010; Damla ve ark., 2010; Türkmen ve ark., 2008).

Gama ışınlarının veya X-ışınlarının soğrulması ve saçılması bir elementin atom numarası ve yoğunluğu ile ilişkilidir. Bileşik materyallerde ise etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu ile ilişkilidir. Etkin atom numarası, bir bileşiği veya karışımı oluşturan

elementlerin ortalama atom numarasıdır. Bileşik maddelerdeki etkin atom numarasını hesaplayan kuralları ortaya çıkarmak için birçok çalışma yapılmıştır (Angelone ve ark., 2001; Chitralekha ve ark., 2004; Baltaş ve ark., 2005; Tadashi ve ark., 2004; Çevik ve ark., 2005; Kurudirek ve ark., 2009).

Hızlı nötronların çarpışma yapması soğurmanın bir etkisidir. Bu çarpışma şu süreçlerde gerçekleşebilir:

Hidrojenle çarpışma yapabilir: Böylece nötronun enerjisi azalır ve yönü 0 dan 90°'ye değişir.

Oksijenle ya da ağır metallerle elastik çarpışma yapabilir: Bu çarpışma 1 MeV ve aşağısında gerçekleşebilir.

Oksijen ya da ağır metallerle inelastik çarpışma yapabilir: Bu çarpışma da 1 MeV ya da yukarısında gerçekleşebilir.

Sonuç olarak hızlı nötronların, hidrojen, oksijen veya ağır metallerle çarpışma yapması olayı soğurma tesir kesiti olayı olarak adlandırılır (Blizard ve Abbott, 1962). Soğurma tesir kesiti enerjisinin yaklaşık olarak 2 ve 12 MeV arasında sabit olduğu düşünülmektedir (Kaplan, 1989). Soğurma tesir kesitinden elde edilen değerlerin toplamı  $\sum_r$  (cm<sup>-1</sup>) kabaca 2/3 e eşittir. Verilen materyalin soğurma tesir kesitinin sahip olduğu enerjiler 6-8 MeV arasında değişmektedir (Glasstone ve Sesonske, 1986). Eğer beton, önemli yapışkan materyal içeriyorsa nötron saçılması bu soğurma süreçleriyle belirlenebilir.

Son zamanlarda, homojen karışım ve bileşiklerden geçen hızlı nötronları hesaplamak için MERCSEF-N adlı bir bilgisayar programı El-Khayatt tarafından geliştirildi (El-Khayatt ve El-Sayed, 2009). Bu program, hesaplar için gerekli olan fiziksel bilgileri içermektedir. Homojen karışım veya bileşiklerde nötron soğurma tesir kesitleri ve gama ışınlarının (veya X-ışınlarının) her ikisini de hesaplamak için NXcom adlı yeni bir program geliştirildi (El-Khayatt, 2011).

Bu çalışmada, 59,5 ve 661 keV'de on iki beton numunesi (mineral katkılı ve mineral katkısız) için gama ışını soğurma katsayıları deneysel olarak ölçüldü. Teorik olarak kütle soğurma katsayıları WinXcom programı ile hesaplandı. Hem deneysel hem de teorik olarak hesaplanmış kütle soğurma katsayısı değerleri, foton etkileşme parametreleri olan etkin atom numarası, elektron yoğunluğu, lineer soğurma katsayısı, yarı kalınlık ve atomik tesir kesiti değerlerini hesaplamak için kullanıldı. Buna ilaveten, bu numunelerin teorik nötron soğurma tesir kesitleri ( $\sum_R$ , cm<sup>-1</sup>) NXcom programı kullanılarak hesaplandı.

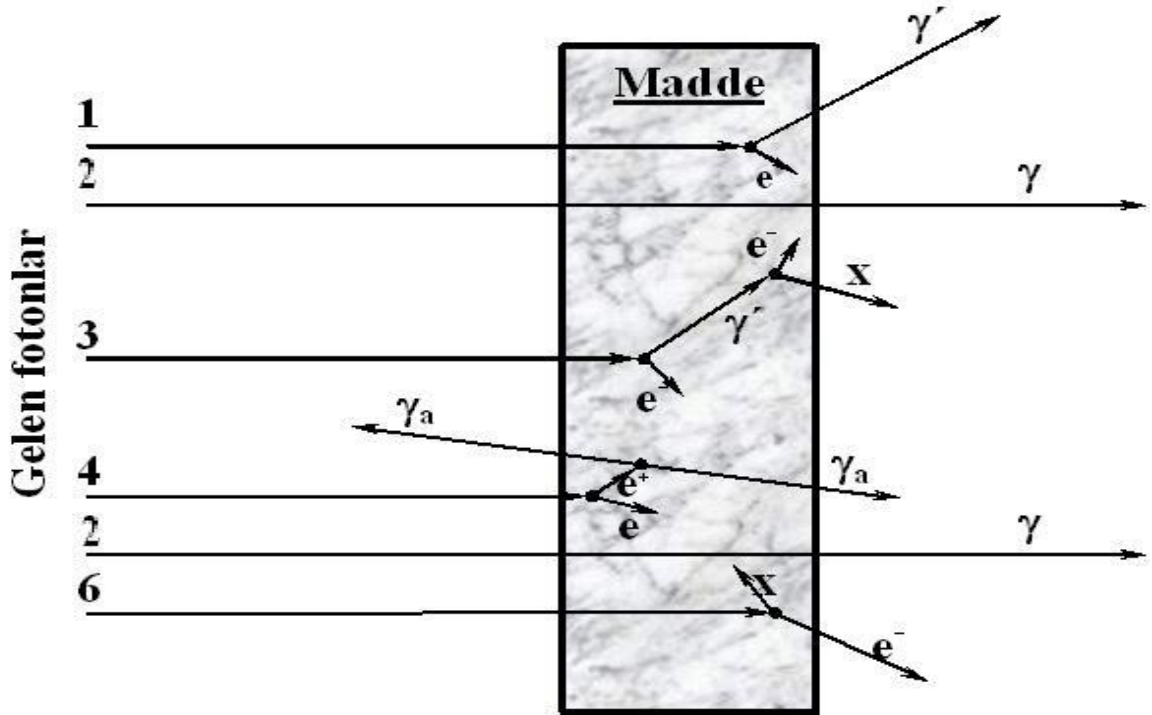
## 1.2. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Tek renkli (monokromatik) bir X veya gama ışını demeti herhangi bir maddeden geçirilecek olursa demetin şiddetinde bir azalma olur.  $I_0$  şiddetinde bir X veya gama ışını demetinin  $dx$  kalınlığındaki bir maddeyi geçtikten sonraki şiddeti  $I$  ise, gelen X veya gama ışını demetinin şiddeti, maddenin  $dx$  kalınlığı ve ışın demetinin içinden geçtiği maddenin cinsine bağlı olarak,

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

ile verilmektedir. Burada  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), lineer soğurma katsayısı olup birim kalınlık başına düşen soğurulma olarak tarif edilmektedir.

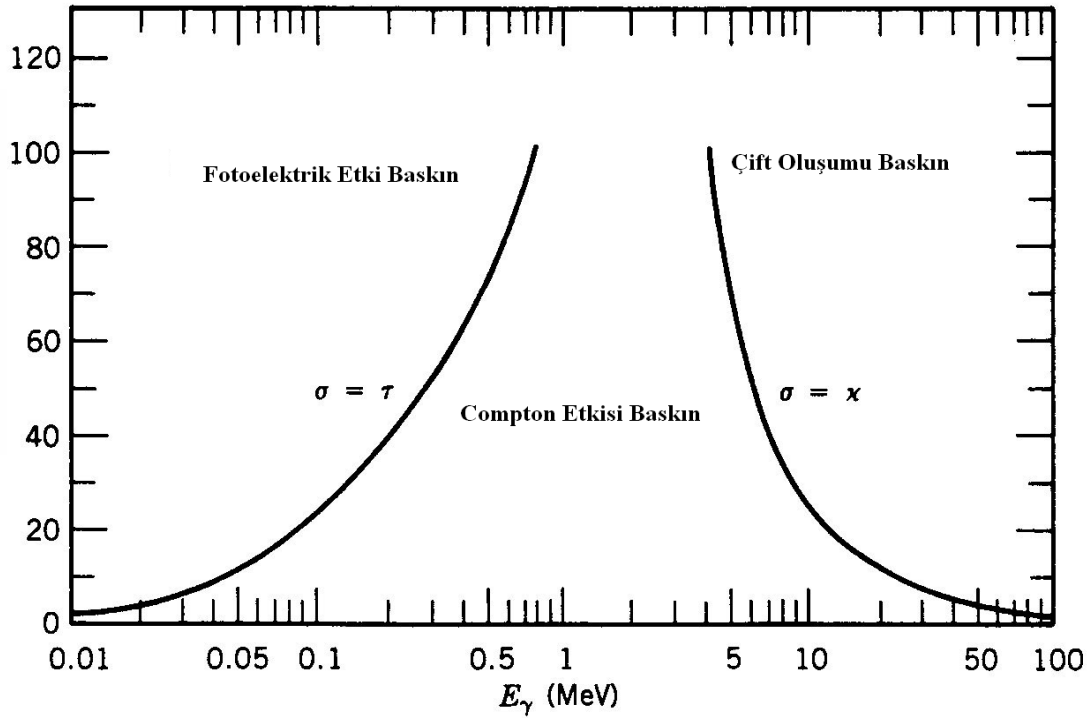
Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucunda Şekil 1.'de gösterilen olaylar meydana gelir. Bunlar, Compton saçılması (1), Koherent saçılma (2), Compton saçılmasından sonra saçılan fotonun fotoelektrik etkisiyle X-ışınları oluşumu (3), Çift oluşumu (4) ve Fotoelektrik olaydır (5).



Şekil 1. Elektromanyetik radyasyonun maddeyle etkileşimi

### 1.3. Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması

Madde içerisine giren bir foton, madde atomunun bağlı elektronları, serbest elektronları ve çekirdeği ile etkileşirler. Elektromanyetik radyasyonun soğurulması çeşitli olaylar sonucu gözlenmekle beraber bu olayların en baskın olanları fotoelektrik olay, saçılma (Compton ve Koherent) olayı ve çift oluşumdur. Bu olayların meydana gelme ihtimaliyeti foton enerjisi ile değişmektedir. Şekil 2.'de görüldüğü gibi, fotoelektrik olay 0,001 MeV ile 0,5 MeV arasında etkin iken, saçılma olayı 0,1 MeV ve 0,5 MeV arasında daha etkin davranır. Çift oluşum olayı ise 1,02 MeV'den başlar ve artan foton enerjisi ile artar.



Şekil 2. Elektromanyetik radyasyon etkileşmelerinin soğurucunun atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre değişimi

#### 1.3.1. Fotoelektrik Olay

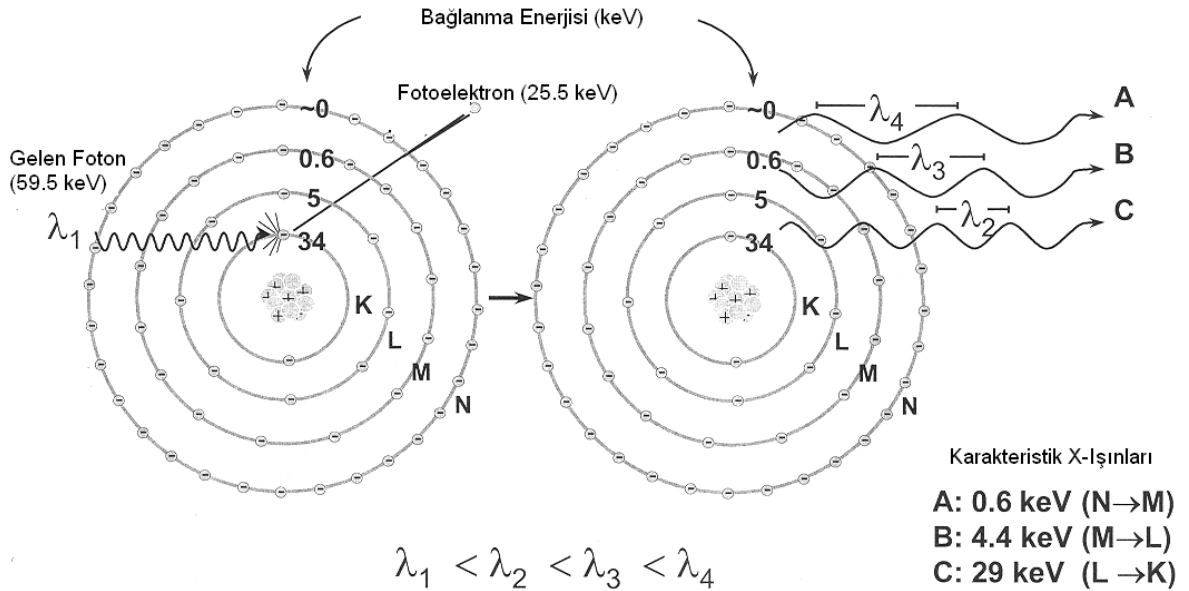
$h\nu$  enerjili bir fotonun, atomun bağlı elektronlarından biri tarafından soğurularak elektronun serbest hale geçmesi olayına fotoelektrik olayı, serbest hale geçen elektrona da fotoelektron denir (Şekil 3). Bu olay sırasında fotonun enerjisini tamamen soğuran elektronun kazandığı kinetik enerji,

$$K_e = h\nu - E_b \quad (2)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $K_e$  elektronun kazandığı kinetik enerji,  $h\nu$  gelen fotonun enerjisi ve  $E_b$  ise elektronun bağlanma enerjisidir. Serbest haldeki bir elektronda enerji ve momentumun ikisi birden korunumlu olmayacağından, böyle bir elektronun foton soğurması mümkün değildir. Fakat bağlı elektronlarda durum böyle değildir. Atom geri tepir ve böylece momentumun korunması sağlanır. Atomun kütlesi çok büyük olduğundan geri tepme enerjisi çok küçüktür ve bu yüzden de kinetik enerji ifadesi ihmal edilmiştir.

Düşük atom numaralı ( $Z$ ) elementlerin bağlanma enerjileri de düşük olduğundan fotoelektrik etki bahsedilen fotonlar için güçsüz kalır.  $Z$  arttıkça bağlanma enerjisi  $Z$  de artar ve böylece fotoelektrik etki de artar.

Fotoelektrik olayı atomun çevresinde tüm yörüngelerde meydana gelebilir. Foton enerjisinin yüksek olduğu durumlarda bu olayın iç yörüngelerde olma olasılığı artmaktadır. Buna göre fotoelektrik olayı, düşük enerjilerde dış, yüksek enerjilerde ise iç yörüngelerde meydana gelmektedir. Foton enerjisi herhangi bir yörüngenin bağlanma enerjisine eşit olduğu durumda etkileşme o yörüngede yoğunluk kazanmaktadır.



Şekil 3. Fotoelektrik olay

Metalden elektron koptuğu sırada K kabuğunda oluşan boşluk, atomun üst tabaka elektronları tarafından doldurulur. Bu işlem sonucu, iki tabakanın bağlanma enerjileri



arasındaki fark kadar enerjiye sahip bir foton yayımlanır ve bu foton karakteristik X-ışını fotonu olarak adlandırılır.

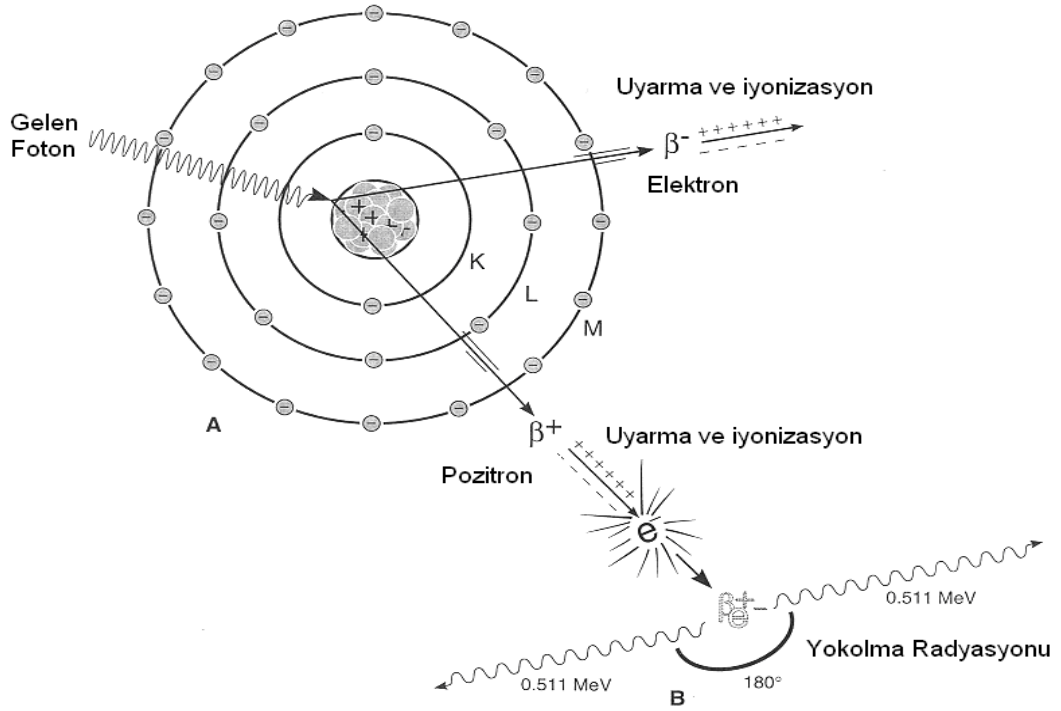
Oluşan karakteristik X-ışını her zaman atomu terk etmez, bazen bu foton atomun dış kabuklarındaki elektronlardan birisini sökerek yok olur. Bu olaya Auger olayı, sökülen elektrona da Auger elektronu denir. Böylece, meydana getirilen bir boşluk için her zaman bir karakteristik x-ışını yayımlanmaz. Meydana getirilen boşluk başına X-ışını yayınlanma ihtimali floresans verim ( $\omega$ ) olarak tanımlanır. Floresans verim 0 ile 1 arasında değerler alır. Küçük atom numaralı elementler için Auger elektronu yayınlanma ihtimali, büyük atom numaralı elementlerinkine oranla daha büyüktür. Büyük atom numaralı elementler için karakteristik X-ışını yayınlanma ihtimali ise küçük atom numaralılara göre daha büyüktür. Bunun sebebi, küçük atom numaralı atomlarda iç kabuklar arası elektron geçişinden yayımlanan foton enerjisinin, dış kabukların soğurma kıyılarına, büyük atom numaralı elementlerinkinden çok yakın olmasıdır.

### 1.3.2. Çift Oluşumu

Çift oluşumu, çekirdeğin etki alanına giren bir fotonun bir elektronla ( $e^-$ ) bir pozitrona ( $e^+$ ) dönüşmesi olayıdır.

$$\gamma \text{ fotonu} \rightarrow e^- + e^+ \quad (3)$$

Foton yeterli enerjiye sahip olduğunda, madde tarafından soğrulur ve zıt elektrik yüklü parçacıklar meydana gelir. Pozitronun kütlesi elektronun kütlesine eşit olduğundan, elektron-pozitron çift oluşumu için eşik enerjisi  $h\nu \approx 2m_e c^2 = 1.02\text{MeV}$  olacaktır. Aynı zamanda bu olay çekirdek etrafında olduğundan hiçbir korunum ilkesi bozulmuş olmaz. Yani, hem yük hem çizgisel momentum ve hem de toplam enerji korunmuş olur. Bu olay Şekil 4'te gösterilmiştir. Çift oluşumun karşıtı ise, bir elektron ile bir pozitronun yan yana gelerek bir foton çifti oluşturmak suretiyle yok olmasıdır. Bu olayın çekirdek etrafında olma zorunluluğu yoktur.



Şekil 4. Çift Oluşumu

Çift oluşum tesir kesiti  $Z^2$  ile değişir, burada  $Z$  ortamın atom numarasıdır. Çift oluşum eşikten hızlıca yükselir ve foton enerjilerinin 10 MeV den büyük olduğu durumlarda enerji kaybı mekanizmalarında baskın olur. Çok yüksek enerjilerde ( $>100$  MeV), elektron-pozitron çifti tesir kesiti azalır ve ortamın radyasyon uzunluğuna eşit olan sabit soğurma katsayısı ile ifade edilir.

#### 1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Saçılması

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi olaylarından biri olan saçılmayı, saçılan ışının enerjisine göre koherent ve inkoherent saçılma olarak iki gruba ayırabiliriz.

##### 1.4.1. Koherent Saçılma

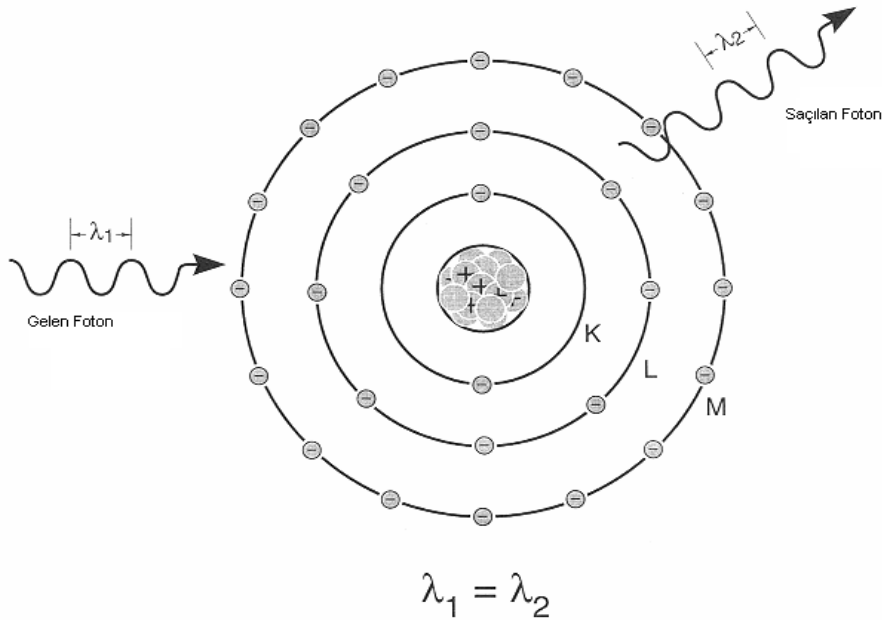
Gelen fotonla saçılan foton arasında, enerji farkı olmadan meydana gelen saçılmaya koherent saçılma denir. Koherent saçılmada gelen ve saçılan ışın aynı fazdadır. Bu durum, enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden daha düşük enerjili fotonların elektron üzerinden saçılmasıyla da oluşur. Koherent saçılma olarak adlandırılan dört tip saçılma

vardır. Bunlar Rayleigh saçılması, Delbrück saçılması, nükleer rezonans saçılma ve nükleer Thomson saçılmasıdır.

#### 1.4.1.1. Rayleigh Saçılması

Bir koherent saçılma olayı olan Rayleigh saçılması, 0,1 MeV ve daha aşağı enerjilerde, fotonların atoma sıkı bağlı elektronlar tarafından saçılmasıdır. Rayleigh saçılması, elektronun etkileşmeden sonra başlangıç konumuna döndüğü saçılma olarak da tanımlanır. Bununla birlikte bu saçılma, Şekil 5.'teki gibi gelen foton bağlı bir elektron üzerine düştüğünde elektronun atomdan sökülecek kadar enerji almadığı hallerde meydana geldiği için düşük foton enerjilerinde ve büyük  $Z$ 'li ağır elementlerde meydana gelme ihtimaliyeti daha fazladır. Rayleigh saçılmasının yoğunluğu  $1/\lambda$  ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla düşük dalga boyuna sahip olan ışınlar büyük dalga boyuna göre daha şiddetli saçılır.

Rayleigh saçılma tesir kesiti  $Z^2$  ile orantılı olup koherent saçılmanın en çok görülen çeşidi olduğu için genellikle koherent saçılma tesiriyle eşdeğer anlamda kullanılır.



Şekil 5. Rayleigh Saçılması

#### **1.4.1.2. Delbrück Saçılması**

Bu saçılmaya elastik nükleer potansiyel saçılma adı da verilmekte olup fotonun, çekirdeğin oluşturduğu Coulomb alanından saçılmasıdır. Delbrück saçılma, çekirdeğin Coulomb alanında yaratılan gerçek olmayan elektron-pozitron çiftlerinden fotonların saçılmasından dolayı elastik foton atom saçılma genliğine yapılan katkıdır.

#### **1.4.1.3. Nükleer Rezonans Saçılma**

Nükleer rezonans saçılma, fotonun atomun çekirdeği ile etkileşmesi sonucu gözlenir. Bu olayda çekirdek iki nükleer enerji seviyesi arasındaki farka eşit enerjiye sahip olan bir fotonun soğurulmasıyla uyarılır. Bunu çekirdeğin uyarılmaktan kurtulması takip eder (Çevik, 1994).

#### **1.4.1.4. Nükleer Thomson Saçılması**

Bu saçılma olayı tamamen gelen fotonla çekirdek arasında meydana gelir. Klasik olarak, bir tek yük sistemi olarak düşünülebilen çekirdek gelen dalga tarafından salındırılır. Çekirdeğin kütlesi çok büyük olduğundan bu etki çok küçüktür.

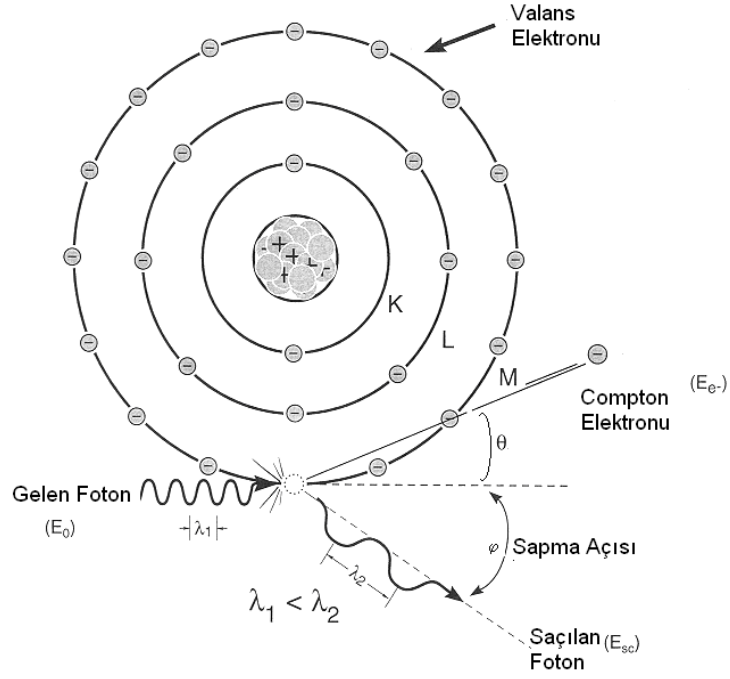
#### **1.4.2. İnkohorent Saçılma**

İnkohorent saçılmada gelen ve saçılan fotonlar arasında enerji farkı vardır. Yani gelen ve saçılan fotonların dalga boyları birbirinden farklıdır. Bu saçılmada fazlar arasında bir bağlantı yoktur. Bu sebeple de saçılan dalgalar arasında bir girişim gözlenemez. Bu durumda atom tarafından saçılan ışının toplam şiddeti, atomun her bir elektronu tarafından saçılma şiddetleri toplanarak elde edilir. İnkohorent saçılma, Compton saçılması, Nükleer saçılma ve Raman saçılması olmak üzere üç çeşittir.

#### **1.4.2.1. Compton Saçılması**

Fotonun madde ile etkileşmesinde en iyi anlaşılan mekanizmalardan birisi Compton saçılmasıdır. Bu olay fotonun serbest bir elektronda esnek saçılmasıdır. Tabiki elektronlar madde içinde bağlı durumdadır. Fakat, eğer fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden yüksek ise, bağlanma enerjisi göz ardı edilip elektronun serbest olduğu

düşünülür. Bu işlemde, gelen foton serbest bir elektronla etkileşerek daha düşük bir enerji ile saçılır ve geri kalan enerji geri tepen elektron tarafından alınır. Gelen foton atomik bağlanma enerjisinin önemli olduğu enerjiye (100 keV altı) sahipse bu olay gerçekleşemez. Bu olay Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Compton saçılması

Enerji ve momentumun korunumu bağıntılarını ve enerjinin rölativistik eşitliği kullanıldığında,

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\varphi) \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  saçılan ve gelen fotonun dalga boyları arasındaki farktır.  $h$  Planck sabiti,  $m_0$  elektronun kütlesi,  $c$  ışık hızı ve  $\varphi$  ise fotonun saçılma açısıdır.  $h/m_0c = 2,43 \times 10^{-13}$  m ise Compton dalgaboyu olarak adlandırılmaktadır.

Eşitlik (5) kullanılarak saçılan fotonun enerjisi,

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos\varphi)} \quad (5)$$

ifadesiyle verilir. Geri tepen elektronun kinetik enerjisi ise ;

$$K = \frac{\alpha E(1 - \cos \varphi)}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} \quad (6)$$

ile verilir. Burada  $E$  gelen foton enerjisi,  $\alpha = E/m_0c^2$  olup ince yapı sabitidir. Gelen foton, saçılan foton ve geri tepen elektron daima bir düzlemde olduğundan  $\theta$  ve  $\varphi$  arasındaki bağıntı ise;

$$\cot \varphi = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\theta$ , geri tepen elektronla gelen fotonun yönü arasındaki açıdır.

Compton saçılması tesir kesiti yaklaşık olarak  $\sigma \approx \frac{Z}{h\nu}$  ile verilir. Foton enerjisinin 0.1 ile 10 MeV olduğu aralıkta ortamda enerji depolanmasında Compton saçılması baskın olur.

Fotoelektrik olay genellikle K ve L tabakalarına ait elektronlarda baskın olmasına rağmen, Compton olayı dış tabaka elektronlarında daha baskındır. Compton saçılması, elektronun bağlanma enerjisinin, gelen fotonun enerjisi yanında ihmal edilecek kadar küçük olduğu durumlarda baskın olarak meydana gelir (Baltaş, 2006).

#### 1.4.2.2. Raman Saçılması

Raman saçılması ikinci mertebeden bir olay olarak da düşünülmektedir. Birinci adımda  $h\nu$  enerjili bir foton soğurulur ve atom bir a durumundan n durumuna uyarılır. İkinci adımda, atom  $h\nu'$  enerjili bir foton yayımlar ve uyarılmış n durumundan son b durumuna döner. Atomun son durumu başlangıçtaki durumundan farklı ise saçılma koherent değildir ve bu olay Raman saçılması olarak bilinir.

#### 1.4.2.3. Nükleer Saçılma

İnkoherent saçılma olarak da gözlenen nükleer saçılma, fotonun atomun çekirdeği ile etkileşmesi sonucu oluşur. Bu saçılmanın inkoherent katkısı oldukça küçüktür.

## **1.5. Karışım Materyallerinin Özellikleri**

### **1.5.1. Çimento**

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerinin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür. Çimento, su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır (Erdoğan, 2003).

### **1.5.2. Yüksek Fırın Cürufu**

Yüksek fırın cürufu; çelik üretiminden oluşan atık maddedir. Önce atmosferik normal koşullarda sonra suda soğutularak elde edilir. Yüksek fırın cürufunun oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C'dir. Yavaş soğutulduğu takdirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle beton agregası olarak kullanılır. Üretilen 1 ton çelikten 30 kg cüruf oluşur (Kaplan ve ark., 2007).

### **1.5.3. Silis Dumanı**

Silis dumanı; silisyum metali veya ferro silisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO<sub>2</sub> olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen hemen tamamını oluşturur. Bu malzeme mikrosilis, silis tozu veya silica fume gibi isimlerle de anılmaktadır. Silis dumanı amorf yapıya sahip olduğundan ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir. Silis dumanı tane boyu 1µ'dan küçük olup ortalama 0,1 µ civarındadır. Silis dumanının inceliği çimentodan ortalama 100 kere daha incedir (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanı, agrega ve çimento hamuru ara yüzeyini geliştirir ve erken puzolanik reaksiyonlar sayesinde betonun dayanımına ve geçirimsizliğine katkıda bulunur. Silis dumanı genelde betonun su gereksimini artırır (Topçu, 2006). Yüksek dayanımlı beton üretiminde silis dumanı yaygın olarak kullanılır (Türkmen, 2002; Topçu, 2006; Erdoğan, 2003). Süper akışkanlaştırıcı katkılarla silis dumanının birlikte kullanımı betonda su/çimento oranını azaltırken kaliteli bir içyapı elde edilmesini de sağlar (Aköz, 2002).

Silis dumanı kullanılarak üretilen betonların fazla miktarda karışım suyuna ihtiyacı vardır. Bunu karşılayabilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir. Çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından beton yüzeyinin düzeltilmesi işlemi güçleşmektedir. Çoğu zaman plastik büzülme çatlaklarına neden olan silis dumanı genellikle betonun koyu renk kazanmasına sebep olur (Topçu, 2006).

#### **1.5.4. Uçucu Kül**

Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen erimiş malzeme soğuyarak gaz akışıyla kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5-150  $\mu$ ) olup baca gazlarıyla sürüklenmeleri nedeniyle uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Yoğunluğu 2.1-2.7 g/cm<sup>3</sup> arasında değişir. Dünyada toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında kullanılır. Ülkemizde yaklaşık 15 milyon ton üretilmektedir (Türker ve ark., 2007).

#### **1.5.5. Agreg a (Kum)**

Agreg a, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan, bağlayıcı madde yardımıyla bir araya getirilen, organik olmayan, kuru, çak ıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genişletilmiş perlit, genişletilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir (Erdoğan, 1995). Agreg a genel olarak beton hacminin % 70-75'ini oluşturur.

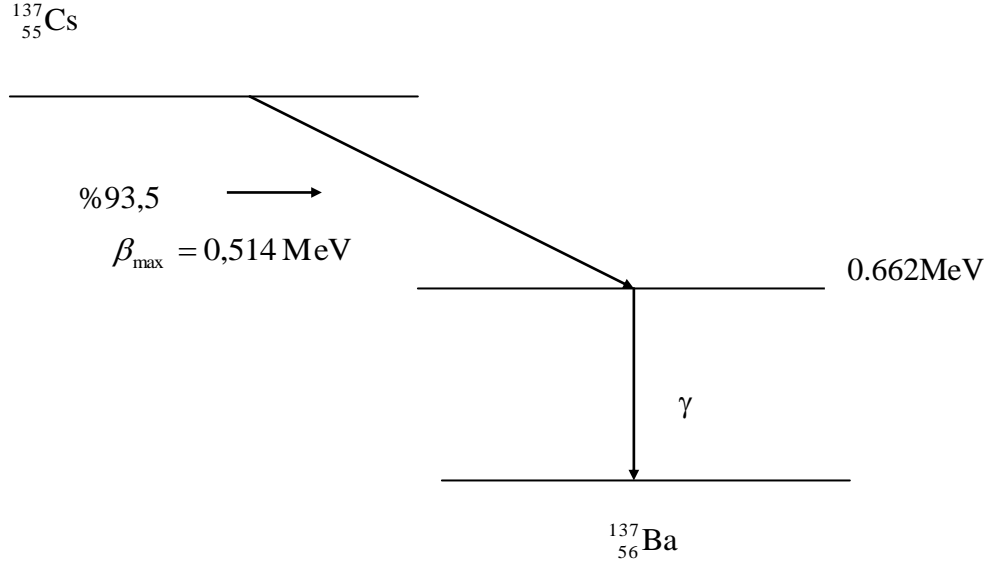
Agreg a, yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olması nedeniyle yapı maliyetlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle uygun niteliklerdeki agreg ayı, yeterli miktarda ve en yakın ocaktan, en ekonomik şekilde elde edebilmek mühendislik açısından önemli bir konudur (Baradan, 2004; Ustabaş, 2008).

#### **1.6. Gama Işınları**

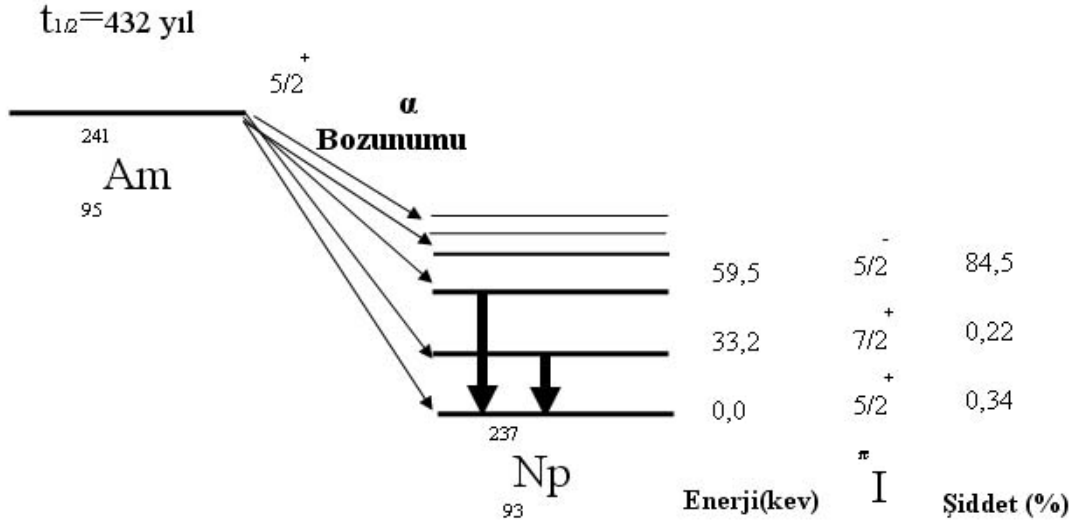
Gama ışınları, alfa ve beta ışınlarını takiben türev çekirdek tarafından gerçekleştirilir. Uyarılmış bir çekirdek yüksek enerji değerine sahip olur ve gama yayımı yaparak fazla enerjisini dışarı verir. Yüksek enerjili  $\gamma$  ışınları birkaç santim kalınlığındaki kurşun bloktan geçebilirler.  $\gamma$  ışınları iyonlaştırıcı değildir. Meydana getirdikleri elektronlarla iyonizasyon yaparlar ve X-ışınlarının aksine çizgisel enerji spektrumuna sahiptirler.



Uyarılmış nükleer seviyelerle üretilen radyoaktivite şeklinin örnekleri Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmektedir. Bu durumlarda  $\gamma$  ışını geçişleri  $\beta$  veya  $\alpha$  geçişlerinin bazı biçimlerinden önce gelir. Bu bozunmalarda kimyasal elementte değişiklik meydana gelir. İlk ve son çekirdek sırasıyla ana ve ürün olarak adlandırılır.  $\gamma$  ışınları genellikle ürüne geçişlerin sonucu olsa da radyoaktif kaynak genellikle ana adıyla gösterilir.



Şekil 7. Elektron yakalama bozunmasına bir örnek olarak  $^{137}\text{Cs}$ 'ın bozunma şeması



Şekil 8.  $^{241}\text{Am}$ 'un bozunma şeması

## 1.7. Nötronlar

Nötronlar yüksüz parçacıklar olduklarından çekirdek ve nükleer kuvvetler ile etkileşirler. Çekirdeğe yaklaştıklarında yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb engelini yenmek zorunda değildirler. Çekirdek ile etkileşebilmeleri için çekirdeğe en az  $10^{-13}$  cm kadar yaklaşmalıdırlar.

Nötronlar düşük enerjilerde oldukça yüksek verimlilikle dedekte edilirler. Nötronları dedekte etmek için yüklü parçacıklar üretilmek zorundadır. Bu sebeple, nötronları birçok protonu olan malzeme ile yavaşlatmak faydalı olacaktır. Çünkü enerjinin büyük bir kısmı çarpışma ile benzer kütleli parçacığa aktarılır.

Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması:

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

Nötronlar enerjilerine bağlı olarak birçok etkileşme meydana getirirler.

## 1.8. Elastik Saçılma

MeV mertebesinde enerjiye sahip nötronların enerji kaybetme mekanizmasıdır. Çarpışan iki parçacığın toplam kinetik enerjisi korunur. Nötron bir atom çekirdeğine çarpar ve kinetik enerjisinin bir kısmını ona aktardıktan sonra kendi geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda saparak çekirdekten uzaklaşır. Burada çekirdeğin yapısında değişiklik olmaz. Enerji kaybı  $2m/(1+m)^2$  ifadesiyle hesaplanır. Burada  $m$  nötron kütesinin çarpıştığı çekirdek kütesine oranını verir. Örnek olarak enerjisi 1 MeV'den küçük olan bir nötron, bir hidrojen çekirdeğiyle çarpışsa yaklaşık olarak enerjisinin yarısını kaybeder. Esnek saçılma yoluyla nötronları yavaşlatmakla hafif elementler en etkilidirler. Bu nedenle hidrojen oranı yüksek su, beton, plastik gibi malzemelerin kullanılması en uygundur. Nötronların yakalanmasında ise lityum ve bor kullanılır.

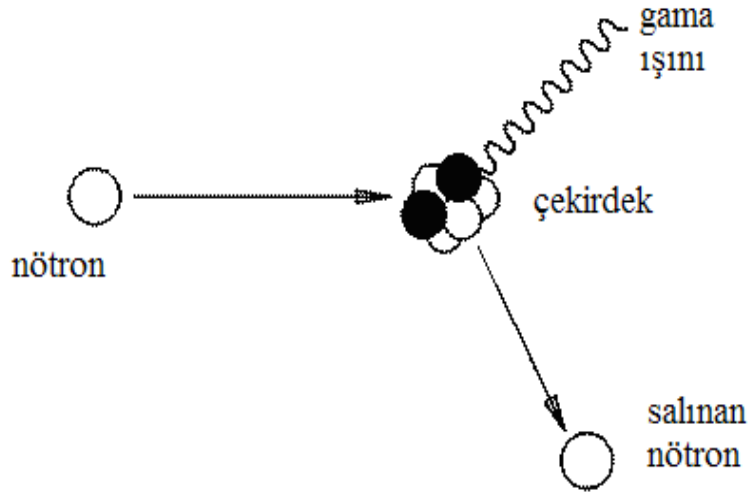
## 1.9. İnelastik Saçılma

Enerjisi 1-10 MeV arasında olan nötronlar ortam atomlarıyla esnek olmayan çarpışmalar meydana getirirler. Bu çeşit saçılmalarda, çekirdek uyarılmış durumda bırakılır

ve bu çekirdek daha sonra gama veya radyasyonun diğer çeşitli formları ile bozunur. Uyarılmış hedef çekirdekler taban durumuna geçerken gama ışınları yayımlarlar. Bu tür nötronların zırhlanmasında hem hafif hem de ağır çekirdekli malzeme kullanılır. En uygun malzeme çiftleri parafin+kadmiyum veya parafin+kurşundur. Nötronların zırhlanmasında demir parçacıkları içeren çimentodan da yararlanılabilir. Enerjisi 0.01 MeV'den küçük nötronlar demir çekirdeği tarafından soğrulur veya çimento içindeki hidrojen çekirdeği ile birleşerek döteryum çekirdeğine dönüşür.

### **1.9.1. Hızlı Nötron Etkileşimleri**

Gama ışınları gibi nötronların da giricilikleri fazladır. Nötronlar yüksüzdürler ve bu nedenle soğurucu ortamların elektrik alanından etkilenmezler. Nötronlarla gerçekleşen reaksiyonların olasılığı artan nötron enerjisi ile hızlı bir şekilde azalır. Yine de, bir çarpışma olayında, nötrona fark edilir miktarda enerji transfer edebildiği için, saçılmanın önemi çok büyüktür. Bu durumda ikincil radyasyonlar, nötron reaksiyonlarından dedekte edilebilir miktarda enerji kazanmış olan geri tepme çekirdeklerdir. Her saçılma bölgesinde, nötron enerji kaybeder ve bu nedenle daha düşük enerjiye yavaşlatılır. Hızlı nötronun enerjisi yeterince yüksek olduğunda, nötron hedef çekirdek tarafından soğrulur. Oluşan bileşik çekirdek orijinal çekirdeği uyarılmış seviyelerinden birinde bırakarak daha düşük kinetik enerjili nötron salar. Bu çekirdek bir veya daha fazla gama ışını salarak temel seviyeye döner. Bu olayda nötronlar enerjilerini büyük ölçüde zırhlama malzemesiyle yaptıkları esnek ve esnek olmayan saçılmalarla kaybederler. Şekil 9'da gösterilen ve esnek olmayan saçılmada, salınan gama ışını enerjisi, saçılan nötron enerjisi ve geri tepen çekirdeğin enerjisinin toplamı nötronun geliş enerjisine eşittir.



Şekil 9. Esnek olmayan saçılma

### 1.9.2. Nötron Soğurma Tesir Kesiti

Hızlı nötronların saçılmasını hesaplamak için etkin soğurma tesir kesiti denilen bir metod geliştirilmiştir. Etkin soğurma tesir kesiti karışım ve bileşikler için  $\Sigma_R$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) veya  $\Sigma_R / \rho$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) değerinden hesaplanabilir (Profio, 1979; Kaplan, 1989).

$$\Sigma_R / \rho = \sum_i w_i (\Sigma_R / \rho)_i \quad (8)$$

veya,

$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i (\Sigma_R / \rho)_i \quad (9)$$

Hızlı nötronların saçılmasında toplam soğurma tesir kesiti artarken nötronun enerjisi azalır. Bu olay hızlı gerçekleşen bir süreçtir. Bu süreç sonrasında nötronlar çok küçük açılarla saparlar. Doğrusal olarak saçılan nötronlar yavaşladığı için uzaklık ihmal edilebilir. Ayrıca bir nötron oksijen ya da ağır metallere çarpışma yaptığında saçılan nötron her açıda sapabilir ve bu durum nötronun enerjisine bağlıdır.

Düşük enerjilerde saçılma tesir kesiti hızlı bir şekilde artarken enerjisi azalmış bir nötron da buna paralel olarak durur.

5-15 MeV arasındaki daha yüksek nötron enerjilerinde ağır elementlerin soğurma tesir kesitlerinin yaklaşık olarak yarısı küçük açılı elastik sapmaların saçılma tesir kesitleriyle aynı değerdedir.

Hızlı bir nötronun hidrojen ile çarpışmasıyla büyük miktarda enerji kaybından dolayı, ışıktan gelen nötron uzaklaştırılır. Sonuç olarak zırh yeterli derecede uygun materyal içerirse, nötronların soğurulması bu süreç ile belirlenir. Hidrojenli zırhlar vasıtasıyla hızlı nötronların soğurulması, deneysel Albert-Welton çekirdeği ve soğurma tesir kesiti ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. Yöntem hidrojenle çarpışmayı soğurmaya eşit kabul ediyor. Soğurma tesir kesiti kavramı, soğurucudaki hidrojenin varlığına dayandırılır. Yöntem hidrojen soğurucular ile desteklenen diğer maddelere de uygulanabilir. Bileşikler ve homojen karışımlar için etkin soğurma tesir kesiti  $\Sigma_R (cm^{-1})$  Kaplan ve Wood tarafından (Kaplan, 1989; Wood, 1982) verilen bileşikler ve karışımlardaki çeşitli elementler için  $\Sigma_R$  veya  $\Sigma_R / \rho (cm^2 g^{-1})$  değerinden hesaplanabilir.

$$\Sigma_R / \rho = \sum_i (F_w)_i (\Sigma_R / \rho)_i \quad (10)$$

burada  $\rho_i$  ve  $(\Sigma_R / \rho)_i$  sırasıyla kısmi yoğunluk (karışımda ortaya çıkan yoğunluk) ve  $i$  bileşiğin soğurma tesir kesitidir ve  $F_w$  ağırlık kesridir. Bileşikteki  $i$  elementin ağırlık kesri:

$$(F_w)_i = \frac{a_i M_i}{\sum_j a_j M_j} \quad (11)$$

denklemleri ile verilir. Burada  $a_i$  ve  $M_i$  sırasıyla formül birimlerinin sayısı ve  $i$  elementin atomik ağırlığıdır.

Denklem (10) esas alınarak herhangi bir bileşik için soğurma tesir kesiti aşağıdaki yöntemle bulunabilir. Kimyasal bir bileşik  $C$  ile ifade edilirse, örneğin;  $X_i Y_j Z_k$  kimyasal formülü gibi, burada  $X, Y$  ve  $Z, C$  bileşiğindeki elementlerin kimyasal sembolleridir ve  $i, j$  ve  $k$  elementlerin kütlece belirli oranlarıdır. Bileşiğin molar kütlesi ( $M_C$ ) aşağıdaki denklemle verilir.

$$M_C = M_X i + M_Y j + M_Z k \quad (g/mol) \quad (12)$$

burada sırasıyla  $M_X$ ,  $M_Y$  ve  $M_Z$  X, Y ve Z elementlerinin atomik kütleleridir (atomik kütle biriminde). (C) bileşiğinin soğurma  $cm^2/g$ , aşağıdaki denklemle verilir.

$$(\Sigma_R / \rho)_C = \frac{M_X i (\Sigma_R / \rho)_X + M_Y j (\Sigma_R / \rho)_Y + M_Z k (\Sigma_R / \rho)_Z}{M_C} \quad (13)$$

veya

$$(\Sigma_R / \rho)_C = R_X (\Sigma_R / \rho)_X + R_Y (\Sigma_R / \rho)_Y + R_Z (\Sigma_R / \rho)_Z \quad (14)$$

burada  $R_e = \frac{M_e}{M_C}$  (C) bileşiğinde (e) elementinin kütle kesridir. Genellikle, n tane element içeren (C) bileşiğinin soğurma tesir kesiti;

$$(\Sigma_R / \rho)_C = \sum_{e=1}^n R_e (\Sigma_R / \rho)_e \quad (15)$$

ile verilir. Burada  $(\Sigma_R / \rho)_e$  (e) elementinin soğurma tesir kesridir. m bileşenlerine sahip bir numune için  $\Sigma_{R_s}$  saçılma tesir kesiti:

$$\Sigma_{R_s} = \sum_{C=1}^m \rho_C (\Sigma_R / \rho)_C = \sum_{C=1}^m (F_w)_C \rho_s (\Sigma_R / \rho)_C \quad (16)$$

denklemleri ile verilir.  $\rho_C$  karışımda ortaya çıkan C. bileşiğin yoğunluğunu ifade eder ve C. bileşiğin ağırlık kesri  $(F_w)_C$  ile numune yoğunluğu  $\rho_s$ 'nin çarpımıdır.

$$\rho_C = (F_w)_C \rho_s \quad (17)$$

## 1.10. Radyoizotop Kaynaklar

X-ışını analizinde genellikle radyoizotop kaynaklar kullanılır. Radyoizotop kaynaklar, X-ışını spektrometrik uygulamalarında dört temel özellikleri ile karakterize edilebilirler:

a) Radyoaktif bozunma ve yayımlanan radyasyonun tipi, ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  yayımlama, K veya L elektronu yakalama)

b) Yayımlanan radyasyonun enerjisi,

c) Kaynak aktivitesi,

d) Kaynağın yarı-ömrü,

Radyoaktif bozunma, radyoaktivite özelliğine sahip olan atomların kararsız çekirdeklerinin parçalanmasıyla yeni bir çekirdek oluşması ve atom çekirdeklerindeki bu değişiklikler sonucu radyasyon yayımlanması olayıdır.

Sonuç olarak kararsız bir atom, kararlı hale gelinceye kadar bir seri dönüşüme uğrar ve böylece meydana gelen seriye bozunma zinciri denir. Bu bozunma sırasında dışarı radyoaktif parçacıklar ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) ve  $\gamma$ -ışını yayınlanır. Tablo 1'de bozunma sonucu yayımlanan radyasyon tipleri ve özellikleri verilmiştir.

Radyoizotopların aktivitesi, radyoaktif atomların bozunması (parçalanması) ile orantılıdır. Bir kaynağın aktivitesi, saniyedeki bozunma sayısı olarak tanımlanır ve bu Bekerele olarak isimlendirilir. Bekerele (Bq) yerine SI birim sisteminde Curie (Ci) kullanılır. Bir Curie  $3,7 \times 10^{10}$  Bq'dir.

Tablo 1. Radyasyon tipleri ve özellikleri

Radyasyon Tipleri	Özellikleri
Gama Işınımı	Atom çekirdeğindeki fotonlar tarafından yayılan elektromagnetik dalgalarıdır.
Beta ışınımı	Atom çekirdeğinden yayılan ve elektron olarak adlandırılan çok yüksek hızlı taneciklerdir.
Alfa ışınımı	Atom çekirdeğinden yayılır, iki proton ve iki nötron içermektedir.
Nötronlar	Atomun çekirdeğinden çarpışmalar ve fisyon tepkimeleri sonucunda yayılan nötr taneciklerdir.
X-ışınları	Elektronların enerji seviyelerindeki değişimden yayılan elektromagnetik dalgalarıdır. Atom çekirdeğinden yayılmazlar.

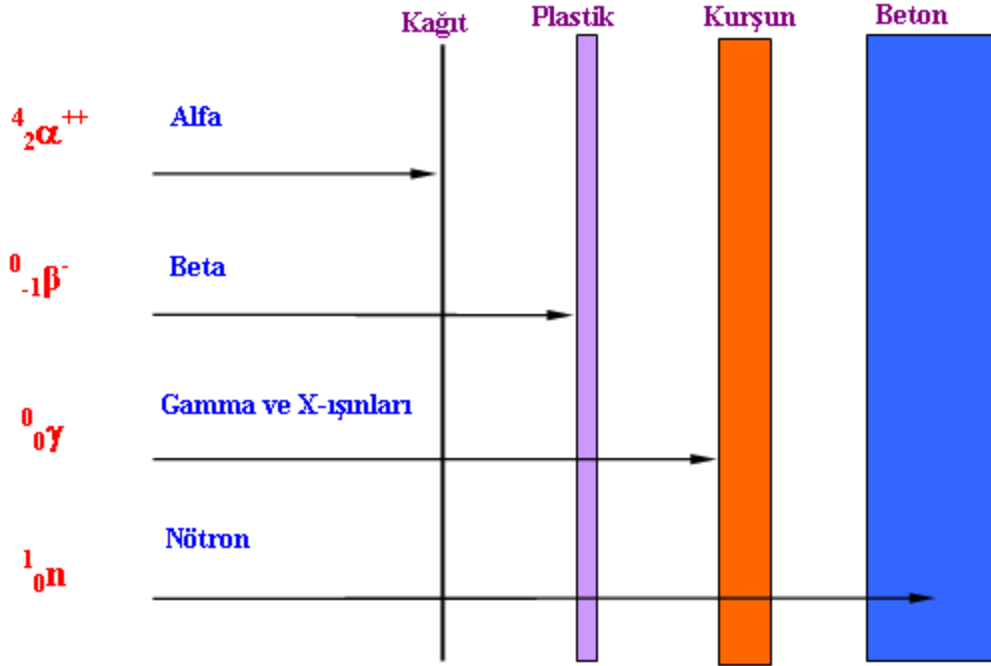
Yayımlanan ışınların sayısı zamanla azalır. Bir radyoizotop atomun  $t$  süre sonundaki bozunanlarının sayısı,

$$N = N_0 e^{-0.693t/T_{1/2}} \quad (18)$$

eşitliği ile bulunur. Burada  $T_{1/2}$  radyoizotop için yarı ömürdür ve bu yarı ömür süresi sonunda kaynaktaki esas yayımlanmaların sayısı yarıya iner. Radyoizotop kaynak bir, iki yarı ömürlük süreden sonra genellikle yenilenir. Radyoizotop kaynakların fiziksel boyutları küçüktür.

Şekil 10'da yayımlanan radyasyonların çeşitli maddelerdeki girme mesafeleri verilmiştir. Ayrıca temel haldeki bir element ise radyasyona tabi tutularak aynı  $Z$ 'ye sahip fakat kararsız elementler (radyoizotoplar) oluşturulabilir ve bunlarda radyoaktif kaynak olarak kullanılabilirler.





Şekil 10. Radyasyonlar ve çeşitli girme mesafeleri

XRF analizi ve numunelerin uyarılmasında kullanılan radyoizotop kaynaklar bu önemli karakteristikleri ile birlikte Tablo 2’de verilmiştir.

Radyoizotopların emniyetli kullanımı için uluslar arası standartlar vardır. Birçok ülkede sağlık bakanlığı veya atom enerjisi yetkilileri bu işi yürütmektedir. Her bir organizasyonun radyoaktif maddeleri kullanabilmek için bir lisansa sahip olması gerekir. Uluslararası Radyoloji Komisyonu insanın sağlıklı yaşayabilmesi için alabileceği yıllık radyasyon dozunu  $3,6 \times 10^{15}$  Bq olarak belirlemiştir.

Tablo 2. XRF analizi ile numunelerin uyarılmasında kullanılan radyoizotop kaynaklar ve özellikleri

Radyoizotop ve Yarı ömrü	Bozunma Tipi	Parçacık Enerjileri ve Geçiş İhtimaliyeti		Elektromagnetik Geçişler	
		Enerji (MeV)	Geçiş İhtimaliyeti	Foton Enerjisi (MeV)	Foton Yayınlanma İhtimaliyeti
Am-241 (433 yıl)	$\alpha$	5,443 5,486	13% 85%	0,060 Np L X-ışınları	36% 38%
Cs-137 (30,17 yıl)	$\beta^-$	0,512 1,174	94,6% 5,4%	0,662 Ba K X-ışınları (0,032-0,038)	85,1% 7%

## 1.11. Soğurma

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

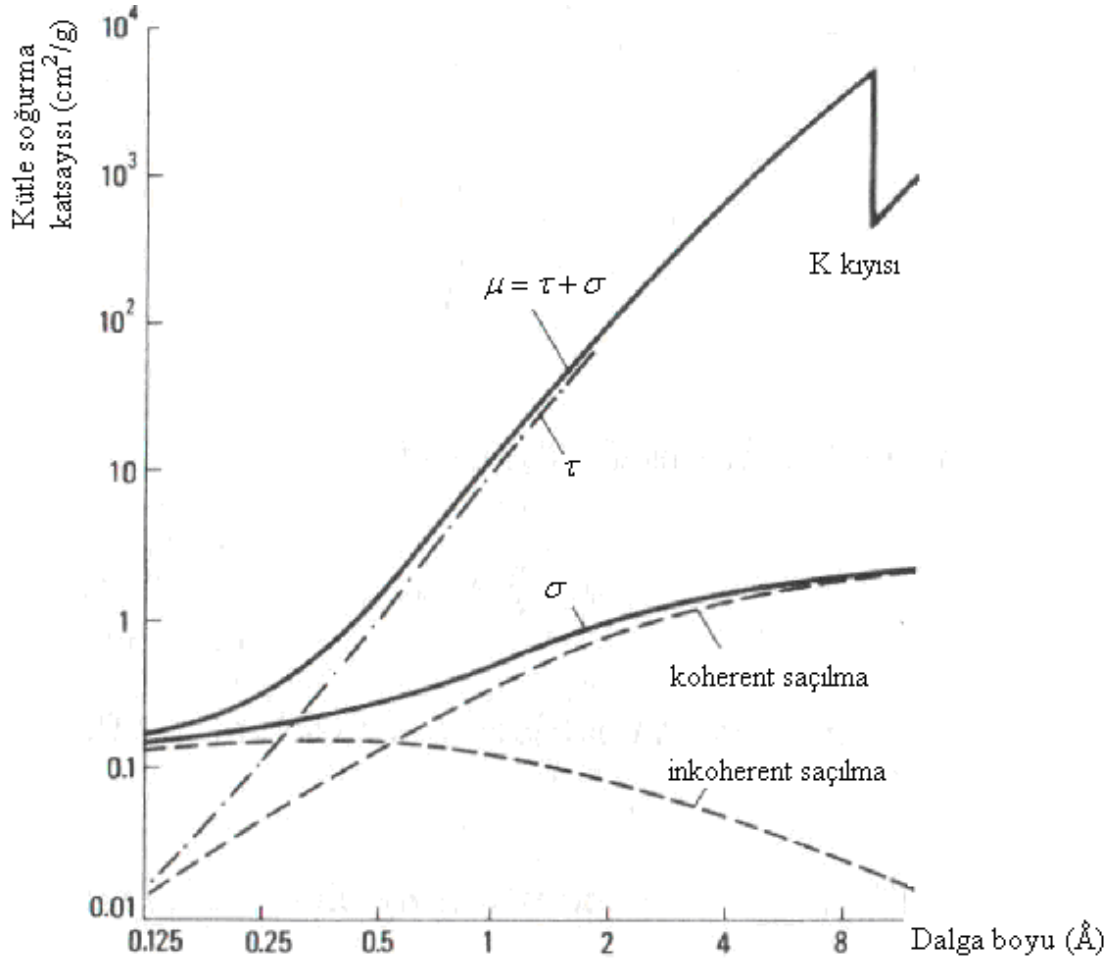
a) Gerçek soğurma (fotoelektrik soğurma), fotonların atomlarla etkileşmesi sonucu elektronik geçişlere sebep olması ile gerçekleşir.

b) Fotonların atomlardan saçılması ile gerçekleşen soğurma. Saçılan fotonlar, gelen fotonla oranla daha uzun dalga boyuna (inkoherent saçılma sonucunda) veya aynı dalga boyuna sahip olur (koherent saçılma sonucunda).

Bu etkiler dikkate alındığında toplam soğurma katsayısının,

$$\mu = \tau + \sigma \quad (19)$$

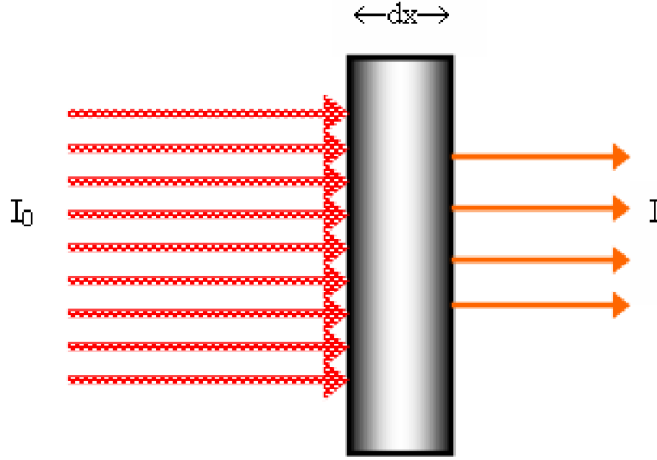
şeklinde olması gerektiği açık bir şekilde görülmektedir. Burada  $\tau$  fotoelektrik soğurma katsayısı iken,  $\sigma$  ise saçılma soğurma katsayısıdır.



Şekil 11. Mg'un kütle soğurma katsayılarının dalga boyu ile değişimi

0,1 keV ile 100 keV aralığındaki enerji bölgesinde fotoelektrik soğurma katsayısı saçılma soğurma katsayısından çok daha büyüktür ve toplam soğurma katsayısına katkısı % 95'in üzerindedir. Bundan dolayı bu enerji aralığında yapılan deneylerde elde edilen fotoelektrik soğurma katsayısı sonuçları toplam soğurmayı yeteri kadar yansıtmaktadır. Magnezyum elementinin kütle soğurma katsayısının dalga boyu ile değişimini gösteren grafik Şekil 11'de verilmektedir. Grafikte, yukarıda bahsettiğimiz enerji aralığına karşılık gelen dalga boylarında toplam soğurmaya fotoelektrik etkinin ve saçılmanın katkıları açık bir şekilde görülmektedir (Tertian ve Claisse, 1982).

### 1.11.1. Lineer Soğurma Katsayısı



Şekil 12. Elektromanyetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması

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

$$dI \propto -I dx \quad (20)$$

$$dI = -\mu I dx \quad (21)$$

$$dI_0/I = -\mu dx \quad (22)$$

burada  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) lineer soğurma katsayısıdır ve birim kalınlık başına düşen enerji soğurma kesri olarak tanımlanır. Lineer soğurma katsayısı, soğurucunun atom numarasına ( $Z$ ) ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Denklem (22)'nin sonlu bir  $x$  kalınlığı üzerinden integralini alırsak,

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu dx \quad (23)$$

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (24)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (25)$$

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

$$\mu = x^{-1} \ln(I_0 / I) \quad (26)$$

olarak bulunur.

#### 1.11.1.1. 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.

$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (27)$$

#### 1.11.2. Kütle Soğurma Katsayısı

Fotonların soğurulmasında soğurucu ortamın kalınlığının yanı sıra yoğunluğu da soğurmanın bir ölçüsüdür. Örneğin sıvı cıvanın 1 mm uzunluğunda X-ışınının soğurulması, buhar halindeki cıvadaki (aynı mesafe için) soğurulmadan çok daha büyüktür. Bu nedenle soğurucu maddeyi onun yoğunluğundan bağımsız olan kütle soğurma katsayısı ile belirtmek daha faydalı olur. Denklem (25)'i yeniden düzenlersek,

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho \cdot x} \quad (28)$$

şeklinde olur. Burada  $\mu/\rho$  kütle soğurma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) olarak adlandırılırken,  $\rho x$  ifadesi ise soğurucunun  $d$  ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ ) yüzey yoğunluğudur. Bu ifadeleri denklem (28)'de yerine yazarsak,

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho).d} \quad (29)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (29)'u yeniden düzenlersek, kütle soğurma katsayısı için,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (30)$$

ifadesini elde etmiş oluruz. Çeşitli deneysel düzenlemeler ve tekniklerden  $(\mu/\rho)$  elde edilebilir. Özellikle son zamanlarda kristolografide ve dalgaboyu değişiminde, Hubbell ve Creagh tarafından uygulandı ve değerlendirildi (Creagh ve Hubell, 1987). Bu, kristografi için uluslararası tablolarda yeni tablolara yol gösterdi (Creagh ve Hubell, 1992). Daha sonraları  $(\mu/\rho)$  Gerward tarafından yeniden incelendi (Gerward, 1993). Ölçülmüş verilerin günün ihtiyaçlarına uygun hale getirilmiş bir bibliyografisi Hubbell tarafından verilmektedir (Hubbell, 1994).

$$\frac{\mu}{\rho} = \sigma_{top} \frac{N_A}{(UA)} \quad (31)$$

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

$$\sigma_{top} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{ph.n.} \quad (32)$$

Burada  $\sigma_{pe}$  atomik ışık etkisi tesir kesiti,  $\sigma_{coh}$  ve  $\sigma_{incoh}$  koherent (Rayleigh) ve inkoharent (Compton) saçılma tesir kesiti,  $\sigma_{pair}$  ve  $\sigma_{trip}$  çekirdeklerin ve atomik elektronların alanlarında elektron-pozitron oluşumu için tesir kesitleridir,  $\sigma_{ph.n.}$  ise fotonükler tesir kesitidir.

Atomik çekirdekler tarafından fotonun fotonükler soğurması, fotonlarla veya daha çok nötronlarla birinin dışarı atılmasında en iyi sonuç verir. Bu etkileşme hedef çekirdeğe

düşen dev rezonans bölgesini kapsayan 5 ve 40 MeV arasında herhangi bir yerde meydana gelen oldukça dar bir enerji bölgesinde toplam foton etkileşme tesir kesiti için %5-10 kadar katkıda bulunabilir. Bu etkileşmenin etkileri 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 ve Seltzer, 1995). Bu sonuçlar aşağıdaki eşitlik (33) ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{UA} (\sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip}) \quad (33)$$

Ayrıca kütle soğurma katsayısı lineer soğurma katsayısının soğurucunun özgül ağırlığına bölümüne eşittir. Gelen radyasyonun şiddetindeki azalmadan bahsettiğimizde radyasyonun zayıflaması veya zayıflatılması, etkileştiği maddede terk edilen enerjiden bahsettiğimizde de soğurulma terimi kullanılır.

### 1.11.3. Karışımlar ve Bileşikler İçin Kütle Soğurma Katsayısı

Birçok karışım ve bileşik için  $(\mu/\rho)$  kütle soğurma katsayısı eşitlik (34) ile hesaplanır.

$$(\mu/\rho)_c = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (34)$$

Burada  $w_i$  i. atomik yapının ağırlığı ile ilgili değerdir.  $(\mu/\rho)_i$  değerleri Hubell ve Seltzer'den alınmıştır (Hubbel ve Seltzer, 1995).

Bir kimyasal bileşiğin ağırlık kesri ise;

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum a_i A_i} \quad (35)$$

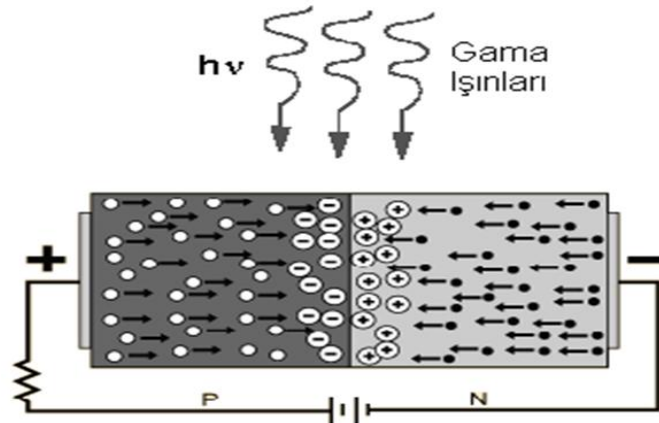
ile verilir. Burada  $A_i$ , i. elementin atomik ağırlığı ve  $a_i$  ise i. elementin mol sayısıdır.

## 1.12. Gama Işını Dedektörleri

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

### 1.12.1.1. Yarıiletken Dedektörler

Yarı iletken dedektörler, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (boşluk) taşıyıcıları fazla olan n ve p tipi materyaller temas ettirilerek elde edilir. Ters besleme altında dedektörde, elektron ve boşluk arınmış bir hassas bölge oluşur. Dedektör veriminin yüksek olması için derin bir hassas bölge, derin hassas bölge elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Bir foton, eklem içinden geçtikçe, bir elektron valans bandından iletim bandına yükseltilir ve elektron-boşluk çifti üretilmiş olur. İçerdeki elektrik alan, elektronları eklem pozitif, boşlukları da negatif tarafa doğru sürükler. Bu da bir sayıcı ile sayılabilen bir puls meydana getirir. Şekil 13'te yarıiletken dedektörlerin basit şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 13. Yarıiletken dedektör şeması

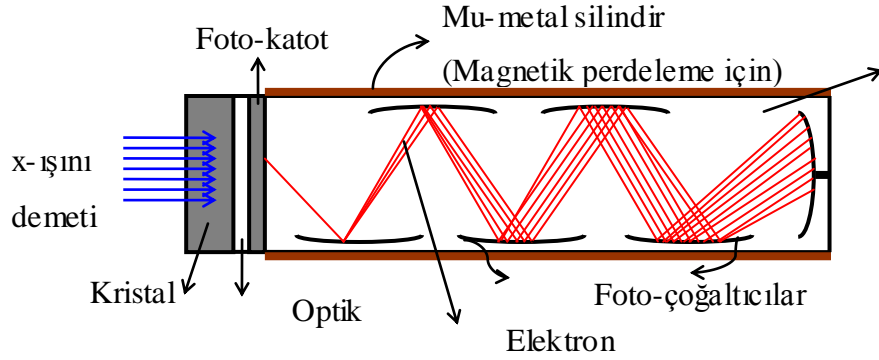


### 1.12.1.2. Sintilasyon Dedektörler

Sintilasyon dedektörleri iki ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 14).

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

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



Şekil 14. Sintilasyon dedektörlerinin şematik gösterimi

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Numunelerin içeriği TS EN 196-1 standartlarında hazırlandı. Tüm betonlarda normalize edilmiş CEN EN 196-1 kumu ve sıradan Portland çimento (CEM I 42.5 R.) kullanıldı. Bu çimento bazı harçlarda, mineral katkı dediğimiz uçucu kül, silika dumanı ve yüksek fırın cürufu ile karıştırıldı. Beton numuneleri TS EN 196-1 standartlarına göre Hobart karıştırıcı tarafından karıştırıldı. Hazırlanan harçlar 4×4×16 cm'lik kalıplara yerleştirildi ve daha sonra %90 nemlilikte 20°C'de 24 saat boyunca kurutuldu. Bu işlemlerden sonra kalıplarından çıkarılan numuneler 20±1°C'de kireç suyuna bırakıldı. Böylece dört farklı tip beton hazırlanmış oldu. İçeriğinde mineral katkı olmayan "sıradan" beton numunesi, (MO) 450 g çimento, 1350 g kum ve 225 g sudan oluşmaktadır (1:3:0.5 oranlarında). Diğer üç tip beton numunesi ise çimentonun azaltılması ve yerine uçucu kül (MF), yüksek fırın cürufu (MB) ve silika dumanı (MS) eklenerek hazırlandı. Uçucu kül (MF) ve yüksek fırın cürufu (MB) katkılı beton numuneleri %5, %10, %20 ve %30 oranlarında, silika dumanı (MS) ise %2,5, %5 ve %10 oranlarında eklenerek hazırlandı. Sonuçta on iki beton numunesi elde edildi. Hazırlanmış olan beton numunelerinin içerikleri Tablo 3.'de listelenmiştir.

Beton numunelerinin yoğunluklarını hesaplamak için, numunelerin kütleleri, kenarları ve kalınlıkları 5'er kez ölçüldü. Elde edilen verilerden yararlanılarak numunelerin yoğunlukları hesaplandı.

Tablo 3. Beton numunelerinin içeriği

Beton numuneleri	Çimento (g)	Su (g)	Silika dumanı (g)	Uçucu kül (g)	Yüksek fırın cürufu (g)	Kum (g)	Yoğunluk
MO	450	225	0	0	0	1350	2,09
MS2,5	438,75	225	11,25	0	0	1350	2,03
MS5	427,5	225	22,5	0	0	1350	2,07
MS10	405	225	45	0	0	1350	2,02
MF5	427,5	225	0	22,5	0	1350	2,07
MF10	405	225	0	45	0	1350	1,99
MF20	360	225	0	90	0	1350	1,95
MF30	315	225	0	135	0	1350	1,83
MB5	427,5	225	0	0	22,5	1350	1,87
MB10	405	225	0	0	45	1350	1,88
MB20	360	225	0	0	90	1350	1,95
MB30	315	225	0	0	135	1350	1,89

## 2.2. Kimyasal Analiz

MO, MS, MF, MB karışımları ve bu karışımların farklı bileşenlerinin kimyasal ölçümleri için EDXRF spektrometre (Epsilon5, PANalytical, Almelo, the Netherlands) cihazı kullanıldı. Numunelerin üzerinde kalan suyu buharlaştırmak için, numuneler 4 saat boyunca 105°C'de kurutuldu. Analiz işlemi için numuneler, öncelikle hidrolik baskı makinesiyle 20 saniye boyunca 7 tonluk basınçla preslendi. Preslenen numuneler 40 mm çapındadır ve kütleleri 500 g'dır. Ölçüm için hazır hale gelen numuneler 100 ml'lik lekesiz çelik kaplara yerleştirildi ve Şekil 15'te gösterilen EDXRF cihazında ölçüldü.



Şekil 15. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı

## 2.3. Deneysel Yöntem

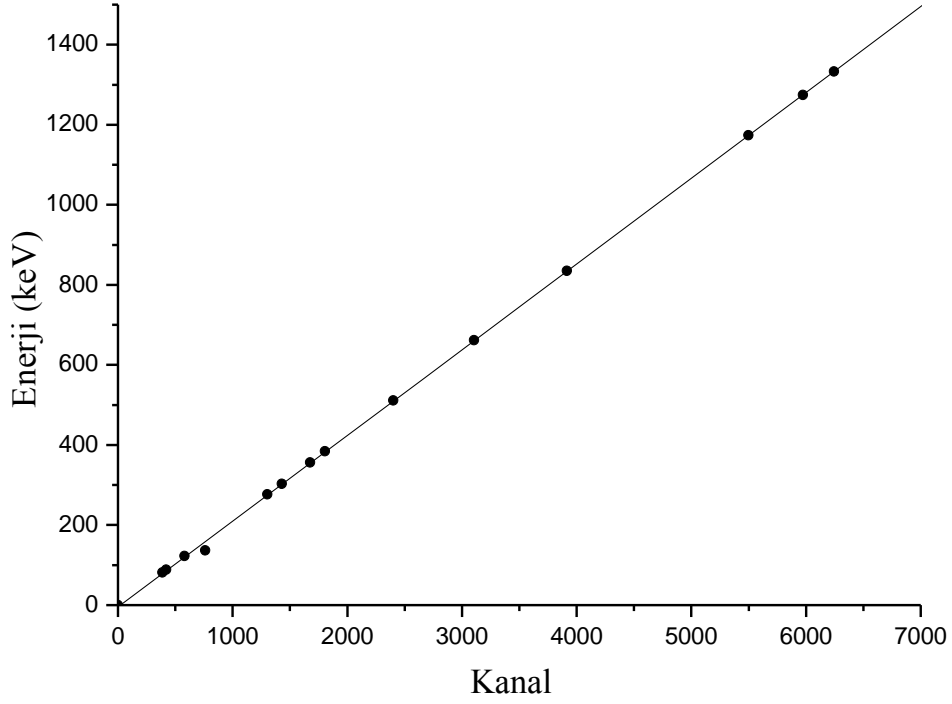
### 2.3.1. Enerji Kalibrasyonu

Herhangi bir numune ile çalışılırken, ilgili numuneden gelen piklerin tepe noktasının enerjisinin hesaplanıp, o pikin hangi elemente ait olduğunu belirlemek, pikleri doğru bir şekilde yorumlamak ve değerlendirmek için enerji kalibrasyonu yapıldı. Enerji kalibrasyonu yapmak için enerji değerleri bilinen pikler ve bu piklerin enerji değerlerine karşılık gelen kanal numaralarına ihtiyaç vardır. Enerji ve verim kalibrasyonu için enerjileri 80–1400 keV arasında değişen  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  ve  $^{60}\text{Co}$  radyoizotop standart nokta kaynaklar kullanıldı. Çalışma süresince enerji kalibrasyonu periyodik olarak kontrol edildi. Tablo 4’de kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 4. Standart kaynakların özellikleri

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

Dedektör yardımı ile enerji kalibrasyonu için standart kaynağın spektrumu elde edilerek enerjilerin hangi kanallara karşılık geldiği tespit edildi. Enerjinin kanallara göre değişim grafiği Şekil 16'da gösterilmiştir.



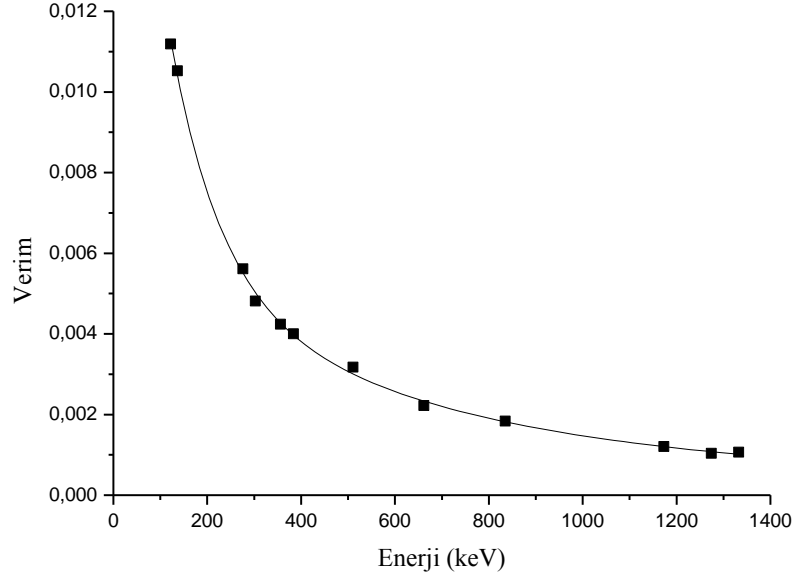
Şekil 16. Enerji-Kanal grafiği

### 2.3.2. Verim Kalibrasyonu

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

$$\varepsilon = \frac{s}{(I_{\gamma}) \cdot N \cdot t} \quad (36)$$

Burada HPGe dedektörünün ilgilenilen gama enerjisindeki verimi  $\varepsilon$ , pikin net alanı  $s$ , sayma süresi  $t$ , gama ışınının salma hızı  $I_{\gamma}$  ve  $N$  kullanılan standart kaynağın sayım günündeki aktivitesidir. Böylece farklı gama enerjileri için hesaplanan  $\varepsilon$  değerlerine karşılık gelen enerji verim eğrisi elde edilmiştir (Şekil 17). Verimin güvenilirliği uluslararası Atom Enerji kurumunun (IAEA- 375) nolu referans materyali ile periyodik olarak test edilmiştir.

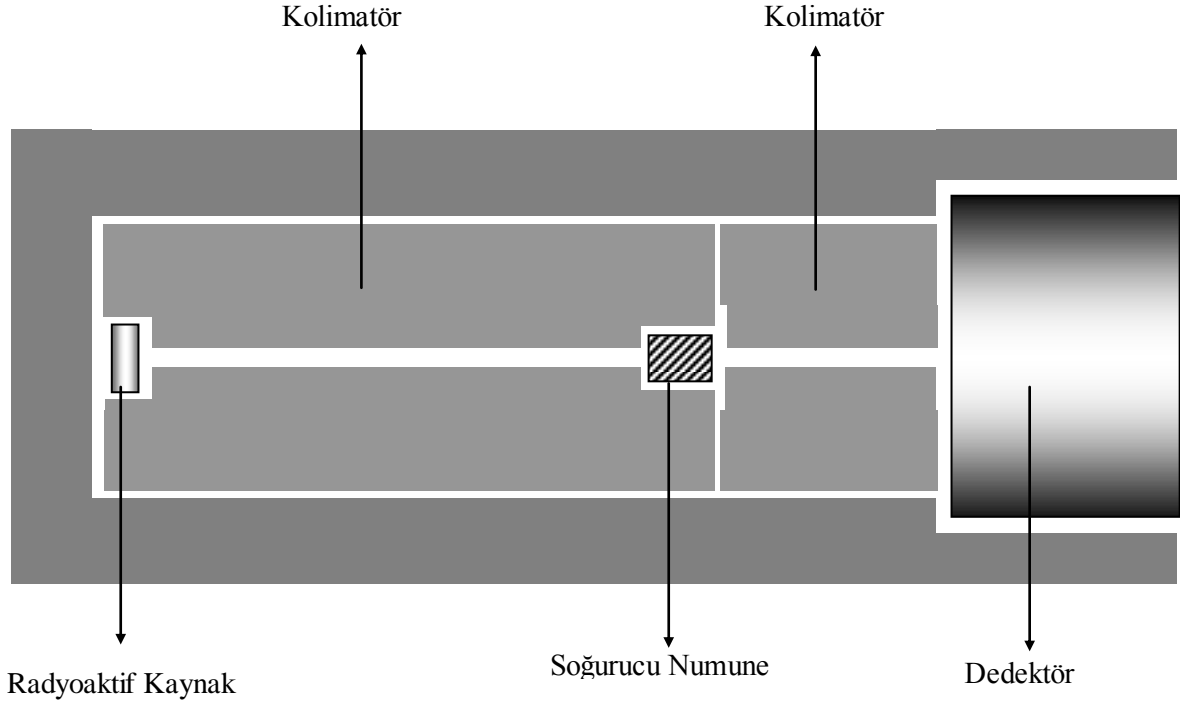


Şekil 17. Enerji-Verim eğrisi

## 2.4. Kütle Soğurma Katsayısı Ölçümleri

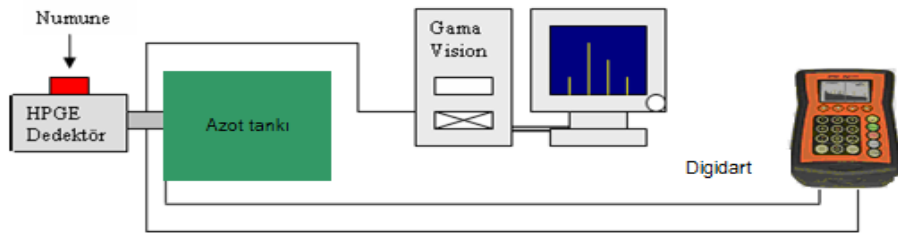
### 2.4.1. Deney Sistemi

Numunelerin deneysel kütle soğurma katsayıları Ortec marka GEM55P4 Model HPGe dedektörü kullanılarak yapılmıştır. HPGe dedektörü özden yarı iletkenlik prensibine göre çalışan yarıiletken kristalden oluşmaktadır. Özden yarıiletken, içerisine yapay safsızlıkların bulunmadığı bir çeşit yarıiletkendir. HPGe dedektörde  $\text{cm}^3$ 'te yaklaşık olarak 1010 safsızlık atomu vardır. Dedektör ile nokta kaynak arasında Şekil 18'de gösterildiği gibi yaklaşık 20 cm uzaklık vardır.



Şekil 18. Gama ışınları soğurma ölçümleri için kullanılan deney geometrisi

HPGe dedektörü %55 relatif verime sahip olup 1700 volta çalışmaktadır. Enerji rezölasyonu (FWHM)  $^{60}\text{C}$  kaynağı için 1.3325 MeV'de 1,9 keV'dir. Şekil 18'de deneysel sistem verilmekte olup, önyükseltici, yüksek voltaj kaynağı, analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA) bir sistemde bulunup aynı zamanda dedektörün portatif olarak kullanılmasına imkan vermektedir. Alınan ölçümler Gama Vision yazılım programı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 19. Soğurma ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin genel görünüşü

Kütle soğurma katsayısı ölçümlerine geçmeden önce enerji kalibrasyonu yapıldı. Enerji kalibrasyonu için enerjileri 80-1400 keV arasında değişen  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  standart radyoaktif kaynaklar kullanıldı. Kalibrasyon işleminden



sonra beton halindeki inşaat malzemelerinin kütle soğurma katsayılarını belirlemek için enerjileri sırasıyla 59,5 ve 661 keV olan  $^{241}\text{Am}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif nokta kaynaklar kullanıldı. Bu kaynakların saldığı gama ışınlarının paralel bir demet halinde dedektöre gelmesi, istenmeyen saçılmaları engellemek ve numune ve kaynakları yerleştirmek için her biri üzerinde 1 mm çaplı delikler bulunan kurşun kolimatörler kullanıldı. Deney geometrisi bu şekilde hazırlandıktan sonra ölçüm işlemine geçildi. Ölçümler önce düzenekte numune yokken radyoaktif kaynaktan yayınlanan gama ışınları ile 5000 s süre için üçer defa gerçekleştirildi. Daha sonra beton malzemeler dedektörün baş kısmından 5 cm uzaklığa yerleştirildi ve ölçümler 5000 s süre için alındı. Bu deneyler sonucunda Şekil 20-21 spektrum örneklerinde görüldüğü gibi ilgili piklerin altında kalan alanlar kullanılarak numuneye gelen ve numuneden geçen gama ışınlarının şiddetleri bulundu. Bu veriler kullanılarak malzemelerin kütle soğurma katsayıları deneysel olarak hesaplandı.

Mevcut ölçümlerdeki hataların % 9-11 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu hataların pik alanlarından ( $\leq \%5$ ), numunelerin kalınlığından ( $\approx \%3$ ), yoğunluk ölçümlerinden ( $\leq \%3$ ) ve sayma istatistiğinden ( $\leq \%2$ ) kaynaklanmaktadır.

Kütle soğurma katsayılarının teorik değerleri denklem 37'yi temel alan Gerward tarafından geliştirilen WinXCOM programı ile hesaplandı (Gerward ve ark., 2004).

### **3. BULGULAR**

#### **3.1. Kimyasal Analiz**

Numunelerin kimyasal analiz sonuçları yüzde olarak standart numune (MO), uçucu kül katkılı numuneler (MF5), (MF10), (MF20) ve (MF30), silika dumanı katkılı numuneler (MS2,5), (MS5) ve (MS10), yüksek fırın cürufu katkılı numuneler (MB5), (MB10), (MB20) ve (MB30) için sırasıyla Tablo 5’te verilmiştir. Tablo 6’da on iki beton numunesi için kimyasal analiz sonuçları değerleri kullanılarak WinXcom programı ile hesaplanmış teorik kütle soğurma katsayıları verilmektedir.

Tablo 5. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları (%)

Element	MO	MF5	MF10	MF20	MF30	MS2,5	MS5	MS10	MB5	MB10	MB20	MB30
H	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
O	51,2	51,3	51,5	51,7	51,9	51,3	51,4	51,6	51,3	51,4	51,5	51,7
Na	2,44	2,43	2,42	2,40	2,39	2,43	2,43	2,42	2,43	2,42	2,40	2,39
Mg	2,39E-01	3,59E-01	4,78E-01	7,16E-01	9,55E-01	2,38E-01	2,37E-01	2,34E-01	2,98E-01	3,57E-01	4,75E-01	5,92E-01
Al	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,75	3,83	3,99	4,15
Si	27,6	27,8	28	28,4	28,8	27,7	27,9	28,3	27,6	27,7	27,9	28,1
S	7,25E-01	7,06E-01	6,87E-01	6,49E-01	6,11E-01	7,15E-01	7,05E-01	6,85E-01	7,20E-01	7,15E-01	7,06E-01	6,97E-01
Cl	9,38E-01	9,37E-01	9,37E-01	9,36E-01	9,35E-01	9,38E-01	9,38E-01	9,38E-01	9,37E-01	9,35E-01	9,33E-01	9,30E-01
K	9,94E-01	1,01	1,03	1,08	1,12	9,92E-01	9,90E-01	9,85E-01	9,93E-01	9,91E-01	9,89E-01	9,86E-01
Ca	9,77	9,31	8,84	7,92	6,99	9,53	9,30	8,83	9,49	9,22	8,67	8,12
Sc	1,18E-02	1,12E-02	1,06E-02	9,44E-03	8,26E-03	1,15E-02	1,12E-02	1,06E-02	1,15E-02	1,11E-02	1,05E-02	9,84E-03
Ti	1,30E-01	1,36E-01	1,42E-01	1,54E-01	1,67E-01	1,29E-01	1,29E-01	1,28E-01	1,31E-01	1,32E-01	1,34E-01	1,37E-01
V	1,93E-03	2,14E-03	2,35E-03	2,77E-03	3,18E-03	1,90E-03	1,87E-03	1,80E-03	1,87E-03	1,80E-03	1,67E-03	1,54E-03
Cr	9,31E-03	9,38E-03	9,46E-03	9,61E-03	9,75E-03	9,28E-03	9,25E-03	9,19E-03	9,24E-03	9,17E-03	9,03E-03	8,88E-03
Mn	3,43E-02	3,44E-02	3,44E-02	3,45E-02	3,46E-02	3,44E-02	3,44E-02	3,44E-02	4,15E-02	4,87E-02	6,30E-02	7,73E-02
Fe	8,69E-01	8,83E-01	8,97E-01	9,24E-01	9,52E-01	8,60E-01	8,51E-01	8,32E-01	8,46E-01	8,23E-01	7,76E-01	7,30E-01
Co	2,77E-03	2,63E-03	2,49E-03	2,22E-03	1,94E-03	2,70E-03	2,63E-03	2,49E-03	2,63E-03	2,49E-03	2,22E-03	1,94E-03
Ni	2,62E-04	3,44E-04	4,26E-04	5,91E-04	7,55E-04	2,64E-04	2,67E-04	2,71E-04	2,62E-04	2,62E-04	2,62E-04	2,62E-04
Cu	8,72E-03	8,52E-03	8,31E-03	7,89E-03	7,47E-03	8,58E-03	8,44E-03	8,15E-03	8,42E-03	8,11E-03	7,50E-03	6,89E-03
Zn	4,05E-03	4,06E-03	4,07E-03	4,09E-03	4,11E-03	4,04E-03	4,03E-03	4,02E-03	3,95E-03	3,85E-03	3,66E-03	3,46E-03
Ga	-	2,47E-05	4,94E-05	9,89E-05	1,48E-04	1,91E-05	3,82E-05	7,64E-05	-	-	-	-
Ge	-	4,80E-07	9,60E-07	1,92E-06	2,88E-06	2,47E-06	4,94E-06	9,87E-06	-	-	-	-
As	2,70E-03	2,69E-03	2,67E-03	2,65E-03	2,62E-03	2,69E-03	2,67E-03	2,65E-03	2,67E-03	2,64E-03	2,58E-03	2,53E-03
Se	5,98E-04	5,68E-04	5,38E-04	4,79E-04	4,19E-04	5,88E-04	5,78E-04	5,58E-04	5,69E-04	5,40E-04	4,82E-04	4,23E-04
Br	-	-	-	-	-	9,22E-06	1,84E-05	3,69E-05	-	-	-	-
Rb	4,89E-03	5,08E-03	5,26E-03	5,64E-03	6,01E-03	4,90E-03	4,91E-03	4,92E-03	4,93E-03	4,96E-03	5,02E-03	5,09E-03

Tablo 5 'in devamı

Sr	2,24E-02	2,23E-02	2,22E-02	2,20E-02	2,19E-02	2,23E-02	2,23E-02	2,21E-02	2,25E-02	2,27E-02	2,29E-02	2,32E-02
Y	2,63E-03	2,66E-03	2,68E-03	2,73E-03	2,78E-03	2,63E-03	2,62E-03	2,61E-03	2,66E-03	2,68E-03	2,73E-03	2,77E-03
Zr	1,96E-02	1,95E-02	1,94E-02	1,92E-02	1,90E-02	1,96E-02	1,95E-02	1,95E-02	1,97E-02	1,97E-02	1,97E-02	1,98E-02
Nb	9,14E-04	8,99E-04	8,83E-04	8,53E-04	8,22E-04	9,06E-04	8,99E-04	8,83E-04	8,99E-04	8,83E-04	8,53E-04	8,22E-04
Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	1,43E-05	2,85E-05	5,71E-05	8,56E-05
Ba	6,02E-02	6,03E-02	6,04E-02	6,06E-02	6,08E-02	6,04E-02	6,06E-02	6,09E-02	6,66E-02	7,30E-02	8,58E-02	9,86E-02
Ce	-	8,40E-05	1,68E-04	3,36E-04	5,04E-04	-	-	-	4,93E-05	9,86E-05	1,97E-04	2,96E-04
Nd	2,80E-03	2,87E-03	2,93E-03	3,06E-03	3,19E-03	2,80E-03	2,80E-03	2,80E-03	2,80E-03	2,80E-03	2,80E-01	2,80E-03
Yb	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,52E-04	3,05E-04	6,10E-04	9,15E-04
Hf	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,71E-03	8,73E-03	8,75E-03	8,80E-03	8,85E-03
La	-	-	-	-	-	-	-	-	2,61E-05	5,21E-05	1,04E-04	1,56E-04
Pb	2,62E-03	2,65E-03	2,68E-03	2,75E-03	2,82E-03	2,62E-03	2,63E-03	2,64E-03	2,58E-03	2,55E-03	2,48E-03	2,41E-05
Th	0,00E+00	1,70E-04	3,39E-04	6,78E-04	1,02E-03	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 6. 12 beton numunesi için hesaplanmış kütle soğurma katsayıları (cm<sup>2</sup>/g)

Enerji (MeV)	MO	MS2,5	MS5	MS10	MF5	MF10	MF20	MF30	MB5	MB10	MB20	MB30
1,00E-03	3,47E+03	3,43E+03	3,39E+03	3,36E+03	3,40E+03	3,39E+03	3,37E+03	3,30E+03	3,40E+03	3,39E+03	3,41E+03	3,38E+03
1,10E-03	2,75E+03	2,71E+03	2,69E+03	2,67E+03	2,69E+03	2,68E+03	2,67E+03	2,61E+03	2,70E+03	2,68E+03	2,69E+03	2,66E+03
1,14E-03	2,50E+03	2,47E+03	2,48E+03	2,43E+03	2,45E+03	2,44E+03	2,43E+03	2,38E+03	2,46E+03	2,44E+03	2,45E+03	2,42E+03
1,16E-03	2,39E+03	2,36E+03	2,39E+03	2,32E+03	2,34E+03	2,33E+03	2,32E+03	2,27E+03	2,35E+03	2,33E+03	2,34E+03	2,31E+03
1,19E-03	2,24E+03	2,21E+03	2,24E+03	2,17E+03	2,19E+03	2,18E+03	2,17E+03	2,12E+03	2,20E+03	2,18E+03	2,19E+03	2,16E+03
1,24E-03	2,01E+03	1,98E+03	2,01E+03	1,95E+03	1,96E+03	1,96E+03	1,95E+03	1,90E+03	1,98E+03	1,96E+03	1,97E+03	1,94E+03
1,29E-03	1,81E+03	1,78E+03	1,82E+03	1,75E+03	1,77E+03	1,76E+03	1,76E+03	1,71E+03	1,78E+03	1,76E+03	1,77E+03	1,75E+03
1,31E-03	1,76E+03	1,73E+03	1,76E+03	1,70E+03	1,71E+03	1,71E+03	1,71E+03	1,74E+03	1,73E+03	1,72E+03	1,73E+03	1,73E+03
1,32E-03	1,72E+03	1,69E+03	1,73E+03	1,67E+03	1,68E+03	1,68E+03	1,67E+03	1,71E+03	1,70E+03	1,68E+03	1,70E+03	1,69E+03
1,34E-03	1,65E+03	1,63E+03	1,66E+03	1,61E+03	1,61E+03	1,61E+03	1,61E+03	1,64E+03	1,63E+03	1,62E+03	1,63E+03	1,63E+03
1,36E-03	1,59E+03	1,57E+03	1,60E+03	1,54E+03	1,55E+03	1,55E+03	1,54E+03	1,58E+03	1,57E+03	1,56E+03	1,57E+03	1,56E+03
1,50E-03	1,23E+03	1,21E+03	1,23E+03	1,19E+03	1,20E+03	1,19E+03	1,19E+03	1,22E+03	1,21E+03	1,20E+03	1,21E+03	1,20E+03
1,53E-03	1,16E+03	1,14E+03	1,17E+03	1,13E+03	1,13E+03	1,13E+03	1,13E+03	1,15E+03	1,15E+03	1,14E+03	1,15E+03	1,14E+03
1,85E-03	1,73E+03	1,75E+03	1,78E+03	1,79E+03	1,77E+03	1,78E+03	1,79E+03	1,82E+03	1,77E+03	1,77E+03	1,76E+03	1,78E+03
1,86E-03	1,71E+03	1,73E+03	1,77E+03	1,77E+03	1,75E+03	1,76E+03	1,77E+03	1,80E+03	1,75E+03	1,76E+03	1,74E+03	1,76E+03
1,86E-03	1,71E+03	1,73E+03	1,77E+03	1,77E+03	1,75E+03	1,76E+03	1,77E+03	1,80E+03	1,75E+03	1,76E+03	1,74E+03	1,76E+03
1,90E-03	1,64E+03	1,66E+03	1,69E+03	1,70E+03	1,68E+03	1,69E+03	1,69E+03	1,72E+03	1,68E+03	1,68E+03	1,67E+03	1,68E+03
1,94E-03	1,57E+03	1,59E+03	1,62E+03	1,63E+03	1,61E+03	1,62E+03	1,62E+03	1,65E+03	1,61E+03	1,61E+03	1,60E+03	1,62E+03
2,00E-03	1,47E+03	1,49E+03	1,52E+03	1,53E+03	1,51E+03	1,52E+03	1,52E+03	1,55E+03	1,51E+03	1,51E+03	1,50E+03	1,52E+03
2,04E-03	1,41E+03	1,43E+03	1,46E+03	1,46E+03	1,45E+03	1,45E+03	1,46E+03	1,48E+03	1,45E+03	1,45E+03	1,44E+03	1,45E+03
2,07E-03	1,36E+03	1,38E+03	1,41E+03	1,42E+03	1,40E+03	1,40E+03	1,41E+03	1,43E+03	1,40E+03	1,40E+03	1,39E+03	1,40E+03
2,08E-03	1,35E+03	1,37E+03	1,39E+03	1,40E+03	1,39E+03	1,39E+03	1,40E+03	1,42E+03	1,38E+03	1,39E+03	1,38E+03	1,39E+03
2,12E-03	1,29E+03	1,31E+03	1,33E+03	1,34E+03	1,33E+03	1,33E+03	1,34E+03	1,36E+03	1,32E+03	1,33E+03	1,32E+03	1,33E+03
2,16E-03	1,23E+03	1,25E+03	1,27E+03	1,28E+03	1,27E+03	1,27E+03	1,28E+03	1,30E+03	1,26E+03	1,27E+03	1,26E+03	1,27E+03
2,19E-03	1,19E+03	1,21E+03	1,23E+03	1,24E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,24E+03	1,25E+03	1,22E+03	1,23E+03	1,22E+03	1,23E+03
2,22E-03	1,15E+03	1,17E+03	1,19E+03	1,20E+03	1,18E+03	1,19E+03	1,19E+03	1,21E+03	1,18E+03	1,19E+03	1,18E+03	1,19E+03
2,26E-03	1,10E+03	1,12E+03	1,14E+03	1,15E+03	1,13E+03	1,14E+03	1,14E+03	1,16E+03	1,13E+03	1,13E+03	1,12E+03	1,13E+03
2,31E-03	1,04E+03	1,06E+03	1,08E+03	1,08E+03	1,07E+03	1,07E+03	1,08E+03	1,09E+03	1,07E+03	1,07E+03	1,06E+03	1,07E+03

Tablo 6'nın devamı

Enerji (MeV)	MO	MS2,5	MS5	MS10	MF5	MF10	MF20	MF30	MB5	MB10	MB20	MB30
2,34E-03	1,00E+03	1,02E+03	1,04E+03	1,05E+03	1,03E+03	1,04E+03	1,04E+03	1,06E+03	1,03E+03	1,04E+03	1,03E+03	1,04E+03
2,37E-03	9,71E+02	9,88E+02	1,01E+03	1,01E+03	1,00E+03	1,00E+03	1,01E+03	1,02E+03	9,98E+02	1,00E+03	9,92E+02	1,00E+03
2,42E-03	9,17E+02	9,34E+02	9,51E+02	9,56E+02	9,46E+02	9,48E+02	9,53E+02	9,67E+02	9,43E+02	9,46E+02	9,38E+02	9,47E+02
2,46E-03	8,77E+02	8,93E+02	9,09E+02	9,14E+02	9,04E+02	9,06E+02	9,11E+02	9,25E+02	9,02E+02	9,05E+02	8,97E+02	9,06E+02
2,47E-03	8,68E+02	8,83E+02	8,99E+02	9,04E+02	8,94E+02	8,96E+02	9,01E+02	9,15E+02	8,92E+02	8,95E+02	8,87E+02	8,95E+02
2,47E-03	8,68E+02	8,83E+02	8,99E+02	9,04E+02	8,94E+02	8,96E+02	9,01E+02	9,15E+02	8,92E+02	8,95E+02	8,87E+02	8,95E+02
2,48E-03	8,66E+02	8,80E+02	8,95E+02	8,99E+02	8,90E+02	8,92E+02	8,96E+02	9,09E+02	8,89E+02	8,91E+02	8,84E+02	8,93E+02
2,51E-03	8,38E+02	8,51E+02	8,66E+02	8,70E+02	8,61E+02	8,63E+02	8,67E+02	8,79E+02	8,60E+02	8,62E+02	8,56E+02	8,63E+02
2,53E-03	8,20E+02	8,33E+02	8,47E+02	8,51E+02	8,43E+02	8,44E+02	8,48E+02	8,60E+02	8,41E+02	8,43E+02	8,37E+02	8,45E+02
2,56E-03	7,93E+02	8,06E+02	8,20E+02	8,24E+02	8,15E+02	8,17E+02	8,21E+02	8,32E+02	8,14E+02	8,16E+02	8,10E+02	8,17E+02
2,59E-03	7,68E+02	7,80E+02	7,94E+02	7,97E+02	7,89E+02	7,91E+02	7,95E+02	8,06E+02	7,88E+02	7,90E+02	7,84E+02	7,91E+02
2,64E-03	7,28E+02	7,40E+02	7,52E+02	7,56E+02	7,48E+02	7,50E+02	7,53E+02	7,63E+02	7,47E+02	7,49E+02	7,43E+02	7,50E+02
2,70E-03	6,83E+02	6,94E+02	7,06E+02	7,09E+02	7,02E+02	7,03E+02	7,07E+02	7,17E+02	7,01E+02	7,03E+02	6,98E+02	7,04E+02
2,76E-03	6,42E+02	6,52E+02	6,64E+02	6,66E+02	6,60E+02	6,61E+02	6,64E+02	6,73E+02	6,59E+02	6,61E+02	6,56E+02	6,62E+02
2,82E-03	6,04E+02	6,14E+02	6,24E+02	6,27E+02	6,21E+02	6,22E+02	6,25E+02	6,34E+02	6,20E+02	6,21E+02	6,17E+02	6,22E+02
3,00E-03	5,09E+02	5,17E+02	5,26E+02	5,28E+02	5,23E+02	5,24E+02	5,26E+02	5,33E+02	5,22E+02	5,23E+02	5,19E+02	5,24E+02
3,07E-03	4,78E+02	4,85E+02	4,93E+02	4,95E+02	4,90E+02	4,91E+02	4,93E+02	5,00E+02	4,89E+02	4,91E+02	4,87E+02	4,91E+02
3,30E-03	3,91E+02	3,97E+02	4,04E+02	4,06E+02	4,02E+02	4,02E+02	4,04E+02	4,10E+02	4,01E+02	4,02E+02	3,99E+02	4,03E+02
3,55E-03	3,21E+02	3,26E+02	3,31E+02	3,33E+02	3,29E+02	3,30E+02	3,32E+02	3,36E+02	3,29E+02	3,30E+02	3,27E+02	3,30E+02
3,58E-03	3,14E+02	3,18E+02	3,24E+02	3,25E+02	3,22E+02	3,22E+02	3,24E+02	3,28E+02	3,21E+02	3,22E+02	3,20E+02	3,23E+02
3,61E-03	3,19E+02	3,24E+02	3,28E+02	3,29E+02	3,26E+02	3,27E+02	3,29E+02	3,33E+02	3,26E+02	3,27E+02	3,24E+02	3,28E+02
3,73E-03	2,92E+02	2,96E+02	3,00E+02	3,02E+02	2,98E+02	3,00E+02	3,01E+02	3,05E+02	2,98E+02	2,99E+02	2,97E+02	3,00E+02
3,85E-03	2,68E+02	2,72E+02	2,76E+02	2,77E+02	2,74E+02	2,75E+02	2,77E+02	2,80E+02	2,73E+02	2,74E+02	2,72E+02	2,75E+02
4,00E-03	2,42E+02	2,45E+02	2,48E+02	2,49E+02	2,47E+02	2,48E+02	2,49E+02	2,52E+02	2,46E+02	2,47E+02	2,45E+02	2,48E+02
4,04E-03	3,43E+02	3,31E+02	3,21E+02	3,14E+02	3,22E+02	3,19E+02	3,14E+02	2,98E+02	3,24E+02	3,21E+02	3,27E+02	3,18E+02
4,04E-03	3,43E+02	3,31E+02	3,21E+02	3,14E+02	3,22E+02	3,19E+02	3,14E+02	2,98E+02	3,24E+02	3,21E+02	3,27E+02	3,18E+02
4,48E-03	2,61E+02	2,52E+02	2,44E+02	2,38E+02	2,44E+02	2,42E+02	2,38E+02	2,25E+02	2,46E+02	2,44E+02	2,48E+02	2,41E+02
4,97E-03	1,98E+02	1,90E+02	1,84E+02	1,80E+02	1,85E+02	1,83E+02	1,80E+02	1,70E+02	1,86E+02	1,84E+02	1,88E+02	1,82E+02

Tablo 6'nın devamı

Enerji (MeV)	MO	MS2,5	MS5	MS10	MF5	MF10	MF20	MF30	MB5	MB10	MB20	MB30
5,00E-03	1,95E+02	1,87E+02	1,81E+02	1,77E+02	1,82E+02	1,80E+02	1,77E+02	1,67E+02	1,83E+02	1,81E+02	1,85E+02	1,79E+02
5,35E-03	1,62E+02	1,56E+02	1,50E+02	1,47E+02	1,51E+02	1,49E+02	1,47E+02	1,39E+02	1,52E+02	1,51E+02	1,54E+02	1,49E+02
5,47E-03	1,52E+02	1,46E+02	1,41E+02	1,38E+02	1,42E+02	1,41E+02	1,38E+02	1,30E+02	1,43E+02	1,42E+02	1,44E+02	1,40E+02
5,54E-03	1,47E+02	1,41E+02	1,36E+02	1,33E+02	1,37E+02	1,36E+02	1,33E+02	1,26E+02	1,38E+02	1,37E+02	1,39E+02	1,35E+02
5,62E-03	1,41E+02	1,36E+02	1,31E+02	1,28E+02	1,32E+02	1,30E+02	1,28E+02	1,21E+02	1,33E+02	1,31E+02	1,34E+02	1,30E+02
5,80E-03	1,30E+02	1,24E+02	1,20E+02	1,17E+02	1,21E+02	1,19E+02	1,17E+02	1,11E+02	1,22E+02	1,20E+02	1,23E+02	1,19E+02
5,99E-03	1,18E+02	1,14E+02	1,10E+02	1,07E+02	1,10E+02	1,09E+02	1,07E+02	1,01E+02	1,11E+02	1,10E+02	1,12E+02	1,09E+02
6,00E-03	1,18E+02	1,13E+02	1,09E+02	1,07E+02	1,10E+02	1,09E+02	1,07E+02	1,01E+02	1,11E+02	1,10E+02	1,12E+02	1,09E+02
6,54E-03	9,29E+01	8,92E+01	8,60E+01	8,39E+01	8,63E+01	8,55E+01	8,39E+01	7,91E+01	8,78E+01	8,62E+01	8,81E+01	8,56E+01
6,82E-03	8,26E+01	7,93E+01	7,65E+01	7,45E+01	7,67E+01	7,60E+01	7,46E+01	7,02E+01	7,81E+01	7,67E+01	7,83E+01	7,61E+01
7,11E-03	7,35E+01	7,06E+01	6,80E+01	6,63E+01	6,82E+01	6,76E+01	6,63E+01	6,24E+01	6,95E+01	6,82E+01	6,97E+01	6,77E+01
7,11E-03	7,35E+01	7,06E+01	6,80E+01	6,63E+01	6,82E+01	6,76E+01	6,63E+01	6,24E+01	6,95E+01	6,82E+01	6,97E+01	6,77E+01
8,00E-03	5,47E+01	5,23E+01	5,02E+01	4,88E+01	5,05E+01	5,01E+01	4,92E+01	4,62E+01	5,08E+01	5,03E+01	5,14E+01	4,98E+01
8,33E-03	4,88E+01	4,67E+01	4,48E+01	4,35E+01	4,50E+01	4,47E+01	4,39E+01	4,12E+01	4,53E+01	4,49E+01	4,59E+01	4,44E+01
8,65E-03	4,39E+01	4,19E+01	4,03E+01	3,91E+01	4,05E+01	4,02E+01	3,95E+01	3,70E+01	4,08E+01	4,03E+01	4,13E+01	3,99E+01
8,98E-03	3,95E+01	3,77E+01	3,65E+01	3,52E+01	3,64E+01	3,61E+01	3,55E+01	3,33E+01	3,67E+01	3,63E+01	3,71E+01	3,59E+01
9,31E-03	3,57E+01	3,40E+01	3,29E+01	3,18E+01	3,29E+01	3,26E+01	3,20E+01	3,00E+01	3,31E+01	3,27E+01	3,35E+01	3,24E+01
9,66E-03	3,21E+01	3,06E+01	2,97E+01	2,86E+01	2,96E+01	2,93E+01	2,88E+01	2,70E+01	3,03E+01	2,95E+01	3,02E+01	2,91E+01
9,66E-03	3,21E+01	3,06E+01	2,97E+01	2,86E+01	2,96E+01	2,93E+01	2,88E+01	2,70E+01	3,03E+01	2,95E+01	3,02E+01	2,91E+01
1,00E-02	2,91E+01	2,78E+01	2,69E+01	2,59E+01	2,68E+01	2,66E+01	2,61E+01	2,45E+01	2,74E+01	2,67E+01	2,73E+01	2,64E+01
1,19E-02	1,77E+01	1,69E+01	1,75E+01	1,57E+01	1,63E+01	1,61E+01	1,58E+01	1,48E+01	1,67E+01	1,62E+01	1,66E+01	1,60E+01
1,19E-02	1,77E+01	1,69E+01	1,75E+01	1,57E+01	1,63E+01	1,61E+01	1,58E+01	1,48E+01	1,67E+01	1,62E+01	1,66E+01	1,60E+01
1,24E-02	1,57E+01	1,50E+01	1,56E+01	1,39E+01	1,45E+01	1,43E+01	1,41E+01	1,32E+01	1,48E+01	1,44E+01	1,47E+01	1,42E+01
1,30E-02	1,37E+01	1,31E+01	1,36E+01	1,22E+01	1,26E+01	1,25E+01	1,23E+01	1,15E+01	1,29E+01	1,26E+01	1,29E+01	1,24E+01
1,50E-02	9,10E+00	8,66E+00	9,04E+00	8,06E+00	8,36E+00	8,27E+00	8,13E+00	7,60E+00	8,57E+00	8,32E+00	8,53E+00	8,21E+00
1,52E-02	8,77E+00	8,34E+00	8,71E+00	7,76E+00	8,05E+00	7,96E+00	7,83E+00	7,32E+00	8,26E+00	8,01E+00	8,21E+00	7,91E+00
1,55E-02	8,29E+00	7,89E+00	8,24E+00	7,34E+00	7,61E+00	7,53E+00	7,40E+00	6,92E+00	7,81E+00	7,57E+00	7,76E+00	7,47E+00
1,59E-02	7,70E+00	7,33E+00	7,66E+00	6,82E+00	7,07E+00	7,00E+00	6,88E+00	6,43E+00	7,26E+00	7,04E+00	7,21E+00	6,95E+00

Tablo 6'nın devamı

Enerji (MeV)	MO	MS2,5	MS5	MS10	MF5	MF10	MF20	MF30	MB5	MB10	MB20	MB30
1,60E-02	7,57E+00	7,20E+00	7,53E+00	6,70E+00	6,95E+00	6,87E+00	6,76E+00	6,31E+00	7,13E+00	6,91E+00	7,09E+00	6,82E+00
1,61E-02	7,43E+00	7,07E+00	7,39E+00	6,58E+00	6,82E+00	6,75E+00	6,64E+00	6,20E+00	7,00E+00	6,79E+00	6,96E+00	6,70E+00
1,66E-02	6,82E+00	6,49E+00	6,79E+00	6,04E+00	6,26E+00	6,19E+00	6,09E+00	5,69E+00	6,42E+00	6,23E+00	6,39E+00	6,15E+00
1,70E-02	6,37E+00	6,06E+00	6,34E+00	5,64E+00	5,85E+00	5,78E+00	5,69E+00	5,31E+00	6,00E+00	5,82E+00	5,97E+00	5,74E+00
1,75E-02	5,87E+00	5,58E+00	5,84E+00	5,19E+00	5,38E+00	5,33E+00	5,24E+00	4,89E+00	5,52E+00	5,36E+00	5,49E+00	5,29E+00
1,80E-02	5,42E+00	5,15E+00	5,40E+00	4,79E+00	4,97E+00	4,92E+00	4,84E+00	4,52E+00	5,10E+00	4,95E+00	5,07E+00	4,89E+00
1,85E-02	5,01E+00	4,77E+00	4,99E+00	4,43E+00	4,60E+00	4,55E+00	4,48E+00	4,18E+00	4,72E+00	4,58E+00	4,69E+00	4,52E+00
1,90E-02	4,65E+00	4,42E+00	4,63E+00	4,11E+00	4,26E+00	4,22E+00	4,15E+00	3,88E+00	4,38E+00	4,24E+00	4,35E+00	4,19E+00
2,00E-02	4,02E+00	3,82E+00	4,01E+00	3,55E+00	3,69E+00	3,65E+00	3,59E+00	3,35E+00	3,78E+00	3,67E+00	3,76E+00	3,62E+00
3,00E-02	1,32E+00	1,26E+00	1,33E+00	1,18E+00	1,22E+00	1,21E+00	1,19E+00	1,12E+00	1,25E+00	1,22E+00	1,25E+00	1,20E+00
3,74E-02	7,68E-01	7,36E-01	7,71E-01	6,94E-01	7,15E-01	7,09E-01	7,00E-01	6,62E-01	7,32E-01	7,12E-01	7,27E-01	7,05E-01
3,74E-02	7,68E-01	7,36E-01	7,71E-01	6,94E-01	7,15E-01	7,09E-01	7,00E-01	6,62E-01	7,32E-01	7,12E-01	7,27E-01	7,05E-01
4,00E-02	6,66E-01	6,39E-01	6,68E-01	6,04E-01	6,21E-01	6,17E-01	6,09E-01	5,78E-01	6,36E-01	6,22E-01	6,35E-01	6,21E-01
5,00E-02	4,22E-01	4,08E-01	4,23E-01	3,90E-01	3,99E-01	3,97E-01	3,93E-01	3,77E-01	4,07E-01	4,00E-01	4,06E-01	3,99E-01
5,95E-02	3,07E-01	3,06E-01	3,05E-01	3,03E-01	3,05E-01	3,04E-01	3,01E-01	2,97E-01	3,06E-01	3,06E-01	3,04E-01	3,03E-01
6,00E-02	3,11E-01	3,03E-01	3,12E-01	2,93E-01	2,98E-01	2,97E-01	2,95E-01	2,85E-01	3,03E-01	2,99E-01	3,02E-01	2,99E-01
8,00E-02	2,19E-01	2,15E-01	2,20E-01	2,12E-01	2,14E-01	2,13E-01	2,13E-01	2,08E-01	2,16E-01	2,14E-01	2,16E-01	2,13E-01
8,80E-02	2,00E-01	1,98E-01	2,01E-01	1,95E-01	1,97E-01	1,96E-01	1,96E-01	1,93E-01	1,98E-01	1,97E-01	1,98E-01	1,96E-01
1,00E-01	1,82E-01	1,80E-01	1,82E-01	1,78E-01	1,79E-01	1,78E-01	1,78E-01	1,76E-01	1,80E-01	1,79E-01	1,80E-01	1,79E-01
2,00E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,26E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01	1,27E-01
3,00E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01
4,00E-01	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,58E-02	9,58E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02	9,59E-02
5,00E-01	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,72E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02	8,73E-02
6,00E-01	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02	8,06E-02
6,61E-01	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02
8,00E-01	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02	7,07E-02
1,00E+00	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02	6,35E-02



### 3.2. Lineer Soğurma, Kütle Soğurma Katsayısı ve Yarı Kalınlık

Beton üretiminde kullanılan çimentonun farklı yüzdeleri için uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı katılarak 59,5 keV ve 661 keV enerjileri için deneysel olarak lineer ve kütle soğurma katsayıları hesaplandı (Tablo 7).

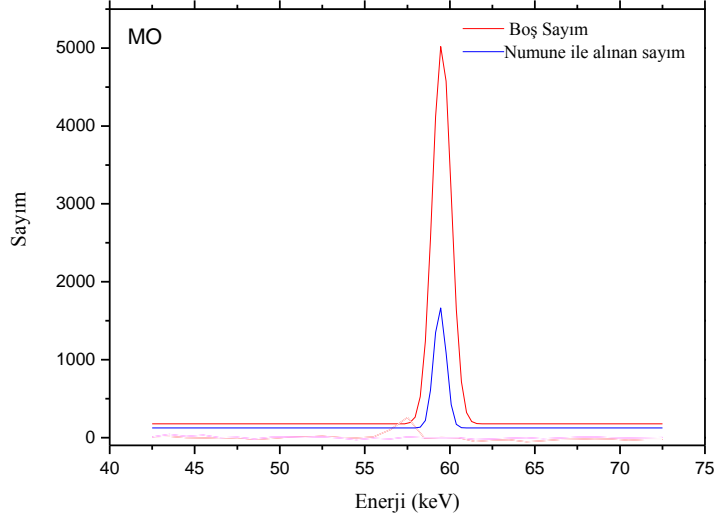
Lineer soğurma katsayısı deneysel değerleri “Lambert Beer” yasasından türetilen denklem (26)’dan hesaplanmıştır.

Kütle soğurma katsayısı deneysel değerleri, yine “Lambert Beer” yasasından türetilen, denklem (30)’dan hesaplanmıştır. Kütle soğurma katsayısı teorik değerleri ise WinXCOM programından elde edilmiştir.

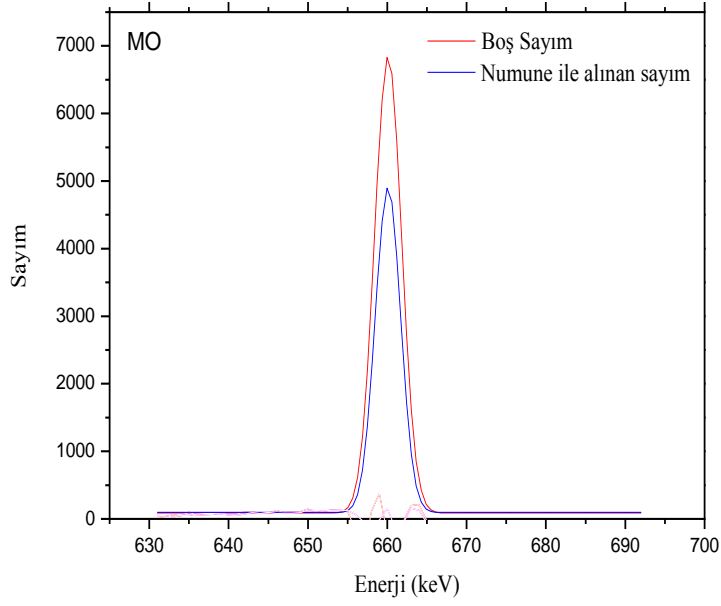
Yarı kalınlık değerlerini hesaplamak için ise iki farklı yöntem kullanıldı. İlk yöntem için eşitlik (27)’den Tablo 7’de elde edilen deneysel  $\mu$  değerleri kullanılarak hesaplandı.

İkinci yöntem için ise Şekil 25-26’da görüldüğü gibi farklı kalınlıklara karşı sayım grafiklerinden yarı kalınlık değerleri hesaplandı.

Lineer soğurma katsayıları, yarı kalınlık değerleri ve kütle soğurma katsayıları Tablo 7’de verilmiştir. Tablolardan açıkça görülmektedir ki, artan enerji ve yüzdelerle beraber lineer ve kütle soğurma katsayıları azalmaktadır. Yarı kalınlık değerleri ise artan enerjiyle beraber artmaktadır. Ayrıca teorik ve deneysel olarak elde edilen bu sonuçlarla çizilen, kütle soğurma katsayısı enerjiyle değişim grafikleri Şekil 22-24’te verilmektedir.



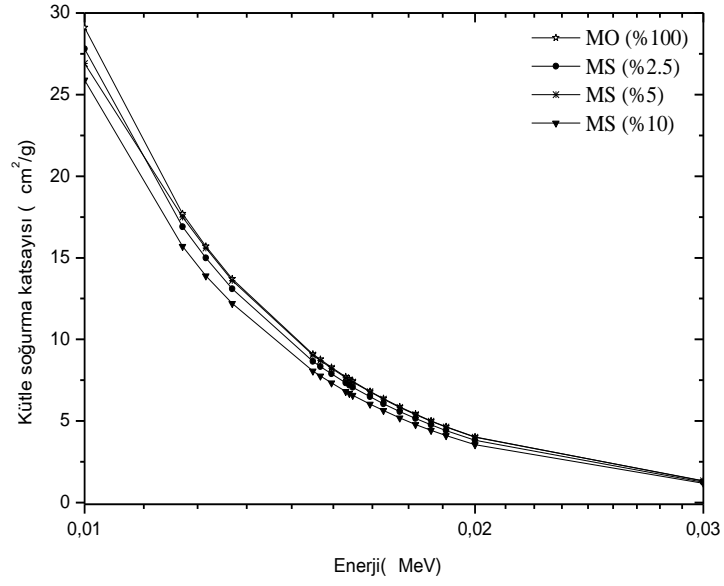
Şekil 20. 59,5 keV’de MO numunesi için elde edilen soğurma spektrum örneği



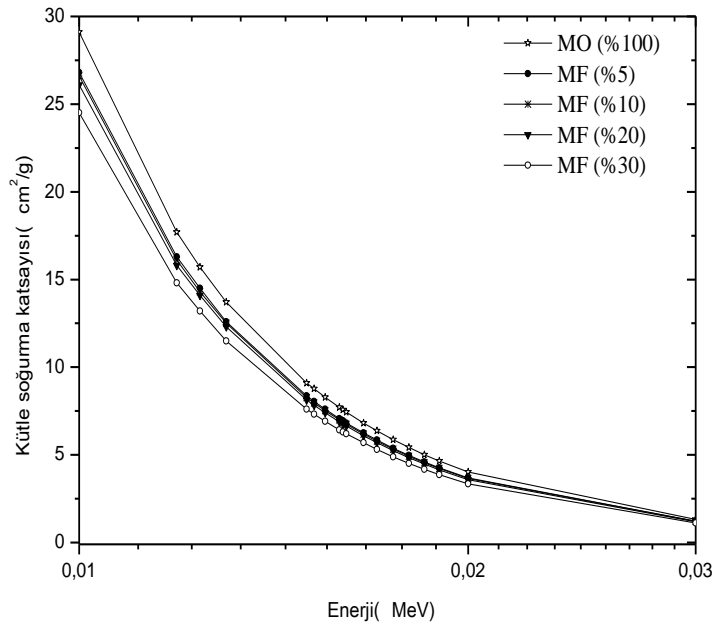
Şekil 21. 661 keV’de MO numunesi için elde edilen soğurma spektrum örneği

Tablo 7. 59,5keV ve 661 keV’de beton karışımlarının lineer soğurma, kütle soğurma ve yarı kalınlık değerleri

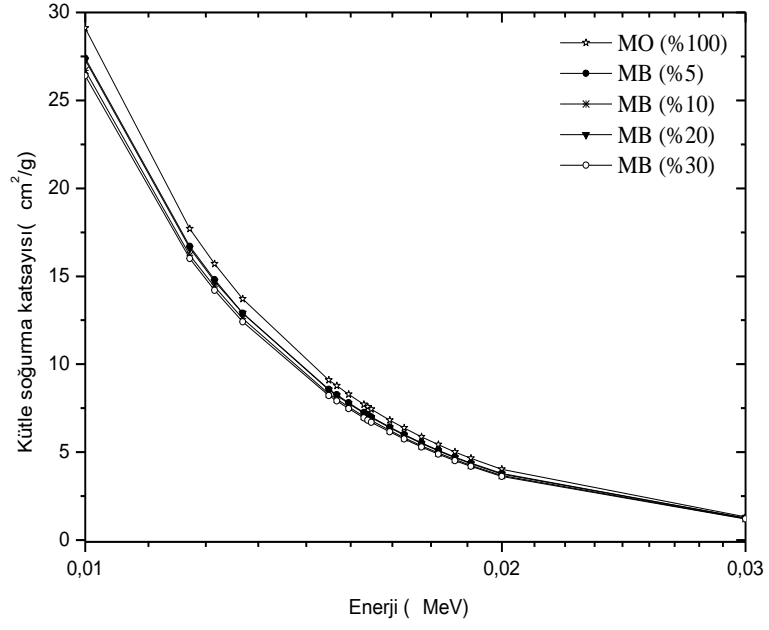
Beton numuneleri	Lineer soğurma katsayıları $\mu$ (cm <sup>-1</sup> ) ve yarı kalınlık değerleri (cm)						Kütle soğurma katsayıları $\mu/\rho$ (cm/g <sup>2</sup> )			
	Enerji (keV)						Enerji (keV)			
	59,5			661			59,5		661	
	$(x_{1/2})_{den}$		$\mu_{den}$	$(x_{1/2})_{den}$		$\mu_{den}$	$(\mu/\rho)_{teo}$	$(\mu/\rho)_{den}$	$(\mu/\rho)_{teo}$	$(\mu/\rho)_{den}$
İlk metot	İkinci metot		İlk metot	İkinci metot						
MO	1,168±0,110	1,053±0,022	0,593	3,96±0,372	3,174±0,076	0,175	0,307	0,284±0,028	0,078	0,084±0,007
MS2,5	1,540±0,147	1,045±0,024	0,450	3,50±0,343	3,647±0,080	0,198	0,306	0,222±0,024	0,078	0,098±0,008
MS5	1,781±0,178	1,237±0,027	0,389	3,430±0,346	3,678±0,088	0,202	0,305	0,188±0,020	0,078	0,098±0,008
MS10	1,809±0,179	1,301±0,031	0,383	3,871±0,375	3,673±0,095	0,179	0,303	0,190±0,020	0,078	0,089±0,008
MF5	1,823±0,178	1,322±0,033	0,380	3,807±0,350	3,795±0,087	0,182	0,305	0,184±0,020	0,078	0,088±0,007
MF10	2,112±0,215	1,430±0,031	0,328	4,052±0,409	3,749±0,101	0,171	0,304	0,165±0,018	0,078	0,086±0,007
MF20	2,341±0,243	1,573±0,040	0,296	4,100±0,422	4,285±0,102	0,169	0,301	0,152±0,016	0,078	0,087±0,007
MF30	2,547±0,241	1,64±0,045	0,272	4,304±0,421	4,125±0,094	0,161	0,297	0,149±0,016	0,078	0,088±0,007
MB5	2,294±0,222	1,643±0,044	0,302	4,414±0,428	4,293±0,107	0,157	0,306	0,162±0,017	0,078	0,084±0,007
MB10	2,325±0,239	1,613±0,041	0,298	4,029±0,382	4,208±0,088	0,172	0,306	0,159±0,017	0,078	0,092±0,009
MB20	2,172±0,204	1,488±0,034	0,319	4,005±0,408	3,250±0,084	0,173	0,304	0,164±0,018	0,078	0,089±0,007
MB30	2,520±0,252	1,593±0,039	0,275	4,052±0,393	3,611±0,090	0,171	0,303	0,146±0,016	0,078	0,091±0,008



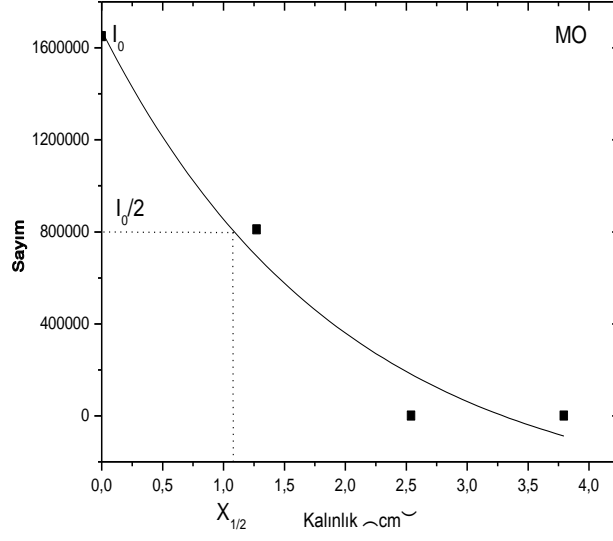
Şekil 22. Silika dumanı katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi



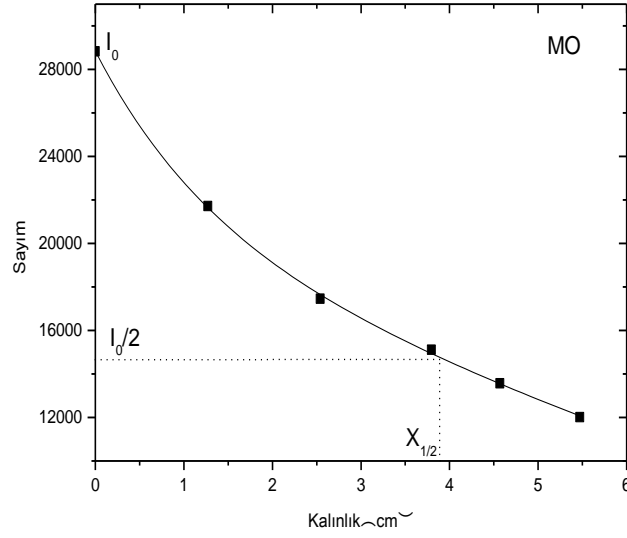
Şekil 23. Uçucu kül katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi



Şekil 24. Yüksek fırın cürufu katkılı beton örneklerinin enerjilere göre kütle soğurma katsayılarının değişimi



Şekil 25.  $^{241}\text{Am}$  kaynağıyla ölçülen standart numunenin yarı kalınlık grafiği



Şekil 26.  $^{137}\text{Cs}$  kaynağıyla ölçülen standart numunenin yarı kalınlık grafiği

### 3.3. Etkin Atom Numarası ve Elektron Yoğunluğunun Hesaplanması

Bileşikler, toprak, plastik gibi malzemelerin fotonla etkileşmelerini, malzemenin ihtiva ettiği tek bir elementin atom numarasıyla ifade etmemiz olanaksızdır. Böyle bir durum “etkin atom numarası” adı verilen ve foton enerjisiyle değişen bir sayıyla ifade edilir.

Kütle soğurma katsayısı bilinen bir bileşiğin toplam moleküler tesir kesiti ( $\sigma_{t,m}$ ),

$$\sigma_{t,m} = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \frac{A_t}{N_A} \quad (37)$$

ifadesi ile bulunur. Burada  $A_t$  bileşiğin bir molünün ağırlığıdır,  $N_A$  ise avagadro sayısıdır. Bileşiğin toplam atomik tesir kesiti ( $\sigma_{t,a}$ ) ise,

$$\sigma_{t,a} = \sigma_{t,m} \frac{1}{\sum_i n_i} \quad (38)$$

eşitliği ile bulunur. Burada  $\sum_i n_i$  moleküldeki atomların sayısıdır. Her elementin toplam elektronik tesir kesiti ( $\sigma_{t,el}$ ),

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \quad (39)$$

eşitliği ile bulunur. Burada,  $f_i$  bileşiği oluşturan elementlerin bolluk kesri,  $A_i$  bileşiği oluşturan elementlerin kütle numarası,  $Z_i$  bileşiği oluşturan elementlerin atom numarasıdır. Toplam elektronik ve atomik tesir kesitlerinden yararlanılarak etkin atom numarası için,

$$Z_{et} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (40)$$

ile verilen bir ifade elde edilmiş olur (Singh ve ark., 2002).

Elektron yoğunluğu ifadesi (Gowda ve ark., 2005) tarafından aşağıdaki formülle verilmiştir.

$$N_{el} = \frac{(\mu/\rho)_c}{\sigma_{el}} = \frac{N_A}{M} Z_{eff} \sum_i n_i \quad (41)$$

Karışımlar için toplam atomik tesir kesiti ise; materyalin kütle soğurma katsayısının, karışımın bir gramındaki toplam atom numarasına bölünmesiyle elde edilir.

$$\sigma_c = \frac{(\mu/\rho)_c}{N_A \sum_i w_i / A_i} \text{ (b/atom)} \quad (42)$$

Karışımların etkin atom numarasını hesaplamak için verilen enerjide WinXCom'dan soğurma tesir kesitleri interpolasyon edilir (Singh ve ark., 2007).

$$Z_{eff} = \frac{Z_1(\log \sigma_2 - \log \sigma) + Z_2(\log \sigma - \log \sigma_1)}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (43)$$

Burada  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$ ; materyalin atomik tesir kesitinin bir üst ve bir alt değeridir.  $Z_1$  ve  $Z_2$  ise,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  'ye karşılık gelen atom numaralarıdır.

Karışımlar için etkin elektron yoğunluğu ise,

$$N_E = N_A \frac{nZ_{eff}}{\sum_i n_i A_i} = N_A \frac{Z_{eff}}{\langle A \rangle} \text{ (elektron/g)} \quad (44)$$

ile verilir. Burada  $\langle A \rangle$  materyalin ortalama atomik kütesidir. Böylece eşitlik (43)'ten elde edilen etkin atom numaraları eşitlik (44)'te yerine konularak karışımlar için etkin elektron yoğunlukları hesaplanmış olur.

59,5 keV ve 661 keV'de deneysel ve teorik atomik tesir kesiti, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu değerleri eşitlik (42), (43) ve (44)'ten hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 8 ve Tablo 9'da gösterilmiştir. Tablolardan da görülmektedir ki, artan enerji ve yüzdelik oranlarla beraber atomik tesir kesiti, etkin atom numarası ve elektron yoğunlukları azalmaktadır.



Tablo 8. 59,5 keV ve 661 keV’de beton karışımlarının atomik tesir kesitleri

Beton numuneleri	Atomik Tesir Kesiti [ $\sigma_a$ (barn/atom)]			
	59,5 keV		661 keV	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
MO	8,49	7,86±0,95	2,16	2,32±0,23
MS2,5	8,46	6,14±0,85	2,15	2,71±0,27
MS5	8,42	5,19±0,72	2,15	2,70±0,27
MS10	8,35	5,23±0,85	2,15	2,45±0,27
MF5	8,43	5,09±0,70	2,15	2,43±0,24
MF10	8,38	4,55±0,63	2,15	2,37±0,31
MF20	8,28	4,18±0,58	2,15	2,39±0,32
MF30	8,15	4,09±0,56	2,14	2,42±2,42
MB5	8,46	4,48±0,61	2,16	2,32±0,23
MB10	8,45	4,39±0,61	2,15	2,54±0,33
MB20	8,38	4,52±0,63	2,15	2,45±0,24
MB30	8,33	4,01±0,55	2,14	2,50±0,31

Tablo 9. 59,5 keV ve 661 keV’de beton numunelerinin teorik ve deneysel etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunlukları

Beton numuneleri	Etkin atom numaraları ( $Z_{eff}$ )				Etkin elektron yoğunlukları [ $N_e (\times 10^{23})$ (elektron/g )]			
	Enerji (keV)				Enerji (keV)			
	59,5		661		59,5		661	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
MO	10,85	10,42±0,99	7,36	9,06±0,11	2,82	2,71±0,26	1,91	2,35±0,35
MS2,5	10,82	9,04±1,14	8,42	10,55±1,46	2,82	2,35±0,30	2,19	2,74±0,41
MS5	10,80	8,11±1,04	8,41	10,54±1,47	2,81	2,11±0,27	2,19	2,75±0,39
MS10	10,75	8,16±0,96	8,39	9,56±1,42	2,81	2,13±0,24	2,19	2,50±0,28
MF5	10,81	7,99±1,02	8,42	9,48±0,95	2,81	2,08±0,28	2,19	2,47±0,28
MF10	10,77	7,39±0,95	8,40	9,25±0,93	2,80	1,93±0,26	2,20	2,42±0,31
MF20	10,70	6,93±0,90	8,38	9,33±0,94	2,45	1,82±0,25	2,20	2,81±0,28
MF30	10,62	6,81±0,88	8,37	9,42±0,94	2,76	1,80±0,25	2,21	2,49±0,27
MB5	10,83	7,30±0,94	8,42	9,05±0,91	2,82	1,90±0,26	2,19	2,36±0,28
MB10	10,82	7,19±0,93	8,41	9,89±0,99	2,82	1,87±0,26	2,19	2,58±0,28
MB20	10,77	7,35±0,95	8,40	9,56±0,96	2,82	1,92±0,26	2,20	2,50±0,28
MB30	10,74	6,71±0,87	8,38	9,75±0,98	2,82	1,76±0,24	2,20	2,56±0,34

### 3.4. Nötron (Etkin) Soğurma Tesir Kesiti

Numunelerin soğurma tesir kesitleri Tablo 10’da verilmiştir. Bu numunelerin soğurma tesir kesitleri WinXCOM programından hesaplanmıştır. Soğurma tesir kesitlerinin standart numunede (MO) daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Bu durum çimentonun diğer katkılı numunelere göre nötron soğurmasının daha etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca düşük  $\Sigma_R$  değerleri için numune yoğunluklarının da daha düşük olduğu saptanmıştır.

Tablo 10. Beton numunelerinde soğurma tesir kesitleri

Element	MO		MS2,5		MS5		MS10	
	$\rho= 2,09 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,03 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,07 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,02 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$
H	2,60E-02	1,55E-02	2,52E-02	1,51E-02	2,57E-02	1,54E-02	2,51E-02	1,50E-02
O	1,07E+00	4,34E-02	1,04E+00	4,22E-02	1,06E+00	4,31E-02	1,04E+00	4,22E-02
Na	5,09E-02	1,74E-03	4,94E-02	1,68E-03	5,03E-02	1,72E-03	4,90E-02	1,67E-03
Mg	5,00E-03	1,67E-04	4,84E-03	1,61E-04	4,90E-03	1,63E-04	4,73E-03	1,58E-04
Al	7,67E-02	2,25E-03	7,45E-02	2,18E-03	7,60E-02	2,23E-03	7,41E-02	2,17E-03
Si	5,76E-01	1,70E-02	5,63E-01	1,66E-02	5,78E-01	1,70E-02	5,71E-01	1,68E-02
S	1,51E-02	4,19E-04	1,45E-02	4,02E-04	1,46E-02	4,04E-04	1,38E-02	3,83E-04
Cl	1,96E-02	4,94E-04	1,91E-02	4,80E-04	1,94E-02	4,89E-04	1,90E-02	4,78E-04
K	2,08E-02	5,13E-04	2,01E-02	4,98E-04	2,05E-02	5,06E-04	1,99E-02	4,92E-04
Ca	2,04E-01	4,96E-03	1,94E-01	4,71E-03	1,92E-01	4,68E-03	1,78E-01	4,33E-03
Sc	2,47E-04	5,52E-06	2,34E-04	5,23E-06	2,32E-04	5,20E-06	2,14E-04	4,80E-06
Ti	2,71E-03	5,56E-05	2,63E-03	5,39E-05	2,67E-03	5,47E-05	2,59E-03	5,31E-05
V	4,04E-05	8,61E-07	3,86E-05	8,23E-07	3,87E-05	8,24E-07	3,64E-05	7,76E-07
Cr	1,95E-04	4,05E-06	1,88E-04	3,92E-06	1,91E-04	3,98E-06	1,86E-04	3,86E-06
Mn	7,18E-04	1,46E-05	6,98E-04	1,42E-05	7,12E-04	1,44E-05	6,95E-04	1,41E-05
Fe	1,82E-02	3,89E-04	1,75E-02	3,74E-04	1,76E-02	3,77E-04	1,68E-02	3,60E-04
Co	5,79E-05	1,12E-06	5,49E-05	1,06E-06	5,45E-05	1,06E-06	5,04E-05	9,77E-07
Ni	5,47E-06	1,04E-07	5,37E-06	1,02E-07	5,52E-06	1,05E-07	5,48E-06	1,04E-07
Cu	1,82E-04	3,39E-06	1,74E-04	3,24E-06	1,75E-04	3,25E-06	1,65E-04	3,06E-06
Zn	8,46E-05	1,55E-06	8,21E-05	1,50E-06	8,35E-05	1,53E-06	8,12E-05	1,49E-06
Ga	-	-	3,88E-07	5,04E-09	7,91E-07	1,03E-08	1,54E-06	2,01E-08

Tablo 10'un devamı

Element	MO		MS2,5		MS5		MS10	
	$\rho= 2,09 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,03 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,07 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 2,02 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$
Ge	-	-	5,01E-08	8,82E-10	1,02E-07	1,80E-09	1,99E-07	3,51E-09
As	5,64E-05	9,76E-07	5,45E-05	9,44E-07	5,53E-05	9,57E-07	5,35E-05	9,25E-07
Se	1,25E-05	2,13E-07	1,19E-05	2,03E-07	1,20E-05	2,04E-07	1,13E-05	1,92E-07
Br	-	-	1,87E-07	3,15E-09	3,82E-07	6,41E-09	7,45E-07	1,25E-08
Rb	1,02E-04	1,67E-06	9,95E-05	1,62E-06	1,02E-04	1,66E-06	9,94E-05	1,62E-06
Sr	4,69E-04	7,50E-06	4,54E-04	7,26E-06	4,61E-04	7,37E-06	4,46E-04	7,14E-06
Y	5,50E-05	6,22E-07	5,34E-05	6,03E-07	5,43E-05	6,13E-07	5,28E-05	5,96E-07
Zr	4,11E-04	6,41E-06	3,98E-04	6,21E-06	4,05E-04	6,31E-06	3,93E-04	6,13E-06
Nb	1,91E-05	2,92E-07	1,84E-05	2,82E-07	1,86E-05	2,85E-07	1,78E-05	2,73E-07
Ba	1,26E-03	1,62E-05	1,23E-03	1,58E-05	1,25E-03	1,62E-05	1,23E-03	1,59E-05
Nd	5,85E-05	7,26E-07	5,69E-05	7,05E-07	5,80E-05	7,19E-07	5,66E-05	7,02E-07
Hf	1,82E-04	2,04E-06	1,77E-04	1,98E-06	1,80E-04	2,02E-06	1,76E-04	1,97E-06
Pb	5,47E-05	5,69E-07	5,32E-05	5,54E-07	5,44E-05	5,65E-07	5,33E-05	5,54E-07
Toplam	2,09	0,0869	2,03	0,0845	2,07	0,0862	2,02	0,0842

Tablo 10'un devamı

Element	MF5		MF10		MF20		MF30	
	$\rho= 2,07 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,99 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,95 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,83 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$
H	2,57E-02	1,54E-02	2,47E-02	1,48E-02	2,42E-02	1,45E-02	2,28E-02	1,36E-02
O	1,06E+00	4,30E-02	1,02E+00	4,15E-02	1,01E+00	4,08E-02	9,50E-01	3,85E-02
Na	5,03E-02	1,71E-03	4,82E-02	1,64E-03	4,69E-02	1,60E-03	4,37E-02	1,49E-03
Mg	7,42E-03	2,47E-04	9,51E-03	3,17E-04	1,40E-02	4,65E-04	1,75E-02	5,82E-04
Al	7,60E-02	2,23E-03	7,30E-02	2,14E-03	7,16E-02	2,10E-03	6,72E-02	1,97E-03
Si	5,75E-01	1,70E-02	5,57E-01	1,64E-02	5,54E-01	1,63E-02	5,28E-01	1,56E-02
S	1,46E-02	4,05E-04	1,37E-02	3,78E-04	1,26E-02	3,50E-04	1,12E-02	3,10E-04
Cl	1,94E-02	4,89E-04	1,86E-02	4,70E-04	1,82E-02	4,60E-04	1,71E-02	4,31E-04
K	2,10E-02	5,19E-04	2,06E-02	5,09E-04	2,10E-02	5,18E-04	2,04E-02	5,05E-04
Ca	1,93E-01	4,68E-03	1,76E-01	4,28E-03	1,54E-01	3,75E-03	1,28E-01	3,11E-03
Sc	2,32E-04	5,20E-06	2,11E-04	4,73E-06	1,84E-04	4,12E-06	1,51E-04	3,39E-06
Ti	2,81E-03	5,77E-05	2,83E-03	5,80E-05	3,01E-03	6,17E-05	3,05E-03	6,26E-05
V	4,44E-05	9,45E-07	4,68E-05	9,97E-07	5,40E-05	1,15E-06	5,83E-05	1,24E-06
Cr	1,94E-04	4,04E-06	1,88E-04	3,91E-06	1,87E-04	3,90E-06	1,79E-04	3,71E-06
Mn	7,11E-04	1,44E-05	6,85E-04	1,39E-05	6,72E-04	1,36E-05	6,32E-04	1,28E-05
Fe	1,83E-02	3,91E-04	1,78E-02	3,82E-04	1,80E-02	3,86E-04	1,74E-02	3,73E-04
Co	5,45E-05	1,06E-06	4,96E-05	9,63E-07	4,32E-05	8,39E-07	3,55E-05	6,89E-07
Ni	7,12E-06	1,35E-07	8,48E-06	1,61E-07	1,15E-05	2,19E-07	1,38E-05	2,63E-07
Cu	1,76E-04	3,28E-06	1,65E-04	3,07E-06	1,54E-04	2,86E-06	1,37E-04	2,54E-06
Zn	8,40E-05	1,54E-06	8,09E-05	1,48E-06	7,97E-05	1,46E-06	7,51E-05	1,37E-06

Tablo 10'un devamı

Element	MF5		MF10		MF20		MF30	
	$\rho= 2,07 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,99 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,95 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,83 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R (\text{cm}^{-1})$
Ga	5,12E-07	6,65E-09	9,84E-07	1,28E-08	1,93E-06	2,51E-08	2,71E-06	3,53E-08
Ge	9,93E-09	1,75E-10	1,91E-08	3,36E-10	3,74E-08	6,59E-10	5,27E-08	9,27E-10
As	5,56E-05	9,62E-07	5,32E-05	9,20E-07	5,16E-05	8,93E-07	4,80E-05	8,30E-07
Se	1,18E-05	2,00E-07	1,07E-05	1,82E-07	9,33E-06	1,59E-07	7,66E-06	1,30E-07
Rb	1,05E-04	1,71E-06	1,05E-04	1,71E-06	1,10E-04	1,79E-06	1,10E-04	1,79E-06
Sr	4,62E-04	7,39E-06	4,42E-04	7,08E-06	4,30E-04	6,88E-06	4,00E-04	6,40E-06
Y	5,50E-05	6,22E-07	5,34E-05	6,03E-07	5,32E-05	6,01E-07	5,08E-05	5,74E-07
Zr	4,04E-04	6,31E-06	3,86E-04	6,03E-06	3,74E-04	5,84E-06	3,47E-04	5,41E-06
Nb	1,86E-05	2,85E-07	1,76E-05	2,69E-07	1,66E-05	2,54E-07	1,50E-05	2,30E-07
Ba	1,25E-03	1,61E-05	1,20E-03	1,55E-05	1,18E-03	1,53E-05	1,11E-03	1,44E-05
Ce	1,74E-06	2,19E-08	3,34E-06	4,21E-08	6,55E-06	8,25E-08	9,22E-06	1,16E-07
Nd	5,93E-05	7,36E-07	5,83E-05	7,23E-07	5,97E-05	7,40E-07	5,84E-05	7,25E-07
Hf	1,80E-04	2,02E-06	1,73E-04	1,94E-06	1,70E-04	1,90E-06	1,59E-04	1,78E-06
Pb	5,49E-05	5,70E-07	5,34E-05	5,55E-07	5,36E-05	5,58E-07	5,15E-05	5,36E-07
Th	3,51E-06	3,44E-08	6,75E-06	6,61E-08	1,32E-05	1,30E-07	1,86E-05	1,82E-07
Toplam	2,07	0,0862	1,99	0,0829	1,95	0,0814	1,83	0,0766

Tablo 10'un devamı

Element	MB5		MB10		MB20		MB30	
	$\rho= 1,87 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,88 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,95 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,89 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$
H	2,32E-02	1,39E-02	2,34E-02	1,40E-02	2,42E-02	1,45E-02	2,35E-02	1,41E-02
O	9,59E-01	3,89E-02	9,66E-01	3,91E-02	1,00E+00	4,07E-02	9,77E-01	3,96E-02
Na	4,54E-02	1,55E-03	4,55E-02	1,55E-03	4,69E-02	1,60E-03	4,51E-02	1,54E-03
Mg	5,58E-03	1,86E-04	6,71E-03	2,24E-04	9,26E-03	3,08E-04	1,12E-02	3,73E-04
Al	7,01E-02	2,05E-03	7,20E-02	2,11E-03	7,78E-02	2,28E-03	7,85E-02	2,30E-03
Si	5,17E-01	1,52E-02	5,21E-01	1,54E-02	5,44E-01	1,60E-02	5,30E-01	1,56E-02
S	1,35E-02	3,73E-04	1,34E-02	3,73E-04	1,38E-02	3,81E-04	1,32E-02	3,65E-04
Cl	1,75E-02	4,41E-04	1,76E-02	4,43E-04	1,82E-02	4,58E-04	1,76E-02	4,43E-04
K	1,86E-02	4,59E-04	1,86E-02	4,60E-04	1,93E-02	4,76E-04	1,86E-02	4,60E-04
Ca	1,78E-01	4,31E-03	1,73E-01	4,21E-03	1,69E-01	4,11E-03	1,53E-01	3,73E-03
Sc	2,15E-04	4,80E-06	2,10E-04	4,69E-06	2,05E-04	4,58E-06	1,86E-04	4,16E-06
Ti	2,45E-03	5,02E-05	2,48E-03	5,09E-05	2,62E-03	5,37E-05	2,58E-03	5,29E-05
V	3,50E-05	7,45E-07	3,39E-05	7,22E-07	3,26E-05	6,95E-07	2,92E-05	6,22E-07
Cr	1,73E-04	3,59E-06	1,72E-04	3,59E-06	1,76E-04	3,66E-06	1,68E-04	3,49E-06
Mn	7,76E-04	1,58E-05	9,15E-04	1,86E-05	1,23E-03	2,49E-05	1,46E-03	2,97E-05
Fe	1,58E-02	3,38E-04	1,55E-02	3,31E-04	1,51E-02	3,24E-04	1,38E-02	2,95E-04
Co	4,92E-05	9,55E-07	4,69E-05	9,10E-07	4,33E-05	8,39E-07	3,67E-05	7,12E-07
Ni	4,90E-06	9,31E-08	4,92E-06	9,36E-08	5,11E-06	9,70E-08	4,95E-06	9,41E-08
Cu	1,57E-04	2,93E-06	1,53E-04	2,84E-06	1,46E-04	2,72E-06	1,30E-04	2,42E-06
Zn	7,39E-05	1,35E-06	7,24E-05	1,33E-06	7,13E-05	1,30E-06	6,54E-05	1,20E-06
As	4,99E-05	8,64E-07	4,96E-05	8,59E-07	5,04E-05	8,71E-07	4,77E-05	8,26E-07
Se	1,06E-05	1,81E-07	1,01E-05	1,73E-07	9,39E-06	1,60E-07	8,00E-06	1,36E-07
Rb	9,21E-05	1,50E-06	9,32E-05	1,52E-06	9,80E-05	1,60E-06	9,62E-05	1,57E-06

Tablo 10'un devamı

Element	MB5		MB10		MB20		MB30	
	$\rho= 1,87 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,88 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,95 \text{ g.cm}^{-3}$		$\rho= 1,89 \text{ g.cm}^{-3}$	
	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$	Kısmi Yoğunluk	$\Sigma_R(\text{cm}^{-1})$
Sr	4,22E-04	6,75E-06	4,26E-04	6,82E-06	4,47E-04	7,15E-06	4,38E-04	7,01E-06
Y	4,97E-05	5,61E-07	5,04E-05	5,69E-07	5,32E-05	6,01E-07	5,24E-05	5,92E-07
Zr	3,68E-04	5,74E-06	3,70E-04	5,77E-06	3,85E-04	6,00E-06	3,73E-04	5,83E-06
Nb	1,68E-05	2,57E-07	1,66E-05	2,54E-07	-	-	1,55E-05	2,38E-07
Pd	-	-	-	-	1,66E-05	2,54E-07	-	-
Ag	2,67E-07	3,79E-09	5,37E-07	7,62E-09	1,11E-06	1,58E-08	1,62E-06	2,30E-08
Ba	1,25E-03	1,61E-05	1,37E-03	1,77E-05	1,67E-03	2,16E-05	1,86E-03	2,40E-05
La	4,87E-07	5,41E-09	9,80E-07	1,09E-08	2,03E-06	2,26E-08	2,95E-06	3,75E-08
Ce	9,22E-07	1,16E-08	1,85E-06	2,34E-08	3,85E-06	4,84E-08	5,59E-06	7,04E-08
Nd	5,24E-05	6,49E-07	5,27E-05	6,53E-07	5,46E-05	6,77E-07	5,29E-05	6,56E-07
Yb	2,85E-06	3,22E-08	5,73E-06	6,48E-08	1,19E-05	1,34E-07	1,73E-05	1,95E-07
Hf	1,63E-04	1,83E-06	1,65E-04	1,84E-06	1,72E-04	1,92E-06	1,67E-04	1,87E-06
Pb	4,83E-05	5,02E-07	4,79E-05	4,98E-07	4,83E-05	5,02E-07	4,55E-05	4,73E-07
Toplam	1,87	0,0778	1,88	0,0783	1,95	0,0813	1,89	0,0789



#### 4. TARTIŞMA

Çernobil Nükleer santral kazasından sonra atmosfere büyük miktarda fisyon ürünü olan  $^{137}\text{Cs}$  salınmıştır. Bu yüzden atmosferden gelen sürekli bir radyasyona maruz kalınır. Bu radyasyondan en çok etkilenen bölge Türkiye'nin doğusudur. Türkiye'de bazı beton çeşitleri inşaat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu inşaatlarda yaşayan insanlar için radyasyon soğurma katsayılarının belirlenmesi gerekir.

On iki beton numunesinin içeriği ve kimyasal analiz (% olarak) sonuçları sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 5 'de verilmiştir. Tablo 3'te duvar materyali olarak hazırlanan numunelerin yoğunluklarının kısmen düşük olduğu görülmektedir ( $2,09 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında Kurudirek ve arkadaşları çimentonun duvar halindeki yoğunluğunu  $2,067$  (Kurudirek ve ark.,2009), Medhat  $2,25 \text{ g.cm}^{-3}$  (Medhat, 2009), Trnkova ve arkadaşları  $2,30 \text{ g.cm}^{-3}$  (Trnkova ve ark., 2009). Salinas ve arkadaşları (Salinas ve ark., 2006) ise  $2,40 \text{ g.cm}^{-3}$  olarak bulmuşlardır.

Tablo 6'da 12 adet beton numunelerinin  $0,05 \text{ MeV}$  ile  $1 \text{ MeV}$  aralığından WinXcom programı ile hesaplanmış teorik kütle soğurma katsayıları verilmektedir. Tablo 7'de 12 farklı beton numunelerinin  $59,5$  ve  $661 \text{ keV}$ 'de teorik ve deneysel kütle soğurma katsayıları ( $\mu/\rho$ ) ve deneysel lineer soğurma katsayıları ( $\mu$ ), yarı kalınlık ( $x_{1/2}$ ) değerleri verilmektedir. Tablo 6-7'de açıkça görüldüğü gibi, kütle soğurma katsayıları artan enerjiyle azalmaktadır. Ayrıca  $59,5 \text{ keV}$ 'de kimyasal bileşen ile kütle soğurma katsayılarında büyük bir fark görülmektedir ve  $661 \text{ keV}$ 'deki farklar ihmal edilebilir. Bu farklılıklar; (i)  $Z^{4,5}$  olarak değişen fotoelektrik etki ve (ii) az olsa da önemli olan  $Z^{2,3}$  olarak değişen koherent saçılmadan kaynaklanmaktadır. Bu etki birçok araştırmacı tarafından deneysel olarak doğrulanmıştır. (Manohara ve Hanagodimath, 2007) ve Zavel'skii (Zavel'skii, 1964) tarafından düşük enerjide kaya tuzlarında ağır metal ile kütle soğurma katsayısının doğrudan bir ilişkisi araştırılmıştır. İnkoherent saçılma sürecinin en baskın olduğu orta enerji bölgesinde, inkoherent saçılmanın atom numarası ( $Z$ ) ile lineer bağımlılığına bağlı olarak kütle soğurma katsayısı sabit olmaktadır.

Ayrıca yüksek enerjide kütle soğurma katsayılarının deneysel ve teorik değerleri hata sınırları içinde uyum içinde olduğu görülürken, düşük enerjide bu uyumun nispeten farklı olduğu saptanmıştır. Bunun, beton numunelerinde dar ışın geometrisinden ya da yüksek  $Z$

safsızlıklarından kaynaklandığı söylenebilir. Böylece elementlerin ve karışımın kompozisyonunun saflığının kesin bir bilgisi, özellikle fotoelektrik etkinin baskın olduğu düşük enerjilerde doğru hesap yapmak için gereklidir. Şekil 22-24'te Silika dumanı (MS) katkılı beton örnekleri, uçucu kül (MF) katkılı beton örnekleri ve yüksek fırın curufu (MB) katkılı beton örnekleri için çizilen grafiklerden kütle soğurma katsayılarının; artan foton enerjisi ve bu katkıların artışı ile azaldığı görülmektedir.

Eşitlik (26)'dan deneysel olarak hesaplanan lineer soğurma katsayıları Tablo 7'de verilmiştir. Lineer soğurma katsayısı değerlerinin artan enerjiyle beraber azaldığı açıkça görülmektedir. Böylece azalan lineer soğurma katsayısı değerlerinin, kütle soğurma katsayılarında gözlenen azalma eğilimiyle genellikle aynı olduğu söylenebilir. Ayrıca düşük enerjide artan katkı yüzdeleriyle beraber lineer soğurma katsayısında bir azalma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi artan yüzdelik oranlara karşılık gelen kalsiyum (Ca) değerinin atom numarasının diğer elementlere göre daha yüksek olmasıdır. Böylece kalsiyumun düşüşü lineer soğurma katsayısı değerlerinin daha düşük olmasına neden olmuştur.

Numunelerin yarı kalınlık değerlerini belirlemek için iki yöntem kullanılmıştır. Birincisinde, numunelerin yarı kalınlık değerleri eşitlik (27)'de lineer soğurma katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. İkinci yöntemde ise bütün numuneler için farklı kalınlıklara karşı şiddet grafikleri çizilerek yarı kalınlık değerleri belirlenmiştir. Şekil 25-26'da standart karışım beton (MO) numunesi için 59,5 ve 661 keV'de çizilen grafikler verilmektedir. Tablo 7'de görülebilir ki, iki yöntemle elde edilen yarı kalınlık değerleri arasında önemli bir fark gözlenmiştir. Bu fark beton numuneleri için diğer araştırmacılar tarafından da gözlenmiştir (Creagh, 1987; Kerur, 1991). Araştırmacılar gözlenen bu farkın bazı foton geçiş kalınlık şartının sağlanmamasına dayandırmaktadır. Yarı kalınlık değerleri artan silika dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarıyla beraber artmıştır.

Deneysel ve teorik kütle soğurma katsayısı değerleri kullanılarak eşitlik (42)'den atomik tesir kesitleri belirlendi ve bu değerler Tablo 8'de verildi. Tablo 8'den de anlaşılacağı üzere, önceki tablolarda olduğu gibi 59,5 keV'de artan enerji ve mineral katkılarla birlikte atomik tesir kesitlerinin azaldığı gözlenmiştir. 661 keV'deki atomik tesir kesiti değerlerinde ise önemli bir değişiklik söz konusu değildir.

Tek bir atom numarasının bir elementi temsil etmek için kullanıldığını biliyoruz. Fakat bileşik materyallerde ise tek bir atom numarasını bu materyalleri temsil etmek için

kullanamayız. Bu yüzden farklı ağırlığa sahip olan materyaldeki çeşitli atom numaraları için madde ile farklı foton etkileşimi yüzünden enerji parametreye bağlıdır (Kurudirek ve ark., 2010). Tablo 9’da verilen farklı enerjilerdeki beton karışımlarının etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunlukları sırasıyla eşitlik (43) ve (44)’ten hesaplanarak elde edilmiştir. Tablo 9’da etkin atom numarası ve elektron yoğunlukları, artan silika dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının artışı ile azalmıştır. Ayrıca etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarında bir değişim fark edilmektedir.

Bu sonuçlar gama ışınlarının soğrulması yönünden incelendiğinde, 661 keV’de mineral katkılı bütün beton numuneleri neredeyse aynı soğurma etkisi vermekteyken, MS(2,5) beton numunesinin 59,5 keV’deki bütün beton numuneleri arasında en iyi foton soğurucu olduğu görülmüştür. En genel ifadeyle, silika dumanı ve uçucu kül katkılı beton karışımları diğer beton karışımları arasında en iyi foton soğurma özelliklerine sahip beton karışımlarıdır ve yüksek fırın cürufu katkılı beton numuneleriyle kıyaslandıklarında etkin atom numaralarının daha yüksek olduğu açıkça gözlenmektedir.

Standart numune ve bu numunenin farklı yüzdelikli beton karışımları (MS, MF, ve MB) için etkin soğurma tesir kesiti değerleri NXcom programından yararlanılarak hesaplanmıştır (El-Khayatt, 2010). Bu değerler Tablo 10’da listelenmiştir. Tablolardan da anlaşılacağı üzere en yüksek değer standart beton numunesine (MO) ait olduğu gözlenmiştir. Bu durumda saf çimento katkılı beton numunesinin farklı katkılı beton numunelerine göre nötron soğurmasının daha etkili olduğunu söyleyebiliriz. Beton karışımları için nötron soğurmasının düşük olmasının sebebi; literatürde yer alan diğer değerler (El-Khayatt ve El-Sayed, 2009) ile kıyaslandığında, duvar halindeki beton numunelerinin düşük yoğunluklu olmasından kaynaklanmaktadır. Soğurma tesir kesitleri için, numuneden numuneye teorik değerler arasında küçük değişimler gözlenmiştir. Bu durum, çimento ya da katkı malzemeleri için suyun sabit oranı, (w/c) ve kum için suyun sabit oranından dolayı inceleme altındadır. Bu oranlar sırasıyla 0,5 ve 0,17’dir. Bu sabitlik, beton numunelerinin benzer elementel bileşenlere sahip olmasından kaynaklanabilir. O halde sonuç olarak elementel bileşen, hidrojen bileşeni ve beton yoğunluğu nötronlar ve gama ışını soğurması için önemli bir kuraldır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Belirli enerji aralıklarında gerçekleştirilen bu çalışmanın, enerji aralıkları genişletilerek soğurma katsayıları hesaplanabilir. Böylece daha geniş bir kütle soğurma tablosu elde edilebilir. Buna ilaveten beton örnekleri toz haline getirilip aynı ölçümler yapılarak soğurma parametreleri bu sonuçlarla kıyaslanabilir. Çimento, silika dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkı maddelerinin saf halde soğurma parametreleri belirlenebilir. Böylece bu sonuçlar karışım halindeki beton örnekleriyle karşılaştırılabilir. Ayrıca bu malzemelerin radyoaktiviteleri ölçülerek ortama en az radyasyon veren ve dışarıdan gelen radyasyonu en iyi soğuran beton örneği tespit edilebilir.

## KAYNAKLAR

Akkurt, İ., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kılıncarslan, S., Basyigit, C., 2010. Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. Prog. Nucl. Energy, 52, 620-623.

Aköz, F., Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harç Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.

Angelone, M., Esposito, A., Chiti, M., ve Gentile, A., 2001. Measurement of mass attenuation coefficients for mixtures using X-ray from 13 keV up to 40 keV. Radiation Physics and Chemistry, 61 (3-6), 547-548.

Baltaş, H., Çevik, U., Tıraşoğlu, E., Ertuğral, B., Apaydın, G., ve Kobya, A.İ., 2005. Mass attenuation coefficients of YBaCuO and BiPbSrCaCuO superconductor at 511, 661 and 1274 keV energies. Radiation Measurements, 39, 33-37.

Baltaş, H., YBaCuO ve BiPbSrCaCuO Süperiletkenlerinin Soğurma Katsayısının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon 2006.

Baradan, B., 2004. Yapı Malzemesi II. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları Yayın No: 207, İzmir, s. 221.

Bentz, D.P., Peltz, M.A., Durán-Herrera, A., Valdez, P., Juárez, C.A., 2011. Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. J. Building Phys, 34 (3), 263-275.

Blizard, E.P., Abbott, L.S., 1962. Reactor Handbook, vol. III, Part B, Shielding. John Wiley & Sons, Inc.

Chitralakha, Kerur, B.R., Lagare, M.T. Nathuram, R. ve Sharma, D.N., 2004. Mass attenuation coefficients of saccharides for low-energy X-rays. Radiation Physics and Chemistry, 72, 1-5.

Creagh, D.C., 1987. The resolution of discrepancies in tables of photon attenuation coefficients. Nucl. Instr. and Meth., A, 255 (1-2), 1-16.

Creagh, D.C., Hubell, J.H., 1992. X-ray Absorption (or Attenuation) Coefficients, Sec. 4.2.4. in International Tables for Crystallography, Vol. C, A.J.C., Wilson, ed. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), 189-206.

Creagh, D.C., Hubbell, J.H., 1987. Problems Associated with The Measurement of X-ray Atenuation Coefficients. I. Silicon. Report on the International Union of Crystallography X-ray Attenuation Project, Acta Cryst., A, 43, 102-112.

Çevik, U., Baltaş, H., Çelik, Ş., Karaca, İ. ve Kobya, A.İ., 2005. Measurement of mass attenuation coefficients for YBaCuO superconductor at different energies. Supercond. Sci. Technol, 18, 101-106.

Çevik, U., Doğu Karadeniz Dip Tortularının X - Işını Floresans Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.

Damla, N., Cevik, U., Kobya, A.İ., Celik, A., Celik, N., Van Grieken, R., 2010. Radiation dose estimation and mass attenuation coefficients of cement samples used in Turkey. J. Hazard. Mater, 176, 644-649.

Demirboğa, R., 2007. Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. Building and Environment, 42(7), 2467-2471.

El-Khayatt, A.M., 2010. Radiation shielding of concrete containing different lime/silica ratios. Ann. Nucl. Energy, 37, 991-995.

El-Khayatt, A.M., 2011. NXcom - A program for calculating attenuation coefficients of fast neutrons and gamma-rays. Ann. Nucl. Energy, 38(1), 128-132.

El-Khayatt, A.M., El-Sayed Abdo, A., 2009. MERCSEF-N calculation program for fast neutron removal cross-sections in composite shields. Ann. Nucl. Energy, 36 (6), 832-836.

Erdoğan Y.T., 1995. Karışım ve Bakım Suları. Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara.

Erdoğan, T.Y., 2003 Beton, Metu Pres, Ankara.

Gerward, L., 1993. X-ray Attenuation Coefficients: Current State of Knowledge and Availability. Radiat. Phys. Chem., 41, 783-789.

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H., 2004. WinXCom - a program for calculating X-ray attenuation coefficients. Radiat. Phys. Chem., 71, 653-654.

Glasstone, S., Sesonske, A., 1986. Nuclear Reactor Engineering, third ed. CBS Publishers & Distributors, Shahdara, Delhi, India.

Gowda, S., Krishnaveni, S. ve Gowda, R., 2005. Studies on effective atomic numbers and electron densities in amino acids and sugars in the energy range 30-1333 keV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 239, 361-369.

Hubbel, J.H., Seltzer, S.M., 1995. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficient 1keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional substances of Dosimetric Interest, NISTIR 5632, Gaithersburg.

Hubell, J.H., 1994. Bibliography of Photon Total Cross Section (Attenuation Coefficient) Measurements 10 eV to 13.5 GeV, 1907-1993, NISTR 5437.

Hui-sheng Shi, Bi-wan Xu, Xiao-chen Zhou, 2009. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. Construction and Building Mater., 23(5), 1980-1985.

Kaplan H., Tama Y. S, Ün H., Yılmaz S., Kamu Yapılarında Gözlenen Yapısal Kusurlar, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2007. Denizli, Cilt 13, Sayı 2, Sayfa 203-212.

Kaplan, M.F., 1989. Concrete Radiation Shielding. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Kerur, B.R., Thontadarya, S.R., Hanumaiah, B., 1991. A novel method for the determination of x-ray mass attenuation coefficients. Int. J. Rad. Appl. Instrum., A, 42(6), 571-575.

Kurudirek, M., Aygun, M., Erzeneoglu, S.Z., 2010. Chemical composition, effective atomic number and electron density study of trommel sieve waste (TSW), Portland cement, lime, pointing and their admixtures with TSW in different proportions. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 68, 106-1011.

Kurudirek, M., Türkmen, İ., Özdemir, Y., 2009. A study of photon interaction in some building materials: High-volume admixture of blast furnace slag into Portland cement. Radiat. Phys. Chem. 78, 751-759.

M. E. Medhat, 2009. Gamma-ray attenuation coefficients of some building materials available in Egypt. Ann. Nucl. Energy, 36, 849-852.

Manohara, S.R., Hanagodimath, S.M., 2007. Studies on effective atomic numbers and electron densities of essential amino acids in the energy range 1 keV-100 GeV. Nuc. Instr. Meth., B, 258, 321-328.

Profio, 1979, "Profio, A. E., 1979. Radiation Shielding and Dosimetry John. Wiley and Sons, Inc., New York".

Salinas, I. C. P., Conti, C. C., Lopes, R. T., 2006. Effective density and mass attenuation coefficient for building material in Brazil, 64, 13-18.

Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuran, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti, S.S., ve Sahota, S.S., 2002. Gamma-ray Attenuation Coefficients in Bismuth Borate Glasses, Nuc. Inst.Meth. Phys. Res., B, 194, 1-6.

Singh, T., Kaur, P., Singh, P.S., 2007. A study of photon interaction parameters in some commonly used solvents. J. Radiol. Protection, 27, 79-85.

Tadashi, A., Tsuyoshi, Y., Ryouyuke, N., Kouichi, S., Ikuo, M., ve Fumiyuki, F., 2004. Measurements of mass attenuation coefficients around the K absorption edge of semiconductors by parametric X-rays. Radiat. Phys.Chem., 71, 643-645

Tertian, R. ve Claisse, F., 1982. Principles of Quantitative X-rayc Fluorescence Analysis, Heyden ve Son Ltd., London.

Topçu, İ.B., 2006, Yapı Malzemeleri ve Beton , Şahvar Ofset, Eskişehir.

Trnkova, L., Trojek, T., Thinova, L., 2009. Gamma spectrometric measurements of depth-related radionuclide distribution in walls. Applied Radiat. and Isotopes., 68, 832-835.

Türker, F., Akos, F., Koral, S., Yüzer, N., (1997), Effect of magnesium sulfate Concentration on Sulfate resistance of Mortars With and Without Silica Fume, Cement and Concrete Research, 205-214.

Türkmen, İ., Gul, R., Celik, C., 2007. A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. Building and Environment, 43, 1127-1137.

Türkmen, İ., Korozif Etkiler Altında Yüksek Fırın Cürufu ve silis Dumanı katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı, Doktora tezi, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2002.

Türkmen, İ., Özdemir, Y., Kurudirek, M., Demir, F., Simsek, Ö., Demirboğa, R., 2008. Calculation of radiation attenuation coefficients in Portland cements mixed with silica fume, blast furnace slag and natural zeolite. Ann. Nucl. Energy, 35, 1937-1943.

Ustabaş, İ., Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi, Doktora Tezi, K. T. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.

Wei Sun, Yunsheng Zhang, Sifeng Liu, Yanmei Zhang, 2004. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete. Cem. and Concr. Res., 34(10), 1781-1785.

Wood, J., Computational Methods in Reactor Shielding. Pergamon Press, Inc., New York, USA, 1982.

Zavel'skii, F. S., 1964. Mass absorption coefficients of gama radiation in soils, and errors in measurements made by the gama method. Atom. Energy, 16 (3), 319-322.



## **ÖZGEÇMİŞ**

29. 01. 1985 tarihinde Rize’de doğdu. İlköğrenimini İstanbul’da, lise öğrenimini ise Rize’de tamamladı. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2008 yılında lisansını tamamladı. Aynı yıl Rize Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İlk yıl İngilizce hazırlık programına katıldı. Esra YILMAZ halen öğrenimine devam etmektedir.