

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

**BETON NUMUNELERDE ALAŞIM TOZLARININ VE BOR  
KARBÜR KATKISININ İYONLAŞTIRICI RADYASYON  
ZIRHLAMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ  
İLHAMİ ERKOYUNCU**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI  
Prof. Dr. İskender DEMİRKOL**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Ferdi AKMAN**

**BİNGÖL-2023**



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

**BETON NUMUNELERDE ALAŞIM TOZLARININ VE BOR KARBÜR  
KATKISININ İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Prof. Dr. İskender DEMİRKOL danışmanlığında, İlhami ERKOYUNCU tarafından hazırlanan bu çalışma ...../...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı – Nükleer Fizik Bilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

|        |                               |      |   |
|--------|-------------------------------|------|---|
| Başkan | : Prof. Dr. Hüsnü AKSAKAL     | İmza | : |
| Üye    | : Prof. Dr. İskender DEMİRKOL | İmza | : |
| Üye    | : Prof. Dr. Kani ARICI        | İmza | : |
| Üye    | : Prof. Dr. Zafer ŞERBETÇİ    | İmza | : |
| Üye    | : Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ     | İmza | : |

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ...../ ...../ ..... tarih ve ...../ .....  
nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Zafer ŞİAR**  
**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: BAP-FEF.2021.010

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışması sırasında ihtiyaç duyulan her anda tereddütsüz yardımlarını esirgemeyen, her anlamda destek olan çok değerli hocalarım Prof. Dr. İskender DEMİRKOL'a, Doç. Dr. Ferdi AKMAN'a ve Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ'e şükranlarımı sunuyorum. Doktora tez çalışmasına verdikleri desteklerden dolayı Bingöl Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Proje Birimine (Proje Numarası: BAP-FEF.2021.010) ayrıca teşekkür ederim.

Yapmış olduğum Tez İzleme Komitesi sunumlarım sırasında tez çalışmasına ilişkin yaptıkları geri bildirim ve katkıları nedeni ile değerli hocam Prof. Dr. Zafer ŞERBETÇİ'ye, doktora tez çalışmasına ait deneysel çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL'a ve Öğr. Gör. Hasan POLAT'a şükran ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora tez çalışmam boyunca desteklerini eksik etmeyen başta eşim Ümran ERKOYUNCU'ya, kızım İrem ERKOYUNCU'ya, oğlum Çınar ERKOYUNCU'ya, kıymetli arkadaşım Doç. Dr. Harun Kaya KESİK'e ve görev yerimdeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu doktora çalışması başta babam Talat ERKOYUNCU'ya ve annem Hadice ERKOYUNCU olmak üzere bütün aileme ithaf edilmiştir.

**İLHAMİ ERKOYUNCU**

**Bingöl 2023**

# İÇİNDEKİLER

|                                                                |      |
|----------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                     | i    |
| İÇİNDEKİLER.....                                               | ii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....                           | v    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                          | vi   |
| TABLolar LİSTESİ.....                                          | xiv  |
| ÖZET.....                                                      | xii  |
| ABSTRACT.....                                                  | xxii |
| 1. GİRİŞ.....                                                  | 1    |
| 2. KURAMSAL TEMELLER.....                                      | 27   |
| 2.1. Radyasyonun Tanımı ve Tarihçesi .....                     | 27   |
| 2.1.1. Doğal Radyasyon Kaynakları .....                        | 29   |
| 2.1.2. Yapay Radyasyon Kaynakları .....                        | 32   |
| 2.2. Radyasyon Türleri .....                                   | 34   |
| 2.2.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon .....                   | 35   |
| 2.2.2. İyonlaştırıcı Radyasyon .....                           | 39   |
| 2.2.2.1. X-Işınları.....                                       | 40   |
| 2.2.2.2. Alfa Radyasyonu.....                                  | 40   |
| 2.2.2.3. Beta Radyasyonu.....                                  | 42   |
| 2.2.2.4. Gama Radyasyonu.....                                  | 43   |
| 2.2.2.5. Nötron Radyasyonu.....                                | 44   |
| 2.3. Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkisi .....              | 48   |
| 2.4. Radyasyon Zırhlama .....                                  | 49   |
| 2.4.1. Gama Radyasyon Zırhlama.....                            | 51   |
| 2.4.2. Nötron Radyasyon Zırhlama.....                          | 55   |
| 2.4.2.1. Nötron zırhlama için kullanılan bazı materyaller..... | 57   |
| 2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi .....                    | 61   |
| 2.5.1. Gama Radyasyonun Madde ile Etkileşimi .....             | 61   |



|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.5.1.1. Fotoelektrik.....                                                                                                                  | 62  |
| 2.5.1.2. Compton Saçılması.....                                                                                                             | 63  |
| 2.5.1.3. Çift Oluşumu.....                                                                                                                  | 65  |
| 2.5.2. Nötron Radyasyonun Madde ile Etkileşimi .....                                                                                        | 66  |
| 2.5.2.1. Saçılma.....                                                                                                                       | 66  |
| 2.6. Tesir Kesiti .....                                                                                                                     | 69  |
| 2.7. İyonlaştırıcı Radyasyon Zırhlama Parametreleri .....                                                                                   | 73  |
| 2.7.1. Lineer Azaltma Katsayısı .....                                                                                                       | 73  |
| 2.7.2. Kütle Azaltma Katsayısı .....                                                                                                        | 73  |
| 2.7.3. Etkin Atom Numarası .....                                                                                                            | 74  |
| 2.7.4. Yarı Kalınlık Değeri (YKD).....                                                                                                      | 76  |
| 2.7.5. Onda-Bir Kalınlık Değeri (OKD).....                                                                                                  | 77  |
| 2.7.6. Ortalama Serbest Yol.....                                                                                                            | 77  |
| 2.7.7. Radyasyon Koruma Verimliliği .....                                                                                                   | 77  |
| 2.8. Hızlı Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti .....                                                                                           | 78  |
| 2.9. Betonun Bazı Mekanik Özellikleri .....                                                                                                 | 79  |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                                                                                 | 82  |
| 3.1. GEANT4 Simülasyon Kodu .....                                                                                                           | 82  |
| 3.1.1. GEANT4 Kullanımı .....                                                                                                               | 83  |
| 3.2. FLUKA Simülasyon Kodu .....                                                                                                            | 86  |
| 3.3. XCOM Bilgisayar Programı .....                                                                                                         | 87  |
| 3.4. Beton Numunelerin Hazırlanması Süreci.....                                                                                             | 88  |
| 3.5. Gama Radyasyonu Zırhlama için Deneysel Süreç .....                                                                                     | 94  |
| 3.6. Nötron Radyasyonu Zırhlama için Teorik Süreç .....                                                                                     | 97  |
| 3.7. Numunelerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi .....                                                                                     | 97  |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                                                                                                | 100 |
| 4.1. Kütle Azaltma Katsayılarına Ait Araştırma Bulguları .....                                                                              | 101 |
| 4.2. Gama Radyasyon Zırhlamada Lineer Azaltma Katsayılarına Ait Araştırma Bulguları .....                                                   | 114 |
| 4.3. Yarı Kalınlık Değeri (YKD), Onda-Bir Kalınlık Değeri (OKD) ve Ortalama Serbest Yol (OSY) Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları ..... | 127 |
| 4.4. Etkin Atom Numarası Parametresine Ait Araştırma Bulguları .....                                                                        | 164 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5. Radyasyon Koruma Verimine Ait Araştırma Bulguları.....                  | 177 |
| 4.6. Nötron Radyasyonu Zırlama Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları.....  | 183 |
| 4.7. Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerine Ait Araştırma Bulguları..... | 219 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                    | 224 |
| KAYNAKLAR.....                                                               | 234 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                | 255 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                       |                                              |
|-----------------------|----------------------------------------------|
| Ev                    | : Elektron volt                              |
| KeV                   | : Kiloelektron volt                          |
| MeV                   | : Megaelektron volt                          |
| ICRP                  | : Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi |
| LINAC                 | : Lineer Hızlandırıcı                        |
| EAF                   | : Çelik Endüstrisinin Yan Ürünü              |
| $\mu$                 | : Lineer Azaltma Katsayısı                   |
| $\mu/\rho$            | : Kütle Azaltma Katsayısı                    |
| HPGe                  | : Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörü       |
| YKD                   | : Yarı Kalınlık Değeri                       |
| OKD                   | : Onda_Bir Kalınlık Değeri                   |
| OSY                   | : Ortalama Serbest Yol                       |
| RKV                   | : Radyasyon Koruma Verimliliği               |
| $Z_{\text{etk}}$      | : Etkin Atom Numarası                        |
| $\gamma$              | : Gama                                       |
| $\alpha$              | : Alfa                                       |
| $\beta$               | : Beta                                       |
| I                     | : Radyasyon Şiddeti                          |
| $I_0$                 | : Başlangıç Radyasyon Şiddeti                |
| $\Sigma$              | : Tesir Kesiti                               |
| EMR                   | : Elektromanyetik Radyasyon                  |
| $\sigma_{\text{t,a}}$ | : Toplam Atomik Soğurma Tesir Kesiti         |
| $\sigma_{\text{t,e}}$ | : Toplam Elektronik Soğurma Tesir Kesiti     |
| $\sigma_{\text{t,m}}$ | : Toplam Moleküler Soğurma Tesir Kesiti      |
| $\Sigma_R$            | : Hızlı Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti     |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Nükleer tıp uygulamaları için bir örnek.....                                                                                                                                                                           | 32 |
| Şekil 2.2.  | Radyasyon barındıran bazı endüstriyel kaynakların gösterimi.....                                                                                                                                                       | 33 |
| Şekil 2.3.  | Radyasyon barındıran bazı nükleer yakıt çevrimi elemanlarının gösterimi.....                                                                                                                                           | 33 |
| Şekil 2.4.  | İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonu gösteren elektromanyetik spektrum.....                                                                                                                               | 34 |
| Şekil 2.5   | Gama bozunması sürecine ilişkin bir örnek .....                                                                                                                                                                        | 35 |
| Şekil 2.6   | Radyasyon türüne göre uygulanabilen zırhlama malzemeleri.....                                                                                                                                                          | 49 |
| Şekil 2.7.  | Radyasyon maruziyetini etkileyen temel faktörler.....                                                                                                                                                                  | 49 |
| Şekil 2.8.  | Fotoelektrik, Compton ve Çift oluşumu olaylarının etkin olduğu bölgeler .....                                                                                                                                          | 61 |
| Şekil 2.9.  | Fotoelektrik olayı sonucu karakteristik X-Işını oluşumu.....                                                                                                                                                           | 62 |
| Şekil 2.10. | Compton saçılmasının gösterimi.....                                                                                                                                                                                    | 63 |
| Şekil 2.11. | Çift oluşumu.....                                                                                                                                                                                                      | 65 |
| Şekil 2.12. | Nötronun çekirdekten elastik saçılması.....                                                                                                                                                                            | 66 |
| Şekil 2.13. | Nötronun inelastik saçılması.....                                                                                                                                                                                      | 67 |
| Şekil 2.14. | Nötronun yakalama.....                                                                                                                                                                                                 | 67 |
| Şekil 2.15. | Nükleer fisyon reaksiyonuna bir örnek.....                                                                                                                                                                             | 68 |
| Şekil 2.16. | Tesir kesitinin şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                                 | 69 |
| Şekil 3.1.  | FLUKA simülasyon programının kullanım aşamalarından bir gösterim.....                                                                                                                                                  | 85 |
| Şekil 3.2.  | FLUKA simülasyon programının kullanım aşamalarında parçacık/ışın ve enerji tanımlanması.....                                                                                                                           | 86 |
| Şekil 3.3.  | (a) Kür havuzuna alınan numuneler (b) Üretim aşamasında kullanılan karıştırıcı (c) Mekanik testlerde kullanılan 5x5x5 cm <sup>3</sup> ölçüsündeki kalıp örnekleri (d) Radyasyon deneylerinde kullanılan 1 cm kalınlığa |    |

|            |                                                                                                                                                                                            |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|            | sahip silindirik kalıp örnekler.....                                                                                                                                                       | 91  |
| Şekil 3.4. | Mekanik deneyler için üretilen numune örnekleri.....                                                                                                                                       | 92  |
| Şekil 3.5. | Radyasyon zırhlama ölçümleri için üretilen numunelerden örnek.....                                                                                                                         | 92  |
| Şekil 3.6. | Deney geometrisi.....                                                                                                                                                                      | 93  |
| Şekil 3.7  | Deneylerde kullanılan basınç presi.....                                                                                                                                                    | 95  |
| Şekil 3.8. | Deneylerde kullanılan Posso ultra ses geçiş hızı cihazı.....                                                                                                                               | 96  |
| Şekil 3.9. | Deneylerde kullanılan Schmidt yüzey çekici cihazı.....                                                                                                                                     | 96  |
| Şekil 4.1. | Bronz katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.....                                                    | 105 |
| Şekil 4.2. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.....                                                   | 106 |
| Şekil 4.3. | Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.....                                          | 107 |
| Şekil 4.4. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.....           | 108 |
| Şekil 4.5. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.....          | 109 |
| Şekil 4.6. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği..... | 110 |
| Şekil 4.7. | Bronz ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....                                                                                     | 118 |
| Şekil 4.8. | Pirinç ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....                                                                                    | 119 |
| Şekil 4.9. | Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....                                                                           | 120 |

|             |                                                                                                                                                   |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.10. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....       | 121 |
| Şekil 4.11. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....      | 124 |
| Şekil 4.12. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği. | 124 |
| Şekil 4.13. | Bronz katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                                | 131 |
| Şekil 4.14. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                               | 132 |
| Şekil 4.15. | Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                      | 133 |
| Şekil 4.16. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                       | 134 |
| Şekil 4.17. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                  | 135 |
| Şekil 4.18. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....             | 136 |
| Şekil 4.19. | Bronz katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                                | 143 |
| Şekil 4.20. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                               | 144 |
| Şekil 4.21. | Paslanmaz katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                            | 145 |
| Şekil 4.22. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                       | 146 |
| Şekil 4.23. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                      | 147 |
| Şekil 4.24. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği.....             | 148 |
| Şekil 4.25. | Bronz katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                          | 155 |

|             |                                                                                                                                                                 |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.26. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                       | 156 |
| Şekil 4.27. | Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                              | 157 |
| Şekil 4.28. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....               | 158 |
| Şekil 4.29. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....          | 159 |
| Şekil 4.30. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği..... | 160 |
| Şekil 4.31. | Bronz katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....                                                         | 168 |
| Şekil 4.32. | Pirinç alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....                                            | 169 |
| Şekil 4.33. | Paslanmaz çelik alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası katsayısının enerjiye göre değişim grafiği.....                                   | 170 |
| Şekil 4.34. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....            | 171 |
| Şekil 4.35. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....           | 172 |
| Şekil 4.36. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.....      | 173 |
| Şekil 4.37. | Bronz katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi.....                                    | 177 |
| Şekil 4.38. | Pirinç katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi.....                                   | 178 |
| Şekil 4.39. | Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi.....                          | 178 |

|             |                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.40. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi.....           | 179 |
| Şekil 4.41. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi.....          | 179 |
| Şekil 4.42. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi..... | 180 |
| Şekil 4.43. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                       | 181 |
| Şekil 4.44. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                      | 182 |
| Şekil 4.45. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                             | 183 |
| Şekil 4.46. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                     | 185 |
| Şekil 4.47. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                    | 186 |
| Şekil 4.48. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                           | 186 |
| Şekil 4.49. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....                                      | 188 |
| Şekil 4.50. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....                                     | 189 |
| Şekil 4.51. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                             | 189 |
| Şekil 4.52. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....                                      | 191 |



|             |                                                                                                                                                                    |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.53. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjide geçen nötron sayısı .....                           | 192 |
| Şekil 4.54. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                | 192 |
| Şekil 4.55. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....                        | 193 |
| Şekil 4.56. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....                       | 194 |
| Şekil 4.57. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı .....              | 195 |
| Şekil 4.58. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....           | 197 |
| Şekil 4.59. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....          | 198 |
| Şekil 4.60. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı değişimi.....      | 198 |
| Şekil 4.61. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....           | 200 |
| Şekil 4.62. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....          | 201 |
| Şekil 4.63. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi..... | 201 |
| Şekil 4.64. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....           | 203 |
| Şekil 4.65. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....          | 204 |
| Şekil 4.66. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron                           |     |

|             |                                                                                                                                                                           |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | sayılarının değişimi.....                                                                                                                                                 | 204 |
| Şekil 4.67. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....                  | 206 |
| Şekil 4.68. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....                 | 207 |
| Şekil 4.69. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....        | 207 |
| Şekil 4.70. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi.....           | 208 |
| Şekil 4.71. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda göre geçen nötron sayılarının değişimi.....     | 208 |
| Şekil 4.72. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi..... | 209 |
| Şekil 4.73. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi.....           | 209 |
| Şekil 4.74. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi.....          | 210 |
| Şekil 4.75. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi..... | 210 |
| Şekil 4.76. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi.....             | 211 |
| Şekil 4.77. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi.....              | 211 |

|             |                                                                                                                                                                         |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.78. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi..... | 212 |
| Şekil 4.79. | %50 bronz ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin karşılaştırmalı grafiği.....                 | 213 |
| Şekil 4.80. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin karşılaştırmalı grafiği.....                | 216 |
| Şekil 4.81. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B <sub>4</sub> C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin karşılaştırmalı grafiği.....       | 226 |
| Şekil 4.82. | Farklı oranlarda bronz katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği.....                                                                                                  | 228 |
| Şekil 4.83. | Farklı oranlarda pirinç katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği.....                                                                                                 | 228 |
| Şekil 4.84. | Farklı oranlarda paslanmaz çelik katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği.....                                                                                        | 229 |
| Şekil 4.85. | Farklı oranlarda bronz katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği.....                                               | 229 |
| Şekil 4.86. | Farklı oranlarda pirinç katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği.....                                              | 229 |
| Şekil 4.87. | Farklı oranlarda paslanmaz çelik katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği.....                                     | 229 |

## TABLolar LİSTESİ

|            |                                                                                                                                                                                   |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. | Yiyeceklerdeki 500 gram başına potasyum-40 içeriği.....                                                                                                                           | 30 |
| Tablo 2.2. | Bazı radyonüklidlerin Bq cinsinden radyoaktiviteleri.....                                                                                                                         | 30 |
| Tablo 2.3. | Doğal radyasyondan elde edilen ortalama yıllık etkin doz.....                                                                                                                     | 31 |
| Tablo 2.4. | Radyasyon türleri.....                                                                                                                                                            | 35 |
| Tablo 2.5. | Elektromanyetik spektrumdaki bileşenlerin dalga boyuna, frekans ve enerjisine göre değişimi.....                                                                                  | 36 |
| Tablo 2.6. | Enerjilerine göre nötron türlerinin bazı özellikleri.....                                                                                                                         | 47 |
| Tablo 2.7. | Polimerlerin kimyasal bileşimi.....                                                                                                                                               | 59 |
| Tablo 2.8. | Nötron zırhlamada kullanılan bor içerikli bazı malzemelerin avantaj ve dezavantajları.....                                                                                        | 60 |
| Tablo 3.1. | Bronz katkılı beton numuneler ile bronz + B4C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları.....                           | 90 |
| Tablo 3.2. | Pirinç katkılı beton numuneler ile pirinç alaşımı + B4C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları.....                 | 91 |
| Tablo 3.3. | Paslanmaz çelik katkılı beton numuneler ile paslanmaz çelik + B4C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları.....       | 92 |
| Tablo 3.4. | Devam Paslanmaz çelik katkılı beton numuneler ile paslanmaz çelik + B4C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları..... | 92 |
| Tablo 3.5. | Deneylerde kullanılan radyoizotoplar ve foton enerjileri.....                                                                                                                     | 95 |
| Tablo 4.1. | Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) değerleri.....                   | 99 |
| Tablo 4.2. | Pirinç ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve                                                                                                              |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | FLUKA ile belirlenmiş kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                                                                                                                 | 99  |
| Tablo 4.3.  | Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                   | 102 |
| Tablo 4.4.  | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                     | 103 |
| Tablo 4.5.  | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ).....                                                                                                              | 104 |
| Tablo 4.6.  | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile hesaplanmış karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                           | 105 |
| Tablo 4.7.  | Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri 112Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri..... | 112 |
| Tablo 4.8.  | Pirinç ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                                     | 113 |
| Tablo 4.9.  | Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                            | 114 |
| Tablo 4.10. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                              | 115 |
| Tablo 4.11. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri.....                                                                                                                             | 116 |
| Tablo 4.12. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer                                                                                                                                                                          |     |

|             |                                                                                                                                                    |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ).....                                                                                                        | 117 |
| Tablo 4.13. | Bronz katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm).....                                           | 126 |
| Tablo 4.14. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı YKD'leri (cm).....                          | 127 |
| Tablo 4.15. | Paslanmış çelik katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı YKD'leri (cm).....                 | 128 |
| Tablo 4.16. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm).....               | 129 |
| Tablo 4.17. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri cm.....                | 130 |
| Tablo 4.18. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm).....     | 131 |
| Tablo 4.19. | Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm).....                                       | 138 |
| Tablo 4.20. | Pirinç alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm).....                              | 139 |
| Tablo 4.21. | Paslanmaz çelik alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm).....                     | 140 |
| Tablo 4.22. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm).....               | 141 |
| Tablo 4.23. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm).....              | 142 |
| Tablo 4.24. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)..... | 143 |
| Tablo 4.25. | Bronz katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm).....                                       | 150 |
| Tablo 4.26. | Pirinç katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm).....                                      | 151 |

|             |                                                                                                                                                 |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 4.27. | Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm).....                          | 154 |
| Tablo 4.28. | %50 bronz farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm).....           | 154 |
| Tablo 4.29. | %50 pirinç farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri .....              | 154 |
| Tablo 4.30. | %50 paslanmaz çelik farklı oranlarda B4C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)..... | 155 |
| Tablo 4.31. | Bronz katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                                                                             | 156 |
| Tablo 4.32. | Pirinç katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                                                                            | 164 |
| Tablo 4.33. | Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                                                                   | 165 |
| Tablo 4.34. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                                                 | 166 |
| Tablo 4.35. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                                                | 167 |
| Tablo 4.36. | %50 paslanmaz çelik alaşımı ve farklı oranlarda B4C katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Zetk değerleri.....                               | 168 |
| Tablo 4.37. | Bronz katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%).....                                    | 175 |
| Tablo 4.38. | Pirinç katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliği (%).....                                              | 176 |
| Tablo 4.39. | Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliği (%).....                                     | 176 |
| Tablo 4.40. | %50 bronz ve B4C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%).....                         | 177 |
| Tablo 4.41. | %50 pirinç ve B4C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%).....                        | 177 |

|             |                                                                                                                                             |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 4.42. | %50 paslanmaz çelik ve B4C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%).....           | 178 |
| Tablo 4.43. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı.....           | 182 |
| Tablo 4.44. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı.....          | 182 |
| Tablo 4.45. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı..... | 183 |
| Tablo 4.46. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....              | 185 |
| Tablo 4.47. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....             | 185 |
| Tablo 4.48. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....    | 186 |
| Tablo 4.49. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                | 188 |
| Tablo 4.50. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....               | 188 |
| Tablo 4.51. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....      | 189 |
| Tablo 4.52. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                | 189 |
| Tablo 4.53. | % 50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....              | 191 |
| Tablo 4.54. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....      | 192 |
| Tablo 4.55. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....               | 194 |
| Tablo 4.56. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....              | 194 |
| Tablo 4.57. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 10 cm kalınlığındaki                                                                    |     |



|             |                                                                                                                                                                                  |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                                                                                   | 195 |
| Tablo 4.58. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                    | 197 |
| Tablo 4.59. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                   | 198 |
| Tablo 4.60. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                          | 198 |
| Tablo 4.61. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                    | 200 |
| Tablo 4.62. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                   | 200 |
| Tablo 4.63. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                          | 201 |
| Tablo 4.64. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                    | 203 |
| Tablo 4.65. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                   | 203 |
| Tablo 4.66. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                          | 204 |
| Tablo 4.67. | %50 bronz ve farklı oranlarda B4C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                    | 206 |
| Tablo 4.68. | %50 pirinç ve farklı oranlarda B4C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                                   | 206 |
| Tablo 4.69. | %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B4C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı.....                                          | 207 |
| Tablo 4.70. | %50 bronz katkılı ve farklı oranlarda B4C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri.....  | 214 |
| Tablo 4.71. | %50 pirinç katkılı ve farklı oranlarda B4C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri..... | 214 |
| Tablo 4.72. | %50 paslanmaz çelik katkılı ve farklı oranlarda B4C katkılı beton                                                                                                                |     |

|             |                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri.....                                                                                                   | 214 |
| Tablo 4.73. | %50 bronz ve farklı oranlar B4C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri (cm-1).....         | 215 |
| Tablo 4.74. | %50 pirinç ve farklı oranlar B4C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri (cm-1).....        | 215 |
| Tablo 4.75. | %50 paslanmaz elik ve farklı oranlar B4C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri (cm-1)... | 216 |
| Tablo 4.76. | retilen tüm numunelerin ortalama basıncı dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve Schmidt yüzey sertliği için elde edilen değerler.....                                                                                         | 218 |

# BETON NUMUNELERDE ALAŞIM TOZLARININ VE BOR KARBÜR KATKISININ İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

## ÖZET

Bu doktora çalışması ile, iyonlaştırıcı gama radyasyonu zayıflatmada kullanılmak üzere alaşımlarla güçlendirilmiş betonun, radyasyonu azaltma kabiliyetinin tespit edilmesi ve bu amaçla nükleer teknoloji uygulamalarında kullanılabilecek yeni bir beton türünün önerilmesi amaçlanmıştır. Alaşım olarak farklı oranlarda bronz, pirinç ve paslanmaz çelik veya bor karbür kullanılmıştır. Numunelerin radyasyon azaltma kabiliyetlerini tespit edebilmek için  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{241}\text{Am}$  olmak üzere 5 farklı gama radyoizotop kaynağı kullanılmıştır. Radyoizotop kaynakları kullanılarak 11 farklı enerji değerinde gama radyasyonuna maruz bırakılan beton numunelerin deneysel, teorik ve simülasyon programlarından elde edilen veriler analiz edilmiş, bu veriler karşılaştırılmıştır. Teorik sonuçlar için WinXCOM bilgisayar programı, simülasyon sonuçları için GEANT4 ve FLUKA kodu kullanılmıştır.

Teorik sonuçlara göre gama radyasyona karşı en iyi sonucu veren beton numunelere farklı oranda bor karbür ilavesi yapılarak yine aynı 11 farklı enerji değerinde gama radyasyonu azaltma performansı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda 7 farklı parametreye göre analizler yapılmıştır. Bu parametreler kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, onda\_bir kalınlık değeri, yarı kalınlık değeri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve radyasyon koruma verimi parametreleridir. Bunun yanında tasarımı yapılan beton numunelerin mekanik özelliği olarak basınç dayanımı, ultra ses hızı ve yüzey sertliği incelenmiştir. Gama radyasyona karşı en iyi sonucu veren beton serisine farklı oranlarda bor karbür ilavesi yapılarak 7 farklı enerji değerinde ve 9 farklı kalınlıkta nötron radyasyonuna karşı davranışları GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları aracılığı ile belirlenmiştir. Bu kodlar kullanılarak zırh malzemesinden geçen nötron sayısı simüle edilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda gama radyasyonu zırhlamada kullanılan beton numunelerin yoğunluğu arttıkça iletilen radyasyonun azaldığı, simülasyonla elde edilen verilere göre, nötron radyasyonu zırhlamada ise kullanılan malzemenin yoğunluğu azaldıkça iletilen nötron sayısının azaldığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan beton numunelerin radyasyonu azaltma değerleri incelendiğinde tasarımı yapılan betonun nükleer teknoloji uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Radyasyon, zırhlama, gama radyasyonu, nötron radyasyonu, beton, GEANT4, FLUKA.

# **THE EFFECTS OF ALLOY POWDERS AND BORON CARBIDE ADDITIVE ON IONIZING RADIATION SHIELDING AND MECHANICAL PROPERTIES IN CONCRETE SAMPLES**

## **ABSTRACT**

In this study, it is aimed to determine the radiation attenuation ability of alloy reinforced concrete to be used to attenuate ionized gamma radiation and to propose a new type of concrete that can be used in nuclear technology applications for this purpose. Different proportions of bronze, brass and stainless steel were used as alloys. Of the designed concrete samples, 5x5x5 cm<sup>3</sup> cube shaped ones were prepared for mechanical tests, and cylindrical samples with a diameter of 2 cm and a height of 1 cm were prepared for radiation tests. In order to determine the radiation attenuation capabilities of the samples, 5 different gamma radioisotope sources, <sup>22</sup>Na, <sup>60</sup>Co, <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs and <sup>241</sup>Am, were used. The data obtained from experimental, theoretical and simulation programs of concrete samples exposed to gamma radiation at 11 different energy values using radioisotope sources were analyzed and these data were compared. WiNXCOM computer program was used for theoretical results, GEANT4 and FLUKA were used for simulation results.

According to the theoretical results, the gamma radiation scavenging at the same 11 different energy values was analyzed by adding different amounts of boron carbide to the concrete samples that gave the best results against gamma radiation. In both cases, analyzes were made according to 7 different parameters. These parameters are mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, one\_tenth thickness value, half value thickness, mean free path and effective atomic number and radiation shielding efficiency parameters. In addition, compressive strength, ultra sound velocity and surface hardness were investigated as mechanical properties of concrete samples. By adding boron carbide at different rates to the concrete series, which gives the best results against gamma radiation, its behavior against neutron radiation at 7 different energy values and 9 different thicknesses was investigated by means of GEANT4 and FLUKA simulation codes. Using these codes, the number of neutrons passing through the attenuation material was simulated.

All the results were analyzed and graphics were obtained with the help of Origin 2018(demo) graphics program. In this case, it has been seen that the use of elements with low atomic numbers is beneficial in terms of attenuating neutron radiation. When the radiation attenuation values of the concrete samples used in this study are examined, it is thought that the designed concrete can be used in nuclear technology applications.

**Keywords:** Radiation, shielding, gamma radiation, neutron radiation, concrete, GEANT4, FLUKA.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile radyasyon hayatımızın hemen hemen her aşamasında yer almaktadır. Radyasyonun sadece insanları değil bütün canlı varlıkları etkileyen sağlık sorunlarına neden olması, radyasyondan korunmayı önemli hale getirmiştir. Radyasyondan korunmanın temel olarak üç yolu bulunmaktadır. Bunlar radyasyon kaynağına olan uzaklık, radyasyon kaynağı ile geçirilen zaman ve radyasyon zırhlamadır.

Bu tez çalışması ile radyasyon zırhlamada etkin olarak kullanılabilecek malzeme önerilmesi amaçlanmaktadır. Nükleer teknoloji bünyesinde radyasyon zırhlamada kullanılabilecek olan malzemelerin üretilmesi, tasarımı ve geliştirilmesi hedefi olan birçok sayıda araştırma yapılmış ve halen bu alandaki çalışmalarda devam etmektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar dikkate alındığında radyasyon zırhlamada etkin malzemelerin geliştirilmesi mümkün görünmektedir.

Literatüre bakıldığında çeşitli malzemelerin radyasyon zırhlamadaki etkinliğinin analiz edildiği, yapılan bu analizler sonucunda lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, radyasyon koruma verimi gibi radyasyon zırhlama parametrelerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu malzemeler içinde de en çok tercih edilenler farklı materyallerle katkılандırılmış cam ve betonlardır. Radyasyon zırhlamada kullanılan kurşunun hem sağlık açısından tehlikeli olması hem de ciddi ağırlığının olması ya da kullanılan betonun radyasyonu önlemek için çok kalın seçilmesi ve maliyetinin artması gibi etkenler bu alanda bilim dünyasını sürekli arayışa sevk etmektedir.

Bu çalışmada alaşım veya bor karbür ilaveli beton numuneler hazırlanarak, iyonlaştırıcı radyasyon ve mekanik özellikleri açısından test edilmiştir. Yapılan bu doktora çalışması sonucunda radyasyondan koruyabilen veya etkisini minimuma indirgeyen alaşım katkılı veya bor karbür ilaveli betonların önerilmesi hedeflenmiştir.

Günümüzde nükleer teknolojik uygulamalarının artması, insan yaşamını kolaylaştırmaktadır. Ancak bu teknolojik uygulamalar birçok faydası yanında önemsenmesi gereken sorunlara da neden olmuştur. Şu anda teknolojik olarak dünyada gelinen noktada, hayatımızdaki radyasyon riskini göz ardı etmeyen ancak radyasyon tehlikesini de en aza indirecek radyasyondan korunma önlemlerini almamız zorunlu hale gelmiştir (Akkurt vd. 2011).

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmada, radyasyon kaynağına olan uzaklık (mesafe), radyasyon kaynağı ile birlikte geçirilen zaman (süre) ve zırlama olmak üzere üç parametreye dikkat edilmektedir. Radyasyona neden olan kaynaktan mümkün olabildiğince uzak mesafede kalarak ve kaynağın yakın çevresinde bulunma süresini minimuma indirerek radyasyonun olumsuz etkileri azaltılabilir. Bu basit sayılabilecek tedbirlere rağmen maruz kalınan radyasyonun miktarı yeterince azalmadığında ise zırlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılacak olan zırlama radyasyon kaynağının ve kaynağın yer aldığı alana göre değişkenlik gösteren bir materyal olabilmektedir. Zırlama ile radyasyona neden olan ışımayı minimuma düşürerek maruz kalınan doz seviyesini Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi'nin (ICRP) önerdiği radyasyon dozu seviyelerine indirilebilir.

Günümüzde çok fazla kullanılan eski tip radyasyon zırlama materyallerinin azımsanmayacak ölçüdeki zırlama yetenekleri ile istenmeyen bazı olumsuzlukları bulunmaktadır. Örneğin kurşun insan sağlığı açısından tehlike oluşturabilecek toksik özelliğe sahiptir. Ayrıca bulunduğu çevreye ciddi zarar verebilmektedir. Buna benzer dezavantajlardan dolayı zırlamada, radyasyon azaltma performansı yüksek ve çevreye çok fazla zarar vermeyen malzeme kullanımı tercih edilir. Nükleer teknolojiye önemli bir yer teşkil eden zırlama malzemelerinin farkına varılması, tasarlanması, üretimi ve kullanılması radyasyon zırlamaya duyulan ilgiyi önemli hale getirmiş ve bilim dünyası konuya ilişkin çalışmalara daha fazla eğilim göstermiştir. Radyasyon zırlamada tercih edilen malzemenin, maruz kalınan radyasyon doz miktarını azaltma özelliği (radyasyon tutuculuğu) ile beraber sahip olması gereken başka parametreler de bulunmaktadır.

Zırlama için belirlenen malzemenin ekonomik yönden avantajlı olması, korezyon ve kimyasal etkileşimlere karşı direnç gösterebilmesi, hafif olması, iyi ısıl iletkenlik ve

mekanik özellikler zırhlama seçiminde kullanılacak olan malzemenin sahip olması gereken önemli özelliklerdendir (Porokhorenko, 2015). Radyasyonun zırhlama materyali ile etkileşmesinin detaylı olarak analiz edilmesi, zırhlama için tercih edilecek materyalin belirlenmesi aşamasında yol gösterici olabilmektedir. Sonuç olarak nükleer teknoloji uygulamalarında radyasyonun neden olabileceği olumsuzlukları minimuma indirmek için farklı hedeflere hizmet edebilecek materyallerin içeriklerinin araştırılması, geliştirilmesi de zırh malzemesinin tespit edilmesi açısından önemli bir husustur (Shultis, 2000).

Radyasyona neden olabilecek nükleer teknoloji uygulamalarında yaşanan hızlı gelişmeler dikkate alındığında radyasyondan koruma performansı son derece iyi olan kurşun (Pb) elementi gibi ağır malzemelerin yerini alabilecek yeni zırh malzemeleri tasarlamak, üretmek veya önermek ana hedef olmuştur. Her ne kadar da iyonlaştırıcı radyasyondan korunmak için kurşun (Pb) veya kurşun içerikli malzemeler çok fazla kullanılsa da bu element insan sağlığını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Örneğin, kurşun elementi vücutta kanserojen madde birikmesine, ciddi hastalıklara, zehirlenmelere, organ hasarına, genetik bozukluklara neden olabilmektedir. Sayılan bu sağlık sorunları da insan ve çevre sağlığı üzerinde yüzyıllar boyunca etki edebilmektedir.

Kurşun elementinin bu tür etkilerinden dolayı, radyasyon zırhlamaya alternatif olması için, bu çalışmada pirinç tozu, bronz veya paslanmaz çelik ilave edilerek üretilen beton numunelerinin iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama özellikleri hem deneysel ve teorik hesaplamalarda kullanılan GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları kullanılarak araştırılması ve yeni bir zırh malzemesi olarak kullanılabilecek bir beton türünün literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

Normal şartlarda malzemenin radyasyon sızdırmazlığı ana hedef olarak hedeflenirken, normal olmayan durumlarda ise bu özelliklerinin yanında zırhlama için kullanılan materyallerin deformasyonlara karşı direnci, iyi korozyon direnci ve ısı özellikleri dikkate alınmaktadır. Son yıllarda meydana gelen Çernobil ve Fukuşima gibi bazı nükleer kazalar normal olmayan koşullar için zırhlama malzemelerinin sahip olduğu özelliklerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Oray, 2007). Sonuç olarak zırhlamada kullanılacak olan materyallerin fiziksel ve kimyasal radyasyon önleyici özelliklerinin birlikte

geliştirilmesi son derece önemlidir. Malzemeler oluşturulurken içerdikleri element, bileşik veya alaşımların oranları, tane boyutları, fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi parametreler üzerinde durulması gereken temel parametreler arasında yer almaktadır. Bu amaçla üretilen beton numunelerinin basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve yoğunluk gibi özellikleri de incelenmiştir.

İçerisinde birden fazla elementi barındıran materyallerin (bileşik, alaşım vb.) radyasyon azaltma parametrelerinin ölçülmesi veya hesaplanması astrofizikte, nükleer fizikte, nükleer silah yapımında, nükleer reaktörlerde, katı hal fiziğinde, sağlık fiziği uygulamalarında, yeraltı çalışmalarında, plazma fiziğinde, dozimetri ve daha sayılamayan nükleer teknoloji içerikli radyasyon uygulamalarında önemli bir yer teşkil etmektedir.

Literatürde radyasyona neden olan uygulamalarda zırhlama amacı ile malzemelerin üretilmesi, tasarımı ve geliştirilmesi hedefli olan birçok sayıda çalışma yapılmış ve halen bu alandaki çalışmalar da devam etmektedir. Yapılan bu çalışmaların irdelenmesi ve analizi ile elde edilebilecek bilgi ve yorumların katkısıyla ileri teknoloji ürünü olarak sayılan malzemelerin tasarımı mümkün olacaktır. Literatüre bakıldığında çeşitli malzemelerin radyasyon zırhlamadaki etkinliğinin analiz edildiği ve önemli zırhlama parametrelerinin hesaplanabildiği farklı türde birçok araştırma görülmektedir. Bu malzemeler içinde en çok tercih edilenler maliyetleri ve kullanım alanı nedeni ile farklı materyallerle katkılanmış cam ve betonlardır.

Literatürdeki mevcut bazı çalışmaları sıralarsak;

Demir ve Keleş (2006) 59,5 ve 81 keV enerjili gama ışınlarına maruz kalan bor katkılı betonların radyasyonu azaltma kabiliyetini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde inceledikleri atık bor katkılı betonların iki farklı gama radyasyonun kütle azaltma parametresini hesaplamışlardır. Elde ettikleri veriler sonucunda betonlara atık bor türevli malzemelerin kütle azaltma katsayısını zırhlama açısından pozitif yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Demir (2008) agregalı betonların X- ışını, gama ışını ve nötron radyasyonu azaltma aktivitesini değerlendirmiştir. Katıhal dedektörü, sintilasyon sayacı, iyon odası, He nötron dedektörü ve doğrusal hızlandırıcıdan (LINAC) yararlanarak deneylerini yapmıştır.



Yaptığı bu çalışmanın sonucunda içerisinde barit muhteva eden betonların fotonlar için, içerisinde kolemanit içeren betonların ise nötronlar için daha uygun zırh malzemesi olduğunu tespit etmiştir.

Kharita vd. (2008) tarafından yapılan araştırmada Suriye’de hali hazırda tercih edilen 2 tür beton ile kendi tasarımları olan 4 tür beton olmak üzere 6 tür birbirinden değişik beton numunesinin radyasyona maruz bırakılması durumunda kendi üretimleri olan betonun radyasyona karşı zırh malzemesi olarak daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Mortazavi vd. (2010) çalışmalarında kolemanit ve galena katkısı yapılmış ağır beton (CoGa) tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu betonun zırhlama malzemesi olarak kullanımını sıradan beton ile kıyaslamışlardır. Yapmış oldukları araştırmalarda radyasyon kaynağı olarak Co-60 gama ve Am-Be nötron kaynaklarını tercih etmişlerdir. CoGa katkısı yapılmış betonun sıradan betonla karşılaştırdıklarında yarı kalınlık değerinin 3,51 cm sıradan betondan daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca tasarımı yapılan betonun nötron radyasyona karşı sıradan betona göre % 10 oranında daha iyi bir zırhlama malzeme olduğunu beyan etmişlerdir.

Kharita vd. (2011) tarafından yapılan başka bir araştırmada borik asit, borik frit ve boraksı birbirinden farklı olan 2 çeşit betona katkı maddesi olarak eklemişlerdir. Çalışmada bu numunelerin radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini ve yapılan ilavelerin zırhlamaya katkısını değerlendirmişlerdir. Buldukları sonuçlara göre borik asit ve borik frit katkısının çimentonun içeriğini kötü etkilediğini, ancak boraks katkısının betonun içeriğini olumsuz etkilemediğini ve gama radyasyonu zırhlama parametrelerini % 80’e varan oranda iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Limkitjaroenporn vd. (2011), kurşun oksit-sodyum oksit-bor trioksit  $[(80-x)B_2O_3:xPbO:20Na_2O]$ ’ten oluşan cam malzemelerini farklı molar oranlarda üreterek gama radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda 662 keV enerjiye sahip fotonlar kullanmışlardır. Elde ettikleri verileri ise aynı kalınlıktaki standart beton verileri ile kıyaslamışlardır. Sonuçta standart betondan daha üstün sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir.

Oto ve Gür (2013) tarafından yapılan başka bir araştırmada manyetit cevheri miktarının beton numunelerinin gama radyasyonunda koruma verimi üzerindeki etkisini NaI(Tl) dedektörü yardımı ile değerlendirmişlerdir. Sonuçta beton numunelerde manyetit oranının artırılması ile lineer azaltma katsayısında artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Wang vd. (2014) kayaç yapılarında bulunan peridotitin betona ilave edilmesinin nötron zırlama üzerine değişkenliğini değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışmaya göre betona peridotit eklenmesinin betonun nötron zırlama kabiliyetini olumlu yönde geliştirdiğini rapor etmişlerdir.

Singh vd. (2015) betona değişik oranlarda kurşun-uçucu kül katkısı yapılmasının etkilerini analiz etmişlerdir. %0, %20, %30, %40, %50 ve %60 katkı maddesi içeren 6 çeşit farklı beton tasarlamışlardır. 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerinde foton kullanarak deneysel ve teorik olarak zırlama parametreleri analiz etmişlerdir. Yapılan araştırmaya neticesinde uçucu kül içeren betonlara kıyasla içinde kurşun-uçucu kül barındıran betonların zırlama kabiliyetlerinin daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

İpbüker vd. (2015) yaptıkları bir çalışmada önerdikleri çimento-bazalt karışımının radyasyon koruma özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, WinXCom programı aracılığıyla gama radyasyonu zırlama parametreleri Monte Carlo Serpernt kodu ile de nötron azaltma parametrelerinin hesaplanmaları yer almaktadır. Sunulan sonuçlar, bazalt lifi katkılı betonun nükleer enerji uygulamalarında ve nükleer atık yönetiminde kullanım için iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Park vd. (2014) tarafından yaptıkları araştırmada ise, içerisinde bor ve polietilen barındıran materyalin nötron zırlama kabiliyetini, MCNP-5 simülasyon kodu kullanılarak teorik olarak hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre içerisinde bor barındıran betona polietilen eklenmesi nötron zırlama etkisini arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Yaltay vd. (2015) tarafından yapılan başka bir araştırmada pomza agregası ve kolemanit ilave edilmesi ile tasarlanan değişken miktarlardaki ağır olmayan betonun radyasyon koruma kapasitelerini ve tasarlanan malzemenin kür süresinin radyasyon koruma

üzerindeki etkisini  $^{60}\text{Co}$  radyoaktif kaynağını kullanarak analiz etmişlerdir. Ağır olmayan betona kolemanit eklenmesi ile betonun radyasyon koruma özelliklerinde artış olduğunu ancak ağır olmayan betonda kolemanit oranının değiştirilmesinin radyasyon azaltma özellikleri ile kür süresi arasında bilinen bir ilişki olmadığını ifade etmişlerdir.

Waly ve Bourham (2015) tarafından yapılan araştırmada farklı oranlarda  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetit) ve  $\text{PbO}$  (kurşun oksit) eklenmesi ile beton oluşturulduğu zaman, sıradan betona göre gama radyasyonundan koruma performanslarında ciddi bir artış olduğunu ifade etmişlerdir. 0,015 – 1,5 MeV enerji aralığında foton enerjilerinde deneysel araştırmalar yapmışlardır. Araştırmaya göre en üstün zırhlama yeteneğine sahip betonun %39,195 magnetit ve %15,678 kurşun oksit ilavesi ile elde edilen betonda görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Tekin vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada mikro ve nano boyutlardaki  $\text{WO}_3$  ve  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  katkısının hematit serpantin ilaveli betonunun radyasyon zırhlama performansı üzerine katkısını analiz etmişlerdir. Bu hedefle hem mikro hem de nano ölçeklerde  $\text{WO}_3$  ve  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ile karıştırılmış hematit serpantin katkılı betonun kütle azaltma katsayısını, MCNPX kodu yardımı ile 0,142-1,33 MeV foton enerji aralığında analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, nanopartiküllerin sahip olduğu lineer azaltma katsayısı sonuçlarının seçilen tüm enerji değerlerinde mikro partiküllerden daha üstün olduğunu beyan etmişlerdir.

Kaya (2019) yaptığı bir çalışmasında sıradan beton ve özel teknikle tasarlanan hafif, ağır ve çelik lifli katkılı betonların radyasyonu azaltma kabiliyetlerini  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  gama radyasyon kaynakları yardımı ile incelemiştir. Birbirinden farklı kalınlıktaki beton numunelerinin radyasyon azaltma katsayılarını ve yarı kalınlık değerlerini hesaplamıştır. Neticede elde edilen bu sonuçların kullanılan malzemelerin yoğunluk ve kimyasal özellikleri ile yakın ilişki içinde olduğunu rapor etmiştir.

Singh vd. (2008) radyasyon zırhlama malzemesi olarak baryum borat uçucu kül camların farklı enerjilerde kütle azaltma katsayılarını hesaplamışlar ve elde ettikleri sonuçları sıradan beton malzemelerin kütle azaltma katsayılarıyla karşılaştırmışlardır. Elde edilen

sonuçlara göre, baryum-borat-uçucu kül camlarının zırhlama açısından, sıradan betonlara göre gama radyasyonlarına karşı daha iyi zırhlama malzemesi olduğunu rapor etmişlerdir. Kaewjaeng vd. (2012)  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O}$  katkılı cam yapıdaki malzemenin içeriğinde bulunan BaO bileşiğinin gama radyasyon zırhlamaya etkisini analiz etmişlerdir. Tasarlanan camlar içerisinde bulunan malzemeyi  $(50-x)\text{SiO}_2:15\text{B}_2\text{O}_3:2\text{Al}_2\text{O}_3:10\text{CaO}:23\text{Na}_2\text{O}:x\text{BaO}$ ,  $x = 0, 5, 10, 15$  ve  $20$  % mol oranlarında olacak şekilde üretmişlerdir. Sonuçta BaO bileşiğinin artırılması ile üretilen malzemenin gama radyasyonuna karşı zırhlama performansının arttığını ispatlamışlardır. Üretilen cam numunelerin betonla kıyaslaması yapılmış ve aynı ölçülerde kullanıldığında daha üstün bir zırhlama malzemesi olduğunu ifade etmişlerdir.

Akıllı (2019) yaptığı tez çalışmasında  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-PbCl}_2\text{-TeO}_2$  sisteminin optik, ısı, fiziksel ve yapısal karakteristiklerini analiz etmiştir. Üretilen camların radyasyon zırhlama performanslarını da incelemiştir. Ayrıca, elde edilen camların betonla ve mevcut diğer camlarla radyasyon zırhlama yönünden karşılaştırmasını yaparak, elde edilen camların zırh malzemesi olarak yüksek kullanım potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir.

Singh vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada silikat ve borat ağır metal oksit katkılı camların radyasyon zırhlama yeteneklerini araştırmışlardır. Sonuçta bu şekilde katkılanan camların % 40 oranında daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Calzada vd. (2011) yaptıkları çalışmada nötron ve gama zırhlamasında kullanılabilecek bir malzeme önermişlerdir.  $\text{Fe-B}_4\text{C-PE}$  (demir-bor karbür-polietilen) karıştırarak elde ettikleri malzemelerin nötron radyasyonuna karşı zırhlama performansının ağır betonun zırhlama performansına göre değerlendirmiş ve sonuçları Monte Carlo (MNCP) yardımı ile buldukları teorik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Tasarlanan malzemenin ağır betona göre %10 ile %20 arasında değişen oranda nötron zırhlama açısından daha iyi sonuçlar sağladığını belirtmişlerdir.

Hanafinvedik vd. (2011) yaptıkları çalışmada bor fiber malzemelerin nötron radyasyonunu azaltma özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada epoksinde kullanıldığı 15 farklı içerikli malzemenin özelliklerini açıklayarak nötron radyasyonu

karşısındaki zırhlama performanslarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre fiber borun nötron radyasyonu önlemede oldukça faydalı bir malzeme olduğunu göstermiştir. Kaloshkin vd. (2012), polimer-matris yapılı nano parçacık teknolojisi ile üretilmiş kompozit yapıdaki malzemenin içerisine  $B_4C$  ve W nano parçacıklar ilave etmişlerdir. Bunun sonucunda kompozit olarak dizayn edilen malzemenin gama radyasyonunu azaltma performansını, malzemenin içeriğindeki tungsten (W) oranının artması ile belli bir yere kadar doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmaya göre en iyi performansın kompozit yapıdaki malzemeye %60 W ilave edilerek elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Büyük (2013) yaptığı bir araştırmada tungsten, titanyum ve bor içeren karma yapıdaki materyallerin gama ve nötron radyasyonu azaltma performansını incelemek için kütle azaltma katsayıları, yarı-değer kalınlık değeri ve onda bir değer kalınlık değerini analiz etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bor içeren karma yapıların nötron zırhlamada etkin olabileceğini, tungsten ve titanyum içerikli malzemelerin ise gama radyasyon zırhlamada daha etkin olabileceğini ifade etmiştir.

Lee vd. (2014),  $B_4C-PbO-Al(OH)_3$  nanokompozit yapıdaki malzemenin nötron ve gama radyasyonuna karşı zırhlama yeteneğini analiz etmişlerdir. Malzemedeki  $B_4C$  ve PbO miktarlarının değişimine karşı lineer azaltma katsayılarını hesaplamışlardır. Araştırma sonucunda  $B_4C$  oranının artışı ile nötron zırhlama yeteğininde artış olduğunu, PbO oranı artması ile gama radyasyonu zırhlama performansında artış olduğunu ifade etmişlerdir. Shin vd. (2014) polietilen/bor karışımı içeren kompozit yapıdaki malzemenin radyasyon azaltma performanslarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre polietilen/bor karışımının etkili termal iletim sağladığını ve nötron zırhlama performansının yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

Chang vd. (2015) içerisinde değişen oranlarda tungsten barındıran tungsten/epoksi kompozit yapıdaki malzemeyi hazırlamışlar ve Co-60 radyoaktif kaynak yardımı ile malzemelerin radyasyon zırhlama yeteneklerini analiz etmişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışma sonunda, üretilen kompozit malzeme içindeki tungsten oranındaki artışın radyasyon zırhlama özelliğini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Belgin vd. (2015) yeni bir radyasyondan korunma malzemesi olarak ana materyali polyester olan hematit içerikli kompozitlerin radyasyon azaltma katsayılarını incelemişlerdir. Kompozit yapıdaki malzemelerin kütle azaltma katsayılarının kurşunun kütle azaltma katsayılarının %98'ine karşılık geldiğini bulmuşlardır. Ayrıca üretilen malzemenin toksik olmaması nedeni ile kurşundan üstün olduğunu beyan etmişlerdir.

Korkut (2010) üç farklı bor türü içeren cevher (kolemanit, üleksit ve tinkal) ile içinde bor barındıran beş farklı bileşiğin ( $MgB_2$ ,  $NaBH_4$ ,  $KBH_4$ ,  $B_2O_3$  ve  $H_3BO_3$ ) nötron radyasyonunu zırlama verilerini incelemiştir. Malzemelerin içerisinde bulunan bor ve hidrojen miktarlarının, malzemelerin radyasyona karşı zırlama kabiliyetini nasıl değiştirdiğini incelemiştir. Bunun sonucunda içerisinde bor ve hidrojen bulunan malzemenin nötron zırlama kabiliyetini artırdığını göstermişlerdir.

Singh ve Badiger (2014), bazı metallerin biraraya getirilmesi ile meydana gelmiş alaşımların gama ve nötron radyasyonuna karşı zırlama performanslarını analiz etmişlerdir. Ürettikleri bakır-nikel alaşımının (%2 Mn, %2 Fe, %30 Ni ve %66 Cu) üstün gama radyasyon zırlama kabiliyetine ve SS-316 adını verdikleri diğer bir alaşımında (%67,70 Si, %18 Cr, %12 Ni ve %2,3 Mo) 2 ile 12 MeV arasında değişen enerjilerde performansı son derece iyi olan nötron zırlama kabiliyetine sahip olduğunu ispatlamışlardır.

Oto vd. (2015) barit, manyetit, limonit, hematit ve serpantin cevherlerinin kütle azaltma katsayılarını farklı foton enerjileri için değerlendirmiş ve kullanılan enerjilerde bu cevherlerin etkin atom numaralarını ve elektron yoğunluklarını da hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre barit cevherlerinin çalışılan diğer cevherlere göre zırlama performansı bakımından daha üstün olduğunu rapor etmişlerdir.

Sayyed vd. (2017) tellür oksitin ana bileşen olduğu camların gama ışınından koruma kabiliyetini incelemişlerdir. Bu çalışmada yığılma faktörü üzerinde radyoaktif kaynağın sahip olduğu foton enerjisinin ve ortalama serbest yolun etken olduğunu ifade etmişlerdir. Elde edilen veriler ışığında, bu tür camların radyasyon zırlamada etkin olduğunu ifade etmişlerdir.

Kurudirek (2017), yaptığı bir çalışmada ağır metal oksit borat (HMOB) camlarının gama, hızlı nötron ve yüklü parçacık etkileşimi için kütle azaltma katsayılarının, etkin atom numaralarının ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitlerinin deneysel değerlerini MCNPX simülasyon kodunu kullanarak doğrulamıştır. Sonuçta üretilen cam sistemlerin, standart beton ve hematit-serpantin katkılı betonlarından daha üstün zırhlama yeteneklerine sahip olduğunu beyan etmiştir.

Hatipoğlu (2017), Kırklareli mermeri, kalker tozu ve alüminyum numunelerinin gama azaltma katsayılarını Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynaklardan yayımlanan enerjilerde belirlemiştir. Çalışmanın sonunda Kırklareli mermerinin ve basınç uygulanmış kalker tozunun lineer ve kütle azaltma katsayıları, yarı-kalınlık değeri (YKD) ve ondabir-kalınlık (OKD) değerlerinin malzemeye bağlı olarak değişebileceğini ifade etmişlerdir.

Levet vd. (2020) Fe-B kullanılarak üretilen alaşımların gama azaltma performansını değerlendirmişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada kütle azaltma katsayılarını 0,0532-0,7785 MeV aralığındaki foton enerjilerinde hesaplamıştır. Sonuçta bu tür bir alaşımın radyasyon zırhlamada etkili olabileceğini söylemişlerdir.

Mhamdi (2010) ve Hayouni (2014) tarafından yapılan araştırmalarda, barit, selestin ve galen gibi ağır minerallerin özellikle gama radyasyonu zayıflatılmasında beton yapımında kullanılan çimento harçlarına ilave edildiğinde radyasyon zırhlama karakteristiklerinin olumlu yönde etkilendiklerini söylemişlerdir.

Saidani vd. (2015) , Hammam Zriba'dan (Kuzey-Doğu Tunus) beton yapımında kumun kısmi ikamesi olarak barit kullanımının beton şişmesini etkilemediğini, ancak mekanik direnci ve büzülmeyi azalttığını bildirmişlerdir. Burada sunulan çalışma, maden atıklarının dahil edilmesinin gama ışınlarının azaltılması üzerindeki etkisini ve bu tür maden atıkları ile harmanlanmış harcın mekanik mukavemetini araştırmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre betona kısmi olarak kum yerine barit eklenmesinin radyasyonu azalttığını rapor etmişlerdir.

Nükleer radyasyondan koruma uygulamaları için çeşitli kurşun (Pb) bazlı camlar ticari olarak mevcut olsa da; Son zamanlarda, Pb'nin insan sağlığı, canlı organizmaların ve

çevrenin refahı üzerindeki toksik etkileri hakkında büyük bir endişe olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, literatürde radyasyon için borat, borosilikat, tellürit, boro-tellürit ve borat-tellürit-silikat camların Pb esaslı camlarla değiştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma rapor edilmiştir.

Azreen vd.(2018) betona amang ve kurşun cam ekleyerek numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin gama ışınlarına karşı kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Ancak bu iki mineral uzun süreli basınç dayanımını azaltmıştır. Önerilen numunelerin gama ışını koruması için etkili olmasına rağmen, radyolojik güvenlik endişeleri yarattığını beyan etmişlerdir.

Han vd. (2018) silika kumunun nükleer tesislerin yapımında pratik uygulamaya sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Radyasyon kalkanını iyileştirmek için geri dönüştürülmüş kaba agregayı da ek olarak önermişlerdir. Yaptıkları çalışmalar neticesinde betonda silika kumunun kullanılmasının gama ve nötron radyasyonunu azalttığını beyan etmişlerdir. Betona silika kumu ile beraber kaba agreganın ilave edilmesinin radyasyon azaltma performansını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Eid vd. (2022) bileşimine atık cam eklenmiş çimento numunelerinin radyasyon koruyucu özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerin kütle azaltma katsayılarını, radyasyon zırlama yeteneklerini değerlendirmek için deneysel olarak belirlemişlerdir. Sonuçta genel olarak, %50 atık cam içeren çimento numunesinin radyasyondan korunma uygulamaları için en büyük koruma potansiyeline sahip olduğunu ve atık camın yeniden kullanılması için faydalı bir yol olduğu sonucuna varılmıştır.

Masaoud vd. (2020) serpantinit agreganın, ağır agrega içeren betonun radyasyon azaltma özelliklerini iyileştirdiğini beyan etmişlerdir. Serpantinit betonun normal ve hematit-serpantinit betona göre daha yüksek radyasyon azaltma özelliklerine sahip olduğunu ve aynı zamanda ilmenit-limonit betondan daha düşük gama radyasyon azaltma özelliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Zayed vd. (2020) antigorit esaslı serpantinit betonun  $\gamma$ -ışınlarına ve hızlı nötronlarına karşı lizardit ve krizotil esaslı serpantinit betona göre nispeten daha yüksek bir radyasyon



azaltma etkinliği gösterdiğini ifade etmişlerdir. Serpantinit betona barit ve hematit agregalarının eklenmesinin yoğunluğu arttırdığını ve mukavemetini azalttığını da raporlamışlardır.

El-Sayed vd. (2022) normal dayanımlı beton içerisine farklı nano katkı maddelerinin (nano alümina, karbon nanotüpler ve her iki malzemenin karışımı) eklenmesinin, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra betonun hem mekanik hem de gama ışını radyasyonu koruma özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hem basınç dayanımı hem de gama ışını lineer zayıflama katsayısı ( $\mu$ ) testleri, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra özelliklerdeki değişimin bir göstergesi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, tüm değiştirme oranlarında tüm nano katkı maddeleri için dikkate değer olumlu etkiler gösterirken, %1,5 nano alümina ile %0,1 oranındaki karbon nano tüplerin karışımı, hem mekanik hem de radyasyon kalkanı özellikleri için optimum seviyeyi gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Tekin vd. (2017) tungsten oksit ( $WO_3$ ) nanoparçacıklarının betonun kütle azaltma katsayıları üzerindeki etkisini MCNPX (versiyon 2.4.0) simülasyonunu kullanılarak araştırmışlardır. Tavsiye edilen MCNPX simülasyon geometrisinin doğrulaması, sonuçların betonun kütle azaltma katsayıları için standart XCOM verileriyle karşılaştırılmasıyla sağlanmıştır. XCOM ve MCNPX arasında çok iyi bir uyum gözlenmemiştir. Doğrulanmış geometri, nano-  $WO_3$  ve mikro  $WO_3$  'ün beton numuneye tanımlanması için kullanılmıştır. Saf beton ve  $WO_3$  'ün kütle azaltma katsayıları mikro boyutlu ve nano boyutlu katkılı beton karşılaştırılmıştır. Sonuç  $WO_3$  'ün katkılı betonun malzemenin zırlama özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Papachristoforou ve Papayianni (2018) bir araştırmada, kaba agrega için kısmi bir ikame olarak EAF (çelik endüstrisinin bir yan ürünü) cürufa iki farklı tipte çelik lif dahil etmişlerdir. Sonuç olarak, farklı foton enerjileri için EAF lineer azaltma katsayısının, standart betona kıyasla yaklaşık %10-15 arttığını gözlemlemişlerdir.

Zeyad vd. (2022) çeşitli ağır ve ince agregaların betona dahil edilmesi ile üretilen betonların basınç dayanımı, yoğunluk, zırlama kapasitesi gibi farklı özelliklerini iyileştirmede üstün olabileceğini ortaya koymuşlardır. Sonuçta betona bu tür agregaların dahil edilmesinin radyasyon iletimini sınırlandırdığını beyan etmişlerdir.

Alzahrani vd. (2021),  $\text{TeO}_2$  –  $\text{Na}_2\text{O}$  –  $\text{TiO}_2$  cam sisteminin gama radyasyonu, termal nötronlar ve yüklü parçacıklara karşı zırhlama özelliklerinde  $\text{TiO}_2$  içeriğinin rolünü incelemişlerdir. Foton zırhlama verimliliğini, %0 ila % 20 mol arasındaki  $\text{TiO}_2$  konsantrasyonu için PHITS simülasyonu ve Phy-X arayüzü ile tahmin etmişlerdir.  $\text{TiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  konsantrasyon oranı arttıkça cam numunelerin bu verimliliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı eğilim, toplam termal nötron kesiti ve yüklü parçacık absorpsiyon yetenekleri için de gözlemlemişlerdir.

Kebaili vd. (2021), kalkojenit camlarının Bi oranındaki değişimin camların yapısal, optik ve foton azaltma yeteneği üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmaya göre, Bi içeriğindeki artış, foton azaltma yeteneği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Velasco vd. (2022) bir çalışmada Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak 1 keV'den 100 GeV'ye kadar foton enerjisi için üç tip tuğlanın radyasyon zırhlama ve dozimetrik parametrelerini belirlemişlerdir. Karşılaştırma için aynı parametreleri NBS türü beton için de hesaplanmışlardır. Hesaplanan parametreler, lineer zayıflama katsayıları, etkin atom numaraları, yarı değer katmanları (YKD), enerji soğurma faktörleri (EABF) ve maruz kalma yığılma faktörleri (EBF) parametreleridir. Elde edilen sonuçlardan, mamografi üniteleri (30 keV'den az) barındıran tıbbi tesislerin tasarımında üç tip tuğlanın güvenle kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Alfryyan vd (2022) tellürit içerikli camların iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama kapasitelerini araştırmışlardır. Mevcut cam malzemelerin gama ışını, hızlı nötron ve elektron zırhlama parametrelerini GEANT4, Phy-X/PSD yazılımı, ESTAR ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Sonuç olarak camların zırhlama yeterliliğinin, bazı geleneksel zırhlama malzemelerinden daha iyi sonuçla verdiğini dolayısıyla nükleer tesislerde radyasyon güvenliği amacı için yeterli bir potansiyele sahip olduklarını beyan etmişlerdir.

Alshahrani vd. (2022) kimyasal içeriğinde  $60\text{Li}_2\text{O}_3$  -  $10\text{Y}_2\text{O}_3$  -  $(30-x)\text{B}_2\text{O}_3$  -  $x\text{Dy}_2\text{O}_3$  olan yeni bir cam sisteminin foton zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. Bunun yanında cam sisteminin hızlı nötron uzaklaştırma özelliklerini de analiz etmişlerdir. Sonuç olarak

bu cam sisteminin kullanıldığı gözlüklerin yaygın olarak kullanılan cam sistemlerinden daha iyi bir koruma potansiyeline sahip olduğunu göstermişlerdir.

Alharshan vd. (2022)  $\text{TeO}_2\text{--ZnO--LiF--NaF}$  cam sisteminin radyasyon zırhlama kapasitelerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu cam sistemine  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  katkısı eklenerek zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. Sonuçta standart koruyucu camlar ve beton ile karşılaştırıldığında, üretilen camların üstün derecede zırhlama yetenekleri olduğunu not etmişlerdir.

Libeesh vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada karmaşık malzemelerin gama ışını zırhlama kapasiteleri 0.015 – 15 MeV foton enerjisi aralığında belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada maksimum Fe içeren dunit numunesinin, araştırılan malzemelerle karşılaştırıldığında üstün zırhlama özellikleri gösterdiğini ifade etmişlerdir. Sonuçta dunitin üstün zırhlama özelliklerinin, nötron ve ağır iyonlar gibi diğer radyasyon türleri için araştırmaya değer olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Abdalla vd. (2022) granit numunelerinin radyasyon zırhlama performansını araştırmışlardır. Granit numunelerinin radyasyon zırhlama yeteneklerini 59,5, 661,6, 1173 ve 1332 keV'de deneysel olarak test etmişlerdir. Granit örneklerinin düşük enerjilerde önemli derecede radyasyon azaltma etkinliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, deneysel lineer azaltma katsayısı değerlerinin XCOM programı kullanılarak teorik olarak elde edilen değerlerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Akkurt ve Malidarre (2022) çeşitli mermer katkılı beton numunelerinin gama foton zırhlama performanslarını elde etmek için FLUKA Monte Carlo Kodu, Phy-X:PSD yazılımı ve analitik yöntem kullanmışlardır. Yarı kalınlık değeri (YKD), radyasyon geçirme oranı ve radyasyondan koruma verimliliği (RKV) gibi gama foton azaltma parametrelerini FLUKA simülasyon kodunu kullanarak belirlemişlerdir. Bulgular, MC25 kodlu en ince mermer türünün daha iyi YKD'ye sahip olduğunu ve sonuç olarak diğer mermer beton örnekleri ile karşılaştırıldığında daha iyi bir zırhlama performansı gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Aygün vd. (2021) dört yeni krom katkılı ağır beton için hem nötron hem de foton azaltma özelliklerini değerlendirmek için bir çalışma yapmışlardır. Buna göre önerilen krom içerikli yeni ağır beton örneklerinin hem nötron hem de gama radyasyonu azaltma performanslarının yaygın olarak tercih edilen referans numunelere göre çok yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Aygün (2020) yapığı bir çalışmada üç tür paslanmaz çelik örneğı tasarlayıp bu alaşımların gama ve nötron azaltma performanslarını değerlendirmiştir. Araştırmada hızlı nötronların radyasyon koruma performansını, toplam makroskopik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve nötron geçirme parametrelerini GEANT4 kodunu kullanarak belirlemiştir. Sonuçlar yaygın olarak kullanılan 316LN tipi paslanmaz çelikle karşılaştırmıştır. Tasarımı yapılan paslanmaz çelik türlerinin radyasyon azaltma performanslarının 316LN tipinden daha üstün olduğunu bildirmiştir.

El-Samrah vd. (2022) dolomit, barit, ilmenit ve selestit olmak üzere 4 farklı iri agrega tipini içeren betonların gama zırlama kapasitelerini WinXCOM programı ile, nötron zırlama performanslarını MRCsC ve JANIS-4 programlarını kullanarak incelemiştir. Sonuçlar, barit ve selestit içeren beton karışımlarının, belirlenen enerji aralığında gama ışınlarını azaltmada yeterli olduğunu gözlemlemiştir.

Al-Ghamdi (2022) yapısında farklı oranlarda tungsten oksit içeren bazı ağır beton numuneleri hazırlamış ve elde edilen numunelerin mekanik ve radyasyon zırlama özelliklerini teorik ve deneysel teknikler kullanarak incelemiştir. İncelenen tüm enerji değerlerinde, deneysel test ile teorik veriler arasında kabul edilebilir ölçüde uyum olduğunu göstermiştir. En yüksek yoğunluğa sahip  $400 \text{ kg/m}^3 \text{ WO}_3$  içeren Cons-5 kodlu numunenin gama radyasyona karşı en iyi sonucu verdiğini ifade etmiştir.

Cheewasukhanont vd. (2022) radyasyon zırlamada kullanılmak üzere yüksek yoğunluklu  $\text{WO}_3$ - $\text{Gd}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$  camların radyasyon zırlama özelliklerini incelemiştir. Radyasyon zırlama özelliklerinin araştırılması için  $^{137}\text{Cs}$  radyoizotop kaynağını kullanmışlardır. Deneysel değerleri, WinXCom ve GEANT4 ile karşılaştırmışlardır. Bulgular neticesinde kütle azaltma katsayılarının artan  $\text{WO}_3$  içeriğı ile biraz arttığını ve artan enerji ile azaldığını ifade etmişlerdir. Benzer şekilde  $Z_{\text{etk}}$  ve  $N_{\text{etk}}$

değerlerinin, artan  $WO_3$  miktarı ile hafifçe artan ve artan gama ışını enerjisi ile azalan benzer eğilimleri not etmişlerdir.

Dong vd. (2022) yaptıkları çalışmada nötron radyasyonu tehlikelerine karşı zırhlama için son derece uygun maliyetli bir zırhlama malzemesi olarak bor içeren yüksek fırın cürufunun ( $B_3FS$ ) önermişlerdir. Hazırlanan kompozitlerin termal nötronlara karşı koruma performansının karakteristiği, Am-Be nötron kaynağı ile test edilmiştir. Sonuç olarak hazırlanan kompozitlerin zırhlama kabiliyeti referans olarak kullanılan bazı ticari zırhlama materyallerinden daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Amin vd. (2022) değişen su-çimento oranı ile (w/c) ile radyasyon azaltma karakteristikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Radyasyon azaltılma karakteristiklerini, beton tarafından emilen su miktarı ve lineer zayıflama katsayısı arasındaki ilişkiyi hesaplamışlardır. Ek olarak, betonun radyasyon koruma kapasitesini tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) ve gen ekspresyon programlama (GEP) modellerini geliştirmişlerdir.

Luo vd. (2022) yüksek sıcaklıkların radyasyon koruma betonun (RSC) fiziksel, mekanik ve zırhlama özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklıkların, RSC'nin mekanik ve gama zırhlama özelliklerinin bozulmasına neden olduğunu, barit betonun yüksek sıcaklıklarda termal olarak daha az kararlı özellikler gösterdiğini ve manyetit betonun yüksek sıcaklık ortamında radyasyon koruma için daha uygun bulunduğunu ifade etmişlerdir.

Tamayo vd. (2022) iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama alanında farklı beton karışımları karşılaştırmışlardır. Su/çimento oranı ve CEM türü çimentoların iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama özelliklerini nasıl etkilediğine dair analizler yapmışlardır. s/c oranındaki her 0.1 artış için lineer azaltma katsayısında düşüş gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında %95'e varan bir uyumun olduğunu beyan etmişlerdir.

Daungwilailuk vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada yerel mineraller, barit ve kesilmiş çelik çubuklar içeren betonun gama ışını ve hızlı nötron radyasyonuna karşı koruma performansını değerlendirmişlerdir. Baritin betonda ince ve kaba agrega olarak

kullanılması, numunelerin mukavemet ve yoğunluğunun yanı sıra radyasyondan korunma yeteneğini arttırdığını, katkı malzemesi olarak kesilmiş çelik çubukların kullanılmasının da, gama ışınlarının ve nötronların zayıflama katsayılarını önemli ölçüde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Zalegowski vd. (2020) gadolinyum ve boraks gibi hızlı nötron düzenleyiciler ve termal nötron emiciler içeren malzemelerle modifiye edilen Yeni Nesil Koruyucu Betonun (NGS-Beton) radyasyon koruma özellikleri üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Referans sıradan betonu ( OC ), iri agreganın ezilmiş granitten manyetite ve çimentonun CEM III 42,5N'den CEM I 42.5R'ye değiştirilmesiyle modifiye etmişlerdir. Deneysel olarak mikro yapı çalışmaları kırılma yüzeyinin analizi, kesitlerin görsel ve görüntü analizi, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılan gözlemler, hacim ve mutlak yoğunluk ve gravimetrik ölçümlerden hesaplanan toplam gözeneklilik , basınç dayanımı, ultrasonik ses darbe hızı ( UPV ) ve nötron radyasyonu eşdeğer doz azaltımı ile belirlenen, yarı kalınlık değeri (YKD) olarak ifade edilen nötron radyasyonu koruma verimliliği ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada tüm betonlar için basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızı arasında iyi bir korelasyon doğrulanmıştır. Nötron radyasyonu koruma verimliliğinin esas olarak hacim yoğunluğundan etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda nötron radyasyon kalkanının, esas olarak agreganın faz ve atomik kompozisyon değişiklikleri ve daha az ölçüde mikro yapı değişiklikleri ile belirlenen beton hacim yoğunluğuna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Katubi vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada kimyasal bileşimi  $50\text{B}_2\text{O}_3 + x \text{Li}_2\text{O} + 20\text{ZnO} + (30 - x) \text{Na}_2\text{O}$  (burada  $x = \%5, \%10$  ve  $\%20$  mol) olan ve BLZN-A, BLZN- B, BLZN-C olarak kodlanmış üç borat camının, gama ışını, yüklü parçacık (elektronlar, protonlar, alfa parçacıkları ve karbon iyonları) ve nötronlara karşı koruyucu özelliklerini araştırmışlardır. Gama ışını azaltma katsayıları FLUKA simülasyon kodu ve XCOM programı ile hesaplanırken, parçacıkların durma güçleri ve aralığı SRIM yazılımı ve NIST veri tabanına dayalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut cam numuneler için gama ışını ve yüklü parçacık koruma kabiliyetinin 0,01–10 MeV enerji aralığı için BLZN-A < BLZN-B < BLZN-C olarak sırasıyla arttığını göstermişlerdir. Elde edilen bulgular camların zırhlama performansının, sıradan beton ve ticari cam zırhlama malzemeleri gibi bazı geleneksel zırhlardan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu

nedenle, mevcut BLZN cam sistemi, hastanelerde ve nükleer tesislerde pratik uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Sayyed vd. (2022) yaptıkları başka bir çalışmada betona bazı endüstriyel ürünleri (kırmızı çamur ve katot ışın tüpleri) ekleyerek oluşturdukları numuneleri önermişlerdir. Endüstriyel ürünlerin kullanımının, radyasyondan koruyucu betonun zırhlama performansını artırdığını beyan etmişlerdir. Çalışmada beş farklı beton blok dökülmüştür. Bu blokların yoğunluğu, basınç dayanımı ve gama zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Test sonuçları, 2, 3 veya 5 cm kalınlığındaki kompozit betonların düşük enerjili radyasyona karşı iyi zırhlama malzemesi olduğunu göstermiştir.

Öz vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada jeopolimer numunelerinin foton ve hızlı nötron zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmaya göre kuvars içeriği değişen 4 tür jeopolimer üretmişlerdir. Bunların içinde M3 numunesi yüksek GBFS (öğütülmüş yüksek fırın cürufu) içeriği nedeniyle iyi bir gama ışını koruma performansına sahipken, yüksek kuvars kumu içeriği nedeniyle M1 numunesinin ise, çalışılan jeopolimerler arasında hızlı nötron koruması için en etkili numune olduğunu bildirmişlerdir.

Henieagal vd. (2022) ultra yüksek ağır betonda (UHPHWC) ince agregaların ikamesi olarak kullanılmak üzere siyah kumdan ayrılmış ilmenit ve manyetit kullanmışlardır. Ayrıca nano ferrosilikonu(NFS) çimento kütlesinin %1, %2 ve %3'ü oranlarında çimentoya eklemişlerdir. Bu katkıların UHPHWC'nin mikro yapısı, gama ışını azaltma katsayısı, mekanik özellikleri ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bulgular neticesinde ince kumun ilmenit ve manyetit ile toplam ikamesi, 28 gün sonra beton karışımlarının azaltma verimini sırasıyla %18,9 ve %24,2 arttırdığını belirtmişlerdir. UHPHWC üretmek için %3 NFS eklenmesi ile, sırasıyla 7, 28 ve 91 gün sonra 130,5, 167,2 ve 189,8 MPa'lık en yüksek basınç dayanımlarına ulaşmışlardır Ayrıca %3 NFS ve %100 manyetit içeren kombinasyon, maksimum yoğunluk ve gama ışını azaltma kapasitelerine sahip olduklarını not etmişlerdir.

İmamoğlu vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada, 1 keV ila 100 GeV foton enerjisi aralığında yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak farklı oranlarda üleksit ilave edilerek üretilen betonların lineer azaltma katsayılarını tahmin etmişlerdir. YSA

modelinin temel girdisi foton enerjisi, yoğunluk ve üleksit oranıdır. YSA kullanılarak elde edilen bulgular, XCOM hesaplamaları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve %99'luk doğrusal korelasyon gözlemlenmiştir.

Malkapur vd. (2021) gama ve nötron radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için Atık Polimerle Birleştirilmiş Beton (WPIC) numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelerde, geleneksel bileşenler yerine, demir endüstrisinden gelen atık polimerik malzeme ve yüksek yoğunluklu ince ve iri agrega bileşenlerinin aynı anda kullanımını tercih etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre demir endüstrisinin yan ürünleriyle birlikte atık plastiklerin, hem gama hem de nötron radyasyonları açısından kabul edilebilir basınç dayanımı özelliklerine ve önemli ölçüde geliştirilmiş zırhlama yeteneklerine sahip beton karışımlarının radyasyon korumada rahatlıkla kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Tuna vd. (2021) bor karbür ( $B_4C$ ) takviyeli polyester tabanlı kompozit malzemelerin nötron zırhlama yeteneklerini araştırmışlardır. Çalışma için 20, 40 ve 60 mm kalınlığındaki numuneler önce %10-50  $B_4C$  ile takviye edilerek hazırlanmış ve daha sonra çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak nötron zırhlama özellikleri incelemişlerdir. Sonuçta kompozit malzemelerin zırhlama kabiliyetlerinin numune kalınlığı ile arttığı gözlemlenmiştir.

Abdülaziz vd. (2022) etilen-propilen dien kauçuk ve düşük yoğunluklu polietilen ile nötron koruyucu malzemeler içeren bor karbür dolgulu çift polimer matris üretti. Yüksek miktarda bor karbür eklenmesinin (ağırlıkça %57) nötronları yaklaşık %85 oranında keskin bir şekilde azalttığını bildirmişlerdir.

Hassanpour vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada, grafen/h-BN meta malzemelerinin, MCNPX simulasyon kodu ile hem termal hem de hızlı nötron için moderatör ve nötron soğurucu olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Üretilen numune üzerine, Monte Carlo simülasyon giriş dosyasında 100 keV ila 15 MeV enerji aralığına sahip bir Am-Be nötron kaynağı tarafından üretilen ışınlar gönderilmiştir. Ortaya çıkan mevcut iletim hızı, MCNPX koduyla araştırılmıştır. Betonun radyasyon zırhlama malzemesi olarak yaygın kullanımı nedeniyle, bu tasarımın sonuçları da beton numunelerle



karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, betona kıyasla üretilen numunelerin zırhlama karakteristiklerinde önemli bir iyileşme olduğunu raporlamışlardır.

Piotrowski (2021) radyasyon zırhlama parametrelerini iyileştirmek amacı ile betona farklı katkı maddeleri eklemiş ve bazı karşılaştırmalar yapmıştır. Karşılaştırmalarını sıradan betona göre yapmıştır. Elde edilen bulgulara göre, nötron zırhlamada en iyi sonucun betona akrilik—manyetit karışımına karşının %1'i oranında Gd ekleyerek elde edildiğini belirtmiştir.

C. Harrison vd. (2008) çalışmalarında, dolgu partiküllerinin başarılı yüzey modifikasyonunun hem bor nitrür hem de bor karbür dolgulu polietilen matris kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, bor karbür ve bor nitrür katkılı kompozitlerin zırhlama nötron zırhlama karakteristiklerinin polietilen-saf numunelerden biraz daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

Kaur vd. (2019) nötron radyasyonu önlemede kullanılmak üzere bizmut katkılı lityum borat camları incelemişlerdir. Hazırlanan camların yapısal özellikleri, kimyasal dayanıklılıkları, gama ışını zırhlama özellikleri, yığılma faktörü ve hızlı nötron koruma özellikleri incelenmiştir. Sentezlenen malzemelerin nötron koruma özellikleri su, grafit, ve hematit-serpantin ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta incelenen bizmut-lityumun -borat cam sistemi hem gama radyasyon için hem de nötron radyasyonu için çok daha iyi radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Hazırlanan camların PET (Pozitron Emisyon Tomografisi), X-ışını, medikal radyoterapi üniteleri, yüksek enerjili fizik laboratuvarları, nükleer reaktörler, radyasyon atık saklama kutuları gibi çeşitli tesislerde radyasyon koruyucu pencere olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Yin vd. (2022)  $(100-x)(60\text{TeO}_2 - 40\text{PbO}) - x\text{B}_2\text{O}_3$  cam sisteminde  $\text{B}_2\text{O}_3$ 'ün cam radyasyon zırhı olarak kullanılmasının rolünü incelemişlerdir. Burada  $x = 0, 1, 2, 3, 4$  ve  $5$  moldür. Camın içeriğini SEM ve XRD testleri ile incelemişlerdir. Camın radyasyon özelliklerini deneysel ve teorik olarak hesaplamak için radyasyon kaynakları ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  ve  $^{241}\text{Am}$ ) ve WinXCOM yazılımını kullanmışlardır. Camın gama zırhlama yeteneğini, kütle azaltma katsayısını kullanarak değerlendirmişlerdir. Yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası ( $Z_{\text{etk}}$ ) hesaplanmıştır. Camların

nötron radyasyonuna karşı zırhlama kabiliyeti, hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti (RCS) değeri hesaplanarak analiz etmişlerdir. Camın gama ve nötron radyasyona karşı zırhlama özelliklerini, çeşitli sıradan beton ve diğer tellürit camlarla karşılaştırmışlardır. Ölçülen kütle azalma katsayılarının, WinXCOM yazılımı kullanılarak elde edilen teorik değerlerle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir. Düşük YKD, MFP değerleri ile yüksek kütle azaltma katsayısı,  $Z_{etk}$  ve RCS değerleri, bu cam malzeme serisinin iyi zırhlama özelliklerine sahip olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre TPB-1 cam numunesinin en iyi radyasyon koruma performansını gösterdiğini bildirmişlerdir.

Madbouly vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada, 662, 1173, 1275 ve 1333 keV gama ışını enerjileri için bizmut-borofosfat camların foton geçirgenlikleri, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol değerlerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Daha sonra belirlenen bu değerleri FLUKA kodu ile karşılaştırmışlardır. FLUKA kodu bulgularının, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. Radyasyona karşı zırhlamada, bizmut-borofosfat camların mükemmel gama ışını koruma özelliklerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Alzahrani vd.(2022) yaptıkları çalışmada borat ve tellürit camlarının radyasyon zırhlama özelliklerini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. GEANT4 simülasyonları ile hem borat hem de tellürit camların radyasyon zırhlama özelliklerini değerlendirmişlerdir. İncelenen enerji bölgesinde tellürit camların ortalama serbest yolları (OSY) borat camların OSY değerinden daha düşüktür. Buna göre tellürit camların borat camlarından daha yüksek foton azaltma özelliklerine ve dolayısıyla daha iyi zırhlama malzemesi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yonphan vd. (2022) yaptıkları bir çalışmada, esnek radyasyon zırhlama malzemeleri üretimi için antimon oksit ( $Sb_2O_3$ ) ilaveli doğal bir kauçuk (NR) geliştirmişlerdir. NR'nin kompozitlerini farklı oranlarda  $Sb_2O_3$  konsantrasyonlarında hazırlamışlardır. NR kauçuğun gama radyasyona karşı zırhlama özellikleri, 0,223 MeV – 0,662 MeV enerji aralığında Compton saçılma tekniği kullanılarak ölçülmüş ve teorik değerlerle kıyaslama yapmışlardır. Kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğunun artan  $Sb_2O_3$  oranı ile arttığını beyan etmişlerdir. Ayrıca, ticari camlar,

beton ve kırmızı tuğla ile karşılaştırıldığında kompozitlerin yarı kalınlık değerlerinin daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu bulgulara dayanarak araştırmacılar  $Sb_2O_3$  eklenmiş NR kauçuk kompozitlerinin radyasyona karşı zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceğini beyan etmişlerdir.

Nagaraj vd (2022) lantan polimerleri, seryum polimeri, Praseodimyum polimer, Gadolinyum teksafirin gibi lantanit polimerlerinin X-ışınları ve nötron zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. Elde edilen verilere göre diğer tüm lantanit polimerleriyle karşılaştırıldığında, erbiyum fosfat hidrat polimerinin maksimum en yüksek zırhlama potansiyeline sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Arfa vd. (2022) nükleer zırhlama ve mekanik özellikleri açısından optimum beton korumanın belirlenmesine dayalı olarak, sıradan betonun (OC) performansı ile içeriğinde farklı çelik lif içerikleri barındıran yeni nesil reaktif toz beton (RPC) arasındaki farkı analiz etmişlerdir. İncelenen numunelerin yapısal özelliklerini incelemek için yoğunluk, basınç ve çekme dayanımları, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve diferansiyel termal analizi (DTA) kullanmışlardır. Kütle azaltma katsayılarını belirlemek için 59,5 keV'den 1407 keV'e kadar dokuz farklı gama ışını enerjisini kullanmışlardır. Hazırlanan betonların makroskopik nötron kesitlerini ( $\Sigma$ ,  $cm^{-1}$ ) belirlemek için üç tip nötron enerjisi (yavaş nötron, toplam yavaş nötron ve 10 keV'den büyük enerjili nötron) kullanmışlardır. Sonuçlar, çelik lif içeriğinin, RPC'nin mekanik ve nükleer zırhlama özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre her iki tip betonun da yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından sonra, RPC'nin nükleer zırhlama ve mekanik özelliklerinin, sıradan betona göre iyileşme gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Park vd. (2022) çimento bazlı malzeme uygulamaları için bir polimer-bor kompozitinin nötron zırhlama performansını geliştirmek, karakterize etmek ve değerlendirmek amaçlı bir çalışma yapmışlardır. Buna göre mikro boyutlu bir polietilen/  $B_4C$  kompozit (Poly-B) tozu sentezlemişlerdir. Poly-B içeren bir çimento hamuru hazırlamışlardır ve Poly-B'nin çimento ve nötron kalkanlama performansı deneysel olarak değerlendirmişlerdir.

Deneysel olarak elde edilen sonuçları, Monte Carlo N-parçacık (MCNPX) kodu kullanılarak karşılaştırmışlardır. Poly-B, borlu betonun zırlaması için daha uygun bir katkı maddesi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca polietilenin, B<sub>4</sub>C partiküllerinin yüzeyini kapladığından, Poly-B, çimento hidrasyonu sırasında borik asit çözünmesini bastırdığını, saf B<sub>4</sub>C katkılı çimento hamuruna kıyasla Ca(OH)<sub>2</sub> tüketimini azalttığını ve bu nedenle, Poly-B'nin betona dahil edilmesinin, çimentolu malzemelerin nötron geçişini azaltabileceğini bildirmişlerdir.

Gökmen. (2022) Inconel 718 (NiCr<sub>19</sub>Fe<sub>19</sub>Nb<sub>5</sub>Mo<sub>3</sub>) ile güçlendirilmiş B<sub>4</sub>C'ün (ağırlıkça %0-25) nötron ve gama ışını zırlama özelliklerini PSD yazılımı kullanarak analiz etmiştir. Ortalama serbest yol (OSY), lineer ve kütle azaltma katsayıları, onda\_bir değeri ve yarı kalınlık değeri (OKD, YKD), etkin atom numarası ( $Z_{etk}$ ), maruz kalma yığılma faktörleri (EBF) ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesidi (FNRC) değerlerini 0,015–15 MeV enerji aralığında belirlemiştir.

Bulgulara göre B<sub>4</sub>C içeriğindeki azalma ile kütle azaltma ve lineer azalt katsayılarının arttığını bildirmiştir. YKD, OKD ve FNRC değerlerini sırasıyla 0,018 cm ile 3,6 cm arasında, 2,46 cm ile 12,087 cm arasında ve 0,159 cm ile 0,194 cm arasında bulmuştur. Yapılan çalışmada, Inconel 718 en yüksek kütle azaltma katsayısı değerini,  $Z_{etk}$  değerlerini ve en düşük YKD değerini sağladığı için maksimum foton zırlama özelliğini sağlarken, ağırlıkça %25 B<sub>4</sub>C katkılı Inconel 718'in en yüksek FNRC değerini gösterdiğinden nötron için en iyi zırlama malzemesi olduğunu rapor etmiştir.

Almatari vd. (2022) betona alternatif olarak bilyeli kil-çimento-demir cürufunun radyasyon zırlama özelliklerini incelemişlerdir. Çeşitli çimento, bilyeli kil ve demir cüruf bileşimleri kullanılarak altı numune üretmişlerdir. Lineer azaltma katsayısını, Am-241, Cs-137 ve Co-60 ve bir HPGe dedektörü kullanılarak deneysel olarak rapor etmişlerdir. Deneysel ve XCOM sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak hazırlanan bilyeli kil-çimento-demir cüruf kompozitlerinin etkin atom numarası değerlerini de belirlemişlerdir. Sonucunda kompozitlere demir cürufu ilave edilmesinin lineer azaltma katsayısı değerini artırdığını beyan etmişlerdir.

Roslan vd. (2019) ferro boru, gama ve nötron radyasyonunu azaltmak için yüksek yoğunluklu beton için bir agrega olarak kullanmışlardır. Betona %25 ve %50 ferro bor eklenmesi ile malzeme mukavemetini arttığını gözlemlemişlerdir. Gama ışınlarının ve nötronların zırlama kapasitelerinin betondaki ferro bor yüzdesi ile beraber arttığını gözlemlemişlerdir.

Khanzadeh vd. (2020) değişen miktarlarda borosilikat cam tozu içeren çimento esaslı macun ve harç karışımlarının hem puzolanik reaktivitesini hem de nötron zırlama özelliklerini değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, borosilikat cam tozu kullanımının erken dönemde tek başına çimento hamuru için beklenenden daha fazla hidratasyon ısısı ile zırlama performansını gözlemlemişlerdir. Borosilikat cam tozu miktarının arttıkça harcın nötron zırlama karakteristiklerinin %10 ila %40 oranında arttığını bildirmişlerdir.

Daungwilavulk vd. (2021) farklı beton karışımları için hızlı nötron zırlama tesir kesitlerini incelemişlerdir. İnce agregalı baritin, nötron zırlama performansını önemli ölçüde arttığını beyan etmişlerdir. Bunun yanında su/çimento oranının değiştirilmesi ile, nötron zırlama karakteristiklerinin değişmediğini gözlemlemişlerdir.

Hassanpour (2022) bazı atık gıda maddelerinin eklenmesi ile meydana gelen betonun mekanik ve nötron zırlama özelliklerini incelemişlerdir. Atık gıda malzemelerinin betona eklenmesi ile nötron zırlama parametrelerinin saf betona göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Galehdari ve Kelkar (2017) , polimer kompozitlerin mekanik, termofiziksel özellikleri ve nötron radyasyonu zırlama üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar, nano boyutta bor nanotoz, gadolinyum ve bor karbür gibi epoksi bazlı nanokompozitler malzemelerle güçlendirilmiş malzemelerin nötron zırlama parametrelerini incelenmişlerdir. Bu çalışmanın sonucuna göre, çalışılan nanokompozitlerin nötron koruma verimliliğinin, saf epoksiden daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır.

An vd. (2022)  $H_3BO_3-K_2CO_3-MgO-TeO_2-ZnO-AgNO_3$  bileşimindeki cam sistemlerini uygun sıcaklıklarda eritme yöntemiyle sentezlemişlerdir. Gama ve nötron zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 15 keV ile 15 MeV arasında değişen enerjilerde incelemişlerdir. Önerdikleri bu cam sisteminin nötron radyasyona karşı mükemmel koruma sağladığını bildirmişlerdir.

Olarinoye vd. (2021)  $Ag_2O/V_2O_5$  ikamesinin  $xAg_2O + 40TeO_2 + (60 - x)V_2O_5$  kimyasal bileşimine sahip tellürit cam sisteminin gama ve nötron radyasyon zırhlama parametreleri üzerindeki etkisini FLUKA simülasyon programı ile araştırmışlardır. ( $0 < x < 50\%$  mol arasında bir değerdir). Elde edilen sonuçlara göre, mevcut cam sistemleri arasında foton zırhlama, hızlı nötron zırhlama bakımından en iyi zırhlama malzemesi olarak %50  $Ag_2O$  katkılı numune olduğunu gözlemlemişlerdir.

Mhareb vd. (2021) çok bileşenli borat bazlı cam serilerinin zırhlama özelliklerini araştırmışlardır.  $(80-y)H_3BO_3-10ZnO-10Na_2O-yBaO$  bileşimine sahip yedi adet cam numunesini incelemişlerdir. Burada borat bazlı cam serileri ( $y = 0, 5, 10, 15, 20, 25$  ve  $30$  mol.) eritme yöntemiyle sentezlemişlerdir. Sonuçta sentezledikleri borat bazlı cam serilerinin radyasyondan koruma amaçlı kullanımını önermişlerdir.

Literatür incelemesinden de görüldüğü gibi, bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya  $B_4C$  ile güçlendirilmiş betonlara ait gama ve nötron radyasyonu zırhlama karakteristikleri üzerine yapılan bir çalışma bulunmamaktadır. Sunulan tezde bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya  $B_4C$  ile güçlendirilmiş betonun gama radyasyonu zırhlama parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA ile karşılaştırılmıştır. Nötron radyasyonu zırhlama parametreleri ise GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodu yardımı ile belirlenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Radyasyonun Tanımı ve Tarihçesi

Radyasyon, enerjinin uzayda veya maddesel bir ortamda dalgalar veya parçacıklar şeklinde yayılması veya iletimi olarak tanımlanır. Radyasyon sözcük anlamı itibari ile, bir kaynaktan yayımlanan ve tüm yönlerde dışa doğru hareket eden dalgalar olgusundan kaynaklanmaktadır. Bir nokta radyoaktif kaynaktan gelen her tür radyasyonun şiddeti, uzaklık ile ters orantılıdır(Weisstein, 2014).

Görünür ışık dışında kalan dalga boylarının elektromanyetik radyasyon barındırdığı 19.yüzyılın başlarında keşfedilmiştir. Örneğin kızılötesi radyasyonun varlığının ilk kez bilinmesi astronom William Herschel'e atfedilir. Herschel güneşten gelen ışığı bir prizma yardımı ile kırınıma uğratmış ve termometre yardımı ile kaydedilen sıcaklıklarda artış olması neticesinde kızılötesi ışınlarını tespit etmiştir.

1801'de Alman fizikçi Johann Wilhelm Ritter, bir prizmadan yansıyan ışınların gümüş klorürden hazırladığı numunelerin üzerine düştüğü zaman, gelen ışınların numuneleri mor ışıktan daha hızlı renk değişimine uğrattığını (kararttığını) belirterek ultraviyole ışının (UV) keşfini yapmıştır. Ritter'in yapmış olduğu deneyler neticesinde ek olarak UV ışınlarının kimyasal reaksiyonlara sebep olduğunu da belirtmiştir. Tespit edilen ilk radyo dalgaları doğal bir kaynaktan değil, 1887'de Alman bilim adamı Heinrich Hertz tarafından üretilmiştir. Bunu yaparken Hertz, James Clerk Maxwell'e ait denklemler tarafından önerilen formülleri referans alarak radyo frekansı aralığında salınımlar üretmek amacı ile kullanılan elektrik devrelerini kullanmıştır. Maxwell'in elektromanyetik dalgalarının gerçekliğini laboratuvar ortamında deneysel olarak ilk radyo dalgaları üreterek göstermiştir. Dolayısı ile radyo dalgaları ilk kez yapay olarak üretilmiştir (Davidson, 2014).

Wilhelm Röntgen, X-ışınlarını 1895'te keşfetmiştir. Havası alınmış bir tüpe uygulanan

yüksek gerilimlerle deneyler yaparken, deney ortamında bulunan kaplamalı cam plaka üzerinde bir aydınlık fark etmiştir. Bu olay sayesinde X-ışınlarının temel özellikleri keşfedilmiştir (Jeans, 1947). 1896'da Henri Becquerel, bazı minerallerden yayımlanan ışınların siyah kâğıdı etkilediğini ve yayımlanan ışınların etkilemediği bir fotoğraf plakasının buğulanmasına neden olduğunu ispat etmiştir. Marie Curie , yalnızca belirli elementlerin bu enerji ışınlarını yayımladığını keşfetmiştir. Bu davranışa radyoaktivite adını vermiştir.

Alfa ışınları (alfa parçacıkları) ve beta ışınları (beta parçacıkları) 1899'da Ernest Rutherford tarafından bazı deneylerle ayırt edilmiştir. Rutherford radyoaktif kaynağı kullanması sonucu kaynağın neden olduğu ışınların aynı malzeme içerisinde farklı oranda giricilik özelliklerene sahip olduğunu belirlemiştir. Rutherford'un alfa ışınları olarak adlandırdığı tür düşük giriciliğe (kağıt tarafından durdurulmuştu) ve pozitif bir yüke sahip olduğunu belirtmiştir. Beta parçacıkları ise daha nüfuz edici (filmi kağıttan geçirebiliyordu ama metalden geçemiyordu) ve negatif bir yüke sahip olduğunu belirtmiştir. Bu, Becquerel tarafından uranyum tuzlarından ilk kez tespit edilen radyasyondur. 1900 yılında Fransız bilim adamı Paul Villard radyumdan gelen nötr yüklü ve yüksek nüfuz edici radyasyon türü keşfetmiştir. Villard bu radyasyon türünü ifade ettikten sonra, Rutherford 1903'te üçüncü bir radyasyon çeşidinin varlığından söz etmiştir (Jeans, 1947).

Henri Becquerel, beta ışınlarının aslında hızlı elektronlar olduğunu ispatlamıştır. Rutherford ve Thomas Royds 1909'da alfa ışınlarının aslında iyonlaşmış helyumdan ibaret olduğunu kanıtlamışlardır. Gama ışınlarının aslında X-ışınlarına benzediğini ancak daha kısa dalga boylarına sahip olduklarını Rutherford ve Edward Andrade 1914'te kanıtlamıştır.

Uzaydan yayımlanarak Dünya'ya ulaşan kozmik ışın radyasyonların 1912'de bilim adamı Victor Hess'in serbest bir balon uçuşunda çeşitli irtifalara bir elektrometre taşınmasıyla kesin olarak var olduğu kanıtlanmıştır. Bu tür radyasyonların yapısı ve özellikleri yavaş yavaş anlaşılabilmiştir.

1932'de James Chadwick nötronu dolayısı ile nötron radyasyonunu keşfetmiştir.



Pozitronlar, müonlar ve pionlar gibi bir dizi başka yüksek enerjili parçacıklı radyasyon, bir süre sonra kozmik ışın reaksiyonlarının bulut odası incelemesi ile keşfedilmiştir. Bundan sonra ise yirminci yüzyılın son yarısı boyunca diğer parçacık radyasyon türleride yapay olarak parçacık hızlandırıcılarda üretilmiştir.

### 2.1.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Günümüzde, radyasyon insanların yaşam kalitelerine fayda sağlasa da radyasyona maruz kalmanın olumsuz sağlık etkilerini önlemek için özen gösterilmelidir. Buna göre radyasyon kullanımı, maruz kalma seviyesini tahmin etmek için bir indeks olan 'radyasyon dozu' referans alınarak kontrol edilir. "Yapay" radyasyona ek olarak, insanlar ya Dünya'dan ya da uzaydan gelen "doğal" radyasyona maruz kalırlar. 1955 yılında kuruluşundan bu yana, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), küresel ve bölgesel radyasyon maruziyetini takip etmekte ve değerlendirmektedir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları UNSCEAR raporlarında özetlenmiştir. Son UNSCEAR 2008 raporu, bireysel yıllık ortalama dozlar ve çeşitli kaynaklardan gelen radyasyon aralıkları hakkında veri sağlamaktadır. Doğal radyasyon kaynakları, dış ve iç maruziyetlere neden olan kozmik radyasyon ve karasal radyasyonu içerir. UNSCEAR 2008 raporu doğal radyasyon kaynakları olarak, dış karasal (yani karasal gama ışınları), kozmik, radyasyon soluma ve radyasyon yutmayı dikkate alır.

**Karasal radyasyona maruz kalma :** Yerkabuğunun bileşimi, önemli bir doğal radyasyon kaynağıdır. Ana katkıda bulunanlar, doğal bozunma sürecinde az miktarda iyonlaştırıcı radyasyon salan doğal uranyum, potasyum ve toryum yataklarıdır. Uranyum ve toryum her yerde bulunurlar. Bu minerallerin izleri yapı malzemelerinde de bulunur, bu nedenle doğal radyasyona maruz kalma hem iç mekanlarda hem de dış mekanlarda meydana gelebilir.

**Kozmik radyasyona maruz kalma:** Dünyanın dış atmosferi sürekli olarak kozmik radyasyon tarafından bombalanır. Genellikle kozmik radyasyon, uzayda var olan ve evrendeki güneş ve diğer göksel olaylar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan kaynaklanan hızlı hareket eden parçacıklardan oluşur. Kozmik ışınlar çoğunlukla protonlardır, ancak diğer parçacıklar veya dalga enerjisi olabilir. Bazı iyonlaştırıcı

radasyonlar dünya atmosferine nüfuz eder ve insanlar tarafından emilir, bu da doğal radyasyona maruz kalmaya neden olur.

**Solunum yoluyla maruz kalma:** Doğal radyasyona maruz kalmadaki varyasyonların çoğu, toprakta ve ana kayada bulunan radyoaktif mineraller tarafından üretilen radyoaktif gazların solunmasından kaynaklanır. Radon, uranyum-238'in bozunmasıyla üretilen kokusuz ve renksiz bir radyoaktif gazdır. İnert bir gazdır, yani çevreleyen madde ile reaksiyona girmez. Radon reaksiyona girmediği için yerden kolayca yükselebilir ve atmosfere karışabilir. Toron, toryum tarafından üretilen radyoaktif bir gazdır. Radon ve toron seviyeleri, toprak ve ana kayanın bileşimine bağlı olarak konuma göre önemli ölçüde değişir. Havaya salındıktan sonra, bu gazlar normalde atmosferde zararsız seviyelere inerler, ancak bazen bina içinde sıkışıp birikerek bina sakinleri tarafından solunurlar. Ortalama olarak, doğal radyasyona maruz kalmanın en büyük kaynağıdır.

**Yutma yoluyla maruz kalma:** Eser miktarda radyoaktif mineraller doğal olarak yiyecek ve içme sularının içeriğinde bulunur. Örneğin, sebzeler tipik olarak radyoaktif mineraller içeren toprakta ve yer altı sularında yetiştirilir. Yutulduktan sonra bu mineraller, doğal radyasyona dahili maruz kalmaya neden olur.

Potasyum-40 ve karbon-14 gibi doğal olarak oluşan radyoaktif izotoplar, radyoaktif olmayan izotoplarıyla aynı kimyasal ve biyolojik özelliklere sahiptir. Bu radyoaktif ve radyoaktif olmayan elementler vücudumuzda kullanılır. Dolayısı ile doğal radyoizotoplar bizi sürekli olarak radyasyona maruz bırakır. Aşağıdaki Tablo 2.1, yaklaşık 500 gram farklı gıda ürününde bulunan potasyum-40'tan kaynaklanan radyoaktivite miktarını tanımlar. Becquerel, saniyede bir bozunmaya eşit bir radyoaktivite birimidir.

Tablo 2. 1. Yiyeceklerdeki 500 gram başına potasyum-40 içeriği (Brodsky, 1978)

| Gıda          | Becquerel |
|---------------|-----------|
| Et            | 56        |
| Havuç         | 63        |
| Beyaz Patates | 63        |
| Muz           | 65        |

İnsan vücudu ayrıca birkaç radyoaktif izotop içerir. Aşağıdaki Tablo 2.2 vücutta doğal olarak bulunan bazı izotopların bir listesini içermektedir.

Tablo 2. 2. Bazı radyonüklidlerin Bq cinsinden radyoaktiviteleri (Brodsky, 1978)

| İzotop      | Radyoaktivite |
|-------------|---------------|
| Uranyum     | 2,3           |
| Toryum      | 0,21          |
| Potasyum-40 | 4,000         |
| Radyum-266  | 1,1           |
| Karbon-14   | 3,700         |

Genel olarak, kozmik radyasyon yükseklik ve manyetik enlem ile artmaktadır. Karasal radyasyon, konuma bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Bu, karasal radyasyona maruz kalmanın topraktaki ve diğer ortamdaki radyonüklid içeriğine ve aynı zamanda insan faaliyetlerine ve uygulamalarına bağlı olduğu anlamına gelir. Özellikle evin yapı malzemesi, tasarım ve havalandırma sistemleri, soluma yoluyla iç maruz kalmaya önemli ölçüde katkıda bulunabilen radon, toron ve bunların bozunma ürünlerinin iç mekan seviyelerini güçlü bir şekilde etkiler. Doğal olarak oluşan bir dizi radyonüklid, vücutta dış ve iç maruz kalınan dozlara yol açar. Çeşitli katkıların bir özeti Tablo 2.3'te sunulmuştur (Wiley and Sons, 1988).

Tablo 2. 3. Doğal radyasyondan elde edilen ortalama yıllık etkin doz

| Maruz kalma bileşeni                                  | Yıllık etkin doz (mSv) |
|-------------------------------------------------------|------------------------|
| Kozmik ışınlar                                        | 0,38                   |
| Kozmojenik radyonüklidler                             | 0,01                   |
| Karasal radyasyon: harici maruz kalma                 | 0,46                   |
| Karasal radyasyon: radonsuz dahili maruz kalma        | 0,23                   |
| <b>Karasal radyasyon: Radondan dahili maruz kalma</b> |                        |
| Rn-222'nin solunması                                  | 1,2                    |
| Rn-220'nin solunması                                  | 0,07                   |
| Rn-222'nin yutulması                                  | 0,005                  |
| Toplam                                                | 2,4                    |

Doğal radyasyon kaynaklarından dünya nüfusuna göre yıllık ortalama dozun 2,4 mSv olduğu tahmin edilmektedir. Bunun üçte biri dış maruz kalma ve üçte ikisi iç maruz kalmadır. Yıllık eşdeğer dozun (1,3 mSv) en yüksek bileşeni, radonun solunması ve kısa ömürlü bozunma ürünlerinden gelmektedir. Kozmik radyasyon ve karasal kaynaklar arasında yaklaşık olarak eşit olarak bölünen harici radyasyon dozu (0,85 mSv) da önemlidir. Geri kalan doz,  $^{40}\text{K}$ 'un yutulmasından,  $^{220}\text{Rn}$ 'nin solunmasından ve toprakta bulunan radyonüklidler kaynaklıdır.

### 2.1.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

**Atmosferik test :** İkinci Dünya Savaşı'nın sonundan 1980'in sonlarına kadar atom silahlarının atmosferik testleri havaya serpinti adı verilen radyoaktif madde salmıştır. Radyoaktif serpinti yere çöktükçe bunların çoğunluğu çevreyi olumsuz etkilemiştir. Oluşan serpintilerin çoğunun yarı ömrü kısa olduğundan çevrede artık bulunmamaktadır. Ancak bazıları bugüne kadar bozunmaya devam etmektedir. İnsanlar ve çevre her yıl söz konusu serpintiden giderek daha küçük dozlara maruz kalmaktadır.

**Tıbbi kaynaklar :** Radyasyonun tıpta birçok kullanım alanı vardır. En iyi bilinen kullanım alanı, kırık kemikleri tespit etmek ve hastalıkları teşhis etmek için radyasyon barındıran X-ışını cihazlarıdır. Başka bir örnek, kanser gibi hastalıkları teşhis ve tedavi etmek için radyoaktif izotopları kullanan nükleer tıptır. Nükleer tıbbın bu uygulamaları insan sağlığı için son derece önemli bir yer teşkil etmektedir. Röntgen, CT taraması, nükleer tıp ve izotop üreten bir parçacık hızlandırıcısı dahil olmak üzere tıbbi radyasyon kaynaklarının örneklerini Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Nükleer tıp uygulamaları için bir örnek (<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/sources/nat-bg-sources.html>)

**Endüstriyel Kaynaklar :** Radyasyona neden olan ışınlımların, yol inşaatında kullanılan nükleer içerikli göstergelerden, fabrikalardaki borulardaki malzeme akışını ölçen yoğunluk ölçerlere kadar çok farklı türde endüstriyel kullanımları vardır. Ayrıca duman dedektörlerinde ve bazı karanlıkta parlayarak yön gösteren çıkış işaretlerinde ve petrol çıkartılan bölgelerdeki rezervleri tahmin etmek için kullanılır. Radyasyon ayrıca büyük, ağır korumalı ışınlayıcıların kullanıldığı sterilizasyon için de kullanılır. Şekil 2.2, nükleer göstergeler, bir duman detektörü ve karanlıkta parlayan çıkış levhası gibi endüstriyel radyasyon kaynaklarının örneklerini göstermektedir.



Şekil 2.2. Radyasyon barındıran bazı endüstriyel kaynakların gösterimi (<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>)

**Nükleer yakıt döngüsü :** Nükleer enerji santralleri, buhar üreten bir zincirleme reaksiyonu yürütmek için uranyum kullanır ve bu da türbinleri elektrik üretmeye yönlendirir. Nükleer enerji santralleri, normal aktivitelerinin bir parçası olarak, insanları düşük dozda radyasyona maruz bırakabilen, düzenlenmiş seviyelerde radyoaktif madde salabilmektedir. Benzer şekilde, uranyum madenleri, yakıt fabrikasyon tesisleri ve radyoaktif atık tesisleri, halkın radyasyon dozuna katkıda bulunan bir miktar radyoaktivite salar. Şekil 2.3, uranyum madenciliği, yakıt çubukları ve bir nükleer enerji santrali dahil olmak üzere nükleer yakıt döngüsünün örneklerini göstermektedir.



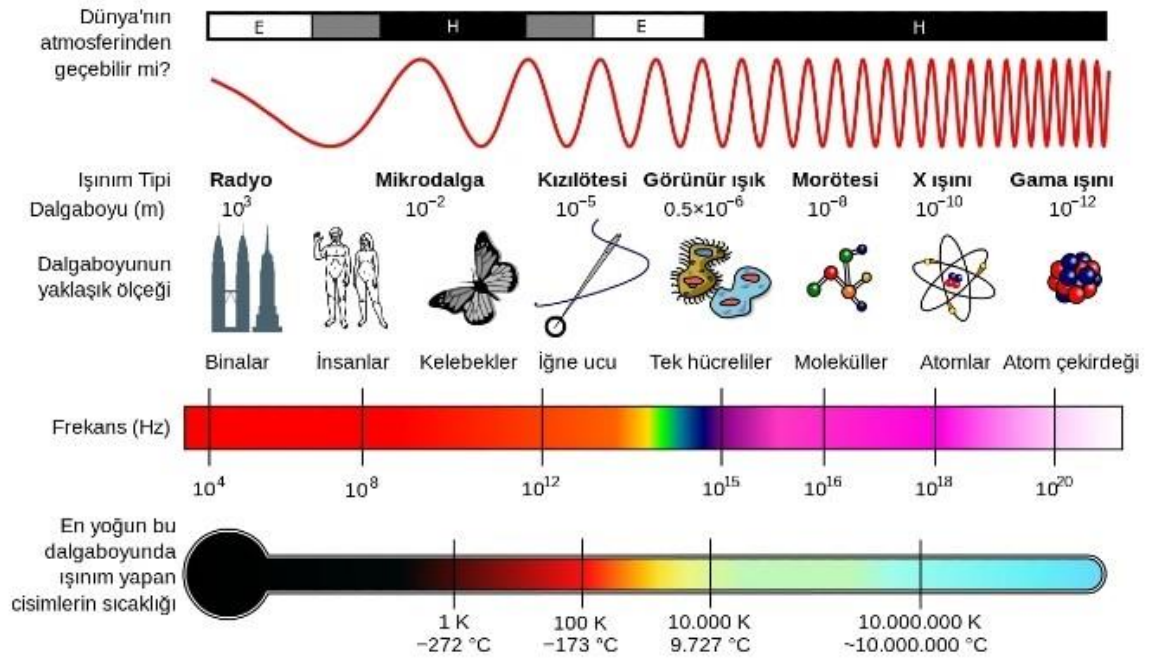
Şekil 2.3. Radyasyon barındıran bazı nükleer yakıt çevrimi elemanlarının gösterimi

Normalde güneş, toprak veya kayalar gibi doğal kaynaklardan gelen iyonlaştırıcı radyasyonu değiştirmek veya azaltmak için yapabileceğimiz çok az şey vardır. Bu tür maruz kalma, hiçbir zaman tamamen risksiz olmasa da, genellikle oldukça düşüktür. Ancak bazı durumlarda, evdeki radon gazı gibi doğal radyoaktivite kaynakları kabul edilemeyecek kadar yüksek olabilir ve azaltılması gerekebilir.

Yapay kaynaklardan ve faaliyetlerden gelen iyonlaştırıcı radyasyon daha dikkatli kontrol edilir. Bu ortamlarda radyasyonun topluma sağladığı yararlar ile insanlara ve çevreye getirdiği riskler arasında bir denge kurulur. Hem çalışanların hem de halkın radyasyon maruziyetini kısıtlamak için doz limitleri belirlenir. Lisans sahiplerinin tüm radyasyon dozlarını sosyal ve ekonomik faktörleri dikkate alarak mümkün olan en düşük seviyede tutmaları gerekmektedir. Ayrıca, radyasyon kullanımının net bir faydası olmalıdır. Örneğin, duman dedektörlerinde radyoaktif izotoplara izin verilir, çünkü duman dedektörleri hayat kurtarır.

## 2.2. Radyasyon Türleri

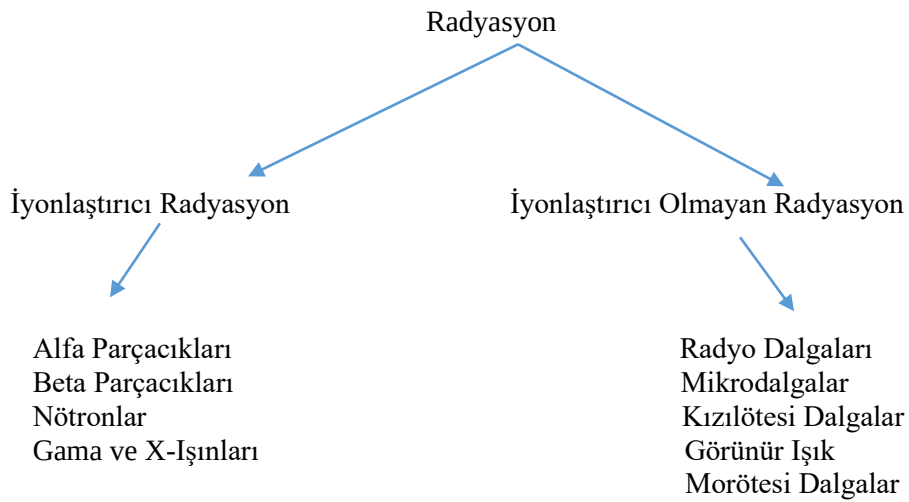
Radyasyon, radyoaktif kaynaktan yayımlanan parçacıkların enerjisine bağlı olarak genellikle iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon şeklinde iki sınıfa ayrılabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, atomları ve molekülleri iyonlaştıran ve kimyasal bağları kırmak için gerekli olan 10 eV'dan fazla enerji taşımaktadır. Bu enerji miktarı canlı organizmalara zarar verebilecek düzeydedir. İyonlaştırıcı radyasyon kaynağı, sırasıyla helyum çekirdekleri, elektronlar veya pozitronlar,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $x$ ,  $\gamma$  veya nötron radyasyonu yayan kaynaklardır. X-ışınları tıbbi radyografi incelemelerinden ve birincil kozmik ışınların dünya atmosferi ile etkileşime girmesinden sonra üretilen ikincil kozmik ışınlarını oluşturan müonlar, mezonlar, pozitronlar, nötronlar ve diğer parçacıklardan elde edilir. Şekil 2.4'te elektromanyetik spektrum gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonu gösteren elektromanyetik spektrum

İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2. 4. Radyasyon türleri



### 2.2.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir atom veya molekülden bir elektronu tamamen

çıkarmak için yeterli enerjiyi barındırmayan her çeşit elektromanyetik radyasyonu ifade eder (Moulder, 2014).

İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyon, maddeden geçerken yüklü iyonlar üretmez. Burada yalnızca uyarılma, titreme veya öteleme için yeterli enerjiye sahip olan radyasyon söz konusudur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon canlılar için önemli bir sağlık riski oluşturmaz. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon , iyonlaştırıcı radyasyona göre daha düşük bir frekansa, dolayısıyla daha uzun dalga boyuna sahiptir.

İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon arasındaki ayrım çizgisi, elektromanyetik spektrumun morötesi kısmında bulunur (yukarıdaki Tablo 2.4'te elektromanyetik spektrum şeklinde gösterilmiştir). Morötesi bandındaki ve daha düşük enerjilerdeki (ultraviyolenin solundaki) radyasyona iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, ultraviyole bandının sağındaki daha yüksek enerjilerdeki radyasyona ise iyonlaştırıcı radyasyon denir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon elektronları atomlardan ve moleküllerden uzaklaştırmak için yeterli enerjiye sahip değildir. Bu radyasyon çeşidi maddeleri ısı transferi yapabilir.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon , çevremizde birçok kaynakta bulunur. Şekil 2.4'te belirtilen elektromanyetik spektrum incelediğinde iyonlaştırıcı olmayan radyasyon 5 farklı türe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Birçok yayın ve iletişim uygulamasında kullanılan radyo frekansı (RF) radyasyonu
- Ev mutfağında kullanılan mikrodalgalar
- Isı lambalarında kullanılan kızılötesi radyasyon
- Görünür bölge
- Güneşten gelen ultraviyole (UV) radyasyon

Elektromanyetik spekturumunda yer alan iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyona neden olan bileşenlerin dalga boyu, frekans ve enerjilerini gösteren veriler Tablo 2.5'te verilmiştir.



Tablo 2. 5. Elektromanyetik spektrumdaki bileşenlerin dalga boyuna, frekans ve enerjisine göre değişimi

| İsim             | Dalga boyu      | Frekans (Hz)      | Foton enerjisi ( eV ) |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| Gama ışını       | < 0,03 nm       | > 30 Hz           | > 124 keV             |
| X-ışını          | 0,01 nm – 10 nm | 30 EHz – 30 P Hz  | 124 keV – 124 eV      |
| ultraviyole      | 10 nm – 400 nm  | 30 PHz – 750 THz  | 124 eV – 3 eV         |
| Görülebilir ışık | 400 nm – 750 nm | 750 THz – 400 THz | 3 eV – 1,7 eV         |
| Kızılötesi       | 750 nm – 1 mm   | 400 THz – 300 GHz | 1,7 eV – 1,24 meV     |
| Mikrodalga       | 1 mm – 1 m      | 300 GHz – 300 MHz | 1,24 meV – 1,24 µeV   |
| Radyo            | ≥ 1 m           | ≤ 300 MHz         | ≤ 1,24 µeV            |

**Radyo dalgaları :** Radyo dalgaları elektromanyetik spektrumun en uzun dalgaboyuna sahiptir. Bir futbol sahası uzunluğundan daha uzun olacağı gibi bir golf topu ölçüsünde de olabilmektedir. Radyo, TV ve cep telefonu gibi iletişim araçlarının sinyallerini kapsamaktadır.

**Mikro dalgalar :** Mikrodalgalar cm seviyesinde dalga boylarına sahiptir. Bu tip radyasyona neden olan dalgalar, maddeleri teşkil eden atom ve moleküllerde titreşim hareketi yaparak ısı enerjisinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da mikrodalgaya maruz kalan maddelerin ısınmasını sağlamaktadır. Mikrodalgalar, gönderilen sinyalleri bir yerden başka bir yere yönlendirmek için oldukça iyi bir taşıyıcı görevi yapmaktadırlar.

Mikrodalga teknolojisi, noktadan noktaya telekomünikasyon amaçlı çok fazla kullanılmaktadır. Mikrodalgaların sahip oldukları kısa dalga boyları sayesinde, taşınabilir cihazların antenlerinin çok kısa olmasına olanak vermektedir. Bu nedenle mikrodalga frekansları, cep telefonları, telsiz telefonlar ve kablosuz LAN (Wi-Fi) erişimi gibi Ayrıca mikrodalgalar, radyo dalgalarına göre daha kısa boylu ışınlarla daha kolay odaklanırlar. Yine bu dalgalar, yaklaşık boyları birkaç cm'yi geçemeyen dalgalarla bildiğimiz radar sistemleri yapısında kullanılmaktadır.

**Kızıl ötesi dalgalar :** Kızılötesi dalgalar (IR) görünür ışıktan daha uzun dalga boylarına sahip olan elektromanyetik radyasyon (EMR) çeşitidir. Özel olarak yapılmış darbeli lazerlerden 1050 nanometreye (nm) kadar olan dalga boylarının IR'si belirli koşullar

altında insanlar tarafından görülebilse de, insan gözü tarafından genelde algılanamaz. Kızılötesi ışık, görünür spektrumun önerilen kırmızı kenarından 700 nanometreden 1 milimetreye kadar uzanır. Oda sıcaklığı veya buna yakın objeler tarafından yayılan termal radyasyonun çoğu IR dalgalarından oluşmaktadır. Bütün elektromanyetik radyasyonlarda olduğu gibi IR'de ısıma enerjisi taşır ve fotona benzer şekilde hareket eder. IR dalgaları, ısıyı tetikleme özelliğine sahiptir.

Bazen kızılötesi ışınlar, kızılötesi ısıtıcılar gibi ısı üretiminin gerekli olduğu uygulamalarda veya bir hastanın fizik tedaviye ihtiyaç duyduğu terapötik amaçlar için kullanılır. Yakın kızılötesi ışınlar, TV uzaktan kumanda sensörleri ve fotoğrafçılık gibi elektronik uygulamalarda kullanılır. Dalga boyu aralıkları yakın olduğu için uygulamaları görünür ışık uygulamalarına benzer olabilir. Uzak kızılötesi ışınlar daha termaldir. Isı üreten herhangi bir şey uzak kızılötesi radyasyon yayar. 37°C'deki insan vücudu bile yaklaşık 800 nm dalga boyunda kızılötesi radyasyon yayar.

**Görünür ışık dalgaları :** Işık dalgaları, elektrik ve manyetik alanların titreşimlerinin sonucudur ve bu nedenle bir elektromanyetik (EM) radyasyon biçimidir. Görünür ışık, birçok EM radyasyon türünden yalnızca biridir ve genel elektromanyetik spektrumun çok küçük bir alanını kaplar, ancak ışığı gözlerimizle görebildiğimiz için bizim için özel bir önemi vardır.

Görünür ışık dalgaları, yaklaşık 400 ila 700 nanometre (4,000 ila 7,000 Å) arasında dalga boylarına sahiptir. Gözlerimiz, ışığın farklı dalga boylarını gökkuşağı renk tonları olarak algılar. Kırmızı ışık, yaklaşık 700 nm uzunluğunda nispeten uzun dalga boyuna sahiptir. Mavi ve mor ışığın ise 400 nm civarında dalga boyuna sahiptirler. Daha kısa dalga boyuna sahip olanlar daha yüksek frekanslarda titreşir ve daha yüksek enerjilere sahiptir. Kırmızı ışığın frekansı 430 THz civarındayken, mavinin frekansı 750 terahertz'e yakındır. Kırmızı renge sahip ışık fotonları yaklaşık olarak 1,8 elektron volt (eV) enerji taşımaktadır. Mavi renge sahip mavi ışık foton ise yaklaşık olarak 3,1 eV enerji taşımaktadır.

Görünür ışığın EM spektrumundaki komşuları, bir tarafta kızılötesi radyasyon ve diğer tarafta ultraviyole radyasyondur. Kızılötesi radyasyon, kırmızı ışıktan daha uzun

dalgalara sahiptir ve bu nedenle daha düşük bir frekansta salınır ve daha az enerji taşır. Ultraviyole radyasyon mavi veya mor ışıktan daha kısa dalgalara sahiptir ve bu nedenle daha hızlı salınır ve foton başına görünür ışıktan daha fazla enerji taşımaktadır.

**Mor ötesi dalgalar :** Morötesi dalgalar ya da diğer adıyla ultraviyole (UV) "ışık" bir elektromanyetik radyasyon türüdür. Görünür ışıkla karşılaştırıldığında daha kısa bir dalga boyuna sahiptir. Mor ışık olarakta bilinir ve diğer ışık renklerinden daha kısa dalga boylarına sahiptir. Ultraviyole radyasyon, elektromanyetik spektrum boyunca görünür ışık ve X-ışınları arasında yer alır. UV ışığı, yaklaşık 10 ila 400 nanometre arasındaki bir dalga boyu aralığını kapsar. Ultraviyole radyasyon yaklaşık 800 THz ile 30.000 THz arasındaki frekanslara sahiptirler. Dünya atmosferi , uzaydan gelen UV radyasyonunun çoğunun yere ulaşmasını engeller.

### 2.2.2. İyonlaştırıcı Radyasyon

"İyonize" kelimesi, nispeten enerjisi yüksek olan elektromanyetik (EMR) dalgaların neden olduğu bir olaydır. Bir başka deyişle elektronun atomdan kopmasını ifade etmektedir. Yüksek enerji barındıran EMR dalgaları spektrumun iyonlaştırıcı kısmını oluşturmaktadır. X-ışınları, gama ışınları gibi yüksek enerjili EMR dalgaları bu tip radyasyona örnektir.

Yeterince yüksek enerjili radyasyon atomlarını iyonize edebilmektedir. İyonizasyon, bir elektronun atomun bir elektron tabakasından kurtulduğunda meydana gelir ve bu da atomun net bir pozitif yüke sahip olmasını sağlamaktadır.

10 elektron voltun (eV) üzerinde olan fotonlar ve parçacıklar iyonlaştırıcı özelliğe sahiptir. Herhangi bir radyoaktif malzeme veya nükleer süreç nedeni ile ortaya çıkan parçacık radyasyonu, iyonlaşmaya yetecek kadar yüksek enerji taşımaktadır. Bu tip radyasyonun günümüzde nükleer teknoloji uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak doğru şekilde kullanılmadığında canlılar için tehlikeli olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon türüne göre 5'e ayrılmaktadır. Bunlar X-ışınları radyasyonu, alfa parçacık radyasyonu, beta parçacık radyasyonu, gama ışını radyasyonu ve nötron radyasyonudur.

### 2.2.2.1. X-Işınları

X-ışınları bir elektromanyetik radyasyon (EMR) biçimidir. Temel fiziksel özellikleri, elektromanyetik spektrumun daha bilinen bileşenleri olan görünür ışık, kızılötesi radyasyon ve ultraviyole radyasyon ile aynıdır. Işık hızında hareket ederler. X-ışınları diğer EMR çeşitleri gibi dalga ve parçacık özelliğine sahiptir. Bu ikili doğa, tüm radyasyon ve madde biçimlerinin bir özelliğidir ve kuantum mekaniği teorisi tarafından kapsamlı bir şekilde tanımlanmaktadır.

X-ışınları, dalga boyu yaklaşık olarak  $10^{-9}$  m'den düşük olan, frekansı yine yaklaşık olarak  $3 \times 10^{17}$  Hz, yaklaşık olarak enerjisi 1,240 eV'den büyük olan elektromanyetik dalgalardır. Bir X-ışını fotonu, bir atomla çarpıştığı zaman, atom fotonun enerjisini soğurabilir veya atomun elektronunu daha yüksek yörünge seviyesine yükseltebilir ya da foton çok fazla enerjiye sahipse, atomdan bir elektronu kopararak iyonlaşmış atoma neden olabilir.

Yüksek atom numarasına sahip elementlerin atomlarının yörünge elektronları arasında daha büyük enerji farkı mevcuttur. Bu nedenle atomun bir X-ışını fotonunu soğurma olasılığı daha yüksektir. Bu ışınların malzemelere nüfuz etme kabiliyetleri, atomik ölçüdeki dalga boyları, X-ışını fotonlarının barındırdığı yüksek enerjisi sayesinde endüstriyel, tıbbi ve bilimsel uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. En basit moleküllerin etkileşimlerinin incelenmesinden, insan beyninin yapısına kadar birçok alan için özel X-ışını kaynakları, dedektörler ve analiz teknikleri geliştirilmiştir.

### 2.2.2.2. Alfa Radyasyonu

İki proton ve iki nötrona sahip olan helyum çekirdeği aslında alfa radyasyonu olarak bilinen alfa parçacıklarıdır. Sahip olduğu elektriksel yükler ve kütleleri nedeniyle madde ile etkileşime girerler. Radyoaktif bozunmadaki üretim mekanizmaları nedeniyle, alfa parçacıkları genellikle yaklaşık 5 MeV'lik bir kinetik enerjiye ve ışık hızının %4'ü civarında bir hıza sahiptir. Bunlar, parçacık radyasyonunun oldukça iyonlaştırıcı bir formudur ve genellikle düşük nüfuz etme derinliğine sahiptirler.

Bununla birlikte, fisyonlardan gelen daha uzun menzilli alfa parçacıkları, yaklaşık olarak üç kat daha yüksek enerjiye sahip olmakla beraber daha derine nüfuz edebilirler. Kozmik ışınlarda ise durum farklıdır. Helyum çekirdekleri kozmik ışınların %10-12'sini oluşturur ve nükleer süreçler sonunda ortaya çıkan alfa parçacıklarından daha yüksek enerjiye sahiptirler. Dolayısı ile nüfuz etme derinlikleri yüksektir. Bu nedenle canlı sağlığı için çok daha tehlikelidir.

Yüksek enerjili alfa parçacıkları, vücuda ve hatta ince metal plakalara nüfuz edebilir. Yüksek derecede nüfuz etme derinliğine sahip alfa parçacıklarına örnek olarak, radyum, radon ve polonyum izotopları verilebilir (Beiser 2003). Alfa bozunmasında yayılan alfa parçacığının enerjisi, emisyon sürecinin yarı ömrüne kısmen bağlıdır. Çoğu alfa parçacığı 3 ila 7 MeV arasında enerjiye sahiptir. 5 MeV'lik tipik bir kinetik enerji ile yayılan alfa parçacıklarının hızı, ışık hızının %5'i olan 15.000 km/s'dir. Bu enerji, tek bir parçacık için önemli miktarda enerjidir, ancak yüksek kütleleri nedeni ile, alfa parçacıklarının diğer yaygın radyasyon türlerinden, daha düşük bir hızla sahip olduğu anlamına gelir. Yükleri ve büyük kütleleri nedeniyle, alfa parçacıkları malzemeler tarafından kolayca soğurulur ve havada yalnızca birkaç santimetre hareket edebilirler. Kağıt mendil veya insan derisinin dış katmanları tarafından emilebilirler. Yaklaşık 40 mikrometre kalınlığındaki deriye nüfuz edebilirler (Christensen, 2014).

Alfa bozunmasından sorumlu olan temel etkileşimler, elektromanyetik kuvvet ile nükleer kuvvet arasındaki dengedir. Alfa bozunması, her ikisi de pozitif elektrik yüküne sahip olan ancak nükleer kuvvet tarafından kontrol altında tutulan, alfa parçacığı ile çekirdeğin geri kalanı arasındaki Coulomb itmesinden kaynaklanır. Klasik fizikte, alfa parçacıkları potansiyel kuyusundan kaçmak için yeterli enerjiye sahip değildir (Krane, 1988).

Bununla birlikte, kuantum tünelleme etkisi, alfaların nükleer kuvvetin üstesinden gelmek için yeterli enerjiye sahip olmasalar bile kaçmalarına izin verir. Bu, alfa parçacığının zamanının bir kısmını çekirdekten uzaktaki bir bölgede geçirmesine izin veren maddenin dalga doğası tarafından sağlanır ki itici elektromanyetik kuvvetten gelen potansiyel, nükleer kuvvetin çekiciliğini tamamen telafi eder. Bu noktadan alfa parçacıkları kaçabilir (Krane, 1988).

### 2.2.2.3. Beta Radyasyonu

Beta bozunması ya da beta radyasyonu, bir beta parçacığının (hızlı enerjik elektron veya pozitron) bir atom çekirdeğinden yayıldığı ve ilk durumdaki çekirdeği aynı çekirdeğin bir izobarına dönüştüğü radyoaktif bozunmadır. Örneğin, bir beta bozunması olayı, bir antinötrinin eşlik ettiği ve bir elektronun serbest kalması ile nötronu protona dönüştürebilir. Diğer bir durumda, pozitron emisyonudur. Beta parçacığı ve onunla ilişkili antinötrino, beta bozunması gerçekleşmeden önce çekirdek içerisinde yer almaz. Beta bozunması ile, kararsız durumdaki atomlar daha kararlı olan bir proton-nötron oranı elde ederler (Konya ve Nagy, 2012).

Nükleonlar, yukarı kuarklardan ve aşağı kuarklardan oluşur ve zayıf kuvvet, bir kuarkın, bir elektron/antinötrino veya pozitron/nötrino çiftinin meydana gelmesini sağlayan bir W bozonu emisyonu ile gerçekleşir (Bijker ve Santapinto, 2015). Örneğin, iki aşağı ve bir yukarı kuarktan oluşan bir nötron, bir aşağı ve iki yukarı kuarktan oluşan bir protona bozunur.

Bunun dışında çekirdeğin atomun yörünge elektronlarından birini yakalaması sonucu oluşan elektron yakalama olayı olarak bilinen bir olay daha vardır. Kararsızlık proton sayısının nötron sayısından fazla olmasından kaynaklı ise ana çekirdek yörünge elektronlarından birini yakalar ve bir nötrino yayınlanır. Bu olaya da elektron yakalama denir. Bu üç olay aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Basdevant vd, 2005).

- $\beta^-$  bozunması veya elektron yayınımlı  

$${}_Z X^A \longrightarrow {}_{Z+1} Y^A + e^- + \bar{\nu}^-$$
- $\beta^+$  bozunması veya pozitron yayınımlı  

$${}_Z X^A \longrightarrow {}_{Z-1} Y^A + \beta^+ + \bar{\nu}^-$$
- Elektron Yakalanması  

$${}_Z X^A + e^- \longrightarrow {}_{Z-1} Y^A + \bar{\nu}^-$$

Beta radyasyonu maddeye alfa radyasyonundan fazla, ama gama radyasyonundan daha az nüfuz etmektedir. Beta radyasyonu, birkaç santimetre kalınlığıdaki plastik veya birkaç milimetre kalınlığıdaki metal ile durdurulabilir.

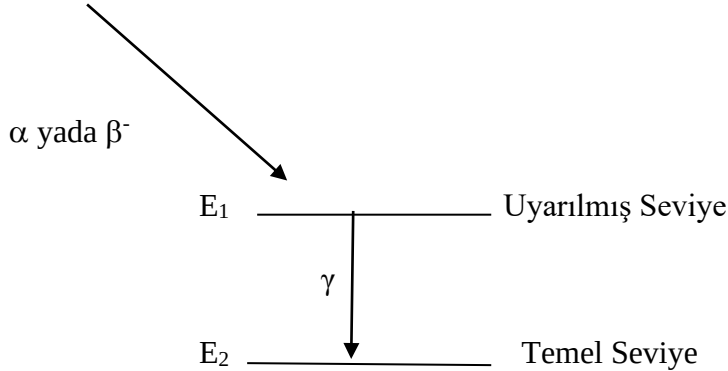
#### 2.2.2.4. Gama Radyasyonu

Gama radyasyonu olarak da bilinen bir gama ışını atom çekirdeğinin radyoaktif bozunmasından kaynaklanan nüfuz edici bir elektromanyetik (EM) radyasyon şeklidir. En kısa dalga boylu EM dalgalar arasındadır. Dalga boyları yaklaşık olarak  $10^{-10}$ cm'dir. Gama ışınları foton olarak yayımlanmaktadır. Radyoaktif bozunmadan nedeni ile oluşan gama ışınları, birkaç keV'den yaklaşık 8 MeV'e kadar enerji aralığındadır.

Dünya'dan kaynaklanan doğal gama ışınları kaynakları, çoğunlukla radyoaktif bozunmanın ve kozmik ışın parçacıklarıyla atmosferik etkileşimlerden kaynaklanan ikincil radyasyonun bir sonucudur. Bununla birlikte, çekirdek etrafındaki elektron hareketlerinden dolayı gama ışınlarına neden olan karasal gama ışını gibi doğal kaynaklar da bulunmaktadır. Önem arzeden yapay gama ışınları kaynakları, nükleer reaktörlerde meydana gelen nükleer süreçler, fisyon, füzyon gibi yüksek enerji fiziği deneylerinden kaynaklanmaktadır. Gama ışınları iyonlaştırıcı radyasyon sınıfındadır. Bu sebeble canlılar için tehlikelidir. Yüksek nüfuz edici güçleri sebebi ile kemik iliğinden iç organlara kadar zarar verebilirler. Alfa ve beta ışınlarının tersine, insan vücundan rahatlıkla geçerler. Bu sebeble, etkili bir radyasyon zırhlama gerektirir.

Herhangi bir yolla uyarılmış bir çekirdek, bozunma sonrası uyarılmış seviyede kalabilir. Uyarılmış durumdan kurtulmak için çekirdek gama ışınması yayınlamak zorunda kalabilmektedir. Şekil 2.5'te bu sürece ait bir örnek sunulmuştur.

#### Radyoaktif Ana Çekirdek



Şekil 2.5 Gama bozunması sürecine ilişkin bir örnek (Bilge, 1985)

Foton enerjisi iki enerji seviyesi arasındaki farka eşittir.

$$E_{\gamma} = E_1 - E_2 \quad (2.2)$$

#### 2.2.2.5. Nötron Radyasyonu

Nötron Sir James Chadwick tarafından 1932 yılında keşfedilmiştir. Bu keşfinden dolayı Sir James Chadwick 1935 yılında Nobel ödülü almıştır. Aslında nötronun keşfedilmeden önce birkaç bilim insanı atom çekirdeği içindeki bu parçacığa atıfta bulunmuş ancak tam olarak ne olduğunu ispat edememişlerdir. Örneğin 1920 yılında Rutherford, 1930 yılında Walter Bothe ve 1931 yılında Madam Curie nötronun varlığından söz eden ünlü bilim insanlarıdır. Ancak nötronun keşfedilmesi 1932 yılında gerçekleşmiştir.

1930'da Almanya'da Walther Bothe ve Herbert Becker, polonyumdan yayılan çok enerjik alfa parçacıklarının belirli hafif elementler, özellikle berilyum, bor veya lityum üzerine düşmesi durumunda, alışılmadık derecede nüfuz eden bir radyasyon ürettiğini bulmuştur. İlk başta bu radyasyonun bilinen tüm gama ışınlarından daha fazla nüfuz etmesine rağmen gama radyasyonu olduğu düşünülüyordu ve deneysel sonuçların ayrıntılarını bu temelde yorumlamak çok zordu. Bir sonraki önemli katkı 1932'de Irène Joliot-Curie ve Frédéric Joliot tarafından yapıldı. Bu bilinmeyen radyasyonun parafine veya hidrojen içeren herhangi bir bileşiğe düşmesi durumunda çok yüksek enerjili protonları fırlattığını gösterdiler. Bu, yeni radyasyonun varsayılan gama ışını doğasıyla kendi içinde tutarsız değildi, ancak verilerin ayrıntılı nicel analizinin böyle bir hipotezle uzlaştırılması giderek zorlaştı. Sonunda 1932'de fizikçi James Chadwick, gama ışını hipotezinin savunulamaz olduğunu gösteren bir dizi deney yapmıştır. Aslında keşfedilen yeni radyasyonun yaklaşık olarak protonun kütlesine sahip yüksüz parçacıklardan oluştuğunu öne sürdü. Bu tür yüksüz parçacıklar sonunda nötron latince nötr ve Yunanca -on eki eklenerek (elektron ve proton ismini hatırlatması amacı ile) nötron olarak isimlendirilmiştir.

Nötron, elektriksel olarak sıfır yüke sahip ve kütlesi  $939.573 \text{ MeV}/c^2$  ( $1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$  bir protondan biraz daha fazla) olan atom altı bir parçacıktır.  $1/2$  spine sahiptir. Antiparçacığına antinötron denir. Nötron, tıpkı proton gibi bir nükleondur.



Çekirdeğin dışında, serbest nötronlar kararsızdır ve ortalama ömrü  $885,7 \pm 0,8$  saniyedir (yaklaşık 15 dakika), bir elektron ve antinötrino yayarak bir protona dönüşerek bozunurlar.



Nötron, dört temel etkileşim olan elektromanyetik, zayıf nükleer, güçlü nükleer ve kütle çekimi etkileşimlerinin tümü aracılığıyla etkileşime girer. Nötronun net yükü sıfır olmasına rağmen, elektromanyetik olarak iki şekilde etkileşebilir: birincisi, nötronun manyetik momenti protonla aynı mertebededir. İkincisi, elektrik yüklü kuarklardan oluşur. Bu nedenle, elektromanyetik etkileşim, derin elastik olmayan saçılmada ve manyetik etkileşimlerde nötron için öncelikle önemlidir (Curie vd., 1932). Nötron, beta bozunması yoluyla bir proton, elektron ve antinötrinosu ile zayıf etkileşimi gerçekleştirir. Ancak kütle çekim kuvveti o kadar zayıftır ki çoğu parçacık fiziği deneyinde ihmal edilebilir.

Nötronlar için en önemli kuvvet güçlü etkileşimdir. Bu etkileşim nötronun 3 kuarkının (bir yukarı kuark, iki aşağı kuark) tek bir parçacık halinde bağlanmasından sorumludur. Güçlü nükleer kuvvet, çekirdeklerin bağlanmasından da sorumludur. Nötronlar maddeden geçerken nükleer kuvvet başrol oynar. Yüklü parçacıkların veya fotonların aksine, nötron atomları iyonize ederek enerji kaybedemez. Aksine, nötron, bir atom çekirdeği ile kafa kafaya çarpışma yapana kadar kontrolsüz bir şekilde yoluna devam eder. Bu nedenle nötron radyasyonu son derece nüfuz edici ve tehlikelidir (Greene, 1986).

Çoğu atomun çekirdeği (yalnızca tek bir protondan oluşan hidrojen hariç) proton ve nötronlardan oluşur. Nötron sayısı bir elementin izotopunu belirler. Örneğin, karbon-12 izotopunun 6 protonu ve 6 nötronu varken, karbon-14 izotopunun 6 protonu ve 8 nötronu vardır. İzotoplar, atom numaraları aynı kütle numaraları farklı olan elementlerdir. Bir nötron, baryon olarak sınıflandırılır ve iki aşağı bir yukarı kuarktan oluşur (Ji, 1995).

Nötronun nasıl bir parçacık olduğunu anlayabilmek için bilinmesi gereken temel özellikleri vardır. Bunlardan en önemli özelliklerden biri nötronun ortalama yaşam

ömrüdür. Serbest haldeki bir nötronun yaşam ömrü ortalama 10-11 dakika civarındadır. Burada bir nötron bir proton ve antinötrinoya dönüşür. Güneş sistemimizden yayılan diğer radyasyon türleri ile nötronlar karşılaştırıldığında ise birincil nötronların azlığı görülmektedir. Güneş sisteminden yayılan ve dünya çevresine ulaşan nötronlar madde ile etkileşime girer. Bu etkileşim ikincil nötronların oluşmasına ve sayılarının hızlı bir şekilde artmasına olanak sağlar. Bu olay için örnek vermek gerekirse uzay araçlarında radyasyondan korunmak için birçok zırh malzemesi radyasyon kalkını olarak kullanılmaktadır. Bu yapısal zırh malzemesindeki yüklü parçacıklar birincil nötronları yavaşlatmakta, ikincil nötronların oluşmasına neden olmaktadır. Nötronlar yüksüz oldukları için de etkileşimde görüntülenmeyebilirler. Ama bu nötronları nüfuz alanı oldukça yüksektir. Dolayısı ile oluşan radyasyonda toplam doz miktarına katkıları yüksektir.

Yeryüzündeki radyoaktif nötron kaynakları enerjisi 10 MeV'e kadar olan nötron üretebilir. Uzayda ise nötron enerjisi birkaç TeV mertebesine ulaşabilmektedir. Nötron enerjisinin yüksek olması sadece dozimetri için önemli değildir. Aynı zamanda yüksek enerjili nötronları canlılara ve özellikle insanda meydana getirdiği biyolojik etkiyi de anlamamıza yardımcı olur.

Nötronlar yüksüz oldukları için, nötronlar ile eksi yüklü elektronlar ya da artı yüklü protonlarla etkileşim içine girmezler. Bu özellikten faydalanarak atom çekirdeği nötronlarla bombardıman edilebilir ve maddenin çekirdeğinde bir değişim olabilir. Çekirdek, bir nötron soğurduğunda daha büyük bir kütleyle sahip olabilmektedir. Genellikle nötron soğuran bir çekirdek kararsız hale gelir ve ışıma yapabilir. Bu süreç bozunmaya neden olur. Işıma yapma olayına ise radyasyon denir. Günümüzde özellikle teknolojiye kullanılan radyo izotoplar, nötron bombardımanı yoluyla üretilmektedir. Nötronlar uranyum, plütonyum, toryum gibi ağır atomların çekirdekleriyle çarpışmalarının bir sonucu olarak fisyon olayı meydana gelmekte ve çok büyük bir nükleer enerji açığa çıkmaktadır. (Murray, 2000).

Nötronlar elektriksel yüklü olmadıklarından nükleer ve çekirdek kuvvetleri ile etkileşime girmezler. Bu nedenden dolayı çekirdeğe yaklaştıkça karşılaşmaları gereken Coulomb engelinden etkilenmezler. Yüksüz olmaları nedeni ile doğrudan madde etkileşimi olmasa

bile yüklü parçacıkların serbest kalmasına neden olabilmektedir. İkincil olarak ortaya çıkan bu parçacıklar, maddenin atomları ile tekrar etkileşime girerek iyonlaşmaya neden olabilmektedir. Dolayısı ile nötronlar yüksüz olmalarına rağmen radyasyona neden olmaktadır. Bu özelliği nedeni ile “Dolaylı Radyasyon İyonlaştırıcı” kategorisinde değerlendirilmektedir (L’Annunziata, 2003).

Nötronların madde atomları ile etkileşmesi onların çok düşük enerjilerde bile yüksek verimlilikte tespitini sağlamaktadır. Nötronları yavaşlatmak ve daha kolay tespit edebilmek için kendi kütlesine yakın olan elementler kullanılmaktadır. Meydana gelen çarpışmaların etkisi ile nötronlar enerjilerinin büyük kısmını çarpıştıkları parçacıklara aktarabilirler. Nötronlar aşağıda belirtilen enerjilere göre sınıflandırılmaktadır.

**Yüksek enerjili nötronlar:** 20 MeV üzerinde enerjiye sahip olan nötronlardır. Uzaydaki biyolojik etkisi konusunda belirsizliğin en fazla olduğu nötronlardır. **Hızlı nötronlar:** Genellikle enerjileri 0,8-20 MeV arasında olan nötronlardır. Bunlar fisyon kaynakları tarafından yayımlanır. **Yavaş nötronlar:** Genellikle enerjileri 0,5 eV ile 1 MeV arasındadır. Nötronun etkileşime girdiği çekirdek nükleer yapıya sahiptir. Bu tür nötronların atom ile etkileşime girme olasılığı yüksektir. **Epitermal nötronlar:** Enerjileri 0,025 eV ile birkaç yüz eV arasındadır. Bunlar termal ile yavaş nötronların geçiş bölgesini temsil eder. Nötron ile etkileşime giren rezonans durumlar ortaya çıkmaya başlar. Bir sonraki enerji aralığında rezonans durumlar önem arz etmektedir. **Termal nötronlar:** Enerjileri yaklaşık olarak 0,025 eV civarındadır. Atom çekirdekleri çarpışan parçacıktan daha yavaş hareket ediyorsa enerji alır veya daha hızlı hareket ediyorsa enerji kaybeder. Bu sürekli yavaşlama ve hızlanma nötron enerjisinin merkezlenmiş bir dağılıma neden olur. Büyük olasılıkla bu enerji termal enerji kabul edilir. Bazı materyallerde termal nötronların soğurulması ile gama parçacıklarının oluşumuna neden olur. Termal nötronların çekirdek etrafında çok zaman harcaması nedeni ile yakalanma olasılığı daha yüksektir (Issa vd., 2018). **Soğuk nötronlar:** Enerjileri 0,12 ile 12 meV arasındadır. **Ultra soğuk nötronlar:** Enerjisi 300 neV altında olan nötronlardır (L’Annunziata, 2003).

Nötronlar, Tablo 2.6’da gösterildiği gibi kinetik enerjilerine, hızlarına ve dalga boylarına göre sınıflandırılabilir.

Tablo 2. 6. Enerjilerine göre nötron türlerinin bazı özellikleri

| Nötronlar   | Enerji aralığı     | Dalga boyu [Å] | Hız [m/s]          |
|-------------|--------------------|----------------|--------------------|
| aşırı soğuk | $\leq 300$ neV     | $\geq 500$     | $\leq 8$           |
| çok soğuk   | 300 neV – 0,12 meV | 52,2 – 26,1    | 7,5 – 152          |
| soğuk       | 0,12 meV - 12 meV  | 26,1 – 2,6     | 152 – 1515         |
| termal      | 12 meV - 100 meV   | 2,6 – 0,9      | 1515 - 4374        |
| epitermal   | 100 meV - 1eV      | 0,9 - 0,28     | 4374 – 13,8 $10^3$ |
| orta düzey  | 1eV – 0,8 MeV      |                |                    |
| hızlı       | $> 0,8$ MeV        |                |                    |

Nötronun madde ile etkileşme ihtimali nötronun enerjisi azalmaya başladıkça artar. Nötronları durdurmak veya yavaşlatmak için kullanılan maddelere moderatör denilmektedir. Sözü edilen moderatör özellikteki malzemelerin, nötron yakalama eğilimi yüksek olmalıdır. İçerisinde hidrojen içeren parafin ve su gibi malzemeler yoğun olarak kullanılmaktadır (Chanthima vd., 2017).

Nötronlar enerjilerine göre madde atomları olarak birçok kez birbirinden farklı etkileşme meydana getirebilmektedir. Nötronların çekirdek ile etkileşmelere başlayabilmesi için çekirdeğe olan mesafesinin yaklaşık olarak  $10^{-13}$  cm olmalıdır. Nötronlar çekirdekle yakınlaştıklarında yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb engelini aşma zorunluluğu yoktur (Leo, 1987). Nötronların madde ile etkileşmesi sonucu oluşan reaksiyonların toplam tesir kesitini ifade etmek için meydana gelen bütün etkileşmelerin tesir kesitlerinin toplamının alınması gerekir. Bu etkileşmelerin en önemlileri elastik saçılma, inelastik saçılma, nötron yakalanması, nükleer reaksiyonlar ve fisyonudur.

### 2.3. Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkisi

Radyasyona maruz kalmak canlılara ciddi zarar verebilir. Radyasyonun yüksek dozlarına maruz kalmak cilt yanıkları, saç dökülmesi, iç organ yetmezliği ve ölümle birlikte Akut Radyasyon Sendromuna (ARS) sebep olmaktadır. Radyasyona maruz kalmak kanser gibi

hastalıklara ve genetik hasar olasılığının oluşmasına veya artmasına neden olabilir (Hoong, 2003).

Canlı hücrelerdeki DNA, radyasyondan ve özellikle iyonlaştırıcı radyasyondan olumsuz olarak etkilenmektedir. Ayrıca canlıların iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalması canlılarda kanser riskini artırır. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyon canlılarda ciddi hasarlara neden olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun kansere veya farklı ciddi bir tahribata neden olma olasılığı, radyasyonun soğurulan miktarına bağlıdır ve radyasyon tipinin zarar verme eğiliminin (eşdeğer doz), hedef organizma veya dokunun duyarlılığının (etkili doz) fonksiyonudur. İyonize radyasyon türleri içerisinde alfa veya beta parçacıkları daha çok üst dokulardan iç tarafa geçemezken, nötronlar yüksüz olmaları nedeni ile dokuların iç taraflarına kadar ilerleyerek canlılar üzerinde daha büyük bir tahribata yol açarlar. Bunun yanı sıra, iyonize radyasyonun sebep olduğu hücrelerde kanser oluşma riskinin ve ihtimalinin tam olarak hesaplanması hala iyi anlaşılamamıştır. Şu anda öne sürülen görüşler, Hiroşima ve Nagazaki'nin atom bombalarından ve nükleer kazalarının ardından radyasyona maruz kalan toplumun takip edilmesi ile elde edilen nüfusa dayalı datalar yardımı ile belirlenmektedir (Hoong, 2003).

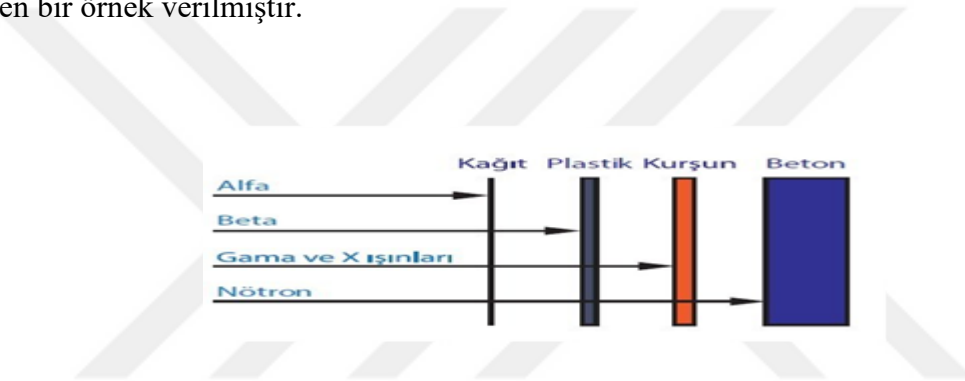
#### **2.4. Radyasyon Zırhlama**

Geleneksel kömüre dayalı enerji yapısı çevre kirliliğine ve ekolojik yıkıma neden olurken, enerji ve çevre sorunları da sürdürülebilir kalkınmanın en büyük sosyal ve ekonomik kısıtları haline gelmiştir. Büyük miktarda enerjiyi bünyesinde barındıran nükleer enerji gibi temiz enerjiye daha fazla önem verilmiştir. Nükleer enerji, çevrenin korunmasını dikkate alarak sera gazı emisyonu sağlamasa da, yüksek düzeyde atık kullanılmış nükleer materyal oluşturur. Bunlar emisyonları veya yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar üretebilmektedir. Dünya çapında toplam kurulu gücü yaklaşık 377 gigawatt olan 443 nükleer güç ünitesi aktif olarak kullanılmaktadır (Singh vd., 2014).

Radyasyonun sahip olduğu yüksek enerji nedeni ile, canlı organizmalara etki etme yetenekleri yanında iyonlaştırma potansiyelleri nedeni ile rahatlıkla dokulara nüfuz ederler. Bu nedenle radyasyondan olabildiğince maksimum derecede korunmak gerekir. Radyasyona karşı korunmanın öncelikli amacı, etki ettiği canlı organizmalarda sebep

olduğu olumsuzlukların tamamen önüne geçmek veya minimum düzeye düşürmek üzerine kuruludur.

Normal olarak, kullanılmış nükleer yakıt farklı radyoaktif izotoplar içerir ve bu radyoaktif izotopların yarı ömürleri, on binlerce yıl olabilmektedir. Ayrıca nükleer atık, birçok nötron emisyonunun eşlik ettiği alfa, beta, gama, proton ve ikincil gama partikül emisyonlarını üretebilir. Bu nedenle, nükleer endüstrinin güvenilir işleyişini ve sürdürülebilir gelişimini sağlamak için radyasyona karşı koruyucu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesini teşvik etmek zorunlu hale gelmektedir (Issa vd., 2018). Şekil 2.6’da radyasyon türüne göre kullanılabilecek zırh malzemelerinin kalınlığını temsil eden bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.6. Radyasyon türüne göre uygulanabilen zırhlama malzemeleri (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>)

Radyasyona maruz kalma, aşağıdaki etkenlerin bir bileşimi olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Radyasyon maruziyetini etkileyen temel faktörler. (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>)

Bunlar;

**Zaman :** Radyasyondan etkilenme süresinin azaltılması, radyasyon maruziyetini orantılı olarak azaltır.

*Mesafe* : Radyasyon kaynağı ile aradaki mesafenin artması radyasyon maruziyetini azaltır.

*Zırhlama* : Radyasyon kaynakları, radyasyonun enerjisini soğuran katı veya sıvı bir malzeme ile korunabilir. Zırhlama terimi, radyasyonu canlılar için güvenli bir seviyeye düşürmek için radyasyona neden olan bir radyasyon kaynağının çevresine yerleştirilen materyalin yayılan radyasyonu soğurması için kullanılmaktadır.

Tehlikeli ışınların dış ortama geçmesinin önlenmesi için radyasyon kaynağını barındıran tesislerin radyasyona karşı yalıtılması gerekir. Bir zırhlayıcı malzemenin tasarımı, imalat kolaylığı, maliyeti ve ağırlığına ek olarak radyasyon tipi, kaynağın aktivitesi ve doz hızı gibi faktörlere büyük ölçüde bağlıdır. Çimentolu malzemeler veya tungsten, hastane odalarının, nükleer santrallerin ve X-ışını,  $\gamma$ -ışını veya nötron parçacığı üretim aletlerini barındıran hızlandırıcıların duvarlarında ve çatılarında kurşun içermeyen radyasyondan korunma malzemeleri olarak geliştirilmiştir.

#### **2.4.1. Gama Radyasyon Zırhlama**

Günümüzde radyasyon kaynaklarının kullanımında teknolojik gelişmelere paralel olarak artış olmuştur. Bu kaynakların faydalarına rağmen, radyasyona maruz kalınması halinde meydana gelebilecek tehlike veya tahribatlar da dikkat edilmesi gereken bir sorundur.

Nükleer santrallerin sayısındaki artış, nükleer silahların savaşlarda kullanılma olanakları, radyasyon yayan cihaz ve kullanılan radyoizotoplardaki artış dikkate alındığında radyasyon maruziyetini engellemek veya azaltmak için daha etkin önlemlerin alınması gerektiği açıktır. Bu riskler nedeni ile radyasyondan koruyucu malzemeler ve radyasyondan korunmaya yönelik tasarımlar üzerine yapılan çalışmalar da artmıştır (Sukesh vd., 2021).

Günümüzde radyasyona neden olabilecek nükleer içerikli uygulamalardan vazgeçmek mümkün değildir. Dolayısı ile radyasyonun neden olduğu tahribatları minimuma indirecek olan koruma tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Radyasyondan korunmada temel fikir, radyasyona olabildiğince az maruz kalmaktır. Makul Ulaşılabilecek Kadar

Düşük (ALARA) ilkesi, herhangi bir radyoaktif kaynaktan yayılan ve maruz kalan dozun en aza indirilmesi gerekliliğini ifade eder (Joseph, 2020).

Gama radyasyondan koruyucu malzemeler genellikle yüksek atom numarasına (Z) sahip elementler içerir. Çünkü kütle azaltma katsayıları koruyucu malzemedeki elementlerin Z'si arttıkça artar. Özellikle düşük enerjili fotonlar için yüksek Z içeren elementlerde fotoelektrik etkileşimler baskındır ve yüksek Z'li elementler, yüksek enerjili fotonlar için daha fazla çift oluşum etkileşimi sağlar. Yüksek Z etkisi nedeniyle kurşun, tıbbi radyoloji bölümlerinde koruyucu bir malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Kurşun bazlı koruyucu malzemeler, klinik personel tarafından X-ışını görüntü kılavuzluğunda girişimsel radyoloji prosedürleri sırasında da kullanılır. Ancak kurşun son derece zehirlidir ve ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Bunun dışında, polimer matrisli kompozitler hafif, uyumlu, uygun maliyetli olmanın yanı sıra kurşunsuz olacak şekilde tasarlanabilmektedir ve potansiyel olarak X-ışınlarını önemli ölçüde azaltabilir. Beton, çimentolu malzemeler veya tungsten gibi diğer matrisler, hastane odalarının, nükleer santrallerin ve X-ışını,  $\gamma$ -ışını veya nötron parçacığı üretimini barındıran hızlandırıcıların duvarlarında ve çatılarında kurşun içermeyen radyasyondan korunma malzemeleri olarak geliştirilmiştir.

Nükleer radyasyon zırhlama malzemesi, nükleer reaktörler ve parçacık hızlandırıcılar gibi nükleer tesislerde önemli hassas altyapı bileşenidir. Bu nedenle radyasyon kalkanı malzemeleri yüksek etkili koruma özelliklerine sahip olmalıdır. Genellikle koruyucu malzemeler, yüksek sıcaklık, korozyon vb. ile oldukça zorlu ortamlarda uzun süre hizmet vermek zorundadır. Ayrıca, koruyucu malzemeler birbirleriyle etkileşimden dolayı sürekli radyasyondan zarar görebilir (Temir vd., 2021).

Zırhlama dizaynında tercih edilecek malzeme radyasyonun türüne ve enerjisine göre farklılık göstermektedir. Alfa radyasyonu ince bir kağıtla bile durdurulabilirken, daha fazla nüfuz edici olan beta radyasyonun ince bir alüminyum tabaka ile kaplamak yeterlidir. Radyasyon kaynağının enerjisine bağlı olarak, gama radyasyonu nüfuz etmesi beta radyasyonundan 100 kat, alfa radyasyonundan 10.000 kat daha fazladır. Bu kadar yüksek nüfuz etme derinliğine sahip olan elektromanyetik radyasyonun durdurulması



zırhlama amacı ile tasarlanmış materyallerin kullanımı ile sağlanabilir. Bazı kaynakların yaydığı radyasyon o kadar güçlüdür ki, uzun mesafelerden tespit edilemezse bile etkisine maruz kalınabilir. Şiddetli radyoaktif etkilerden ancak radyasyonu azaltmak için güçlü bir zırhlama ile korunabilir(Wei vd., 2021; Temir vd., 2021).

Geçtiğimiz yüzyılda, iyonlaştırıcı radyasyon, radyasyon tıbbı, nükleer enerji endüstrisi, havacılık keşif endüstrileri ve nükleer araştırma laboratuvarları dahil olmak üzere toplumun birçok alanında yaygın olarak kullanılmıştır. Radyasyonla çalışmanın tehlikeleri nedeniyle çalışanların, hastaların ve ekipmanın güvenliği temel bir konu haline gelmiştir. Yüksek enerjili radyasyonun nüfuz etme kabiliyeti yüksektir ve bu nedenle hem ekipman hem de insan vücudu üzerinde tehlikeli etkileri vardır. Radyasyonun zararlı etkilerini azaltmak için radyasyon koruyucu malzemeler kullanılmalıdır (Dong vd., 2022).

Teknolojik gelişmelere paralel olarak çeşitli sektörlerde farklı amaçlara yönelik malzemelere giderek daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bir malzemede birçok özellik aynı anda talep edilebilir ancak istenilen bütün parametrelere sahip bir malzeme olmayabilir.

Mukavemet, aşınma direnci, darbe direnci ve hafiflik gibi özelliklere sahip yüksek performanslı bir malzeme gerekebilir. Bütün bu parametrelerin element, bileşik, alaşım, cam, beton, seramik veya polimer gibi tek bir malzeme çeşidi ile sağlanması pek mümkün olmayabilir. Bu durumda her biri birbirinden farklı olan istenen özelliklere sahip malzemeler bir araya getirilerek bir kompozit oluşturulur ve sonuçta zırhlamada etkin olabilecek kompozit malzemeler geliştirilebilir(Yastrebinsky vd., 2021).

Zırhlama malzemesi içerisindeki bileşenler birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirerek malzemenin üstün özelliklerini elde etmek üzere bir araya getirilen farklı türdeki malzeme veya fazlardan oluşan malzemeler olarak da düşünülebilir. Buna göre, malzeme mikroskobik ölçekte heterojen bir malzeme özelliği gösterir ancak makroskobik ölçekte homojen bir malzeme özelliği gösterebilir. Çeşitli koşullar nedeniyle maruz kalabileceğimiz radyasyon miktarı ile ilgili endişeler ve nükleer fiziğin araştırma ve uygulama alanlarının her geçen gün genişlemesi, radyasyondan korunmanın önemini

artırmıştır. Diğer bir deyişle, alternatif ve çevre dostu enerji üretimlerine yöneldiğimiz küresel bir kalkınma planı olarak, pek çok araştırma alanında radyoaktif madde ve enstrümanlarla bol bol uğraşmamız gereken bir çağda olduğumuz unutulmamalıdır.

Gama ışınları ve X ışınları gibi diğer yüksek enerjili radyasyonlar insan vücuduna kolayca nüfuz edebilir. X-ışınları söz konusu olduğunda, bu yetenek radyolojide son derece yararlı olabilir, ancak belirli dozlarda radyasyona maruz kalma kalıcı hücre tahribatına neden olabilir ve kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açtığı kanıtlanmıştır. Bu zararlı etkileri azaltmak için araştırmacılar, insanlar ile radyasyon kaynağı arasına yerleştirilen ve yüksek enerjili fotonların mümkün olduğunca çoğunu azaltmak için kullanılan ve maruz kalma seviyelerini kabul edilebilir bir seviyeye indiren radyasyon kalkanları geliştirmektedirler.

Bir malzemenin bir radyasyon kalkanı olarak ne kadar iyi davrandığını ölçmek için, test edilen malzemenin birkaç enerjide ve bazen farklı kalınlıklarda çeşitli radyasyon azaltma katsayıları hesaplanır. Malzemenin koruma kapasitesi, bileşimi ve yoğunluğu gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle araştırmacılar, malzemenin fiziksel özelliklerden bağımsız olduğu için, soğurma yeteneğinin ana göstergesi olarak malzemelerin kütle azaltma katsayısını kullanmaktadırlar (Agar vd., 2019).

Gama ışınları gibi foton tipi radyasyon, madde ile etkileşime girerken, meydana gelebilecek üç ana olay vardır: fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu ( $E_\gamma > 1,022 \text{ MeV}$  için). Tüm bu olaylar, fotonlardan elektronlara kısmi veya tam bir enerji transferine neden olmaktadır. Yüksek atom numarasına (Z) sahip elementler, fotonlarla daha yüksek etkileşim olasılıkları nedeniyle düşük Z malzemelerine göre daha iyi bir gama radyasyonunu zırlama yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte yoğunlukta dikkate alındığında kurşun, bakır, paslanmaz çelik gibi malzemeler gama radyasyonunun etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak için tarihsel olarak radyasyon zırhlayıcı malzemeler olarak değerlendirilmiştir (Hager vd., 2019).

### 2.4.2. Nötron Radyasyon Zırhlama

Güçlü nüfuz etme yeteneklerine sahip olan nötronlar, esas olarak nükleer fisyon tarafından üretilir ve elektrostatik kuvvetten etkilenmezler. Bu özelliği nedeni ile nötronlar, malzemelerin çoğuna kolayca nüfuz edebilir ve atomun çekirdeği ile etkileşime girebilmektedir. Çünkü nötronların elektrik yükü yoktur ve nükleer fisyon yoluyla nükleer enerjinin yayılmasına yol açmaktadırlar (Chu ve Majemdar, 2012). Salınan bu enerji insanlara ve çevreye ölümcül zararlar verebilir. Sonuç olarak, nötron zırhlama malzemelerinin kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

Normal olarak, kullanılmış nükleer yakıt farklı radyoaktif izotoplar içerir ve bu radyoaktif izotopların yarı ömürleri on binlerce yıl sürebilmektedir. Ayrıca nükleer atık, birçok nötron emisyonunun eşlik ettiği alfa, beta, gama, proton ve ikincil gama ışınları üretebilir. Bu nedenle, nükleer endüstrinin güvenilir işleyişini ve sürdürülebilir gelişimini sağlamak için nötron koruyucu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesini teşvik etmeyi zorunlu hale getirmektedir.

Genellikle nötron koruyucu malzemeler metallere, ametallere, kompozit malzemelere, polimer kompozitlere veya bileşiklere oluşur. Genel olarak nötron zırhlama için Bor (B), kadmiyum (Cd), gümüş (Ag), indiyum (In), hafniyum (Hf), disprosyum (Dy), öropyum (Eu), gadolinyum (Gd) gibi malzemeler tercih edilmektedir. Bunun nedeni sayılan bu malzemelerin her zaman yüksek makroskopik nötron uzaklaştırma tesir kesitine sahip olmalarıdır (Fu vd., 2021).

Nükleer reaktörler için en etkili koruyucu malzeme ise, hidrojen miktarı bol malzemeler ve ağır elementlerdir. Ağır elementler tarafından elastik olmayan saçılma ve hidrojen tarafından elastik saçılma, hızlı ve orta enerjili nötronları yavaşlatmak için oldukça etkilidir ve soğurucular, termal nötronların yanı sıra ikincil gama ışınlarını da azaltabilir. Diğer seçenek ise, Fe, Pb, W gibi bazı elementler ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerdir. Bunlar radyasyona dayanıklı ve yüksek termal kararlılığı olan malzemelerdir (Nambiar vd., 2012).

Nötron zırhlama analizleri genel olarak karmaşık bir yapıdır. Nötron zırhlamada sadece birincil nötronlar veya nötron kaynağını değil, aynı zamanda meydana gelen ikincil

nötronların üretimini kısıtlayarak nötron radyasyona karşı koruma sağlamak esastır. Nötronun hedef materyaldeki atomlar tarafından elastik olmayan saçılmaya uğraması sonucu termal nötronlar oluşur. Termal nötronlarda enerji kaybına uğradığından zırhlama materyali tarafından yakalanmaları söz konusu olur (Sukegawa vd., 2011).

Hafif elementlerde elastik saçılma, nötronun sahip olduğu kinetik enerjinin önemli bir bölümü tek bir saçılmada yok edilebilir. Özellikle hidrojeninden saçılma için ortalama enerji kaybı, nötron enerjisinin başlangıçtaki enerjisinin yaklaşık yarısı kadardır. Sonuç olarak hidrojen atomu ile bir hızlı nötron esasen bir soğurulma veya saçılma ile etkileşime girer. Çünkü nötron ortalama olarak hızlı nötron enerji bölgesinden tek bir saçılma ile uzaklaştırılır. Ek olarak, düşük enerjili bir nötronun hidrojen atomundan saçılması yüksek enerjili bir nötrona göre daha olasıdır. Bu olay şu anlama gelmektedir; Hızlı bir nötron, hidrojenli bir ortamla etkileştiğinde, sonraki saçılma veya yavaşlama etkileşimleri, ilk saçılma etkileşiminin olduğu noktaya çok yakın olabilmektedir (L'Annunziata, 2016).

Nötronlar, hafif çekirdeklerle girdiği etkileşimler sonucu mevcut enerjilerinin büyük bir kısmını kaybederler. Bu nedenle hızlı nötronları yavaşlatmak için içerisinde hidrojen elementinin fazla olduğu malzemeler tercih edilmektedir. Moderatör olarak hidrojenin tercih edilmesinin nedeni hidrojen atomunun sahip olduğu tek protonun nötronla hemen hemen eşit kütleyle sahip olmasıdır. Dolayısıyla nötronun hidrojen çekirdeği ile kafa kafaya yapacağı tek bir çarpışmada bile ile bütün enerjisini hidrojenin sahip olduğu protona aktarma ihtimali son derece yüksektir.

Epitermal veya hızlı nötronların radyasyona karşı zırhlanması iki aşamalı bir süreç gerektirir. Hızlı nötronlar etkileşimlerde nadiren soğurulur veya yakalanır. Bu nedenle hızlı nötronları önce termal enerjilere yavaşlatmak gerekir. Bu yavaşlatma işlemi madde atomları ile elastik olmayan saçılma işlemi olabilir. Örneğin hidrojenin elastik saçılma tesir kesiti elastik olmayan saçılma tesir kesitinden büyüktür. Bu nedenle verimli bir nötron termalizasyonu için demir gibi bir metale ek olarak hidrojene veya hidrojenle benzer bir elemente ihtiyaç vardır. Ek olarak etkili bir nötron radyasyon zırhlama için olarak bor, lityum, hidrojen gibi düşük atom numaralı elementler içeren malzemeler yanında gama radyasyona karşı zırhlamada yüksek yoğunluğa ve atom numarasına sahip

kadmiyum, indiyum gibi güçlü bir elementler kullanılabilir (Ahmad, 2015). Son olarak nötron radyasyonun için beton kullanılacaksa beton-çelik kombinasyonunun kullanılması iyi sonuçlar verebilmektedir.

#### 2.4.2.1. Nötron Zırhlama İçin Kullanılan Bazı Materyaller

**Bor :** Doğal bor %19,9 oranında  $^{10}\text{B}$  ve %80,1 oranında  $^{11}\text{B}$  içerir.  $^{10}\text{B}$ 'nin tesir kesiti 3840 barn iken  $^{11}\text{B}$ 'nin tesir kesiti 5 mb'dir. Nötronun  $^{10}\text{B}$  tarafından soğurulması ile 0,48 MeV değerinde enerji yayılır. Bu enerji değeri yakalan bir gama ışının enerji değerinden daha küçüktür. Zırhlamada kullanılan bor elementi genellikle  $\text{B}_4\text{C}$  formunda bulunur. Bunun yanında bor grafit, boral (alüminyumla karıştırılmış bor), bor nitrür gibi bileşiklerde kullanılmaktadır. Bunun dışında radyasyon zırhlamada kullanılmak üzere borlu polietilen tercih edilmektedir. Hem gama hem nötron radyasyonuna karşı bir zırhlama söz konusu ise kurşun yüklü boratlı polietilen tercih edilebilmektedir (Li vd., 2021).

**Lityum :** Doğal lityum, %7,5 oranında ve  $^6\text{Li}$  %92,5 oranında  $^7\text{Li}$  içermektedir. Termal nötron soğurulması için 940 b tesir kesitine sahiptir ki bu yüksek bir değer sayılmaktadır. Aynı zamanda ikincil gama ışınları üretmez. Hafif bir element olmasının yanı sıra kolaylıkla zenginleştirilebilir. Bu değişik formlarda % 7,5 lityum içeren polietilenlerin zırhlamada kullanılmasının temel nedenidir. Ayrıca, lityum bileşikleri içeren malzemeler, nötron azaltıcılar olarak geliştirilmiştir (Glasgow vd., 1974, EPRI 2009). Bunun nedeni, lityum çekirdeklerinin radyoaktif olmayan  $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  reaksiyonu yoluyla termal nötronları azaltmasıdır. Nötron koruyucu işlevi için uygun olan yüksek yoğunluklu  $\text{LiF}$  paletlerinin hazırlanması için etkili bir metodoloji geliştirilmiştir (Svikis, 1964).

**Parafin :** İlk uygulanabilir malzemelerden biri olan parafin, tıpkı polietilen veya su gibi, yüksek hidrojen oranı nedeniyle nükleer mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir radyasyon kaynağının etrafına sarılmış bir parafin tabakası, yüksek enerjili nötronları yumuşatabilir ve hızlı nötronları termal nötronlara dönüştürebilir. Nötron azaltıcı elementler açısından zenginleştirilmiş borik asit-parafin bileşimlerinden oluşmuş nötron zırhlama blokları, nükleer mühendislikte her zaman

kullanılmaktadır (Igashira vd., 1986). Düşük borik asit içerikli boratlı parafin, termal nötronların azaltılması için yetersizdir.

Tek başına yüksek içerikli parafin ise hızlı nötronları etkili bir şekilde azaltamaz. Yapılan çalışmalara göre, boratlı parafinin, radyasyon kaynağından yayılan hızlı nötronları diğer malzemelerden daha etkili bir şekilde yumuşatabildiğini, bunun sonucunda  $^{10}\text{B}$  çekirdekleri ile çarpışma olasılığını iyileştirdiğini ve termal nötronların soğurulmasını desteklediğini göstermektedir (Gallego vd., 2009).

**Ağır Metaller:** Nükleer mühendisliğin gelişmesiyle birlikte, radyasyon türüne göre yeni zırhlayıcı malzemelere olan talepte gün geçtikçe artmaktadır. Genellikle, istenmeyen radyasyonların azaltılması veya soğurulması için kurşun oksit ve kurşun oksit/tungsten/kalay kompozitlerinden yapılan radyoaktif zırhlayıcı malzemeler kullanılmaktadır (Seltborg vd., 2005). Ağır metallerin nötron koruma verimliliği, radyasyon kaynağı türleri ve enerji seviyesi ile ilişkilidir. Kurşun oksit, bizmut, baryum gibi ağır metaller ve diğer yüksek atom numaralı elementler, radyasyon ışınlarını azaltmak için tasarlanmaktadır. Şu anda, bizmut borosilikat camları, ikili bizmut silikat camları ve silikat ve borlu ağır metal oksit camları dahil olmak üzere çeşitli ağır metal oksit camları türleri vardır (Elalaily vd., 2016). Kurşun bazlı camlar tatmin edici nötron koruma performansı için geliştirilmiştir. Aslında, yüksek atom numaralı malzemeler nükleer radyasyon kaynaklarından yayılan her türlü radyasyonu, özellikle nükleer laboratuvarlardan yayılan radyasyonu engelleyemez veya soğuramaz (Singh vd., 2014).

**Beton :** Tüm koruyucu malzemeler içerisinde düşük maliyeti ve her şekle dökülebilme özelliği nedeni ile beton çok tercih edilmektedir. Ayrıca beton iyi bir yapı performansına sahiptir ve diğer zırhlama materyalleri ile karşılaştırıldığında nötron ve gama radyasyona karşı koruma için kullanılan zırhlamaya uygundur. Yaklaşık olarak beton % 13 çimento, %7 su ve %80 agregadan oluşur. Farklı katkılama maddeleri ile birçok farklı türde beton hazırlanabilmektedir (Abullouh vd. 2010). Betonda radyasyon azaltılmasına neden olan etkiler olarak betonun yoğunluğu, agrega tipi, su-çimento oranı ve element bileşimi sayılabilir (Pillai vd., 2016).

Betondaki hidrojen miktarı, nötron radyasyonuna karşı betonun zırhlama özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Genel olarak betonda su miktarının fazla olması hızlı nötronları daha kolay yavaşlatmayı sağlar. Gerçekte betondaki tüm hidrojen su formundadır. Sadece kalıcı su, çimento ve agregadaki hidratasyon suyu betonun gözeneklerinde serbest su olarak bulunur. Yüksek sıcaklıklarda her iki türdeki su kaybolabilir. Bu olayda betonun hızlı nötronları azaltma kabiliyetini yitirmesine neden olur. Normal ortam şartlarında bile su difüzyon ve buharlaşma nedeni ile yok olabilir. Tipik olarak betondaki su miktarı, beton ağırlığının %3'ü kadardır ve bu su betonun kürlenmesi sırasında kaybolur. Ortam sıcaklıklarında ise bu oranı 20 ile 30 yıl arasında değişen sürede kaybolur. Betonun içerisindeki su miktarını azaltmak geçen nötron radyasyonunu artırmaktadır. Örneğin su miktarının %4,5 tan %3,5'a inmesi ile enerjisi 1 ile 15 MeV arasında değişen nötron sayısını 1,6 oranında artıracaktır (Pillai vd., 2016).

**Cd ve Gd Elementleri İçeren Nötron Azaltıcı Malzeme :** Nükleer mühendislikte kadmiyum elementleri kullanıldığında, zayıf mukavemeti, yüksek toksisitesi ve düşük korozyon direnci nedeniyle paslanmaz çelik gibi bir kaplama tabakası eklemek gerekir. Gadolinyum (Gd), mükemmel bir nötron azaltıcı malzeme olan yüksek nötron uzaklaştırma tesir kesitine sahip iki tip izotopa sahip olan bir elementtir. Bu tür malzemeler, radyoaktif atık depolaması için bir tür nötron azaltıcı malzeme olarak kullanılabilir (Moon and Yi, 2016).

**Polimer Esaslı Kompozitler :** Polimer bazlı kompozitler, yüksek oranda hidrojen içermeleri nedeni ile hızlı nötronları etkin bir şekilde termal nötronlara dönüştürmeleri ve metal içerikli malzemelere göre daha hafif olmaları nedeni ile yapısal malzeme olarak tercih edilebilirler (Nambiar vd. 2016). Genellikle, iyi bir moderatör malzeme olan yüksek hidrojen içeriğine sahip organik polimer, hızlı nötronların yavaşlatılması durumlarında bariz bir etkiye sahiptir. Temel olarak yüksek yoğunluklu organik polietilen, epoksi reçine, fenolik reçine, polimid reçine de dahil olmak üzere organik polimerler radyasyon zırhlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Nötron zırhlama performansını daha da arttırmak için, genellikle organik polimerlere bor ve türevleri eklenir (Jun vd., 2011; Bian vd., ;2014).

Bor içeren malzemelerin eklenmesinden sonra, bor ve hidrojen, ikincil gama ışınlarının ortaya çıkmasıyla termal nötronları yakalayabilir ve termal nötron absorpsiyon kapasitesini artırabilir. Polimer bazlı nötron koruyucu malzemeler genellikle yüksek hızda karıştırma, yoğurma, plastikleştirme ve laminasyon yoluyla hazırlanır. Sonuçlar, polimer kompozitlerin, 80°C ila 100°C arasında değişen sıcaklıklarda mühendislik uygulamaları için uygun olan tatmin edici radyasyon direncine ve iyi nükleer mühendislik özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir (Özdemir vd., 2016). Bazı polimerlerin içerikleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2. 7. Polimerlerin kimyasal bileşimi (Bian vd., 2014)

| Reçine                        | polietilen | KRAFTON-HB4 | eponit | 300°C reçine | geliştirilmiş reçine |
|-------------------------------|------------|-------------|--------|--------------|----------------------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,93       | 1,08        | 1,7    | 1,8          | 1,28                 |
| Element (ağırlıkça%)          |            |             |        |              |                      |
| H                             | 14,4       | 10,4        | 25,5   | 29,4         | 8,2                  |
| C                             | 85,6       | 74,5        | 43,8   | 30,4         | 4,8                  |
| O                             |            | 10,6        | 8,9    | 6,1          | 27,6                 |
| B                             |            | 2,0         | 1,2    | 0,31         | 3,4                  |
| N                             |            | 2,13        |        | 14           | 2,2                  |
| Si                            |            | 0,38        |        | 7,4          |                      |
| Ca                            |            | 0,01        |        | 6,8          |                      |
| Al                            |            | 0,01        |        |              |                      |

**B/Al Alaşım (Bor-Alimünyum Alaşımı) :** Borun alimünyum içerisindeki düşük çözünürlüğü nedeni ile belli bir dereceye kadar paslanmaz çeliğe benzemektedir. Sadece sınırlı oranlarda bor ve alüminyum birbiri ile etkileşime girer ve küçük tane boyutlarında alaşımın kırılabilirliği artar. Atık yakıt havuzunda sınırlı bor içeriğine sahip nötron azaltıcı malzeme kullanılırsa, nükleer reaksiyonun kritik kontrolünde sorunlar yaşanabilir. Bu nedenle, atık yakıt depolama malzemeleri, yüksek <sup>10</sup>B alan yoğunluğuna sahip kompozitler tercih edilmektedir (Mcall, 1997). Tablo 2.8’de nötron radyasyonunda kullanılan malzemelerin avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Tablo 2.8’den



anlaşılacağı üzere nötron radyasyonunu azaltmak için tek bir element değil birkaç element veya alaşımın veya bileşiğin biraraya getirilmesi daha uygun olacaktır.

Tablo 2. 8. Nötron zırhlamada kullanılan bor içerikli bazı malzemelerin avantaj ve dezavantajları (Mcall, 1997)

| Malzemeler                                | Bor içeriği (%) | Avantajlar                                                                 | Dezavantajları                                                         |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Bor katkılanmış paslanmaz çelik           | 0,20–2,25       | Işınlama direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık direnci                | Düşük bor çözünürlüğü, yüksek oranda zenginleştirilmiş $^{10}\text{B}$ |
| $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$ kompozit   | <25             | Düşük yoğunluk, düşük gözeneklik, iyi mekanik özellikler, korozyon direnci | Üretim sürecinde çeşitli etkiler                                       |
| $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$ seramikler | 27,4–50,9       | Düşük yoğunluklu, yüksek bor içeriği                                       | Yüksek gözeneklik, zayıf yapı performansı, düşük korozyon direnci      |
| B/Al alaşımı                              | 0,5–4,5         | Düşük yoğunluklu, yüksek termal iletkenlik                                 | Düşük mekanik performans, düşük bor çözünürlüğü                        |
| Amorf alaşım                              | <20             | Mükemmel nötron koruma verimliliği, yüksek korozyon direnci                | Alaşım elementlerinin dağılımı, ara yüzey reaksiyonu                   |

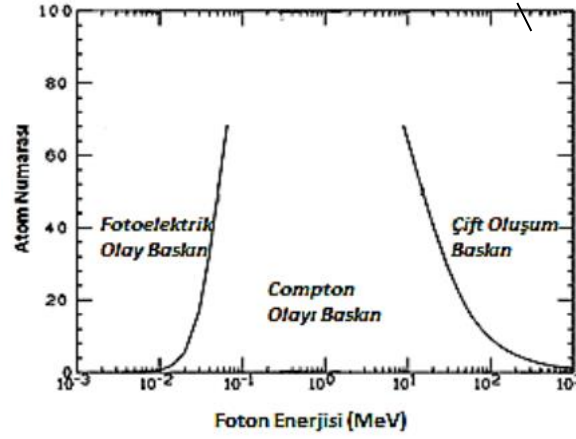
## 2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Bu kısımda gama radyasyonun ve nötron radyasyonunun madde ile etkileşimlerine yer verilmiştir.

### 2.5.1. Gama Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Yüksek nüfuz etme güçleri nedeniyle gama radyasyonu, etkileşime girdiği canlıda büyük hasarlar oluşturulabilir. Malzemelerde ise farklı süreçler ile etkileşime girebilmektedir.

Fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu en baskın süreçlerdir. Bu süreçlerin enerjiye bağlı değişim eğrileri Şekil 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2.8 Fotoelektrik etki, Compton ve Çift oluşumu olaylarının etkin olduğu bölgeler (Krane 2001)

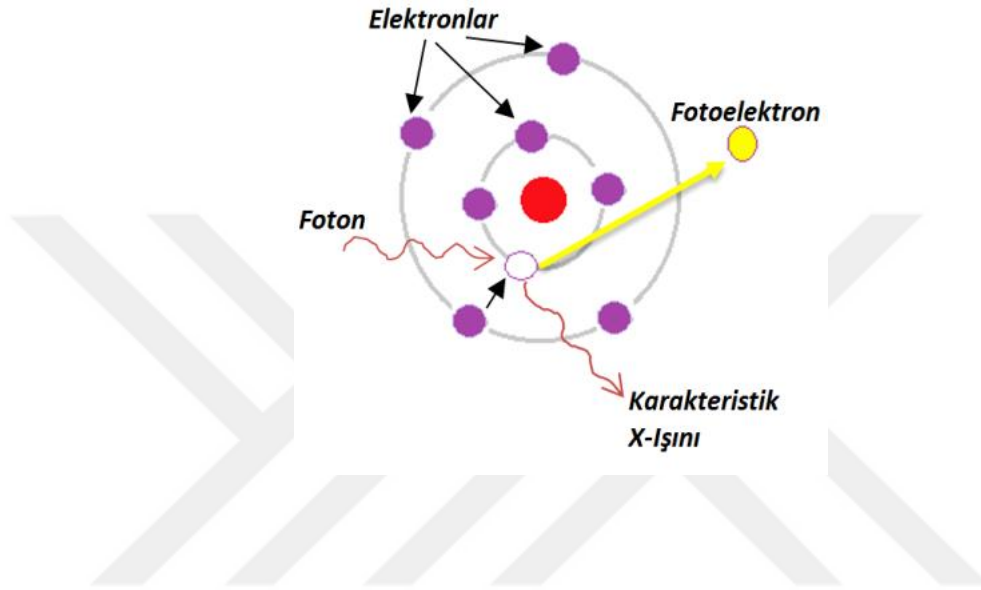
#### 2.5.1.1. Fotoelektrik

Madde üzerine gelen gama fotonun sahip olduğu enerji atoma bağlı bir elektronun bağlanma enerjisinden büyük ise, atomun elektronu yörüngeden ayrılabilir. Ayrılan bu elektrona fotoelektron, bu olayda fotoelektrik olayı denmektedir. Bu etkileşimde, gelen fotonun enerjisi tamamen elektrona aktarılmaktadır. Enerji aktarımı neticesinde foton, yörünge elektronu tarafından soğurulmaktadır (Martin, 2006).

Fotoelektrik olayda, foton enerjisinin bir kısmını elektronu atomdan koparmak için kullanır. Geriye kalan enerjinin bir kısmını yörüngeden ayrılan elektrona kinetik enerji kazandırır. Son olarak, enerjinin az bir bölümünde atoma geri tepme enerjisi olarak aktarılır. Sökülen elektronun yörüngede meydana getirdiği boşluk üst yörüngelerdeki bir elektron tarafından doldurulur. Meydana gelen bu geçiş işleminde atomun yayımlanan karakteristik X-ışınları Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Serbest hale geçen fotoelektronun kazandığı kinetik enerji ifadesi denklem (2.3) ile ifade edilir (Martin, 2006).

$$K.E = h\nu - E_b \quad (2.3)$$

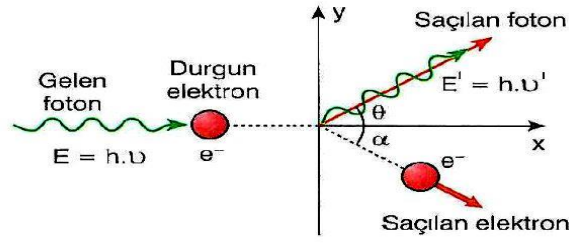
Denklem (2.2)'deki ifadede  $K.E$  kinetik enerji,  $h\nu$  gelen fotonun enerjisi,  $E_b$  ise elektronun yörüngeye bağlanma enerjisidir. Serbest bir elektron fotoelektrik olayı gerçekleştiremez. Bunun nedeni momentum korunamamasıdır. Bağlı halde bulunan elektronun sahip olduğu enerjisinin bütünüyle soğurulması mümkün olabilmektedir. (Bilge ve Tuğrul, 1990).



Şekil 2.9. Fotoelektrik olayı sonucu karakteristlik X-Işını oluşumu (Tuzluca, 2007)

### 2.5.1.2. Compton Saçılması

Compton saçılması, yüksek frekanslı bir fotonun yüklü bir parçacıkla, genellikle bir elektronla etkileşiminden sonraki saçılmasıdır. Compton olayı sırasında, gama fotonu ile atoma zayıf şekilde bağlı dış yörünge elektronu veya serbest elektron arasında Şekil 2.10 gösterildiği gibi bir etkileşim gerçekleşmektedir. Bu olayda durgun elektron üzerine gönderilen gama fotonunun, elektronla etkileşmesi sonucu sahip olduğu enerjisinin bir kısmını elektrona aktarmaktadır. Bilinen bir dalga boyuna sahip foton serbest elektronlarla etkileşime girdiğinde, fotonun bir  $\theta$  açısı ile saçıldığı gözlemlenmiştir (Taylor vd., 2004).



Şekil 2.10. Compton saçılmasının gösterimi (Venugopal vd., 2013)

Compton saçılması da fotoelektrik olayı gibi ışığın tanecik gibi davranabildiğini ispat eden bir etkileşimdir. Bu olayın diğer bir sonucuda, fotonların da momentuma sahip olduğudur (Martin, 2006).

Compton olayında;

- \* Etkileşme sonucu foton ortamdan kaybolmaz. Diğer bir deyişle soğurulmaz.
- \* Enerji korunur. Elektron üzerine gönderilen foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Kalan enerjiyle de kendisi saçılmaya uğrar. Buna göre;

$$E_{gelen} = E_{saçılan} + E_{elektron}$$

$$h\nu_{gelen} = h\nu_{saçılan} + h\nu_{elektron} \quad (2.4)$$

(2.4) ifadesi yazılabilir.  $\nu$  fotonun frekansını ifade etmektedir.

Enerji denklemine göre  $\nu_{gelen} > \nu_{saçılan}$  'dır. Frekans ile dalga boyu ters orantılı olduğundan  $\lambda_{gelen} < \lambda_{saçılan}$  olarak yazılır. Momentum korunur.

$$\vec{P}_{gelen} = \vec{P}_{saçılan} + \vec{P}_{elektron} \quad (2.5)$$

Enerji ve momentum korunumu ifadelerinin birlikte düzenlendiğinde elde edilen aşağıdaki denklem (2.6) ile fotonun dalga boyundaki değişim bulunur.

$$\Delta\lambda = \lambda_{saçılan} - \lambda_{gelen} = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad (2.6)$$

### 2.5.1.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumu bir çekirdeğin yakınında bir elektron-pozitron çifti oluşturan foton anlamına gelir. Çift oluşumunun gerçekleşmesi için enerjinin korunması gerekir. Ayrıca toplam yük ve çizgisel momentum da korunmaktadır. Çift oluşum olayında enerjinin kütleye dönüşmesi söz konusudur. Çift oluşumu sırasında gelen fotonun fazla kalan enerjisi elektron-pozitronun kinetik enerjisi için kullanılır. Çift oluşumunda meydana gelen elektronlar serbest elektrona benzer hareket ederler. İyonlaşma süreçleri oluşturabilirler.

Pozitron ise madde ile etkileşime girerken elektrona benzer şekilde iyonlaşma, uyarma ve Bremsstrahlung gibi etkileşimler nedeni ile sahip olduğu enerjiyi kaybeder. Pozitron ile serbest bir elektron karşılaştığında ise pozitron ve elektron birbirlerini yok eder.

Neticede birbirine ters yönlü ve enerjileri 0,511 MeV olan iki  $\gamma$  ışını oluşur. Çift oluşum etkileşiminde fotonun, çekirdeğin sahip olduğu elektromanyetik alanı ile etkileşimde bulunmaktadır. Bu nedenle etkileşimin olma ihtimali, Z atom numarası ile hızlı bir artış göstermektedir.

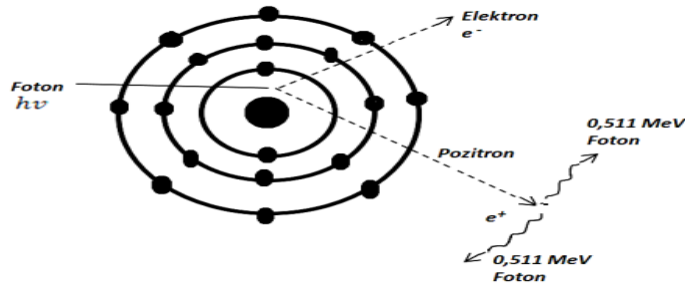
$$E_{foton} = M_{e^-}c^2 + M_{e^+}c^2 + K_{e^-} + K_{e^+} \quad (2.7)$$

Burada  $M_{e^-}$  ve  $M_{e^+}$ , elektron ve pozitronun durgun kütleleri  $K_{e^-}$  ve  $K_{e^+}$  ise elektron ve pozitronun kazandığı kinetik enerjilerdir.

Çift oluşumunun olabilmesi için gelen fotonun enerjisi eşitlik (2.8)'de ifade edildiği gibi, elektronun ve pozitronun durgun kütle enerjileri toplamına yani 1,022 MeV'e (eşik enerjisi) eşit veya büyük olması gerekir (L'Annunziata, 2003).

$$h\nu = E = 2M_e c^2 \times 0,511\text{MeV} = 1,02\text{MeV} \quad (2.8)$$

Şekil 2.11'da çift oluşumunun gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11. Çift oluşumu (Martin, 2006)

## 2.5.2. Nötron Radyasyonun Madde İle Etkileşimi

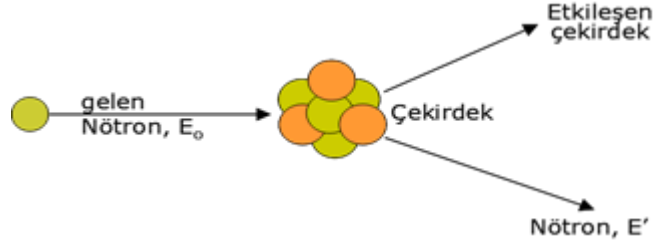
Nötron iki farklı türde madde ile etkileşebilir. Bunlar saçılma ve soğurulmadır. Her iki tür etkileşimde nötronun herhangi bir enerji değerinde olabilir. Ancak genel olarak saçılmaya sebebiyet veren reaksiyonlar birkaç yüz keV mertebesinin üzerindedir. Bunun dışında düşük enerjilerde özellikle termal ve soğurulma önemli hale gelebilmektedir.

### 2.5.2.1. Saçılma

Saçılma etkileşiminde, etkileşimden sonra nötron serbest kalır ancak çarptığı çekirdeğe enerjisinin bir kısmını aktarır. Saçılma etkileşimleri elastik ve inelastik saçılma olarak 2'ye ayrılır.

**Elastik Saçılma :** Toplam momentum, enerji ve kinetik enerji korunur.  $A(n,n)A$  olarak ifade edilen nükleer reaksiyonlardır. Nötron atom çekirdeğine çarptıktan sonra Şekil 2.12'de gösterildiği gibi kendi kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktarır ve geldiği doğrultudan tam aksi yönüne saparak çekirdekten uzaklaşmaya başlar. Elastik saçılmalar çarptığı çekirdeğin yapısında herhangi bir değişikliğe neden olmazlar (L'Annunziata, 2003).

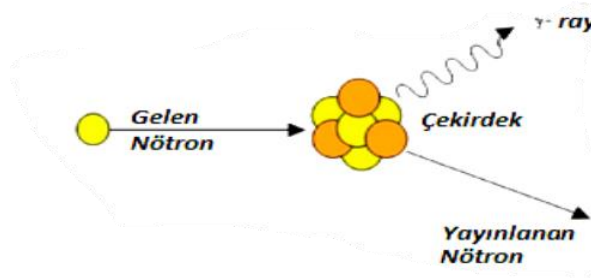
Çekirdek çarpışmadan önce durağan ise, nötronla çarpışma olduktan sonra çekirdek nötrondan kinetik enerji kazanır ve hareket etmeye başlayacaktır. Nükleer reaktörlerde hızlı nötronları yavaşlatmak için sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 2.12. Nötronun çekirdekten elastik saçılması (Şahin, 2013)

**Elastik Olmayan Saçılma (İnelastik Saçılma) :** İnelastik saçılma,  $A(n,n')A^*$  veya  $A(n,2n')B^*$  şeklindeki nükleer reaksiyonları ifade etmektedir. Nötron, kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktararak, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi geliş yönünden farklı bir doğrultuda ve etkileşim başlamadan önce sahip olduğundan daha küçük bir kinetik enerji ile uzaklaşır. Nötronla etkileşime giren çekirdek daha sonra gama veya nötron yayımlayarak taban enerji durumuna döner. Bu tür etkileşimlerde kinetik enerji korunmaz, momentum ve toplam enerji korunur.

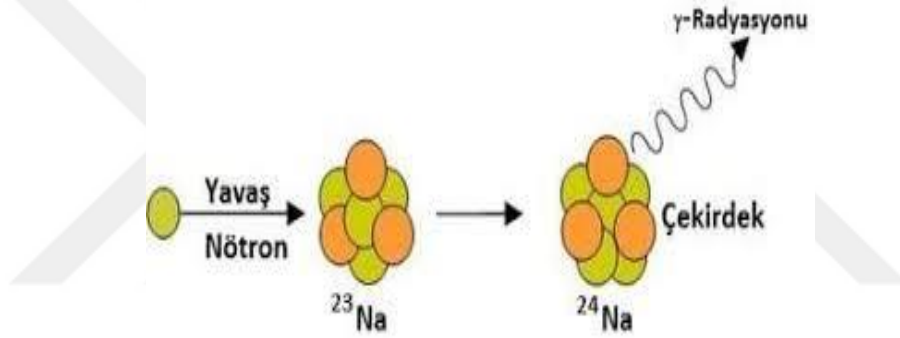
Esnek olmayan çarpışma, nötronların hızlı olduğu durumda meydana gelmektedir. Nötronun çekirdek ile etkileşip çekirdeği uyarması için enerjisinin en az 1 MeV olması gerekmektedir. Belirtilen bu enerji değeri altında sadece elastik saçılma olmaktadır. Çekirdek çarpışmaya uğramadan önce duruyor ise, nükleer reaksiyonun olabilmesi için nötronun çekirdeğin uyarma enerjisinden daha fazla bir kinetik enerjiye sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, esnek olmayan saçılmanın bir "eşik reaksiyonu" olduğu söylenir. Burada eşik değeri nötronun sahip olduğu minimum kinetik enerjidir. Esnek olmayan saçılma ihtimali genel olarak elastik saçılmadan daha düşük olmasına rağmen, esnek olmayan bir çarpışmada nötronun enerji kaybı daha fazladır.



Şekil 2.13. Nötronun inelastik saçılması(Şahin, 2013)

**Nötron soğurulması :** Bir soğurulma etkileşiminde nötronlar çekirdek tarafından emilir ve sonuçta büyük bir enerji depolayabilmektedir.

**Nötron yakalama :** Hedefe üzerine gelen bir nötron, hedef çekirdekle birleşerek Şekil 2.14'te gösterildiği gibi bir bileşik çekirdek oluşturabilir. Sonuç olarak, her çekirdek, kütle numarası bir büyük olan bir izotop haline gelir. Bu tepkime sonucunda meydana gelen izotop, uyarılmış durumdadır ve gama yayınlarak temel enerji seviyesine gelir. Bu tepkimeye nötron yakalama ya da ısımalı yakalama isimleri verilmiştir. Meydana gelen çekirdek kararlı ya da kararsız durumda olabilir. Kararsız bileşik çekirdek meydana geldiğinde çekirdek, kararlı duruma gelinceye kadar beta bozunumu yapabilir.



Şekil 2.14. Nötronun yakalama (Şahin, 2013)

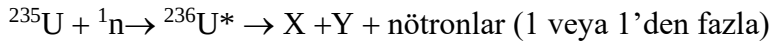
**Yüklü parçacık yayınlanması :** Yüklü parçacıkların çekirdekten ayrılabilmesi için gerekli şart Coulomb engelini aşılması ile mümkündür. Bu engel bir eşik enerjiyi ifade eder. Bu eşik enerji, hedefin Z proton sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu tür etkileşimler genellikle proton sayısı az olan hafif çekirdeklerde görülür. (n, $\alpha$ ) tepkimeleri ise yeteri kadar enerji salan (ekzotermik) olduklarından, daha düşük enerjili örneğin termal ya da yavaş nötronlarla bile etkileşim sağlanabilir. Bu ekzotermik tepkimelere örnek olarak  $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$  ve  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  verilebilir (James, 2006).

**Fisyon :** 1939 yılında Uranyum bileşiklerinin termal nötronlarla bombardımanı sonucu ilk kez farkedilen fisyon, termal nötronlarla zorlanmadan fisyon yapabilen (fissile) bir



çekirdeğin veya hızlı nötronlarla fisyon yapabilen üretken (fertile) bir çekirdeğin nötronlarla bombardımanı sonucu oluşur.

Ağır bir çekirdeğin ( $^{235}\text{U}$  gibi) daha küçük iki çekirdeğe bölünmesiyle oluşan sürece nükleer fisyon denir. Ürün çekirdeklerin kütlesi ana çekirdeğin kütlesinden azdır; bu kütle eksikliği enerji olarak karşımıza çıkmaktadır.



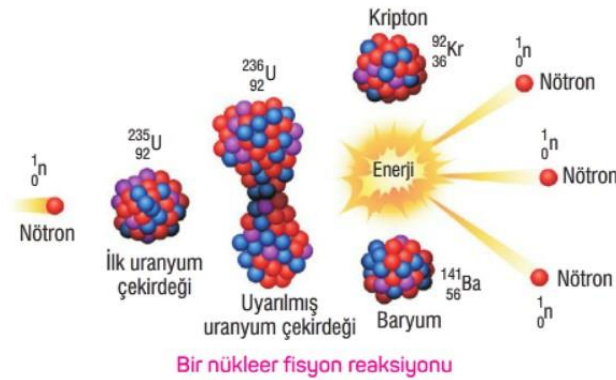
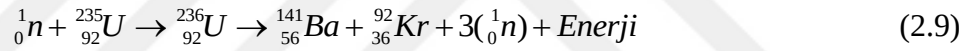
Uranyum fisyonunda X ve Y'nin farklı kombinasyonları vardır (Yücel, 2012).

Fisyon sürecinin basamakları şöyle sıralanabilir:

$^{235}\text{U}$  çekirdeği termal nötron yakalar. Fazla enerjiden dolayı şiddetli titreşimler olur.

$^{236}\text{U}^*$  oluşur.  $^{236}\text{U}^*$  çekirdeği deforme olmuştur; gülle biçimli iki bölgedeki protonlar arası itme deformasyonu artırır. Çekirdek birkaç nötron yayınlayarak 2'ye ayrılır.

Örneğin  $^{235}_{92}\text{U}$  çekirdeğinin yavaşlatılmış nötronla fisyonu Şekil 2.15 gibi gösterilir.



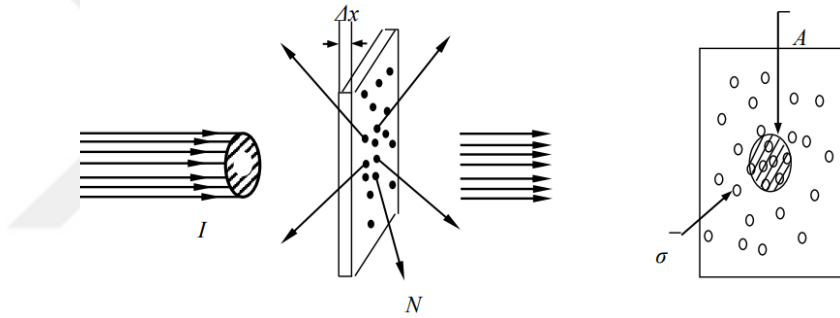
Şekil 2.15. Nükleer fisyon reaksiyonuna bir örnek (Martin, 2006)

## 2.6. Tesir Kesiti

Tesir kesiti, bir etkileşmenin meydana gelebilme olasılığını ifade eden bir kavramdır. Meydana gelen etkileşme olayının türüne göre tesir kesiti adlandırılır. Örneğin çift

oluşumu meydana gelmişse çift oluşumu tesir kesiti, koherent saçılma söz konusu ise koherent saçılma tesir kesiti ifadeleri kullanılır.

Bir etkileşme olayında tesir kesitinin hesabının yapılabilmesi, zırlama süreçlerinde, sağlık fiziği uygulamalarında, radyasyon azaltma katsayılarının hesaplanmasında, atomların yapısının tespitinde, karbon yaş tayininde, ilaç endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Hubbell, 1989). Bunun yanında radyoizotopların incelenmesinde, radyasyon miktarının tespitinde, birçok uygulamalı mühendislik alanında da tesir kesitinin belirlenmesi önemli rol oynar. Ayrıca bazı durumlarda ayırt edici özelliği de bulunmaktadır. Örneğin, karakteristik X-ışınları tesir kesiti her bir element için ayırtedici özelliğe sahiptir.



Şekil 2.16. Tesir kesitinin şematik gösterimi (James, 2006; Meyerhof, 1967)

Şekil 2.16'da gösterildiği üzere, yüzey alanı  $A$  olan ve kalınlığı  $dx$  olan bir levha düşünelim. Levhanın birim hacminde  $n$  adet atom barındırıyorsa, hacmi  $Adx$ , toplam atom sayısı  $nAdx$  kadar olmaktadır. Levhadaki her bir çekirdek için  $\sigma$  etkileşme tesir kesiti hesaplandığında, levhada bulunan bütün çekirdeklerin toplam etkileşme tesir kesiti  $nA\sigma dx$  olur. Gelen ışın demetindeki parçacık sayısı  $N$  ise, levhadaki çekirdeklerle etkileşen parçacık sayısı  $dN$  olur. Buradan,  $F$  alan kesri hesaplanabilir.

$$F = \frac{dN}{N} = \frac{n\sigma Adx}{A} \quad (2.10)$$

$$F = n\sigma dx \quad (2.11)$$

Bu alan kesri  $I$  şiddetine sahip ışın demetinin ince bir levhadan geçerken ışın demetinin şiddetinde oluşan farkın kesrini ifade eder. Buna göre şiddetteki  $dI$  değişimi;

$$dI = -(n\sigma dx)I_0 \quad (2.12)$$

bağıntısı ile verilir.

Eşitlikteki (-) işareti  $x$  kalınlığı arttıkça  $I$  şiddetinde azalma olacağını ifade eder. Bütün bu ifadelerden sonra (2.13) yazılabilir (James, 2006).

$$I = I_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.13)$$

Burada, gelen ışın demetinin etkileşime başlamadan önceki şiddeti  $I_0$ , ışın demetinin  $x$  kalınlığındaki malzemeyi geçtikten sonraki şiddeti ise  $I$ 'dir. Işın demetindeki parçacık sayısı demetin şiddeti ile orantılı olduğundan (2.13) bağıntısı gelen parçacık sayısı ve etkileşimdeki parçacıkların sayısı olarak yazılabilir. Buna göre (2.14) eşitliği yazılabilir.

$$N = N_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.14)$$

Burada  $N_0$  levhaya gelen parçacıkların sayısını  $N$  ise  $x$  kalınlığındaki levhayı geçen parçacıkların sayısını temsil etmektedir.  $e^{-n\sigma x}$  ifadesinin 1'den çok küçük olduğu durumlarda ise eşitlik (2.15) kullanılabilir.

$$e^{-n\sigma x} = (1 - n\sigma x) \quad (2.15)$$

Bu ifade hem levhanın geometrik olarak çok ince olmasını hem de  $\sigma$ 'nın değerinin çok küçük olmasını temsil etmektedir. Buradan hareketle (2.14) eşitliğini tekrar yazarsak (2.16)'ü elde ederiz.

$$N = N_0 (1 - n\sigma x) \quad (2.16)$$

Buradan hareketle  $x$  kalınlığını geçerken etkileşime maruz kalan parçacıkların sayısı  $N_s$  olarak temsil edilirse (2.17) eşitliği bulunur.

$$N_s = N_0 - N \quad (2.17)$$

$N$  yerine (2.16) ifadesi yerine yazılırsa eşitliğin son hali (2.18) olur.

$$N = N_0 - N_0 n \sigma x \quad (2.18)$$

Sonuç olarak tesir kesiti ifadesi için (2.19) bağıntısı yazılır.

$$\sigma = \frac{N_s}{N_0 n x} \quad (2.19)$$

Birimi barn ( $\text{cm}^2$ )'dir. 1 barn  $10^{-24} \text{ cm}^2$ 'dir. İncelenen etkileşme olayının doğasına göre hedefin birim yüzey alanından küçük veya büyük olabilmektedir.

$n\sigma$  ise makroskobik tesir kesiti olarak bilinir ve  $\Sigma$  ile temsil edilir. Gama ışınları için makroskobik tesir kesiti  $\Sigma$  yerine  $\mu$  ile gösterilir ve lineer azaltma katsayısı olarak tanımlanır (Beiser, 2003).

Işık demeti (foton) hedef materyal üzerine geldiğinde ışık demeti hedeften saçılabilir, yansiyabilir, hedef materyal tarafından soğurulabilir, çift oluşumu veya fotoelektrik olay oluşabilir. Meydana gelebilecek bu olayların tesir kesiti toplamlarına toplam tesir kesiti denir (Hubbell, 1989). Foton etkileşimleri nedeni ile oluşabilecek tesir kesitleri (2.20)'de verilmiştir. Bunların toplamı toplam tesir kesitini temsil eder.

$$\sigma_{TOP} = \sigma_{FE} + \sigma_{KOH.} + \sigma_{INKOH.} + \sigma_{ÇİFT} + \sigma_{ÜÇLÜ} + \sigma_{FNÜK.} \quad (2.20)$$

Eşitlik (2.19)'da sırasıyla verilen fotoelektrik tesir kesiti, koherent (Compton) tesir kesiti, inkoherent (Rayleigh) tesir kesiti, çift oluşum tesir kesiti, üçlü oluşum (triplet) tesir kesiti ve fotonükleer tesir kesitlerinin toplamı toplam tesir kesitini oluşturmaktadır.

## 2.7. İyonlaştırıcı Radyasyon Zırhlama Parametreleri

Bu kısımda iyonlaştırıcı radyasyonu zırhlamada kullanılan bazı parametreler sunulmuştur.

### 2.7.1. Lineer Azaltma Katsayısı

Lineer azaltma katsayısı ( $\mu$ ), bir malzemenin birim kalınlığı başına tek enerjili bir ışında azaltılmış gelen fotonların oranını açıklayan bir sabittir. Birimi  $\text{cm}^{-1}$ 'dir. Lineer azaltma katsayısı, artan atom numarası ve soğurucu malzemenin artan fiziksel yoğunluğu ile artar. Soğurma kıyıları hariç, artan foton enerjisi ile azalır (Eves vd., 2021). Fotoelektrik etki, Compton saçılması, çift oluşumu gibi tüm etkileşimler bu katsayıyı etkilemektedir. Bir malzemenin  $x$  kalınlığında azalan ışının şiddeti (2.21) denklemi ile verilir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.21)$$

Bu denklemde  $I_0$  ışın demetinin başlangıçtaki değerini,  $x$  kalınlığını geçen ışın demetinin şiddetini,  $\mu$  ise lineer azaltma katsayısı temsil etmektedir. (2.20) bağıntısında her iki tarafın logaritması alınırsa, (2.22) eşitliği elde edilir.

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{x} \quad (2.22)$$

### 2.7.2. Kütle Azaltma Katsayısı

Malzemelerin farklı faz durumlarındaki özgül ağırlık değerlerinin farklı olabilmesi lineer azaltma katsayısının malzemeye has sabit bir değer almasını ve iyi yorumlanmasını engellemektedir. Bu nedenle malzemeler sahip olduğu lineer azaltma katsayıları tam olarak karşılaştırılamamaktadır. Tespit edilen lineer azaltma katsayısının malzeme yoğunluğuna oranı kütle azaltma katsayısı vermektedir. Ayrıca aşağıdaki matematiksel ifade ile direkt deneysel olarak belirlenebilir. Bu yöntem sayesinde elementlerin, bileşiklerin, alaşımların veya kompozit malzemelerin radyasyon koruyuculuğu hakkında

daha net yorum yapılabilir. Eşitlik 2.23’de kütle azaltma katsayısı için matematiksel ifade verilmiştir (Knoll, 2002).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho x} \quad (2.23)$$

Bu eşitlikte  $\mu_m$  kütle azaltma katsayısını,  $\mu$  lineer azaltma katsayısını,  $\rho$  malzemenin yoğunluğunu temsil eder. Kütle azaltma katsayısı, malzemenin fiziksel özelliklerden bağımsızdır ve doğrudan malzemenin radyasyona karşı tutumunu ifade etmektedir. Bu değer, gelen radyasyonun enerjisi ve malzemenin atom numarasına göre değişkenlik gösterir. Kullanılan malzemenin atom numarası ile doğru orantılıdır. Nükleer teknolojinin kullanıldığı her alanda radyasyon korumayı sağlamada son derece önemli bir göstergedir. Kullanılan malzemeler için ayırt edicidir.

Birden fazla elementten meydana gelmiş kompozit bir malzemenin kütle azaltma katsayısı her bir elementin kütle azaltma katsayılarının ağırlık kesrine göre toplamıdır (Polat and İçelli, 2010).

$$\mu_m = \sum_i W_i (\mu_m)_i \quad (2.24)$$

Burada  $w_i$  i. elementin ağırlık kesri,  $(\mu_m)_i$  ise i. elementin kütle azaltma katsayısıdır.

### 2.7.3. Etkin Atom Numarası

İçeriğinde birden fazla element barındıran malzemenin atom numarası tek bir elementin atom numarası ile temsil edilememektedir. Bu durumda atom numarası yerine etkin atom numarası ( $Z_{\text{etk}}$ ) terimi kullanılır. Bu parametre radyasyonun var olduğu her alanda zırhlama tasarımı ve radyasyon doz hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bir maddenin kimyasal yapısı ile ilgili temel bilgileri tespit etmede referans noktası olarak tercih edilebilir. Örneğin etkin atom numarası büyük olan malzemeler genellikle yapısında inorganik bileşikler bulundurlar. Etkin atom numarası daha küçük olan malzemelerin içeriğinde genellikle organik bileşikler bulunur. (Manohara vd., 2008).

Radyasyon zırlama için kullanılacak malzeme karışım, bileşik ya da alaşım formunda ise malzemenin zırlama yeteğinin tespit edilebilmesi için etkin atom numarasının hesaplanması zorunlu bir hal almaktadır (Murty and Cooper 1999).

Foton etkileşim tesir kesiti için, fotonun sahip olduğu enerjiye karşı kullanılan malzemenin atom numarası ile ilişkilendirilen grafikler çizilebilir. Farklı oranlarda farklı elementleri ihtiva eden kompozit bir malzemenin iyonlaştırıcı radyasyonla etkileşimini ifade etmede etkin atom numarası kullanılmaktadır. Etkin atom numarası, malzemenin içeriğinde bulunan elementlerin atom sayısına bağlıdır.

İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşiminde sıklıkla kullanılan etkin atom numarası, radyasyon doz hesaplamalarında, radyasyon azaltma parametrelerini belirlemede ve Kerna hesaplamalarında aktif olarak kullanılır (Manjunathaguru ve Umesh 2009). Etkin atom numarası etkin atomik ve elektronik tesir kesitleri yardımı ile belirlenebilir. Atomik tesir kesiti ise etkin moleküler tesir kesiti yardımı ile belirlenebilir (Wang vd., 2014).

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{N} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{malzeme} \sum_i (n_i A_i) \quad (2.25)$$

(2.25)'da ifade edilen bağıntıda  $\sigma_{t,m}$  toplam moleküler tesir kesitini,  $A_i$  malzemedeki atomlara ait atom ağırlığını,  $n_i$  malzemeyi oluşturan atomlarının sayısını,  $N$  Avogadro sayısını,  $\left( \frac{\mu}{\rho} \right)_c$  malzemenin kütle azaltma katsayısını temsil eder. Atomik tesir kesiti ise denklem (2.26) ile hesaplanabilir.

$$\sigma_{t,a} = \frac{\sigma_{t,m}}{\sum_i n_i} \quad (2.26)$$

Denklem (2.26)'te yer alan  $\sigma_{t,a}$  toplam atomik tesir kesitini,  $\sigma_{t,m}$  toplam moleküler tesir kesitini,  $n_i$  malzemedeki toplam atom sayısını ifade eder. Toplam elektronik tesir kesiti denklem (2.27) ile belirlenebilir.

$$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2.27)$$

Denklem (2.27)'da yer alan  $\sigma_{t,e}$  toplam elektronik tesir kesitini,  $A_i$  malzeme içerisindeki  $i$  elementinin atom ağırlığını,  $Z_i$  malzeme içerisindeki  $i$ . elementin atom numarası,  $f_i$  malzeme içerisindeki  $i$ . elementinin bolluk kesrini,  $\left( \frac{\mu}{\rho} \right)_i$  malzeme içindeki  $i$ . elementin kütle azaltma katsayısını temsil eder.

Birden fazla elementten meydana gelmiş bir materyal için etkin atom numarası ( $Z_{etk}$ ), (2.26) eşitliğinde verilen toplam atomik tesir kesiti ( $\sigma_{t,a}$ )'nin (2.27) eşitliği ile verilen toplam elektronik tesir kesitine ( $\sigma_{t,e}$ ) oranından hesaplanabilir (Singh vd., 2007).

$$Z_{etk} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \quad (2.28)$$

Denklem (2.28)'den görüleceği gibi etkin atom numarasının tespit edilebilmesi için moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitinin hesaplanması gerekmektedir. (Singh vd., 2007).

#### 2.7.4. Yarı Kalınlık Değeri (YKD)

Başlangıçtaki gama ışını veya X-ışınının şiddetini yarıya düşürecek olan soğurucu malzeme kalınlığı yarı kalınlık değeri olarak adlandırılır ve lineer azaltma katsayısı yardımı ile hesaplanır.

$$YKD = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.29)$$



### 2.7.5. Onda-Bir Kalınlık Değeri (OKD)

Radyasyona neden olan başlangıçtaki gama ışını veya X-ışınının şiddetini  $1/10$ 'a düşürecek olan soğurucu malzeme kalınlığına onda-bir kalınlık değeri olarak adlandırılır ve lineer azaltma katsayısı yardımı ile hesaplanır.

$$OKD = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2,303}{\mu} \quad (2.30)$$

### 2.7.6. Ortalama Serbest Yol

Başlangıçta maruz kalınan radyasyon şiddetini % 36,8'e düşüren malzeme kalınlığı, ortalama serbest yol olarak bilinir (Ağar vd., 2019). Başka bir ifade ile ortalama serbest yol, fotonun hedef malzemenin atomları ile yaptığı çarpışmalar sırasında bir fotonun kat ettiği ortalama mesafedir. Malzemenin ortalama serbest yolu (OSY) lineer azaltma katsayısı yardımı belirlenir. OSY değeri eşitlik (2.30) yardımı ile hesaplanabilir.

$$OSY = \frac{1}{\mu} \quad (2.31)$$

### 2.7.7. Radyasyon Koruma Verimliliği

Zırhlamada tercih edilecek malzemenin tespitinde önemli bir diğer parametre radyasyon koruma verimliliğidir (RKV). Başlangıçtaki radyasyon şiddeti ve zırhlama malzemesini geçen radyasyon şiddeti yardımı ile hesaplanır.

$$RKV(\%) = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad (2.32)$$

(2.32) eşitliğinde,  $I$  son durumdaki radyasyon şiddetini,  $I_0$  başlangıçtaki radyasyon şiddetini temsil eder.

## 2.8. Hızlı Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti

Nötronun madde ile etkileşim içinde bulunma olasılığını belirten parametrelerden biri hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ( $\Sigma_R$ ) olarak adlandırılır. Mikroskobik tesir kesiti ( $\sigma$ ) bir nötron ile bir atomun etkileşimde bulunma ihtimalidir ve birimi barn'dır ( $1 \text{ barn}=10^{-24} \text{ cm}^2$ ). Makroskobik tesir kesiti ( $\Sigma$ ) ise bir nötronun N adet atomla etkileşime girme olasılığıdır. Makroskobik tesir kesitinin birimi ise mikroskobik tesir kesitinden farklı olup  $1/\text{cm}$ 'dir. (2.33) eşitliği ile ifade edilir.

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.33)$$

Nötronların atomlarla ile etkileşme ihtimali, nötron enerjisi artıkça hızlı bir şekilde azalır. Toplam makroskobik tesir kesiti her bir etkileşmenin mikroskobik tesir kesitlerinin toplamına da eşittir.

Gamma ışınları için hesaplanan lineer azaltma katsayısına benzer olarak, nötron için de lineer azaltma katsayısı yazılabilir. Soğurucu kalınlığının artması ile malzemeden geçen nötron sayısının üstel olarak azalacağı gözlemlenecektir. Teorik olarak sadece  $\mu$  yerine  $\Sigma$  yazmak yeterli olacaktır. Bu nedenle lineer azaltma katsayısı (2.34) eşitliği gibi yazılabilir (Wood, 1982).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\Sigma_{\text{top}} x} \quad (2.34)$$

Nötron radyasyonu zırlama hesaplamalarında elektromanyetik radyasyonu zırlama hesabına benzer olarak azalma üstel olmaktadır. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ( $\Sigma_R$ ), hızlı veya yüksek enerjili bir nötronun, madde içine geçebilen nötron akısından ayrılacak bir çarpışmayı yapma olasılığıdır. Yani gelen ilk nötronların uzaklaştırılması ile ilgili bir parametredir. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin hesaplanması sonucu hızlı nötronların uzaklaştırma hesaplamaları için yaklaşık bir metot geliştirilmiştir.

Toplam nötron tesir kesiti (T) soğurma ve saçılma sonucu oluşan nötron etkileşim tesir kesitlerinin toplamıdır. Oluşan tüm bu etkileşimler, nötron soğurma ile sonuçlanmaz. Bu nedenle  $\Sigma_R < T$  olmaktadır. Bu yöntemde hidrojenle etkileşimleri soğurmaya eşit kabul ederek  $\Sigma_R = T$  olarak ele alınır (El-Sayed ve Abdo, 2002). Literatürdeki çalışmalara göre 2 ile 12 MeV enerji aralığındaki nötronlar için etkin azaltma tesir kesitinin yaklaşık olarak sabit olduğu düşünülmektedir (Kaplan 1989).

Bileşik veya karışımlar için  $\Sigma_R$  (2.35) belirtilen eşitliğe göre ile hesaplanmaktadır (Kaplan, 1989; Wood, 1982).

$$\Sigma_R = \sum \rho_i \left( \frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i \quad (2.35)$$

Bu eşitliğe  $\Sigma_R$  hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitini,  $\rho_i$  i. elementin kısmi yoğunluğunu,  $\left( \frac{\Sigma}{\rho} \right)_i$  de, i. elementin kütle uzaklaştırma tesir kesidini temsil eder.

## 2.9. Betonun Bazı Mekanik Özellikleri

**Basınç Dayanımı :** Beton, belli bir bekleme süresini (kür süresi) geçirdikten sonra sertleşmeye başlar. Sertleştikten sonra betonun üzerine gelen yüklerin neden olabileceği şekil değişikliği ve kırılmaya karşı gösterdiği maksimum direnç beton basınç dayanımı olarak adlandırılır. Basınç dayanımlarını dikkate alarak betonları normal ve yüksek dayanımlı betonlar olarak 2 gruba ayrılır. Yüksek basınç dayanımlı betonlar genellikle köprü ve çok katlı binaların yapımında kullanılır. Basınç dayanımı düşük olan bir betonda su geçirgenliği fazla olmaktadır. Beton üretilirken kullanılan çimento/su oranı, çimento yapısı, kürlenme süreleri gibi etkenler betonun basınç dayanımını etkilemektedir. Betonun farklı kürlenme süresi dikkate alınır. Betonun, ilk gün basınç dayanımı % 16, 7. Gün % 40, 28. gün ise % 99 civarı olmaktadır. 28. günden sonra betonun basınç dayanımında ciddi bir artış olmamaktadır. Betonun basınç dayanımı eşitlik (2.36)'a göre hesaplanmaktadır. Birimi MPa'dır.

$$\sigma(MPa) = \frac{P}{A} \quad (2.36)$$

denklemden P kırılma kuvvetini (N) ve A numunenin yüzeyinin alanı (m<sup>2</sup>) temsil etmektedir.

**Ultra Ses Geçiş Hızı :** Ultrases dalgalarının testi yapılacak örnek içine probalar (bir alıcı, bir verici) yardımıyla, ses dalgaları demetler halinde gönderilir. Bu sayede örnek veya binanın iç yapısının özelliğine göre farklılık, geçen ultrases dalgalarının değişimlerine göre betonun kusurlarının veya donatılarının belirlendiği tekniğe ultrases geçiş hızı yöntemi denmektedir.

Ultra ses geçiş hızı yöntemi betonda tahribata yol açmayan bir deney yöntemidir. Hataların veya eksikliklerin tespit edilmesinde kullanılır. Çok kalın olan beton örneklerinde bile güvenilir sonuçlar vermektedir. Çok küçük hataların bile tespit edilmesini sağladığı ve güvenilir olduğu için diğer tahribatsız yöntemlere göre daha çok tercih edilir. (2.37)'de verilen eşitliğe göre hesaplanır.

$$v = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (2.37)$$

Bu denklemde v ses geçiş hızını (m/s), L ses dalgalarının geçiş mesafesini (m) ve t ise ses dalgalarının geçiş süresini (μs) göstermektedir (Mahmoud vd., 2018).

**Schmidt Yüzey Sertliği (Schmidt Çekici) :** 1940'ların sonlarında betonun yerinde tahribatsız muayenesi için bir indeks aparatı olarak geliştirilen Schmidt çekici, 1960'ların başından beri kaya mekaniği pratiğinde, esas olarak tek eksenli basınç dayanımını ve Young modülünü (Elastisite) tahmin etmek için kullanılmaktadır. Uzun geçmişi ve yaygın kullanımı göz önüne alındığında, Schmidt çekiç testi için standart yöntemlerin ( ISRM, 1978a , ASTM 2001) belirli bir kaya türü veya beton türü için tutarlı ve güvenilir değerler ve tekrarlanabilir korelasyonlar sağlamadığı bilinmektedir.

Schmidt çekici (yay yüklü bir pistonun oluşur) bir yüzeye dikey olarak bastırıldığında, piston otomatik olarak serbest kalır. Pistonun darbe enerjisinin bir kısmı büyük ölçüde absorpsiyon (kaya malzemesinin piston ucunun altındaki plastik kısım üzerine yapılan iş) ve dönüşüm (ısı ve sese dönüşme) tarafından tüketilir. Kalan enerji, yüzeyin darbe

penetrasyon direncini (veya sertliğini) temsil eder ve pistonun geri tepmesini sağlar. Yüzey ne kadar sertse, penetrasyon süresi (yani, daha küçük darbe) veya derinlik o kadar kısadır (yani, daha az iş veya enerji kaybı) ve geri tepme o kadar büyük olur (yani, daha küçük momentum değişimi). Geri sekmeden sonra pistonun kat ettiği mesafe (anahtar yayının ilk uzamasının yüzdesi olarak ifade edilir), yüzey sertliğinin bir indeksi olarak kabul edilen geri tepme değeri ( $R$ ) olarak adlandırılır (Basu ve Aydın, 2004).

**Yoğunluk :** Numunelerin yoğunluklarının belirlenmesi için birim hacim ağırlık deneyi ASTM C 597'e göre yapılacaktır. Numuneler deneyden önce 0,0001 g hassasiyete sahip terazi kullanılarak tartılarak ve birim ağırlıkları hesaplanmıştır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. GEANT4 Simülasyon Kodu

GEANT4 (GEometry AND Tracking version 4), parçacıkların madde içinden geçişini tasvir eden bir simülasyon kodudur. C++ programlama dilini kullanmaktadır. GEANT4, hem modelleme için hem de içeriği özelleştirilmiş farklı enerjilerde elektromanyetik ve hadronik etkileşimleri simüle edebilen birçok paket sunmaktadır. Düşük enerji aralığından (elektron volt mertebesi) çok yüksek enerji aralığına kadar (Teraelektron volt mertebesi) güvenilir sonuçlar vermektedir. Günümüzde birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Büyük ölçekli yüksek enerji ve nükleer fizik deneylerinin yanı sıra daha küçük ölçekli dedektörler de araştırma-geliştirme projelerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Parçacık fiziği, nükleer fizik, optik, hızlandırıcı tasarımı, uzay mühendisliği gibi alanlarda kullanılmaktadır. GEANT4'ün ATLAS, BaBar, CMS, HARP, LHC, LHCb, BES III, DUNE, Müon g-2 gibi dünya çapında olan fizik deneylerine önemli katkısı olmuştur.

GEANT4, geometri işleme, izleme, dedektör tepkisi, çalışma yönetimi, görselleştirme için olanaklar içermektedir. Birçok fizik simülasyonu için bu olanaklar, düşük seviyeli ayrıntılara daha az zaman harcanması gerektiği ve araştırmacıların simülasyonun daha önemli yönlerine hemen başlayabilmeleri anlamına gelmektedir. Bu yönü ile GEANT4, araştırmacılara ciddi avantajlar sağlamaktadır (Allison vd., 2016).

**Geometri İşleme :** Geometri işleme, dedektörler, soğurucular vb. dahil olmak üzere deneyin fiziksel düzeninin ve bu düzenin deneydeki parçacıkların yolunu nasıl etkileyeceğini dikkate alan bir analizdir.

**İzleme :** İzleme , bir parçacığın madde içinden geçişini simüle etmektir.

**Detektör tepkisi :** Bir parçacık tasvir edilen detektör yapısından geçtiğinde kayıt yapmakta ve gerçek bir detektörün nasıl tepki vereceğini tahmin etmesidir.

**Çalıştırma yöntemi :** Çalıştırma yönetimi, her çalıştırmanın (bir dizi olayın ) ayrıntılarını kaydetmenin yanı sıra, denemeyi çalıştırmalar arasında farklı yapılandırmalarda ayarlamadır.

**Görselleştirme :** GEANT4, görselleştirme için OpenGL ve Tcsh tabanlı tanınık bir kullanıcı arabirimi dahil olmak üzere bir dizi seçenek sunar. GEANT4 temel histogramlama yapabilir. Gelişmiş histogramlama özelliklerinden yararlanmak için harici analiz araçları veya yazılımları gerektirir.

### 3.1.1. GEANT4 Kullanımı

Öncelikle bu simülasyon kodunu kullanabilmek için Linux veya Ubuntu işletim sistemlerinin bilgisayara yüklü olması gerekmektedir. Bu kısımda GEANT4 simülasyon kodu kullanılarak yapılan kütle azaltma hesaplamaları adım adım anlatılacaktır. Programın amaca hizmet edebilmesi için öncelikle enerji ve materyalin içeriğindeki bileşenlerin tanımlamalarının eksiksiz yapılması gerekmektedir. Tanımlamalar yapıldıktan hangi malzemeyi kullanacaksak malzemenin adını çağrıştıracak bir dosya açılır.

Gama için examples/elektromanyetik klasöründe yer alan. TestEm13 dosyası içerisinde yer alan ‘PrimaryGeneratorAction.cc’ veri tanımlama dosyası içerisinde kullanılacak olan radyasyon türü (gamma) ile parçağın veya ışının enerjisi tanımlanır. Nötron için aynı işlemler yapılır. Sadece nötronda dosya adı examples/hadronic olur. Aşağıda yapılan çalışmalardan bir örnek bulunmaktadır.

```
// $Id: PrimaryGeneratorAction.cc,v 1.2 2022-01-29 16:44:45 gunter Exp $
// GEANT4 tag $Name: geant4-09-04-patch-01 $
= G4ParticleTable::GetParticleTable()->FindParticle("gamma");
particleGun->SetParticleDefinition(particle);
particleGun->SetParticleEnergy(276*keV);
```

Daha sonraki kısımda yine TestEm13 içerisinde bulunan “DetectorConstruction.cc” dosyasını açarız. Burada kullanılacak olan materyalin veya elementlerin tanımlaması yapılır. Materyalin içeriğindeki elementin adı, simgesi, atom numarası, atom ağırlığı

yazılır. Materyale bir kod verilerek materyalin yoğunluğu ve elementlerin materyal içerisindeki yüzde olarak ağırlığı programa girilir. Son olarak materyalin kalınlığı tanımlanır. Programı çalıştırmak için ./TestEm13 komutu uç birimden girilir. Daha sonra Run/beamon/ komutu ile de istediğimiz sayıda foton hedef materyal üzerine gönderilir. Düzenlenen 'DetectorConstruction.cc' veri dosyasına bir örnek ve Run/beamon/ komutu ile dosya çalıştırıldıktan sonra elde edilen sonuç dosyası aşağıda verilmiştir.

*The Box is 1 cm of B20*

*Material: B20 density: 2.2774 g/cm<sup>3</sup> RadL: 5.371 cm*

*Nucl.Int.Length: 31.591 cm*

*Imean: 167.647 eV temperature: 293.15 K pressure: 1.00 atm*

```

---> Element: Oxygen (O) Z = 8.0 N = 16 A = 16.000 g/mole
    ---> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.757 %
    ---> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.038 %
    ---> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.205 %
    ElmMassFraction: 29.71 % ElmAbundance 52.01 %
---> Element: Sodium (Na) Z = 11.0 N = 23 A = 22.990 g/mole
    ---> Isotope: Na23 Z = 11 N = 23 A = 22.99 g/mole abundance: 100.000 %
    ElmMassFraction: 0.54 % ElmAbundance 0.66 %
---> Element: Magnezyum (Mg) Z = 12.0 N = 24 A = 24.312 g/mole
    ---> Isotope: Mg24 Z = 12 N = 24 A = 23.99 g/mole abundance: 78.990 %
    ---> Isotope: Mg25 Z = 12 N = 25 A = 24.99 g/mole abundance: 10.000 %
    ---> Isotope: Mg26 Z = 12 N = 26 A = 25.98 g/mole abundance: 11.010 %
    ElmMassFraction: 0.83 % ElmAbundance 0.96 %
---> Element: Alüminyum (Al) Z = 13.0 N = 27 A = 26.981 g/mole
    ---> Isotope: Al27 Z = 13 N = 27 A = 26.98 g/mole abundance: 100.000 %
    ElmMassFraction: 2.50 % ElmAbundance 2.60 %
---> Element: Silisyum (Si) Z = 14.0 N = 28 A = 28.085 g/mole
    ---> Isotope: Si28 Z = 14 N = 28 A = 27.98 g/mole abundance: 92.230 %
    ---> Isotope: Si29 Z = 14 N = 29 A = 28.98 g/mole abundance: 4.683 %
    ---> Isotope: Si30 Z = 14 N = 30 A = 29.97 g/mole abundance: 3.087 %
    ElmMassFraction: 7.96 % ElmAbundance 7.94 %
---> Element: kükürt (S) Z = 16.0 N = 32 A = 32.065 g/mole
    ---> Isotope: S32 Z = 16 N = 32 A = 31.97 g/mole abundance: 94.930 %
    ---> Isotope: S33 Z = 16 N = 33 A = 32.97 g/mole abundance: 0.760 %
    ---> Isotope: S34 Z = 16 N = 34 A = 33.97 g/mole abundance: 4.290 %
    ---> Isotope: S36 Z = 16 N = 36 A = 35.97 g/mole abundance: 0.020 %
    ElmMassFraction: 0.96 % ElmAbundance 0.84 %
---> Element: Potasyum (K) Z = 19.0 N = 39 A = 39.098 g/mole
    ---> Isotope: K39 Z = 19 N = 39 A = 38.96 g/mole abundance: 93.258 %
    ---> Isotope: K40 Z = 19 N = 40 A = 39.96 g/mole abundance: 0.012 %
    ---> Isotope: K41 Z = 19 N = 41 A = 40.96 g/mole abundance: 6.730 %
    ElmMassFraction: 0.56 % ElmAbundance 0.40 %
---> Element: Kalsiyum (Ca) Z = 20.0 N = 40 A = 40.078 g/mole
    ---> Isotope: Ca40 Z = 20 N = 40 A = 39.96 g/mole abundance: 96.941 %
    ---> Isotope: Ca42 Z = 20 N = 42 A = 41.96 g/mole abundance: 0.647 %

```



```

---> Isotope: Ca43  Z = 20  N = 43  A = 42.96 g/mole  abundance: 0.135 %
---> Isotope: Ca44  Z = 20  N = 44  A = 43.96 g/mole  abundance: 2.086 %
---> Isotope: Ca46  Z = 20  N = 46  A = 45.95 g/mole  abundance: 0.004 %
---> Isotope: Ca48  Z = 20  N = 48  A = 47.95 g/mole  abundance: 0.187 %
    ElmMassFraction: 38.35 % ElmAbundance 26.80 %
---> Element: Demir (Fe)  Z = 26.0  N = 56  A = 55.845 g/mole
---> Isotope: Fe54  Z = 26  N = 54  A = 53.94 g/mole  abundance: 5.845 %
---> Isotope: Fe56  Z = 26  N = 56  A = 55.93 g/mole  abundance: 91.754 %
---> Isotope: Fe57  Z = 26  N = 57  A = 56.94 g/mole  abundance: 2.119 %
---> Isotope: Fe58  Z = 26  N = 58  A = 57.93 g/mole  abundance: 0.282 %
    ElmMassFraction: 1.92 % ElmAbundance 0.96 %
---> Element: Bakır (Cu)  Z = 29.0  N = 64  A = 63.546 g/mole
---> Isotope: Cu63  Z = 29  N = 63  A = 62.93 g/mole  abundance: 69.170 %
---> Isotope: Cu65  Z = 29  N = 65  A = 64.93 g/mole  abundance: 30.830 %
    ElmMassFraction: 14.17 % ElmAbundance 6.24 %
---> Element: Kalay (Sn)  Z = 50.0  N = 119  A = 118.710 g/mole
---> Isotope: Sn112  Z = 50  N = 112  A = 111.91 g/mole  abundance: 0.970 %
---> Isotope: Sn114  Z = 50  N = 114  A = 113.90 g/mole  abundance: 0.660 %
---> Isotope: Sn115  Z = 50  N = 115  A = 114.90 g/mole  abundance: 0.340 %
---> Isotope: Sn116  Z = 50  N = 116  A = 115.90 g/mole  abundance: 14.540 %
---> Isotope: Sn117  Z = 50  N = 117  A = 116.90 g/mole  abundance: 7.680 %
---> Isotope: Sn118  Z = 50  N = 118  A = 117.90 g/mole  abundance: 24.220 %
---> Isotope: Sn119  Z = 50  N = 119  A = 118.90 g/mole  abundance: 8.590 %
---> Isotope: Sn120  Z = 50  N = 120  A = 119.90 g/mole  abundance: 32.580 %
---> Isotope: Sn122  Z = 50  N = 122  A = 121.90 g/mole  abundance: 4.630 %
---> Isotope: Sn124  Z = 50  N = 124  A = 123.91 g/mole  abundance: 5.790 %
    ElmMassFraction: 2.50 % ElmAbundance 0.59 %

```

Idle> /run/beamOn 10000000

===== run summary

The run is: 10000000 gamma of 276 keV through 1 cm of B20 (density: 2.2774 g/cm<sup>3</sup>)  
 Process calls frequency ---> Transportation = 6782686 compt = 3048314 phot = 169000

Nb of incident particles unaltered after 1 cm of B20 : 6782686 over 10000000 incident particles. Ratio = 67.827 %

---> CrossSection per mass: **11.57 mm<sup>2</sup>/g**

Verification from G4EmCalculator:

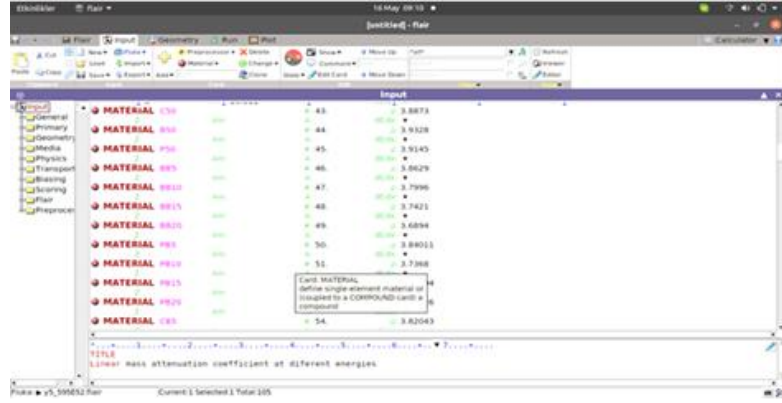
compt= 10.906 mm<sup>2</sup>/g phot= 577.32 um<sup>2</sup>/mg total= 11.583 mm<sup>2</sup>/g  
 Expected ratio of transmitted particles= 67.86 %

### 3.2. FLUKA Simülasyon Kodu

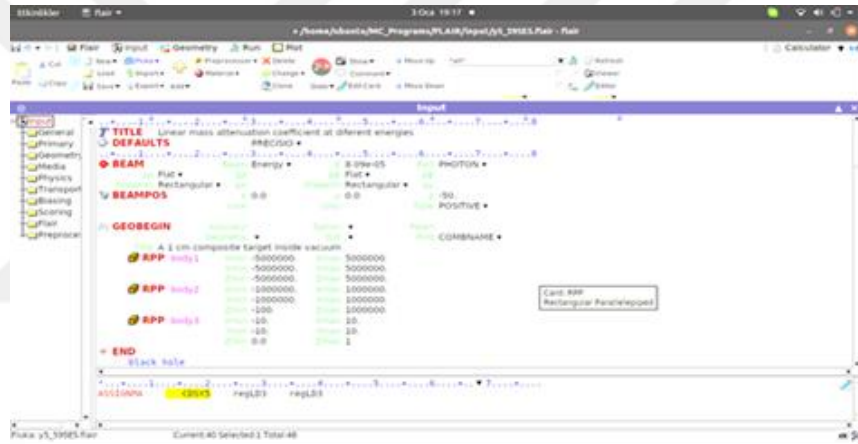
FLUKA kodu hadronların, ağır iyonların ve elektromanyetik parçacıkların veya ışınların malzeme ile etkileşimini ve taşınmasını simüle eden genel amaçlı bir Monte Carlo kodudur. Avrupa Nükleer Araştırma Örgütü (CERN) ve İtalyan Nükleer Fizik Enstitüsü (INFN) tarafından ortaklaşa geliştirilmiştir. Fortran programlama dilinde yazılan ve Linux işletim sisteminde kullanılan FLUKA kodu, parçacık taşınmasını ve parçacıkların madde ile etkileşimini hesaplamak için geliştirilmiştir. FLUKA kodu, herhangi bir hedefte elektromanyetik ve hadronik etkileşimleri ve parçacık taşınmasını fotonlar ve elektronlar da dahil olmak üzere 60 farklı parçacık-malzeme için etkileşimi simüle edebilir. Kod genellikle nükleer fizik ile ilgili güncel çalışmalarda kullanılır. Bunlardan bazıları dedektör tasarımı, hedef tasarımı, doz ve zırlama hesaplamalarıdır (Böhlen vd, 2014).

FLUKA'nın tasarımında ve geliştirilmesinde birinci öncelik her zaman modern fiziğin uygulamalarıdır. Mümkün olduğunca mikroskobik modeller benimsenir. Tutarlılık tüm reaksiyon adımları veya reaksiyon türleri için sağlanır. Korunum yasaları her adımda uygulanır. Sonuç olarak, nihai tahminler tüm enerji değerleri ve hedefler için minimum serbest parametre setini içeren kombinasyonların hesaplamalarını yapmaktadır. FLUKA, 100 eV ila binlerce TeV enerjiye sahip nötron, nötrino, müon, hadronlar, ağır iyonlar, karşıt parçacıklar gibi parçacıkların etkileşimini yüksek doğrulukla simüle eder. FLUKA kodu aynı zamanda polarize olmuş fotonları da simüle edebilir (örn. senkrotron radyasyonu). Kararsız artık çekirdeklerden yayılan radyasyonun tahmin edilmesine yardımcı olabilir.

FLUKA'nın geliştirilmiş bir sürümünü kullanarak çok karmaşık geometrilerin bile üstesinden gelebilir. İyi bilinen Kombinatoryal Geometri (CG) paketi ile FLUKA CG paketi, elektrik ve manyetik alanların varlığında yüklü parçacıkları da doğru bir şekilde izlemek için tasarlanmıştır. Çoğu uygulama için kullanıcıdan programlama istemez. Kullanıcılar için çok sayıda Fortran arayüzü mevcuttur. Bu programda kullanılan FLAIR arayüzüdür. Aşağıda FLUKA'nın kullanım aşamaları ile ilgili bazı görseller Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1 FLUKA simülasyon programının kullanım aşamalarından bir gösterim. (Element, materyal ve yoğunluk tanımlanması)



Şekil 3.2 FLUKA simülasyon programının kullanım aşamalarında parçacık/ışın ve enerji tanımlanması

### 3.3. XCOM Bilgisayar Programı

XCOM 1 keV ila 100 GeV enerjilerde herhangi bir element, bileşik veya karışım ( $Z \leq 100$ ) için saçılma, fotoelektrik soğurma ve çift oluşumu için foton tesir kesitlerini ve ayrıca toplam azaltma katsayılarını hesaplamak için kullanılabilecek bir web veritabanıdır. WinXCOM ise XCOM'un windows versiyonudur. Foton tesir kesitlerine ihtiyaç duyulan malzemelerin sayısı çok fazladır ve sürekli artmaktadır. Saçılma ve soğurulma ile ilgili elde edilen veriler birçok bilimsel, mühendislik ve tıbbi uygulamada kullanılmaktadır (Storm vd., 1970).

Program, esnek olmayan saçılma, esnek saçılma, fotoelektrik soğurma ve çift oluşumu hesaplamalarında azaltma katsayılarının yanı sıra gerçekleşen olayların tesir kesit ve toplam tesir kesitlerinin değerlerini sağlamaktadır.

XCOM programını kullanabilmek için iki verinin eksiksiz girilmesi gerekmektedir. Bunlardan birincisi kullanılacak malzemenin türü (element, bileşik veya karışım,  $Z \leq 100$ ) ikincisi hangi enerji değerlerinde inceleme yapılacağı belirtilmelidir. Elementler atom numaralarına veya kimyasal sembollerine göre seçilebilir. Yalnızca atom numarası 1'den 100'e kadar olan elementler kullanılabilir.

Bileşikler için kimyasal formüller, uygun büyük ve küçük harflerle standart kimyasal gösterimde girilmelidir. Ancak, donanım kısıtlamaları nedeniyle kimyasal formüller satıra yazılmalıdır. Örneğin, potasyum sülfat formülü  $K_2SO_4$  olarak girilmelidir. Parantez, boşluk ve nokta kullanılamaz. Yalnızca tek bir atom türüne sahip moleküllerden oluşan maddeler, elementler veya bileşikler olarak belirlenebilir. Örneğin moleküler nitrojen, N sembolüne sahip bir "element" veya  $N_2$  formülüne sahip bir "bileşik" olarak ele alınabilir. Karışımlar, "temel" bileşenlerden ve/veya "bileşik" bileşenlerden oluşabilir. Sonuçları değiştirmedigi için bu bir kolaylıktır (Salamon ve Hubbell, 1987).

Kullanıcı, inceleme yapacağı materyalin içeriğindeki her bileşen için ağırlıkça yüzdesi belirtmelidir. Program daha sonra bu girdi verilerini, bireysel atomik bileşenlerin ağırlık kesirlerine her elementten gelen katkının toplamını hesaplamak için kullanır. Girdi verilerinde, ağırlıkça kesirlerin toplamı bire eşit değilse, girdi verileri kabul edilir ve program, ağırlıkça tüm kesirleri, toplamaları bir olacak şekilde yeniden normalleştirir. Çıktı sonuçlarında elde edilen değerler, elementler için  $cm^2/g$  ve barn/atom cinsinden, cinsinden sunulabilir. Bileşik veya karışımlarda ise  $cm^2/g$  cinsindendir. İstenirse bu değerlerin grafik hali de alınabilmektedir.

### 3.4. Beton Numunelerin Hazırlanması Süreci

Bu çalışmada beton numunelerin hazırlanmasında çimento, su, bronz, pirinç, paslanmaz çelik ve bor karbür ( $B_4C$ ) kullanılmıştır.

Numune üretiminde kullanılan pirinç tozu çinko ve bakırdan meydana gelen bir alaşımdır. Yoğunluğu  $8,25 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kullanılan pirinç tozunun saflık oranı en az %70 Cu-%30 Zn'dir.  $44 \mu\text{m}$  boyuta sahip pirinç tozları kullanılmıştır.

Bronz tozu ise kalay ve bakırdan meydana gelen bir alaşımdır. Yoğunluğu  $8,50\text{-}8,9 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kullanılan bronz tozunun saflık oranı %85 Cu-%15 Sn'dir.  $44 \mu\text{m}$  boyuta sahip bronz tozları kullanılmıştır.

Paslanmaz çelik tozu içerisinde %70 Fe, %16 Cr, %12 Ni ve %2 Mo barındırmaktadır. Yoğunluğu  $7,9 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kullanılan paslanmaz çelik tozunun saflık oranı %99'dur.  $250 \mu\text{m}$  boyuta sahip paslanmaz çelik tozlarının tercih edilmiştir.

Elemental bor doğada bulunmamaktadır. Endüstriyel işlemler sonunda yüksek saflıkta bor zorlukla elde edilebilir. Çünkü bor, karbon ve başka elementlerle bileşikler oluşturmaktadır. Kullanılan  $\text{B}_4\text{C}$  bileşiğinin yoğunluğu  $2,52 \text{ g/cm}^3$ 'tür.  $100 \mu\text{m}$  boyuta sahip bor karbür kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılan çimento CEM I 42.5 R tipi çimentodur. Yoğunluğu  $3,1 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Ön deneysel çalışmalar sonucu su/çimento oranı 0,4 olacak şekilde belirlenmiştir.

Mekanik testler için  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  ölçüsünde numuneler üretilmiştir. Her bir alaşım, 900 gram çimentoya, çimento ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında ikame edilmiştir. Örneğin B10 numunesinde 900 gram çimentoya, 360 gram su ve 90 gram bronz eklenmiştir. Her numunedan 3'er adet olmak üzere 45 adet numune üretilmiştir. Katkısız olarak da 3 adet numune olmak üzere mekanik testler için toplam 48 adet  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  beton numunesi (15 adet bronz katkılı, 15 adet pirinç katkılı, 15 adet paslanmaz çelik katkılı) üretilmiştir. Mekanik testlerde kullanılan her bir seride 3'er adet numunenin elde edilen aritmetik ortalama değerleri baz alınmıştır. Örneğin B10 kodlu numune için elde edilen değeri, 3 adet B10 kodlu numunenin aritmetik ortalamasıdır.

Radyasyon zırhlama (Gama radyasyonu) ölçümleri için 2 cm çapında 1 cm kalınlığında silindirik geometrili 15 adet bronz katkılı beton, 15 adet pirinç katkılı beton, 15 adet paslanmaz çelik katkılı beton, 3 adet de katkısız beton olmak üzere toplam 48 adet

numune üretilmiştir. Radyasyon numunelerinde yoğunluk ölçümleri Arşimed prensibine göre yapılmıştır.

Teorik hesaplamalar WinXCOM aracılığı ile yapıldıktan sonra kütle azaltma katsayısı bakımından radyasyona karşı en iyi sonucu veren numuneler belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra en iyi sonucu veren alaşım katkılı beton numunesine, çimento ağırlığı değiştirilmeden, çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20'si oranında B<sub>4</sub>C ilavesi yapılarak 36 adet mekanik testler için, 36 adet de radyasyon (gama radyasyonu) hesaplamaları için üretilmiştir. Burada radyasyon numunelerin yoğunluğu her bir numune için aritmetik ortalama ile belirlenmiştir.

Beton hamuru yapım sürecinde homojenliğin artması için beton hamuru karıştırıcıda 6 dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında beton hamuru kalıplara dökülerek 24 saat boyunca oda şartlarında kurumaya bırakılmıştır. Numuneler kuruduktan sonra 28 gün bekleyecekleri kür havuzuna alınmıştır. Daha sonra numuneler kür havuzundan çıkartılarak 24 saat bekletildikten sonra mekanik ve radyasyon testlerine geçilmiştir. Bu süre geçtikten sonra üretilen beton numunelerin basınç dayanımı, ultra-ses geçiş hızı ve yoğunluk gibi fiziko-mekanik özellikleri analiz edilmiştir.

Radyasyon zırlama ve mekanik testler için üretilen numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları, numune yoğunlukları ve numune adlandırılmasını gösteren Tablo 3.1, Tablo 3.2, Tablo 3.3 ile üretilen numunelerin üretim aşamasındaki bazı görselleri Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.1'i açıklamak gerekirse, B30 kodlu numune çimento miktarının % 30'u kadar bronz katkısı olan numuneyi göstermektedir. B50B5 ise çimento miktarının % 50'si kadar bronz katkısı ile beraber çimento miktarının % 5'i kadar B<sub>4</sub>C katkısı olan beton numuneyi, SB ise hiçbir katkısı olmayan saf beton numuneyi (kontrol numunesi) ifade eder.

Benzer şekilde Tablo 3.2'de P10 kodlu numune çimento miktarının %10'u kadar pirinç alaşımı katkısı olan numuneyi göstermektedir. P50B10 çimento miktarının %50'si kadar pirinç alaşımı katkısı ile beraber çimento miktarının % 10'u kadar B<sub>4</sub>C katkısı olan beton

numuneyi ifade etmektedir. SB ise hiçbir katkısı olmayan saf beton numuneyi ifade eder. Tablo 3.3'te C40 kodlu numune çimento miktarının %40'u kadar paslanmaz çelik alaşımı katkısı olan numuneyi temsil etmektedir. C50B20 çimento miktarının %50'si kadar paslanmaz çelik alaşımı katkısı ile beraber çimento miktarının %20'si kadar B<sub>4</sub>C katkısı olan beton numuneyi ifade etmektedir. SB ise benzer şekilde hiçbir katkısı olmayan saf beton numuneyi (kontrol numunesi) ifade etmektedir.

Tablo 3. 1. Bronz katkılı beton numuneler ile bronz + B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları.

| Numune | Elementin Malzeme İçerisindeki Ağırlıkça Oranı (%) |        |        |        |        |        |                        |
|--------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
|        | O                                                  | Na     | Mg     | Al     | Si     | S      | K                      |
| SB     | 0,3565                                             | 0,0065 | 0,0099 | 0,0303 | 0,0953 | 0,0115 | 0,0067                 |
| B10    | 0,3212                                             | 0,0059 | 0,0090 | 0,0273 | 0,0868 | 0,0105 | 0,0061                 |
| B20    | 0,2971                                             | 0,0054 | 0,0083 | 0,0250 | 0,0796 | 0,0096 | 0,0057                 |
| B30    | 0,2743                                             | 0,0050 | 0,0077 | 0,0231 | 0,0735 | 0,0089 | 0,0051                 |
| B40    | 0,2537                                             | 0,0044 | 0,0071 | 0,0215 | 0,0681 | 0,0082 | 0,0048                 |
| B50    | 0,2377                                             | 0,0043 | 0,0066 | 0,0201 | 0,0637 | 0,0077 | 0,0045                 |
| B50B5  | 0,2304                                             | 0,0042 | 0,0064 | 0,0194 | 0,0612 | 0,0074 | 0,0043                 |
| B50B10 | 0,2229                                             | 0,0041 | 0,0062 | 0,0188 | 0,0597 | 0,0073 | 0,0042                 |
| B50B15 | 0,2161                                             | 0,0040 | 0,0060 | 0,0182 | 0,0579 | 0,0070 | 0,0041                 |
| B50B20 | 0,2097                                             | 0,0038 | 0,0059 | 0,0177 | 0,0562 | 0,0068 | 0,0039                 |
|        | Ca                                                 | Fe     | Cu     | Sn     | B      | C      | d (g/cm <sup>3</sup> ) |
| SB     | 0,4603                                             | 0,0230 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,9334                 |
| B10    | 0,4215                                             | 0,0209 | 0,0773 | 0,0105 | 0,0000 | 0,0000 | 2,2081                 |
| B20    | 0,3836                                             | 0,0192 | 0,1417 | 0,0250 | 0,0000 | 0,0000 | 2,2774                 |
| B30    | 0,3541                                             | 0,0177 | 0,1962 | 0,0346 | 0,0000 | 0,0000 | 2,4013                 |
| B40    | 0,3313                                             | 0,0150 | 0,2429 | 0,0429 | 0,0000 | 0,0000 | 2,4398                 |
| B50    | 0,3068                                             | 0,0143 | 0,2833 | 0,0510 | 0,0000 | 0,0000 | 2,5787                 |
| B50B5  | 0,2970                                             | 0,0148 | 0,2742 | 0,0484 | 0,0253 | 0,0070 | 2,3289                 |
| B50B10 | 0,2875                                             | 0,0144 | 0,2656 | 0,0469 | 0,0489 | 0,0136 | 2,2334                 |
| B50B15 | 0,2790                                             | 0,0139 | 0,2576 | 0,0455 | 0,0712 | 0,0198 | 2,1751                 |
| B50B20 | 0,2707                                             | 0,0135 | 0,2500 | 0,0441 | 0,0921 | 0,0256 | 2,0532                 |

Tablo 3. 2. Pirinç katkılı beton numuneler ile pirinç alaşımı + B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları

| Numune        | Elementin Malzeme İçerisindeki Ağırlıkça Oranı (%) |        |        |        |        |        |                        |
|---------------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
|               | O                                                  | Na     | Mg     | Al     | Si     | S      | K                      |
| <b>SB</b>     | 0,3565                                             | 0,0065 | 0,0099 | 0,0303 | 0,0953 | 0,0115 | 0,0067                 |
| <b>P10</b>    | 0,3212                                             | 0,0059 | 0,0090 | 0,0273 | 0,0868 | 0,0105 | 0,0061                 |
| <b>P20</b>    | 0,2971                                             | 0,0054 | 0,0083 | 0,0250 | 0,0796 | 0,0096 | 0,0057                 |
| <b>P30</b>    | 0,2743                                             | 0,0050 | 0,0077 | 0,0231 | 0,0735 | 0,0089 | 0,0051                 |
| <b>P40</b>    | 0,2537                                             | 0,0044 | 0,0071 | 0,0215 | 0,0681 | 0,0082 | 0,0048                 |
| <b>P50</b>    | 0,2377                                             | 0,0043 | 0,0066 | 0,0201 | 0,0637 | 0,0077 | 0,0045                 |
| <b>P50B5</b>  | 0,2304                                             | 0,0042 | 0,0064 | 0,0194 | 0,0612 | 0,0074 | 0,0043                 |
| <b>P50B10</b> | 0,2229                                             | 0,0041 | 0,0062 | 0,0188 | 0,0597 | 0,0073 | 0,0042                 |
| <b>P50B15</b> | 0,2161                                             | 0,0040 | 0,0060 | 0,0182 | 0,0579 | 0,0070 | 0,0041                 |
| <b>P50B20</b> | 0,2097                                             | 0,0038 | 0,0059 | 0,0177 | 0,0562 | 0,0068 | 0,0039                 |
|               | Ca                                                 | Fe     | Cu     | Zn     | B      | C      | d (g/cm <sup>3</sup> ) |
| <b>SB</b>     | 0,4603                                             | 0,0230 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,9334                 |
| <b>P10</b>    | 0,4215                                             | 0,0209 | 0,0637 | 0,0272 | 0,0000 | 0,0000 | 2,2169                 |
| <b>P20</b>    | 0,3836                                             | 0,0192 | 0,1167 | 0,0500 | 0,0000 | 0,0000 | 2,3197                 |
| <b>P30</b>    | 0,3541                                             | 0,0177 | 0,1615 | 0,0692 | 0,0000 | 0,0000 | 2,3613                 |
| <b>P40</b>    | 0,3313                                             | 0,0150 | 0,2000 | 0,0857 | 0,0000 | 0,0000 | 2,4068                 |
| <b>P50</b>    | 0,3068                                             | 0,0143 | 0,2333 | 0,1000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,4792                 |
| <b>P50B5</b>  | 0,2970                                             | 0,0148 | 0,2258 | 0,0967 | 0,0253 | 0,0070 | 2,3619                 |
| <b>P50B10</b> | 0,2875                                             | 0,0144 | 0,2188 | 0,0938 | 0,0489 | 0,0136 | 2,2457                 |
| <b>P50B15</b> | 0,2790                                             | 0,0139 | 0,2121 | 0,0910 | 0,0712 | 0,0198 | 2,2159                 |
| <b>P50B20</b> | 0,2707                                             | 0,0135 | 0,2059 | 0,0882 | 0,0921 | 0,0256 | 2,1555                 |

Tablo 3. 3. Paslanmaz çelik katkılı beton numuneler ile paslanmaz çelik + B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları

| Numune        | Elementin Malzeme İçerisindeki Ağırlıkça Oranı (%) |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | O                                                  | Na     | Mg     | Al     | Si     | S      | K      | Ca     |
| <b>SB</b>     | 0,3565                                             | 0,0065 | 0,0099 | 0,0303 | 0,0953 | 0,0115 | 0,0067 | 0,4603 |
| <b>C10</b>    | 0,3212                                             | 0,0059 | 0,0090 | 0,0273 | 0,0868 | 0,0105 | 0,0061 | 0,4215 |
| <b>C20</b>    | 0,2971                                             | 0,0054 | 0,0083 | 0,0250 | 0,0796 | 0,0096 | 0,0057 | 0,3836 |
| <b>C30</b>    | 0,2743                                             | 0,0050 | 0,0077 | 0,0231 | 0,0735 | 0,0089 | 0,0051 | 0,3541 |
| <b>C40</b>    | 0,2537                                             | 0,0044 | 0,0071 | 0,0215 | 0,0681 | 0,0082 | 0,0048 | 0,3313 |
| <b>C50</b>    | 0,2377                                             | 0,0043 | 0,0066 | 0,0201 | 0,0637 | 0,0077 | 0,0045 | 0,3068 |
| <b>C50B5</b>  | 0,2304                                             | 0,0042 | 0,0064 | 0,0194 | 0,0612 | 0,0074 | 0,0043 | 0,2970 |
| <b>C50B10</b> | 0,2229                                             | 0,0041 | 0,0062 | 0,0188 | 0,0597 | 0,0073 | 0,0042 | 0,2875 |
| <b>C50B15</b> | 0,2161                                             | 0,0040 | 0,0060 | 0,0182 | 0,0579 | 0,0070 | 0,0041 | 0,2790 |
| <b>C50B20</b> | 0,2097                                             | 0,0038 | 0,0059 | 0,0177 | 0,0562 | 0,0068 | 0,0039 | 0,2707 |



Tablo 3. 3. Devam Paslanmaz çelik katkılı beton numuneler ile paslanmaz çelik + B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları

|               | Fe     | Cr     | Ni     | Mo     | B      | C      | d (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| <b>SB</b>     | 0,0230 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,9334                 |
| <b>C10</b>    | 0,0846 | 0,0155 | 0,0100 | 0,0018 | 0,0000 | 0,0000 | 1,9793                 |
| <b>C20</b>    | 0,1358 | 0,0283 | 0,0183 | 0,0033 | 0,0000 | 0,0000 | 2,0138                 |
| <b>C30</b>    | 0,1792 | 0,0392 | 0,0259 | 0,0046 | 0,0000 | 0,0000 | 2,0427                 |
| <b>C40</b>    | 0,2164 | 0,0485 | 0,0314 | 0,0057 | 0,0000 | 0,0000 | 2,1106                 |
| <b>C50</b>    | 0,2487 | 0,0577 | 0,0366 | 0,0066 | 0,0000 | 0,0000 | 2,2245                 |
| <b>C50B5</b>  | 0,2407 | 0,0548 | 0,0355 | 0,0064 | 0,0253 | 0,0070 | 2,2985                 |
| <b>C50B10</b> | 0,2331 | 0,0531 | 0,0344 | 0,0063 | 0,0489 | 0,0136 | 2,2113                 |
| <b>C50B15</b> | 0,2261 | 0,0515 | 0,0333 | 0,0060 | 0,0712 | 0,0198 | 2,1369                 |
| <b>C50B20</b> | 0,2194 | 0,0500 | 0,0324 | 0,0059 | 0,0921 | 0,0256 | 2,0355                 |



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.3. (a) Kür havuzuna alınan numuneler (b) Üretim aşamasında kullanılan karıştırıcı (c) Mekanik testlerde kullanılan 5x5x5 cm ölçüsündeki kalıp örnekleri (d) Radyasyon deneylerinde kullanılan 1 cm kalınlığa sahip silindirik kalıp örnekleri



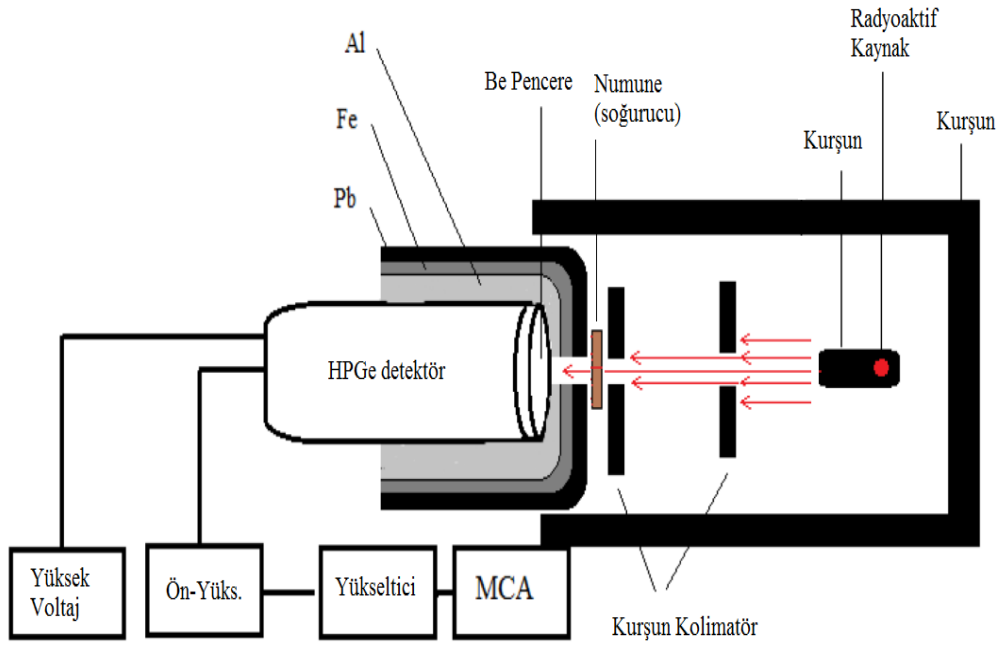
Şekil 3.4. Mekanik deneyler için üretilen numune örnekleri.



Şekil 3.5. Radyasyon zırlama ölçümleri için üretilen numunelerden örnek. (Herbir rakam bir numune kodunu temsil etmektedir).

### 3.5. Gama Radyasyonu Zırlama için Deneysel Süreç

Radyasyon zırlama parametrelerini elde etmek için belirlenen ilk parametre kütle azaltma katsayısıdır. Deneysel olarak bu parametreyi elde etmek için HPGe dedektörü kullanılmıştır. HPGe dedektör, dedektör elektroniği (yüksek voltaj kaynağı, ön-yükseltici, yükseltici ve çok kanallı analizör (MCA), numune, radyoaktif kaynak ve kolimatörlerden oluşan deney geometrisi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Deney geometrisi

Deneylerde kullanılan HPGe dedektör 25 mm kristal genişliğine ve 70 mm aktif çapa sahiptir. Dedektörün rezülasyonu 5,9 keV’de 0,380 keV, 122 keV’de 0,585 keV ve 1330 keV’de 1,8 keV’dir. Dedektör, harici bir yüksek voltaj kaynağına, ayrıca sırasıyla ön-yükseltici, yükseltici ve çok kanallı analizöre bağlıdır. Üretilen elektron-hole çiftleri yüksek voltaj kaynağı yardımı ile toplanmıştır. Elde edilen sinyal önce ön-yükselticiye ardından lineer yükselticiye ve son olarak MCA yardımıyla gelen foton enerjisiyle orantılı olarak ilgili kanala toplanmıştır. Elektronik gürültüyü azaltmak, temel sayma seviyesinin minimumda tutmak için deneyler boyunca dedektör sıvı azot sıcaklığında bir tutulmuştur.

Sistemde kullanılan kolimatörler yardımıyla dar ışın geometrisinin kurulumu sağlanmıştır. Ayrıca sandviç ile (Kurşun-demir-alüminyum kolimatörler ile) temel sayma seviyesi minimumda tutulmuştur.

Ölçümlere başlamadan önce sistem çeşitli test kaynakları ile kalibre edilerek uygun çalışma kanalı seçilmiştir. Numuneler tek tek radyoaktif kaynağın önüne koyulup dedektörde sayımlar alınmıştır. Herbir numune için 1200 saniye ölçüm alınmıştır.

Sonrasında Maestro ara yüzü ile belirlenen enerji değerindeki pik alanları belirlenmiştir ve Microcal Origin 2018 (demo versiyon) ile pik alanlarının kontrolü sağlanmıştır. Sonrasında ölçümlerden elde edilen pik alanları kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde veriler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında zırhlama için belirlenen parametrelerin deneysel ve teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen sonuçlar WinXCOM bilgisayar programı, GEANT4 ve FLUKA simülasyon paketlerinden elde edilen sonuçlar ile beraber değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları için 1 cm numune kalınlığı üzerine 10 milyon foton gönderilmiştir. Bu ölçümlere başlamadan önce üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerinin ağırlıkça yüzde oranları ve numune yoğunlukları tanımlamaları simülasyon programlarına tanıtılmıştır.

Deneysel, WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA aracılığı ile elde edilen tüm sonuçlar Microcal Origin 2018 programı (demo versiyonu) yardımı ile grafiklere dönüştürülmüştür. Tablo 3.4'te deneylerde kullanılan radyoaktif kaynakların aktiviteleri, yarı ömürleri ve foton enerjileri verilmiştir.

Tablo 3. 4. Deneylerde kullanılan radyoizotoplar ve foton enerjileri

| Kaynak            | Aktivite (kBq) | Yarı Ömür (yıl) | Enerji(keV)                              |
|-------------------|----------------|-----------------|------------------------------------------|
| <sup>22</sup> Na  | 456            | 2,60            | 511,0<br>1274,5                          |
| <sup>60</sup> Co  | 424            | 5,27            | 1173,2<br>1332,5                         |
| <sup>133</sup> Ba | 460            | 10,51           | 81,0<br>276,4<br>302,9<br>356,0<br>383,9 |
| <sup>137</sup> Cs | 473            | 30,07           | 661,7                                    |
| <sup>241</sup> Am | 460            | 432,20          | 59,5                                     |

### 3.6 Nötron Radyasyonu Zırhlama İçin Teorik Süreç

Kullanılan numuneler için nötron radyasyonu parametreleri GEANT4 ve FLUKA aracılığı ile belirlenmiştir. Hedef numune üzerine 10 milyon nötron gönderilerek simüle çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, gama radyasyonu kütle azaltma katsayısı açısından en iyi sonucu veren numunelere (B50, P50 ve C50) çimento miktarının % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında B<sub>4</sub>C ikamesi yapılmıştır. Oluşan B<sub>4</sub>C katkılı yeni numunelerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları teorik olarak, yoğunlukları ise Arşimed yöntemi ile belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerin gama radyasyonu zırhlama aşamasında olduğu gibi paket programlara tanımlamaları yapılmıştır. Sonraki aşamada B<sub>4</sub>C katkılı numunelerden 1,1 MeV, 1.5 MeV, 2 MeV, 3 MeV, 4,5 MeV, 6 MeV, 7 MeV, 8 MeV ve 10 MeV enerji değerlerinde ve 1 cm numune kalınlığı için geçen nötron sayıları belirlenmiştir. 4,5 MeV enerji değerinde 1 cm, 2,5 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm, 13 cm, 16 cm, 20 cm ve 25 cm numune kalınlığında geçen nötron sayısı ve toplam makroskopik tesir kesiti belirlendi. Ayrıca GEANT4 yardımı ile yine 4,5 MeV'de ve 1 cm numune kalınlığında ortalama serbest yol değerleri hesaplanmıştır. GEANT4 ve FLUKA simülasyon paketlerinden elde edilen değerler Microcal Origin 2018 programı (demo versiyonu) aracılığı ile grafiklere dönüştürülmüştür. Son olarak B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanmış ve sonuçlar grafiklere dönüştürülmüştür.

### 3.7 Numunelerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Üretilen tüm numunelerin yoğunluk, basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve schmidt yüzey sertliği hesaplamaları yapılmıştır. Basınç dayanımı TS EN 12390-2010'a standartlarına göre yapılmıştır. Basınç dayanımının tespiti için Bingöl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 300 tona kadar dayanıklı basınç presi kullanılmıştır. Her bir numune serisinden 3 adet üretildiği için basınç dayanımı testleri sonucunda ortalama bir değer elde edilmiştir. Şekil 3.7'de basınç dayanım deneylerinde kullanılan basınç presi görülmektedir.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan basınç presi

Ultra ses geçiş hızı için ise Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler MYO İnşaat Programı Laboratuvarında bulunan Posso cihazı kullanılmıştır. TS EN 12504-4:2012 standartlarına göre testler gerçekleştirilmiştir. Teste başlamadan her bir numunenin bir yüzü işaretlenmiştir. Yüzeyin maksimum oranda pürüzsüz ve temiz olması için yüzeyler özel bir jel ile temizlenmiştir. Her bir numune serisinden 3 adet üretildiği için ultra ses geçiş hızı deneylerinde 3 adet numunenin ortalama bir değeri elde edilmiştir. Şekil 3.8’de ultra ses geçiş hızı deneylerinde kullanılan Posso cihazı görülmektedir.



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan Posso ultra ses geçiş hızı cihazı

Schmidt yüzey sertliği için Schmidt çekici deneyleri ISRM (1981) standartları baz alınarak yapılmıştır. Üretilen 50 mm genişliğindeki numuneye Schmidt çekici ile üzerine 1 vuruş gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Bu işlem aynı özellikteki 3 adet numuneye uygulanması sonucu ortalama bir değer alınarak

belirlenmiştir. Şekil 3.9’da Schmidt yüzey sertliği deneylerinde kullanılan Schmidt çekici cihazı görülmektedir.



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan Schmidt yüzey çekici cihazı

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bronz, pirinç ve paslanmaz çelik ile belirlenen oranlarda katkılandırılmış betonun gama radyasyonu azaltma kabiliyetlerini gösteren parametreler, 1 cm numune kalınlığında ve Tablo 3.4’de verilen foton enerji değerinde deneysel, teorik (WinXCOM) ve iki farklı Monte Carlo simülasyon kodu (GEANT4 ve FLUKA) aracılığı ile incelenmiştir. İncelenen parametreler  $\mu$ ,  $\mu_m$ , YKD, OKD, OSY,  $Z_{etk}$  ve RKV olmak üzere 7 adet parametredir. Denklem (2.22) kullanılarak hesaplanan  $\mu$  değeri yardımı ile sırasıyla eşitlik (2.29), (2.30), (2.31) kullanılarak YKD, OKD, OSY parametreleri hesaplanmıştır. RKV I ve  $I_0$ ’ın bilinmesi ile hesaplanan bir parametredir.  $Z_{etk}$  denklem (2.28) kullanılarak belirlenmiştir. Bunun dışında gama radyasyonu zırlama parametrelerinde önemli bir parametre olan kütle azaltma katsayısı açısından en verimli sonucu veren numunelere B<sub>4</sub>C katkısı yapılarak üretilen numunelerin Tablo 3.4’de verilen enerji değerlerinde  $\mu$ ,  $\mu_m$ , YDK, ODK, OSY,  $Z_{etk}$  ve RKV parametreleri incelenmiştir. Sonuçlar ayrıntılı olarak Tablo 4.1-4.42’de verilmiş, elde edilen sonuçların daha anlaşılır olması amacı ile sonuçlar grafiğe dönüştürülüp karşılaştırmalar yapılmıştır. Grafikler Şekil 4.1 - 4.42’de verilmiştir.

Ayrıca seçilen farklı nötron enerji değerlerinde ve farklı numune kalınlıklarında GEANT4 ve FLUKA yardımı ile nötron geçirgenliği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo haline getirilmiş ve grafiklere dönüştürülmüştür. Üretilen B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 1 cm kalınlıkta ve 4,5 MeV nötron enerjisi değerinde ortalama serbest yol değerleri GEANT4 aracılığı ile belirlenmiştir. B<sub>4</sub>C katkılı tüm numuneler için hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçların grafikleri Origin 2018 (demo) yardımı ile elde edilmiştir.

Bütün bunlara ek olarak numune üretimi yapıldıktan sonra üretilen numunelerin yoğunlukları deneysel olarak belirlenmiştir. Bunun yanında üretilen numunelerin basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve Schmidt yüzey sertliği incelenmiş, sonuçlar tablo haline getirilerek grafiklere dönüştürülmüş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.



Üretilen numuneler için, deneysel, teorik ve simülasyon kodlarından elde edilen bulgular sırasıyla gama radyasyonu zırhlama parametreleri, nötron radyasyonu zırhlama parametreleri ve üretilen betonun fiziko-mekanik parametreleri aşağıda sunulmuştur.

#### 4.1 Kütle Azaltma Katsayılarına Ait Araştırma Bulguları

Kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısının malzemenin yoğunluğuna oranlanması ile elde edilebilir. Ayrıca denklem (2.23) ile de belirlenebilir. Lineer azaltma katsayısına göre daha çok tercih edilen bir parametredir. Gelen radyasyonun enerjisi ve malzeme içerisindeki elementlerin atom numarası ile ilişkili bir parametredir. Malzemenin hacimce veya ağırlıkça oranının tanımlandığı durumlarda malzemenin elementel bileşimi hesaplanabilir. Malzeme bileşiminde birden fazla element varsa kütle azaltma katsayısı teorik olarak karışım kuralı ile belirlenir. Bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C ile belli oranlarda katkılanmış beton numuneler için teorik kütle azaltma katsayısı değerleri karışım kuralı yardımı ile elde edilmiştir. WinXCOM programı kullanılarak belirlenen teorik değerler ile deneysel olarak elde edilen kütle azaltma katsayıları karşılaştırılmıştır. Bunun yanında Monte Carlo simülasyon kodu olan GEANT4 ve FLUKA kodları kullanılarak elde edilen kütle azaltma katsayıları ile de karşılaştırılmışlardır. Üretilen beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA yardımı ile elde edilen kütle azaltma katsayısı değerleri Tablo 4.1-4.6'da, elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir.

Tablo 4. 1. Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 0,6130±0,0136 | 0,6323 | 0,5760 | 0,6327 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,3421±0,0081 | 0,3450 | 0,3125 | 0,3452 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1123±0,0053 | 0,1145 | 0,1111 | 0,1144 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1146±0,0036 | 0,1097 | 0,1068 | 0,1096 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,0997±0,0022 | 0,1018 | 0,0999 | 0,1017 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0953±0,0055 | 0,0984 | 0,0969 | 0,0984 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0835±0,0022 | 0,0866 | 0,0861 | 0,0865 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0797±0,0017 | 0,0770 | 0,0770 | 0,0769 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0553±0,0013 | 0,0583 | 0,0583 | 0,0582 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0567±0,0014 | 0,0559 | 0,0560 | 0,0559 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0560±0,0013 | 0,0546 | 0,0547 | 0,0545 |

Tablo 4.1. Devamı Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | B20           |        |        |        | B30           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7371±0,0172 | 0,7785 | 0,7144 | 0,7793 | 0,8765±0,0241 | 0,9023 | 0,8323 | 0,9034 |
| 81,0            | 0,3932±0,0088 | 0,4053 | 0,3688 | 0,4057 | 0,4550±0,0118 | 0,4563 | 0,4168 | 0,4565 |
| 276,4           | 0,1221±0,0067 | 0,1157 | 0,1119 | 0,1155 | 0,1138±0,0064 | 0,1166 | 0,1125 | 0,1164 |
| 302,9           | 0,1147±0,0037 | 0,1104 | 0,1073 | 0,1104 | 0,1059±0,0035 | 0,1111 | 0,1077 | 0,1109 |
| 356,0           | 0,1083±0,0025 | 0,1021 | 0,0999 | 0,1020 | 0,0947±0,0022 | 0,1023 | 0,1000 | 0,1022 |
| 383,9           | 0,0976±0,0057 | 0,0986 | 0,0968 | 0,0985 | 0,1038±0,0055 | 0,0987 | 0,0967 | 0,0985 |
| 511,0           | 0,0821±0,0021 | 0,0864 | 0,0857 | 0,0864 | 0,0816±0,0021 | 0,0862 | 0,0855 | 0,0862 |
| 661,7           | 0,0788±0,0017 | 0,0766 | 0,0793 | 0,0767 | 0,0744±0,0016 | 0,0764 | 0,0763 | 0,0763 |
| 1173,2          | 0,0630±0,0015 | 0,0579 | 0,0581 | 0,0579 | 0,0590±0,0014 | 0,0577 | 0,0577 | 0,0576 |
| 1274,5          | 0,0522±0,0013 | 0,0555 | 0,0557 | 0,0555 | 0,0531±0,0013 | 0,0553 | 0,0555 | 0,0552 |
| 1332,5          | 0,0531±0,0012 | 0,0543 | 0,0544 | 0,0542 | 0,0553±0,0012 | 0,0540 | 0,0541 | 0,0540 |

| Enerji<br>(keV) | B40           |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,9600±0,0356 | 1,0084 | 0,9309 | 1,0084 | 1,0384±0,0365 | 1,1003 | 1,0181 | 1,1016 |
| 81,0            | 0,5131±0,0124 | 0,5001 | 0,4563 | 0,5003 | 0,5161±0,0124 | 0,5380 | 0,4927 | 0,5385 |
| 276,4           | 0,1176±0,0061 | 0,1175 | 0,1128 | 0,1174 | 0,1120±0,0054 | 0,1182 | 0,1135 | 0,1181 |
| 302,9           | 0,1077±0,0033 | 0,1116 | 0,1077 | 0,1115 | 0,1189±0,0037 | 0,1121 | 0,1082 | 0,1121 |
| 356,0           | 0,1065±0,0024 | 0,1026 | 0,0998 | 0,1025 | 0,1021±0,0023 | 0,1027 | 0,1000 | 0,1026 |
| 383,9           | 0,0971±0,0054 | 0,0988 | 0,0966 | 0,0988 | 0,0941±0,0047 | 0,0988 | 0,0966 | 0,0988 |
| 511,0           | 0,0857±0,0023 | 0,0861 | 0,0851 | 0,0861 | 0,0845±0,0022 | 0,0859 | 0,0851 | 0,0859 |
| 661,7           | 0,0765±0,0017 | 0,0761 | 0,0759 | 0,0761 | 0,0744±0,0016 | 0,0759 | 0,0757 | 0,0759 |
| 1173,2          | 0,0598±0,0014 | 0,0574 | 0,0574 | 0,0573 | 0,0569±0,0013 | 0,0572 | 0,0571 | 0,0571 |
| 1274,5          | 0,0563±0,0014 | 0,0550 | 0,0551 | 0,0550 | 0,0561±0,0014 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0547 |
| 1332,5          | 0,0556±0,0013 | 0,0538 | 0,0538 | 0,0537 | 0,0532±0,0012 | 0,0536 | 0,0537 | 0,0535 |

Tablo 4. 2. Piriç ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 0,5698±0,0129 | 0,5677 | 0,5135 | 0,5681 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,3089±0,0074 | 0,3171 | 0,2857 | 0,3172 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1081±0,0058 | 0,1137 | 0,1104 | 0,1136 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1077±0,0035 | 0,1090 | 0,1064 | 0,1091 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,1063±0,0024 | 0,1014 | 0,0997 | 0,1013 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0967±0,0049 | 0,0981 | 0,0967 | 0,0981 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0878±0,0022 | 0,0865 | 0,0860 | 0,0864 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0787±0,0017 | 0,0769 | 0,0769 | 0,0769 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0602±0,0014 | 0,0583 | 0,0583 | 0,0582 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0579±0,0015 | 0,0559 | 0,0560 | 0,0558 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0563±0,0013 | 0,0546 | 0,0550 | 0,0546 |
| Enerji<br>(keV) | P20           |        |        |        | P30           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6299±0,0153 | 0,6602 | 0,6001 | 0,6607 | 0,7174±0,0167 | 0,7384 | 0,6735 | 0,7393 |
| 81,0            | 0,3413±0,0083 | 0,3541 | 0,3197 | 0,3545 | 0,3720±0,0091 | 0,3855 | 0,3484 | 0,3856 |
| 276,4           | 0,1150±0,0066 | 0,1141 | 0,1104 | 0,1142 | 0,1126±0,0068 | 0,1145 | 0,1106 | 0,1144 |
| 302,9           | 0,1088±0,0035 | 0,1093 | 0,1063 | 0,1093 | 0,1132±0,0036 | 0,1095 | 0,1064 | 0,1095 |
| 356,0           | 0,1067±0,0024 | 0,1014 | 0,0994 | 0,1014 | 0,1055±0,0024 | 0,1014 | 0,0992 | 0,1013 |
| 383,9           | 0,0963±0,0049 | 0,0980 | 0,0963 | 0,0980 | 0,0963±0,0049 | 0,0979 | 0,0961 | 0,0980 |
| 511,0           | 0,0864±0,0023 | 0,0862 | 0,0857 | 0,0862 | 0,0829±0,0022 | 0,0859 | 0,0854 | 0,0858 |
| 661,7           | 0,0743±0,0016 | 0,0766 | 0,0765 | 0,0766 | 0,0763±0,0017 | 0,0763 | 0,0761 | 0,0762 |
| 1173,2          | 0,0588±0,0014 | 0,0580 | 0,0580 | 0,0579 | 0,0610±0,0014 | 0,0577 | 0,0577 | 0,0577 |
| 1274,5          | 0,0588±0,0015 | 0,0556 | 0,0557 | 0,0556 | 0,0566±0,0014 | 0,0553 | 0,0554 | 0,0553 |
| 1332,5          | 0,0566±0,0013 | 0,0543 | 0,0544 | 0,0543 | 0,0529±0,0012 | 0,0541 | 0,0541 | 0,0540 |
| Enerji<br>(keV) | P40           |        |        |        | P50           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7675±0,0208 | 0,8055 | 0,7340 | 0,8055 | 0,8175±0,0213 | 0,8636 | 0,7907 | 0,8650 |
| 81,0            | 0,3980±0,0115 | 0,4123 | 0,3721 | 0,4122 | 0,4236±0,0109 | 0,4356 | 0,3947 | 0,4358 |
| 276,4           | 0,1106±0,0065 | 0,1149 | 0,1106 | 0,1148 | 0,1159±0,0054 | 0,1152 | 0,1108 | 0,1151 |
| 302,9           | 0,1097±0,0032 | 0,1096 | 0,1061 | 0,1096 | 0,1067±0,0034 | 0,1098 | 0,1063 | 0,1098 |
| 356,0           | 0,1006±0,0023 | 0,1014 | 0,0988 | 0,1014 | 0,0969±0,0022 | 0,1013 | 0,0988 | 0,1013 |
| 383,9           | 0,0954±0,0053 | 0,0978 | 0,0957 | 0,0979 | 0,0920±0,0060 | 0,0978 | 0,0958 | 0,0977 |
| 511,0           | 0,0815±0,0021 | 0,0857 | 0,0849 | 0,0857 | 0,0812±0,0022 | 0,0856 | 0,0847 | 0,0855 |
| 661,7           | 0,0797±0,0018 | 0,0761 | 0,0758 | 0,0760 | 0,0734±0,0016 | 0,0758 | 0,0756 | 0,0758 |
| 1173,2          | 0,0595±0,0014 | 0,0575 | 0,0574 | 0,0575 | 0,0568±0,0013 | 0,0573 | 0,0573 | 0,0572 |
| 1274,5          | 0,0566±0,0014 | 0,0551 | 0,0551 | 0,0551 | 0,0550±0,0014 | 0,0549 | 0,0550 | 0,0548 |
| 1332,5          | 0,0558±0,0013 | 0,0539 | 0,0538 | 0,0538 | 0,0570±0,0013 | 0,0537 | 0,0537 | 0,0537 |

Tablo 4. 3. Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 0,5025±0,0114 | 0,5321 | 0,5556 | 0,5323 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,2938±0,0071 | 0,3026 | 0,3038 | 0,3027 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1100±0,0053 | 0,1134 | 0,1120 | 0,1133 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1135±0,0038 | 0,1088 | 0,1078 | 0,1088 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,0985±0,0022 | 0,1014 | 0,1009 | 0,1013 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0960±0,0055 | 0,0981 | 0,0979 | 0,0982 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0828±0,0021 | 0,0865 | 0,0869 | 0,0864 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0772±0,0017 | 0,0770 | 0,0778 | 0,0769 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0593±0,0014 | 0,0584 | 0,0590 | 0,0583 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0577±0,0015 | 0,0560 | 0,0567 | 0,0560 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0534±0,0012 | 0,0547 | 0,0554 | 0,0547 |
| Enerji<br>(keV) | C20           |        |        |        | C30           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,5647±0,0124 | 0,5948 | 0,6765 | 0,5949 | 0,6130±0,0138 | 0,6478 | 0,7789 | 0,6483 |
| 81,0            | 0,3223±0,0085 | 0,3275 | 0,3530 | 0,3277 | 0,3427±0,0085 | 0,3487 | 0,3943 | 0,3490 |
| 276,4           | 0,1133±0,0056 | 0,1136 | 0,1135 | 0,1107 | 0,1113±0,0059 | 0,1138 | 0,1148 | 0,1139 |
| 302,9           | 0,1099±0,0034 | 0,1089 | 0,1089 | 0,1088 | 0,1123±0,0036 | 0,1090 | 0,1099 | 0,1089 |
| 356,0           | 0,0993±0,0022 | 0,1013 | 0,1017 | 0,1012 | 0,0987±0,0023 | 0,1012 | 0,1024 | 0,1012 |
| 383,9           | 0,0952±0,0051 | 0,0979 | 0,0985 | 0,0980 | 0,0967±0,0050 | 0,0978 | 0,0992 | 0,0977 |
| 511,0           | 0,0832±0,0022 | 0,0863 | 0,0875 | 0,0863 | 0,0903±0,0023 | 0,0861 | 0,0878 | 0,0859 |
| 661,7           | 0,0795±0,0017 | 0,0767 | 0,0781 | 0,0767 | 0,0786±0,0017 | 0,0765 | 0,0784 | 0,0764 |
| 1173,2          | 0,0553±0,0013 | 0,0581 | 0,0592 | 0,0581 | 0,0604±0,0014 | 0,0579 | 0,0594 | 0,0578 |
| 1274,5          | 0,0567±0,0014 | 0,0557 | 0,0568 | 0,0557 | 0,0521±0,0013 | 0,0555 | 0,0570 | 0,0554 |
| 1332,5          | 0,0515±0,0012 | 0,0545 | 0,0555 | 0,0544 | 0,0532±0,0012 | 0,0543 | 0,0557 | 0,0542 |
| Enerji<br>(keV) | C40           |        |        |        | C50           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6753±0,0178 | 0,6933 | 0,8656 | 0,6938 | 0,7139±0,0196 | 0,7327 | 0,9416 | 0,7336 |
| 81,0            | 0,3588±0,0090 | 0,3668 | 0,4298 | 0,3671 | 0,3731±0,0093 | 0,3825 | 0,4605 | 0,3827 |
| 276,4           | 0,1109±0,0051 | 0,1140 | 0,1158 | 0,1139 | 0,1120±0,0051 | 0,1142 | 0,1169 | 0,1142 |
| 302,9           | 0,1119±0,0038 | 0,1091 | 0,1109 | 0,1090 | 0,1046±0,0032 | 0,1091 | 0,1116 | 0,1091 |
| 356,0           | 0,1017±0,0023 | 0,1011 | 0,1029 | 0,1011 | 0,1008±0,0023 | 0,1011 | 0,1036 | 0,1011 |
| 383,9           | 0,0979±0,0053 | 0,0977 | 0,0997 | 0,0976 | 0,0977±0,0059 | 0,0976 | 0,1001 | 0,0977 |
| 511,0           | 0,0883±0,0023 | 0,0859 | 0,0882 | 0,0858 | 0,0880±0,0023 | 0,0857 | 0,0884 | 0,0857 |
| 661,7           | 0,0782±0,0017 | 0,0763 | 0,0787 | 0,0762 | 0,0781±0,0017 | 0,0761 | 0,0788 | 0,0760 |
| 1173,2          | 0,0566±0,0013 | 0,0577 | 0,0595 | 0,0577 | 0,0567±0,0013 | 0,0576 | 0,0596 | 0,0576 |
| 1274,5          | 0,0581±0,0015 | 0,0553 | 0,0572 | 0,0552 | 0,0538±0,0013 | 0,0552 | 0,0573 | 0,0553 |
| 1332,5          | 0,0518±0,0012 | 0,0541 | 0,0558 | 0,0540 | 0,0565±0,0013 | 0,0539 | 0,0559 | 0,0540 |

Tablo 4. 4. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 1,0384±0,0365 | 1,1003 | 1,0181 | 1,1016 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,5161±0,0124 | 0,5380 | 0,4927 | 0,5385 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1120±0,0054 | 0,1182 | 0,1135 | 0,1181 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1189±0,0037 | 0,1121 | 0,1082 | 0,1121 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,1021±0,0023 | 0,1027 | 0,1000 | 0,1026 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0941±0,0047 | 0,0988 | 0,0966 | 0,0988 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0845±0,0022 | 0,0859 | 0,0851 | 0,0859 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0744±0,0016 | 0,0759 | 0,0757 | 0,0759 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0569±0,0013 | 0,0572 | 0,0571 | 0,0571 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0561±0,0014 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0547 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0532±0,0012 | 0,0536 | 0,0537 | 0,0535 |

| Enerji<br>(keV) | B50B5         |        |        |        | B50B10        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,0548±0,0505 | 1,0700 | 0,9928 | 1,0711 | 1,0103±0,0349 | 1,0420 | 0,9658 | 1,0429 |
| 81,0            | 0,5139±0,0157 | 0,5255 | 0,4814 | 0,5258 | 0,4898±0,0128 | 0,5138 | 0,4709 | 0,5141 |
| 276,4           | 0,1188±0,0059 | 0,1177 | 0,1131 | 0,1177 | 0,1183±0,0065 | 0,1173 | 0,1129 | 0,1172 |
| 302,9           | 0,1180±0,0039 | 0,1117 | 0,1080 | 0,1117 | 0,1086±0,0035 | 0,1113 | 0,1077 | 0,1113 |
| 356,0           | 0,1014±0,0023 | 0,1025 | 0,0998 | 0,1024 | 0,1071±0,0024 | 0,1022 | 0,0996 | 0,1022 |
| 383,9           | 0,0983±0,0049 | 0,0986 | 0,0965 | 0,0986 | 0,0972±0,0051 | 0,0984 | 0,0962 | 0,0982 |
| 511,0           | 0,0827±0,0022 | 0,0858 | 0,0850 | 0,0858 | 0,0837±0,0021 | 0,0856 | 0,0849 | 0,0856 |
| 661,7           | 0,0737±0,0016 | 0,0758 | 0,0757 | 0,0758 | 0,0797±0,0018 | 0,0757 | 0,0753 | 0,0757 |
| 1173,2          | 0,0564±0,0013 | 0,0571 | 0,0572 | 0,0571 | 0,0586±0,0014 | 0,0571 | 0,0571 | 0,0570 |
| 1274,5          | 0,0536±0,0014 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0546 | 0,0544±0,0014 | 0,0547 | 0,0548 | 0,0546 |
| 1332,5          | 0,0514±0,0012 | 0,0535 | 0,0536 | 0,0535 | 0,0516±0,0012 | 0,0535 | 0,0535 | 0,0534 |

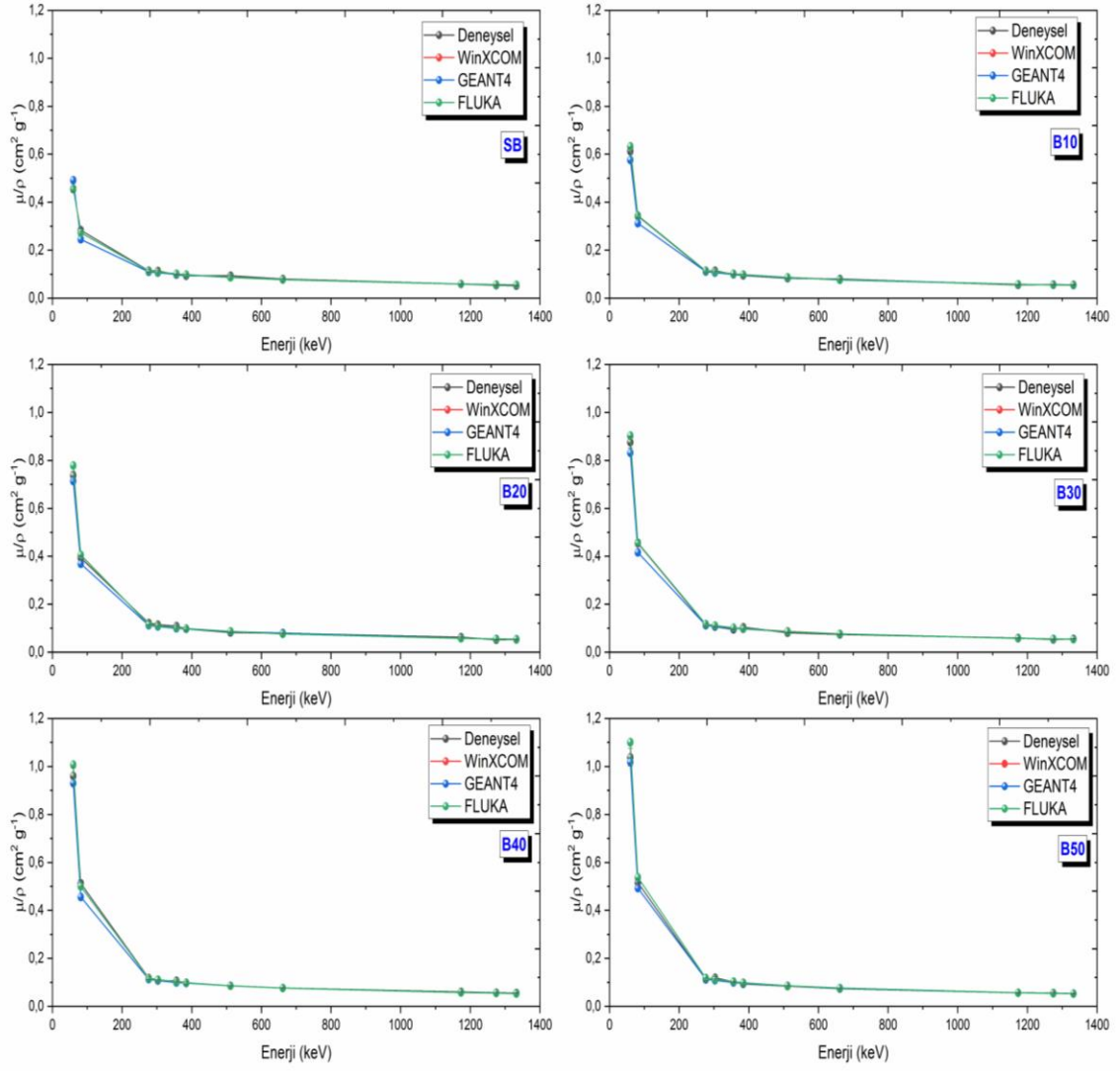
| Enerji<br>(keV) | B50B15        |        |        |        | B50B20        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,9905±0,0340 | 1,0150 | 0,9412 | 0,8888 | 1,0365±0,0413 | 0,9899 | 0,9174 | 0,9910 |
| 81,0            | 0,4760±0,0126 | 0,5027 | 0,4612 | 0,4515 | 0,5058±0,0128 | 0,4924 | 0,4516 | 0,4927 |
| 276,4           | 0,1136±0,0062 | 0,1169 | 0,1126 | 0,1157 | 0,1158±0,0062 | 0,1165 | 0,1123 | 0,1164 |
| 302,9           | 0,1089±0,0034 | 0,1110 | 0,1074 | 0,1102 | 0,1049±0,0033 | 0,1107 | 0,1072 | 0,1105 |
| 356,0           | 0,1065±0,0024 | 0,1017 | 0,0994 | 0,1016 | 0,1028±0,0023 | 0,1013 | 0,0994 | 0,1016 |
| 383,9           | 0,0992±0,0056 | 0,0982 | 0,0960 | 0,0978 | 0,1001±0,0052 | 0,0980 | 0,0960 | 0,0980 |
| 511,0           | 0,0893±0,0024 | 0,0855 | 0,0848 | 0,0856 | 0,0880±0,0022 | 0,0854 | 0,0847 | 0,0853 |
| 661,7           | 0,0749±0,0016 | 0,0756 | 0,0754 | 0,0758 | 0,0795±0,0017 | 0,0755 | 0,0754 | 0,0754 |
| 1173,2          | 0,0574±0,0013 | 0,0570 | 0,0571 | 0,0572 | 0,0559±0,0013 | 0,0570 | 0,0570 | 0,0569 |
| 1274,5          | 0,0523±0,0012 | 0,0547 | 0,0548 | 0,0548 | 0,0564±0,0014 | 0,0546 | 0,0547 | 0,0545 |
| 1332,5          | 0,0557±0,0013 | 0,0534 | 0,0535 | 0,0536 | 0,0505±0,0011 | 0,0534 | 0,0535 | 0,0533 |

Tablo 4. 5. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 0,8175±0,0213 | 0,8636 | 0,7907 | 0,8650 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,4236±0,0109 | 0,4356 | 0,3947 | 0,4358 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1159±0,0054 | 0,1152 | 0,1108 | 0,1151 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1067±0,0034 | 0,1098 | 0,1063 | 0,1098 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,0969±0,0022 | 0,1013 | 0,0988 | 0,1013 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0920±0,0060 | 0,0978 | 0,0958 | 0,0977 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0812±0,0022 | 0,0856 | 0,0847 | 0,0855 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0734±0,0016 | 0,0758 | 0,0756 | 0,0758 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0568±0,0013 | 0,0573 | 0,0573 | 0,0572 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0550±0,0014 | 0,0549 | 0,0550 | 0,0548 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0540±0,0013 | 0,0537 | 0,0537 | 0,0537 |
| Enerji<br>(keV) | P50B5         |        |        |        | P50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8248±0,0245 | 0,8410 | 0,7694 | 0,7153 | 0,8534±0,0269 | 0,8197 | 0,7506 | 0,8115 |
| 81,0            | 0,4403±0,0119 | 0,4260 | 0,3863 | 0,3749 | 0,4112±0,0104 | 0,4178 | 0,3787 | 0,4132 |
| 276,4           | 0,1096±0,0059 | 0,1150 | 0,1107 | 0,1123 | 0,1087±0,0059 | 0,1144 | 0,1103 | 0,1132 |
| 302,9           | 0,1020±0,0035 | 0,1090 | 0,1060 | 0,1073 | 0,1110±0,0037 | 0,1092 | 0,1059 | 0,1078 |
| 356,0           | 0,0949±0,0021 | 0,1010 | 0,0988 | 0,0994 | 0,1057±0,0024 | 0,1009 | 0,0985 | 0,0996 |
| 383,9           | 0,0897±0,0052 | 0,0975 | 0,0956 | 0,0960 | 0,0965±0,0052 | 0,0974 | 0,0954 | 0,0961 |
| 511,0           | 0,0793±0,0021 | 0,0854 | 0,0847 | 0,0844 | 0,0896±0,0024 | 0,0853 | 0,0847 | 0,0841 |
| 661,7           | 0,0719±0,0016 | 0,0757 | 0,0756 | 0,0749 | 0,0796±0,0017 | 0,0756 | 0,0755 | 0,0747 |
| 1173,2          | 0,0504±0,0012 | 0,0572 | 0,0573 | 0,0566 | 0,0589±0,0014 | 0,0572 | 0,0573 | 0,0565 |
| 1274,5          | 0,0528±0,0013 | 0,0549 | 0,0551 | 0,0543 | 0,0555±0,0013 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0541 |
| 1332,5          | 0,0518±0,0012 | 0,0536 | 0,0537 | 0,0531 | 0,0548±0,0012 | 0,0536 | 0,0537 | 0,0539 |
| Enerji<br>(keV) | P50B15        |        |        |        | P50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7769±0,0198 | 0,7998 | 0,7319 | 0,8011 | 0,7389±0,0177 | 0,7636 | 0,7159 | 0,7822 |
| 81,0            | 0,4179±0,0101 | 0,4097 | 0,3718 | 0,4099 | 0,4055±0,0122 | 0,3950 | 0,3654 | 0,4022 |
| 276,4           | 0,1093±0,0050 | 0,1141 | 0,1101 | 0,1140 | 0,1134±0,0062 | 0,1137 | 0,1099 | 0,1138 |
| 302,9           | 0,1053±0,0034 | 0,1089 | 0,1056 | 0,1088 | 0,1107±0,0036 | 0,1087 | 0,1055 | 0,1085 |
| 356,0           | 0,1040±0,0023 | 0,1007 | 0,0983 | 0,1006 | 0,1045±0,0023 | 0,1005 | 0,0983 | 0,1005 |
| 383,9           | 0,0953±0,0050 | 0,0972 | 0,0953 | 0,0972 | 0,0992±0,0057 | 0,0971 | 0,0952 | 0,0969 |
| 511,0           | 0,0828±0,0022 | 0,0852 | 0,0844 | 0,0851 | 0,0826±0,0023 | 0,0852 | 0,0844 | 0,0850 |
| 661,7           | 0,0725±0,0018 | 0,0756 | 0,0755 | 0,0755 | 0,0774±0,0017 | 0,0756 | 0,0753 | 0,0754 |
| 1173,2          | 0,0591±0,0014 | 0,0571 | 0,0572 | 0,0571 | 0,0561±0,0013 | 0,0572 | 0,0572 | 0,0569 |
| 1274,5          | 0,0558±0,0014 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0547 | 0,0577±0,0015 | 0,0548 | 0,0549 | 0,0547 |
| 1332,5          | 0,0536±0,0012 | 0,0535 | 0,0536 | 0,0535 | 0,0541±0,0012 | 0,0539 | 0,0540 | 0,0541 |

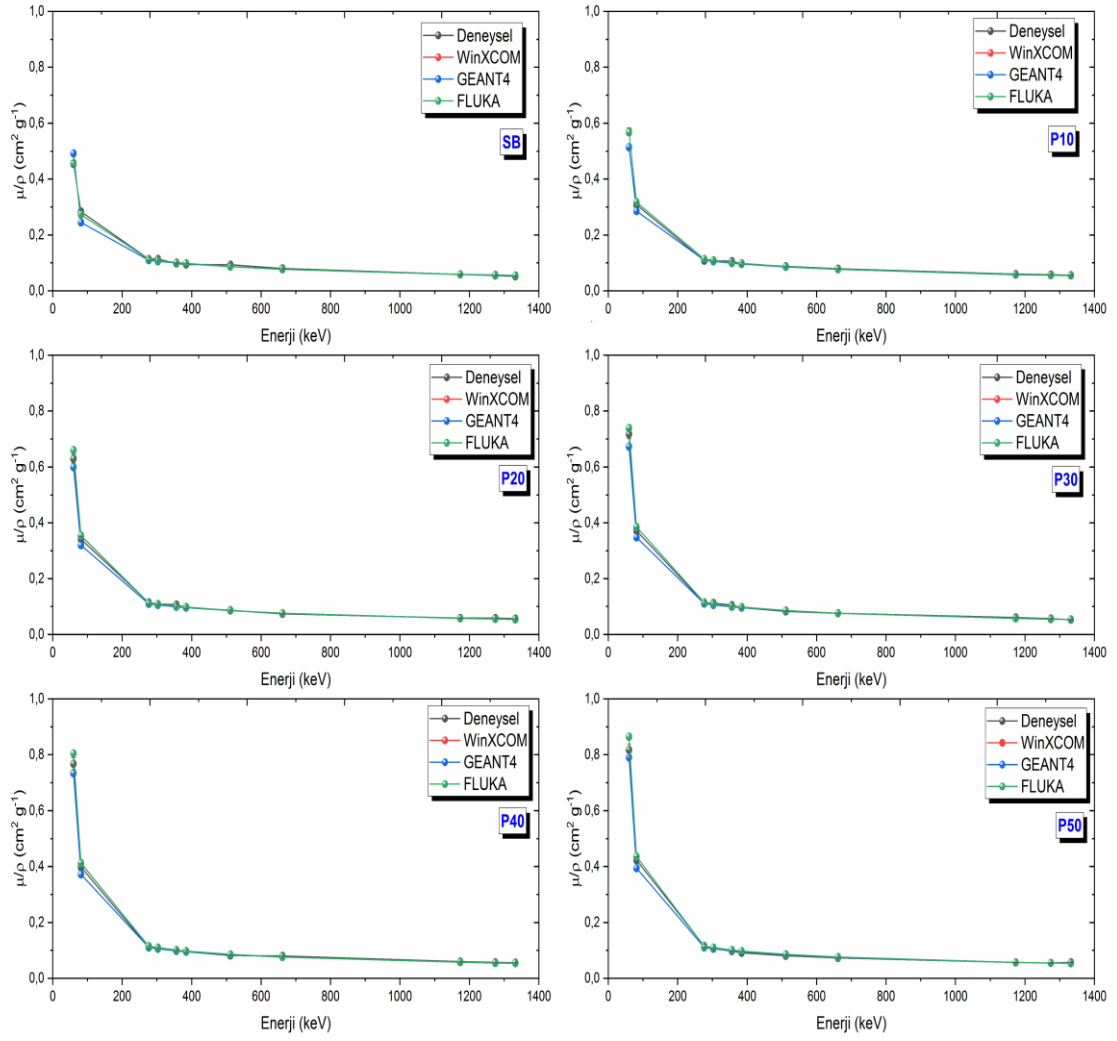
Tablo 4. 6. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile hesaplanmış karşılaştırmalı kütle azaltma katsayısı (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4545±0,0101 | 0,4568 | 0,4914 | 0,4570 | 0,7139±0,0196 | 0,7327 | 0,9416 | 0,7336 |
| 81,0            | 0,2837±0,0064 | 0,2726 | 0,2450 | 0,2726 | 0,3731±0,0093 | 0,3825 | 0,4605 | 0,3827 |
| 276,4           | 0,1143±0,0057 | 0,1131 | 0,1103 | 0,1131 | 0,1120±0,0051 | 0,1142 | 0,1169 | 0,1142 |
| 302,9           | 0,1137±0,0034 | 0,1087 | 0,1064 | 0,1086 | 0,1046±0,0032 | 0,1091 | 0,1116 | 0,1091 |
| 356,0           | 0,0982±0,0023 | 0,1015 | 0,0999 | 0,1016 | 0,1008±0,0023 | 0,1011 | 0,1036 | 0,1011 |
| 383,9           | 0,0941±0,0050 | 0,0983 | 0,0969 | 0,0984 | 0,0977±0,0059 | 0,0976 | 0,1001 | 0,0977 |
| 511,0           | 0,0936±0,0024 | 0,0869 | 0,0865 | 0,0867 | 0,0880±0,0023 | 0,0857 | 0,0884 | 0,0857 |
| 661,7           | 0,0800±0,0017 | 0,0774 | 0,0774 | 0,0773 | 0,0781±0,0017 | 0,0761 | 0,0788 | 0,0760 |
| 1173,2          | 0,0586±0,0016 | 0,0587 | 0,0588 | 0,0586 | 0,0567±0,0013 | 0,0576 | 0,0596 | 0,0576 |
| 1274,5          | 0,0557±0,0014 | 0,0563 | 0,0565 | 0,0564 | 0,0538±0,0013 | 0,0552 | 0,0573 | 0,0553 |
| 1332,5          | 0,0552±0,0012 | 0,0550 | 0,0552 | 0,0550 | 0,0565±0,0013 | 0,0539 | 0,0559 | 0,0540 |
| Enerji<br>(keV) | C50B5         |        |        |        | C50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6960±0,0181 | 0,7141 | 0,9178 | 0,7148 | 0,6618±0,0153 | 0,6975 | 0,8936 | 0,6974 |
| 81,0            | 0,3643±0,0091 | 0,3749 | 0,4504 | 0,3752 | 0,3570±0,0089 | 0,3681 | 0,4407 | 0,3684 |
| 276,4           | 0,1154±0,0056 | 0,1138 | 0,1162 | 0,1137 | 0,1174±0,0054 | 0,1135 | 0,1158 | 0,1135 |
| 302,9           | 0,1104±0,0038 | 0,1088 | 0,1112 | 0,1088 | 0,1135±0,0035 | 0,1086 | 0,1109 | 0,1085 |
| 356,0           | 0,0994±0,0022 | 0,1008 | 0,1033 | 0,1008 | 0,1056±0,0024 | 0,1006 | 0,1030 | 0,1006 |
| 383,9           | 0,0949±0,0052 | 0,0974 | 0,0999 | 0,0974 | 0,0983±0,0051 | 0,0972 | 0,0996 | 0,0972 |
| 511,0           | 0,0830±0,0022 | 0,0856 | 0,0883 | 0,0855 | 0,0807±0,0021 | 0,0854 | 0,0880 | 0,0854 |
| 661,7           | 0,0722±0,0016 | 0,0760 | 0,0786 | 0,0760 | 0,0742±0,0016 | 0,0759 | 0,0785 | 0,0758 |
| 1173,2          | 0,0596±0,0014 | 0,0575 | 0,0595 | 0,0574 | 0,0555±0,0013 | 0,0574 | 0,0594 | 0,0573 |
| 1274,5          | 0,0540±0,0013 | 0,0551 | 0,0572 | 0,0550 | 0,0536±0,0013 | 0,0551 | 0,0570 | 0,0550 |
| 1332,5          | 0,0527±0,0012 | 0,0539 | 0,0558 | 0,0538 | 0,0561±0,0012 | 0,0538 | 0,0557 | 0,0538 |
| Enerji<br>(keV) | C50B15        |        |        |        | C50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6581±0,0152 | 0,6802 | 0,8708 | 0,6816 | 0,6313±0,0144 | 0,6637 | 0,8494 | 0,6664 |
| 81,0            | 0,3538±0,0088 | 0,3611 | 0,4318 | 0,3617 | 0,3424±0,0096 | 0,3544 | 0,4232 | 0,3555 |
| 276,4           | 0,1178±0,0064 | 0,1132 | 0,1155 | 0,1131 | 0,1107±0,0054 | 0,1129 | 0,1151 | 0,1129 |
| 302,9           | 0,1073±0,0033 | 0,1083 | 0,1104 | 0,1082 | 0,1128±0,0038 | 0,1080 | 0,1101 | 0,1079 |
| 356,0           | 0,1037±0,0024 | 0,1004 | 0,1027 | 0,1004 | 0,1046±0,0024 | 0,1002 | 0,1024 | 0,1002 |
| 383,9           | 0,0981±0,0053 | 0,0971 | 0,0993 | 0,0970 | 0,0963±0,0049 | 0,0969 | 0,0990 | 0,0969 |
| 511,0           | 0,0842±0,0022 | 0,0853 | 0,0879 | 0,0852 | 0,0886±0,0023 | 0,0852 | 0,0875 | 0,0852 |
| 661,7           | 0,0723±0,0016 | 0,0758 | 0,0784 | 0,0757 | 0,0751±0,0017 | 0,0757 | 0,0781 | 0,0756 |
| 1173,2          | 0,0552±0,0013 | 0,0574 | 0,0593 | 0,0574 | 0,0573±0,0013 | 0,0573 | 0,0592 | 0,0572 |
| 1274,5          | 0,0542±0,0014 | 0,0550 | 0,0569 | 0,0550 | 0,0523±0,0014 | 0,0549 | 0,0568 | 0,0549 |
| 1332,5          | 0,0516±0,0012 | 0,0538 | 0,0556 | 0,0537 | 0,0555±0,0012 | 0,0537 | 0,0555 | 0,0536 |

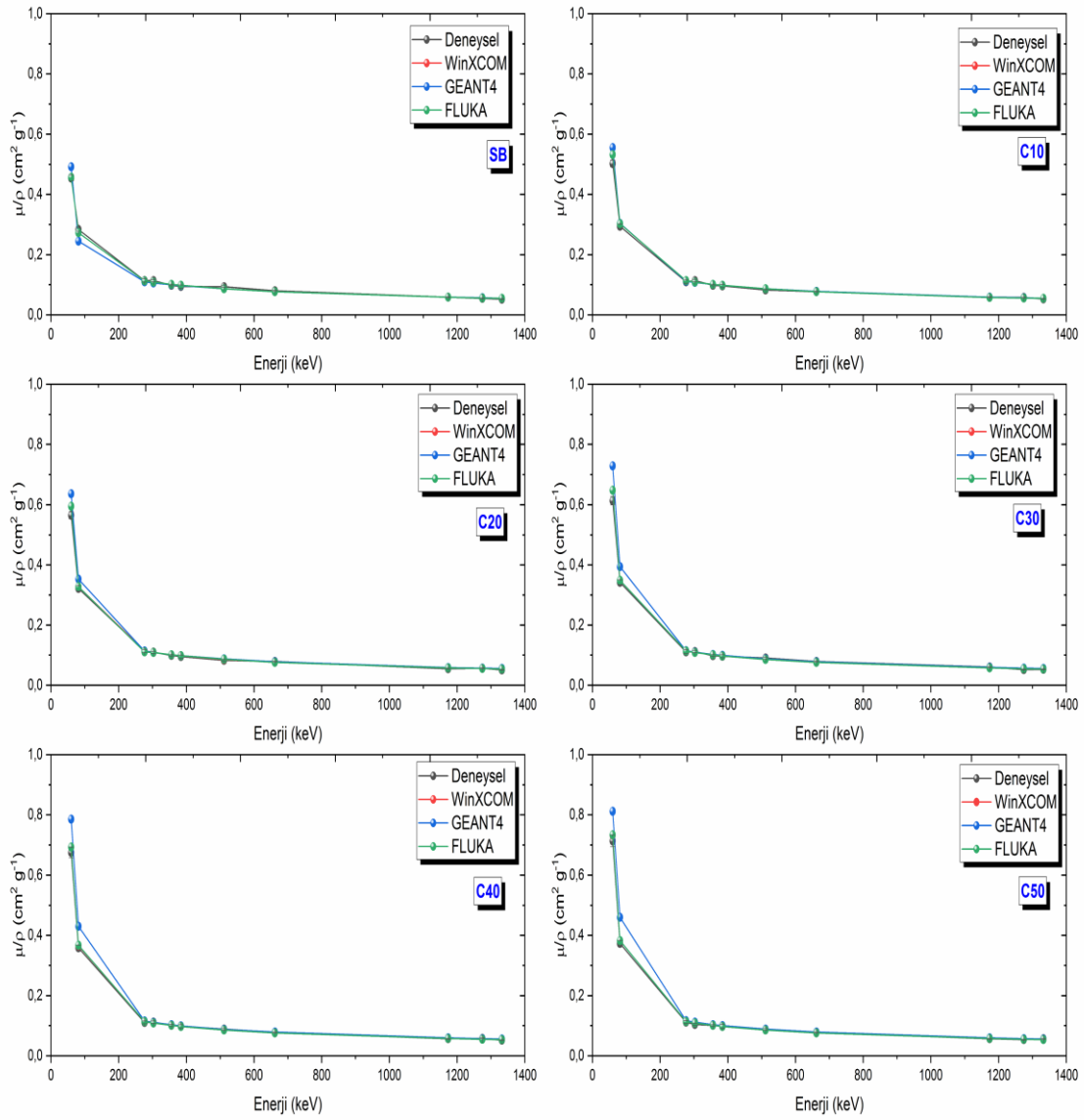


Şekil 4.1. Bronz katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği

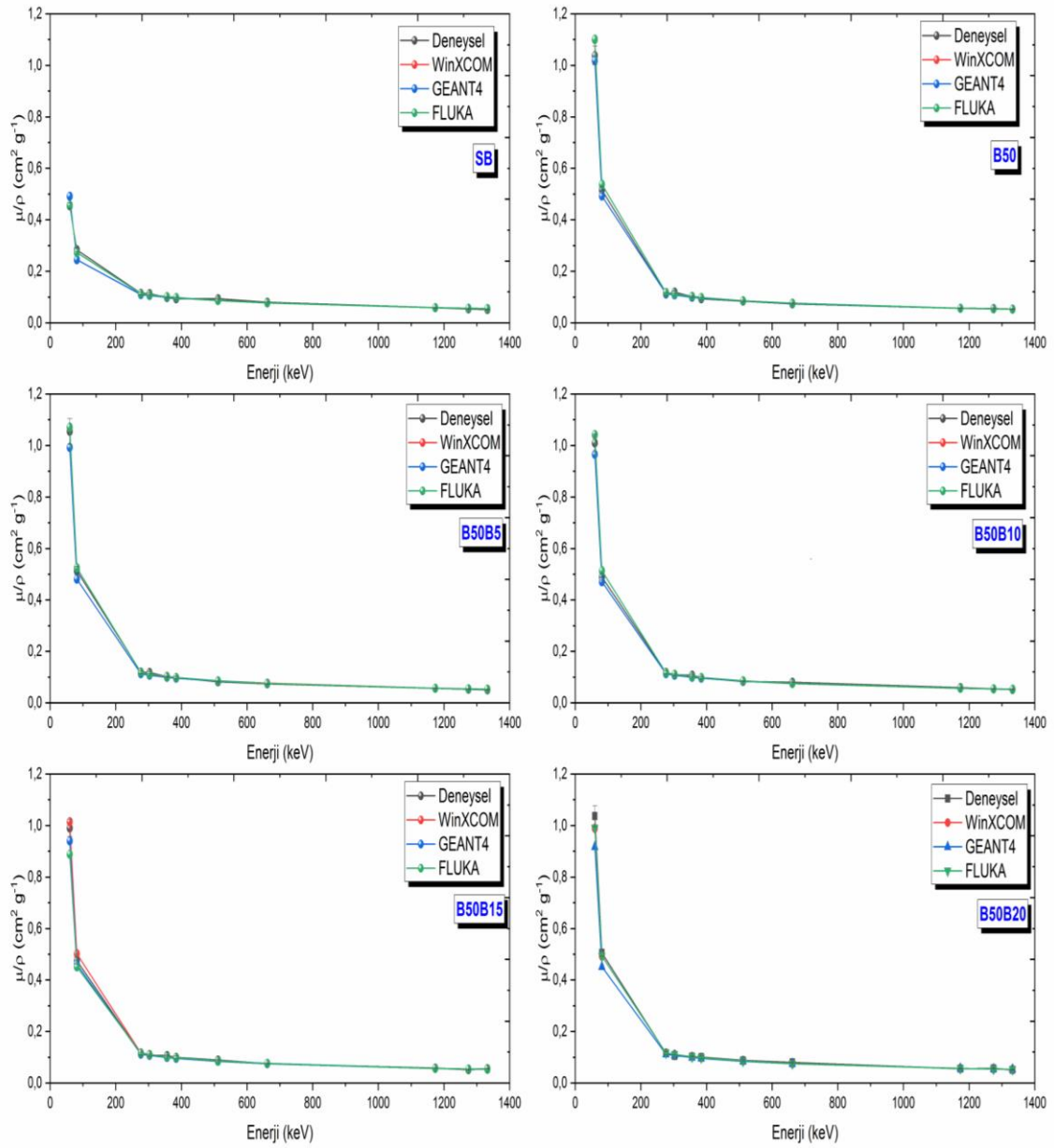




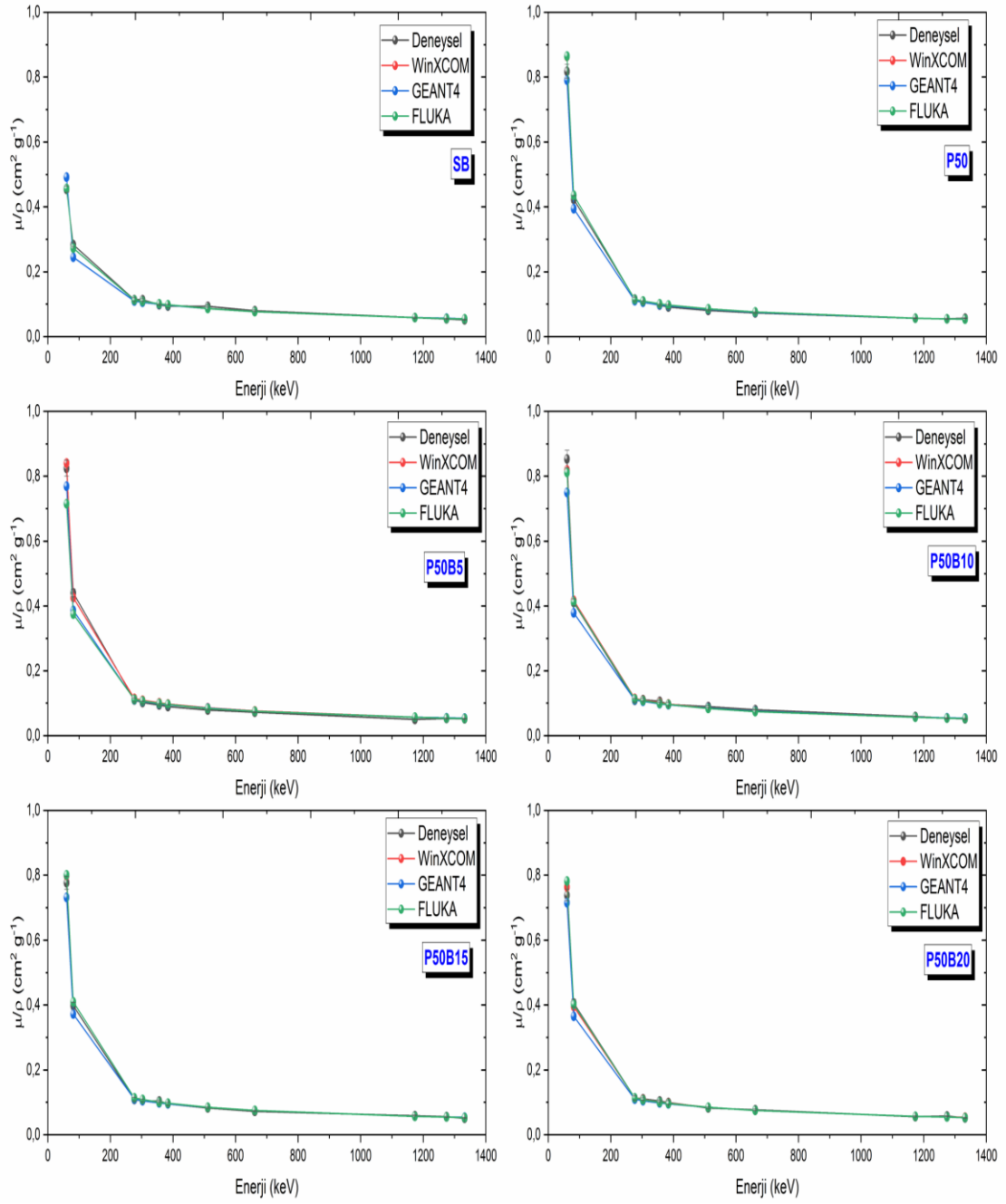
Şekil 4.2. Pirinç katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği



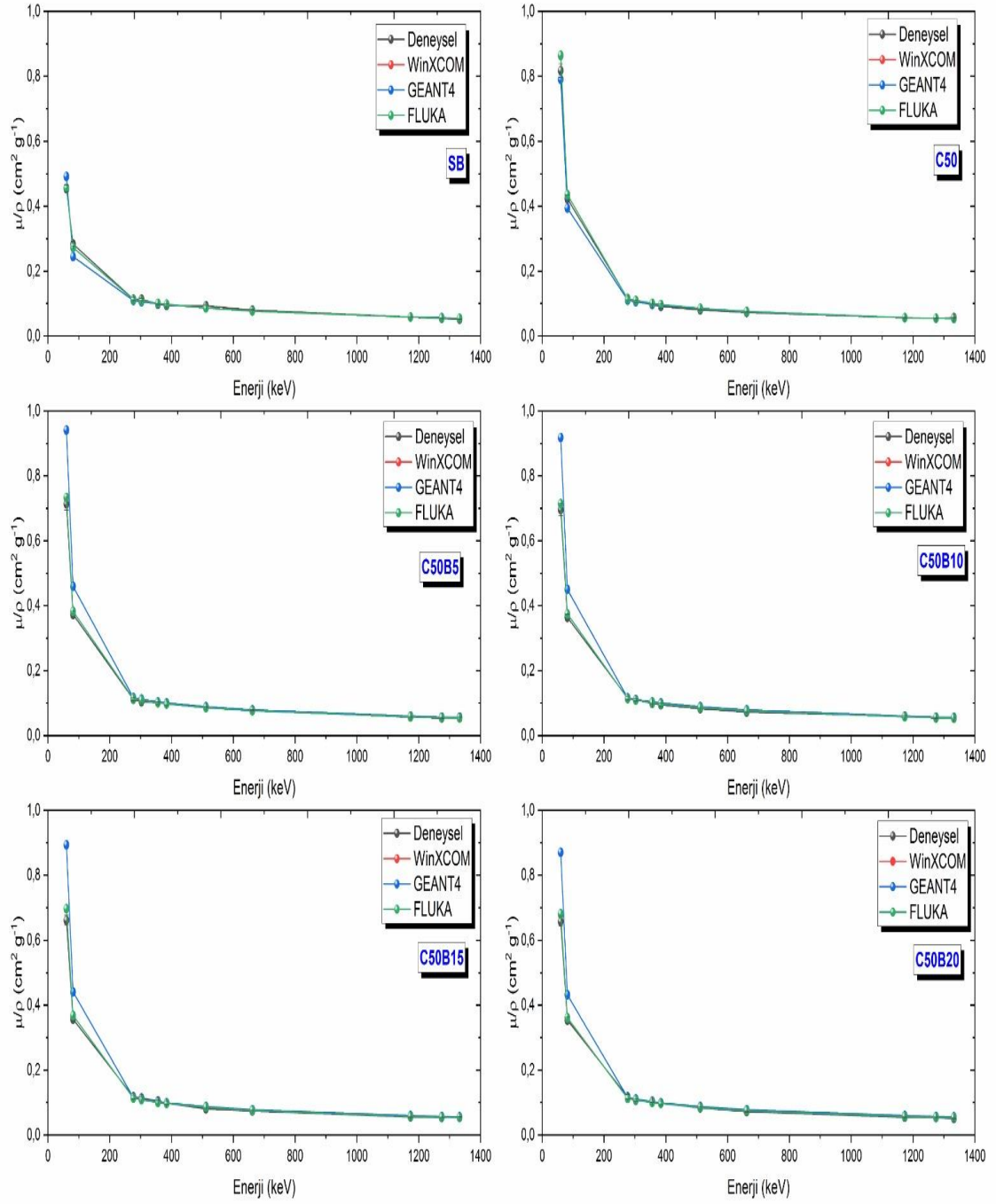
Şekil 4.3. Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.4. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.



Şekil 4.5. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği.



Şekil 4.6. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin elde edilen sonuçlara göre çizilmiş kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişim grafiği

## 4.2. Gama Radyasyon Zırhlamada Lineer Azaltma Katsayılarına Ait Bulgular

Gama radyasyonu zırhlamada hedef materyalin yoğunluğunun önemli olduğu gösteren parametrelerden biri lineer azaltma katsayısıdır. Kullanılan beton miktarının %10-20-30-40-50'si oranında bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya beton miktarının %5-10-15-20'si oranında B<sub>4</sub>C ile katkılanarak hazırlanan beton numunelerin lineer azaltma katsayıları ( $\mu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ), deneysel olarak kütle azaltma katsayısının malzemenin sahip olduğu yoğunlukla çarpılması ile elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, teorik ve simülasyonlar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin elde edilen ve hesaplanan lineer azaltma katsayısı değerleri Tablo 4.7-4.12'de, elde edilen sonuçlara göre çizilen grafikler Şekil 4.7-4.12'de verilmiştir.

Tablo 4. 7. Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 1,3537±0,0030 | 1,3962 | 1,2719 | 1,3971 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 0,7553±0,0178 | 0,7618 | 0,6901 | 0,7623 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2479±0,0118 | 0,2528 | 0,2453 | 0,2527 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,2531±0,0079 | 0,2421 | 0,2359 | 0,2420 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,2201±0,0049 | 0,2248 | 0,2207 | 0,2246 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,2104±0,0122 | 0,2173 | 0,2140 | 0,2172 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,1845±0,0048 | 0,1912 | 0,1902 | 0,1910 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1760±0,0039 | 0,1699 | 0,1701 | 0,1697 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1220±0,0028 | 0,1287 | 0,1288 | 0,1286 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1252±0,0032 | 0,1234 | 0,1237 | 0,1234 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1236±0,0028 | 0,1206 | 0,1209 | 0,1204 |

| Enerji<br>(keV) | B20           |        |        |        | B30           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,6786±0,0391 | 1,7731 | 1,627  | 1,7747 | 2,1048±0,0578 | 2,1667 | 1,9985 | 2,1693 |
| 81,0            | 0,8954±0,0200 | 0,9230 | 0,8398 | 0,9240 | 1,0927±0,0282 | 1,0958 | 1,0009 | 1,0962 |
| 276,4           | 0,2780±0,0153 | 0,2634 | 0,2549 | 0,2631 | 0,2734±0,0153 | 0,2801 | 0,2700 | 0,2796 |
| 302,9           | 0,2613±0,0085 | 0,2515 | 0,2443 | 0,2515 | 0,2543±0,0083 | 0,2667 | 0,2586 | 0,2662 |
| 356,0           | 0,2466±0,0056 | 0,2325 | 0,2275 | 0,2324 | 0,2274±0,0054 | 0,2458 | 0,2400 | 0,2455 |
| 383,9           | 0,2223±0,0130 | 0,2244 | 0,2204 | 0,2244 | 0,2493±0,0132 | 0,2369 | 0,2323 | 0,2365 |
| 511,0           | 0,1869±0,0047 | 0,1967 | 0,1952 | 0,1967 | 0,1959±0,0005 | 0,2070 | 0,2054 | 0,2069 |
| 661,7           | 0,1795±0,0039 | 0,1745 | 0,1805 | 0,1746 | 0,1788±0,0039 | 0,1834 | 0,1832 | 0,1832 |
| 1173,2          | 0,1435±0,0033 | 0,1320 | 0,1323 | 0,1318 | 0,1416±0,0033 | 0,1384 | 0,1386 | 0,1384 |
| 1274,5          | 0,1188±0,0030 | 0,1265 | 0,1268 | 0,1264 | 0,1275±0,0032 | 0,1327 | 0,1332 | 0,1325 |
| 1332,5          | 0,1209±0,0027 | 0,1236 | 0,1239 | 0,1235 | 0,1329±0,0029 | 0,1297 | 0,1300 | 0,1297 |

Tablo 4.7 Devam Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | B40           |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 2,3423±0,0869 | 2,4602 | 2,2712 | 2,4602 | 2,6778±0,0942 | 2,8373 | 2,6254 | 2,8406 |
| 81,0            | 1,2518±0,0302 | 1,2201 | 1,1132 | 1,2207 | 1,3308±0,0320 | 1,3874 | 1,2704 | 1,3888 |
| 276,4           | 0,2868±0,0148 | 0,2866 | 0,2753 | 0,2865 | 0,2889±0,0140 | 0,3048 | 0,2928 | 0,3046 |
| 302,9           | 0,2628±0,0081 | 0,2723 | 0,2626 | 0,2720 | 0,3065±0,0096 | 0,2891 | 0,2791 | 0,2890 |
| 356,0           | 0,2598±0,0059 | 0,2502 | 0,2436 | 0,2500 | 0,2634±0,0060 | 0,2649 | 0,2579 | 0,2646 |
| 383,9           | 0,2369±0,0131 | 0,2409 | 0,2358 | 0,2411 | 0,2427±0,0122 | 0,2549 | 0,2492 | 0,2548 |
| 511,0           | 0,2091±0,0055 | 0,2100 | 0,2077 | 0,2101 | 0,2180±0,0057 | 0,2216 | 0,2195 | 0,2216 |
| 661,7           | 0,1867±0,0041 | 0,1857 | 0,1851 | 0,1857 | 0,1918±0,0042 | 0,1958 | 0,1953 | 0,1958 |
| 1173,2          | 0,1458±0,0034 | 0,1400 | 0,1400 | 0,1398 | 0,1467±0,0034 | 0,1474 | 0,1474 | 0,1473 |
| 1274,5          | 0,1374±0,0035 | 0,1342 | 0,1344 | 0,1342 | 0,1445±0,0037 | 0,1413 | 0,1417 | 0,1412 |
| 1332,5          | 0,1357±0,0031 | 0,1312 | 0,1312 | 0,1310 | 0,1371±0,0031 | 0,1381 | 0,1383 | 0,1381 |

Tablo 4. 8. Piriñ ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 1,2631±0,0285 | 1,2586 | 1,1384 | 1,2594 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 0,6847±0,0127 | 0,7029 | 0,6334 | 0,7033 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2397±0,116  | 0,2520 | 0,2447 | 0,2517 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,2388±0,0078 | 0,2417 | 0,2360 | 0,2418 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,2357±0,0053 | 0,2249 | 0,2210 | 0,2246 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,2143±0,0048 | 0,2175 | 0,2143 | 0,2175 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,1945±0,0039 | 0,1917 | 0,1907 | 0,1916 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1744±0,0027 | 0,1706 | 0,1706 | 0,1705 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1335±0,0019 | 0,1293 | 0,1294 | 0,1290 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1284±0,0023 | 0,1239 | 0,1241 | 0,1238 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1248±0,0020 | 0,1212 | 0,1218 | 0,1211 |

| Enerji<br>(keV) | P20           |        |        |        | P30           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,4611±0,0354 | 1,5315 | 1,3920 | 1,5325 | 1,6941±0,0394 | 1,7436 | 1,5903 | 1,7458 |
| 81,0            | 0,7918±0,0193 | 0,8214 | 0,7417 | 0,8223 | 0,8785±0,0205 | 0,9102 | 0,8227 | 0,9106 |
| 276,4           | 0,2668±0,0124 | 0,2648 | 0,2560 | 0,2648 | 0,2660±0,0099 | 0,2704 | 0,2613 | 0,2702 |
| 302,9           | 0,2523±0,0096 | 0,2535 | 0,2466 | 0,2534 | 0,2673±0,0084 | 0,2585 | 0,2511 | 0,2584 |
| 356,0           | 0,2474±0,0085 | 0,2352 | 0,2305 | 0,2352 | 0,2492±0,0073 | 0,2394 | 0,2343 | 0,2393 |
| 383,9           | 0,2234±0,0062 | 0,2273 | 0,2234 | 0,2274 | 0,2274±0,0052 | 0,2312 | 0,2270 | 0,2315 |
| 511,0           | 0,2004±0,0045 | 0,2000 | 0,1987 | 0,1999 | 0,1957±0,0059 | 0,2030 | 0,2016 | 0,2026 |
| 661,7           | 0,1724±0,0025 | 0,1777 | 0,1775 | 0,1777 | 0,1801±0,0042 | 0,1802 | 0,1797 | 0,1800 |
| 1173,2          | 0,1365±0,0019 | 0,1346 | 0,1346 | 0,1343 | 0,1441±0,0029 | 0,1363 | 0,1362 | 0,1362 |
| 1274,5          | 0,1363±0,0019 | 0,1290 | 0,1293 | 0,1289 | 0,1336±0,0013 | 0,1307 | 0,1309 | 0,1306 |
| 1332,5          | 0,1313±0,0016 | 0,1261 | 0,1263 | 0,1260 | 0,1250±0,0028 | 0,1277 | 0,1279 | 0,1274 |

Tablo 4.8. Devam Piriç ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | P40           |        |        |        | P50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,8472±0,0502 | 1,9386 | 1,7665 | 1,9386 | 2,0269±0,0528 | 2,1410 | 1,9602 | 2,1445 |
| 81,0            | 0,9579±0,0278 | 0,9924 | 0,8955 | 0,9922 | 1,0503±0,0270 | 1,0800 | 0,9785 | 1,0803 |
| 276,4           | 0,2661±0,0156 | 0,2765 | 0,2662 | 0,2763 | 0,2873±0,0138 | 0,2855 | 0,2746 | 0,2854 |
| 302,9           | 0,2639±0,0093 | 0,2639 | 0,2555 | 0,2638 | 0,2645±0,0105 | 0,0227 | 0,2634 | 0,2722 |
| 356,0           | 0,2420±0,0065 | 0,2440 | 0,2378 | 0,2441 | 0,2403±0,0088 | 0,2513 | 0,2450 | 0,2512 |
| 383,9           | 0,2297±0,0042 | 0,2354 | 0,2303 | 0,2355 | 0,2282±0,0071 | 0,2423 | 0,2376 | 0,2422 |
| 511,0           | 0,1962±0,0034 | 0,2063 | 0,2045 | 0,2062 | 0,2012±0,0054 | 0,2121 | 0,2100 | 0,2119 |
| 661,7           | 0,1917±0,0037 | 0,1830 | 0,1825 | 0,1830 | 0,1820±0,0042 | 0,1880 | 0,1875 | 0,1880 |
| 1173,2          | 0,1433±0,0026 | 0,1384 | 0,1382 | 0,1383 | 0,1408±0,0027 | 0,1420 | 0,1420 | 0,1419 |
| 1274,5          | 0,1362±0,0024 | 0,1326 | 0,1326 | 0,1326 | 0,1363±0,0015 | 0,1361 | 0,1363 | 0,1358 |
| 1332,5          | 0,1342±0,0027 | 0,1297 | 0,1295 | 0,1296 | 0,1414±0,0013 | 0,1331 | 0,1331 | 0,1331 |

Tablo 4. 9. Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 0,9645±0,0218 | 1,0212 | 1,0663 | 1,0216 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 0,5638±0,0166 | 0,5807 | 0,5830 | 0,5809 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2111±0,0105 | 0,2176 | 0,2150 | 0,2175 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,2177±0,0091 | 0,2089 | 0,2070 | 0,2088 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,1890±0,0084 | 0,1946 | 0,1937 | 0,1944 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,1843±0,0072 | 0,1883 | 0,1879 | 0,1885 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,1588±0,0059 | 0,1661 | 0,1668 | 0,1659 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1482±0,0041 | 0,1478 | 0,1493 | 0,1476 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1137±0,0035 | 0,1121 | 0,1132 | 0,1120 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1107±0,0030 | 0,1074 | 0,1088 | 0,1074 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1025±0,0023 | 0,1050 | 0,1063 | 0,1050 |

| Enerji<br>(keV) | C20           |        |        |        | C30           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1371±0,0251 | 1,1977 | 1,3623 | 1,1979 | 1,2522±0,0283 | 1,3233 | 1,5910 | 1,3243 |
| 81,0            | 0,6491±0,0170 | 0,6596 | 0,7109 | 0,6598 | 0,7000±0,0174 | 0,7122 | 0,8054 | 0,7128 |
| 276,4           | 0,2282±0,0087 | 0,2288 | 0,2286 | 0,223  | 0,2274±0,0112 | 0,2325 | 0,2345 | 0,2326 |
| 302,9           | 0,2213±0,0071 | 0,2193 | 0,2194 | 0,2192 | 0,2293±0,0095 | 0,2226 | 0,2245 | 0,2225 |
| 356,0           | 0,1999±0,0061 | 0,2040 | 0,2049 | 0,2038 | 0,2015±0,0082 | 0,2067 | 0,2091 | 0,2067 |
| 383,9           | 0,1916±0,0049 | 0,1972 | 0,1984 | 0,1973 | 0,1974±0,0068 | 0,1998 | 0,2027 | 0,1997 |
| 511,0           | 0,1675±0,0047 | 0,1737 | 0,1761 | 0,1739 | 0,1845±0,0054 | 0,1758 | 0,1794 | 0,1755 |
| 661,7           | 0,1602±0,0036 | 0,1545 | 0,1573 | 0,1544 | 0,1606±0,0071 | 0,1562 | 0,1601 | 0,1560 |
| 1173,2          | 0,1113±0,0031 | 0,1171 | 0,1192 | 0,1171 | 0,1233±0,0037 | 0,1183 | 0,1213 | 0,1181 |
| 1274,5          | 0,1142±0,0029 | 0,1122 | 0,1144 | 0,1121 | 0,1064±0,0026 | 0,1134 | 0,1165 | 0,1133 |
| 1332,5          | 0,1037±0,0023 | 0,1097 | 0,1118 | 0,1096 | 0,1086±0,0024 | 0,1109 | 0,1138 | 0,1108 |



Tablo 4.9. Devam Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | C40           |        |        |        | C50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,4253±0,0376 | 1,4633 | 1,8269 | 1,4643 | 1,5880±0,0435 | 1,6299 | 2,0946 | 1,6319 |
| 81,0            | 0,7572±0,0189 | 0,7741 | 0,9072 | 0,7748 | 0,8300±0,0246 | 0,8508 | 1,0242 | 0,8514 |
| 276,4           | 0,2340±0,0203 | 0,2406 | 0,2443 | 0,2405 | 0,2491±0,0135 | 0,2539 | 0,2599 | 0,2540 |
| 302,9           | 0,2362±0,0088 | 0,2302 | 0,2340 | 0,2300 | 0,2327±0,0122 | 0,2427 | 0,2483 | 0,2426 |
| 356,0           | 0,2146±0,0073 | 0,2135 | 0,2173 | 0,2134 | 0,2242±0,0094 | 0,2248 | 0,2304 | 0,2249 |
| 383,9           | 0,2066±0,0077 | 0,2062 | 0,2105 | 0,2061 | 0,2174±0,0132 | 0,2171 | 0,2228 | 0,2173 |
| 511,0           | 0,1864±0,0054 | 0,1812 | 0,1862 | 0,1812 | 0,1957±0,0083 | 0,1906 | 0,1966 | 0,1906 |
| 661,7           | 0,1651±0,0048 | 0,1610 | 0,1661 | 0,1609 | 0,1737±0,0017 | 0,1693 | 0,1753 | 0,1691 |
| 1173,2          | 0,1194±0,0036 | 0,1219 | 0,1257 | 0,1218 | 0,1261±0,0013 | 0,1281 | 0,1327 | 0,1281 |
| 1274,5          | 0,1225±0,0032 | 0,1168 | 0,1206 | 0,1165 | 0,1197±0,0014 | 0,1227 | 0,1274 | 0,1229 |
| 1332,5          | 0,1093±0,0022 | 0,1142 | 0,1178 | 0,114  | 0,1258±0,0018 | 0,1200 | 0,1243 | 0,1201 |

Tablo 4. 10. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 2,6778±0,0942 | 2,8373 | 2,6254 | 2,8406 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 1,3308±0,0320 | 1,3874 | 1,2704 | 1,3888 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2889±0,0140 | 0,3048 | 0,2928 | 0,3046 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,3065±0,0096 | 0,2891 | 0,2791 | 0,2890 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,2634±0,0060 | 0,2649 | 0,2579 | 0,2646 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,2427±0,0122 | 0,2549 | 0,2492 | 0,2548 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,2180±0,0057 | 0,2216 | 0,2195 | 0,2216 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1918±0,0042 | 0,1958 | 0,1953 | 0,1958 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1467±0,0034 | 0,1474 | 0,1474 | 0,1473 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1445±0,0037 | 0,1413 | 0,1417 | 0,1412 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1371±0,0031 | 0,1381 | 0,1383 | 0,1381 |

| Enerji<br>(keV) | B50B5         |        |        |        | B50B10        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 2,4566±0,1175 | 2,4919 | 2,3121 | 2,4944 | 2,2564±0,0780 | 2,3272 | 2,1571 | 2,3292 |
| 81,0            | 1,1969±0,0386 | 1,2238 | 1,1211 | 1,2246 | 1,0938±0,0287 | 1,1475 | 1,0517 | 1,1483 |
| 276,4           | 0,2767±0,0138 | 0,2741 | 0,2635 | 0,2740 | 0,2641±0,0144 | 0,2620 | 0,2522 | 0,2617 |
| 302,9           | 0,2748±0,0090 | 0,2601 | 0,2515 | 0,2600 | 0,2426±0,0077 | 0,2486 | 0,2405 | 0,2486 |
| 356,0           | 0,2361±0,0054 | 0,2387 | 0,2324 | 0,2384 | 0,2391±0,0054 | 0,2283 | 0,2225 | 0,2282 |
| 383,9           | 0,2290±0,0115 | 0,2297 | 0,2247 | 0,2295 | 0,2172±0,0113 | 0,2197 | 0,2150 | 0,2194 |
| 511,0           | 0,1926±0,0051 | 0,1998 | 0,1979 | 0,1998 | 0,1870±0,0048 | 0,1913 | 0,1897 | 0,1913 |
| 661,7           | 0,1716±0,0038 | 0,1766 | 0,1762 | 0,1765 | 0,1780±0,0039 | 0,1691 | 0,1683 | 0,1692 |
| 1173,2          | 0,1312±0,0031 | 0,1330 | 0,1332 | 0,1329 | 0,1309±0,0030 | 0,1274 | 0,1275 | 0,1273 |
| 1274,5          | 0,1248±0,0032 | 0,1275 | 0,1278 | 0,1273 | 0,1215±0,0030 | 0,1222 | 0,1224 | 0,1219 |
| 1332,5          | 0,1197±0,0027 | 0,1246 | 0,1249 | 0,1246 | 0,1152±0,0030 | 0,1194 | 0,1196 | 0,1193 |

Tablo 4.10. Devam %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( cm<sup>-1</sup>) değerleri

| Enerji<br>(keV) | B50B15        |        |        |        | B50B20        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 2,1544±0,0740 | 2,2077 | 2,0473 | 1,9332 | 2,1280±0,0848 | 2,0323 | 1,8835 | 2,0345 |
| 81,0            | 1,0354±0,0275 | 1,0934 | 1,0032 | 0,9820 | 1,0384±0,0262 | 1,0109 | 0,9271 | 1,0114 |
| 276,4           | 0,2471±0,0134 | 0,2543 | 0,2448 | 0,2517 | 0,2378±0,0127 | 0,2392 | 0,2305 | 0,2391 |
| 302,9           | 0,2368±0,0074 | 0,2414 | 0,2337 | 0,2396 | 0,2154±0,0068 | 0,2273 | 0,2201 | 0,2269 |
| 356,0           | 0,2317±0,0053 | 0,2212 | 0,2163 | 0,2210 | 0,2110±0,0048 | 0,2080 | 0,2040 | 0,2087 |
| 383,9           | 0,2159±0,0122 | 0,2135 | 0,2089 | 0,2127 | 0,2056±0,0106 | 0,2011 | 0,1970 | 0,2012 |
| 511,0           | 0,1942±0,0052 | 0,1860 | 0,1844 | 0,1861 | 0,1806±0,0046 | 0,1753 | 0,1740 | 0,1752 |
| 661,7           | 0,1630±0,0036 | 0,1645 | 0,1640 | 0,1649 | 0,1632±0,0036 | 0,1551 | 0,1549 | 0,1549 |
| 1173,2          | 0,1248±0,0029 | 0,1240 | 0,1243 | 0,1245 | 0,1147±0,0027 | 0,1169 | 0,1169 | 0,1167 |
| 1274,5          | 0,1138±0,0029 | 0,1189 | 0,1191 | 0,1193 | 0,1158±0,0029 | 0,1121 | 0,1123 | 0,1120 |
| 1332,5          | 0,1211±0,0027 | 0,1162 | 0,1164 | 0,1166 | 0,1037±0,0023 | 0,1096 | 0,1097 | 0,1095 |

Tablo 4. 11. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı ( cm<sup>-1</sup>) değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 2,0269±0,0528 | 2,1410 | 1,9602 | 2,1445 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 1,0503±0,0270 | 1,0800 | 0,9785 | 1,0803 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2873±0,0138 | 0,2855 | 0,2746 | 0,2854 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,2645±0,0105 | 0,0227 | 0,2634 | 0,2722 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,2403±0,0088 | 0,2513 | 0,2450 | 0,2512 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,2282±0,0071 | 0,2423 | 0,2376 | 0,2422 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,2012±0,0054 | 0,2121 | 0,2100 | 0,2119 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1820±0,0042 | 0,1880 | 0,1875 | 0,1880 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1408±0,0027 | 0,1420 | 0,1420 | 0,1419 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1363±0,0015 | 0,1361 | 0,1363 | 0,1358 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1414±0,0013 | 0,1331 | 0,1331 | 0,1331 |

| Enerji<br>(keV) | P50B5         |        |        |        | P50B10        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,9480±0,2230 | 1,9864 | 1,8171 | 1,6896 | 1,9164±0,0605 | 1,8408 | 1,6855 | 1,8224 |
| 81,0            | 1,0400±0,0458 | 1,0062 | 0,9125 | 0,8856 | 0,9234±0,0233 | 0,9383 | 0,8504 | 0,9278 |
| 276,4           | 0,2588±0,0144 | 0,2716 | 0,2615 | 0,2653 | 0,2440±0,0132 | 0,2569 | 0,2477 | 0,2542 |
| 302,9           | 0,2408±0,0089 | 0,2574 | 0,2502 | 0,2535 | 0,2493±0,0082 | 0,2452 | 0,2379 | 0,2421 |
| 356,0           | 0,2241±0,0055 | 0,2386 | 0,2333 | 0,2348 | 0,2373±0,0053 | 0,2266 | 0,2213 | 0,2237 |
| 383,9           | 0,2119±0,0128 | 0,2303 | 0,2259 | 0,2268 | 0,2168±0,0118 | 0,2186 | 0,2143 | 0,2158 |
| 511,0           | 0,1873±0,0050 | 0,2017 | 0,1999 | 0,1993 | 0,2012±0,0053 | 0,1915 | 0,1902 | 0,1890 |
| 661,7           | 0,1697±0,0039 | 0,1788 | 0,1786 | 0,1768 | 0,1787±0,0039 | 0,1699 | 0,1696 | 0,1677 |
| 1173,2          | 0,1189±0,0030 | 0,1351 | 0,1352 | 0,1337 | 0,1322±0,0031 | 0,1284 | 0,1286 | 0,1268 |
| 1274,5          | 0,1248±0,0034 | 0,1297 | 0,1300 | 0,1283 | 0,1202±0,0030 | 0,1231 | 0,1234 | 0,1215 |
| 1332,5          | 0,1224±0,0030 | 0,1266 | 0,1269 | 0,1253 | 0,1162±0,0026 | 0,1203 | 0,1205 | 0,1187 |

Tablo 4.11. Devam %50 piriç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı (cm<sup>-1</sup>) değerleri

| Enerji<br>(keV) | P50B15        |        |        |        | P50B20        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,7216±0,0439 | 1,7723 | 1,6218 | 1,7751 | 1,5927±0,0381 | 1,6459 | 1,5431 | 1,6861 |
| 81,0            | 0,8817±0,0224 | 0,9079 | 0,8238 | 0,9084 | 0,8741±0,0262 | 0,8514 | 0,7877 | 0,8670 |
| 276,4           | 0,2422±0,012  | 0,2528 | 0,2440 | 0,2526 | 0,2445±0,0133 | 0,2451 | 0,2369 | 0,2452 |
| 302,9           | 0,2333±0,0075 | 0,2413 | 0,2340 | 0,2411 | 0,2385±0,0077 | 0,2343 | 0,2273 | 0,2338 |
| 356,0           | 0,2304±0,0051 | 0,2231 | 0,2179 | 0,2230 | 0,2252±0,0050 | 0,2166 | 0,2118 | 0,2165 |
| 383,9           | 0,2112±0,0111 | 0,2153 | 0,2111 | 0,2153 | 0,2138±0,0123 | 0,2092 | 0,2052 | 0,2089 |
| 511,0           | 0,1836±0,0048 | 0,1887 | 0,1871 | 0,1887 | 0,1779±0,0047 | 0,1835 | 0,1819 | 0,1833 |
| 661,7           | 0,1607±0,0036 | 0,1674 | 0,1672 | 0,1672 | 0,1668±0,0036 | 0,1629 | 0,1624 | 0,1625 |
| 1173,2          | 0,1309±0,0030 | 0,1266 | 0,1267 | 0,1265 | 0,1209±0,0028 | 0,1232 | 0,1232 | 0,1228 |
| 1274,5          | 0,1237±0,0031 | 0,1213 | 0,1216 | 0,1212 | 0,1243±0,0031 | 0,1181 | 0,1183 | 0,1179 |
| 1332,5          | 0,1143±0,0026 | 0,1186 | 0,1188 | 0,1185 | 0,1124±0,0025 | 0,1154 | 0,1154 | 0,1152 |

Tablo 4. 12. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı (cm<sup>-1</sup>)

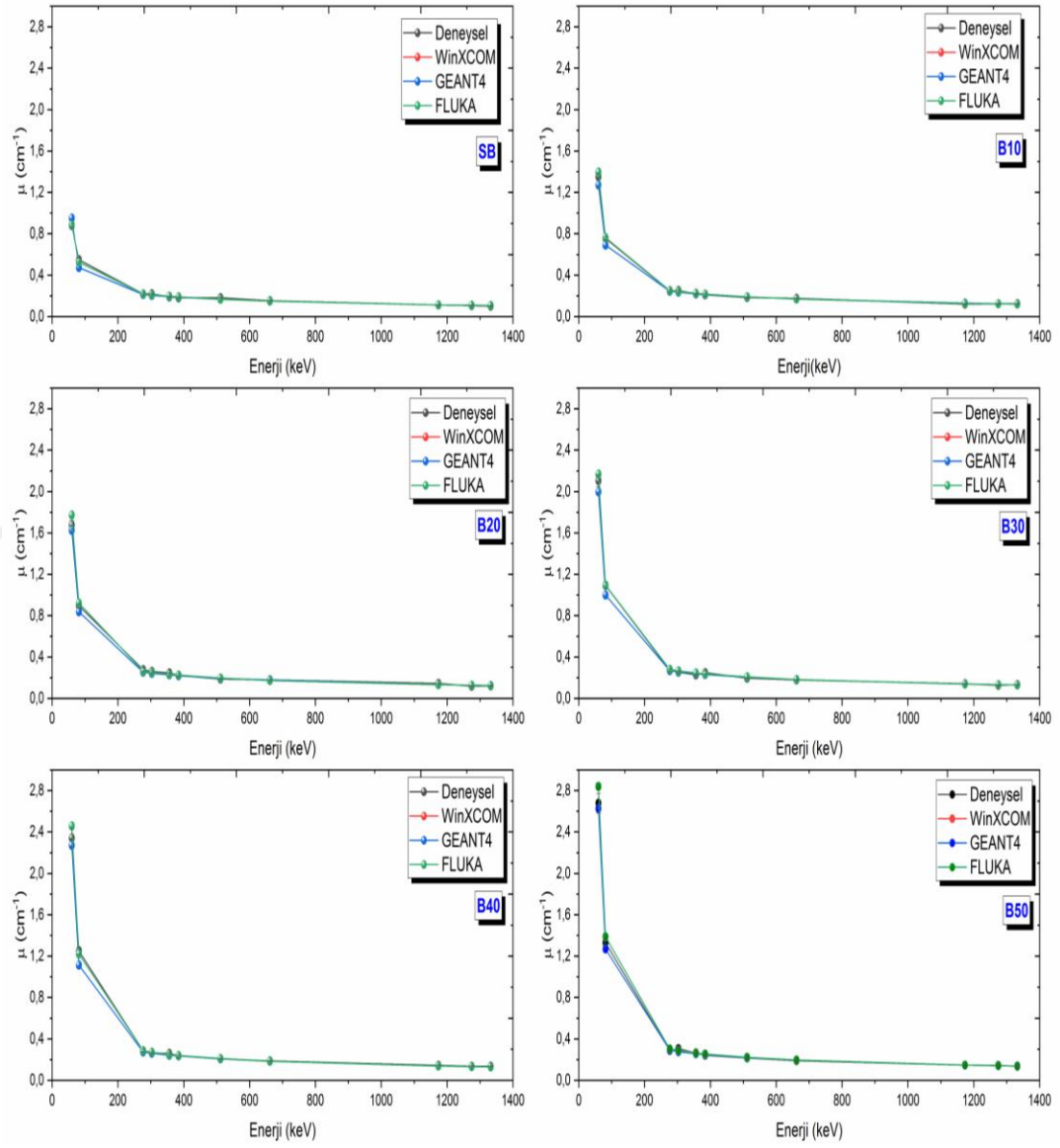
| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8790±0,0196 | 0,8834 | 0,9504 | 0,8839 | 1,5880±0,0435 | 1,6299 | 2,0946 | 1,6319 |
| 81,0            | 0,5487±0,0124 | 0,5272 | 0,4738 | 0,5273 | 0,8300±0,0246 | 0,8508 | 1,0242 | 0,8514 |
| 276,4           | 0,2210±0,0111 | 0,2187 | 0,2133 | 0,2187 | 0,2491±0,0135 | 0,2539 | 0,2599 | 0,2540 |
| 302,9           | 0,2198±0,0065 | 0,2102 | 0,2057 | 0,2101 | 0,2327±0,0122 | 0,2427 | 0,2483 | 0,2426 |
| 356,0           | 0,1901±0,0044 | 0,1963 | 0,1932 | 0,1964 | 0,2242±0,0094 | 0,2248 | 0,2304 | 0,2249 |
| 383,9           | 0,1820±0,0096 | 0,1900 | 0,1874 | 0,1903 | 0,2174±0,0132 | 0,2171 | 0,2228 | 0,2173 |
| 511,0           | 0,1810±0,0047 | 0,1680 | 0,1673 | 0,1677 | 0,1957±0,0083 | 0,1906 | 0,1966 | 0,1906 |
| 661,7           | 0,1547±0,0034 | 0,1496 | 0,1498 | 0,1495 | 0,1737±0,0017 | 0,1693 | 0,1753 | 0,1691 |
| 1173,2          | 0,1134±0,0028 | 0,1135 | 0,1137 | 0,1134 | 0,1261±0,0013 | 0,1281 | 0,1327 | 0,1281 |
| 1274,5          | 0,1059±0,0026 | 0,1089 | 0,1093 | 0,1090 | 0,1197±0,0014 | 0,1227 | 0,1274 | 0,1229 |
| 1332,5          | 0,1009±0,0023 | 0,1064 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1258±0,0018 | 0,1200 | 0,1243 | 0,1201 |

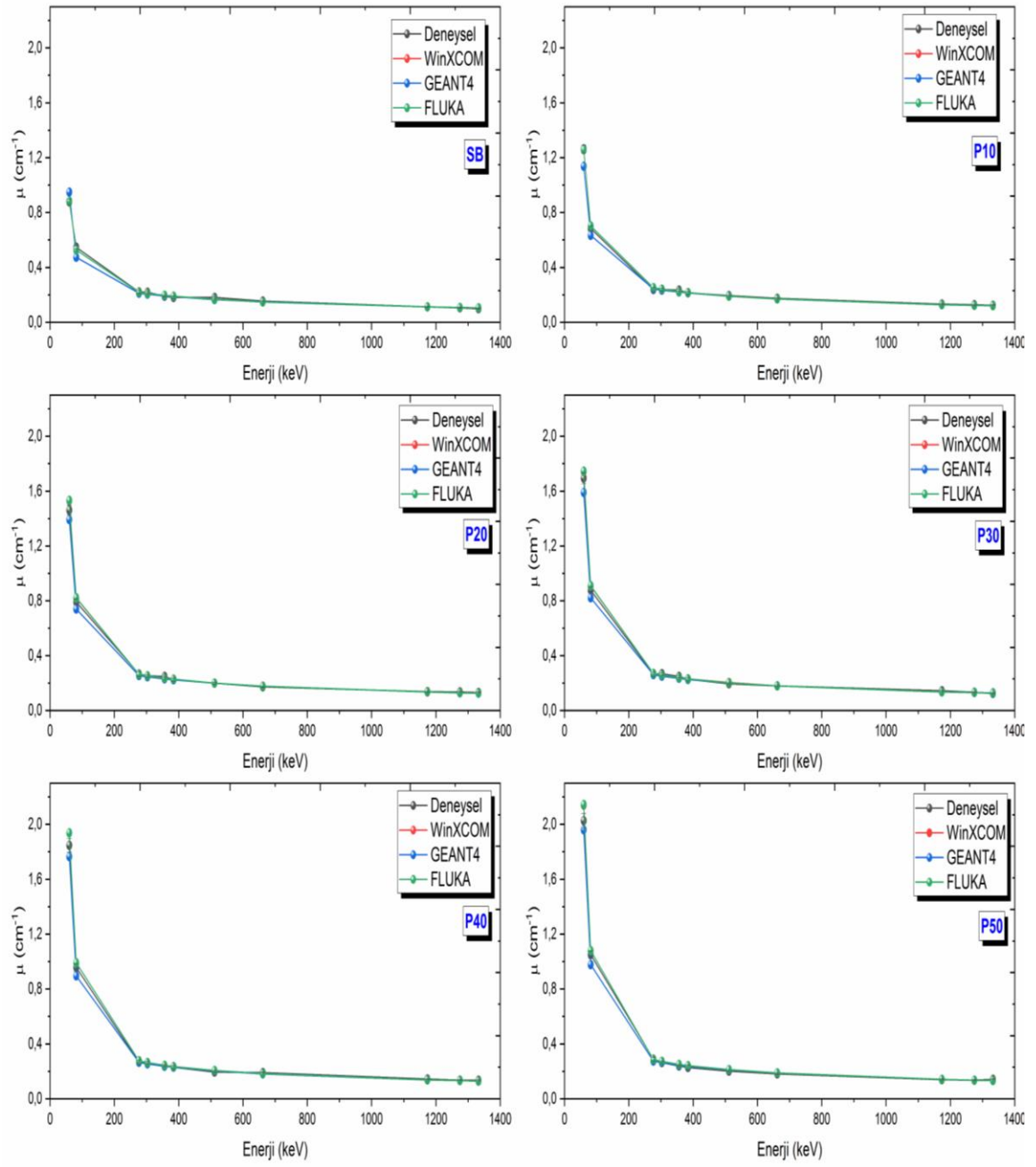
| Enerji<br>(keV) | C50B5          |        |        |        | C50B10        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel       | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,5998±0,04115 | 1,6414 | 2,1095 | 1,6431 | 1,4634±0,0339 | 1,5424 | 1,9761 | 1,5421 |
| 81,0            | 0,8374±0,0208  | 0,8617 | 1,0353 | 0,8625 | 0,7894±0,0196 | 0,814  | 0,9745 | 0,8146 |
| 276,4           | 0,2652±0,0130  | 0,2616 | 0,2670 | 0,2614 | 0,2596±0,0119 | 0,2510 | 0,2562 | 0,2509 |
| 302,9           | 0,2538±0,0088  | 0,2501 | 0,2555 | 0,2502 | 0,2509±0,0077 | 0,2401 | 0,2452 | 0,2400 |
| 356,0           | 0,2284±0,0052  | 0,2317 | 0,2375 | 0,2317 | 0,2335±0,0052 | 0,2225 | 0,2278 | 0,2225 |
| 383,9           | 0,2181±0,0119  | 0,2239 | 0,2297 | 0,2239 | 0,2173±0,0173 | 0,2150 | 0,2202 | 0,2149 |
| 511,0           | 0,1907±0,0050  | 0,1966 | 0,2028 | 0,1965 | 0,1785±0,0046 | 0,1889 | 0,1946 | 0,1889 |
| 661,7           | 0,1659±0,0036  | 0,1746 | 0,1807 | 0,1746 | 0,1641±0,0036 | 0,1678 | 0,1735 | 0,1676 |
| 1173,2          | 0,1371±0,0032  | 0,1321 | 0,1368 | 0,1319 | 0,1228±0,0029 | 0,1270 | 0,1313 | 0,1268 |
| 1274,5          | 0,1241±0,0031  | 0,1267 | 0,1314 | 0,1264 | 0,1185±0,0030 | 0,1218 | 0,1261 | 0,1216 |
| 1332,5          | 0,1211±0,0027  | 0,1238 | 0,1283 | 0,1237 | 0,1240±0,0028 | 0,1190 | 0,1232 | 0,1190 |

Tablo 4.12. Devam %50 paslanmaz çelik alaşımı ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılandırılmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş lineer azaltma katsayısı (cm<sup>-1</sup>) değerleri

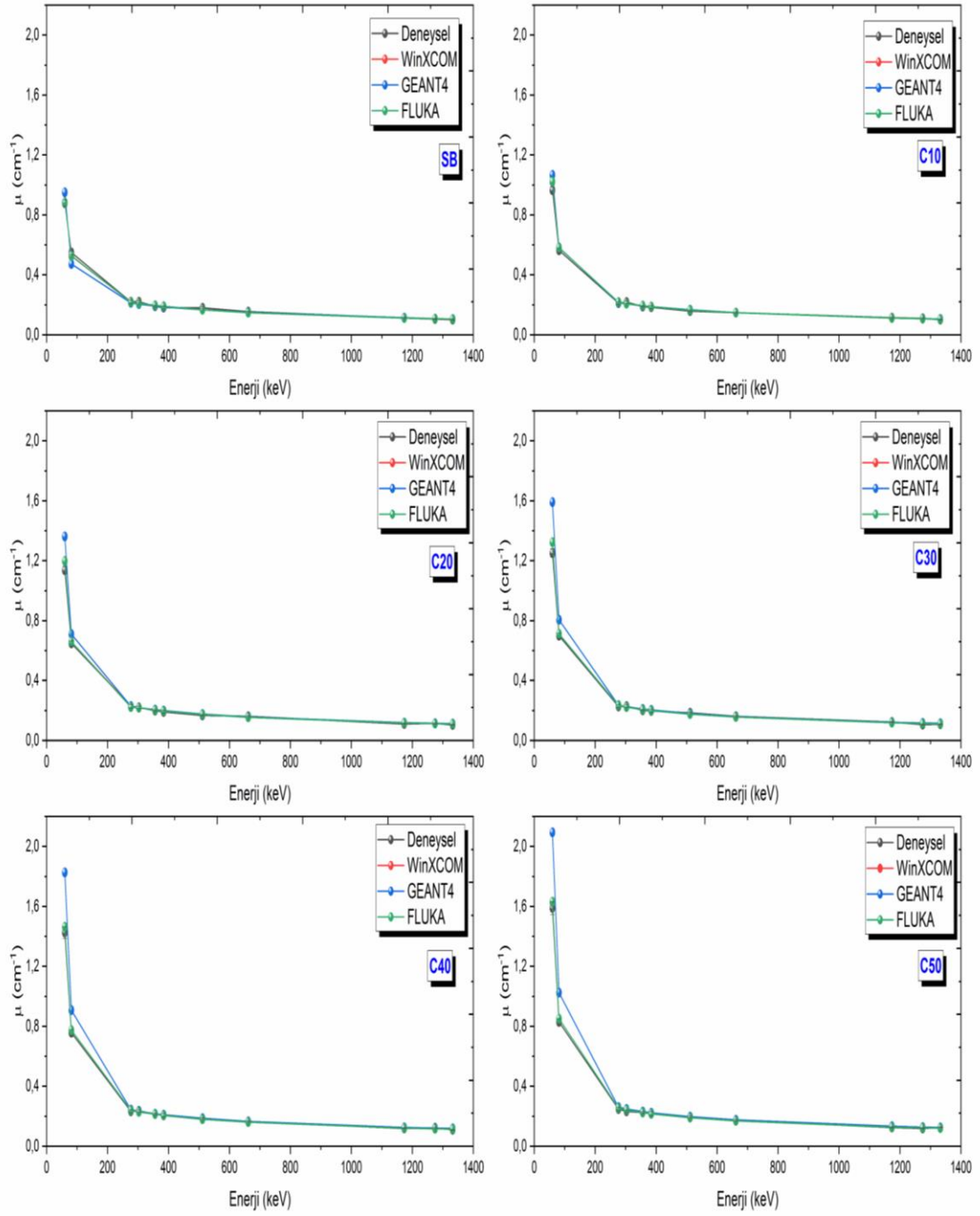
| Enerji<br>(keV) | C50B15        |        |        |        | C50B20        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,4063±0,0325 | 1,4535 | 1,8607 | 1,4565 | 1,2850±0,0294 | 1,3510 | 1,7290 | 1,3564 |
| 81,0            | 0,7560±0,0187 | 0,7716 | 0,9226 | 0,7729 | 0,6970±0,0196 | 0,7214 | 0,8614 | 0,7236 |
| 276,4           | 0,2518±0,0137 | 0,2419 | 0,2467 | 0,2417 | 0,2253±0,0111 | 0,2298 | 0,2342 | 0,2297 |
| 302,9           | 0,2292±0,0072 | 0,2314 | 0,2360 | 0,2312 | 0,2296±0,0077 | 0,2198 | 0,2241 | 0,2196 |
| 356,0           | 0,2216±0,0051 | 0,2145 | 0,2195 | 0,2146 | 0,2128±0,0048 | 0,2040 | 0,2085 | 0,2039 |
| 383,9           | 0,2097±0,0112 | 0,2074 | 0,2123 | 0,2074 | 0,1960±0,0099 | 0,1972 | 0,2016 | 0,1971 |
| 511,0           | 0,1799±0,0047 | 0,1823 | 0,1878 | 0,1822 | 0,1803±0,0047 | 0,1734 | 0,1780 | 0,1734 |
| 661,7           | 0,1545±0,0034 | 0,1619 | 0,1675 | 0,1617 | 0,1529±0,0033 | 0,1541 | 0,1590 | 0,154  |
| 1173,2          | 0,1180±0,0027 | 0,1226 | 0,1267 | 0,1226 | 0,1167±0,0027 | 0,1166 | 0,1205 | 0,1165 |
| 1274,5          | 0,1158±0,0029 | 0,1175 | 0,1216 | 0,1175 | 0,1064±0,0027 | 0,1118 | 0,1156 | 0,1117 |
| 1332,5          | 0,1102±0,0025 | 0,1149 | 0,1187 | 0,1148 | 0,1130±0,0025 | 0,1093 | 0,1129 | 0,1092 |



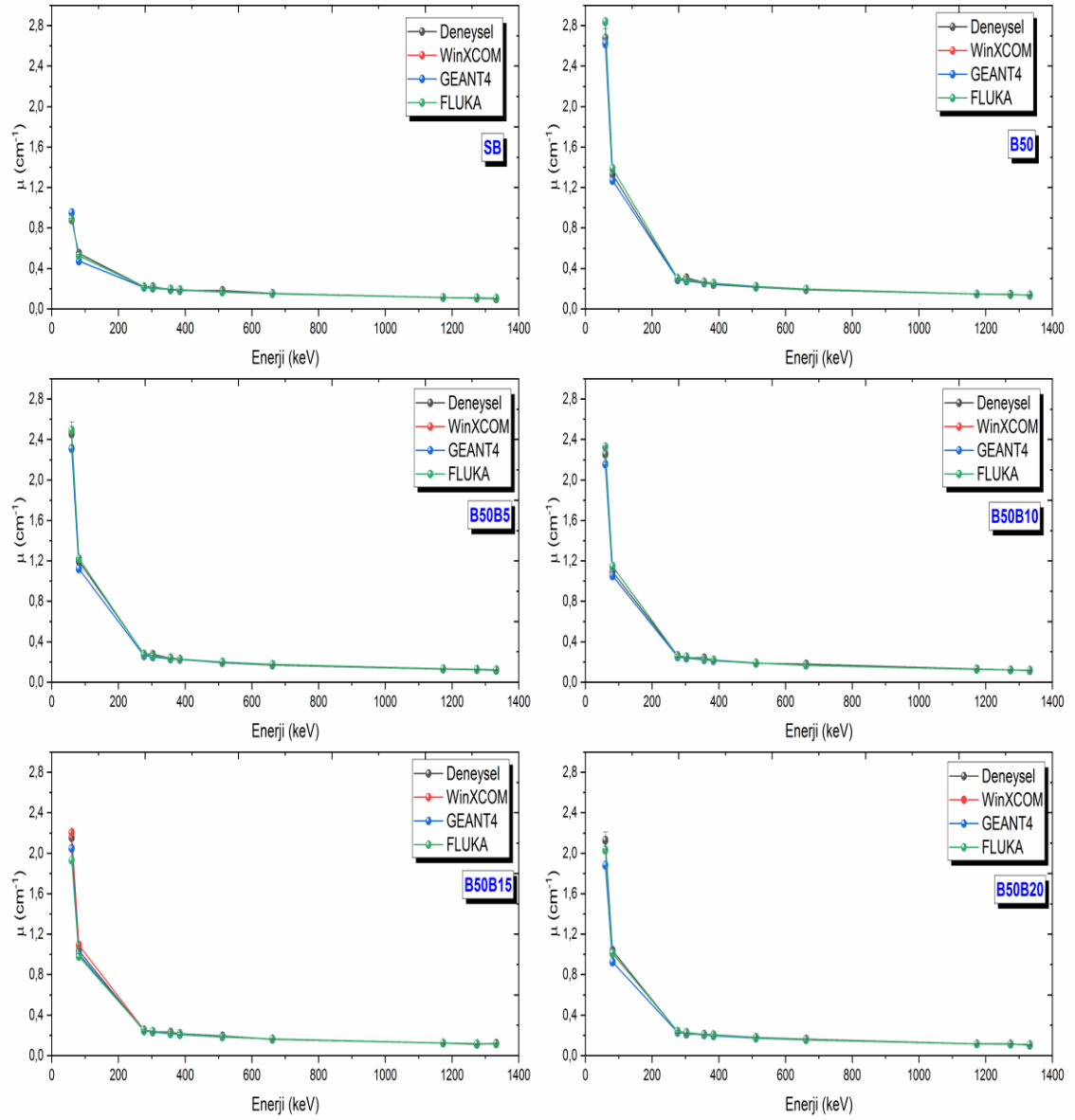
Şekil 4.7. Bronz ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.8. Pirinç ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği

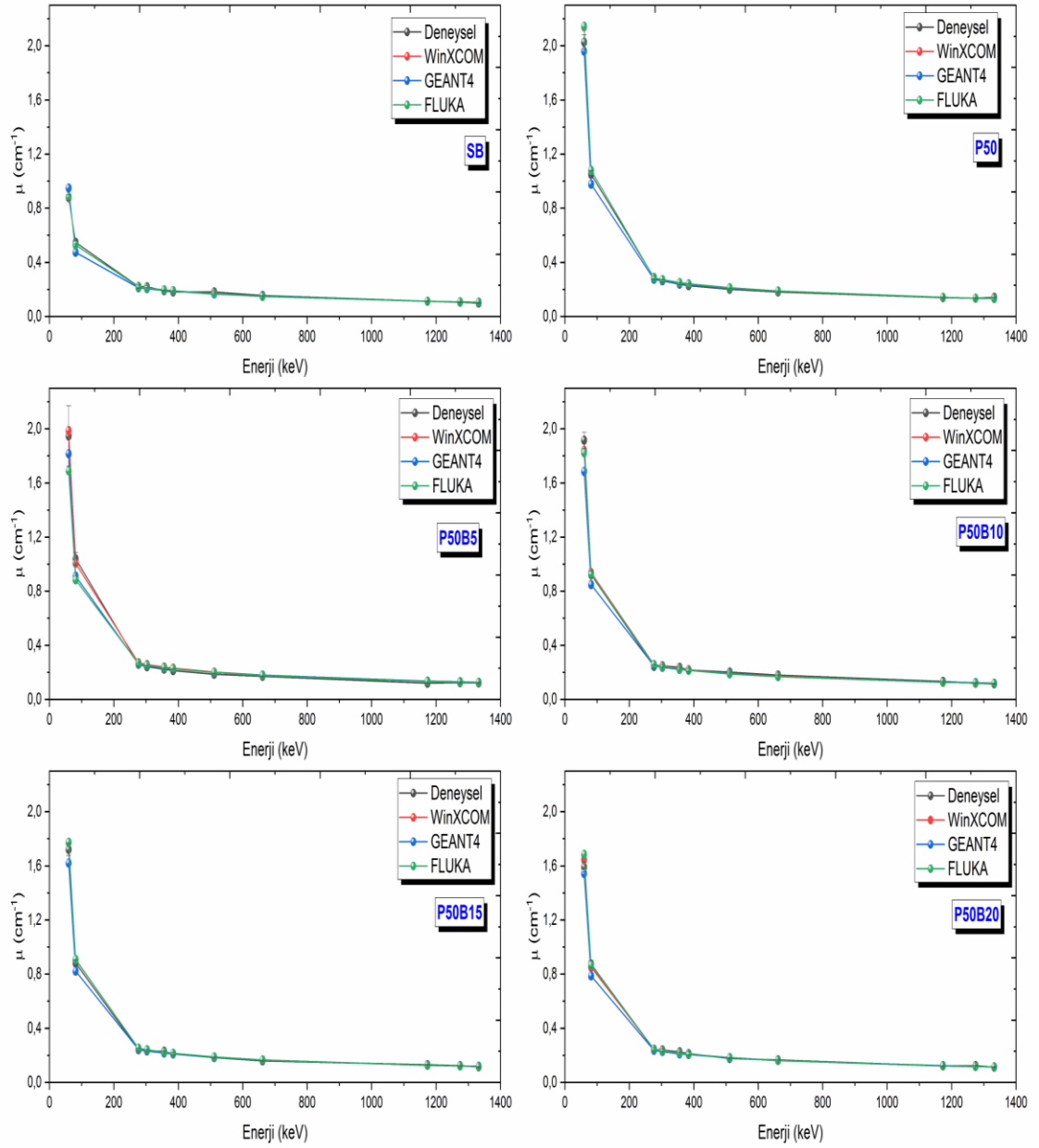


Şekil 4.9. Paslanmaz çelik ile katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği

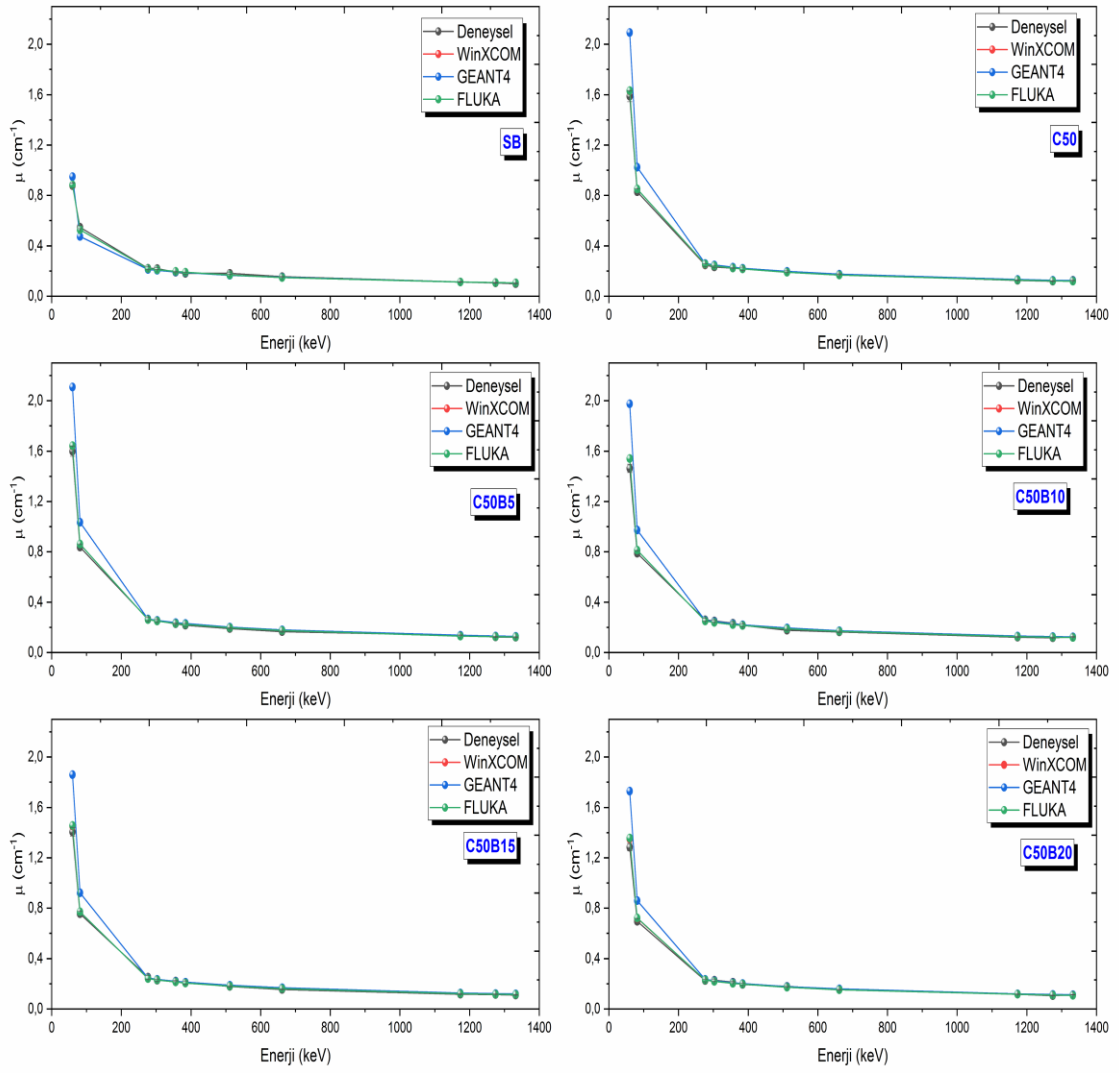


Şekil 4.10. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği





Şekil 4.11. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.12. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin lineer azaltma katsayısının enerjiye göre değişim grafiği

#### 4.3 Yarı Kalınlık Değeri (YKD), Onda-Bir Kalınlık Değeri (OKD) ve Ortalama Serbest Yol (OSY) Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları

Yarı kalınlık değeri (YKD, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin yarısının düşürüldüğü numune kalınlığını ifade etmektedir. Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C katkılı hazırlanan beton numunelerin YKD'leri eşitlik (2.29) yardımı ile bulunmuştur.

Onda-bir kalınlık değeri (OKD, cm), başlangıçta maruz kalınan radyasyon şiddetinin %10'nun geçebileceği numune kalınlığıdır. Diğer bir deyişle başlangıç radyasyon şiddetinin % 90'nın hedef malzemede azaltıldığı numune kalınlığını ifade etmektedir. Üretilen katkılı beton numunelerinin OKD'leri eşitlik (2.30) yardımıyla ile belirlenmiştir.

Fotonun madde içerisindeki ortalama serbest yolu, başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'sinin hedef materyalden geçebildiği numune kalınlığı olarak ifade edilmektedir. OSY değerleri eşitlik (2.31) yardımı belirlenmiştir. Her üç parametre hesabında da ana parametre değeri lineer azaltma katsayısıdır. Elde edilen YKD, OKD ve OSY değerleri bütün numuneler için daha kolay karşılaştırma yapabilmek adına tablolar halinde sunulmuştur.

Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik ve B<sub>4</sub>C katkılanmış tüm beton numunelerin YKD, OKD ve OSY parametrelerinin teorik, simülasyon ve deneysel sonuçları Tablo 4.13- 4.30'da sunulmuştur. Elde edilen veriler neticesinde oluşturulan grafikler Şekil 4.13-4.30'da sunulmuştur.

Tablo 4. 13. Bronz katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,5121±0,0113 | 0,4965 | 0,5450 | 0,4961 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 0,9177±0,0216 | 0,9099 | 1,0044 | 0,9092 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,1690 | 3,2498 | 3,1700 | 2,7960±0,1329 | 2,7415 | 2,8257 | 2,7432 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,2990 | 2,7391±0,0854 | 2,8628 | 2,9381 | 2,8641 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 3,1495±0,0705 | 3,0829 | 3,1408 | 3,0857 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 3,2943±0,1915 | 3,1895 | 3,2388 | 3,1916 |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 3,7577±0,0972 | 3,6249 | 3,6439 | 3,6289 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 3,9377±0,0862 | 4,0787 | 4,0756 | 4,0838 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 5,6796±0,1325 | 5,3849 | 5,3800 | 5,3904 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 5,5348±0,1393 | 5,6184 | 5,6034 | 5,6161 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 5,6095±0,1271 | 5,7474 | 5,7340 | 5,7570 |
| Enerji<br>(keV) | B20           |        |        |        | B30           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4129±0,0096 | 0,3909 | 0,4260 | 0,3906 | 0,3293±0,0090 | 0,3199 | 0,3468 | 0,3195 |
| 81,0            | 0,7741±0,0173 | 0,7509 | 0,8253 | 0,7502 | 0,6344±0,0164 | 0,6325 | 0,6926 | 0,6323 |
| 276,4           | 2,4935±0,1371 | 2,6315 | 2,7189 | 2,6348 | 2,5355±0,1423 | 2,4748 | 2,5670 | 2,4794 |
| 302,9           | 2,6527±0,0858 | 2,7565 | 2,8373 | 2,7559 | 2,7261±0,0891 | 2,5991 | 2,6804 | 2,6038 |
| 356,0           | 2,8102±0,0641 | 2,9807 | 3,0468 | 2,9826 | 3,0484±0,0719 | 2,8203 | 2,8876 | 2,8240 |
| 383,9           | 3,1179±0,1829 | 3,0883 | 3,1449 | 3,0891 | 2,7798±0,1470 | 2,9257 | 2,9845 | 2,9305 |
| 511,0           | 3,7085±0,0938 | 3,5231 | 3,5517 | 3,5245 | 3,5388±0,0905 | 3,3481 | 3,3753 | 3,3500 |
| 661,7           | 3,8610±0,0849 | 3,9714 | 3,8395 | 3,9701 | 3,8772±0,0850 | 3,7801 | 3,7832 | 3,7826 |
| 1173,2          | 4,8286±0,1180 | 5,2525 | 5,2409 | 5,2578 | 4,8937±0,1130 | 5,0070 | 5,0024 | 5,0097 |
| 1274,5          | 5,8331±0,1459 | 5,4805 | 5,4645 | 5,4818 | 5,4364±0,1366 | 5,2245 | 5,2047 | 5,2296 |
| 1332,5          | 5,7338±0,1289 | 5,6063 | 5,5964 | 5,6130 | 5,2170±0,1150 | 5,3444 | 5,3324 | 5,3442 |
| Enerji<br>(keV) | B40           |        |        |        | B50           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,2959±0,0110 | 0,2817 | 0,3052 | 0,2817 | 0,2589±0,0091 | 0,2443 | 0,2640 | 0,2440 |
| 81,0            | 0,5537±0,0134 | 0,5681 | 0,6226 | 0,5678 | 0,5209±0,0125 | 0,4996 | 0,5456 | 0,4991 |
| 276,4           | 2,4165±0,1250 | 2,4184 | 2,5177 | 2,4196 | 2,3994±0,1163 | 2,2741 | 2,3676 | 2,2753 |
| 302,9           | 2,6371±0,0854 | 2,5454 | 2,6391 | 2,5480 | 2,2612±0,0708 | 2,3980 | 2,4833 | 2,3987 |
| 356,0           | 2,6677±0,0604 | 2,7702 | 2,8458 | 2,7725 | 2,6317±0,0600 | 2,6164 | 2,6881 | 2,6199 |
| 383,9           | 2,9258±0,1614 | 2,8768 | 2,9397 | 2,8747 | 2,8558±0,1438 | 2,7196 | 2,7820 | 2,7203 |
| 511,0           | 3,3148±0,0879 | 3,3011 | 3,3374 | 3,2996 | 3,1800±0,0837 | 3,1280 | 3,1578 | 3,1285 |
| 661,7           | 3,7121±0,0817 | 3,7320 | 3,7442 | 3,7335 | 3,6140±0,0792 | 3,5404 | 3,5493 | 3,5403 |
| 1173,2          | 4,7539±0,1111 | 4,9497 | 4,9504 | 4,9585 | 4,7252±0,1096 | 4,7011 | 4,7036 | 4,7067 |
| 1274,5          | 5,0458±0,1279 | 5,1649 | 5,1591 | 5,1631 | 4,7954±0,1212 | 4,9055 | 4,8921 | 4,9100 |
| 1332,5          | 5,1078±0,1156 | 5,2834 | 5,2819 | 5,2901 | 5,0552±0,1139 | 5,0181 | 5,0102 | 5,0196 |

Tablo 4. 14. Pirinç katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı YKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,5487±0,0124 | 0,5507 | 0,6089 | 0,5504 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 1,0123±0,0244 | 0,9861 | 1,0943 | 0,9856 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,1690 | 3,2498 | 3,1700 | 2,8917±0,1561 | 2,7505 | 2,8329 | 2,7534 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,2990 | 2,9023±0,0939 | 2,8679 | 2,9375 | 2,8671 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 2,9406±0,0659 | 3,0821 | 3,1365 | 3,0867 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 3,2344±0,1631 | 3,1864 | 3,2338 | 3,1863 |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 3,5630±0,0910 | 3,6149 | 3,6347 | 3,6169 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 3,9740±0,0865 | 4,0638 | 4,0642 | 4,0648 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 5,1913±0,1204 | 5,3606 | 5,3586 | 5,3743 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 5,4002±0,1367 | 5,5929 | 5,5833 | 5,5999 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 5,5540±0,1245 | 5,7212 | 5,6896 | 5,7246 |
| Enerji<br>(keV) | P20           |        |        |        | P30           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4744±0,0115 | 0,4526 | 0,4980 | 0,4523 | 0,4092±0,095  | 0,3975 | 0,4358 | 0,3970 |
| 81,0            | 0,8754±0,0214 | 0,8438 | 0,9346 | 0,8429 | 0,7890±0,0193 | 0,7615 | 0,8426 | 0,7612 |
| 276,4           | 2,5977±0,1491 | 2,6180 | 2,7071 | 2,6173 | 2,6058±0,1570 | 2,5631 | 2,6532 | 2,5655 |
| 302,9           | 2,7476±0,0878 | 2,7348 | 2,8105 | 2,7351 | 2,5935±0,0823 | 2,6817 | 2,7599 | 2,6820 |
| 356,0           | 2,8017±0,0623 | 2,9465 | 3,0075 | 2,9471 | 2,7812±0,0623 | 2,8953 | 2,9587 | 2,8968 |
| 383,9           | 3,1032±0,1586 | 3,0488 | 3,1022 | 3,0479 | 3,0479±0,1553 | 2,9981 | 3,0537 | 2,9939 |
| 511,0           | 3,4590±0,0904 | 3,4665 | 3,4880 | 3,4681 | 3,5416±0,0925 | 3,4153 | 3,4390 | 3,4206 |
| 661,7           | 4,0208±0,0884 | 3,9012 | 3,9040 | 3,9013 | 3,8479±0,0838 | 3,8471 | 3,8563 | 3,8505 |
| 1173,2          | 5,0788±0,1178 | 5,1516 | 5,1489 | 5,1615 | 4,8112±0,1124 | 5,0848 | 5,0894 | 5,0892 |
| 1274,5          | 5,0838±0,1281 | 5,3748 | 5,3616 | 5,3790 | 5,1895±0,1302 | 5,3051 | 5,2960 | 5,3077 |
| 1332,5          | 5,2777±0,1187 | 5,4981 | 5,4892 | 5,5021 | 5,5455±0,1244 | 5,4267 | 5,4211 | 5,4408 |
| Enerji<br>(keV) | P40           |        |        |        | P50           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,3752±0,0102 | 0,3576 | 0,3924 | 0,3575 | 0,3420±0,0089 | 0,3238 | 0,3536 | 0,3232 |
| 81,0            | 0,7236±0,0210 | 0,6984 | 0,7741 | 0,6986 | 0,6600±0,0170 | 0,6418 | 0,7084 | 0,6416 |
| 276,4           | 2,6044±0,1540 | 2,5073 | 2,6035 | 2,5088 | 2,4124±0,1118 | 2,4279 | 2,5238 | 2,4283 |
| 302,9           | 2,6263±0,0778 | 2,6268 | 2,7134 | 2,6278 | 2,6205±0,0831 | 2,5466 | 2,6311 | 2,5464 |
| 356,0           | 2,8638±0,0649 | 2,8412 | 2,9149 | 2,8392 | 2,8846±0,0656 | 2,7588 | 2,8297 | 2,7595 |
| 383,9           | 3,0176±0,1676 | 2,9440 | 3,0100 | 2,9431 | 3,0378±0,1989 | 2,8602 | 2,9174 | 2,8620 |
| 511,0           | 3,5337±0,0928 | 3,3591 | 3,3902 | 3,3609 | 3,4449±0,0914 | 3,2681 | 3,3003 | 3,2719 |
| 661,7           | 3,6149±0,0796 | 3,7868 | 3,7989 | 3,7873 | 3,8079±0,0831 | 3,6868 | 3,6971 | 3,6875 |
| 1173,2          | 4,8381±0,1137 | 5,0090 | 5,0159 | 5,0119 | 4,9224±0,1150 | 4,8800 | 4,8817 | 4,8837 |
| 1274,5          | 5,0876±0,1282 | 5,2261 | 5,2268 | 5,2264 | 5,0860±0,1283 | 5,0914 | 5,0844 | 5,1046 |
| 1332,5          | 5,1633±0,1164 | 5,3457 | 5,3513 | 5,3500 | 4,9016±0,1093 | 5,2079 | 5,2074 | 5,2066 |

Tablo 4. 15. Paslanmış çelik katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş karşılaştırmalı YKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,7187±0,0163 | 0,6788 | 0,6500 | 0,6785 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 1,2294±0,0297 | 1,1936 | 1,1888 | 1,1932 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,1690 | 3,2498 | 3,1700 | 3,2835±0,1580 | 3,1847 | 3,2239 | 3,1865 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,2990 | 3,1833±0,1072 | 3,3181 | 3,3489 | 3,3195 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 3,6679±0,0820 | 3,5626 | 3,5792 | 3,5652 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 3,7616±0,2166 | 3,6818 | 3,6893 | 3,6780 |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 4,3640±0,118  | 4,1733 | 4,1552 | 4,1786 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 4,6775±0,1019 | 4,6896 | 4,6429 | 4,6952 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 6,0940±0,1406 | 6,1838 | 6,1228 | 6,1916 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 6,2587±0,1526 | 6,4517 | 6,3682 | 6,4546 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 6,7612±0,1510 | 6,5997 | 6,5217 | 6,6020 |
| Enerji<br>(keV) | C20           |        |        |        | C30           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6096±0,0189 | 0,5787 | 0,5088 | 0,5786 | 0,5535±0,0201 | 0,5238 | 0,4357 | 0,5234 |
| 81,0            | 1,0679±0,0265 | 1,0509 | 0,9751 | 1,0505 | 0,9902±0,0183 | 0,9732 | 0,8606 | 0,9724 |
| 276,4           | 3,0370±0,1538 | 3,0291 | 3,0317 | 3,1089 | 3,0480±0,1402 | 2,9809 | 2,9563 | 2,9797 |
| 302,9           | 3,1318±0,1023 | 3,1601 | 3,1597 | 3,1628 | 3,0225±0,1105 | 3,1132 | 3,0876 | 3,1155 |
| 356,0           | 3,4681±0,0942 | 3,3986 | 3,3836 | 3,4010 | 3,4395±0,0978 | 3,3529 | 3,3154 | 3,3538 |
| 383,9           | 3,6170±0,1879 | 3,5145 | 3,4933 | 3,5127 | 3,5105±0,1609 | 3,4689 | 3,4197 | 3,4718 |
| 511,0           | 4,1373±0,1063 | 3,9896 | 3,9352 | 3,9869 | 3,7566±0,1243 | 3,9430 | 3,8630 | 3,9492 |
| 661,7           | 4,3273±0,0998 | 4,4865 | 4,4058 | 4,4906 | 4,3169±0,1294 | 4,4368 | 4,3287 | 4,4424 |
| 1173,2          | 6,2255±0,1397 | 5,9202 | 5,8161 | 5,9217 | 5,6223±0,1136 | 5,8583 | 5,7126 | 5,8679 |
| 1274,5          | 6,0686±0,1469 | 6,1767 | 6,0570 | 6,1807 | 6,5145±0,1029 | 6,1120 | 5,9494 | 6,1203 |
| 1332,5          | 6,6863±0,1597 | 6,3183 | 6,1975 | 6,3255 | 6,3821±0,1502 | 6,2521 | 6,0916 | 6,2581 |
| Enerji<br>(keV) | C40           |        |        |        | C50           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4863±0,0199 | 0,4737 | 0,3794 | 0,4734 | 0,4365±0,0120 | 0,4253 | 0,3309 | 0,4248 |
| 81,0            | 0,9154±0,0212 | 0,8954 | 0,7641 | 0,8947 | 0,8352±0,0209 | 0,8147 | 0,6768 | 0,8142 |
| 276,4           | 2,9621±0,1387 | 2,8807 | 2,8368 | 2,8824 | 2,7821±0,1267 | 2,7298 | 2,6668 | 2,7288 |
| 302,9           | 2,9344±0,1064 | 3,0113 | 2,9624 | 3,0136 | 2,9784±0,0925 | 2,8559 | 2,7920 | 2,8569 |
| 356,0           | 3,2305±0,1143 | 3,2472 | 3,1903 | 3,2479 | 3,0920±0,0698 | 3,0828 | 3,0087 | 3,0823 |
| 383,9           | 3,3546±0,0917 | 3,3610 | 3,2933 | 3,3632 | 3,1885±0,1939 | 3,1920 | 3,1118 | 3,1894 |
| 511,0           | 3,7186±0,9934 | 3,8245 | 3,7232 | 3,8259 | 3,5415±0,0919 | 3,6358 | 3,5262 | 3,6376 |
| 661,7           | 4,1994±0,1359 | 4,3058 | 4,1741 | 4,3075 | 3,9896±0,0872 | 4,0952 | 3,9537 | 4,0979 |
| 1173,2          | 5,8063±0,1297 | 5,6883 | 5,5165 | 5,6929 | 5,4966±0,1278 | 5,4126 | 5,2244 | 5,4101 |
| 1274,5          | 5,6572±0,1294 | 5,9347 | 5,7454 | 5,9485 | 5,7924±0,1448 | 5,6470 | 5,4416 | 5,6393 |
| 1332,5          | 6,3418±0,1306 | 6,0706 | 5,8819 | 6,0807 | 5,5110±0,1230 | 5,7763 | 5,5743 | 5,771  |

Tablo 4. 16. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,2589±0,0091 | 0,2443 | 0,2640 | 0,2440 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 0,5209±0,0125 | 0,4996 | 0,5456 | 0,4991 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,1690 | 3,2498 | 3,1700 | 2,3994±0,1163 | 2,2741 | 2,3676 | 2,2753 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,2990 | 2,2612±0,0708 | 2,3980 | 2,4833 | 2,3987 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 2,6317±0,0600 | 2,6164 | 2,6881 | 2,6199 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 2,8558±0,1438 | 2,7196 | 2,7820 | 2,7203 |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 3,1800±0,0837 | 3,1280 | 3,1578 | 3,1285 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 3,6140±0,0792 | 3,5404 | 3,5493 | 3,5403 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 4,7252±0,1096 | 4,7011 | 4,7036 | 4,7067 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 4,7954±0,1212 | 4,9055 | 4,8921 | 4,9100 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 5,0552±0,1139 | 5,0181 | 5,0102 | 5,0196 |

| Enerji<br>(keV) | B50B5         |        |        |        | B50B10        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,2822±0,0135 | 0,2782 | 0,2998 | 0,2779 | 0,3072±0,0106 | 0,2978 | 0,3213 | 0,2976 |
| 81,0            | 0,5791±0,0177 | 0,5664 | 0,6183 | 0,566  | 0,6337±0,0166 | 0,604  | 0,6591 | 0,6036 |
| 276,4           | 2,5048±0,1250 | 2,5287 | 2,6306 | 2,5296 | 2,6245±0,1433 | 2,6458 | 2,7485 | 2,6488 |
| 302,9           | 2,5223±0,0829 | 2,6645 | 2,7563 | 2,6657 | 2,8568±0,0911 | 2,7885 | 2,8817 | 2,7884 |
| 356,0           | 2,9352±0,0674 | 2,9037 | 2,9831 | 2,9077 | 2,8984±0,0657 | 3,0367 | 3,1157 | 3,0377 |
| 383,9           | 3,0269±0,1516 | 3,0182 | 3,0854 | 3,0200 | 3,1917±0,1663 | 3,1547 | 3,2245 | 3,1589 |
| 511,0           | 3,5982±0,0949 | 3,4697 | 3,5030 | 3,4692 | 3,7066±0,0950 | 3,6240 | 3,6544 | 3,6239 |
| 661,7           | 4,0388±0,0890 | 3,9255 | 3,9334 | 3,9279 | 3,8944±0,0825 | 4,0987 | 4,1197 | 4,0974 |
| 1173,2          | 5,2811±0,1233 | 5,2115 | 5,2057 | 5,2165 | 5,2965±0,1228 | 5,4391 | 5,4357 | 5,4443 |
| 1274,5          | 5,5535±0,1403 | 5,4351 | 5,4255 | 5,4463 | 5,7064±0,1430 | 5,6738 | 5,6651 | 5,6858 |
| 1332,5          | 5,7887±0,1307 | 5,5611 | 5,5512 | 5,5649 | 6,0186±0,1359 | 5,8043 | 5,7972 | 5,8119 |

| Enerji<br>(keV) | B50B15        |        |        |        | B50B20        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,3217±0,0111 | 0,314  | 0,3386 | 0,3585 | 0,3257±0,0130 | 0,3411 | 0,368  | 0,3407 |
| 81,0            | 0,6695±0,0178 | 0,6339 | 0,6909 | 0,7059 | 0,6675±0,0168 | 0,6857 | 0,7477 | 0,6853 |
| 276,4           | 2,8050±0,1524 | 2,7260 | 2,8311 | 2,7541 | 2,9152±0,1553 | 2,8981 | 3,0073 | 2,8995 |
| 302,9           | 2,9275±0,0914 | 2,8709 | 2,9661 | 2,8930 | 3,2183±0,1011 | 3,0499 | 3,1486 | 3,0545 |
| 356,0           | 2,9919±0,0683 | 3,1335 | 3,2050 | 3,1365 | 3,2843±0,0741 | 3,3329 | 3,3976 | 3,3217 |
| 383,9           | 3,2109±0,1808 | 3,2461 | 3,3182 | 3,2582 | 3,3718±0,1738 | 3,4462 | 3,5184 | 3,4458 |
| 511,0           | 3,5701±0,0959 | 3,7267 | 3,7598 | 3,7243 | 3,8380±0,0981 | 3,9539 | 3,9841 | 3,9569 |
| 661,7           | 4,2532±0,0932 | 4,2136 | 4,2258 | 4,2034 | 4,2483±0,0931 | 4,4695 | 4,4752 | 4,4759 |
| 1173,2          | 5,5553±0,1284 | 5,5898 | 5,5766 | 5,5673 | 6,0452±0,1397 | 5,9274 | 5,9272 | 5,9373 |
| 1274,5          | 6,0903±0,1535 | 5,8312 | 5,8205 | 5,8114 | 5,9859±0,1497 | 6,1825 | 6,1702 | 6,1910 |
| 1332,5          | 5,7245±0,1292 | 5,9654 | 5,9545 | 5,9447 | 6,6838±0,1506 | 6,3261 | 6,3167 | 6,3327 |

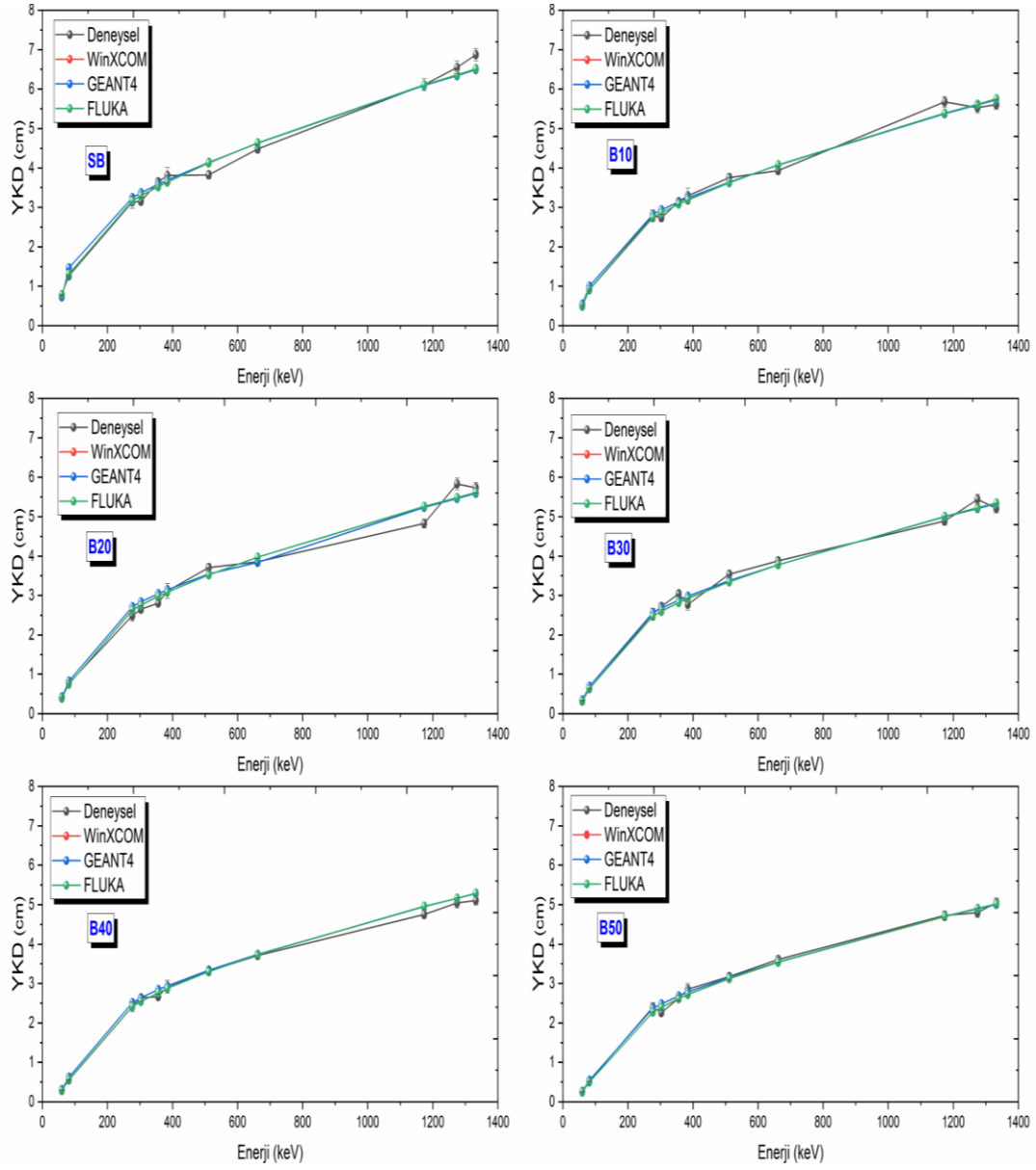
Tablo 4. 17. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,3420±0,0089 | 0,3238 | 0,3536 | 0,3232 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 0,6600±0,0170 | 0,6418 | 0,7084 | 0,6416 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,169  | 3,2498 | 3,1700 | 2,4124±0,1118 | 2,4279 | 2,5238 | 2,4283 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,299  | 2,6205±0,0831 | 2,5466 | 2,6311 | 2,5464 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 2,8846±0,0656 | 2,7588 | 2,8297 | 2,7595 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 3,0378±0,1989 | 2,8602 | 2,9174 | 2,862  |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 3,4449±0,0914 | 3,2681 | 3,3003 | 3,2719 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 3,8079±0,0831 | 3,6868 | 3,6971 | 3,6875 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 4,9224±0,1150 | 4,8800 | 4,8817 | 4,8837 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 5,0860±0,1283 | 5,0914 | 5,0844 | 5,1046 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 4,9016±0,1093 | 5,2079 | 5,2074 | 5,2066 |
| Enerji<br>(keV) | P50B5         |        |        |        | P50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,3558±0,0106 | 0,3490 | 0,3815 | 0,4102 | 0,3617±0,0114 | 0,3765 | 0,4112 | 0,3803 |
| 81,0            | 0,6665±0,0180 | 0,6889 | 0,7596 | 0,7827 | 0,7506±0,0189 | 0,7388 | 0,8151 | 0,7471 |
| 276,4           | 2,6786±0,1441 | 2,5519 | 2,6508 | 2,6123 | 2,8404±0,1536 | 2,698  | 2,7981 | 2,727  |
| 302,9           | 2,8783±0,0980 | 2,6924 | 2,7699 | 2,7340 | 2,7798±0,0917 | 2,8265 | 2,9140 | 2,8629 |
| 356,0           | 3,0934±0,0698 | 2,9056 | 2,9711 | 2,9525 | 2,9207±0,0653 | 3,0590 | 3,1323 | 3,0985 |
| 383,9           | 3,2718±0,1883 | 3,0100 | 3,0688 | 3,0557 | 3,1978±0,1735 | 3,1702 | 3,2344 | 3,212  |
| 511,0           | 3,7010±0,0963 | 3,4364 | 3,4668 | 3,4783 | 3,4453±0,0905 | 3,6189 | 3,6441 | 3,6684 |
| 661,7           | 4,0841±0,0894 | 3,8768 | 3,8810 | 3,9198 | 3,8787±0,0846 | 4,0806 | 4,0879 | 4,1336 |
| 1173,2          | 5,8275±0,1346 | 5,1306 | 5,1261 | 5,1862 | 5,2419±0,1213 | 5,3989 | 5,3909 | 5,4656 |
| 1274,5          | 5,5555±0,1390 | 5,3455 | 5,3309 | 5,4025 | 5,7654±0,1446 | 5,6314 | 5,6177 | 5,7033 |
| 1332,5          | 5,6644±0,1273 | 5,4752 | 5,4621 | 5,5297 | 5,9640±0,1335 | 5,7606 | 5,7499 | 5,8374 |
| Enerji<br>(keV) | P50B15        |        |        |        | P50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4026±0,0103 | 0,3911 | 0,4274 | 0,3905 | 0,4352±0,0104 | 0,4211 | 0,4492 | 0,4111 |
| 81,0            | 0,7861±0,0200 | 0,7635 | 0,8414 | 0,7631 | 0,7930±0,0238 | 0,8141 | 0,8800 | 0,7995 |
| 276,4           | 2,8621±0,1319 | 2,7415 | 2,8411 | 2,7438 | 2,8347±0,1546 | 2,8282 | 2,9260 | 2,8267 |
| 302,9           | 2,9715±0,0950 | 2,8724 | 2,9627 | 2,8750 | 2,9060±0,0934 | 2,9583 | 3,0489 | 2,9642 |
| 356,0           | 3,0081±0,0672 | 3,1063 | 3,1810 | 3,1080 | 3,0778±0,0689 | 3,1997 | 3,2725 | 3,2011 |
| 383,9           | 3,2824±0,1723 | 3,2188 | 3,2835 | 3,2196 | 3,2415±0,1858 | 3,3128 | 3,3777 | 3,3188 |
| 511,0           | 3,7761±0,0982 | 3,6727 | 3,7050 | 3,6742 | 3,8952±0,1026 | 3,7765 | 3,8102 | 3,7819 |
| 661,7           | 4,3124±0,0957 | 4,1404 | 4,1449 | 4,1444 | 4,1555±0,0907 | 4,2553 | 4,2684 | 4,265  |
| 1173,2          | 5,2940±0,1231 | 5,4773 | 5,4701 | 5,4785 | 5,7329±0,1351 | 5,6268 | 5,6257 | 5,6466 |
| 1274,5          | 5,6031±0,1415 | 5,7134 | 5,6984 | 5,7205 | 5,5780±0,1405 | 5,8692 | 5,8581 | 5,8769 |
| 1332,5          | 6,0639±0,1356 | 5,8436 | 5,8367 | 5,8496 | 6,1683±0,1382 | 6,0039 | 6,0090 | 6,0144 |

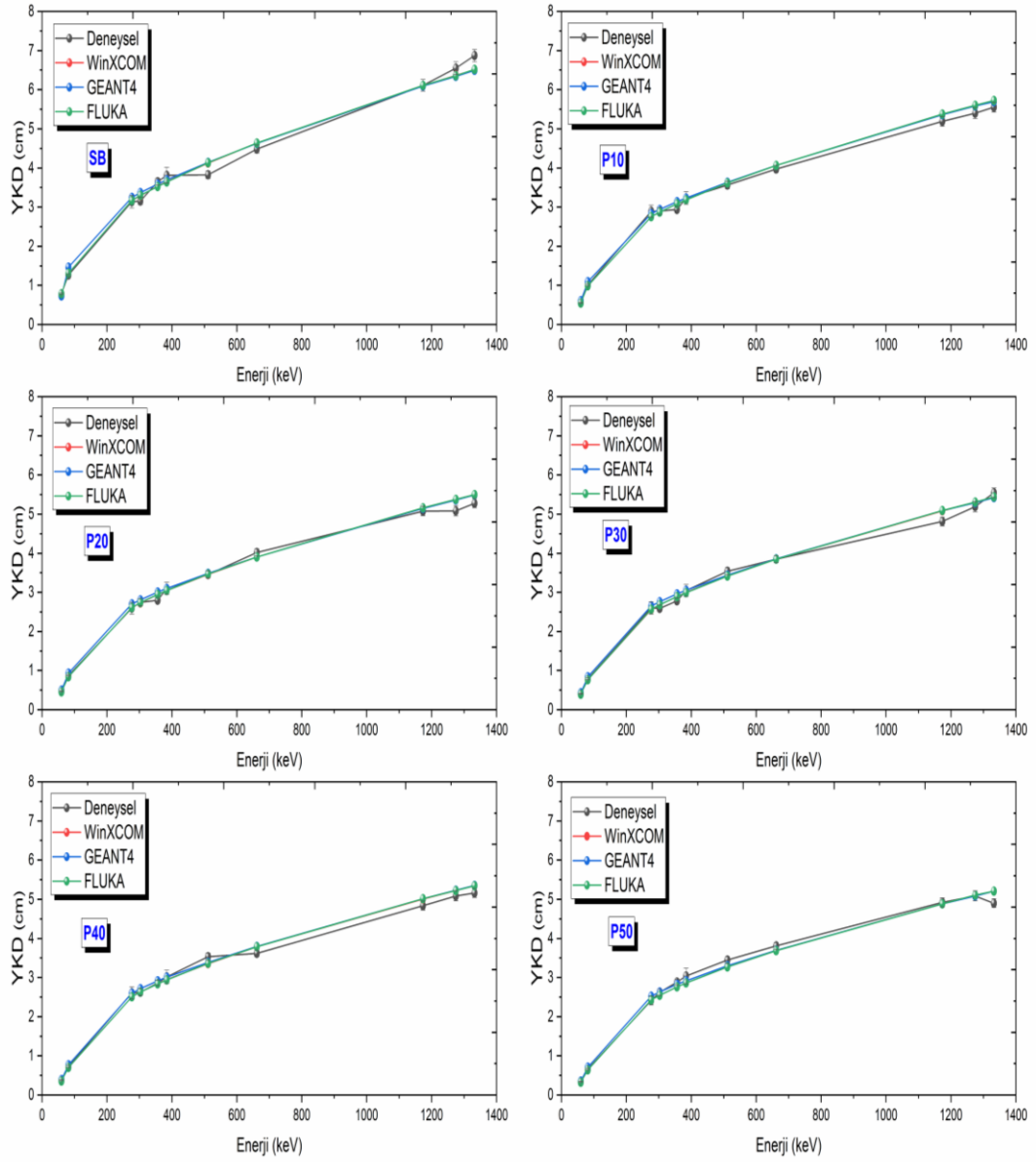


Tablo 4. 18. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş YKD'leri (cm)

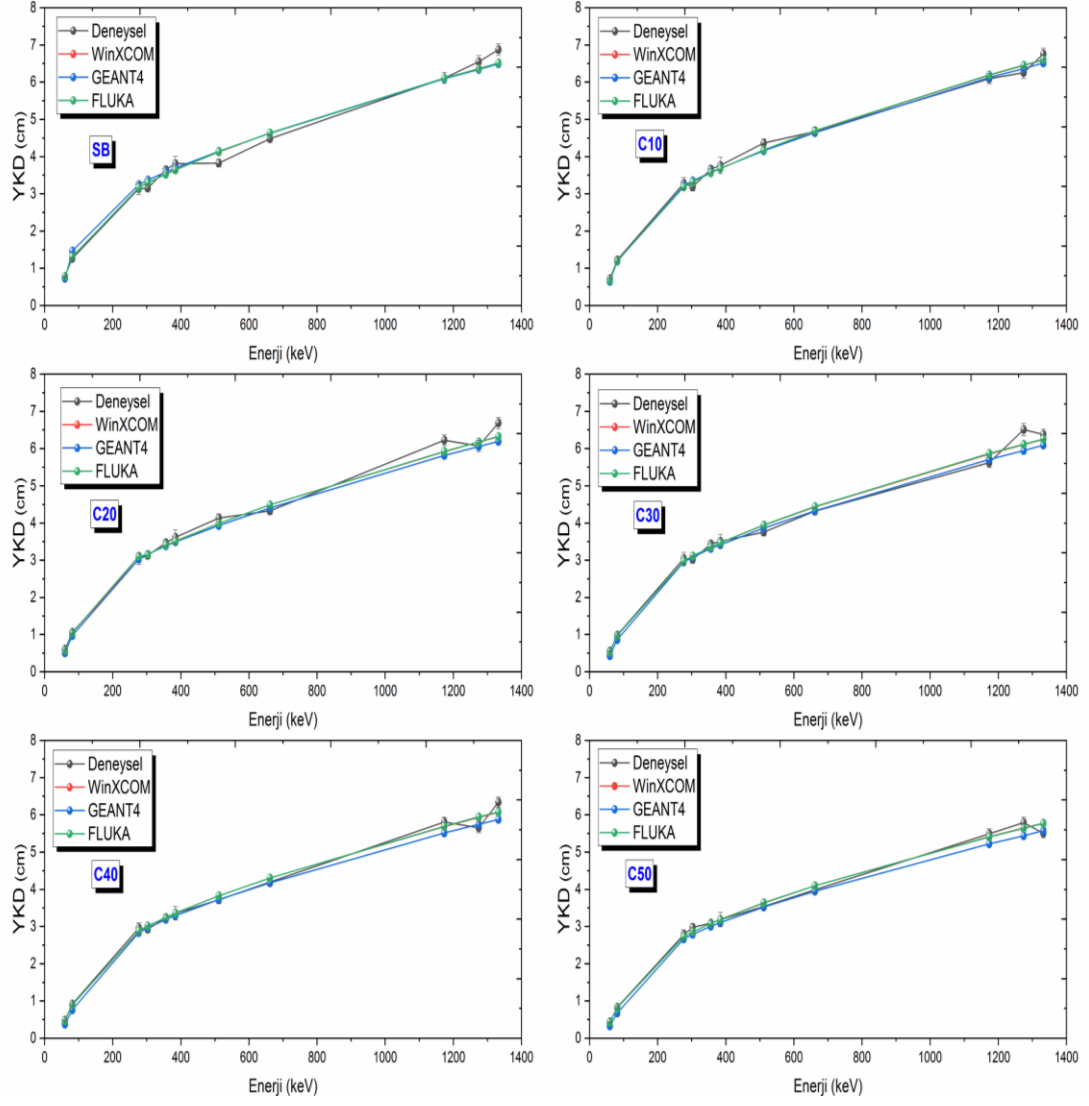
| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7886±0,0583 | 0,7846 | 0,7293 | 0,7842 | 0,4365±0,0120 | 0,4253 | 0,3309 | 0,4248 |
| 81,0            | 1,2632±0,0951 | 1,3148 | 1,4628 | 1,3146 | 0,8352±0,0209 | 0,8147 | 0,6768 | 0,8142 |
| 276,4           | 3,1371±0,5213 | 3,1690 | 3,2498 | 3,1700 | 2,7821±0,1267 | 2,7298 | 2,6668 | 2,7288 |
| 302,9           | 3,1536±0,5116 | 3,2973 | 3,3702 | 3,2990 | 2,9784±0,0925 | 2,8559 | 2,7920 | 2,8569 |
| 356,0           | 3,6488±0,5098 | 3,5312 | 3,5868 | 3,5284 | 3,0920±0,0698 | 3,0828 | 3,0087 | 3,0823 |
| 383,9           | 3,8079±0,4896 | 3,6473 | 3,6979 | 3,6430 | 3,1885±0,1939 | 3,1920 | 3,1118 | 3,1894 |
| 511,0           | 3,8291±0,5223 | 4,1269 | 4,1432 | 4,1336 | 3,5415±0,0919 | 3,6358 | 3,5262 | 3,6376 |
| 661,7           | 4,4817±0,5214 | 4,6331 | 4,6281 | 4,6354 | 3,9896±0,0872 | 4,0952 | 3,9537 | 4,0979 |
| 1173,2          | 6,1137±0,5168 | 6,1049 | 6,0955 | 6,1117 | 5,4966±0,1278 | 5,4126 | 5,2244 | 5,4101 |
| 1274,5          | 6,5479±0,5032 | 6,3674 | 6,3444 | 6,3600 | 5,7924±0,1448 | 5,6470 | 5,4416 | 5,6393 |
| 1332,5          | 6,8698±0,0517 | 6,5143 | 6,4972 | 6,5167 | 5,5110±0,1230 | 5,7763 | 5,5743 | 5,771  |
| Enerji<br>(keV) | C50B5         |        |        |        | C50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4333±0,0113 | 0,4223 | 0,3286 | 0,4219 | 0,4737±0,0110 | 0,4494 | 0,3508 | 0,4495 |
| 81,0            | 0,8277±0,0206 | 0,8044 | 0,6695 | 0,8036 | 0,8781±0,0218 | 0,8516 | 0,7113 | 0,8509 |
| 276,4           | 2,6135±0,1279 | 2,6500 | 2,5957 | 2,6516 | 2,6698±0,1225 | 2,7617 | 2,7059 | 2,7626 |
| 302,9           | 2,7313±0,0950 | 2,7717 | 2,7129 | 2,7708 | 2,7629±0,0845 | 2,8863 | 2,8267 | 2,8886 |
| 356,0           | 3,0347±0,0685 | 2,9917 | 2,9185 | 2,9909 | 2,9687±0,0667 | 3,1159 | 3,0427 | 3,1153 |
| 383,9           | 3,1784±0,1740 | 3,0962 | 3,0180 | 3,0954 | 3,1899±0,1653 | 3,2235 | 3,1476 | 3,2253 |
| 511,0           | 3,6352±0,0951 | 3,5250 | 3,4172 | 3,5276 | 3,8829±0,1010 | 3,6692 | 3,5618 | 3,6703 |
| 661,7           | 4,1777±0,0909 | 3,9695 | 3,8354 | 3,9700 | 4,2237±0,0923 | 4,1310 | 3,9952 | 4,1352 |
| 1173,2          | 5,0565±0,1176 | 5,2464 | 5,0663 | 5,2536 | 5,6436±0,1315 | 5,4581 | 5,2797 | 5,4663 |
| 1274,5          | 5,5836±0,1403 | 5,4721 | 5,2760 | 5,4836 | 5,8495±0,1460 | 5,6930 | 5,4975 | 5,6989 |
| 1332,5          | 5,7230±0,1279 | 5,597  | 5,4026 | 5,6036 | 5,5890±0,1254 | 5,8231 | 5,628  | 5,8228 |
| Enerji<br>(keV) | C50B15        |        |        |        | C50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4929±0,0114 | 0,4769 | 0,3725 | 0,4759 | 0,5394±0,0123 | 0,5131 | 0,4009 | 0,511  |
| 81,0            | 0,9168±0,0227 | 0,8983 | 0,7513 | 0,8968 | 0,9945±0,0280 | 0,9609 | 0,8046 | 0,9579 |
| 276,4           | 2,7529±0,1495 | 2,8655 | 2,8091 | 2,8679 | 3,0770±0,1511 | 3,0162 | 2,9598 | 3,0172 |
| 302,9           | 3,0244±0,0944 | 2,9951 | 2,9376 | 2,9981 | 3,0195±0,1008 | 3,1530 | 3,0929 | 3,1557 |
| 356,0           | 3,1278±0,0722 | 3,2308 | 3,1575 | 3,2294 | 3,2567±0,0734 | 3,3985 | 3,3242 | 3,3988 |
| 383,9           | 3,3058±0,1769 | 3,3420 | 3,2652 | 3,3426 | 3,5366±0,1790 | 3,5150 | 3,4384 | 3,516  |
| 511,0           | 3,8525±0,1007 | 3,8023 | 3,6906 | 3,8051 | 3,8436±0,0996 | 3,9978 | 3,8934 | 3,9984 |
| 661,7           | 4,4851±0,0980 | 4,2804 | 4,1382 | 4,2855 | 4,5328±0,0988 | 4,4990 | 4,3590 | 4,5018 |
| 1173,2          | 5,8756±0,1366 | 5,6540 | 5,4688 | 5,6548 | 5,9413±0,1386 | 5,9429 | 5,7536 | 5,9508 |
| 1274,5          | 5,9839±0,1496 | 5,8976 | 5,7007 | 5,8991 | 6,5138±0,1627 | 6,1982 | 5,9940 | 6,2029 |
| 1332,5          | 6,2886±0,1410 | 6,0326 | 5,8378 | 6,0385 | 6,1331±0,1376 | 6,3401 | 6,1410 | 6,3485 |



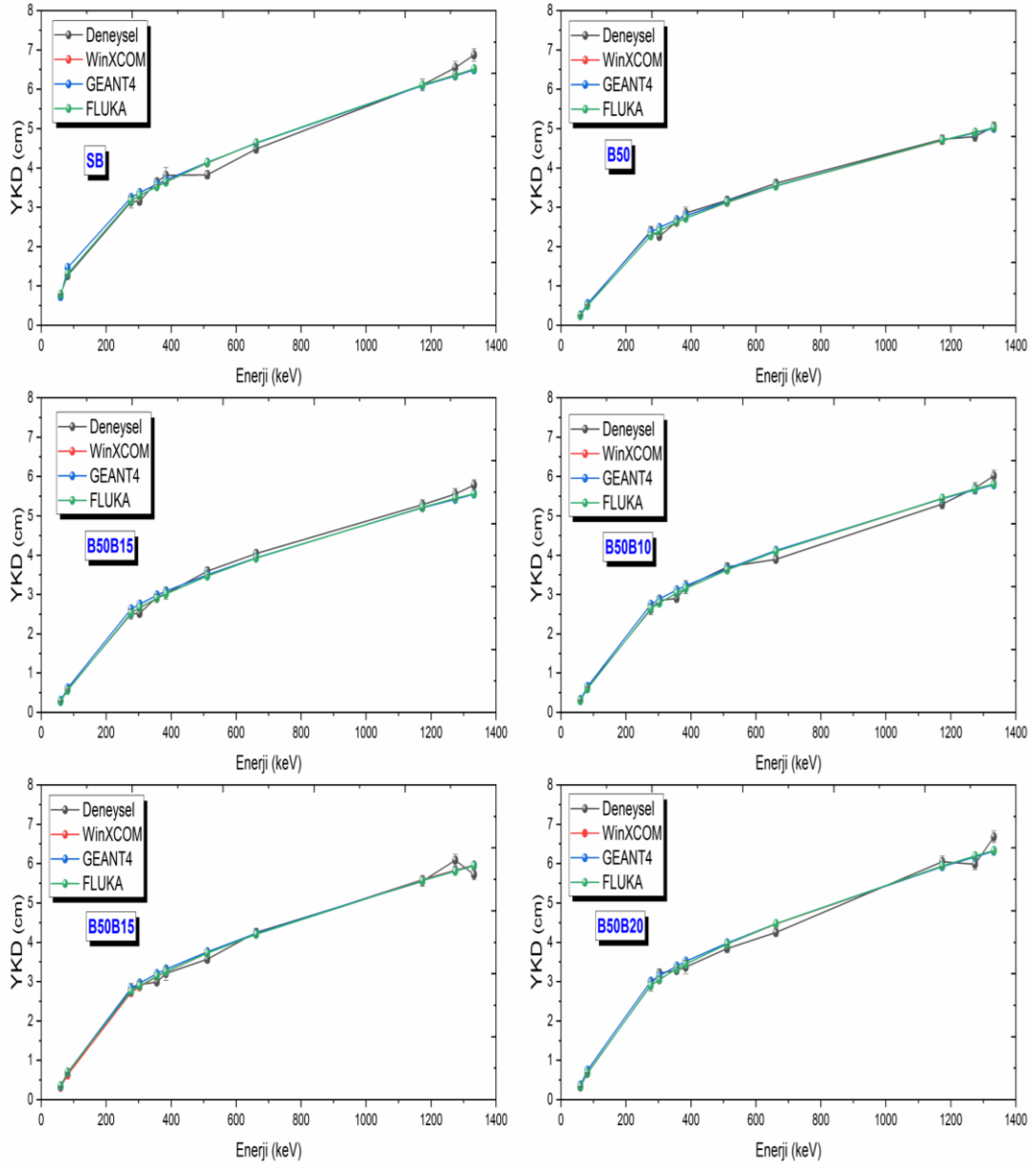
Şekil 4.13. Bronz katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



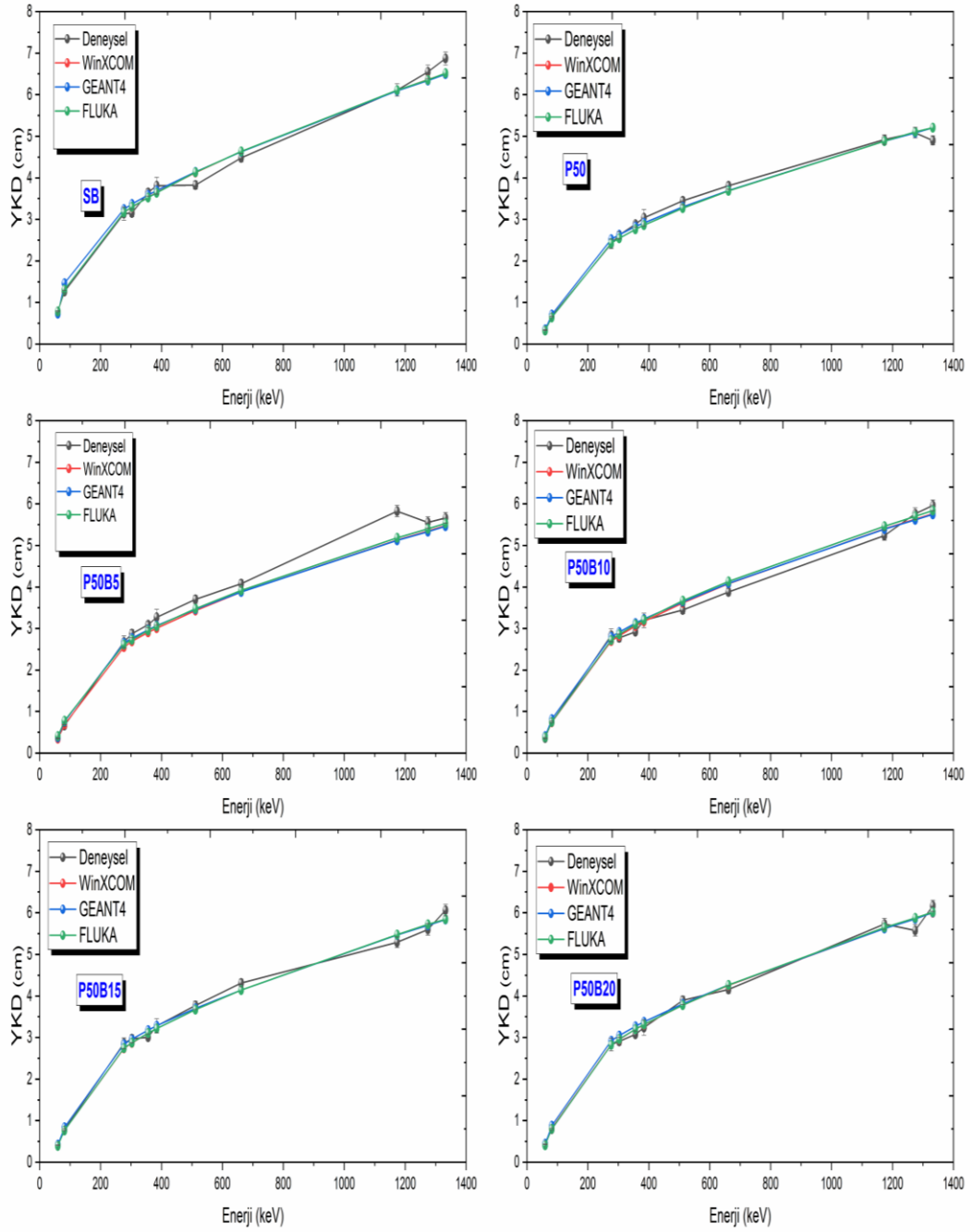
Şekil 4.14. Piriç katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



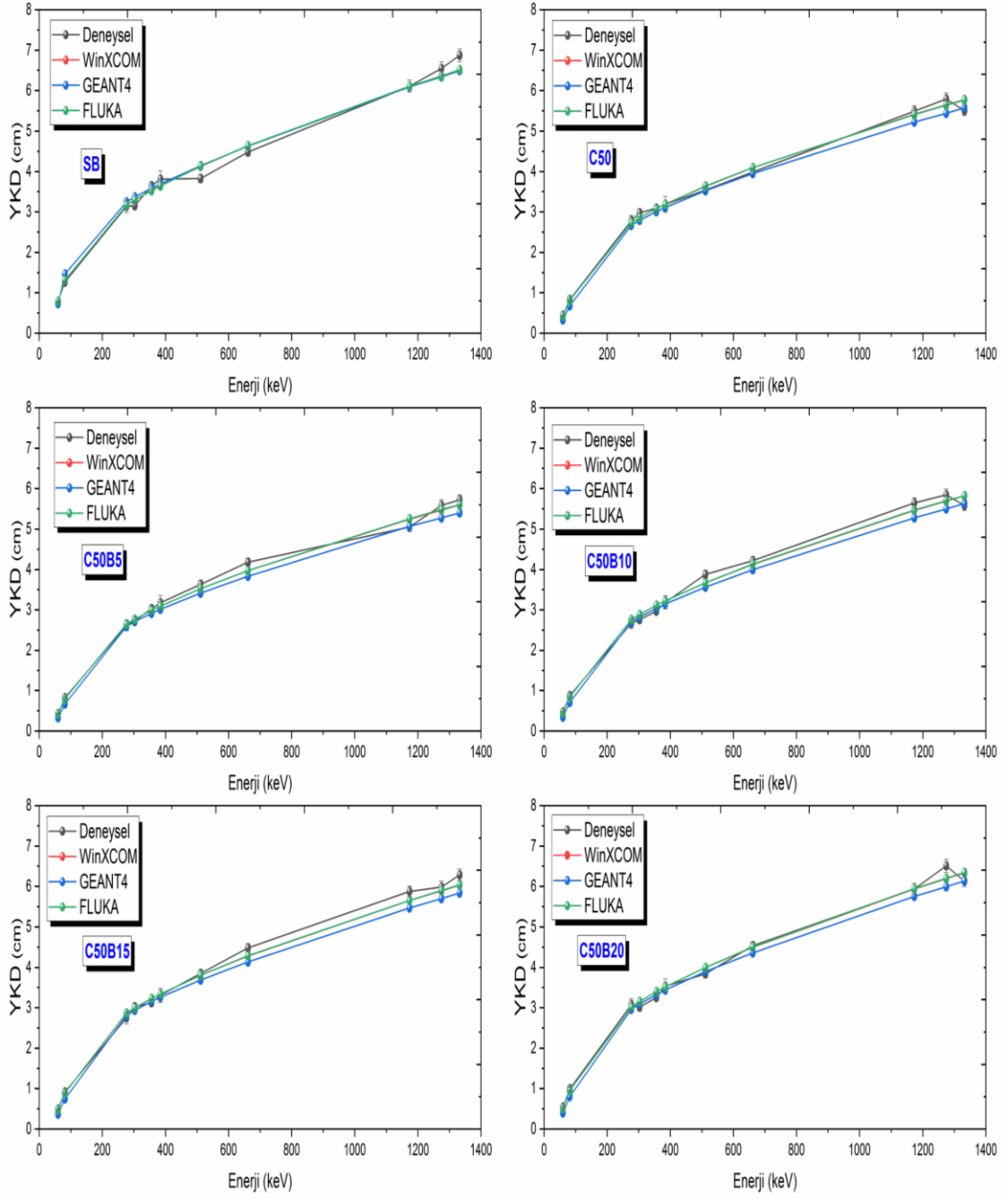
Şekil 4.15. Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.16. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.17. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.18. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin YKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği

Tablo 4. 19. Bronz ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | B10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59.5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052  | 1,7010±0,0377  | 1,6492  | 1,8103  | 1,6481  |
| 81.0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,3670  | 3,0484±0,0718  | 3,0227  | 3,3365  | 3,0204  |
| 276.4           | 10,4212±0,5213 | 10,5274 | 10,7956 | 10,5307 | 9,2882±0,4416  | 9,1069  | 9,3869  | 9,1126  |
| 302.9           | 10,4762±0,3098 | 10,9535 | 11,1955 | 10,959  | 9,0993±0,2838  | 9,5099  | 9,7603  | 9,5144  |
| 356.0           | 12,1209±0,2786 | 11,7305 | 11,9153 | 11,7212 | 10,4624±0,2343 | 10,2411 | 10,4334 | 10,2506 |
| 383.9           | 12,6495±0,6675 | 12,116  | 12,2843 | 12,1016 | 10,9434±0,6361 | 10,5952 | 10,7592 | 10,6022 |
| 511.0           | 12,7200±0,3320 | 13,7092 | 13,7635 | 13,7314 | 12,4827±0,3248 | 12,0417 | 12,1048 | 12,0551 |
| 661.7           | 14,8878±0,3246 | 15,3909 | 15,3741 | 15,3984 | 13,0807±0,2863 | 13,5492 | 13,5387 | 13,5662 |
| 1173.2          | 20,3092±0,5059 | 20,2801 | 20,2487 | 20,3025 | 18,8674±0,4403 | 17,8882 | 17,8719 | 17,9065 |
| 1274.5          | 21,7516±0,5414 | 21,1520 | 21,0756 | 21,1276 | 18,3861±0,4629 | 18,6641 | 18,6139 | 18,6562 |
| 1332.5          | 22,8210±0,5142 | 21,6402 | 21,5833 | 21,6481 | 18,6344±0,4221 | 19,0926 | 19,0478 | 19,1242 |
| Enerji<br>(keV) | B20            |         |         |         | B30            |         |         |         |
|                 | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59.5            | 1,3718±0,0563  | 1,2986  | 1,4153  | 1,2974  | 1,0940±0,0601  | 1,0627  | 1,1521  | 1,0614  |
| 81.0            | 2,5716±0,0791  | 2,4946  | 2,7417  | 2,4920  | 2,1073±0,0685  | 2,1013  | 2,3006  | 2,1004  |
| 276.4           | 8,2832±0,4781  | 8,7416  | 9,0321  | 8,7527  | 8,4226±0,5120  | 8,2211  | 8,5273  | 8,2364  |
| 302.9           | 8,8120±0,3347  | 9,1569  | 9,4254  | 9,1550  | 9,0560±0,4982  | 8,6340  | 8,9042  | 8,6495  |
| 356.0           | 9,3354±0,2931  | 9,9018  | 10,1212 | 9,9080  | 10,1266±0,4102 | 9,3688  | 9,5923  | 9,3810  |
| 383.9           | 10,3576±0,5996 | 10,2592 | 10,447  | 10,2618 | 9,2344±0,5408  | 9,7190  | 9,9142  | 9,7350  |
| 511.0           | 12,3193±0,4702 | 11,7034 | 11,7983 | 11,7082 | 11,7558±0,3987 | 11,1222 | 11,2125 | 11,1283 |
| 661.7           | 12,8260±0,4591 | 13,1927 | 12,7545 | 13,1883 | 12,8797±0,4012 | 12,5571 | 12,5674 | 12,5656 |
| 1173.2          | 16,0404±0,5403 | 17,4483 | 17,4098 | 17,4661 | 16,2564±0,5113 | 16,6328 | 16,6177 | 16,6420 |
| 1274.5          | 19,3770±0,4875 | 18,2058 | 18,1528 | 18,2101 | 18,0594±0,4703 | 17,3554 | 17,2898 | 17,3724 |
| 1332.5          | 19,0474±0,5021 | 18,6237 | 18,5908 | 18,646  | 17,3305±0,5105 | 17,7537 | 17,7139 | 17,7532 |
| Enerji<br>(keV) | B40            |         |         |         | B50            |         |         |         |
|                 | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyisel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59.5            | 0,9830±0,0365  | 0,9359  | 1,0138  | 0,9359  | 0,8599±0,0303  | 0,8115  | 0,8771  | 0,8106  |
| 81.0            | 1,8394±0,0347  | 1,8872  | 2,0684  | 1,8862  | 1,7302±0,0416  | 1,6597  | 1,8125  | 1,6580  |
| 276.4           | 8,0274±0,3921  | 8,0337  | 8,3637  | 8,0378  | 7,9706±0,3865  | 7,5543  | 7,8651  | 7,5585  |
| 302.9           | 8,7601±0,3191  | 8,4556  | 8,7669  | 8,4641  | 7,5114±0,2351  | 7,9660  | 8,2495  | 7,9684  |
| 356.0           | 8,8618±0,3345  | 9,2024  | 9,4534  | 9,2100  | 8,7425±0,1993  | 8,6916  | 8,9296  | 8,7031  |
| 383.9           | 9,7194±0,4912  | 9,5565  | 9,7655  | 9,5495  | 9,4867±0,4776  | 9,0343  | 9,2417  | 9,0368  |
| 511.0           | 11,0116±0,2705 | 10,9659 | 11,0865 | 10,9610 | 10,5638±0,2782 | 10,391  | 10,4901 | 10,3927 |
| 661.7           | 12,3314±0,2843 | 12,3973 | 12,4379 | 12,4025 | 12,0053±0,2631 | 11,7611 | 11,7906 | 11,7605 |
| 1173.2          | 15,7922±0,3002 | 16,4426 | 16,4450 | 16,4719 | 15,6969±0,3639 | 15,6166 | 15,6251 | 15,6353 |
| 1274.5          | 16,7617±0,4196 | 17,1573 | 17,1381 | 17,1516 | 15,9298±0,4027 | 16,2958 | 16,2512 | 16,3107 |
| 1332.5          | 16,9678±0,2576 | 17,5509 | 17,5462 | 17,5732 | 16,7932±0,3785 | 16,6696 | 16,6435 | 16,6747 |



Tablo 4. 20. Piriç alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | P10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052  | 1,8229±0,0411  | 1,8294  | 2,0226  | 1,8283  |
| 81,0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,3670  | 3,3629±0,0810  | 3,2758  | 3,6352  | 3,2741  |
| 276,4           | 10,4212±0,5210 | 10,5274 | 10,7956 | 10,5307 | 9,6059±0,5185  | 9,1371  | 9,4106  | 9,1466  |
| 302,9           | 10,4762±0,3098 | 10,9535 | 11,1955 | 10,9590 | 9,6413±0,3110  | 9,5268  | 9,7581  | 9,5243  |
| 356,0           | 12,1209±0,2786 | 11,7305 | 11,9153 | 11,7212 | 9,7685±0,2188  | 10,2386 | 10,4193 | 10,2539 |
| 383,9           | 12,6495±0,6675 | 12,1160 | 12,2843 | 12,1016 | 10,7446±0,5418 | 10,5850 | 10,7424 | 10,5846 |
| 511,0           | 12,7200±0,3320 | 13,7092 | 13,7635 | 13,7314 | 11,8359±0,3023 | 12,0083 | 12,0742 | 12,0152 |
| 661,7           | 14,8878±0,3246 | 15,3909 | 15,3741 | 15,3984 | 13,2014±0,2872 | 13,4995 | 13,5009 | 13,5029 |
| 1173,2          | 20,3092±0,5059 | 20,2801 | 20,2487 | 20,3025 | 17,2450±0,3998 | 17,8076 | 17,8010 | 17,8532 |
| 1274,5          | 21,7516±0,5414 | 21,1520 | 21,0756 | 21,1276 | 17,9391±0,4541 | 18,5793 | 18,5473 | 18,6023 |
| 1332,5          | 22,8210±0,5142 | 21,6402 | 21,5833 | 21,6481 | 18,4499±0,4135 | 19,0056 | 18,9004 | 19,0169 |
| Enerji<br>(keV) | P20            |         |         |         | P30            |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,5759±0,0564  | 1,5035  | 1,6542  | 1,5025  | 1,3592±0,0493  | 1,3206  | 1,4479  | 1,3190  |
| 81,0            | 2,9081±0,0498  | 2,8031  | 3,1046  | 2,8001  | 2,6210±0,0601  | 2,5297  | 2,7989  | 2,5286  |
| 276,4           | 8,6294±0,3391  | 8,6968  | 8,9928  | 8,6946  | 8,6564±0,3565  | 8,5144  | 8,8136  | 8,5223  |
| 302,9           | 9,1274±0,4762  | 9,0848  | 9,3362  | 9,0856  | 8,6154±0,3293  | 8,9083  | 9,1682  | 8,9093  |
| 356,0           | 9,3069±0,3982  | 9,7879  | 9,9907  | 9,7901  | 9,2389±0,2786  | 9,6180  | 9,8285  | 9,6230  |
| 383,9           | 10,3087±0,4552 | 10,1280 | 10,3054 | 10,1249 | 10,1249±0,4291 | 9,9596  | 10,1442 | 9,9455  |
| 511,0           | 11,4905±0,4027 | 11,5154 | 11,5870 | 11,5209 | 11,7651±0,2465 | 11,3454 | 11,4241 | 11,3631 |
| 661,7           | 13,3568±0,3208 | 12,9595 | 12,9687 | 12,9599 | 12,7826±0,3510 | 12,7799 | 12,8103 | 12,7912 |
| 1173,2          | 16,8715±0,2995 | 17,1132 | 17,1044 | 17,1461 | 15,9823±0,4113 | 16,8913 | 16,9065 | 16,9059 |
| 1274,5          | 16,8880±0,2361 | 17,8548 | 17,8109 | 17,8687 | 17,2392±0,2834 | 17,6233 | 17,5928 | 17,6318 |
| 1332,5          | 17,5321±0,5382 | 18,2641 | 18,2347 | 18,2777 | 18,4219±0,4772 | 18,0271 | 18,0084 | 18,0739 |
| Enerji<br>(keV) | P40            |         |         |         | P50            |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,2465±0,0605  | 1,1878  | 1,3034  | 1,1877  | 1,1360±0,0296  | 1,0755  | 1,1747  | 1,0737  |
| 81,0            | 2,4039±0,0499  | 2,3202  | 2,5714  | 2,3208  | 2,1924±0,0563  | 2,1320  | 2,3531  | 2,1313  |
| 276,4           | 8,6517±0,4094  | 8,3290  | 8,6485  | 8,3342  | 8,0140±0,3713  | 8,0654  | 8,3838  | 8,0666  |
| 302,9           | 8,7245±0,4327  | 8,7262  | 9,0136  | 8,7292  | 8,7050±0,2759  | 8,4598  | 8,7405  | 8,4589  |
| 356,0           | 9,5133±0,3018  | 9,4383  | 9,6830  | 9,4318  | 9,5824±0,2179  | 9,1644  | 9,4000  | 9,1670  |
| 383,9           | 10,0243±0,4465 | 9,7798  | 9,9991  | 9,7766  | 10,0913±0,6607 | 9,5013  | 9,6913  | 9,5074  |
| 511,0           | 11,7387±0,3996 | 11,1587 | 11,2620 | 11,1647 | 11,4436±0,3036 | 10,8563 | 10,9634 | 10,8689 |
| 661,7           | 12,0083±0,2298 | 12,5796 | 12,6195 | 12,5812 | 12,6497±0,2762 | 12,2472 | 12,2815 | 12,2494 |
| 1173,2          | 16,0718±0,4561 | 16,6395 | 16,6623 | 16,6491 | 16,3517±0,3819 | 16,2109 | 16,2167 | 16,2233 |
| 1274,5          | 16,9007±0,4333 | 17,3606 | 17,3630 | 17,3619 | 16,8952±0,4261 | 16,9133 | 16,8899 | 16,9573 |
| 1332,5          | 17,1521±0,3708 | 17,7581 | 17,7766 | 17,7722 | 16,2826±0,3623 | 17,3004 | 17,2986 | 17,2961 |

Tablo 4. 21. Paslanmaz çelik alaşımı ile katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | C10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052  | 2,3873±0,0593  | 2,2548  | 2,1593  | 2,2539  |
| 81,0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,3670  | 4,0839±0,0983  | 3,9651  | 3,9492  | 3,9636  |
| 276,4           | 10,4212±0,5210 | 10,5274 | 10,7956 | 10,5307 | 10,9074±0,5342 | 10,5793 | 10,7097 | 10,5854 |
| 302,9           | 10,4762±0,3098 | 10,9535 | 11,1955 | 10,9590 | 10,5747±0,4703 | 11,0226 | 11,1248 | 11,0272 |
| 356,0           | 12,1209±0,2786 | 11,7305 | 11,9153 | 11,7212 | 12,1844±0,5119 | 11,8345 | 11,8900 | 11,8433 |
| 383,9           | 12,6495±0,6675 | 12,1160 | 12,2843 | 12,1016 | 12,4957±0,7093 | 12,2307 | 12,2555 | 12,2182 |
| 511,0           | 12,7200±0,3320 | 13,7092 | 13,7635 | 13,7314 | 14,4969±0,5493 | 13,8634 | 13,8031 | 13,8812 |
| 661,7           | 14,8878±0,3246 | 15,3909 | 15,3741 | 15,3984 | 15,5383±0,5201 | 15,5785 | 15,4235 | 15,5971 |
| 1173,2          | 20,3092±0,5059 | 20,2801 | 20,2487 | 20,3025 | 20,2437±0,4571 | 20,5420 | 20,3394 | 20,5679 |
| 1274,5          | 21,7516±0,5414 | 21,1520 | 21,0756 | 21,1276 | 20,7910±0,4499 | 21,4320 | 21,1546 | 21,4417 |
| 1332,5          | 22,8210±0,5142 | 21,6402 | 21,5833 | 21,6481 | 22,4603±0,4830 | 21,9238 | 21,6646 | 21,9315 |
| Enerji<br>(keV) | C20            |         |         |         | C30            |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 2,0250±0,0694  | 1,9225  | 1,6902  | 1,9222  | 1,8388±0,0555  | 1,7400  | 1,4472  | 1,7388  |
| 81,0            | 3,5474±0,0703  | 3,4910  | 3,2391  | 3,4898  | 3,2894±0,0391  | 3,2329  | 2,8588  | 3,2302  |
| 276,4           | 10,0887±0,4297 | 10,0626 | 10,0710 | 10,3277 | 10,1252±0,6092 | 9,9024  | 9,8208  | 9,8982  |
| 302,9           | 10,4037±0,5498 | 10,4976 | 10,4962 | 10,5065 | 10,0404±0,5802 | 10,3417 | 10,2568 | 10,3494 |
| 356,0           | 11,5208±0,4032 | 11,2899 | 11,2401 | 11,2980 | 11,4257±0,3207 | 11,1381 | 11,0134 | 11,1409 |
| 383,9           | 12,0156±0,2483 | 11,6748 | 11,6044 | 11,6690 | 11,6617±0,4554 | 11,5236 | 11,3600 | 11,5330 |
| 511,0           | 13,7439±0,3704 | 13,2533 | 13,0726 | 13,2442 | 12,4792±0,3028 | 13,0984 | 12,8327 | 13,1188 |
| 661,7           | 14,3750±0,4944 | 14,9038 | 14,6359 | 14,9173 | 14,3403±0,4117 | 14,7388 | 14,3797 | 14,7575 |
| 1173,2          | 20,6807±0,2639 | 19,6665 | 19,3207 | 19,6715 | 18,6770±0,5382 | 19,4608 | 18,9769 | 19,4926 |
| 1274,5          | 20,1596±0,3027 | 20,5184 | 20,1211 | 20,5317 | 21,6405±0,6188 | 20,3037 | 19,7634 | 20,3312 |
| 1332,5          | 22,2116±0,4199 | 20,9889 | 20,5877 | 21,0130 | 21,2009±0,5092 | 20,7690 | 20,2360 | 20,7888 |
| Enerji<br>(keV) | C40            |         |         |         | C50            |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,6155±0,0837  | 1,5736  | 1,2604  | 1,5725  | 1,4500±0,0397  | 1,4127  | 1,0993  | 1,4110  |
| 81,0            | 3,0407±0,0690  | 2,9744  | 2,5382  | 2,9720  | 2,7744±0,0693  | 2,7064  | 2,2481  | 2,7046  |
| 276,4           | 9,8400±0,4492  | 9,5695  | 9,4235  | 9,5751  | 9,2419±0,4208  | 9,0682  | 8,8588  | 9,0650  |
| 302,9           | 9,7479±0,5493  | 10,0034 | 9,8409  | 10,0108 | 9,8940±0,3072  | 9,4869  | 9,2747  | 9,4904  |
| 356,0           | 10,7314±0,5032 | 10,7869 | 10,5980 | 10,7894 | 10,2713±0,2318 | 10,2408 | 9,9947  | 10,2393 |
| 383,9           | 11,1437±0,4304 | 11,1650 | 10,9401 | 11,1723 | 10,5918±0,6441 | 10,6037 | 10,3370 | 10,5949 |
| 511,0           | 12,3528±0,3992 | 12,7048 | 12,3682 | 12,7094 | 11,7646±0,3052 | 12,0778 | 11,7137 | 12,0839 |
| 661,7           | 13,9502±0,4308 | 14,3036 | 13,8662 | 14,3092 | 13,2532±0,2897 | 13,6040 | 13,1339 | 13,6128 |
| 1173,2          | 19,2880±0,4476 | 18,8962 | 18,3253 | 18,9114 | 18,2593±0,4247 | 17,9803 | 17,3552 | 17,9720 |
| 1274,5          | 18,7929±0,3769 | 19,7145 | 19,0858 | 19,7606 | 19,2419±0,4811 | 18,7589 | 18,0765 | 18,7334 |
| 1332,5          | 21,0669±0,4038 | 20,1660 | 19,5394 | 20,1995 | 18,3073±0,4086 | 19,1883 | 18,5175 | 19,1707 |

Tablo 4. 22. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

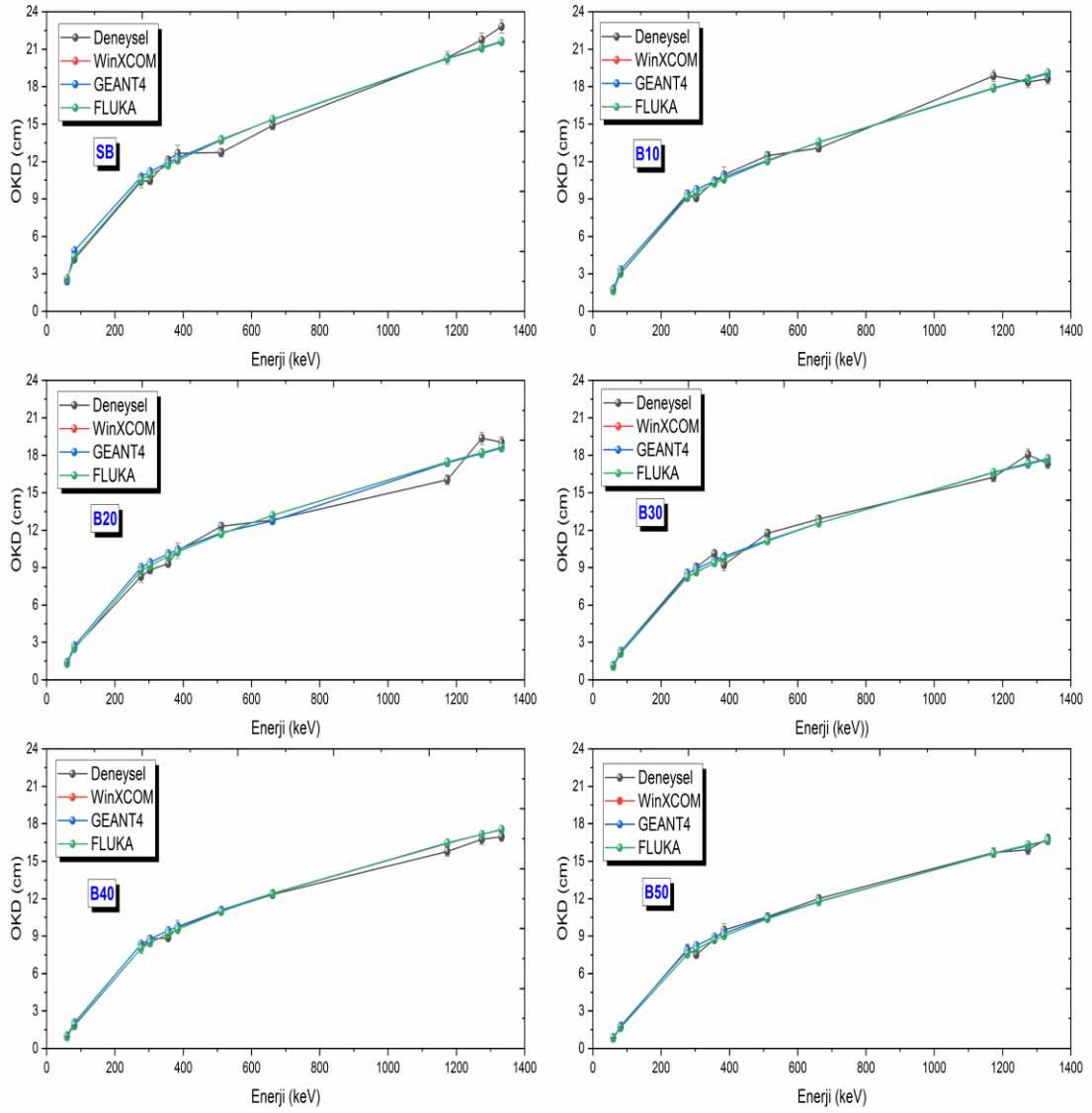
| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | B50            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052  | 0,8599±0,0303  | 0,8115  | 0,8771  | 0,8106  |
| 81,0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,367   | 1,7302±0,0416  | 1,6597  | 1,8125  | 1,658   |
| 276,4           | 10,4212±0,5210 | 10,527  | 10,7956 | 10,5307 | 7,9706±0,3865  | 7,5543  | 7,8651  | 7,5585  |
| 302,9           | 10,4762±0,3098 | 10,954  | 11,1955 | 10,959  | 7,5114±0,2351  | 7,9660  | 8,2495  | 7,9684  |
| 356,0           | 12,1209±0,2786 | 11,731  | 11,9153 | 11,7212 | 8,7425±0,1993  | 8,6916  | 8,9296  | 8,7031  |
| 383,9           | 12,6495±0,6675 | 12,116  | 12,2843 | 12,1016 | 9,4867±0,4776  | 9,0343  | 9,2417  | 9,0368  |
| 511,0           | 12,7200±0,3320 | 13,7090 | 13,7635 | 13,7314 | 10,5638±0,2782 | 10,3910 | 10,4901 | 10,3927 |
| 661,7           | 14,8878±0,3246 | 15,3910 | 15,3741 | 15,3984 | 12,0053±0,2631 | 11,7610 | 11,7906 | 11,7605 |
| 1173,2          | 20,3092±0,5059 | 20,2800 | 20,2487 | 20,3025 | 15,6969±0,3639 | 15,6170 | 15,6251 | 15,6353 |
| 1274,5          | 21,7516±0,5414 | 21,1520 | 21,0756 | 21,1276 | 15,9298±0,4027 | 16,2960 | 16,2512 | 16,3107 |
| 1332,5          | 22,8210±0,5142 | 21,6400 | 21,5833 | 21,6481 | 16,7932±0,3785 | 16,6700 | 16,6435 | 16,6747 |
| Enerji<br>(keV) | B50B5          |         |         |         | B50B10         |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 0,9373±0,0448  | 0,924   | 0,9959  | 0,9231  | 1,0205±0,0353  | 0,9894  | 1,0675  | 0,9886  |
| 81,0            | 1,9239±0,0589  | 1,8814  | 2,0538  | 1,8803  | 2,1051±0,0552  | 2,0066  | 2,1893  | 2,0053  |
| 276,4           | 8,3207±0,4151  | 8,4002  | 8,7387  | 8,4032  | 8,7183±0,4761  | 8,7892  | 9,1302  | 8,799   |
| 302,9           | 8,3788±0,2755  | 8,8514  | 9,1563  | 8,8552  | 9,4900±0,3025  | 9,2631  | 9,5727  | 9,263   |
| 356,0           | 9,7505±0,2240  | 9,6459  | 9,9096  | 9,6592  | 9,6283±0,2183  | 10,0880 | 10,3500 | 10,0909 |
| 383,9           | 10,0551±0,5035 | 10,026  | 10,2496 | 10,0322 | 10,6028±0,552  | 10,4800 | 10,7117 | 10,4937 |
| 511,0           | 11,9529±0,3154 | 11,5260 | 11,6368 | 11,5246 | 12,3129±0,3157 | 12,0390 | 12,1396 | 12,0384 |
| 661,7           | 13,4165±0,2957 | 13,0400 | 13,0665 | 13,0483 | 12,9369±0,2841 | 13,6160 | 13,6852 | 13,6112 |
| 1173,2          | 17,5435±0,4096 | 17,312  | 17,2928 | 17,3287 | 17,5945±0,4080 | 18,0680 | 18,0569 | 18,0854 |
| 1274,5          | 18,4482±0,4660 | 18,055  | 18,0232 | 18,0921 | 18,9562±0,4750 | 18,8480 | 18,8190 | 18,8877 |
| 1332,5          | 19,2295±0,4352 | 18,474  | 18,4407 | 18,4862 | 19,9933±0,4514 | 19,2810 | 19,2580 | 19,3066 |
| Enerji<br>(keV) | B50B15         |         |         |         | B50B20         |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,0688±0,0367  | 1,0430  | 1,1247  | 1,1910  | 1,0821±0,0431  | 1,1330  | 1,2225  | 1,1318  |
| 81,0            | 2,2239±0,0590  | 2,1059  | 2,2951  | 2,3449  | 2,2175±0,0559  | 2,2778  | 2,4838  | 2,2766  |
| 276,4           | 9,3182±0,5062  | 9,0557  | 9,4049  | 9,1488  | 9,6841±0,5118  | 9,6272  | 9,9899  | 9,6320  |
| 302,9           | 9,7248±0,3036  | 9,5370  | 9,8530  | 9,6105  | 10,6909±0,3360 | 10,132  | 10,4595 | 10,1469 |
| 356,0           | 9,9388±0,2268  | 10,4090 | 10,6469 | 10,4193 | 10,9104±0,2461 | 11,072  | 11,2867 | 11,0345 |
| 383,9           | 10,6664±0,6006 | 10,7830 | 11,0227 | 10,8236 | 11,2009±0,5774 | 11,448  | 11,6878 | 11,4465 |
| 511,0           | 11,8595±0,3186 | 12,3800 | 12,4897 | 12,3717 | 12,7497±0,3259 | 13,135  | 13,2348 | 13,1446 |
| 661,7           | 14,1288±0,3096 | 13,9970 | 14,0377 | 13,9634 | 14,1125±0,3092 | 14,847  | 14,8663 | 14,8686 |
| 1173,2          | 18,4542±0,4266 | 18,5690 | 18,5250 | 18,4941 | 20,0816±0,4641 | 19,691  | 19,6898 | 19,7232 |
| 1274,5          | 20,2314±0,5098 | 19,3710 | 19,3354 | 19,3052 | 19,8848±0,4971 | 20,538  | 20,4969 | 20,5662 |
| 1332,5          | 19,0163±0,4291 | 19,8170 | 19,7805 | 19,7479 | 22,2030±0,5002 | 21,015  | 20,9836 | 21,0367 |

Tablo 4. 23. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

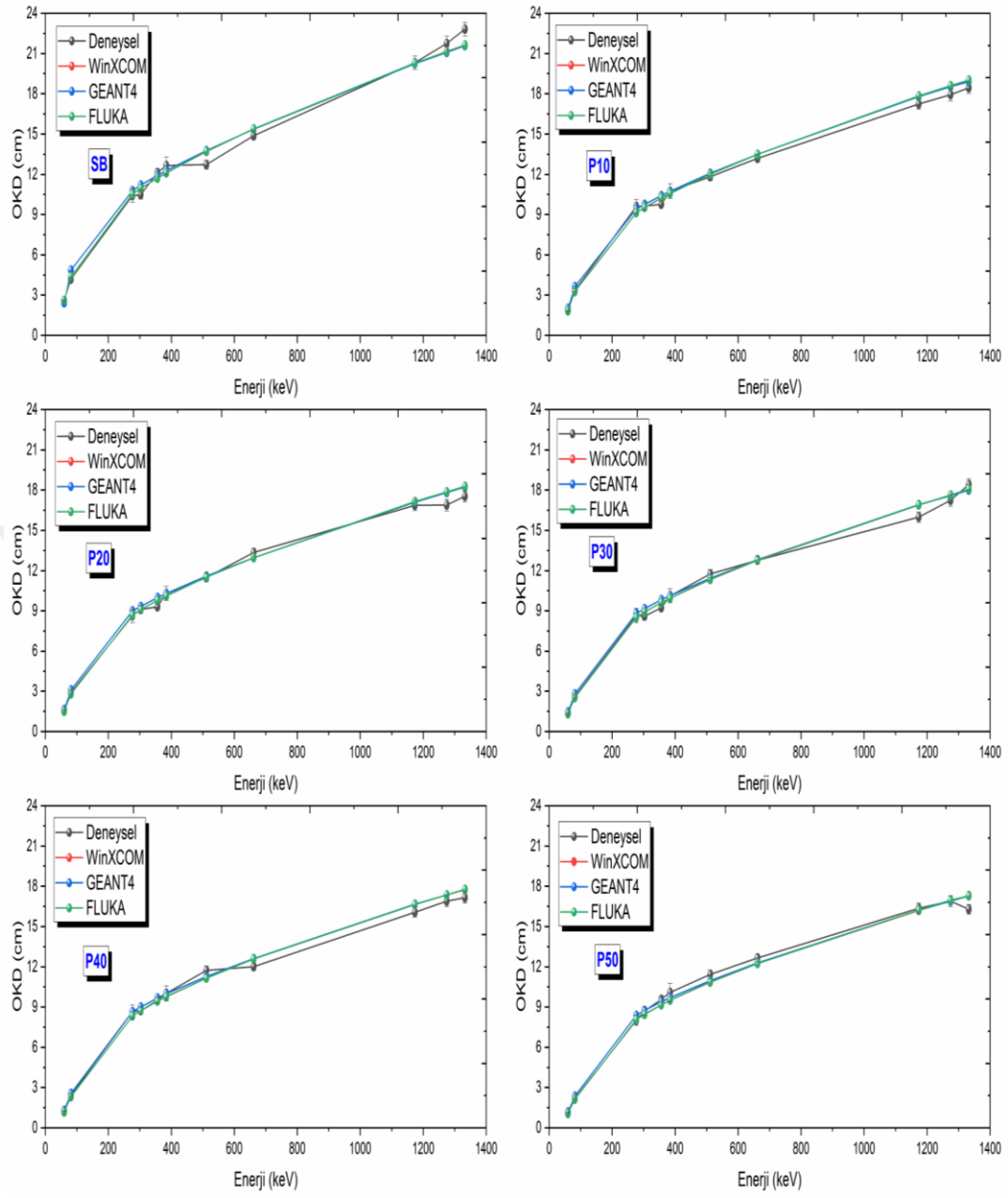
| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |        | P50            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|--------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052 | 1,1360±0,0296  | 1,0755  | 1,1747  | 1,0737  |
| 81,0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,3670 | 2,1924±0,0563  | 2,1320  | 2,3531  | 2,1313  |
| 276,4           | 10,4212±0,5210 | 10,5274 | 10,7956 | 10,531 | 8,0140±0,3713  | 8,0654  | 8,3838  | 8,0666  |
| 302,9           | 10,4762±0,3098 | 10,9535 | 11,1955 | 10,959 | 8,7050±0,2759  | 8,4598  | 8,7405  | 8,4589  |
| 356,0           | 12,1209±0,2786 | 11,7305 | 11,9153 | 11,721 | 9,5824±0,2179  | 9,1644  | 9,4000  | 9,167   |
| 383,9           | 12,6495±0,6675 | 12,1160 | 12,2843 | 12,102 | 10,0913±0,6607 | 9,5013  | 9,6913  | 9,5074  |
| 511,0           | 12,7200±0,3320 | 13,7092 | 13,7635 | 13,731 | 11,4436±0,3036 | 10,8563 | 10,9634 | 10,8689 |
| 661,7           | 14,8878±0,3246 | 15,3909 | 15,3741 | 15,398 | 12,6497±0,2762 | 12,2472 | 12,2815 | 12,2494 |
| 1173,2          | 20,3092±0,5059 | 20,2801 | 20,2487 | 20,303 | 16,3517±0,3819 | 16,2109 | 16,2167 | 16,2233 |
| 1274,5          | 21,7516±0,5414 | 21,1520 | 21,0756 | 21,128 | 16,8952±0,4261 | 16,9133 | 16,8899 | 16,9573 |
| 1332,5          | 22,8210±0,5142 | 21,6402 | 21,5833 | 21,648 | 16,2826±0,3623 | 17,3004 | 17,2986 | 17,2961 |
| Enerji<br>(keV) | P50B5          |         |         |        | P50B10         |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,1820±0,0352  | 1,1592  | 1,2672  | 1,3628 | 1,2015±0,0379  | 1,2509  | 1,3661  | 1,2635  |
| 81,0            | 2,2140±0,0598  | 2,2885  | 2,5234  | 2,6001 | 2,4935±0,0629  | 2,4541  | 2,7078  | 2,4817  |
| 276,4           | 8,8980±0,4786  | 8,4773  | 8,8058  | 8,6779 | 9,4355±0,5102  | 8,9627  | 9,295   | 9,059   |
| 302,9           | 9,5614±0,3256  | 8,9439  | 9,2014  | 9,0822 | 9,2344±0,3046  | 9,3895  | 9,6802  | 9,5102  |
| 356,0           | 10,2759±0,2320 | 9,6523  | 9,8699  | 9,8079 | 9,7023±0,2168  | 10,1619 | 10,4053 | 10,2931 |
| 383,9           | 10,8688±0,6256 | 9,9988  | 10,1945 | 10,151 | 10,6230±0,5762 | 10,5313 | 10,7443 | 10,6699 |
| 511,0           | 12,2945±0,3199 | 11,4155 | 11,5165 | 11,555 | 11,4451±0,3007 | 12,0217 | 12,1053 | 12,186  |
| 661,7           | 13,5671±0,2971 | 12,8783 | 12,8923 | 13,021 | 12,8849±0,2811 | 13,5554 | 13,5798 | 13,7314 |
| 1173,2          | 19,3584±0,4472 | 17,0435 | 17,0286 | 17,228 | 17,4134±0,4031 | 17,9348 | 17,9081 | 18,1563 |
| 1274,5          | 18,4548±0,4616 | 17,7575 | 17,7088 | 17,947 | 19,1523±0,4804 | 18,7070 | 18,6617 | 18,9461 |
| 1332,5          | 18,8166±0,4230 | 18,1882 | 18,1449 | 18,369 | 19,8120±0,4435 | 19,1364 | 19,1008 | 19,3915 |
| Enerji<br>(keV) | P50B15         |         |         |        | P50B20         |         |         |         |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 1,3375±0,0341  | 1,2992  | 1,4198  | 1,2972 | 1,4457±0,0346  | 1,3989  | 1,4922  | 1,3657  |
| 81,0            | 2,6114±0,0665  | 2,5363  | 2,7950  | 2,5349 | 2,6341±0,0790  | 2,7044  | 2,9232  | 2,6557  |
| 276,4           | 9,5078±0,4383  | 9,1071  | 9,4380  | 9,1146 | 9,4166±0,5137  | 9,3952  | 9,7201  | 9,3901  |
| 302,9           | 9,8713±0,3155  | 9,5420  | 9,8420  | 9,5507 | 9,6534±0,3102  | 9,8274  | 10,1284 | 9,847   |
| 356,0           | 9,9928±0,2232  | 10,319  | 10,5669 | 10,325 | 10,2241±0,2289 | 10,6292 | 10,8710 | 10,6338 |
| 383,9           | 10,9039±0,5722 | 10,6927 | 10,9074 | 10,695 | 10,7680±0,6174 | 11,0048 | 11,2204 | 11,025  |
| 511,0           | 12,5440±0,3263 | 12,2005 | 12,3078 | 12,206 | 12,9395±0,3410 | 12,5454 | 12,6573 | 12,5632 |
| 661,7           | 14,3254±0,3179 | 13,7541 | 13,7690 | 13,768 | 13,8042±0,3012 | 14,1357 | 14,1794 | 14,1681 |
| 1173,2          | 17,5863±0,4088 | 18,1951 | 18,1712 | 18,199 | 19,0441±0,4488 | 18,6918 | 18,6882 | 18,7577 |
| 1274,5          | 18,6132±0,4699 | 18,9794 | 18,9296 | 19,003 | 18,5296±0,4668 | 19,4969 | 19,4604 | 19,5226 |
| 1332,5          | 20,1440±0,4506 | 19,4119 | 19,3891 | 19,432 | 20,4907±0,4592 | 19,9447 | 19,9615 | 19,9796 |

Tablo 4. 24. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılandırılmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenmiş OKD'leri (cm)

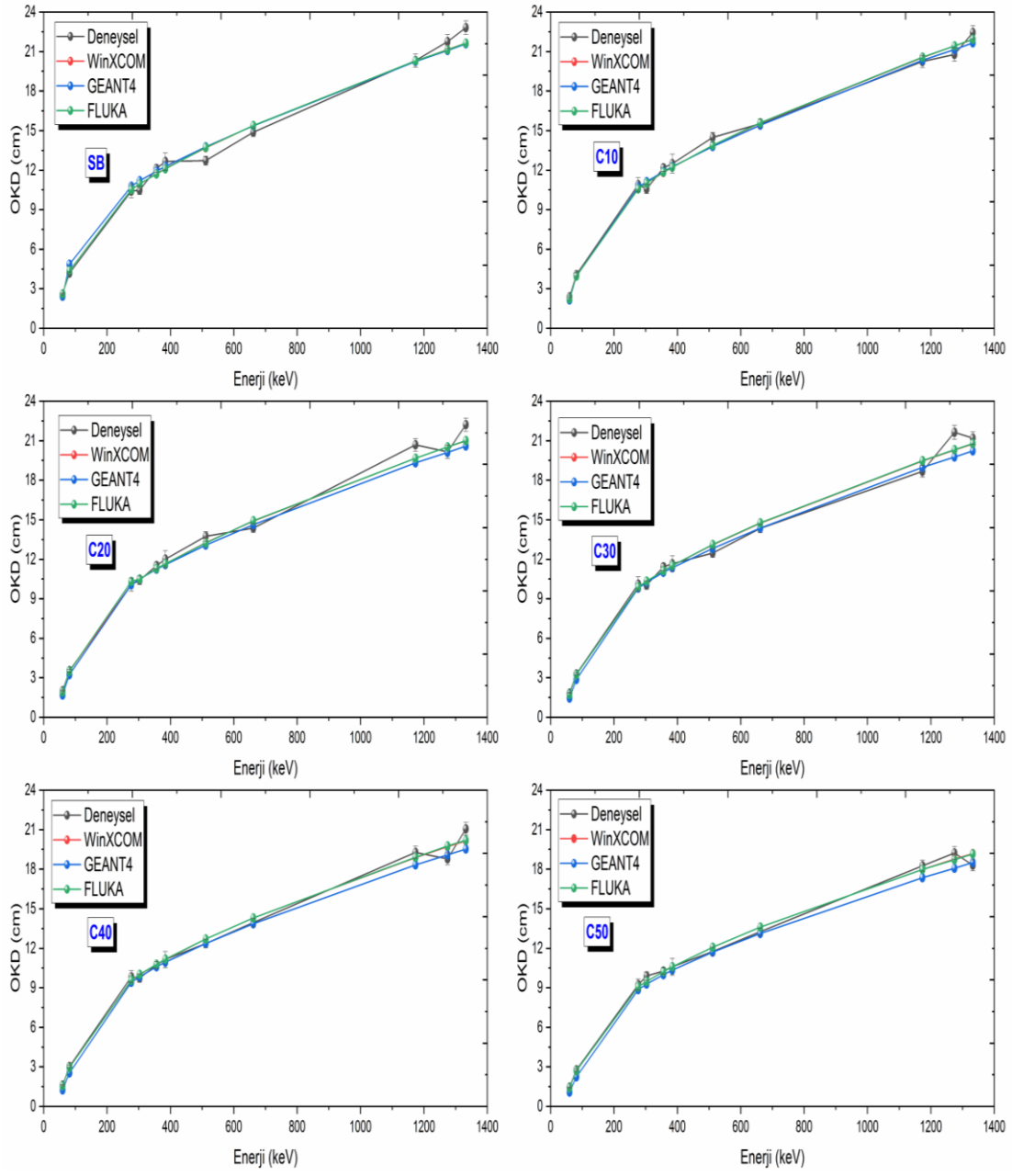
| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | C50            |         |         |        |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|--------|
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  |
| 59,5            | 2,6196±0,0583  | 2,6065  | 2,4228  | 2,6052  | 1,4500±0,0397  | 1,4127  | 1,1993  | 1,4110 |
| 81,0            | 4,1963±0,0951  | 4,3677  | 4,8594  | 4,3670  | 2,7744±0,0693  | 2,7064  | 2,2481  | 2,7046 |
| 276,4           | 10,4212±0,5210 | 10,5274 | 10,7956 | 10,531  | 9,2419±0,4208  | 9,0682  | 8,8588  | 9,0650 |
| 302,9           | 10,4762±0,3098 | 10,9535 | 11,1955 | 10,959  | 9,8940±0,3072  | 9,4869  | 9,2747  | 9,4904 |
| 356,0           | 12,1209±0,2786 | 11,7305 | 11,9153 | 11,721  | 10,2713±0,2318 | 10,2408 | 9,9947  | 10,239 |
| 383,9           | 12,6495±0,6675 | 12,116  | 12,2843 | 12,102  | 10,5918±0,6441 | 10,6037 | 10,337  | 10,595 |
| 511,0           | 12,7200±0,3320 | 13,7092 | 13,7635 | 13,731  | 11,7646±0,3052 | 12,0778 | 11,7137 | 12,084 |
| 661,7           | 14,8878±0,3246 | 15,3909 | 15,3741 | 15,398  | 13,2532±0,2897 | 13,6040 | 13,1339 | 13,613 |
| 1173,2          | 20,3092±0,5059 | 20,2801 | 20,2487 | 20,303  | 18,2593±0,4247 | 17,9803 | 17,3552 | 17,972 |
| 1274,5          | 21,7516±0,5414 | 21,152  | 21,0756 | 21,128  | 19,2419±0,4811 | 18,7589 | 18,0765 | 18,733 |
| 1332,5          | 22,8210±0,5142 | 21,6402 | 21,5833 | 21,648  | 18,3073±0,4086 | 19,1883 | 18,5175 | 19,171 |
| Enerji<br>(keV) | C50B5          |         |         |         | C50B10         |         |         |        |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  |
| 59,5            | 1,4393±0,0374  | 1,4029  | 1,0915  | 1,4014  | 1,5734±0,0365  | 1,4929  | 1,1652  | 1,4931 |
| 81,0            | 2,7496±0,0684  | 2,6721  | 2,2241  | 2,6697  | 2,9170±0,0725  | 2,8288  | 2,3630  | 2,8267 |
| 276,4           | 8,6820±0,4250  | 8,803   | 8,6226  | 8,8083  | 8,8688±0,4070  | 9,1743  | 8,9890  | 9,1772 |
| 302,9           | 9,0730±0,3155  | 9,2075  | 9,0120  | 9,2045  | 9,1783±0,2808  | 9,5882  | 9,3902  | 9,5956 |
| 356,0           | 10,0811±0,2277 | 9,9383  | 9,6949  | 9,9357  | 9,8619±0,2215  | 10,3507 | 10,1076 | 10,349 |
| 383,9           | 10,5583±0,5782 | 10,2852 | 10,0255 | 10,283  | 10,5965±0,5492 | 10,7084 | 10,4561 | 10,714 |
| 511,0           | 12,0760±0,3161 | 11,7098 | 11,3516 | 11,718  | 12,8987±0,3354 | 12,1887 | 11,8319 | 12,193 |
| 661,7           | 13,8779±0,3020 | 13,1865 | 12,7409 | 13,188  | 14,0308±0,3066 | 13,7227 | 13,2718 | 13,737 |
| 1173,2          | 16,7973±0,3906 | 17,4283 | 16,8298 | 17,452  | 18,7477±0,4367 | 18,1313 | 17,5388 | 18,159 |
| 1274,5          | 18,5484±0,4660 | 18,1778 | 17,5265 | 18,216  | 19,4317±0,4850 | 18,9118 | 18,2623 | 18,931 |
| 1332,5          | 19,0115±0,4250 | 18,5927 | 17,9469 | 18,615  | 18,5664±0,4166 | 19,3439 | 18,6958 | 19,343 |
| Enerji<br>(keV) | C50B15         |         |         |         | C50B20         |         |         |        |
|                 | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneysel       | Teorik  | GEANT4  | FLUKA  |
| 59,5            | 1,6373±0,0379  | 1,5841  | 1,2375  | 1,5809  | 1,7920±0,0410  | 1,7044  | 1,3317  | 1,6976 |
| 81,0            | 3,0456±0,0754  | 2,9840  | 2,4957  | 2,9790  | 3,3036±0,0929  | 3,1919  | 2,6729  | 3,1821 |
| 276,4           | 9,1450±0,4966  | 9,5189  | 9,3317  | 9,5270  | 10,2217±0,5020 | 10,0196 | 9,8324  | 10,023 |
| 302,9           | 10,0467±0,3136 | 9,9495  | 9,7585  | 9,9596  | 10,0307±0,3349 | 10,4742 | 10,2744 | 10,483 |
| 356,0           | 10,3903±0,2397 | 10,7324 | 10,489  | 10,728  | 10,8184±0,2439 | 11,2896 | 11,0427 | 11,291 |
| 383,9           | 10,9816±0,5877 | 11,1017 | 10,8466 | 11,104  | 11,7485±0,5945 | 11,6764 | 11,4220 | 11,68  |
| 511,0           | 12,7979±0,3344 | 12,6308 | 12,2599 | 12,6400 | 12,7683±0,3310 | 13,2803 | 12,9335 | 13,283 |
| 661,7           | 14,8991±0,3257 | 14,2193 | 13,7467 | 14,2360 | 15,0578±0,3281 | 14,9453 | 14,4803 | 14,955 |
| 1173,2          | 19,5183±0,4536 | 18,7822 | 18,1669 | 18,7850 | 19,7365±0,4603 | 19,7419 | 19,1132 | 19,768 |
| 1274,5          | 19,8779±0,4971 | 19,5916 | 18,9374 | 19,5970 | 21,6385±0,5404 | 20,5900 | 19,9115 | 20,606 |
| 1332,5          | 20,8901±0,4682 | 20,0397 | 19,3927 | 20,0590 | 20,3736±0,4572 | 21,0615 | 20,3999 | 21,089 |



Şekil 4.19. Bronz katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği

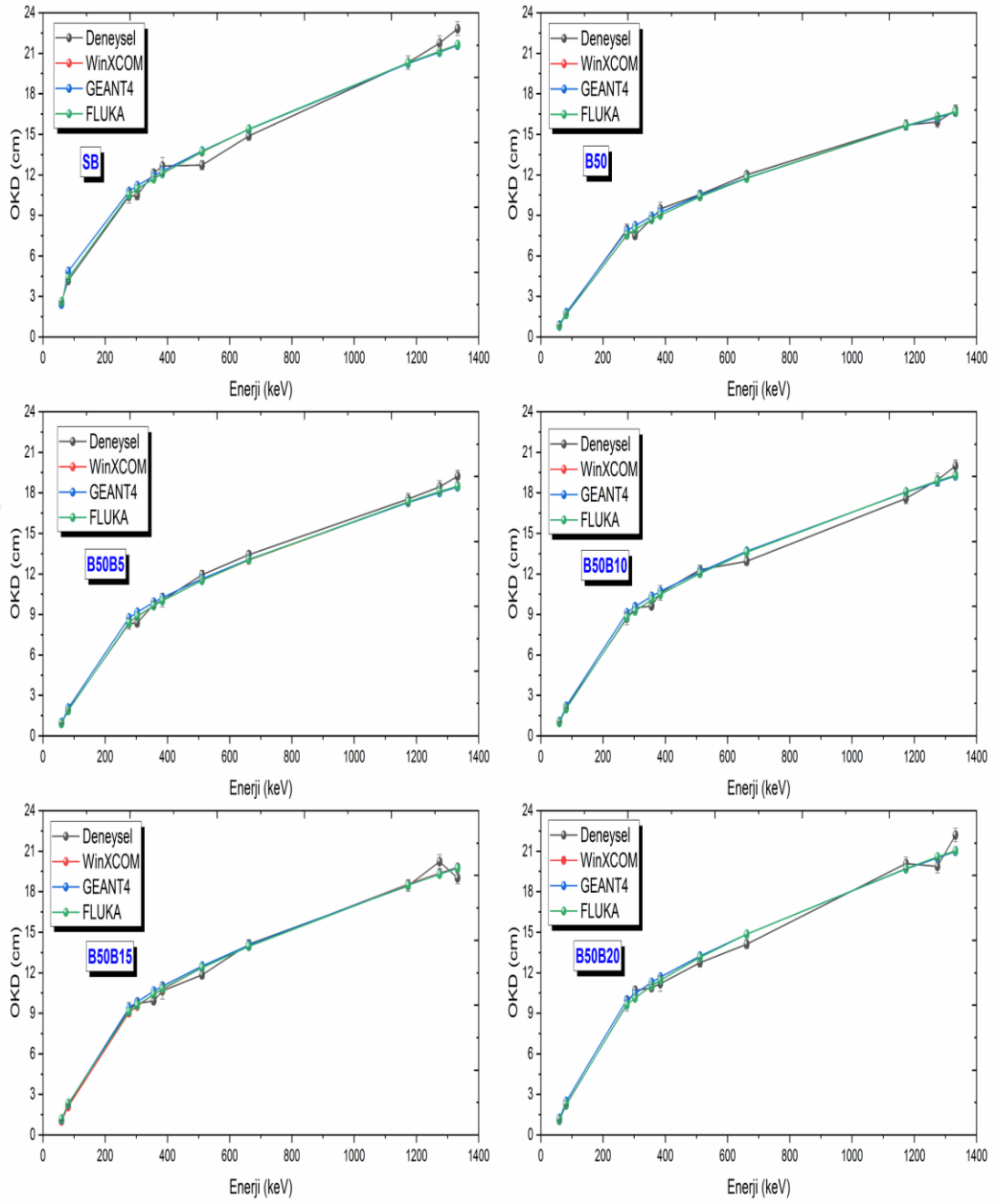


Şekil 4.20. Pirinç katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği

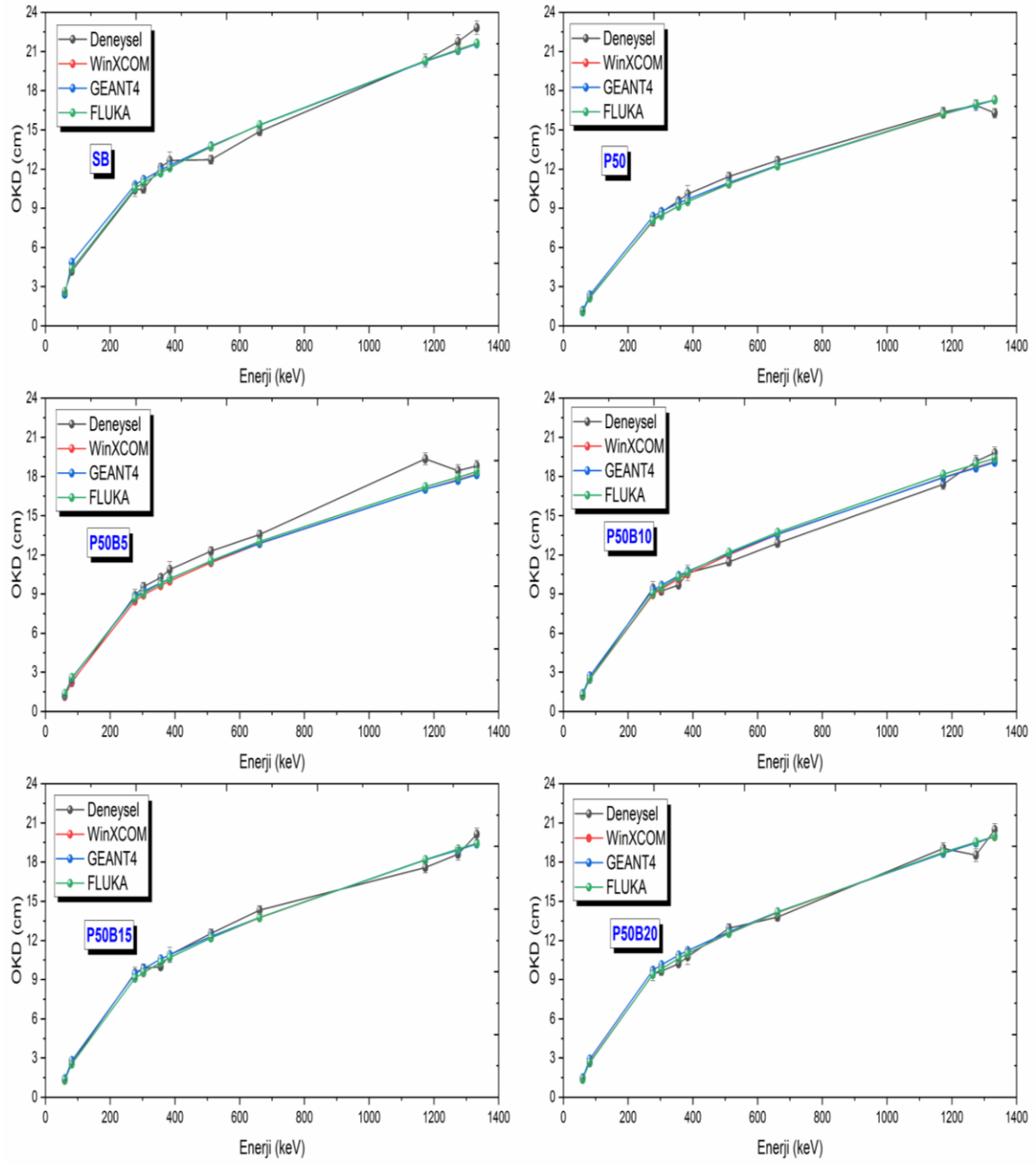


Şekil 4.21. Paslanmaz katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği

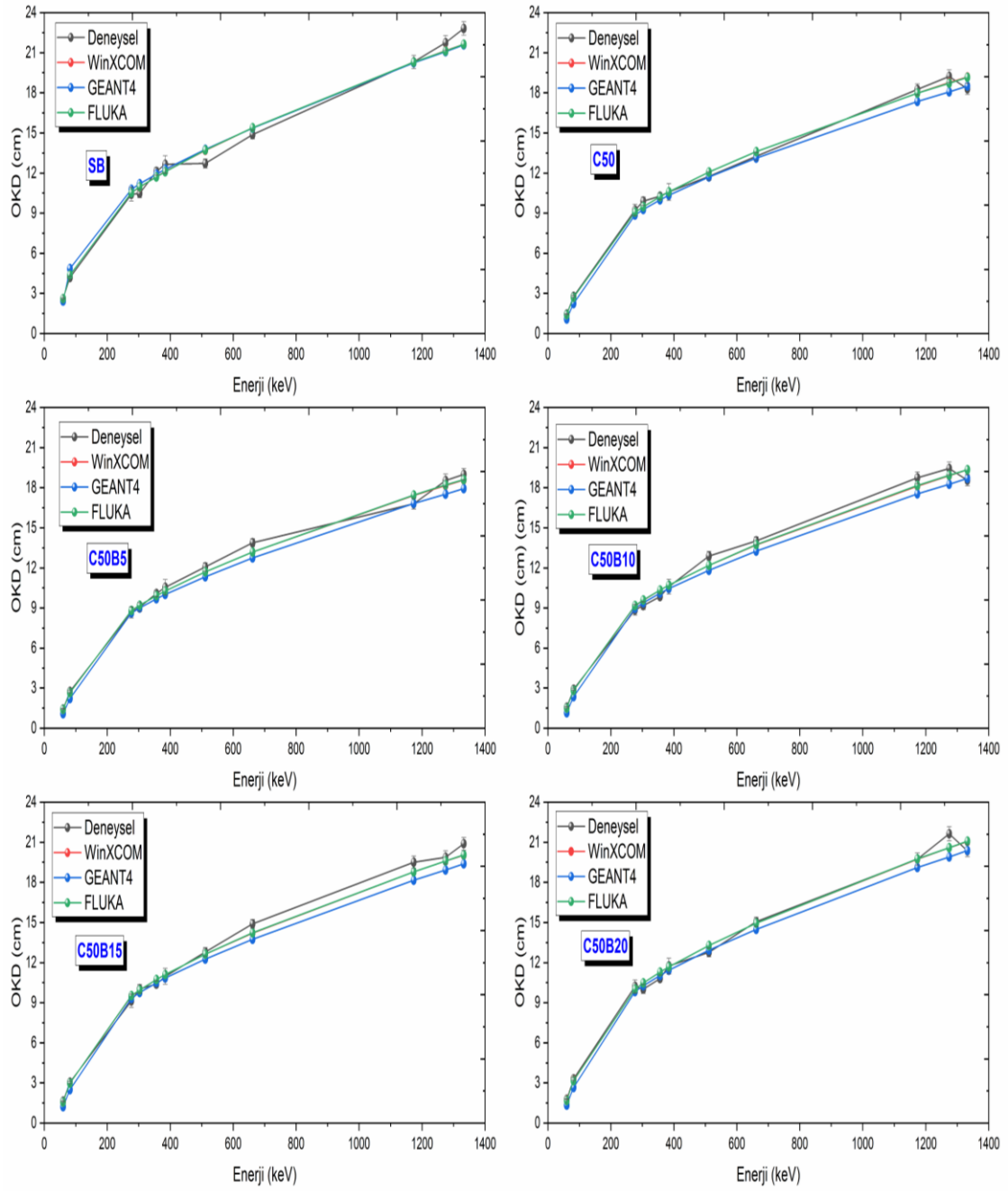




Şekil 4.22. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.23. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.24. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin OKD'lerinin enerjiye göre değişim grafiği

Tablo 4. 25. Bronz katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253 | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 0,7387±0,0164 | 0,7162 | 0,7862 | 0,7158 |
| 81,0            | 1,8224±0,0413 | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 1,3239±0,0312 | 1,3128 | 1,4490 | 1,3117 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264 | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 4,0338±0,1918 | 3,9551 | 4,0767 | 3,9575 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345 | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 3,9518±0,1232 | 4,1301 | 4,2388 | 4,1320 |
| 356,0           | 5,2641±0,1210 | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 4,5438±0,1017 | 4,4477 | 4,5312 | 4,4518 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899 | 5,2619 | 5,3350 | 5,2557 | 4,7527±0,2762 | 4,6014 | 4,6727 | 4,6045 |
| 511,0           | 5,5242±0,1442 | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 5,4212±0,1402 | 5,2296 | 5,2570 | 5,2355 |
| 661,7           | 6,4657±0,1410 | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 5,6809±0,1243 | 5,8843 | 5,8798 | 5,8917 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197 | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 8,1940±0,1912 | 7,7687 | 7,7617 | 7,7767 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351 | 9,1862 | 9,1530 | 9,1756 | 7,9850±0,2010 | 8,1057 | 8,0839 | 8,1023 |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233 | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 8,0928±0,1833 | 8,2918 | 8,2723 | 8,3055 |
| Enerji<br>(keV) | B20           |        |        |        | B30           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,5957±0,0319 | 0,564  | 0,6146 | 0,5635 | 0,4751±0,0301 | 0,4615 | 0,5004 | 0,4610 |
| 81,0            | 1,1168±0,0575 | 1,0834 | 1,1907 | 1,0822 | 0,9152±0,0545 | 0,9126 | 0,9991 | 0,9122 |
| 276,4           | 3,5974±0,4555 | 3,7964 | 3,9226 | 3,8012 | 3,6579±0,4726 | 3,5704 | 3,7033 | 3,5770 |
| 302,9           | 3,8270±0,2852 | 3,9768 | 4,0934 | 3,976  | 3,9330±0,2959 | 3,7497 | 3,8670 | 3,7564 |
| 356,0           | 4,0543±0,2128 | 4,3003 | 4,3956 | 4,303  | 4,3979±0,2388 | 4,0688 | 4,1659 | 4,0741 |
| 383,9           | 4,4982±0,6077 | 4,4555 | 4,5371 | 4,4567 | 4,0104±0,4883 | 4,2209 | 4,3057 | 4,2278 |
| 511,0           | 5,3502±0,3116 | 5,0827 | 5,1240 | 5,0848 | 5,1055±0,3006 | 4,8303 | 4,8695 | 4,8330 |
| 661,7           | 5,5703±0,2820 | 5,7295 | 5,5392 | 5,7276 | 5,5936±0,2823 | 5,4535 | 5,4579 | 5,4572 |
| 1173,2          | 6,9663±0,3714 | 7,5777 | 7,5610 | 7,5854 | 7,0601±0,3753 | 7,2235 | 7,2170 | 7,2275 |
| 1274,5          | 8,4153±0,4847 | 7,9067 | 7,8837 | 7,9085 | 7,8431±0,4539 | 7,5374 | 7,5089 | 7,5447 |
| 1332,5          | 8,2722±0,4282 | 8,0881 | 8,0739 | 8,0978 | 7,5265±0,3822 | 7,7103 | 7,6931 | 7,7101 |
| Enerji<br>(keV) | B40           |        |        |        | B50           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4269±0,0138 | 0,4065 | 0,4403 | 0,4065 | 0,3734±0,0131 | 0,3524 | 0,3809 | 0,3520 |
| 81,0            | 0,7988±0,0193 | 0,8196 | 0,8983 | 0,8192 | 0,7514±0,0181 | 0,7208 | 0,7872 | 0,7201 |
| 276,4           | 3,4862±0,1804 | 3,4890 | 3,6323 | 3,4908 | 3,4616±0,1678 | 3,2808 | 3,4158 | 3,2826 |
| 302,9           | 3,8045±0,1174 | 3,6722 | 3,8074 | 3,6759 | 3,2622±0,1021 | 3,4596 | 3,5827 | 3,4607 |
| 356,0           | 3,8487±0,0872 | 3,9966 | 4,1056 | 3,9998 | 3,7968±0,0866 | 3,7747 | 3,8781 | 3,7797 |
| 383,9           | 4,2211±0,2328 | 4,1503 | 4,2411 | 4,1473 | 4,1200±0,2074 | 3,9235 | 4,0136 | 3,9246 |
| 511,0           | 4,7823±0,1268 | 4,7624 | 4,8148 | 4,7603 | 4,5878±0,1208 | 4,5128 | 4,5558 | 4,5135 |
| 661,7           | 5,3555±0,1178 | 5,3841 | 5,4017 | 5,3863 | 5,2138±0,1142 | 5,1078 | 5,1206 | 5,1075 |
| 1173,2          | 6,8585±0,1602 | 7,1409 | 7,1420 | 7,1536 | 6,8171±0,1581 | 6,7822 | 6,7859 | 6,7903 |
| 1274,5          | 7,2795±0,1845 | 7,4513 | 7,4430 | 7,4489 | 6,9182±0,1749 | 7,0772 | 7,0578 | 7,0836 |
| 1332,5          | 7,3690±0,1668 | 7,6223 | 7,6202 | 7,6320 | 7,2932±0,1644 | 7,2395 | 7,2282 | 7,2417 |

Tablo 4. 26. Pirinç katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253 | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 0,7917±0,0179 | 0,7945 | 0,8784 | 0,794  |
| 81,0            | 1,8224±0,0413 | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 1,4605±0,0352 | 1,4227 | 1,5787 | 1,4219 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264 | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 4,1718±0,2252 | 3,9682 | 4,087  | 3,9723 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345 | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 4,1872±0,1355 | 4,1374 | 4,2379 | 4,1364 |
| 356,0           | 5,2641±0,1210 | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 4,2424±0,0950 | 4,4466 | 4,5251 | 4,4532 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899 | 5,2619 | 5,335  | 5,2557 | 4,6663±0,2353 | 4,5970 | 4,6654 | 4,5968 |
| 511,0           | 5,5242±0,1442 | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 5,1403±0,1313 | 5,2151 | 5,2438 | 5,2181 |
| 661,7           | 6,4657±0,1410 | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 5,7333±0,1247 | 5,8628 | 5,8634 | 5,8642 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197 | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 7,4894±0,1736 | 7,7337 | 7,7309 | 7,7535 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351 | 9,1862 | 9,1530 | 9,1756 | 7,7908±0,1972 | 8,0689 | 8,055  | 8,0789 |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233 | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 8,0127±0,1796 | 8,2540 | 8,2083 | 8,2589 |
| Enerji<br>(keV) | P20           |        |        |        | P30           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6844±0,0166 | 0,6530 | 0,7184 | 0,6525 | 0,5903±0,0137 | 0,5735 | 0,6288 | 0,5728 |
| 81,0            | 1,2630±0,0309 | 1,2174 | 1,3483 | 1,2161 | 1,1383±0,0279 | 1,0987 | 1,2155 | 1,0981 |
| 276,4           | 3,7477±0,2152 | 3,7770 | 3,9055 | 3,7760 | 3,7594±0,2265 | 3,6978 | 3,8277 | 3,7012 |
| 302,9           | 3,9640±0,1267 | 3,9455 | 4,0546 | 3,9458 | 3,7416±0,1188 | 3,8688 | 3,9817 | 3,8693 |
| 356,0           | 4,0419±0,0899 | 4,2508 | 4,3389 | 4,2518 | 4,0124±0,0899 | 4,1770 | 4,2685 | 4,1792 |
| 383,9           | 4,4770±0,2288 | 4,3985 | 4,4756 | 4,3972 | 4,3972±0,2240 | 4,3254 | 4,4056 | 4,3193 |
| 511,0           | 4,9903±0,1304 | 5,0011 | 5,0322 | 5,0035 | 5,1095±0,1355 | 4,9272 | 4,9614 | 4,9349 |
| 661,7           | 5,8008±0,1276 | 5,6282 | 5,6322 | 5,6284 | 5,5514±0,1209 | 5,5502 | 5,5635 | 5,5551 |
| 1173,2          | 7,3272±0,1700 | 7,4322 | 7,4284 | 7,4465 | 6,9410±0,1622 | 7,3358 | 7,3424 | 7,3421 |
| 1274,5          | 7,3344±0,1849 | 7,7542 | 7,7352 | 7,7603 | 7,4869±0,1878 | 7,6537 | 7,6405 | 7,6574 |
| 1332,5          | 7,6141±0,1713 | 7,9320 | 7,9192 | 7,9379 | 8,0005±0,1794 | 7,8291 | 7,8209 | 7,8494 |
| Enerji<br>(keV) | P40           |        |        |        | P50           |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,5414±0,0147 | 0,5158 | 0,5661 | 0,5158 | 0,4934±0,0129 | 0,4671 | 0,5101 | 0,4663 |
| 81,0            | 1,0440±0,0303 | 1,0076 | 1,1167 | 1,0079 | 0,9521±0,0245 | 0,9259 | 1,0220 | 0,9256 |
| 276,4           | 3,7574±0,2222 | 3,6173 | 3,7560 | 3,6195 | 3,4804±0,1612 | 3,5028 | 3,6411 | 3,5033 |
| 302,9           | 3,7890±0,1122 | 3,7897 | 3,9145 | 3,7911 | 3,7805±0,1198 | 3,6740 | 3,7959 | 3,6737 |
| 356,0           | 4,1316±0,0986 | 4,0990 | 4,2053 | 4,0962 | 4,1616±0,0946 | 3,9801 | 4,0824 | 3,9812 |
| 383,9           | 4,3535±0,2418 | 4,2473 | 4,3425 | 4,2459 | 4,3826±0,2869 | 4,1264 | 4,2089 | 4,129  |
| 511,0           | 5,0981±0,1339 | 4,8462 | 4,8910 | 4,8487 | 4,9699±0,1319 | 4,7148 | 4,7613 | 4,7203 |
| 661,7           | 5,2151±0,1148 | 5,4633 | 5,4806 | 5,4639 | 5,4937±0,1199 | 5,3189 | 5,3338 | 5,3199 |
| 1173,2          | 6,9799±0,1641 | 7,2265 | 7,2363 | 7,2306 | 7,1015±0,1658 | 7,0403 | 7,0428 | 7,0457 |
| 1274,5          | 7,3399±0,1849 | 7,5396 | 7,5406 | 7,5402 | 7,3375±0,1850 | 7,3454 | 7,3352 | 7,3644 |
| 1332,5          | 7,4491±0,1680 | 7,7122 | 7,7203 | 7,7184 | 7,0715±0,1577 | 7,5135 | 7,5127 | 7,5116 |

Tablo 4. 27. Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | C10           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253 | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 1,0368±0,0234 | 0,9793 | 0,9378 | 0,9789 |
| 81,0            | 1,8224±0,0413 | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 1,7736±0,0429 | 1,7220 | 1,7151 | 1,7214 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264 | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 4,7370±0,2280 | 4,5945 | 4,6512 | 4,5972 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345 | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 4,5925±0,1546 | 4,7870 | 4,8314 | 4,789  |
| 356,0           | 5,2641±0,1210 | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 5,2916±0,1183 | 5,1397 | 5,1638 | 5,1435 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899 | 5,2619 | 5,3350 | 5,2557 | 5,4268±0,3125 | 5,3117 | 5,3225 | 5,3063 |
| 511,0           | 5,5242±0,1442 | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 6,2959±0,1613 | 6,0208 | 5,9946 | 6,0285 |
| 661,7           | 6,4657±0,1410 | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 6,7482±0,1470 | 6,7657 | 6,6983 | 6,7737 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197 | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 8,7917±0,2028 | 8,9213 | 8,8333 | 8,9325 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351 | 9,1862 | 9,1530 | 9,1756 | 9,0294±0,2274 | 9,3078 | 9,1873 | 9,312  |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233 | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 9,7544±0,2179 | 9,5214 | 9,4088 | 9,5247 |
| Enerji<br>(keV) | C20           |        |        |        | C30           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,8795±0,0194 | 0,8349 | 0,734  | 0,8348 | 0,7986±0,0180 | 0,7557 | 0,6285 | 0,7551 |
| 81,0            | 1,5406±0,0405 | 1,5161 | 1,4067 | 1,5156 | 1,4286±0,0352 | 1,4040 | 1,2416 | 1,4028 |
| 276,4           | 4,3815±0,2164 | 4,3701 | 4,3738 | 4,4852 | 4,3973±0,2315 | 4,3006 | 4,2651 | 4,2987 |
| 302,9           | 4,5183±0,1384 | 4,5591 | 4,5585 | 4,5629 | 4,3605±0,1393 | 4,4914 | 4,4545 | 4,4947 |
| 356,0           | 5,0034±0,1115 | 4,9031 | 4,8815 | 4,9067 | 4,9621±0,1138 | 4,8372 | 4,7831 | 4,8384 |
| 383,9           | 5,2183±0,2772 | 5,0703 | 5,0397 | 5,0678 | 5,0646±0,2624 | 5,0046 | 4,9336 | 5,0087 |
| 511,0           | 5,9689±0,1551 | 5,7558 | 5,6774 | 5,7519 | 5,4196±0,1407 | 5,6886 | 5,5732 | 5,6974 |
| 661,7           | 6,2430±0,1373 | 6,4726 | 6,3563 | 6,4785 | 6,2279±0,1363 | 6,4010 | 6,2450 | 6,4091 |
| 1173,2          | 8,9815±0,2076 | 8,5410 | 8,3909 | 8,5432 | 8,1113±0,1874 | 8,4517 | 8,2416 | 8,4655 |
| 1274,5          | 8,7552±0,2188 | 8,9110 | 8,7385 | 8,9168 | 9,3984±0,2337 | 8,8178 | 8,5831 | 8,8297 |
| 1332,5          | 9,6464±0,2163 | 9,1153 | 8,9411 | 9,1258 | 9,2074±0,2060 | 9,0198 | 8,7884 | 9,0285 |
| Enerji<br>(keV) | C40           |        |        |        | C50           |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7016±0,0185 | 0,6834 | 0,5474 | 0,6829 | 0,6297±0,0172 | 0,6135 | 0,4774 | 0,6128 |
| 81,0            | 1,3206±0,0330 | 1,2918 | 1,1023 | 1,2907 | 1,2049±0,0301 | 1,1754 | 0,9763 | 1,1746 |
| 276,4           | 4,2735±0,1960 | 4,1560 | 4,0926 | 4,1584 | 4,0137±0,1828 | 3,9383 | 3,8473 | 3,9369 |
| 302,9           | 4,2335±0,1422 | 4,3444 | 4,2738 | 4,3476 | 4,2969±0,1334 | 4,1201 | 4,0279 | 4,1216 |
| 356,0           | 4,6606±0,1047 | 4,6847 | 4,6027 | 4,6858 | 4,4607±0,1007 | 4,4475 | 4,3406 | 4,4469 |
| 383,9           | 4,8396±0,2642 | 4,8489 | 4,7512 | 4,8521 | 4,6000±0,2797 | 4,6051 | 4,4893 | 4,6013 |
| 511,0           | 5,3647±0,1415 | 5,5176 | 5,3714 | 5,5196 | 5,1093±0,1325 | 5,2453 | 5,0872 | 5,2480 |
| 661,7           | 6,0585±0,1344 | 6,2120 | 6,0220 | 6,2144 | 5,7558±0,1258 | 5,9081 | 5,7040 | 5,9119 |
| 1173,2          | 8,3767±0,1945 | 8,2065 | 7,9586 | 8,2131 | 7,9299±0,1844 | 7,8087 | 7,5373 | 7,8051 |
| 1274,5          | 8,1616±0,2050 | 8,5619 | 8,2888 | 8,5819 | 8,3567±0,2089 | 8,1469 | 7,8505 | 8,1358 |
| 1332,5          | 9,1492±0,2049 | 8,7580 | 8,4858 | 8,7725 | 7,9507±0,1774 | 8,3334 | 8,0421 | 8,3257 |

Tablo 4. 28. %50 bronz farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | B50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253 | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 0,3734±0,0131 | 0,3524 | 0,3809 | 0,352  |
| 81,0            | 1,8224±0,0413 | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 0,7514±0,0181 | 0,7208 | 0,7872 | 0,7201 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264 | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 3,4616±0,1678 | 3,2808 | 3,4158 | 3,2826 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345 | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 3,2622±0,1021 | 3,4596 | 3,5827 | 3,4607 |
| 356,0           | 5,2641±0,1210 | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 3,7968±0,0866 | 3,7747 | 3,8781 | 3,7797 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899 | 5,2619 | 5,3350 | 5,2557 | 4,1200±0,2074 | 3,9235 | 4,0136 | 3,9246 |
| 511,0           | 5,5242±0,1442 | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 4,5878±0,1208 | 4,5128 | 4,5558 | 4,5135 |
| 661,7           | 6,4657±0,1410 | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 5,2138±0,1142 | 5,1078 | 5,1206 | 5,1075 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197 | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 6,8171±0,1581 | 6,7822 | 6,7859 | 6,7903 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351 | 9,1862 | 9,1530 | 9,1756 | 6,9182±0,1749 | 7,0772 | 7,0578 | 7,0836 |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233 | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 7,2932±0,1644 | 7,2395 | 7,2282 | 7,2417 |
| Enerji<br>(keV) | B50B5         |        |        |        | B50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4071±0,0195 | 0,4013 | 0,4325 | 0,4009 | 0,4432±0,0153 | 0,4297 | 0,4636 | 0,4293 |
| 81,0            | 0,8355±0,0256 | 0,8171 | 0,892  | 0,8166 | 0,9142±0,0240 | 0,8714 | 0,9508 | 0,8709 |
| 276,4           | 3,6136±0,1803 | 3,6482 | 3,7952 | 3,6495 | 3,7863±0,2068 | 3,8171 | 3,9652 | 3,8213 |
| 302,9           | 3,6389±0,1196 | 3,8441 | 3,9765 | 3,8458 | 4,1215±0,1314 | 4,0229 | 4,1574 | 4,0228 |
| 356,0           | 4,2346±0,0973 | 4,1891 | 4,3037 | 4,1949 | 4,1815±0,0948 | 4,3811 | 4,4950 | 4,3824 |
| 383,9           | 4,3669±0,2187 | 4,3544 | 4,4514 | 4,3569 | 4,6047±0,2399 | 4,5512 | 4,6520 | 4,5574 |
| 511,0           | 5,1911±0,1370 | 5,0057 | 5,0538 | 5,0051 | 5,3474±0,1371 | 5,2283 | 5,2721 | 5,2282 |
| 661,7           | 5,8267±0,1284 | 5,6632 | 5,6747 | 5,6668 | 5,6184±0,1234 | 5,9132 | 5,9434 | 5,9113 |
| 1173,2          | 7,6191±0,1779 | 7,5186 | 7,5102 | 7,5258 | 7,6412±0,1772 | 7,8470 | 7,8420 | 7,8544 |
| 1274,5          | 8,0119±0,0202 | 7,8413 | 7,8274 | 7,8573 | 8,2326±0,2063 | 8,1855 | 8,173  | 8,2028 |
| 1332,5          | 8,3513±0,1886 | 8,0229 | 8,0087 | 8,0285 | 8,6830±0,1960 | 8,3738 | 8,3636 | 8,3847 |
| Enerji<br>(keV) | B50B15        |        |        |        | B50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,4642±0,0159 | 0,4530 | 0,4885 | 0,5173 | 0,4699±0,0187 | 0,4921 | 0,5309 | 0,4915 |
| 81,0            | 0,9658±0,0256 | 0,9146 | 0,9968 | 1,0184 | 0,9630±0,0243 | 0,9892 | 1,0787 | 0,9887 |
| 276,4           | 4,0468±0,2198 | 3,9328 | 4,0845 | 3,9733 | 4,2057±0,2240 | 4,1810 | 4,3386 | 4,1831 |
| 302,9           | 4,2234±0,1319 | 4,1419 | 4,2791 | 4,1738 | 4,6430±0,1459 | 4,4001 | 4,5425 | 4,4068 |
| 356,0           | 4,3164±0,0985 | 4,5206 | 4,6239 | 4,5251 | 4,7383±0,1069 | 4,8084 | 4,9018 | 4,7922 |
| 383,9           | 4,6324±0,2608 | 4,6832 | 4,7871 | 4,7006 | 4,8645±0,2508 | 4,9718 | 5,0759 | 4,9712 |
| 511,0           | 5,1505±0,1384 | 5,3766 | 5,4242 | 5,3730 | 5,5371±0,1415 | 5,7043 | 5,7478 | 5,7086 |
| 661,7           | 6,1361±0,1344 | 6,0789 | 6,0965 | 6,0642 | 6,1290±0,1343 | 6,4481 | 6,4563 | 6,4573 |
| 1173,2          | 8,0145±0,1853 | 8,0644 | 8,0453 | 8,0319 | 8,7213±0,2016 | 8,5515 | 8,5512 | 8,5657 |
| 1274,5          | 8,7864±0,2214 | 8,4126 | 8,3972 | 8,3841 | 8,6359±0,2159 | 8,9195 | 8,9017 | 8,9318 |
| 1332,5          | 8,2587±0,1863 | 8,6063 | 8,5905 | 8,5764 | 9,6426±0,2172 | 9,1267 | 9,1130 | 9,1361 |

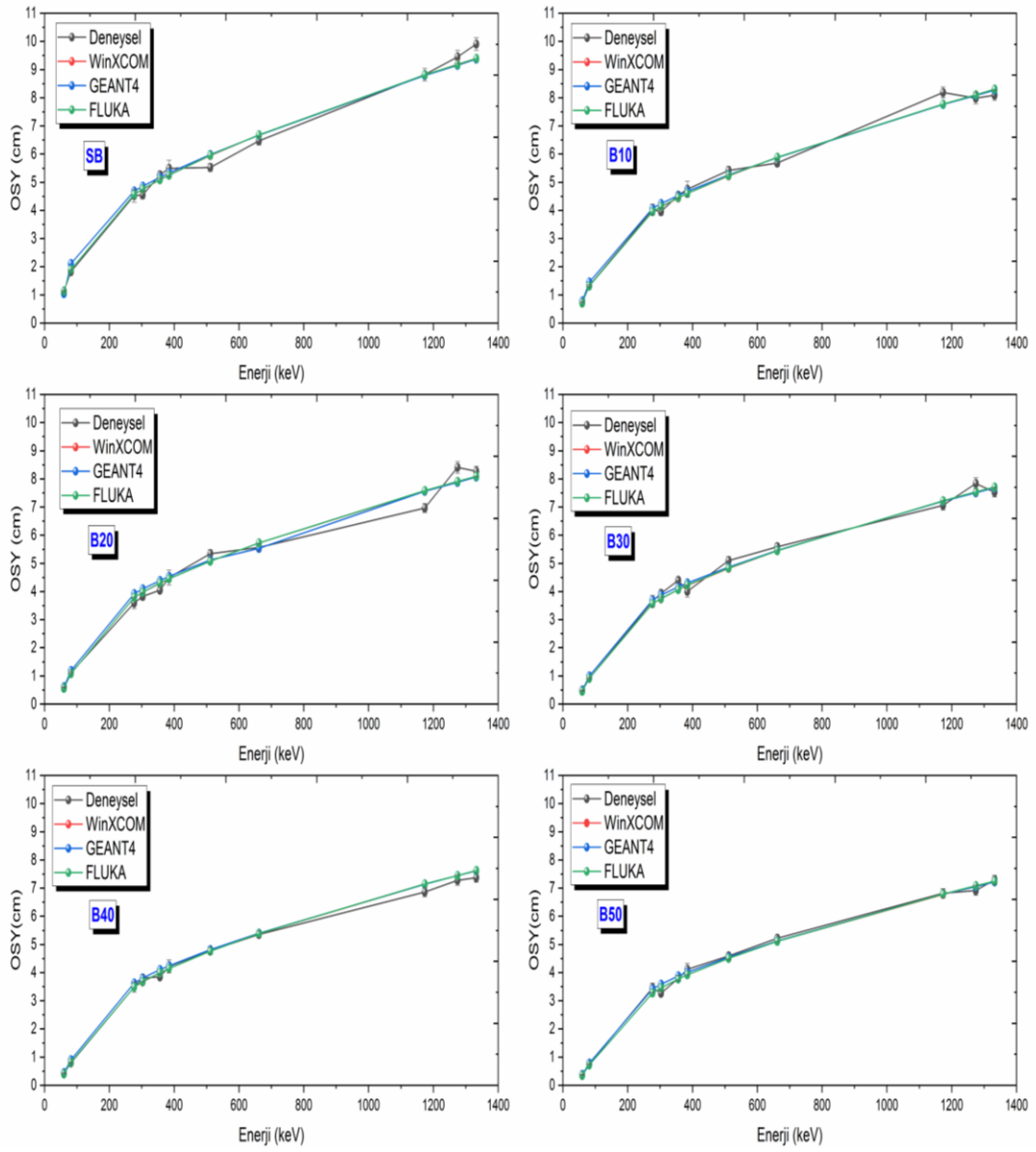
Tablo 4. 29. %50 pirinç farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

| Enerji<br>(keV) | SB            |        |        |        | P50           |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253 | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 0,4934±0,0129 | 0,4671 | 0,5101 | 0,4663 |
| 81,0            | 1,8224±0,0413 | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 0,9521±0,0245 | 0,9259 | 1,0220 | 0,9256 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264 | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 3,4804±0,1612 | 3,5028 | 3,6411 | 3,5033 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345 | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 3,7805±0,1198 | 3,6740 | 3,7959 | 3,6737 |
| 356,0           | 5,2641±0,1210 | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 4,1616±0,0946 | 3,9801 | 4,0824 | 3,9812 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899 | 5,2619 | 5,3350 | 5,2557 | 4,3826±0,2869 | 4,1264 | 4,2089 | 4,129  |
| 511,0           | 5,5242±0,1442 | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 4,9699±0,1319 | 4,7148 | 4,7613 | 4,7203 |
| 661,7           | 6,4657±0,1410 | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 5,4937±0,1199 | 5,3189 | 5,3338 | 5,3199 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197 | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 7,1015±0,1658 | 7,0403 | 7,0428 | 7,0457 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351 | 9,1862 | 9,153  | 9,1756 | 7,3375±0,1850 | 7,3454 | 7,3352 | 7,3644 |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233 | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 7,0715±0,1577 | 7,5135 | 7,5127 | 7,5116 |
| Enerji<br>(keV) | P50B5         |        |        |        | P50B10        |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,5133±0,0153 | 0,5034 | 0,5503 | 0,5919 | 0,5218±0,0165 | 0,5432 | 0,5933 | 0,5487 |
| 81,0            | 0,9615±0,0260 | 0,9939 | 1,0959 | 1,1292 | 1,0829±0,0273 | 1,0658 | 1,1760 | 1,0778 |
| 276,4           | 3,8643±0,2079 | 3,6816 | 3,8243 | 3,7688 | 4,0978±0,2216 | 3,8924 | 4,0368 | 3,9343 |
| 302,9           | 4,1525±0,1414 | 3,8843 | 3,9961 | 3,9443 | 4,0105±0,1323 | 4,0778 | 4,2041 | 4,1302 |
| 356,0           | 4,4628±0,1007 | 4,1920 | 4,2864 | 4,2595 | 4,2137±0,0942 | 4,4132 | 4,5190 | 4,4702 |
| 383,9           | 4,7203±0,1389 | 4,3424 | 4,4274 | 4,4085 | 4,6135±0,2502 | 4,5737 | 4,6662 | 4,6339 |
| 511,0           | 5,3394±0,2717 | 4,9577 | 5,0016 | 5,0181 | 4,9705±0,1306 | 5,2210 | 5,2573 | 5,2923 |
| 661,7           | 5,8921±0,1290 | 5,5930 | 5,5990 | 5,6551 | 5,5958±0,1221 | 5,8870 | 5,8976 | 5,9635 |
| 1173,2          | 8,4072±0,1942 | 7,4019 | 7,3954 | 7,4821 | 7,5625±0,1751 | 7,7890 | 7,7774 | 7,8852 |
| 1274,5          | 8,0148±0,2005 | 7,7120 | 7,6908 | 7,7941 | 8,3177±0,2086 | 8,1243 | 8,1047 | 8,2282 |
| 1332,5          | 8,1720±0,1837 | 7,8990 | 7,8802 | 7,9777 | 8,6042±0,1926 | 8,3109 | 8,2954 | 8,4216 |
| Enerji<br>(keV) | P50B15        |        |        |        | P50B20        |        |        |        |
|                 | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneyssel     | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,5809±0,0148 | 0,5642 | 0,6166 | 0,5633 | 0,6279±0,0150 | 0,6076 | 0,6481 | 0,5931 |
| 81,0            | 1,1341±0,0289 | 1,1015 | 1,2138 | 1,1009 | 1,1440±0,0343 | 1,1745 | 1,2695 | 1,1534 |
| 276,4           | 4,1292±0,1903 | 3,9552 | 4,0989 | 3,9584 | 4,0896±0,2231 | 4,0803 | 4,2214 | 4,0781 |
| 302,9           | 4,2870±0,1370 | 4,1440 | 4,2743 | 4,1478 | 4,1924±0,1347 | 4,268  | 4,3987 | 4,2765 |
| 356,0           | 4,3398±0,0969 | 4,4815 | 4,5892 | 4,484  | 4,4403±0,0954 | 4,6162 | 4,7212 | 4,6182 |
| 383,9           | 4,7355±0,2485 | 4,6438 | 4,7370 | 4,6449 | 4,6765±0,2681 | 4,7793 | 4,8730 | 4,7881 |
| 511,0           | 5,4478±0,1417 | 5,2986 | 5,3452 | 5,3008 | 5,6196±0,1481 | 5,4484 | 5,4970 | 5,4561 |
| 661,7           | 6,2215±0,1381 | 5,9733 | 5,9798 | 5,9792 | 5,9951±0,1308 | 6,1391 | 6,1581 | 6,1531 |
| 1173,2          | 7,6376±0,1776 | 7,9020 | 7,8916 | 7,9038 | 8,2708±0,1949 | 8,1178 | 8,1162 | 8,1464 |
| 1274,5          | 8,0836±0,2041 | 8,2426 | 8,2210 | 8,2529 | 8,0473±0,2027 | 8,4674 | 8,4515 | 8,4785 |
| 1332,5          | 8,7484±0,1957 | 8,4305 | 8,4206 | 8,4392 | 8,8990±0,1984 | 8,6619 | 8,6691 | 8,677  |

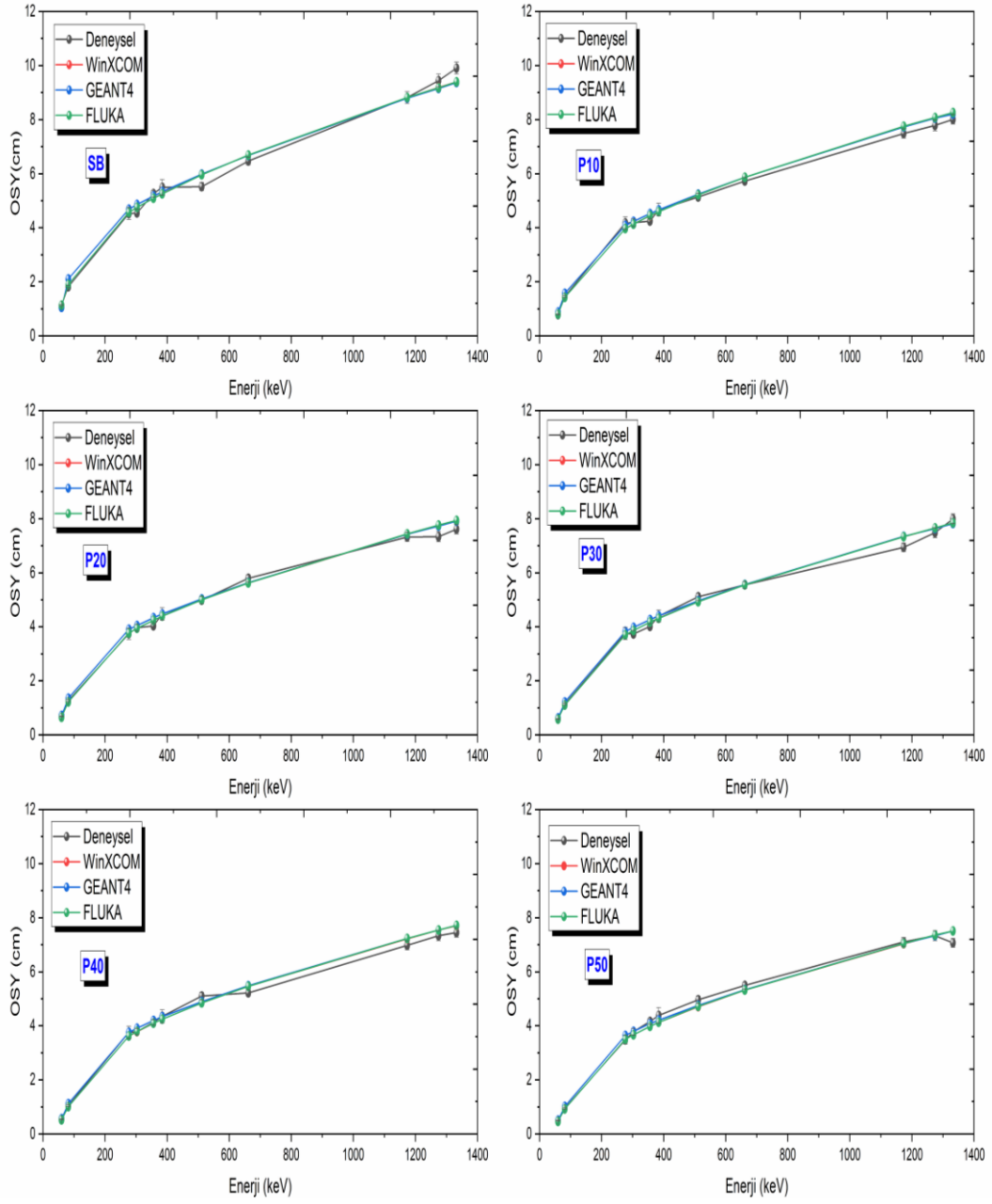


Tablo 4. 30. %50 paslanmaz çelik farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA ile belirlenen OSY değerleri (cm)

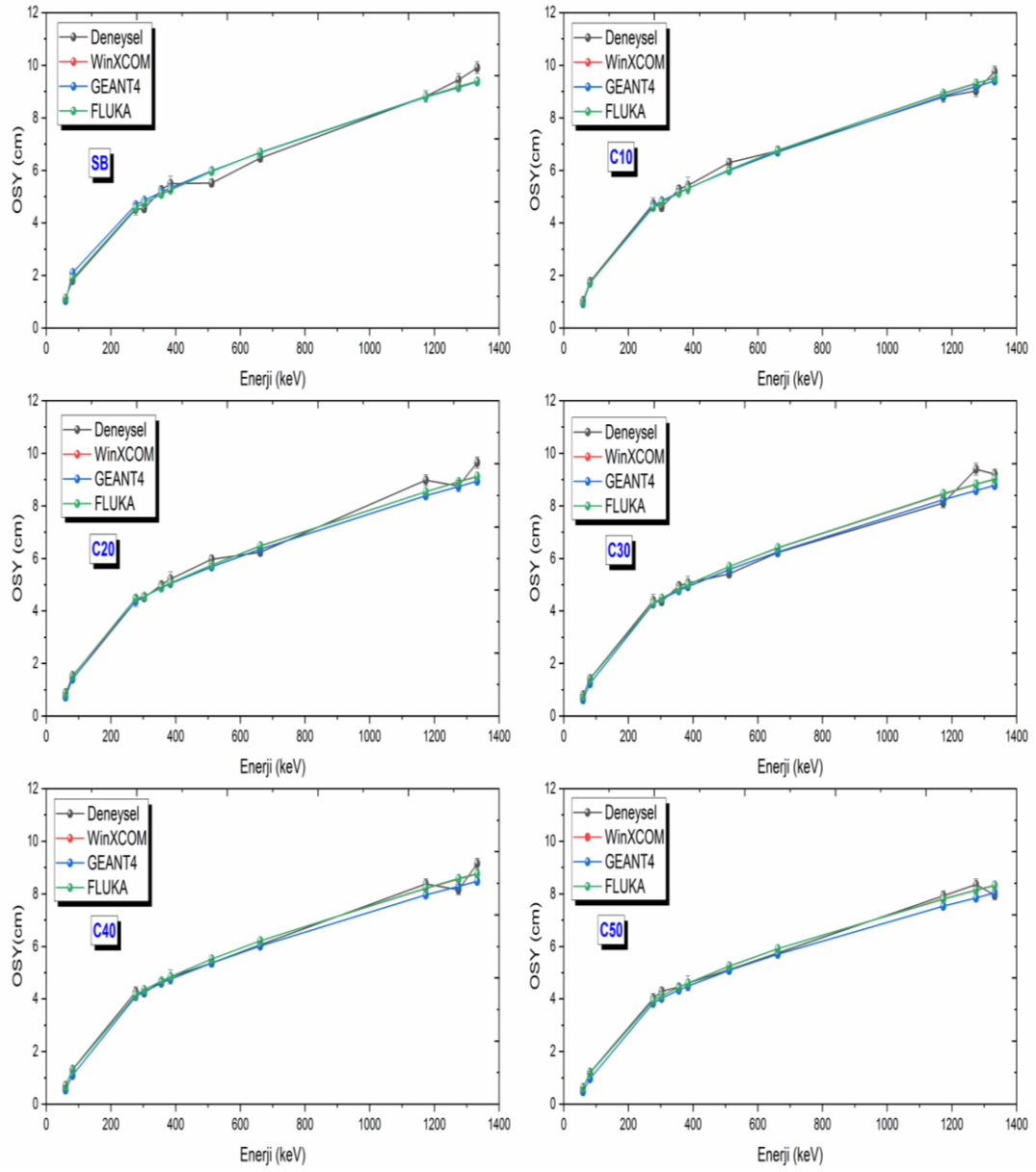
| Enerji<br>(keV) | SB             |        |        |        | C50           |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|                 | Deneysel       | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 1,1377±0,0253  | 1,1320 | 1,0522 | 1,1314 | 0,6297±0,0172 | 0,6135 | 0,4774 | 0,6128 |
| 81,0            | 1,8224±0,0413  | 1,8969 | 2,1104 | 1,8966 | 1,2049±0,0301 | 1,1754 | 0,9763 | 1,1746 |
| 276,4           | 4,5259±0,2264  | 4,5720 | 4,6885 | 4,5734 | 4,0137±0,1828 | 3,9383 | 3,8473 | 3,9369 |
| 302,9           | 4,5497±0,1345  | 4,7570 | 4,8622 | 4,7594 | 4,2969±0,1334 | 4,1201 | 4,0279 | 4,1216 |
| 356,0           | 5,2641±0,1210  | 5,0945 | 5,1747 | 5,0904 | 4,4607±0,1007 | 4,4475 | 4,3406 | 4,4469 |
| 383,9           | 5,4936±0,2899  | 5,2619 | 5,3350 | 5,2557 | 4,6000±0,2797 | 4,6051 | 4,4893 | 4,6013 |
| 511,0           | 5,5242±0,1442  | 5,9538 | 5,9774 | 5,9635 | 5,1093±0,1325 | 5,2453 | 5,0872 | 5,248  |
| 661,7           | 6,4657±0,1410  | 6,6842 | 6,6769 | 6,6874 | 5,7558±0,1258 | 5,9081 | 5,7040 | 5,9119 |
| 1173,2          | 8,8202±0,2197  | 8,8075 | 8,7939 | 8,8173 | 7,9299±0,1844 | 7,8087 | 7,5373 | 7,8051 |
| 1274,5          | 9,4466±0,2351  | 9,1862 | 9,1530 | 9,1756 | 8,3567±0,2089 | 8,1469 | 7,8505 | 8,1358 |
| 1332,5          | 9,9111±0,2233  | 9,3982 | 9,3735 | 9,4016 | 7,9507±0,1774 | 8,3334 | 8,0421 | 8,3257 |
| Enerji<br>(keV) | C50B5          |        |        |        | C50B10        |        |        |        |
|                 | Deneysel       | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,6251±0,01062 | 0,6093 | 0,4741 | 0,6086 | 0,6833±0,0158 | 0,6483 | 0,506  | 0,6485 |
| 81,0            | 1,1941±0,0297  | 1,1605 | 0,9659 | 1,1594 | 1,2669±0,0315 | 1,2285 | 1,0262 | 1,2276 |
| 276,4           | 3,7705±0,1846  | 3,8231 | 3,7448 | 3,8254 | 3,8517±0,1767 | 3,9843 | 3,9039 | 3,9856 |
| 302,9           | 3,9404±0,1370  | 3,9988 | 3,9139 | 3,9975 | 3,9861±0,1219 | 4,1641 | 4,0781 | 4,1673 |
| 356,0           | 4,3782±0,0989  | 4,3161 | 4,2105 | 4,315  | 4,2830±0,0962 | 4,4953 | 4,3897 | 4,4945 |
| 383,9           | 4,5854±0,2511  | 4,4668 | 4,3540 | 4,4657 | 4,6020±0,2385 | 4,6506 | 4,541  | 4,6532 |
| 511,0           | 5,2445±0,1373  | 5,0855 | 4,9299 | 5,0892 | 5,6018±0,1457 | 5,2935 | 5,1385 | 5,2951 |
| 661,7           | 6,0271±0,1312  | 5,7268 | 5,5333 | 5,7276 | 6,0935±0,1332 | 5,9597 | 5,7639 | 5,9658 |
| 1173,2          | 7,2950±0,1696  | 7,5690 | 7,3091 | 7,5793 | 8,1420±0,1896 | 7,8743 | 7,6170 | 7,8862 |
| 1274,5          | 8,0555±0,2024  | 7,8945 | 7,6116 | 7,9112 | 8,4391±0,2106 | 8,2133 | 7,9312 | 8,2218 |
| 1332,5          | 8,2566±0,1846  | 8,0747 | 7,7942 | 8,0843 | 8,0633±0,1809 | 8,4009 | 8,1195 | 8,4005 |
| Enerji<br>(keV) | C50B15         |        |        |        | C50B20        |        |        |        |
|                 | Deneysel       | Teorik | GEANT4 | FLUKA  | Deneysel      | Teorik | GEANT4 | FLUKA  |
| 59,5            | 0,7111±0,0165  | 0,6880 | 0,5374 | 0,6866 | 0,7782±0,0178 | 0,7402 | 0,5784 | 0,7372 |
| 81,0            | 1,3227±0,0328  | 1,2960 | 1,0839 | 1,2937 | 1,4347±0,0403 | 1,3862 | 1,1608 | 1,382  |
| 276,4           | 3,9716±0,2157  | 4,1340 | 4,0527 | 4,1375 | 4,4392±0,2180 | 4,3515 | 4,2701 | 4,353  |
| 302,9           | 4,3632±0,1362  | 4,3210 | 4,2381 | 4,3254 | 4,3563±0,1454 | 4,5489 | 4,4621 | 4,5528 |
| 356,0           | 4,5124±0,1041  | 4,6610 | 4,5553 | 4,6590 | 4,6984±0,1059 | 4,9030 | 4,7958 | 4,9035 |
| 383,9           | 4,7692±0,2552  | 4,8214 | 4,7106 | 4,8223 | 5,1023±0,2582 | 5,0710 | 4,9605 | 5,0725 |
| 511,0           | 5,5580±0,1462  | 5,4855 | 5,3244 | 5,4896 | 5,5452±0,1437 | 5,7675 | 5,6169 | 5,7685 |
| 661,7           | 6,4706±0,1414  | 6,1753 | 5,9701 | 6,1827 | 6,5395±0,1425 | 6,4907 | 6,2887 | 6,4948 |
| 1173,2          | 8,4767±0,1970  | 8,1570 | 7,8898 | 8,1582 | 8,5715±0,1999 | 8,5738 | 8,3007 | 8,5852 |
| 1274,5          | 8,6329±0,2159  | 8,5085 | 8,2244 | 8,5106 | 9,3975±0,2347 | 8,9421 | 8,6475 | 8,949  |
| 1332,5          | 9,0725±0,2034  | 8,7031 | 8,4221 | 8,7117 | 8,8482±0,1985 | 9,1469 | 8,8596 | 9,159  |



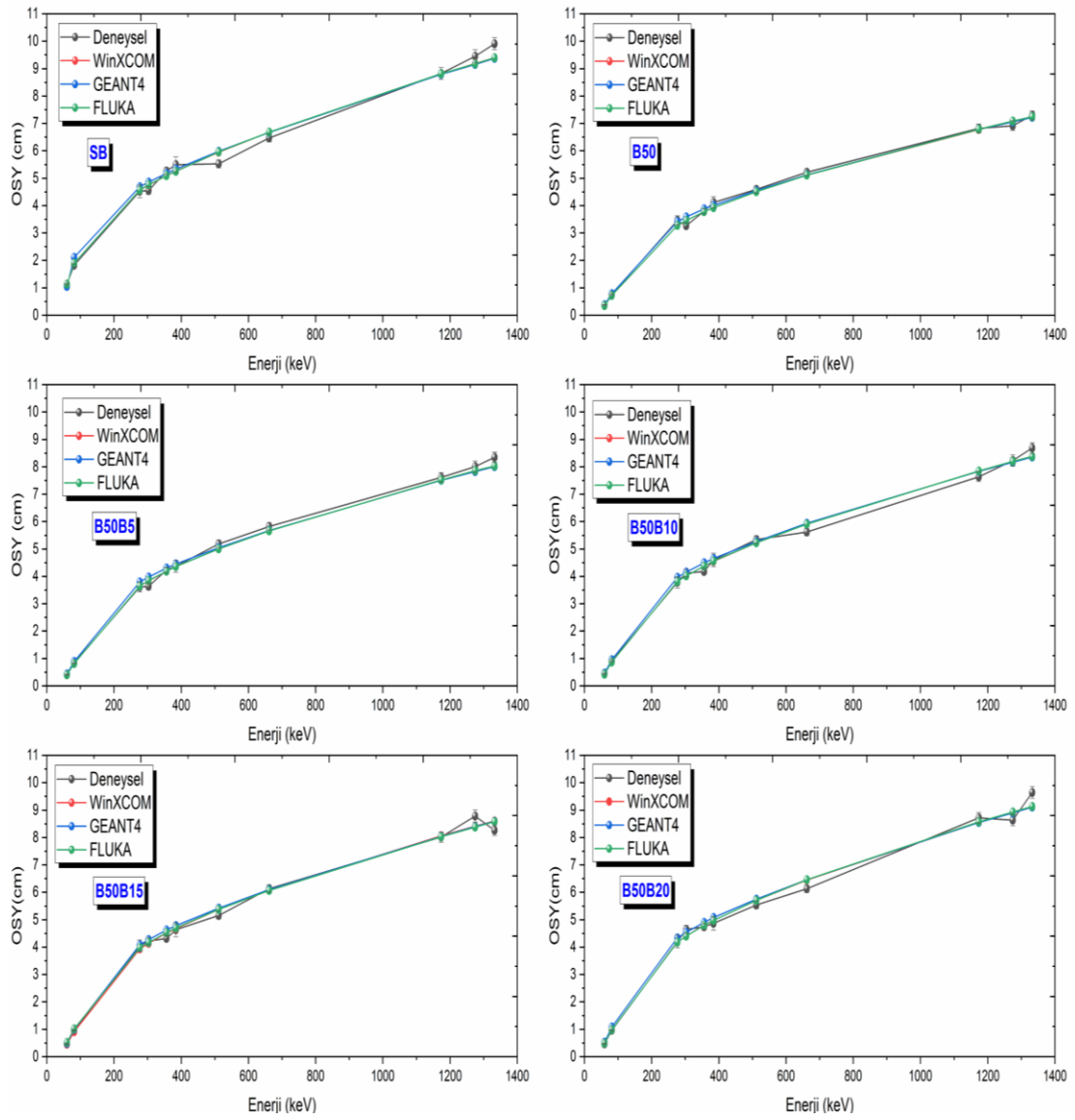
Şekil 4.25. Bronz katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



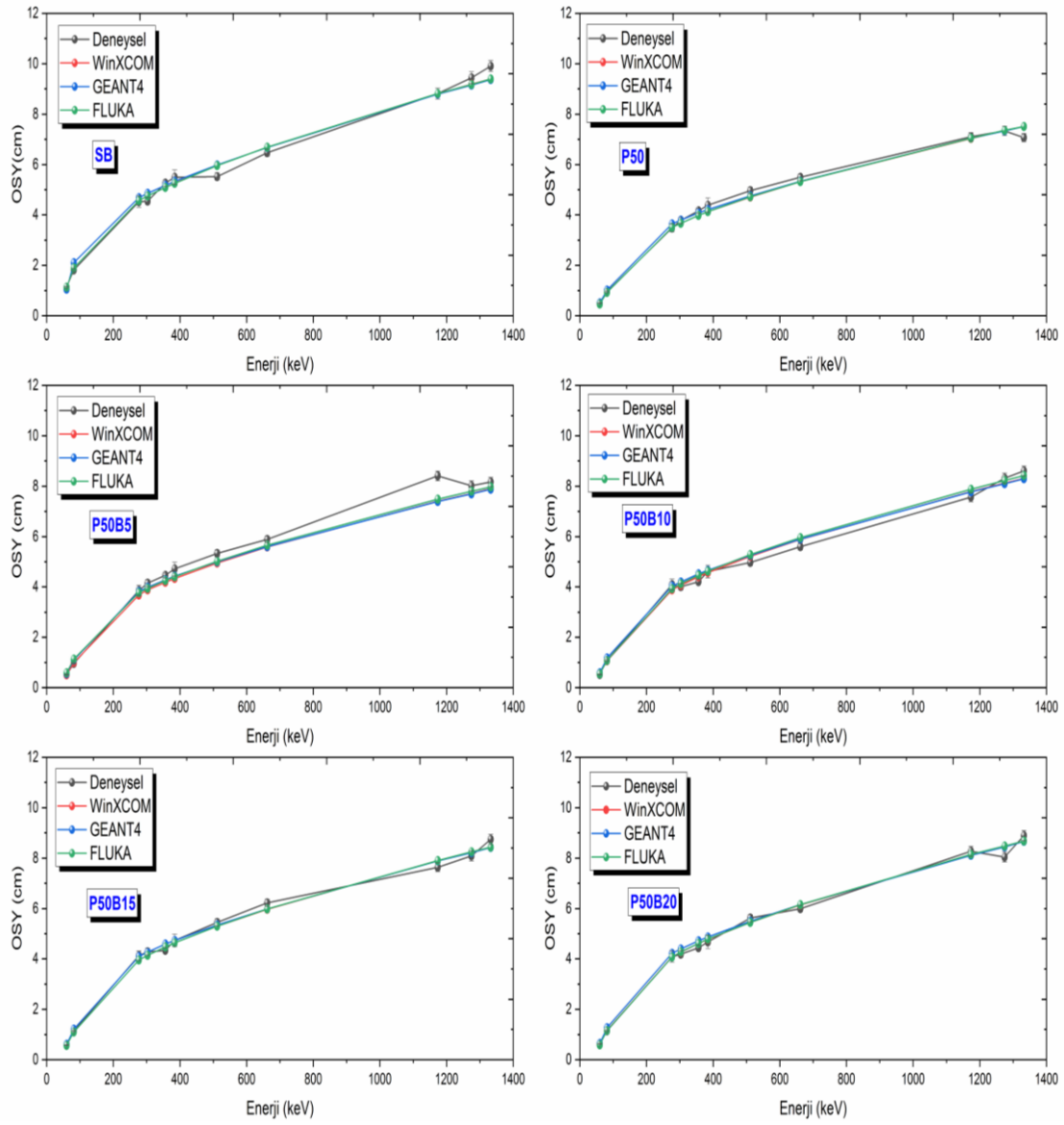
Şekil 4.26. Pirinç katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



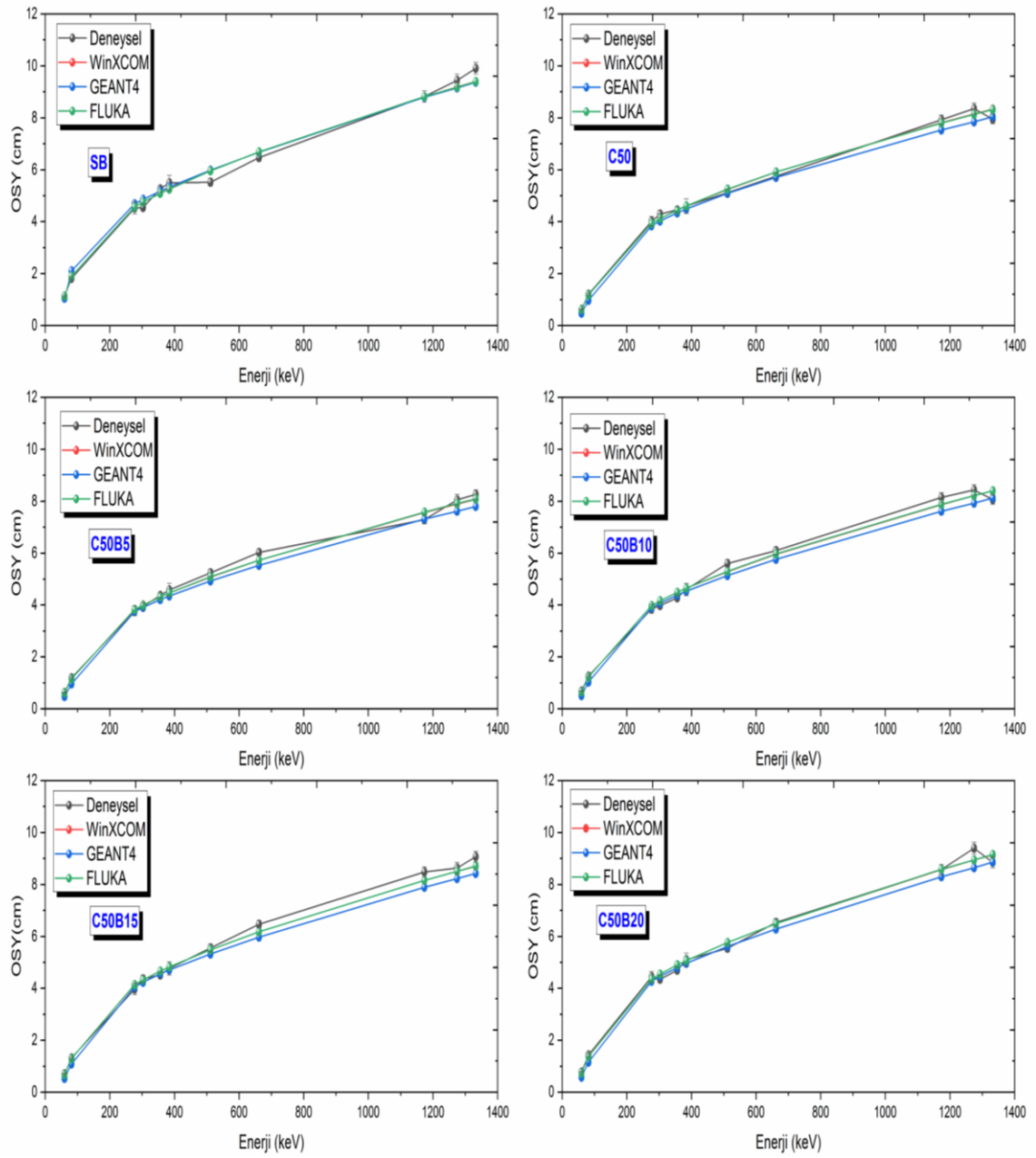
Şekil 4.27. Paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.28. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılanmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.29. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılandırılmış beton numunelerin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.30. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılandırılmış beton numunelerinin ortalama serbest yol değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği

#### 4.4. Etkin Atom Numarası Parametresine Ait Araştırma Bulguları

Çalışılan bir malzeme, içerisinde iki veya daha fazla element ihtiva ediyorsa malzemenin atom numarası ifadesi yerine etkin atom numarası terimi kullanılmaktadır. Kütle azaltma katsayıları yardımı ile numunenin atomik (2.26) ve elektronik (2.27) tesir kesitleri belirlenmiştir. Atomik ve elektronik tesir kesitinin belirlenmesi ile numunelerin etkin atom numaraları, eşitlik (2.28) kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir. Elde edilen  $Z_{\text{etk}}$  değerleri teorik ve simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya  $B_4C$  ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası Tablo 2.1’de verilen on bir farklı foton enerjisinde belirlenmiştir.

Üretilen beton numunelerin  $Z_{\text{etk}}$  değerleri Tablo 4.30-4.36’da ve elde edilen veriler yardımı ile çizilen grafiklerle Şekil 4.30-4.36’da sunulmuştur.



Tablo 4. 31. Bronz katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı  $Z_{etk}$  değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | B10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 18,9367±0,4195 | 19,5318 | 19,4980 | 19,6501 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 17,3265±0,4080 | 17,4737 | 17,0695 | 17,4537 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 13,1715±0,4262 | 13,4336 | 13,3426 | 13,4293 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 13,9500±0,4351 | 13,3476 | 13,2957 | 13,3454 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 13,0197±0,2915 | 13,3010 | 13,2431 | 13,2888 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 12,8404±0,7463 | 13,2624 | 13,2109 | 13,2578 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 12,7397±0,3294 | 13,2063 | 13,1887 | 13,1913 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 14,0928±0,3084 | 13,6055 | 13,1483 | 13,5841 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 12,4619±0,2908 | 13,1440 | 13,1253 | 13,1403 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 13,3371±0,3358 | 13,1384 | 13,1347 | 13,1501 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 13,4523±0,3048 | 13,1294 | 13,1501 | 13,1281 |
| Enerji<br>(keV) | B20            |         |         |         | B30            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 20,8536±0,4853 | 22,0275 | 21,9193 | 22,2222 | 23,1528±0,6356 | 23,8332 | 23,6613 | 24,0943 |
| 81,0            | 19,0493±0,4258 | 19,6373 | 19,0403 | 19,6390 | 21,2649±0,5497 | 21,3264 | 20,5695 | 21,3307 |
| 276,4           | 14,9790±0,6237 | 14,1935 | 14,0899 | 14,1787 | 14,5370±0,8157 | 14,8932 | 14,7447 | 14,8695 |
| 302,9           | 14,6022±0,4725 | 14,0522 | 14,0018 | 14,0579 | 14,0154±0,4580 | 14,7005 | 14,6634 | 14,6778 |
| 356,0           | 14,8441±0,3384 | 13,9950 | 13,9053 | 13,9872 | 13,5427±0,3194 | 14,6381 | 14,5360 | 14,6198 |
| 383,9           | 13,8092±0,8102 | 13,9416 | 13,8621 | 13,9441 | 15,3394±0,8111 | 14,5745 | 14,4813 | 14,5545 |
| 511,0           | 13,1582±0,3329 | 13,8507 | 13,8094 | 13,8442 | 13,6768±0,3497 | 14,4559 | 14,4126 | 14,4445 |
| 661,7           | 14,6468±0,3220 | 14,2397 | 14,2455 | 14,2401 | 14,4596±0,3169 | 14,8310 | 14,3548 | 14,8171 |
| 1173,2          | 14,9760±0,3467 | 13,7676 | 13,7592 | 13,7582 | 14,6651±0,3386 | 14,3332 | 14,3182 | 14,3359 |
| 1274,5          | 12,9254±0,3233 | 13,7569 | 13,7519 | 13,7527 | 13,7681±0,3460 | 14,3266 | 14,3403 | 14,3188 |
| 1332,5          | 13,4407±0,3021 | 13,7466 | 13,7624 | 13,7477 | 14,6671±0,3234 | 14,3175 | 14,3400 | 14,3399 |
| Enerji<br>(keV) | B40            |         |         |         | B50            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 23,9928±0,8903 | 25,2004 | 24,8989 | 25,4802 | 24,7944±0,3724 | 26,2715 | 25,9031 | 26,6221 |
| 81,0            | 23,2711±0,5623 | 22,6817 | 21,6963 | 22,7028 | 22,8231±0,5483 | 23,7933 | 22,7077 | 23,8393 |
| 276,4           | 15,5520±0,8047 | 15,5398 | 15,3489 | 15,5357 | 15,2961±0,7416 | 16,1390 | 15,9598 | 16,1336 |
| 302,9           | 14,7673±0,4507 | 15,2990 | 15,2210 | 15,2873 | 16,8126±0,5263 | 15,8532 | 15,8314 | 15,8518 |
| 356,0           | 15,8211±0,3587 | 15,2356 | 15,0945 | 15,2239 | 15,7002±0,3580 | 15,7921 | 15,6593 | 15,7723 |
| 383,9           | 14,9076±0,8223 | 15,1618 | 15,0519 | 15,1765 | 14,9602±0,7532 | 15,7094 | 15,5920 | 15,7085 |
| 511,0           | 14,9553±0,3965 | 15,0176 | 14,9380 | 15,0192 | 15,2886±0,4026 | 15,5428 | 15,4906 | 15,5335 |
| 661,7           | 15,4635±0,3401 | 15,3813 | 14,8720 | 15,3711 | 15,5721±0,3412 | 15,8954 | 15,4012 | 15,8926 |
| 1173,2          | 15,4824±0,3617 | 14,8700 | 14,8413 | 14,8545 | 15,2945±0,3546 | 15,3732 | 15,3398 | 15,3660 |
| 1274,5          | 15,2137±0,3857 | 14,8629 | 14,8385 | 14,8741 | 15,7186±0,3973 | 15,3656 | 15,3661 | 15,3578 |
| 1332,5          | 15,3644±0,3478 | 14,8539 | 14,8486 | 14,8577 | 15,2436±0,3435 | 15,3566 | 15,3717 | 15,3753 |

Tablo 4. 32. Piriç katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı  $Z_{etk}$  değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | P10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 18,1398±0,4095 | 18,0753 | 18,0658 | 18,1625 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 15,9753±0,3848 | 16,3999 | 16,1970 | 16,3627 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 12,6792±0,6844 | 13,3298 | 13,2531 | 13,3195 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 13,1074±0,4242 | 13,2649 | 13,2339 | 13,2716 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 13,8716±0,3108 | 13,2346 | 13,1911 | 13,2159 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 13,0060±0,6558 | 13,2021 | 13,1566 | 13,2113 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 13,3553±0,3412 | 13,1636 | 13,1502 | 13,1575 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 13,8786±0,3019 | 13,5721 | 13,1048 | 13,5649 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 13,5584±0,3143 | 13,1300 | 13,0954 | 13,1018 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 13,5891±0,3440 | 13,1208 | 13,0995 | 13,1040 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 13,5051±0,3027 | 13,1103 | 13,1743 | 13,1195 |
| Enerji<br>(keV) | P20            |         |         |         | P30            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 18,7579±0,4546 | 19,6608 | 19,6453 | 19,7911 | 20,2587±0,4717 | 20,8507 | 20,8264 | 21,0274 |
| 81,0            | 17,1626±0,4198 | 17,8053 | 17,6257 | 17,7797 | 18,2750±0,4474 | 18,9346 | 18,7687 | 18,9011 |
| 276,4           | 14,1031±0,8096 | 13,9938 | 13,8791 | 14,0012 | 14,3653±0,8654 | 14,6048 | 14,4897 | 14,5954 |
| 302,9           | 13,8283±0,4420 | 13,8931 | 13,8540 | 13,8953 | 14,9626±0,4749 | 14,4706 | 14,4465 | 14,4727 |
| 356,0           | 14,5826±0,3242 | 13,8659 | 13,7946 | 13,8645 | 15,0423±0,3370 | 14,4495 | 14,3737 | 14,4444 |
| 383,9           | 13,5845±0,6942 | 13,8269 | 13,7570 | 13,8422 | 14,1698±0,7219 | 14,4050 | 14,3308 | 14,4390 |
| 511,0           | 13,8016±0,3607 | 13,7718 | 13,7555 | 13,7657 | 13,8244±0,3612 | 14,3358 | 14,3160 | 14,3128 |
| 661,7           | 13,7530±0,3025 | 14,1747 | 13,7010 | 14,1706 | 14,7297±0,3208 | 14,7328 | 14,2386 | 14,7165 |
| 1173,2          | 13,9193±0,3229 | 13,7227 | 13,6909 | 13,7019 | 15,0853±0,3525 | 14,2735 | 14,2227 | 14,2718 |
| 1274,5          | 14,4981±0,3654 | 13,7130 | 13,7021 | 13,7018 | 14,5812±0,3658 | 14,2634 | 14,2428 | 14,2574 |
| 1332,5          | 14,2750±0,3211 | 13,7028 | 13,7161 | 13,7109 | 13,9481±0,3128 | 14,2536 | 14,2595 | 14,2398 |
| Enerji<br>(keV) | P40            |         |         |         | P50            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 20,7501±0,5634 | 21,7766 | 21,6664 | 21,9570 | 21,3176±0,5553 | 22,5177 | 22,4564 | 22,7601 |
| 81,0            | 19,1703±0,5561 | 19,8620 | 19,6595 | 19,8164 | 20,0684±0,5158 | 20,6371 | 20,5148 | 20,6053 |
| 276,4           | 14,6033±0,8636 | 15,1690 | 15,0220 | 15,1639 | 15,7920±0,7316 | 15,6914 | 15,5410 | 15,6934 |
| 302,9           | 15,0062±0,4444 | 15,0034 | 14,9599 | 15,0019 | 15,0599±0,4774 | 15,4963 | 15,4824 | 15,5020 |
| 356,0           | 14,8722±0,3371 | 14,9905 | 14,8677 | 15,0041 | 14,8177±0,3369 | 15,4935 | 15,3838 | 15,4930 |
| 383,9           | 14,5770±0,8096 | 14,9414 | 14,8205 | 14,9622 | 14,5379±0,9519 | 15,4406 | 15,3642 | 15,4490 |
| 511,0           | 14,1260±0,3709 | 14,8603 | 14,8126 | 14,8505 | 14,5615±0,3863 | 15,3492 | 15,2977 | 15,3285 |
| 661,7           | 15,9768±0,3517 | 15,2512 | 14,7489 | 15,2462 | 15,2333±0,3326 | 15,7340 | 15,2418 | 15,7282 |
| 1173,2          | 15,3090±0,3598 | 14,7867 | 14,7296 | 14,7890 | 15,1345±0,3564 | 15,2660 | 15,2246 | 15,2654 |
| 1274,5          | 15,1782±0,3823 | 14,7762 | 14,7284 | 14,7760 | 15,2715±0,3851 | 15,2551 | 15,2300 | 15,2166 |
| 1332,5          | 15,2884±0,3447 | 14,7667 | 14,7426 | 14,7794 | 16,1990±0,3613 | 15,2461 | 15,2389 | 15,2753 |

Tablo 4. 33. Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı  $Z_{etk}$  değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | C10            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 16,3474±0,3097 | 17,3082 | 20,1387 | 17,4393 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 15,4366±0,3734 | 15,8994 | 17,4935 | 15,8564 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 12,7578±0,6139 | 13,1534 | 13,3897 | 13,2409 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 13,7662±0,4685 | 13,2068 | 13,3482 | 13,2055 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 12,7901±0,2858 | 13,1682 | 13,2870 | 13,1544 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 12,8575±0,7404 | 13,1361 | 13,2579 | 13,1540 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 12,5331±0,3211 | 13,1058 | 13,2125 | 13,0909 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 13,4785±0,2927 | 13,4438 | 13,1809 | 13,4919 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 13,2611±0,3059 | 13,0686 | 13,1667 | 13,0667 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 13,4663±0,3391 | 13,0635 | 13,1956 | 13,0651 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 12,7428±0,2846 | 13,0546 | 13,1997 | 13,0741 |
| Enerji<br>(keV) | C20            |         |         |         | C30            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 17,4541±0,3847 | 18,3846 | 23,3202 | 18,5947 | 18,1824±0,4102 | 19,2151 | 25,7795 | 19,5058 |
| 81,0            | 16,6734±0,4378 | 16,9425 | 20,0169 | 16,8986 | 17,4944±0,4065 | 17,8000 | 22,0707 | 17,7640 |
| 276,4           | 13,6100±0,6721 | 13,6454 | 14,1559 | 13,4747 | 13,7796±0,4612 | 14,0896 | 14,8518 | 14,3668 |
| 302,9           | 13,9033±0,4258 | 13,7789 | 14,0741 | 13,7715 | 14,7315±0,4236 | 14,3023 | 14,7436 | 14,2961 |
| 356,0           | 13,4584±0,2998 | 13,7336 | 13,9932 | 13,7155 | 13,8936±0,3724 | 14,2523 | 14,6300 | 14,2364 |
| 383,9           | 13,3049±0,7067 | 13,6933 | 13,9437 | 13,7044 | 14,0363±0,5029 | 14,2046 | 14,5952 | 14,1974 |
| 511,0           | 13,1651±0,3420 | 13,6525 | 13,9000 | 13,6643 | 14,8574±0,3628 | 14,1550 | 14,5158 | 14,1359 |
| 661,7           | 14,4293±0,3173 | 13,9174 | 13,8441 | 14,0362 | 14,7469±0,3374 | 14,3481 | 14,4495 | 14,5269 |
| 1173,2          | 12,9383±0,2990 | 13,6056 | 13,8169 | 13,6172 | 14,6917±0,2935 | 14,1000 | 14,4274 | 14,0925 |
| 1274,5          | 13,8426±0,3460 | 13,6005 | 13,8290 | 13,5993 | 13,2241±0,3138 | 14,0948 | 14,4394 | 14,0835 |
| 1332,5          | 12,8434±0,2880 | 13,5916 | 13,8449 | 13,6007 | 13,7990±0,3760 | 14,0860 | 14,4449 | 14,0978 |
| Enerji<br>(keV) | C40            |         |         |         | C50            |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 19,3588±0,4305 | 19,8753 | 23,7038 | 20,2256 | 19,8887±0,5547 | 20,4127 | 23,2997 | 20,8260 |
| 81,0            | 18,1134±0,4102 | 18,5173 | 23,7973 | 18,4806 | 18,6578±0,4662 | 19,1263 | 21,2550 | 19,0866 |
| 276,4           | 14,0943±0,3892 | 14,4927 | 15,4818 | 14,8392 | 14,5808±0,6639 | 14,8601 | 16,0935 | 15,3019 |
| 302,9           | 15,1704±0,3467 | 14,7830 | 15,3789 | 14,7765 | 14,5997±0,4532 | 15,2261 | 15,9539 | 15,2251 |
| 356,0           | 14,8059±0,4835 | 14,7298 | 15,2256 | 14,7101 | 15,1259±0,3413 | 15,1708 | 15,7944 | 15,1530 |
| 383,9           | 14,7033±0,3342 | 14,6753 | 15,1808 | 14,6700 | 15,1272±0,9199 | 15,1102 | 15,7212 | 15,1272 |
| 511,0           | 15,0350±0,2967 | 14,6183 | 15,0928 | 14,6166 | 15,4475±0,4007 | 15,0469 | 15,5997 | 15,0433 |
| 661,7           | 15,1149±0,2420 | 14,7415 | 15,0205 | 14,9965 | 15,5018±0,3389 | 15,1021 | 15,5273 | 15,4145 |
| 1173,2          | 14,2607±0,2318 | 14,5565 | 14,9779 | 14,5608 | 14,7505±0,3431 | 14,9794 | 15,4871 | 15,0027 |
| 1274,5          | 15,2650±0,1997 | 14,5513 | 14,9893 | 14,5253 | 14,5983±0,3650 | 14,9742 | 15,4977 | 15,0027 |
| 1332,5          | 13,9207±0,2102 | 14,5426 | 14,9964 | 14,5442 | 15,6857±0,3501 | 14,9655 | 15,4946 | 15,0055 |

Tablo 4. 34. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Z<sub>etk</sub> değerleri

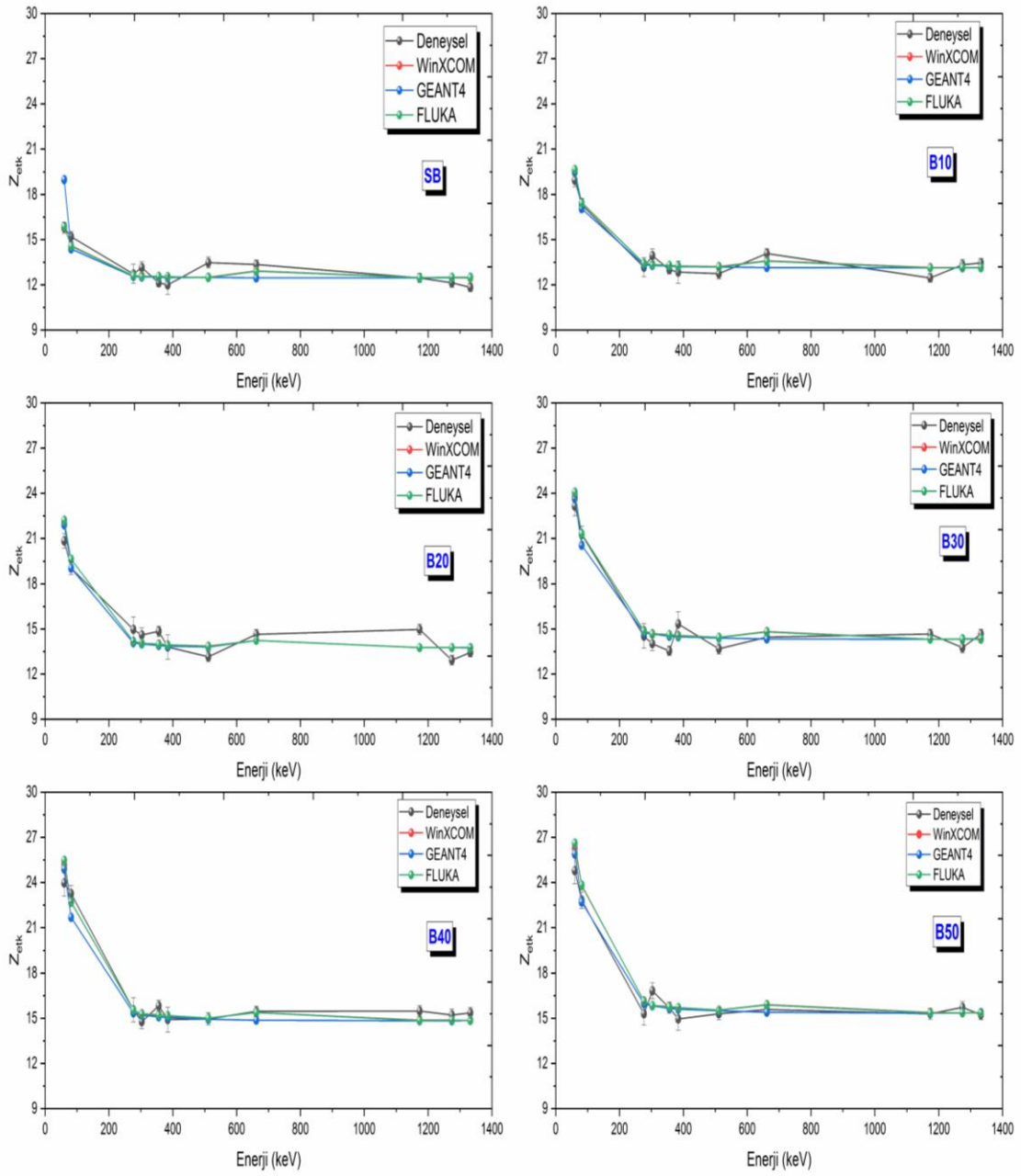
| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | B50            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 24,7944±0,3724 | 26,2715 | 25,9031 | 26,6221 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 22,8231±0,5483 | 23,7933 | 22,7077 | 23,8393 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 15,2961±0,7416 | 16,1390 | 15,9598 | 16,1336 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 16,8126±0,5263 | 15,8532 | 15,8314 | 15,8518 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 15,7002±0,3580 | 15,7921 | 15,6593 | 15,7723 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 14,9602±0,7532 | 15,7094 | 15,5920 | 15,7085 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 15,2886±0,4026 | 15,5428 | 15,4906 | 15,5335 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 15,5721±0,3412 | 15,8954 | 15,4012 | 15,8926 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 15,2945±0,3546 | 15,3732 | 15,3398 | 15,3660 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 15,7186±0,3973 | 15,3656 | 15,3661 | 15,3578 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 15,2436±0,3435 | 15,3566 | 15,3717 | 15,3753 |
| Enerji<br>(keV) | B50B5          |         |         |         | B50B10         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 25,3951±0,9421 | 25,7602 | 25,4513 | 26,1069 | 24,5131±0,8478 | 25,2826 | 24,9385 | 25,6258 |
| 81,0            | 22,5293±0,6897 | 23,0371 | 21,9824 | 23,0944 | 21,2957±0,5581 | 22,3411 | 21,3180 | 22,4170 |
| 276,4           | 15,3736±0,7669 | 15,2281 | 15,0435 | 15,2565 | 14,5832±0,7964 | 14,4654 | 14,2887 | 14,5061 |
| 302,9           | 15,8114±0,5199 | 14,9671 | 14,9265 | 14,9941 | 13,8731±0,4422 | 14,2130 | 14,1592 | 14,2692 |
| 356,0           | 14,7399±0,3386 | 14,8998 | 14,7553 | 14,9104 | 14,8108±0,3358 | 14,1360 | 14,0014 | 14,1856 |
| 383,9           | 14,7740±0,7398 | 14,8164 | 14,6989 | 14,8409 | 13,8977±0,7240 | 14,0611 | 13,9379 | 14,0975 |
| 511,0           | 14,1277±0,3728 | 14,6510 | 14,5889 | 14,6783 | 13,5915±0,3485 | 13,9012 | 13,8497 | 13,9509 |
| 661,7           | 14,5259±0,3202 | 14,9452 | 14,5183 | 14,9659 | 14,8916±0,3271 | 14,1492 | 13,7274 | 14,2092 |
| 1173,2          | 14,2937±0,3337 | 14,4847 | 14,4747 | 14,5153 | 14,1120±0,3272 | 13,7419 | 13,7236 | 13,7943 |
| 1274,5          | 14,1777±0,3581 | 14,4863 | 14,4709 | 14,4939 | 13,6624±0,3423 | 13,7409 | 13,7217 | 13,7714 |
| 1332,5          | 13,9064±0,3140 | 14,4755 | 14,4891 | 14,5205 | 13,2447±0,2990 | 13,7337 | 13,7360 | 13,7914 |
| Enerji<br>(keV) | B50B15         |         |         |         | B50B20         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 24,2103±0,8319 | 24,8100 | 24,4689 | 22,0075 | 25,5139±1,0168 | 24,3664 | 24,0036 | 24,7163 |
| 81,0            | 20,5410±0,5447 | 21,6928 | 20,7121 | 19,5510 | 21,6713±0,5467 | 21,0979 | 20,1249 | 21,1999 |
| 276,4           | 13,4195±0,7289 | 13,8085 | 13,6247 | 13,7415 | 13,1584±0,7008 | 13,2361 | 13,0560 | 13,3175 |
| 302,9           | 13,3135±0,4156 | 13,5756 | 13,5042 | 13,5448 | 12,3398±0,3878 | 13,0210 | 12,9424 | 13,0883 |
| 356,0           | 14,0909±0,3215 | 13,4542 | 13,3542 | 13,5121 | 13,0640±0,2947 | 12,8735 | 12,8101 | 13,0019 |
| 383,9           | 13,5638±0,7637 | 13,4166 | 13,2877 | 13,4391 | 13,1430±0,6775 | 12,8592 | 12,7423 | 12,9468 |
| 511,0           | 13,8439±0,3719 | 13,2619 | 13,1991 | 13,3389 | 13,0943±0,3347 | 12,7104 | 12,6595 | 12,7833 |
| 661,7           | 13,3485±0,2925 | 13,4741 | 13,1212 | 13,5813 | 13,5641±0,2972 | 12,8928 | 12,5919 | 12,9634 |
| 1173,2          | 13,1901±0,3049 | 13,1087 | 13,1121 | 13,2434 | 12,3175±0,2847 | 12,5622 | 12,5349 | 12,6350 |
| 1274,5          | 12,5500±0,3162 | 13,1076 | 13,0919 | 13,2289 | 12,9760±0,3244 | 12,5634 | 12,5495 | 12,6355 |
| 1332,5          | 13,6525±0,3080 | 13,1011 | 13,1089 | 13,2383 | 11,8833±0,2677 | 12,5551 | 12,5564 | 12,6453 |

Tablo 4. 35. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin karşılaştırmalı Z<sub>etk</sub> değerleri

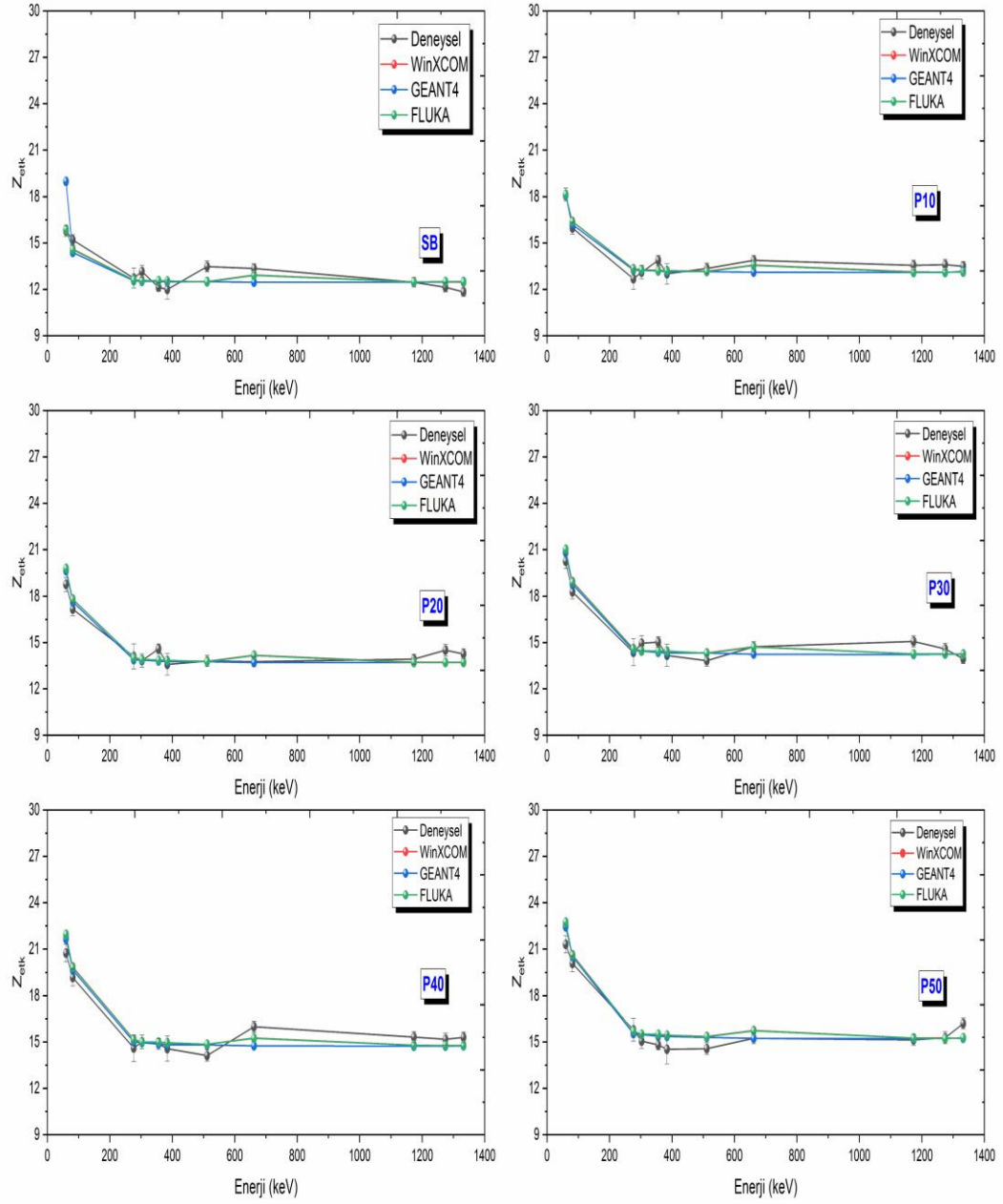
| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | P50            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 21,3176±0,5553 | 22,5177 | 22,4564 | 22,7601 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 20,0684±0,5158 | 20,6371 | 20,5148 | 20,6053 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 15,7920±0,7316 | 15,6914 | 15,5410 | 15,6934 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 15,0599±0,4774 | 15,4963 | 15,4824 | 15,5020 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 14,8177±0,3369 | 15,4935 | 15,3838 | 15,4930 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 14,5379±0,9519 | 15,4406 | 15,3642 | 15,4490 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 14,5615±0,3863 | 15,3492 | 15,2977 | 15,3285 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 15,2333±0,3326 | 15,7340 | 15,2418 | 15,7282 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 15,1345±0,3564 | 15,2660 | 15,2246 | 15,2654 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 15,2715±0,3851 | 15,2551 | 15,2300 | 15,2166 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 16,1990±0,3613 | 15,2461 | 15,2389 | 15,2753 |
| Enerji<br>(keV) | P50B5          |         |         |         | P50B10         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 20,7684±1,3774 | 21,1770 | 21,0556 | 18,1715 | 21,6232±0,6824 | 20,7698 | 20,6471 | 20,7504 |
| 81,0            | 20,2227±0,8899 | 19,5650 | 19,4127 | 17,2102 | 18,7100±0,4720 | 19,0105 | 18,8044 | 18,8065 |
| 276,4           | 14,6624±0,8185 | 15,3900 | 15,2425 | 15,0687 | 13,8736±0,7501 | 14,6054 | 14,4660 | 14,5067 |
| 302,9           | 14,1490±0,5220 | 15,1258 | 15,1569 | 14,9297 | 14,6958±0,4847 | 14,4532 | 14,4244 | 14,3258 |
| 356,0           | 14,2506±0,3486 | 15,1712 | 15,1062 | 14,9637 | 15,1199±0,3379 | 14,4362 | 14,3379 | 14,3072 |
| 383,9           | 13,9245±0,8428 | 15,1360 | 15,0660 | 14,9606 | 14,2681±0,7739 | 14,3924 | 14,3026 | 14,2765 |
| 511,0           | 13,9857±0,3733 | 15,0625 | 15,0164 | 14,9093 | 15,0337±0,3950 | 14,3126 | 14,2859 | 14,1708 |
| 661,7           | 14,6064±0,3314 | 15,3876 | 14,9844 | 15,2501 | 15,3546±0,3350 | 14,5951 | 14,2252 | 14,4641 |
| 1173,2          | 13,1834±0,3300 | 14,9740 | 14,9614 | 14,8594 | 14,6541±0,3392 | 14,2281 | 14,2225 | 14,1209 |
| 1274,5          | 14,4236±0,3909 | 14,9900 | 14,9911 | 14,8697 | 13,8971±0,3486 | 14,2279 | 14,2228 | 14,1078 |
| 1332,5          | 14,4631±0,3522 | 14,9628 | 14,9856 | 14,8723 | 13,7360±0,3075 | 14,2209 | 14,2323 | 14,1108 |
| Enerji<br>(keV) | P50B15         |         |         |         | P50B20         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 19,8031±0,5053 | 20,3859 | 20,2315 | 20,6118 | 18,9399±0,4536 | 19,5730 | 19,8810 | 20,2465 |
| 81,0            | 17,9486±0,4570 | 18,4803 | 18,2614 | 18,5136 | 18,1438±0,5440 | 17,6723 | 17,7664 | 18,0332 |
| 276,4           | 13,3727±0,6164 | 13,9611 | 13,8190 | 14,0239 | 13,3554±0,7286 | 13,3858 | 13,2564 | 13,4811 |
| 302,9           | 13,3504±0,4267 | 13,8112 | 13,7544 | 13,8725 | 13,5010±0,4338 | 13,2620 | 13,1989 | 13,3230 |
| 356,0           | 14,2395±0,3180 | 13,7895 | 13,6811 | 13,8545 | 13,7499±0,3079 | 13,2258 | 13,1271 | 13,3062 |
| 383,9           | 13,4800±0,7074 | 13,7462 | 13,6511 | 13,8299 | 13,4831±0,7730 | 13,1929 | 13,0984 | 13,2677 |
| 511,0           | 13,2921±0,3457 | 13,6662 | 13,6080 | 13,7308 | 12,7201±0,3352 | 13,1197 | 13,0555 | 13,1855 |
| 661,7           | 13,3566±0,2964 | 13,9115 | 13,5872 | 13,9735 | 13,6594±0,2980 | 13,3390 | 13,0175 | 13,3988 |
| 1173,2          | 14,0512±0,3267 | 13,5811 | 13,5717 | 13,6611 | 12,8012±0,3017 | 13,0425 | 13,0173 | 13,0921 |
| 1274,5          | 13,8479±0,3496 | 13,5808 | 13,5774 | 13,6410 | 13,7238±0,3457 | 13,0430 | 13,0288 | 13,1163 |
| 1332,5          | 13,0835±0,2927 | 13,5769 | 13,5761 | 13,6563 | 12,6901±0,2844 | 13,0376 | 13,0085 | 13,1203 |

Tablo 4. 36. %50 paslanmaz çelik alaşımı ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkıli beton numunelerin karşılaştırmalı Z<sub>etk</sub> değerleri

| Enerji<br>(keV) | SB             |         |         |         | C50            |         |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 15,7775±0,3511 | 15,8570 | 18,9874 | 15,8928 | 19,8887±0,5547 | 20,4127 | 23,2997 | 20,8260 |
| 81,0            | 15,1995±0,3443 | 14,6031 | 14,3789 | 14,5589 | 18,6578±0,4662 | 19,1263 | 21,2550 | 19,0866 |
| 276,4           | 12,7318±0,6369 | 12,6035 | 12,5606 | 12,6035 | 14,5808±0,6639 | 14,8601 | 16,0935 | 15,3019 |
| 302,9           | 13,1476±0,3888 | 12,5747 | 12,5336 | 12,5724 | 14,5997±0,4532 | 15,2261 | 15,9539 | 15,2251 |
| 356,0           | 12,1473±0,2792 | 12,5516 | 12,5180 | 12,5616 | 15,1259±0,3413 | 15,1708 | 15,7944 | 15,1530 |
| 383,9           | 11,9988±0,6332 | 12,5270 | 12,4841 | 12,5464 | 15,1272±0,9199 | 15,1102 | 15,7212 | 15,1272 |
| 511,0           | 13,4816±0,3519 | 12,5088 | 12,4997 | 12,4900 | 15,4475±0,4007 | 15,0469 | 15,5997 | 15,0433 |
| 661,7           | 13,3581±0,2913 | 12,9214 | 12,4694 | 12,9107 | 15,5018±0,3389 | 15,1021 | 15,5273 | 15,4145 |
| 1173,2          | 12,4643±0,3105 | 12,4822 | 12,4698 | 12,4777 | 14,7505±0,3431 | 14,9794 | 15,4871 | 15,0027 |
| 1274,5          | 12,1372±0,3021 | 12,4813 | 12,4884 | 12,5017 | 14,5983±0,3650 | 14,9742 | 15,4977 | 15,0027 |
| 1332,5          | 11,8257±0,2664 | 12,4710 | 12,4934 | 12,4859 | 15,6857±0,3501 | 14,9655 | 15,4946 | 15,0055 |
| Enerji<br>(keV) | C50B5          |         |         |         | C50B10         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 19,4720±0,5057 | 19,9780 | 24,6154 | 20,3816 | 18,5881±0,4307 | 19,5913 | 21,9172 | 19,9655 |
| 81,0            | 17,9639±0,4471 | 18,4849 | 22,2849 | 18,4741 | 17,3728±0,4320 | 17,9147 | 20,3865 | 17,9210 |
| 276,4           | 14,2886±0,6994 | 14,0922 | 15,1606 | 14,4921 | 13,9039±0,6380 | 13,4408 | 14,4067 | 13,8221 |
| 302,9           | 14,6136±0,5081 | 14,4002 | 15,0466 | 14,4378 | 14,3237±0,4381 | 13,7114 | 14,2988 | 13,7552 |
| 356,0           | 14,1321±0,3192 | 14,3353 | 14,9151 | 14,3501 | 14,3122±0,3214 | 13,6364 | 14,1603 | 13,6735 |
| 383,9           | 13,9141±0,7619 | 14,2836 | 14,8474 | 14,3192 | 13,7339±0,7118 | 13,5904 | 14,0903 | 13,6361 |
| 511,0           | 13,7877±0,3609 | 14,2188 | 14,7373 | 14,2414 | 12,7787±0,3323 | 13,5231 | 13,9885 | 13,5738 |
| 661,7           | 13,5511±0,2949 | 14,2615 | 14,6547 | 14,5693 | 13,2589±0,2897 | 13,5565 | 13,9193 | 13,8407 |
| 1173,2          | 14,6793±0,3413 | 14,1479 | 14,6188 | 14,1716 | 13,0119±0,3031 | 13,4543 | 13,8766 | 13,4971 |
| 1274,5          | 13,8650±0,3483 | 14,1477 | 14,6322 | 14,1539 | 13,0941±0,3268 | 13,4541 | 13,8920 | 13,4975 |
| 1332,5          | 13,8298±0,3092 | 14,1413 | 14,6346 | 14,1770 | 14,0118±0,3144 | 13,4486 | 13,8973 | 13,5217 |
| Enerji<br>(keV) | C50B15         |         |         |         | C50B20         |         |         |         |
|                 | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   | Deneyssel      | Teorik  | GEANT4  | FLUKA   |
| 59,5            | 18,5540±0,4292 | 19,1771 | 23,2522 | 19,5900 | 17,8608±0,4536 | 18,7782 | 20,6299 | 19,2220 |
| 81,0            | 17,0116±0,4214 | 17,3629 | 20,5803 | 17,4037 | 16,2808±0,5440 | 16,8502 | 17,8352 | 16,9293 |
| 276,4           | 13,4030±0,7279 | 12,8767 | 13,7542 | 13,2315 | 12,1381±0,7286 | 12,3830 | 13,1802 | 12,7277 |
| 302,9           | 12,9794±0,4051 | 13,1062 | 13,6315 | 13,1639 | 13,1348±0,4338 | 12,5787 | 13,0679 | 12,6519 |
| 356,0           | 13,4647±0,3106 | 13,0354 | 13,5143 | 13,0943 | 13,0578±0,3079 | 12,5129 | 12,9528 | 12,5794 |
| 383,9           | 13,1343±0,7029 | 12,9921 | 13,4520 | 13,0593 | 12,3956±0,7730 | 12,4720 | 12,8896 | 12,5507 |
| 511,0           | 12,7574±0,3333 | 12,9261 | 13,3654 | 12,9883 | 12,9042±0,3352 | 12,4067 | 12,7796 | 12,4897 |
| 661,7           | 12,3600±0,2702 | 12,9509 | 13,3047 | 13,2238 | 12,3349±0,2980 | 12,4277 | 12,7411 | 12,6995 |
| 1173,2          | 12,3731±0,2876 | 12,8581 | 13,2614 | 12,9348 | 12,3427±0,3017 | 12,3393 | 12,7133 | 12,4135 |
| 1274,5          | 12,6726±0,3169 | 12,8578 | 13,2620 | 12,9283 | 11,7431±0,3457 | 12,3411 | 12,7223 | 12,4181 |
| 1332,5          | 12,3296±0,2764 | 12,8528 | 13,2628 | 12,9277 | 12,7530±0,2844 | 12,3365 | 12,7168 | 12,4194 |

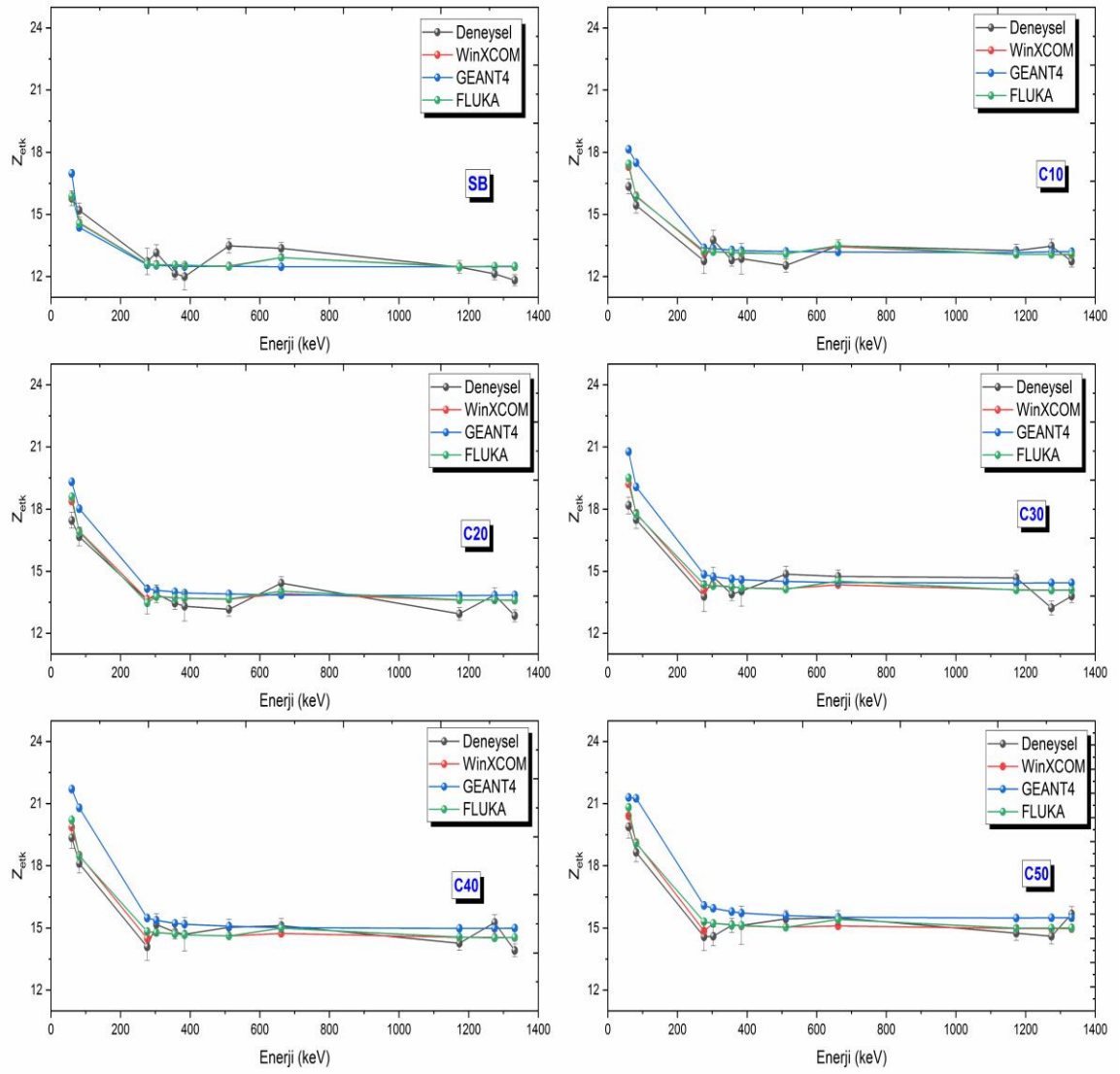


Şekil 4.31. Bronz katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği.

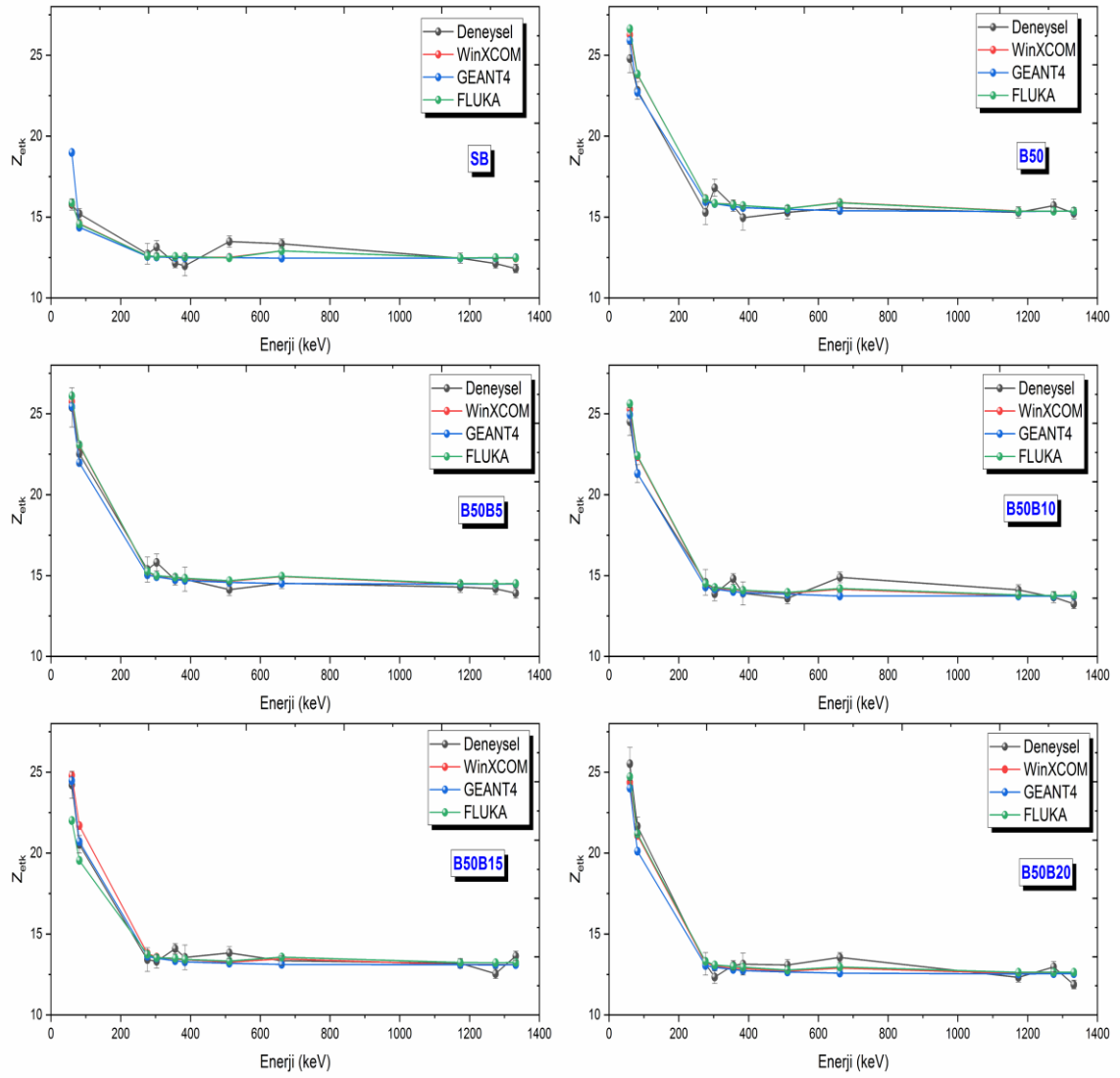


Şekil 4.32. Pirinç alaşımı ile katkılandırılmış beton numunelerin etkin atom numarası katsayısının enerjiye göre değişim grafiği

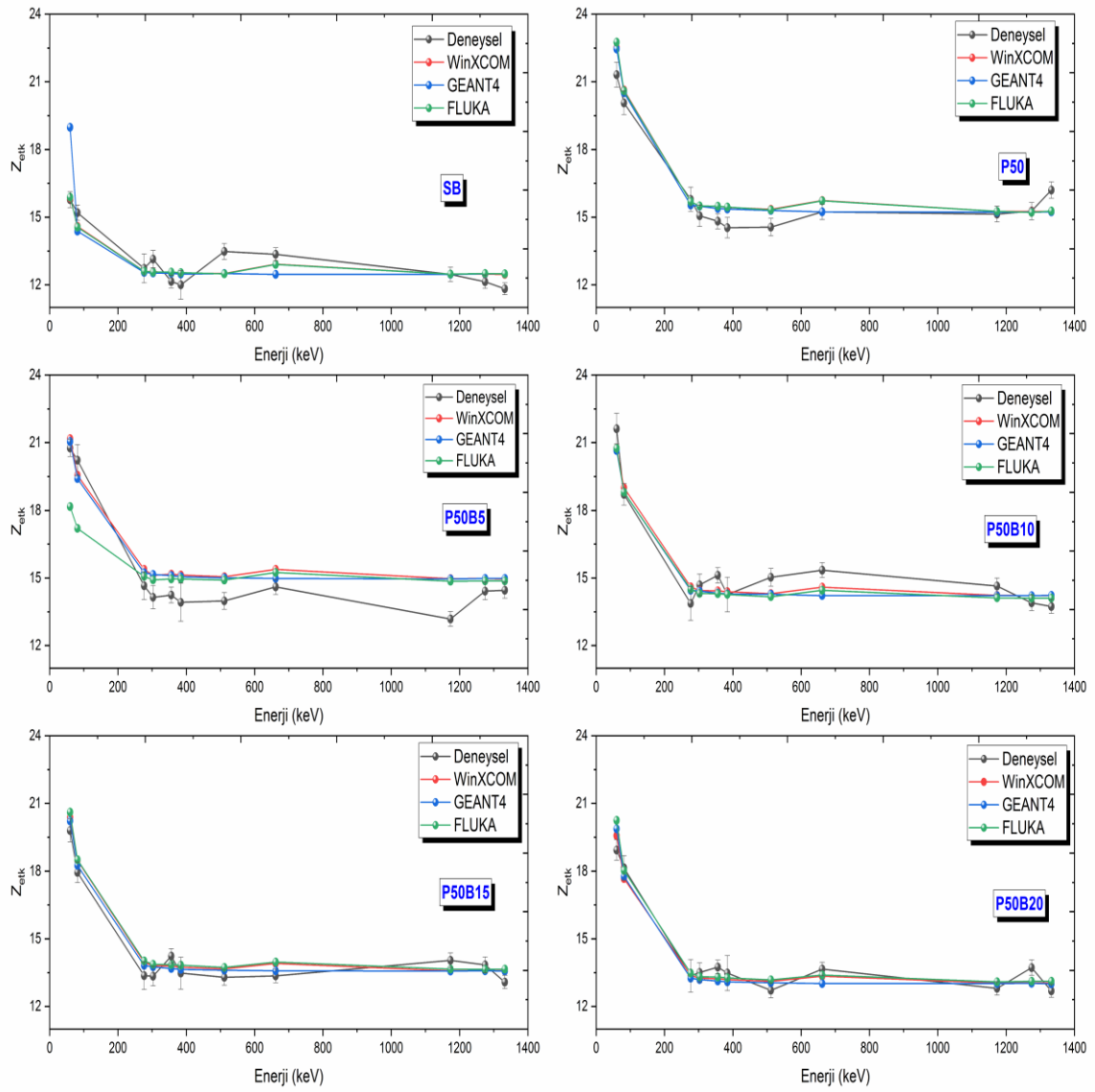




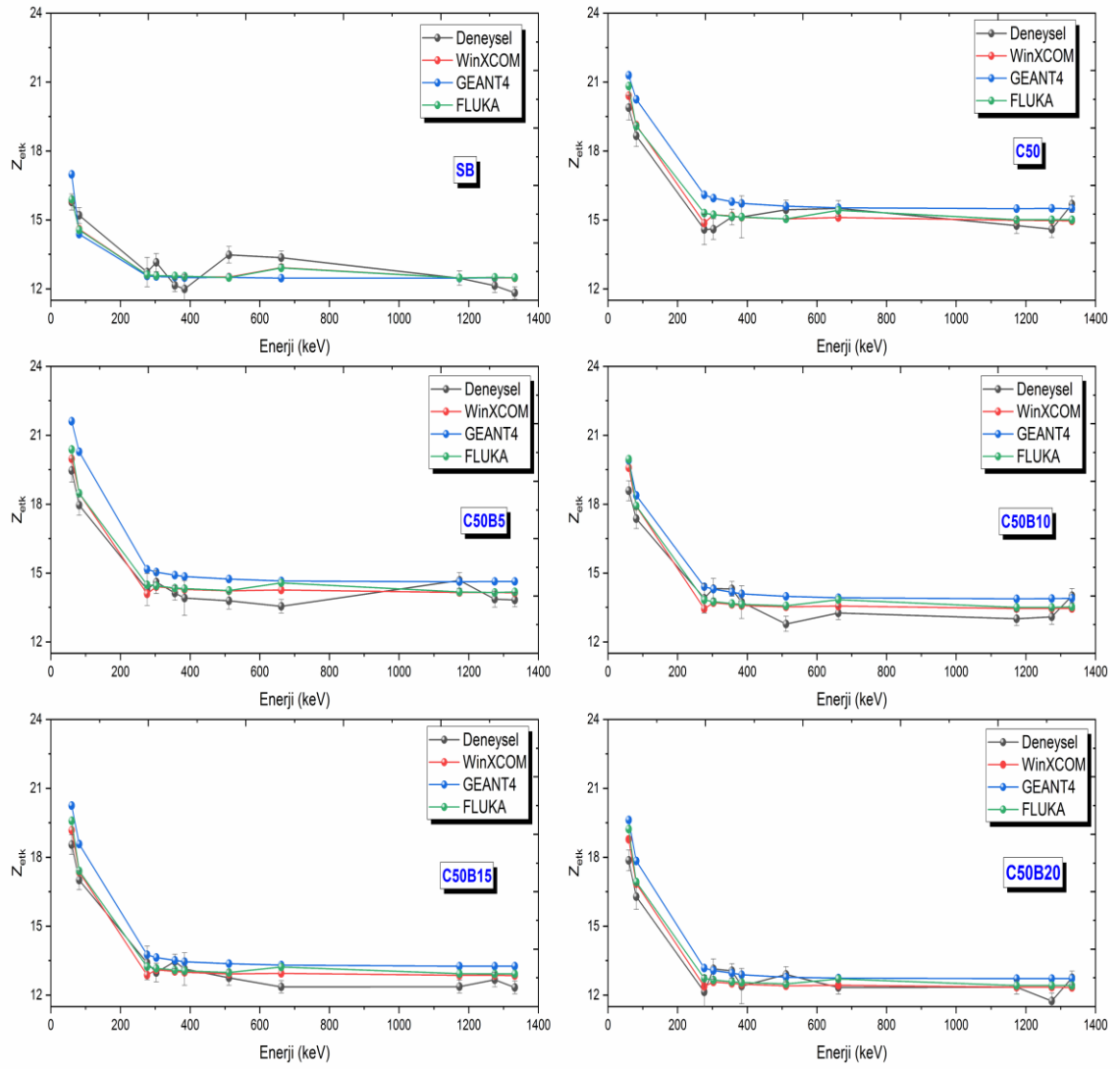
Şekil 4.33. Paslanmaz çelik alaşımı ile katkılandırılmış beton numunelerin etkin atom numarası katsayısının enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.34. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.35. % 50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği



Şekil 4.36. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda  $B_4C$  katkılanmış beton numunelerin etkin atom numarası değerlerinin enerjiye göre değişim grafiği

#### 4.5. Radyasyon Koruma Verimine Ait Araştırma Bulguları

Radyasyona zırlama kabiliyeti ölçülen bir malzemenin radyasyon şiddetini azaltma ölçüsü olarak radyasyon koruma verimi (RKV, %) parametresi kullanılabilir. Kullanılan çimento miktarının %10-20-30-40-50'si oranında bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya içeriğinde % 50 bronz, pirinç, veya paslanmaz çelik bulunan numunelere çimento miktarının % 5-10-15-20'si oranında B<sub>4</sub>C katkılanarak hazırlanan beton numunelerin radyasyon koruma verimi eşitlik (2.31) aracılığı ile belirlenmiştir.

(2.31) eşitliğine göre radyasyon kaynağından yayımlanan başlangıç radyasyon ( $I_0$ ) ve beton numuneden geçen radyasyon şiddeti ( $I$ ) aracılığı ile RKV belirlenmiştir. Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin radyasyon koruma verimleri değerleri Tablo 4.37- 4.42'de ve elde edilen sonuçlarla göre çizilen grafikler Şekil 4.43-4.48'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 37. Bronz katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%)

| Enerji<br>(keV) | SB        | B10       | B20       | B30       | B40       | B50       |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 59,5            | 63,32±0,6 | 77,81±0,7 | 83,11±0,9 | 89,61±1,6 | 94,13±2,6 | 95,30±2,8 |
| 81,0            | 46,53±0,5 | 56,83±0,7 | 61,27±0,8 | 69,13±1,3 | 78,02±1,2 | 78,12±1,4 |
| 276,4           | 22,28±0,5 | 24,10±0,5 | 25,51±0,8 | 25,48±1,1 | 28,33±0,4 | 28,10±1,3 |
| 302,9           | 22,18±0,4 | 24,53±0,6 | 24,18±0,6 | 23,93±0,8 | 27,25±0,3 | 29,53±0,8 |
| 356,0           | 19,49±0,5 | 21,71±0,4 | 22,99±0,9 | 21,70±1,0 | 25,98±0,3 | 25,97±0,6 |
| 383,9           | 18,75±0,3 | 20,86±0,4 | 20,98±1,1 | 23,53±0,9 | 23,93±1,4 | 24,26±0,4 |
| 511,0           | 18,66±0,3 | 18,55±0,5 | 17,96±0,6 | 19,00±0,6 | 22,36±0,3 | 22,03±0,3 |
| 661,7           | 16,18±0,2 | 17,78±0,3 | 17,32±0,5 | 17,49±0,5 | 20,23±0,2 | 19,67±0,3 |
| 1173,2          | 12,13±0,2 | 12,69±0,2 | 14,11±0,5 | 14,13±0,5 | 16,18±0,1 | 15,42±0,2 |
| 1274,5          | 11,38±0,1 | 13,00±0,3 | 11,83±0,3 | 12,82±0,4 | 15,32±0,6 | 15,21±0,4 |
| 1332,5          | 10,87±0,1 | 12,84±0,1 | 12,02±0,4 | 13,32±0,3 | 15,14±0,3 | 14,49±0,2 |

Tablo 4. 38. Pirinç katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliği (%)

| <b>Enerji<br/>(keV)</b> | <b>SB</b> | <b>P10</b> | <b>P20</b> | <b>P30</b> | <b>P40</b> | <b>P50</b> |
|-------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 59,5                    | 63,32±0,6 | 74,40±0,7  | 79,66±0,6  | 85,11±0,8  | 89,25±1,3  | 90,40±1,1  |
| 81,0                    | 46,53±0,5 | 52,22±0,6  | 57,81±0,9  | 62,76±0,8  | 68,53±0,8  | 70,29±1,0  |
| 276,4                   | 22,28±0,5 | 22,38±0,9  | 25,24±0,8  | 25,85±1,0  | 27,47±0,9  | 28,25±0,8  |
| 302,9                   | 22,18±0,4 | 22,71±0,5  | 24,03±0,7  | 25,95±0,6  | 27,28±0,6  | 26,34±0,7  |
| 356,0                   | 19,49±0,5 | 22,45±0,6  | 23,63±0,6  | 24,44±0,6  | 25,33±0,4  | 24,25±0,5  |
| 383,9                   | 18,75±0,3 | 20,63±1,1  | 21,60±1,2  | 22,56±0,9  | 24,22±1,1  | 23,18±0,9  |
| 511,0                   | 18,66±0,3 | 18,91±0,6  | 19,62±0,8  | 19,75±0,4  | 21,08±0,2  | 20,75±0,4  |
| 661,7                   | 16,18±0,2 | 17,15±0,4  | 17,12±0,3  | 18,33±0,3  | 20,66±0,2  | 18,97±0,3  |
| 1173,2                  | 12,13±0,2 | 13,41±0,3  | 13,82±0,1  | 14,95±0,1  | 15,88±0,1  | 15,02±0,3  |
| 1274,5                  | 11,38±0,1 | 12,53±0,3  | 13,80±0,1  | 13,94±0,2  | 15,16±0,1  | 14,57±0,3  |
| 1332,5                  | 10,87±0,1 | 12,59±0,1  | 13,34±0,1  | 13,10±0,1  | 14,96±0,1  | 15,08±0,1  |

Tablo 4. 39. Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliği (%)

| <b>Enerji<br/>(keV)</b> | <b>SB</b> | <b>C10</b> | <b>C20</b> | <b>C30</b> | <b>C40</b> | <b>C50</b> |
|-------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 59,5                    | 63,32±0,6 | 68,46±0,7  | 73,00±0,6  | 76,97±0,8  | 79,88±1,3  | 81,55±1,1  |
| 81,0                    | 46,53±0,5 | 49,06±0,6  | 52,64±0,9  | 56,00±0,8  | 57,33±0,8  | 58,66±1,0  |
| 276,4                   | 22,28±0,5 | 22,32±0,9  | 23,11±0,8  | 23,41±1,0  | 23,14±0,9  | 23,29±0,8  |
| 302,9                   | 22,18±0,4 | 22,94±0,5  | 22,50±0,7  | 23,58±0,6  | 23,33±0,6  | 21,94±0,7  |
| 356,0                   | 19,49±0,5 | 20,24±0,6  | 20,56±0,6  | 21,05±0,6  | 21,44±0,4  | 21,23±0,5  |
| 383,9                   | 18,75±0,3 | 19,79±1,1  | 19,80±1,2  | 20,67±0,9  | 20,74±1,1  | 20,66±0,9  |
| 511,0                   | 18,66±0,3 | 17,31±0,6  | 17,55±0,8  | 19,46±0,4  | 18,92±0,2  | 18,80±0,4  |
| 661,7                   | 16,18±0,2 | 16,25±0,4  | 16,84±0,3  | 17,17±0,3  | 16,94±0,2  | 16,88±0,3  |
| 1173,2                  | 12,13±0,2 | 12,73±0,3  | 12,93±0,1  | 13,46±0,1  | 12,57±0,1  | 12,56±0,3  |
| 1274,5                  | 11,38±0,1 | 12,41±0,3  | 12,62±0,1  | 12,73±0,2  | 12,87±0,1  | 11,96±0,3  |
| 1332,5                  | 10,87±0,1 | 11,54±0,1  | 11,65±0,1  | 11,96±0,1  | 11,57±0,1  | 12,53±0,1  |

Tablo 4. 40. %50 bronz ve B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%)

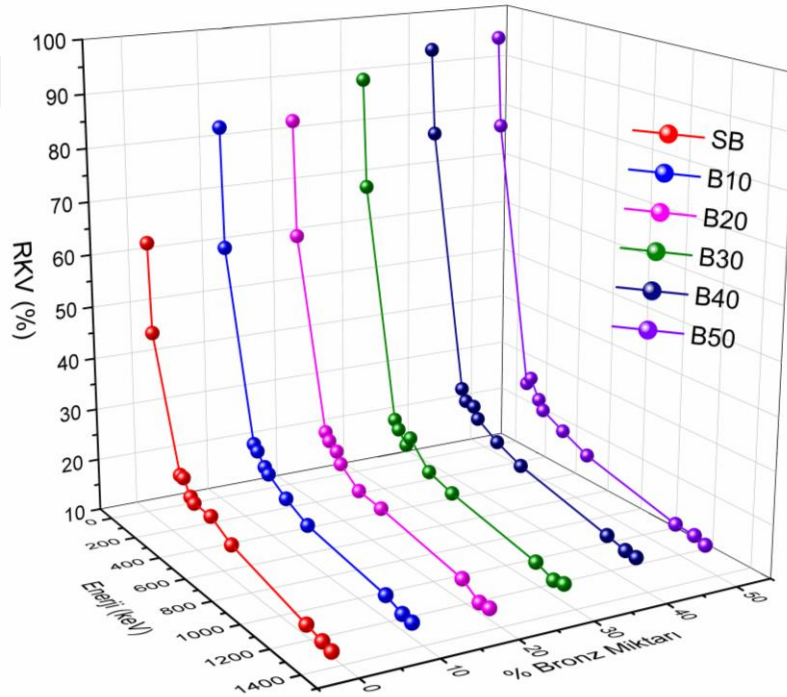
| Enerji (keV) | SB        | B50       | B50B5     | B50B10    | B50B15    | B50B20    |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 59,5         | 63,32±0,6 | 95,30±2,3 | 96,78±4,2 | 94,91±2,7 | 94,83±2,4 | 93,51±3,3 |
| 81,0         | 46,53±0,5 | 78,12±1,8 | 81,26±1,4 | 76,40±1,6 | 75,91±1,7 | 73,67±2,7 |
| 276,4        | 22,28±0,5 | 29,10±1,1 | 32,10±1,1 | 29,44±1,4 | 28,80±1,3 | 26,33±1,2 |
| 302,9        | 22,18±0,4 | 29,54±0,6 | 31,92±1,6 | 27,41±0,8 | 27,78±0,8 | 24,18±1,3 |
| 356,0        | 19,49±0,5 | 26,98±0,8 | 28,14±0,7 | 27,07±0,8 | 27,27±0,9 | 23,76±0,9 |
| 383,9        | 18,75±0,3 | 24,21±0,5 | 27,41±0,6 | 24,93±0,7 | 25,68±1,1 | 23,22±0,7 |
| 511,0        | 18,66±0,3 | 23,84±0,3 | 23,62±0,8 | 21,88±0,8 | 23,42±0,6 | 20,71±0,6 |
| 661,7        | 16,18±0,2 | 21,67±0,2 | 21,34±0,4 | 20,94±0,5 | 20,07±0,4 | 18,92±0,5 |
| 1173,2       | 12,13±0,2 | 16,42±0,1 | 16,77±0,2 | 15,87±0,4 | 15,76±0,3 | 13,70±0,3 |
| 1274,5       | 11,38±0,1 | 15,22±0,2 | 16,02±0,2 | 14,82±0,2 | 14,48±0,1 | 13,83±0,2 |
| 1332,5       | 10,87±0,1 | 14,49±0,1 | 15,42±0,1 | 14,10±0,2 | 15,33±0,1 | 12,48±0,2 |

Tablo 4. 41. %50 pirinç ve B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%)

| Enerji (keV) | SB        | P50       | P50B5     | P50B10    | P50B15    | P50B20    |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 59,5         | 63,32±0,6 | 90,39±1,6 | 92,74±2,4 | 89,83±2,6 | 89,65±2,3 | 86,90±2,1 |
| 81,0         | 46,53±0,5 | 70,29±1,4 | 75,35±1,9 | 66,75±1,8 | 68,70±1,7 | 67,23±1,5 |
| 276,4        | 22,28±0,5 | 28,26±1,1 | 29,42±0,9 | 25,25±1,3 | 27,31±1,3 | 26,81±1,1 |
| 302,9        | 22,18±0,4 | 26,34±0,7 | 27,69±0,9 | 25,72±0,8 | 26,45±0,8 | 26,24±0,9 |
| 356,0        | 19,49±0,5 | 24,25±0,8 | 26,05±0,7 | 24,65±0,9 | 26,18±0,7 | 24,98±0,7 |
| 383,9        | 18,75±0,3 | 23,18±0,5 | 24,82±0,9 | 22,78±1,1 | 24,28±0,7 | 23,88±0,7 |
| 511,0        | 18,66±0,3 | 20,75±0,4 | 22,29±0,6 | 21,33±0,6 | 21,48±0,5 | 20,31±0,8 |
| 661,7        | 16,18±0,2 | 18,97±0,4 | 20,43±0,5 | 19,19±0,4 | 19,08±0,4 | 19,17±0,5 |
| 1173,2       | 12,13±0,2 | 15,02±0,3 | 14,80±0,4 | 14,59±0,5 | 15,84±0,3 | 14,30±0,3 |
| 1274,5       | 11,38±0,1 | 14,57±0,1 | 15,46±0,2 | 13,36±0,4 | 15,04±0,2 | 14,66±0,2 |
| 1332,5       | 10,87±0,1 | 15,08±0,1 | 15,19±0,2 | 12,94±0,2 | 13,98±0,1 | 13,36±0,1 |

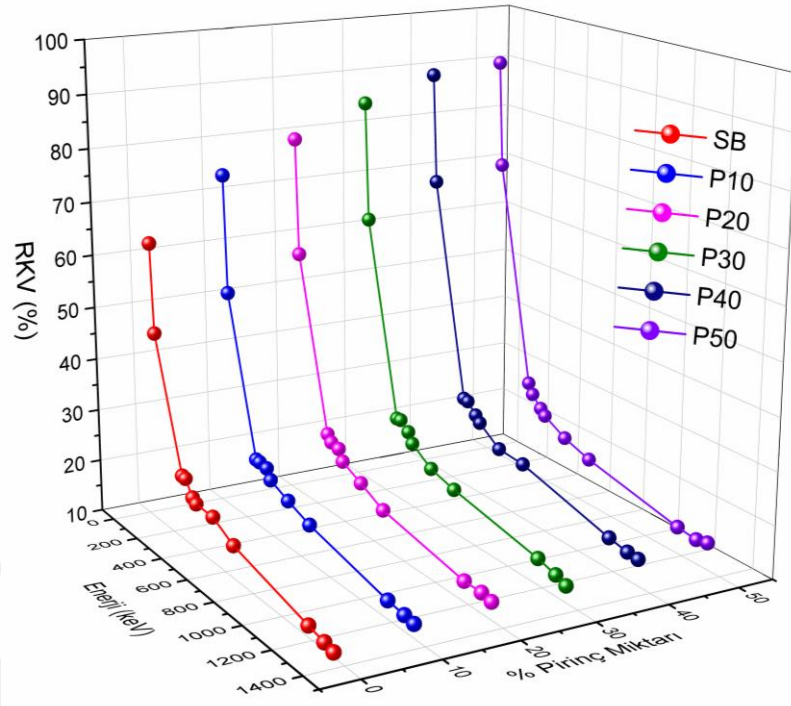
Tablo 4. 42. %50 paslanmaz çelik ve B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimlilik değerleri (%)

| Enerji (keV) | SB        | C50       | C50B5     | C50B10    | C50B15    | C50B20    |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 59,5         | 63,32±0,6 | 81,55±1,6 | 83,31±1,9 | 82,99±2,7 | 83,17±2,2 | 81,71±3,3 |
| 81,0         | 46,53±0,5 | 58,66±1,3 | 60,83±1,7 | 61,54±1,8 | 61,63±1,9 | 60,21±1,2 |
| 276,4        | 22,28±0,5 | 23,29±1,2 | 25,68±1,5 | 26,97±1,4 | 27,31±1,4 | 25,76±0,9 |
| 302,9        | 22,18±0,4 | 21,94±1,3 | 24,73±0,9 | 26,19±1,1 | 25,20±1,2 | 26,18±0,7 |
| 356,0        | 19,49±0,5 | 21,23±0,9 | 22,56±1,0 | 24,62±0,8 | 24,48±0,9 | 24,53±0,8 |
| 383,9        | 18,75±0,3 | 20,66±0,8 | 21,66±0,8 | 23,13±0,7 | 23,33±0,7 | 22,83±1,1 |
| 511,0        | 18,66±0,3 | 18,80±0,6 | 19,22±0,8 | 19,43±0,9 | 20,38±0,6 | 21,21±0,6 |
| 661,7        | 16,18±0,2 | 16,88±0,4 | 16,95±0,5 | 18,02±0,5 | 17,78±0,4 | 18,31±0,5 |
| 1173,2       | 12,13±0,2 | 12,56±0,3 | 14,22±0,4 | 13,82±0,3 | 13,88±0,4 | 14,29±0,3 |
| 1274,5       | 11,38±0,1 | 11,96±0,1 | 12,97±0,3 | 13,36±0,3 | 13,65±0,3 | 13,13±0,2 |
| 1332,5       | 10,87±0,1 | 12,53±0,4 | 12,68±0,3 | 13,94±0,1 | 13,03±0,2 | 13,88±0,2 |

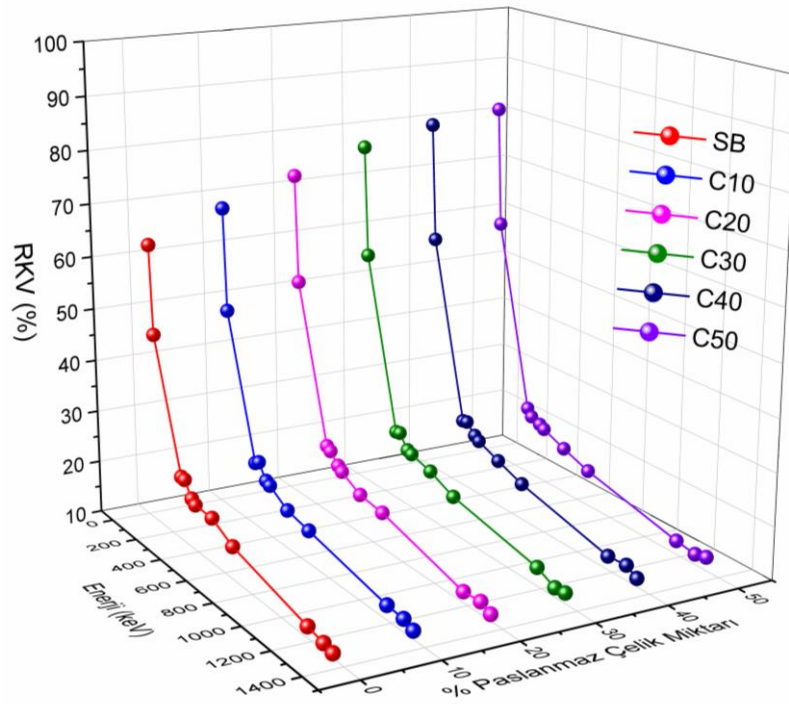


Şekil 4.37. Bronz katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi

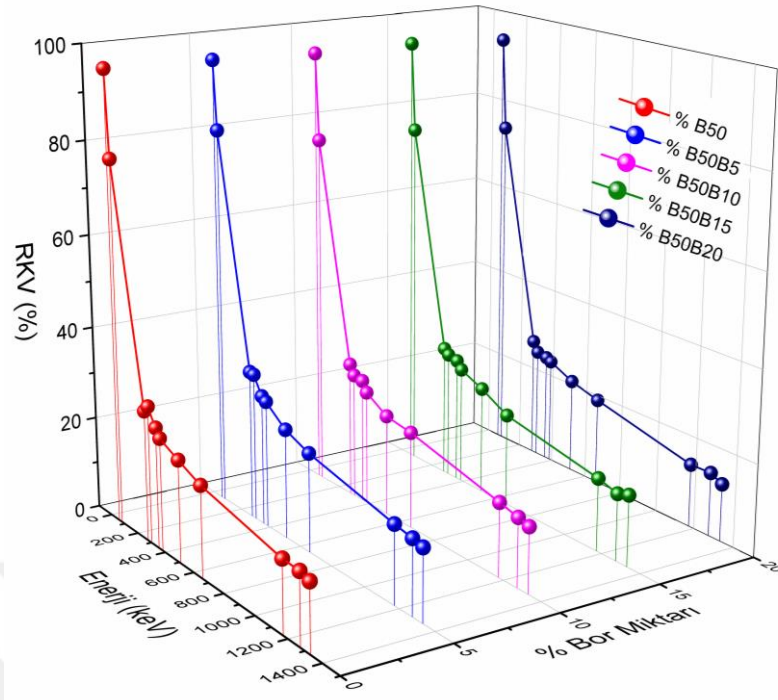




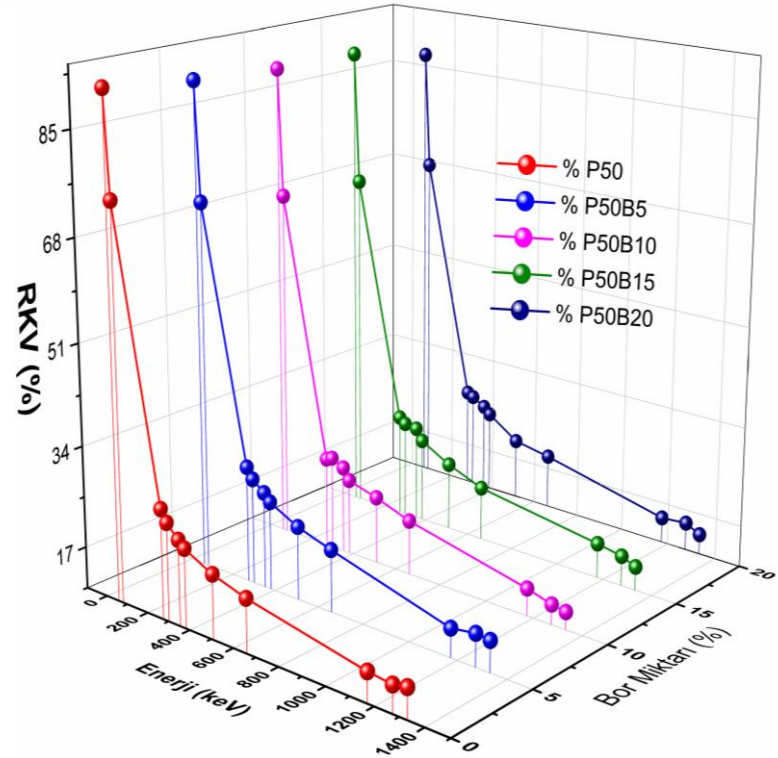
Şekil 4.38. Pirinç katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi



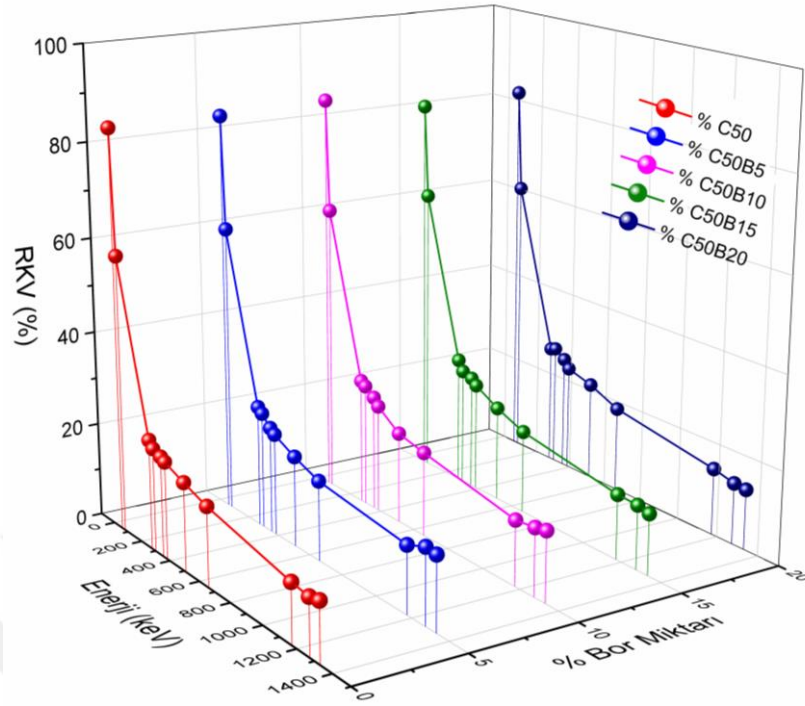
Şekil 4.39. Paslanmaz çelik katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.40. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.41. %50 piriç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.42. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerinin seçilen enerji değerlerindeki radyasyon koruma verimliliklerinin enerjiye göre değişimi

#### 4.6. Nötron Radyasyonu Zırhlama Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları

Bu tez çalışmasında gama radyasyonu azaltma parametreleri yanında nötron radyasyonu azaltma parametreleri de belirlenmiştir. Nötron radyasyonu zırhlama özellikleri Monte Carlo tabanlı GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın nötron radyasyonu zırhlama özellikleri belirleme aşamalarında B50, P50, C50 numunelerine çimento miktarının %5, %10, %15 ve %20'si oranında B<sub>4</sub>C katkısı yapılmış numuneler çalışılmıştır. GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarının kullanılması, sonuçlar arasında karşılaştırma yapma imkanı sunmuştur. Ayrıca, iki farklı simülasyon programlarının tercih edilmesi sonuçların doğruluğunu teyit etme imkanı sağlamıştır. Yapılan çalışmaların ilkinde farklı enerji değerlerinde ve farklı numune kalınlıklarında incelenen betondan geçen nötron sayıları analiz edilmiştir. Beton numuneler üzerine 10 milyon nötron gönderilmiştir. Simülasyon programlarında tercih edilen enerji değerleri sırasıyla 1,1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 3 MeV, 4,5 MeV, 6 MeV, 7 MeV, 8 MeV ve 10 MeV'dir. Numune kalınlıkları ise 1 cm, 2,5 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm, 13 cm, 16 cm, 20 cm ve 25 cm alınmıştır. Bunun dışında, 4,5 MeV enerji değerinde ve 1

cm numune kalınlığında makroskobik tesir kesiti, ortalama serbest yol değerleri de GEANT4 ve FLUKA aracılığı ile incelenmiştir. Teorik olarak hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti eşitlik (2.34) yardımı ile hesaplanmıştır.

Tablo 4. 43. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı

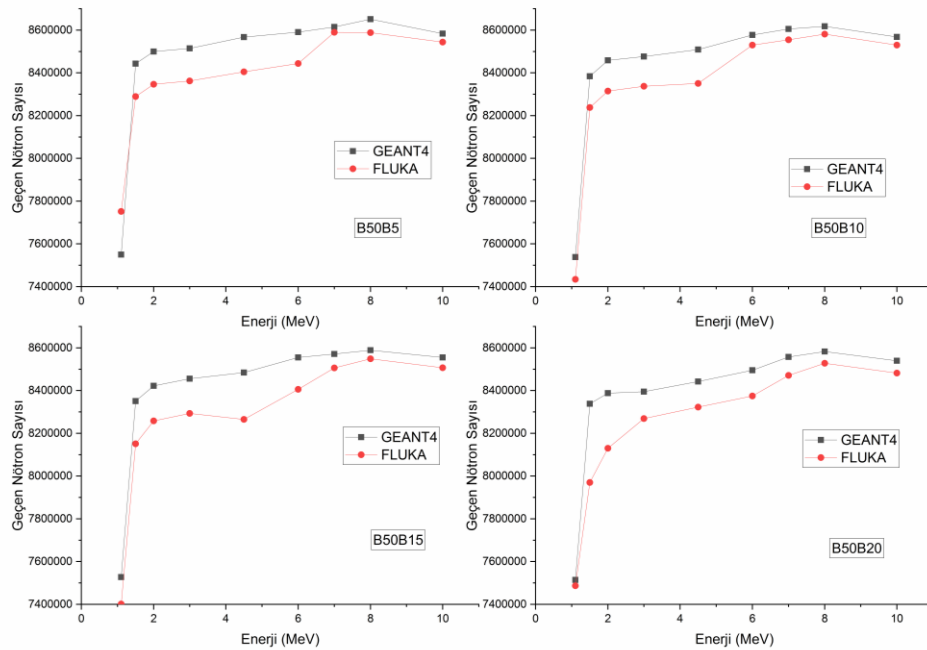
| Enerji<br>(Mev) | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 7549630 | 7751820 | 7537880 | 7433780 | 7526990 | 7401410 | 7514010 | 7487240 |
| 1,5             | 8442910 | 8289530 | 8384280 | 8238080 | 8350260 | 8151150 | 8337790 | 7970220 |
| 2,0             | 8499830 | 8346620 | 8458320 | 8314810 | 8421750 | 8257920 | 8388030 | 8130110 |
| 3,0             | 8514550 | 8361960 | 8476620 | 8337670 | 8455160 | 8293210 | 8394870 | 8269200 |
| 4,5             | 8567320 | 8405040 | 8509090 | 8350310 | 8484490 | 8265120 | 8441820 | 8322740 |
| 6,0             | 8590530 | 8443770 | 8577660 | 8529810 | 8554510 | 8405670 | 8494790 | 8374390 |
| 7,0             | 8614410 | 8589910 | 8605290 | 8554530 | 8571070 | 8505470 | 8557460 | 8470930 |
| 8,0             | 8650830 | 8588380 | 8617890 | 8581130 | 8589020 | 8548490 | 8582400 | 8527930 |
| 10,0            | 8583720 | 8543640 | 8567750 | 8529780 | 8554630 | 8506290 | 8539520 | 8481700 |

Tablo 4. 44. % 50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı

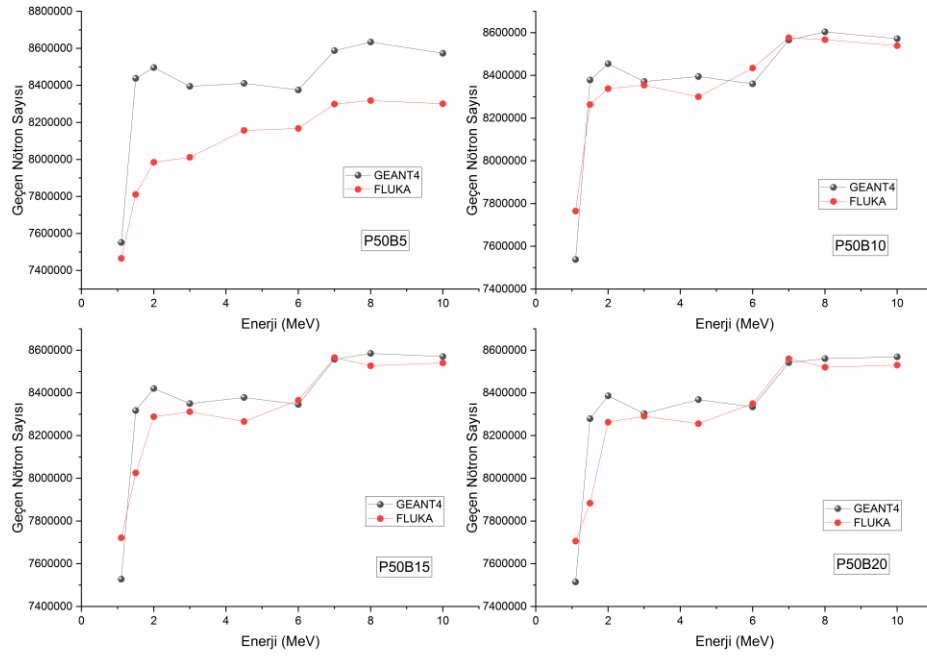
| Enerji<br>(Mev) | P50B5   |         | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 7552230 | 7466130 | 7538350 | 7764790 | 7527980 | 7721210 | 7515070 | 7705840 |
| 1,5             | 8438200 | 7810420 | 8378310 | 8263280 | 8317060 | 8025330 | 8278990 | 7884160 |
| 2,0             | 8496170 | 7984220 | 8454570 | 8338350 | 8420630 | 8288760 | 8386270 | 8262480 |
| 3,0             | 8394760 | 8011520 | 8371360 | 8354250 | 8349580 | 8311770 | 8302900 | 8290810 |
| 4,5             | 8411050 | 8156520 | 8394820 | 8299790 | 8378810 | 8266100 | 8368510 | 8255590 |
| 6,0             | 8375380 | 8167740 | 8360970 | 8434320 | 8346230 | 8365010 | 8334570 | 8349910 |
| 7,0             | 8587330 | 8298770 | 8565340 | 8576300 | 8556970 | 8564500 | 8541770 | 8559080 |
| 8,0             | 8634440 | 8318180 | 8603340 | 8566920 | 8584790 | 8526570 | 8560260 | 8519970 |
| 10,0            | 8572870 | 8300650 | 8571870 | 8539000 | 8569980 | 8540240 | 8568730 | 8529770 |

Tablo 4. 45. % 50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı

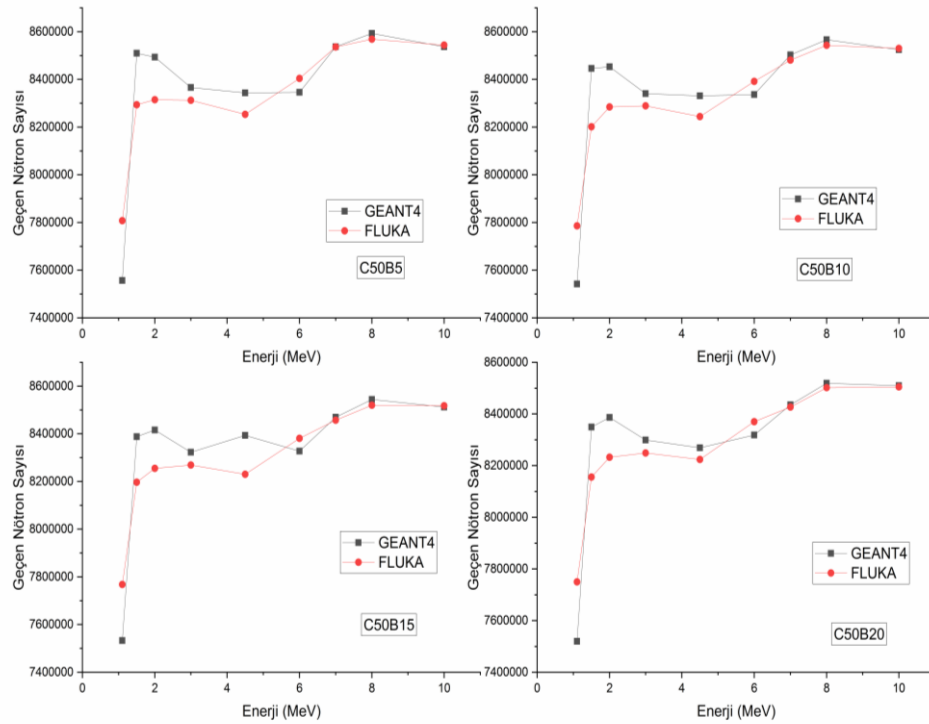
| Enerji<br>(Mev) | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 7556880 | 7807530 | 7542350 | 7785670 | 7533090 | 7768090 | 7519780 | 7749540 |
| 1,5             | 8509740 | 8293850 | 8446360 | 8201570 | 8387820 | 8196770 | 8349330 | 8155480 |
| 2,0             | 8493610 | 8315030 | 8452710 | 8284830 | 8415800 | 8254940 | 8386040 | 8232070 |
| 3,0             | 8366240 | 8312370 | 8340720 | 8289220 | 8322540 | 8269310 | 8298750 | 8248630 |
| 4,5             | 8343670 | 8253230 | 8330990 | 8244160 | 8393070 | 8230500 | 8268820 | 8223310 |
| 6,0             | 8346110 | 8403900 | 8336850 | 8392060 | 8327550 | 8381070 | 8318340 | 8369840 |
| 7,0             | 8537230 | 8536010 | 8503090 | 8481100 | 8469080 | 8457040 | 8435200 | 8426600 |
| 8,0             | 8592630 | 8569040 | 8566250 | 8543420 | 8543770 | 8519990 | 8519060 | 8501700 |
| 10,0            | 8537260 | 8544230 | 8524660 | 8529920 | 8512120 | 8517220 | 8509320 | 8504650 |



Şekil 4.43. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı



Şekil 4.44. %50 piriç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı



Şekil 4.45 %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 1 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde göre geçen nötron sayısı

Tablo 4. 46. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

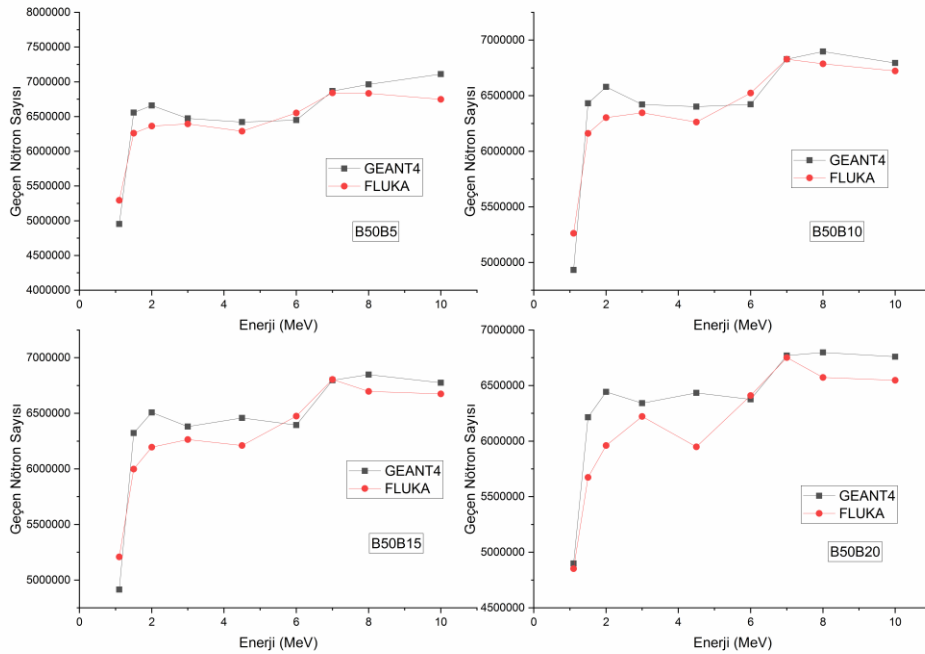
| Enerji<br>(Mev) | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 4952350 | 5294050 | 4932880 | 5261930 | 4914070 | 5208190 | 4898000 | 4852480 |
| 1,5             | 6557630 | 6260600 | 6431550 | 6161410 | 6322050 | 5998820 | 6214100 | 5673450 |
| 2,0             | 6659990 | 6363570 | 6580150 | 6302780 | 6508340 | 6195140 | 6442920 | 5960100 |
| 3,0             | 6472800 | 6395020 | 6421490 | 6346780 | 6380240 | 6263940 | 6341780 | 6221670 |
| 4,5             | 6421490 | 6289140 | 6401490 | 6263350 | 6458850 | 6210390 | 6433850 | 5948000 |
| 6,0             | 6450240 | 6551390 | 6422940 | 6524750 | 6395000 | 6474890 | 6376210 | 6410320 |
| 7,0             | 6866610 | 6841150 | 6829030 | 6828870 | 6797600 | 6805420 | 6769690 | 6751890 |
| 8,0             | 6962420 | 6834760 | 6896860 | 6786770 | 6848090 | 6696990 | 6798070 | 6273450 |
| 10,0            | 7711610 | 6748510 | 6793930 | 6723470 | 6775080 | 6674960 | 6759550 | 6547100 |

Tablo 4. 47. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

| Enerji<br>(Mev) | P50B5   |         | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 4956330 | 4814350 | 4934970 | 5313230 | 4916310 | 5242990 | 4899370 | 5159260 |
| 1,5             | 6549360 | 5394320 | 6426880 | 6206870 | 6279650 | 6147290 | 6154810 | 6096530 |
| 2,0             | 6656800 | 5696310 | 6574770 | 6347040 | 6501990 | 6254490 | 6440190 | 6201570 |
| 3,0             | 6458350 | 5744420 | 6407360 | 6378210 | 6366690 | 6300970 | 6327260 | 6256610 |
| 4,5             | 6489190 | 5823210 | 6459370 | 6277490 | 6457140 | 6214420 | 6433740 | 6191950 |
| 6,0             | 6422390 | 6022610 | 6391230 | 6536380 | 6370900 | 6452290 | 6342960 | 6390880 |
| 7,0             | 6833240 | 6276130 | 6798310 | 6815120 | 6768310 | 6595540 | 6743580 | 6376230 |
| 8,0             | 6932300 | 6306310 | 6791940 | 6791940 | 6811340 | 6743000 | 6779050 | 6725060 |
| 10,0            | 6805110 | 6274690 | 6805380 | 6736100 | 6804360 | 6713590 | 6803770 | 6694510 |

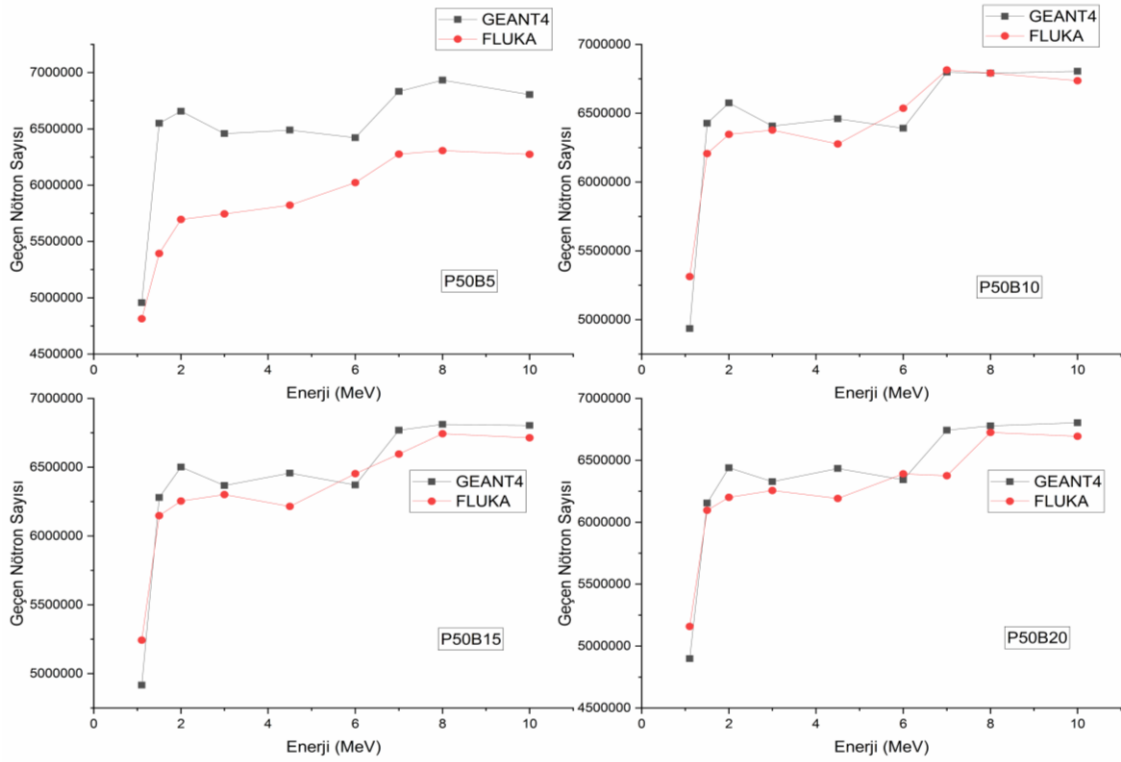
Tablo 4. 48. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 2,5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

| Enerji | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (Mev)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 4959340 | 5385760 | 4939010 | 5349260 | 4921580 | 5309820 | 4907650 | 5289370 |
| 1,5    | 6677400 | 6265160 | 6554240 | 6130060 | 6428960 | 6083610 | 6305000 | 6008100 |
| 2,0    | 6649650 | 6301060 | 6569010 | 6242830 | 6505720 | 6190370 | 6437990 | 6146070 |
| 3,0    | 6400490 | 6293710 | 6356360 | 6255310 | 6317120 | 6213230 | 6278320 | 6180540 |
| 4,5    | 6359120 | 6190770 | 6335310 | 6170590 | 6312830 | 6144480 | 6294780 | 6107260 |
| 6,0    | 6365410 | 6476040 | 6347250 | 6452830 | 6327580 | 6426860 | 6309990 | 6408290 |
| 7,0    | 6733670 | 6802060 | 6673340 | 6736010 | 6586790 | 6647360 | 6501160 | 6572790 |
| 8,0    | 6847070 | 6794780 | 6788450 | 6744990 | 6735650 | 6704070 | 6686390 | 6665190 |
| 10,0   | 6729710 | 6749330 | 6707430 | 6721030 | 6689440 | 6697970 | 6667500 | 6674310 |

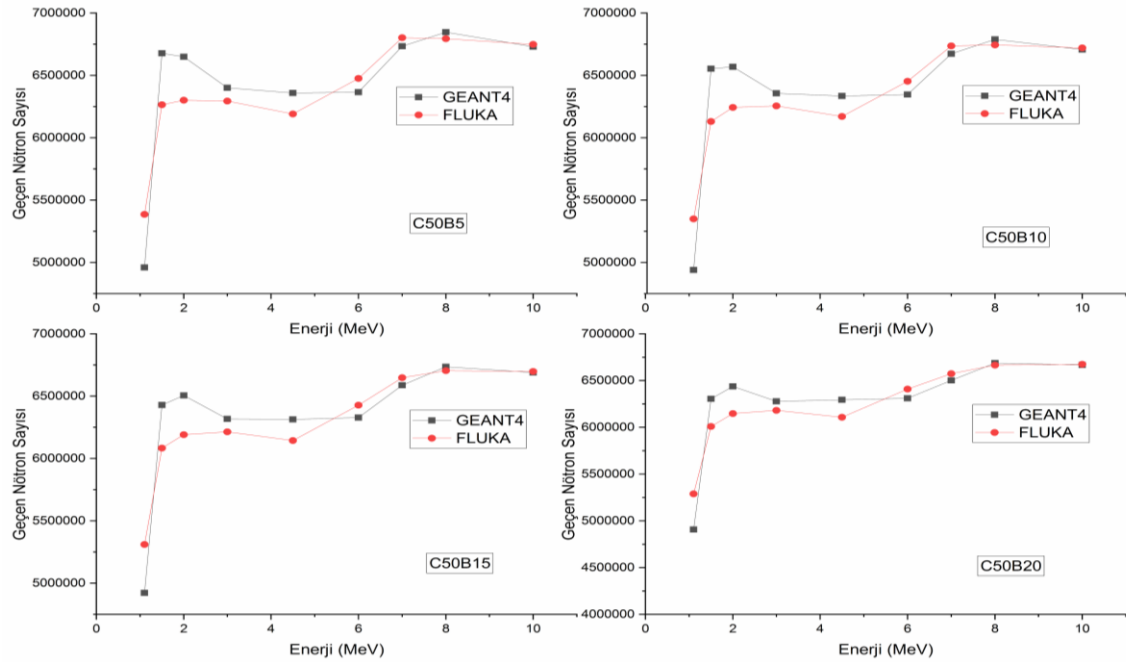


Şekil 4.46. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 2.5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı





Şekil 4.47. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 2.5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.48 %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 2.5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

Tablo 4. 49. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

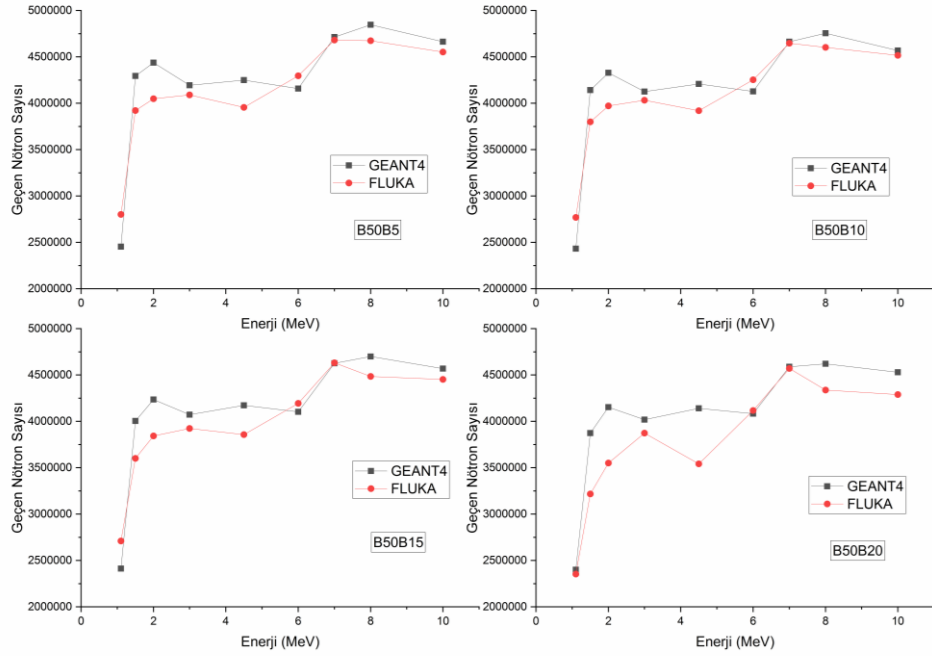
| Enerji<br>(MeV) | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 2452520 | 2800260 | 2432280 | 2768620 | 2413050 | 2709540 | 2399860 | 2352820 |
| 1,5             | 4294580 | 3920300 | 4142310 | 3799700 | 4002930 | 3600570 | 3872040 | 3217140 |
| 2,0             | 4437990 | 4049120 | 4328180 | 3971320 | 4235320 | 3841660 | 4152700 | 3549740 |
| 3,0             | 4194160 | 4089220 | 4124820 | 4031780 | 4072300 | 3923410 | 4018060 | 3873500 |
| 4,5             | 4248410 | 3955440 | 4207850 | 3919290 | 4171560 | 3857450 | 4139490 | 3540730 |
| 6,0             | 4158580 | 4296540 | 4127730 | 4253470 | 4101760 | 4192820 | 4082300 | 4116740 |
| 7,0             | 4713180 | 4680920 | 4663440 | 4646200 | 4624610 | 4630620 | 4587530 | 4569440 |
| 8,0             | 4846510 | 4673150 | 4754970 | 4602590 | 4698330 | 4484580 | 4620600 | 3936740 |
| 10,0            | 4662620 | 4551660 | 4567230 | 4516570 | 4567230 | 4452370 | 4528660 | 4288630 |

Tablo 4. 50. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

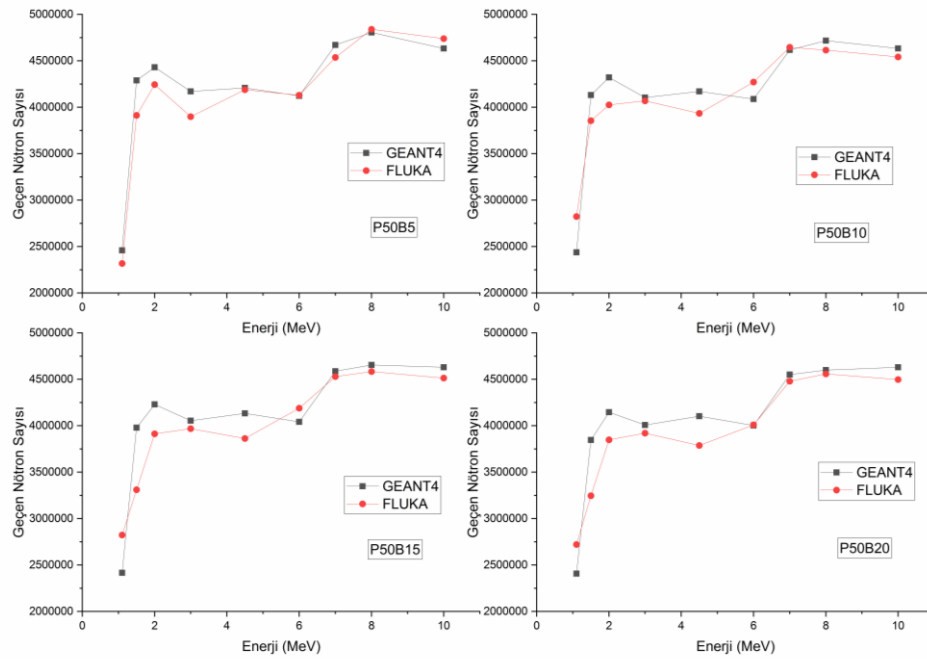
| Enerji<br>(MeV) | P50B5   |         | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 2459220 | 2318030 | 2436600 | 2821990 | 2416310 | 2821990 | 2407620 | 2721020 |
| 1,5             | 4289410 | 3911860 | 4131380 | 3855450 | 3978040 | 3309590 | 3845030 | 3245080 |
| 2,0             | 4429700 | 4244450 | 4321670 | 4025330 | 4229370 | 3912650 | 4144320 | 3847910 |
| 3,0             | 4169750 | 3898740 | 4104060 | 4068560 | 4053730 | 3968080 | 4007580 | 3919410 |
| 4,5             | 4208350 | 4187860 | 4170730 | 3933490 | 4132520 | 3861800 | 4102610 | 3786250 |
| 6,0             | 4121060 | 4129680 | 4088440 | 4270070 | 4041100 | 4187810 | 4002660 | 4009830 |
| 7,0             | 4669750 | 4535200 | 4617380 | 4644320 | 4586180 | 4528770 | 4549490 | 4479050 |
| 8,0             | 4804660 | 4839460 | 4716040 | 4614630 | 4654010 | 4583310 | 4598050 | 4557730 |
| 10,0            | 4631940 | 4739060 | 4632700 | 4540760 | 4629070 | 4512250 | 4628770 | 4496050 |

Tablo 4. 51. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

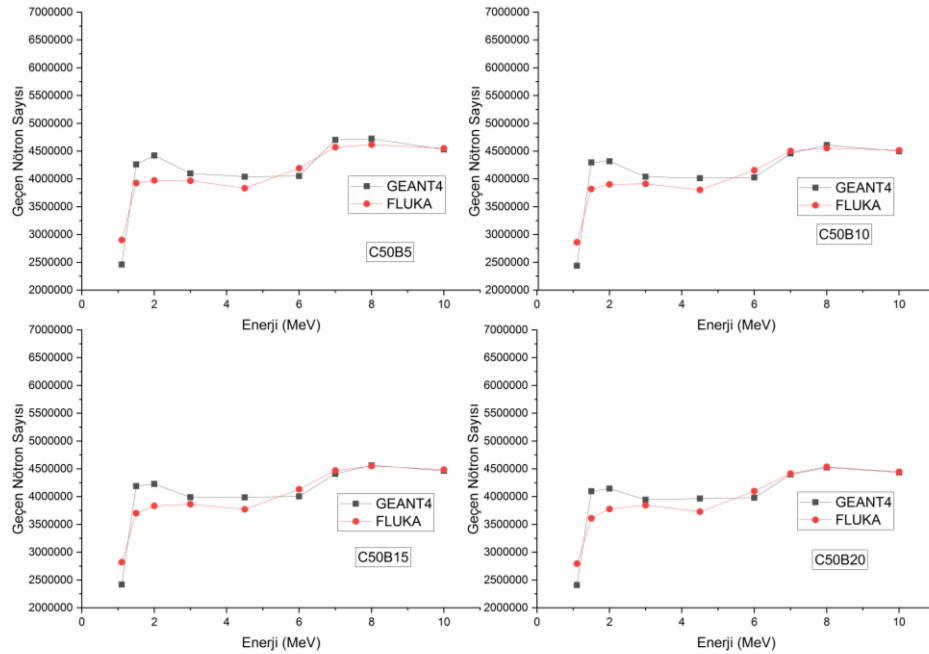
| Enerji<br>(MeV) | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 2459890 | 2901040 | 2439940 | 2861220 | 2418060 | 2819970 | 2409080 | 2793980 |
| 1,5             | 4261080 | 3926380 | 4297150 | 3818850 | 4189240 | 3701950 | 4095680 | 3609160 |
| 2,0             | 4422130 | 3974290 | 4317500 | 3901940 | 4228270 | 3833150 | 4143610 | 3778180 |
| 3,0             | 4099730 | 3967130 | 4041030 | 3910300 | 3990450 | 3862310 | 3945920 | 3845530 |
| 4,5             | 4040350 | 3833130 | 4012010 | 3805530 | 3987520 | 3770470 | 3963860 | 3729470 |
| 6,0             | 4050890 | 4191720 | 4026780 | 4157120 | 4004560 | 4132150 | 3981640 | 4101180 |
| 7,0             | 4702060 | 4572330 | 4458460 | 4503990 | 4410650 | 4468720 | 4399620 | 4412770 |
| 8,0             | 4725450 | 4617130 | 4611540 | 4553760 | 4563500 | 4550920 | 4522910 | 4537020 |
| 10,0            | 4530410 | 4551840 | 4498140 | 4514850 | 4465380 | 4486020 | 4435660 | 4445910 |



Şekil 4.49. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.50. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.51. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 5 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

Tablo 4. 52. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

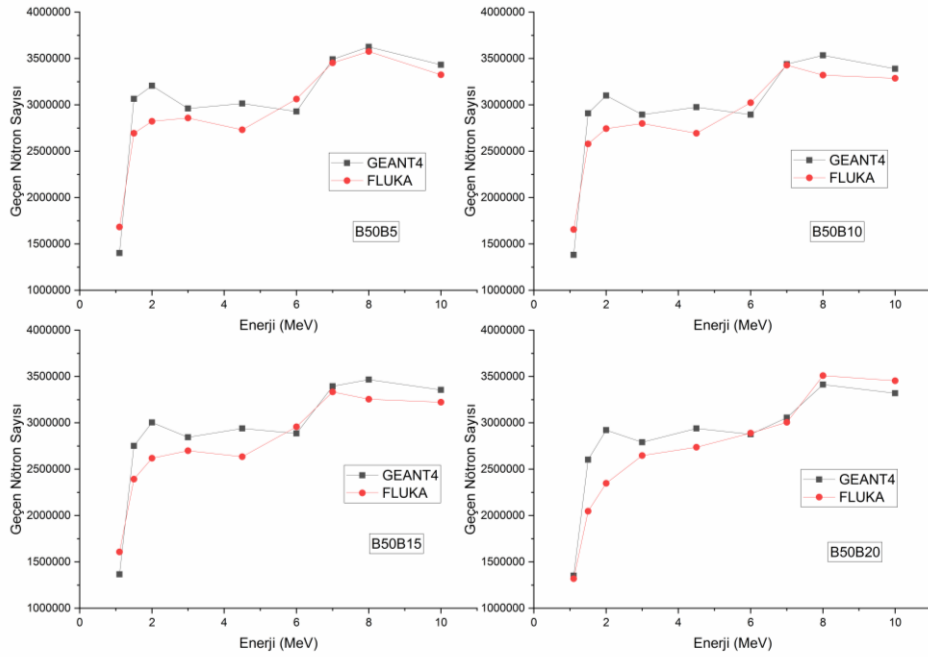
| Enerji | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 1400940 | 1682170 | 1382310 | 1655790 | 1365300 | 1606680 | 1352030 | 1319100 |
| 1,5    | 3063690 | 2693450 | 2907850 | 2579090 | 2751770 | 2392300 | 2601320 | 2046900 |
| 2,0    | 3206430 | 2822280 | 3100780 | 2744360 | 3003670 | 2617410 | 2921930 | 2347360 |
| 3,0    | 2960820 | 2858960 | 2894210 | 2799270 | 2843460 | 2698900 | 2791190 | 2647140 |
| 4,5    | 3014750 | 2731650 | 2975180 | 2694160 | 2939190 | 2634410 | 2939190 | 2736340 |
| 6,0    | 2928670 | 3062110 | 2894970 | 3024100 | 2885890 | 2957880 | 2876020 | 2888390 |
| 7,0    | 3490390 | 3453330 | 3439640 | 3428830 | 3394270 | 3333760 | 3055300 | 3004650 |
| 8,0    | 3625020 | 3575580 | 3534910 | 3320850 | 3465880 | 3255330 | 3413000 | 3509640 |
| 10,0   | 3432330 | 3324390 | 3388270 | 3286450 | 3354060 | 3222290 | 3318580 | 3452990 |

Tablo 4. 53. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

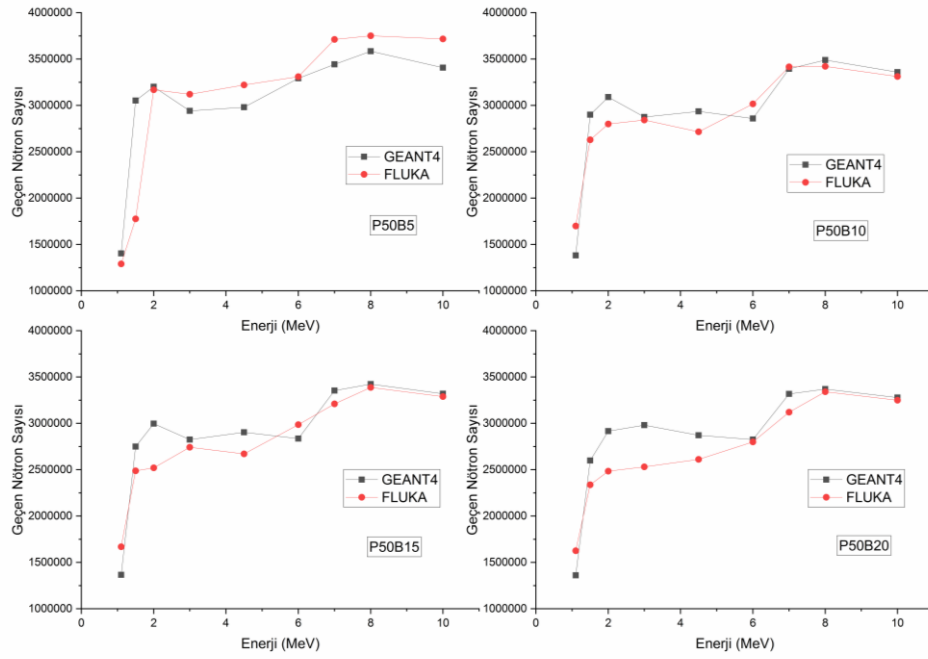
| Enerji | P50B5   |         | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 1403670 | 1290700 | 1382520 | 1699600 | 1366420 | 1668020 | 1359870 | 1625070 |
| 1,5    | 3052770 | 1775980 | 2900060 | 2629480 | 2749270 | 2486830 | 2599040 | 2337010 |
| 2,0    | 3200100 | 3168390 | 3089820 | 2799150 | 2996590 | 2519810 | 2916230 | 2483030 |
| 3,0    | 2940790 | 3119310 | 2875140 | 2841570 | 2825130 | 2741220 | 2979410 | 2530680 |
| 4,5    | 2981050 | 3220050 | 2935960 | 2715380 | 2903070 | 2670580 | 2870850 | 2611630 |
| 6,0    | 3292830 | 3310760 | 2858460 | 3016180 | 2834780 | 2986550 | 2824660 | 2799550 |
| 7,0    | 3442210 | 3710760 | 3393810 | 3416180 | 3353680 | 3209840 | 3317930 | 3119730 |
| 8,0    | 3584150 | 3750210 | 3489910 | 3420950 | 3422940 | 3386520 | 3368790 | 3340970 |
| 10,0   | 3406100 | 3716700 | 3358460 | 3312300 | 3319060 | 3287720 | 3278550 | 3249660 |

Tablo 4. 54. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

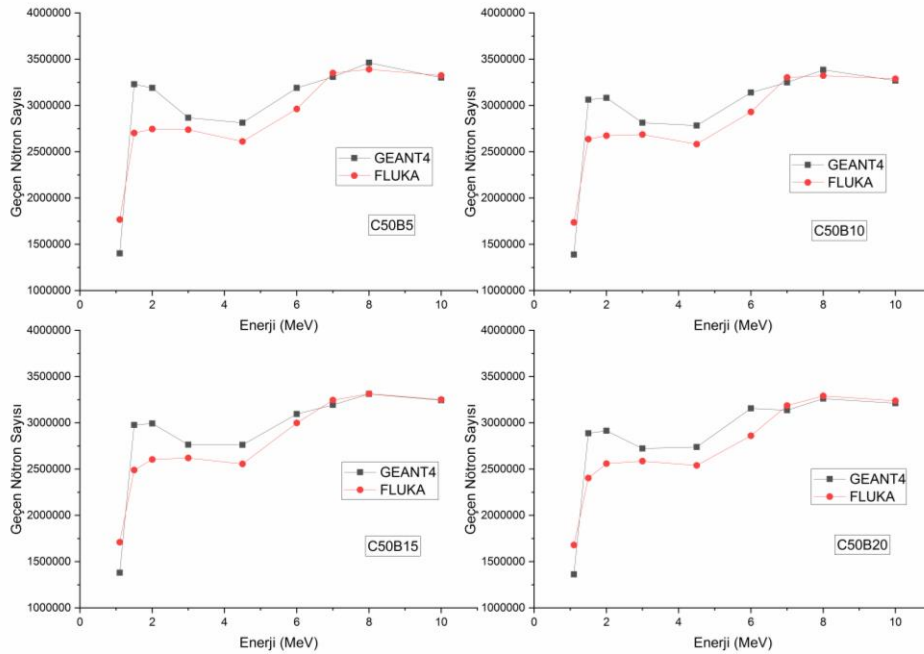
| Enerji | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 1401140 | 1766760 | 1389440 | 1735730 | 1379650 | 1709800 | 1362500 | 1678820 |
| 1,5    | 3230270 | 2702090 | 3063020 | 2635540 | 2976060 | 2488940 | 2887040 | 2402790 |
| 2,0    | 3190210 | 2746300 | 3083060 | 2674320 | 2993240 | 2603510 | 2914280 | 2559040 |
| 3,0    | 2867770 | 2738000 | 2812730 | 2685740 | 2764090 | 2620470 | 2721620 | 2586120 |
| 4,5    | 2813830 | 2610720 | 2783930 | 2582670 | 2761900 | 2555200 | 2738300 | 2539130 |
| 6,0    | 3190390 | 2962420 | 3139640 | 2930720 | 3094270 | 2997550 | 3155300 | 2861090 |
| 7,0    | 3307410 | 3351060 | 3249570 | 3302990 | 3192700 | 3246090 | 3136850 | 3187000 |
| 8,0    | 3463070 | 3390570 | 3384550 | 3321890 | 3311660 | 3314080 | 3262010 | 3289510 |
| 10,0   | 3300730 | 3325260 | 3269350 | 3288050 | 3242890 | 3251090 | 3211010 | 3239060 |



Şekil 4.52. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.53. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjide geçen nötron sayısı



Şekil 4.54. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 7 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

Tablo 4. 55. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

| Enerji | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 602782  | 783915  | 590529  | 766119  | 579642  | 735276  | 568247  | 552742  |
| 1,5    | 1842090 | 1532700 | 1713300 | 1442160 | 1605810 | 1297040 | 1511900 | 1035700 |
| 2,0    | 1970570 | 1638340 | 1876460 | 1577780 | 1793710 | 1473420 | 1724570 | 1259460 |
| 3,0    | 1754360 | 1672970 | 1701980 | 1622180 | 1656190 | 1539820 | 1618750 | 1497360 |
| 4,5    | 1805520 | 1566650 | 1768730 | 1537580 | 1739640 | 1489380 | 1713420 | 1651400 |
| 6,0    | 1731390 | 1843230 | 1702980 | 1811510 | 1682730 | 1757530 | 1651940 | 1693050 |
| 7,0    | 2222450 | 2190450 | 2176660 | 2169310 | 2137870 | 2154110 | 2103080 | 1881450 |
| 8,0    | 2347910 | 2181120 | 2260810 | 2119480 | 2203600 | 2013250 | 2189360 | 1748890 |
| 10,0   | 2172010 | 2070770 | 2133200 | 2041280 | 2097550 | 1995630 | 2068550 | 1937350 |

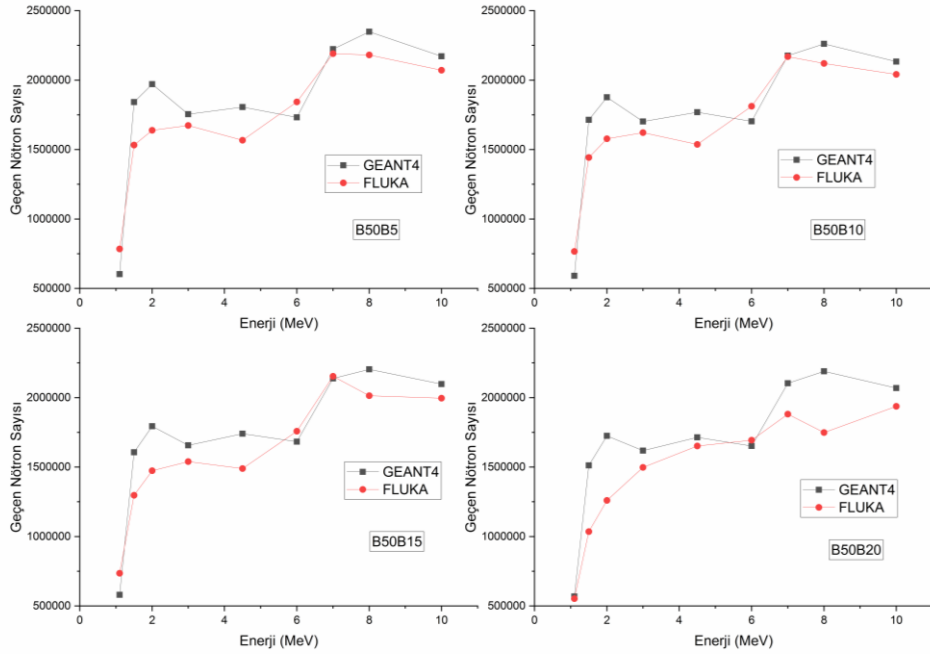
Tablo 4. 56. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

| Enerji | P50B5   |         | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 603392  | 538539  | 592012  | 795755  | 581672  | 758304  | 570905  | 739096  |
| 1,5    | 1836160 | 1846830 | 1706230 | 1484710 | 1609510 | 1368820 | 1501970 | 1303470 |
| 2,0    | 1965150 | 1752880 | 1868790 | 1620030 | 1788500 | 1466400 | 1719050 | 1374060 |
| 3,0    | 1742330 | 1789190 | 1686890 | 1655340 | 1643060 | 1573300 | 1605370 | 1481510 |
| 4,5    | 1754360 | 1850040 | 1701980 | 1550340 | 1656190 | 1495300 | 1618750 | 1469640 |
| 6,0    | 1800030 | 1919010 | 1670650 | 1821570 | 1641220 | 1609540 | 1612960 | 1487550 |
| 7,0    | 1983440 | 1949140 | 2136970 | 2156370 | 2099870 | 2042930 | 2066780 | 1920640 |
| 8,0    | 2309070 | 2201120 | 2221940 | 2232040 | 2176250 | 2176510 | 2129730 | 2109030 |
| 10,0   | 2143640 | 1952620 | 2104820 | 2060670 | 2075590 | 2047020 | 2021030 | 2019350 |

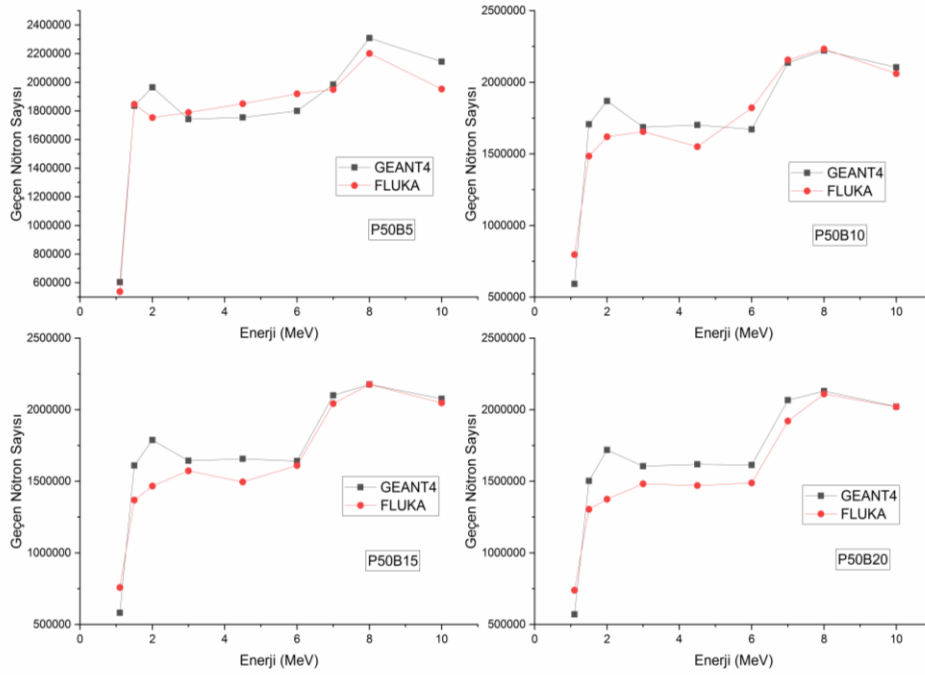


Tablo 4. 57. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

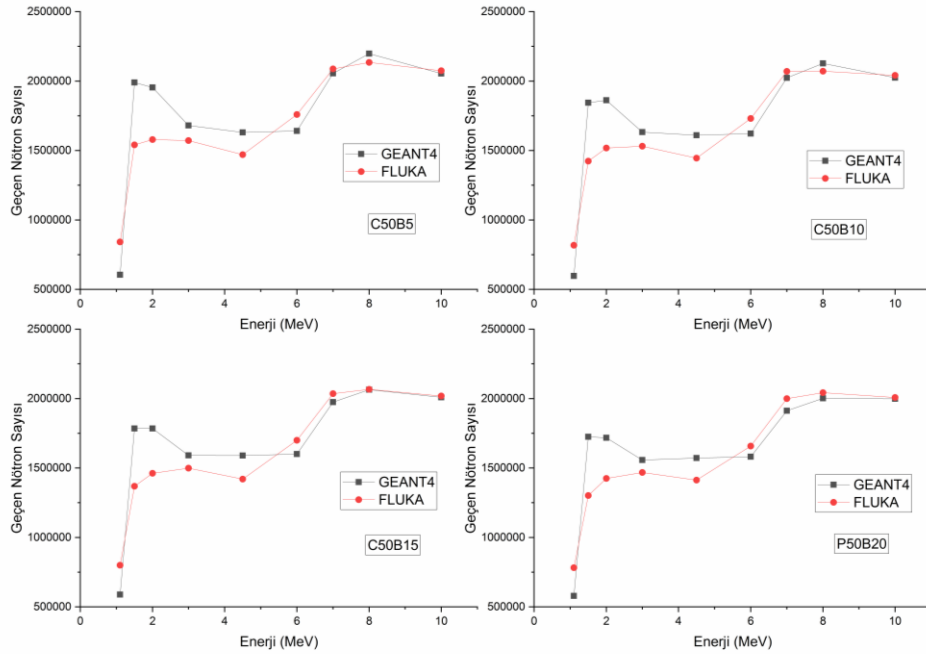
| Enerji | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 604972  | 841428  | 596941  | 817954  | 588662  | 799333  | 579065  | 781960  |
| 1,5    | 1990070 | 1541200 | 1843590 | 1424000 | 1784300 | 1368930 | 1725100 | 1302260 |
| 2,0    | 1954400 | 1578700 | 1861530 | 1517770 | 1784350 | 1462330 | 1717740 | 1424700 |
| 3,0    | 1680170 | 1571720 | 1632320 | 1530810 | 1591050 | 1498500 | 1557870 | 1467330 |
| 4,5    | 1630770 | 1469570 | 1609770 | 1444520 | 1590080 | 1420010 | 1572050 | 1412510 |
| 6,0    | 1641350 | 1759420 | 1621630 | 1730720 | 1600920 | 1699350 | 1581040 | 1657230 |
| 7,0    | 2055430 | 2087440 | 2023110 | 2069520 | 1973870 | 2034770 | 1911910 | 1999500 |
| 8,0    | 2197260 | 2134960 | 2127090 | 2070700 | 2064050 | 2066090 | 2001980 | 2042970 |
| 10,0   | 2054680 | 2074810 | 2025050 | 2041630 | 2009470 | 2018340 | 1998640 | 2007420 |



Şekil 4.55. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.56. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı



Şekil 4.57. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 10 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

Tablo 4. 58. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

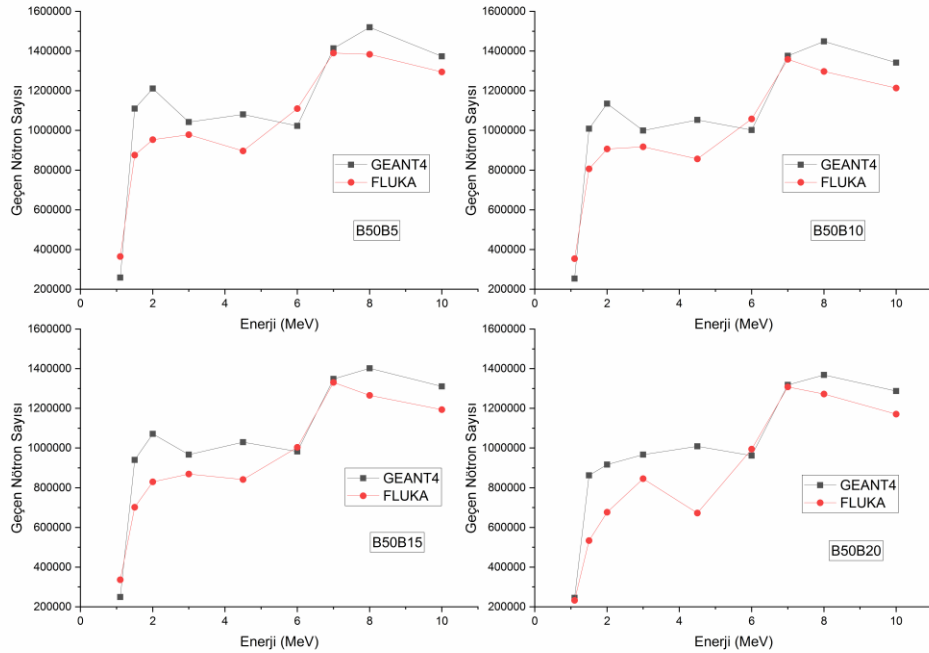
| Enerji<br>(MeV) | B50B5   |         | B50B10  |         | B50B15  |         | B50B20  |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 258377  | 364434  | 253222  | 353934  | 249559  | 336155  | 244988  | 232943  |
| 1,5             | 1109820 | 875543  | 1008960 | 805935  | 940053  | 702016  | 862371  | 533926  |
| 2,0             | 1211100 | 953387  | 1135130 | 907104  | 1071790 | 829838  | 916420  | 677034  |
| 3,0             | 1042140 | 978381  | 999919  | 917532  | 966970  | 869023  | 966970  | 845543  |
| 4,5             | 1080870 | 896631  | 1053020 | 856556  | 1029980 | 841832  | 1008570 | 672253  |
| 6,0             | 1022730 | 1110020 | 1001750 | 1058240 | 982654  | 1003490 | 961892  | 994206  |
| 7,0             | 1413580 | 1389890 | 1375740 | 1357970 | 1347860 | 1330380 | 1317800 | 1308460 |
| 8,0             | 1520010 | 1383020 | 1448240 | 1297110 | 1401650 | 985025  | 1367980 | 1071860 |
| 10,0            | 1373210 | 1294410 | 1341630 | 1213540 | 1311010 | 1193940 | 1286950 | 1170990 |

Tablo 4. 59. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

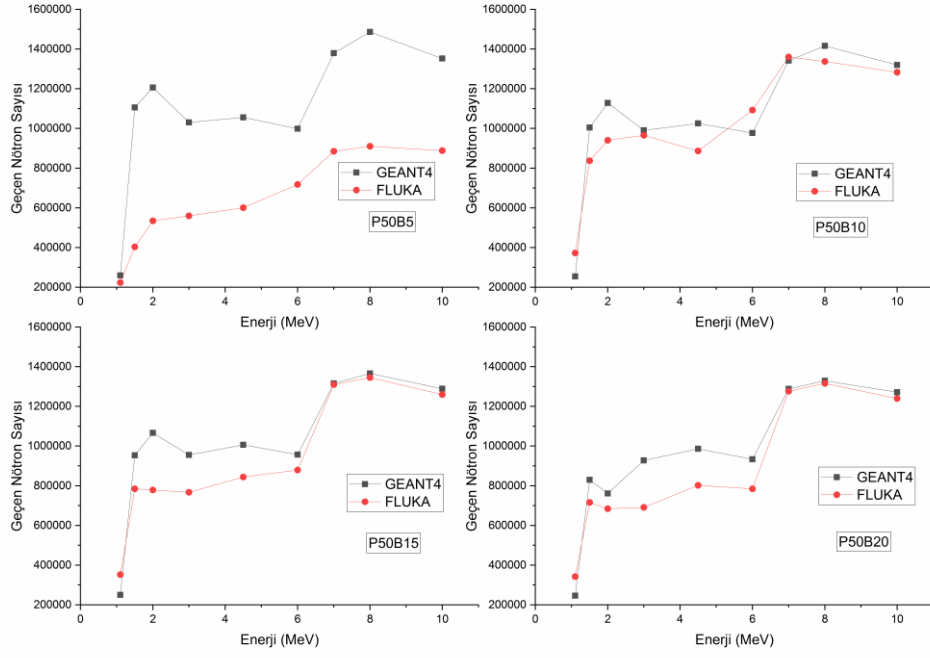
| Enerji<br>(MeV) | P50B5   |        | P50B10  |         | P50B15  |         | P50B20  |         |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | GEANT4  | FLUKA  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1             | 259648  | 223114 | 254074  | 372476  | 250068  | 352009  | 245912  | 341905  |
| 1,5             | 1105610 | 403363 | 1004810 | 837261  | 953356  | 784634  | 829370  | 716351  |
| 2,0             | 1205690 | 534875 | 1128660 | 939846  | 1066070 | 778321  | 760868  | 684287  |
| 3,0             | 1030160 | 559992 | 990082  | 964869  | 955005  | 766832  | 927515  | 690805  |
| 4,5             | 1055160 | 600888 | 1025470 | 887007  | 1006210 | 843857  | 985791  | 801957  |
| 6,0             | 998433  | 717883 | 977078  | 1092020 | 956497  | 878946  | 933090  | 784256  |
| 7,0             | 1379220 | 885098 | 1341400 | 1359910 | 1315520 | 1309760 | 1288330 | 1276370 |
| 8,0             | 1486620 | 910101 | 1416010 | 1337280 | 1365870 | 1345100 | 1328780 | 1315470 |
| 10,0            | 1352420 | 888179 | 1319590 | 1283030 | 1288650 | 1259800 | 1271350 | 1239220 |

Tablo 4. 60. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

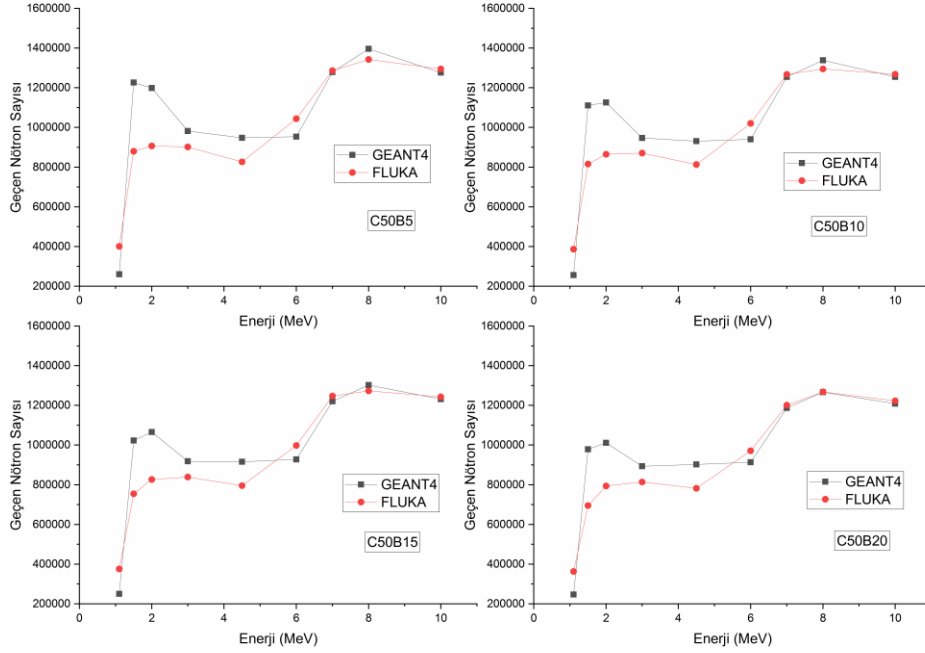
| Enerji | C50B5   |         | C50B10  |         | C50B15  |         | C50B20  |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (MeV)  | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   | GEANT4  | FLUKA   |
| 1,1    | 260451  | 400837  | 255831  | 386726  | 249824  | 375940  | 246873  | 362974  |
| 1,5    | 1225870 | 879769  | 1110990 | 815677  | 1023340 | 754263  | 978964  | 695072  |
| 2,0    | 1198230 | 906590  | 1125760 | 864843  | 1065770 | 826504  | 1011260 | 794153  |
| 3,0    | 981912  | 901399  | 947120  | 870806  | 917997  | 839014  | 893577  | 813751  |
| 4,5    | 947259  | 826647  | 930997  | 813005  | 915601  | 795389  | 902461  | 782097  |
| 6,0    | 953424  | 1043600 | 940278  | 1020510 | 927551  | 998147  | 913669  | 971006  |
| 7,0    | 1278700 | 1286020 | 1254850 | 1267010 | 1220690 | 1247060 | 1186920 | 1201190 |
| 8,0    | 1395900 | 1342350 | 1338100 | 1294770 | 1301990 | 1273230 | 1266500 | 1268010 |
| 10,0   | 1275980 | 1294860 | 1254870 | 1267810 | 1231300 | 1243000 | 1208230 | 1222810 |



Şekil 4.58 %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.59. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.60. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 13 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı değişimi

Tablo 4. 61. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

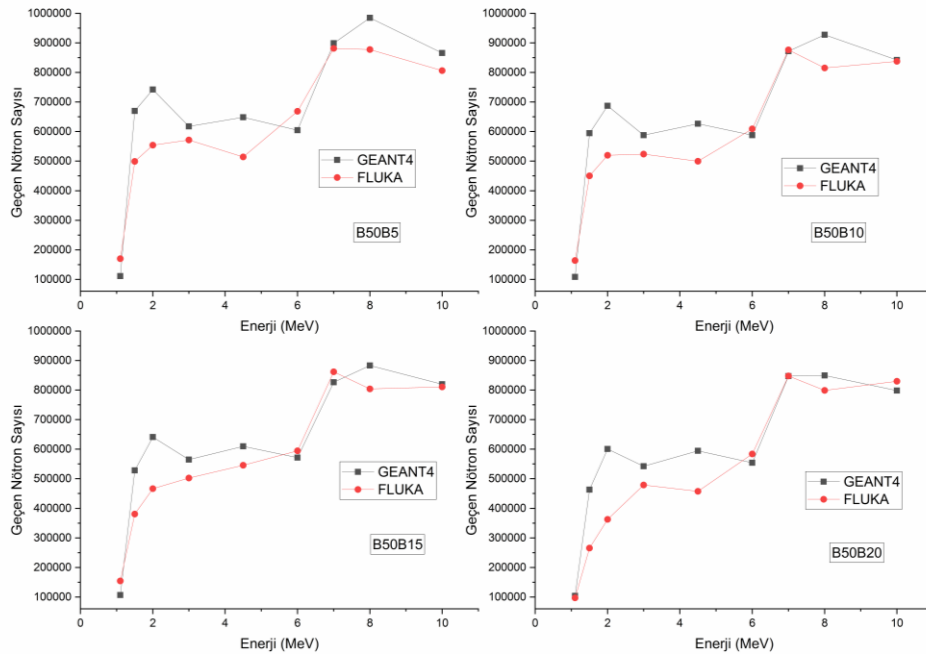
| Enerji<br>(MeV) | B50B5  |        | B50B10 |        | B50B15 |        | B50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 111205 | 170144 | 108114 | 163967 | 106423 | 154098 | 103755 | 97009  |
| 1,5             | 669652 | 499223 | 594784 | 450461 | 528307 | 380555 | 463441 | 265744 |
| 2,0             | 742456 | 554363 | 687435 | 519717 | 641234 | 466693 | 600592 | 362542 |
| 3,0             | 617680 | 571811 | 588064 | 523887 | 564945 | 502756 | 542144 | 479159 |
| 4,5             | 648205 | 514003 | 626554 | 499712 | 609838 | 545628 | 594493 | 457719 |
| 6,0             | 604726 | 668509 | 587930 | 609332 | 571653 | 594604 | 553987 | 583720 |
| 7,0             | 899049 | 881277 | 871987 | 876524 | 826256 | 862033 | 847052 | 847971 |
| 8,0             | 984784 | 877622 | 927639 | 815063 | 883097 | 804025 | 849568 | 798866 |
| 10,0            | 866010 | 806396 | 842330 | 837632 | 819957 | 810634 | 798506 | 829601 |

Tablo 4. 62. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

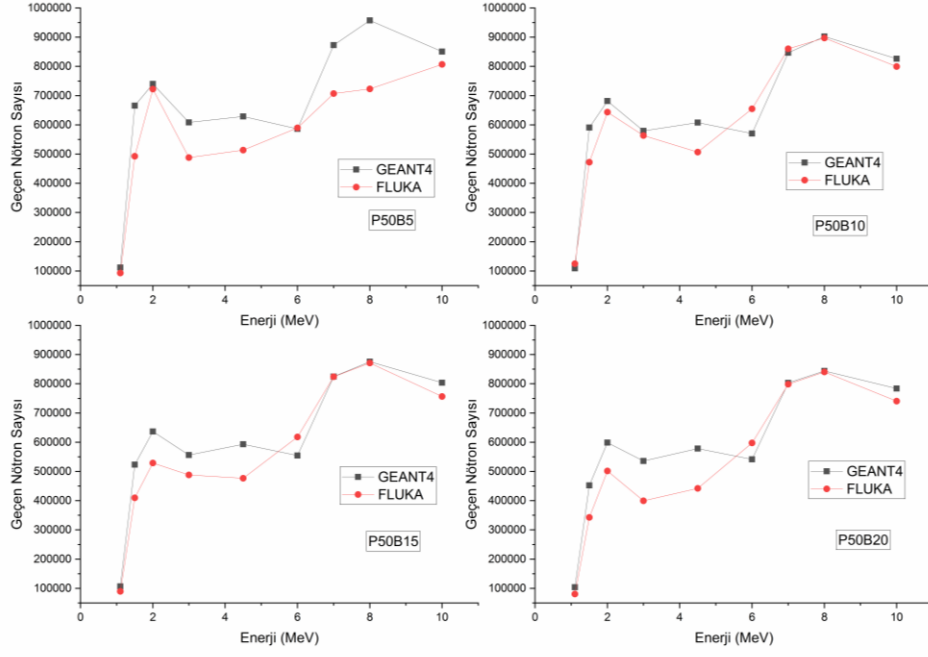
| Enerji<br>(MeV) | P50B5  |        | P50B10 |        | P50B15 |        | P50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 111914 | 93155  | 108896 | 124638 | 106879 | 89551  | 104129 | 80375  |
| 1,5             | 665585 | 492839 | 590985 | 472190 | 523386 | 409775 | 452089 | 342610 |
| 2,0             | 739822 | 272751 | 681639 | 543576 | 636820 | 428705 | 598590 | 301857 |
| 3,0             | 608462 | 287906 | 579699 | 563365 | 556430 | 488064 | 535949 | 399850 |
| 4,5             | 628925 | 313872 | 607612 | 506756 | 593154 | 476753 | 578271 | 442351 |
| 6,0             | 586549 | 389929 | 570580 | 655185 | 554235 | 617925 | 541298 | 597854 |
| 7,0             | 873055 | 507400 | 846860 | 860192 | 824508 | 824065 | 802798 | 798317 |
| 8,0             | 957493 | 522789 | 902653 | 897365 | 875921 | 871364 | 843964 | 840368 |
| 10,0            | 850472 | 507006 | 826522 | 799893 | 803568 | 756339 | 783554 | 740480 |

Tablo 4. 63. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

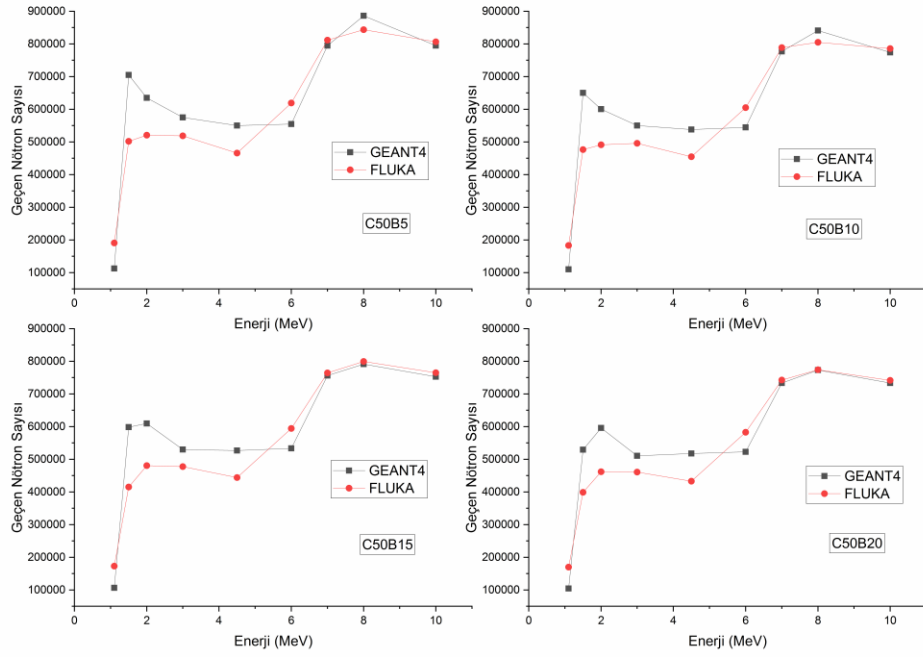
| Enerji | C50B5  |        | C50B10 |        | C50B15 |        | C50B20 |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| (MeV)  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1    | 112603 | 190402 | 109838 | 182869 | 106557 | 173096 | 104558 | 169922 |
| 1,5    | 705064 | 501664 | 650070 | 476324 | 598224 | 415102 | 529573 | 398705 |
| 2,0    | 634872 | 520554 | 600426 | 491367 | 609716 | 480772 | 595690 | 461550 |
| 3,0    | 574888 | 518720 | 550215 | 495847 | 529747 | 477551 | 510388 | 460908 |
| 4,5    | 550242 | 465903 | 537992 | 454455 | 526857 | 443787 | 517690 | 432605 |
| 6,0    | 554712 | 619032 | 544682 | 605008 | 533268 | 594335 | 522977 | 582661 |
| 7,0    | 795089 | 811624 | 777103 | 789051 | 756375 | 764338 | 733465 | 742557 |
| 8,0    | 886351 | 843853 | 840901 | 805099 | 791554 | 799442 | 772906 | 774069 |
| 10,0   | 794856 | 806674 | 773875 | 785842 | 752996 | 764906 | 733585 | 741558 |



Şekil 4.61. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.62. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.63. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 16 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Tablo 4. 64. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

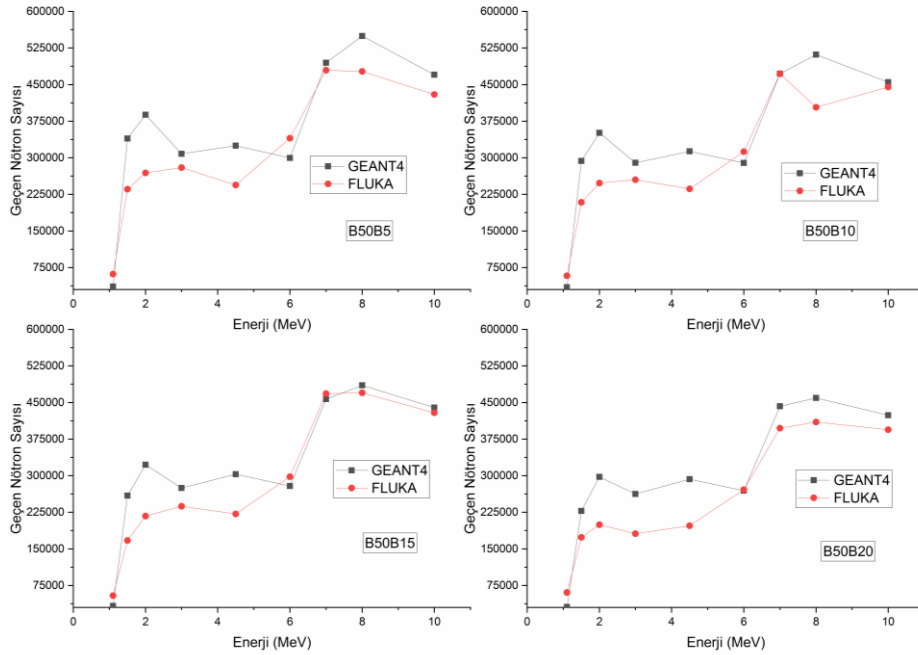
| Enerji<br>(MeV) | B50B5  |        | B50B10 |        | B50B15 |        | B50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 36279  | 61699  | 34782  | 58431  | 32956  | 54139  | 30875  | 60731  |
| 1,5             | 339652 | 235567 | 293444 | 208614 | 259074 | 167192 | 227806 | 173559 |
| 2,0             | 388041 | 268876 | 351055 | 248315 | 322441 | 217148 | 297595 | 199722 |
| 3,0             | 308181 | 279872 | 289868 | 254905 | 274939 | 237511 | 262460 | 181056 |
| 4,5             | 324829 | 244193 | 313287 | 236215 | 302918 | 221586 | 292713 | 197552 |
| 6,0             | 299626 | 340193 | 289562 | 312449 | 278963 | 298045 | 269251 | 271492 |
| 7,0             | 494801 | 479624 | 472193 | 472336 | 457055 | 468283 | 442323 | 397337 |
| 8,0             | 549731 | 477175 | 511552 | 403652 | 485396 | 469954 | 459339 | 410153 |
| 10,0            | 470109 | 429666 | 454788 | 445069 | 439621 | 428907 | 423892 | 394176 |

Tablo 4. 65. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

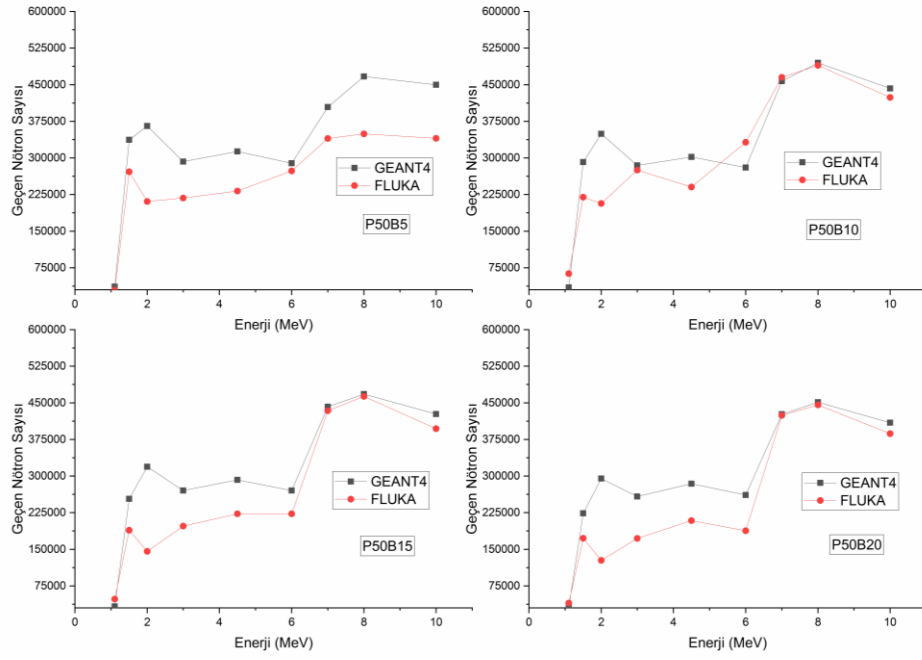
| Enerji<br>(MeV) | P50B5  |        | P50B10 |        | P50B15 |        | P50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 36463  | 29092  | 34876  | 63181  | 33064  | 47904  | 31029  | 39957  |
| 1,5             | 337273 | 271597 | 291549 | 219627 | 253461 | 188993 | 223608 | 172644 |
| 2,0             | 365480 | 210792 | 349526 | 206847 | 319147 | 145698 | 294837 | 127305 |
| 3,0             | 292414 | 218061 | 284559 | 275179 | 270295 | 197605 | 258163 | 172334 |
| 4,5             | 313401 | 232372 | 302015 | 240599 | 292119 | 222640 | 284457 | 208854 |
| 6,0             | 289006 | 273509 | 280300 | 331967 | 270256 | 222654 | 261291 | 187943 |
| 7,0             | 444171 | 239776 | 457375 | 465220 | 442013 | 433908 | 426819 | 424349 |
| 8,0             | 496789 | 249250 | 494688 | 489611 | 467905 | 463281 | 451230 | 445637 |
| 10,0            | 449996 | 240124 | 442366 | 424110 | 426897 | 396970 | 409205 | 386830 |

Tablo 4. 66. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

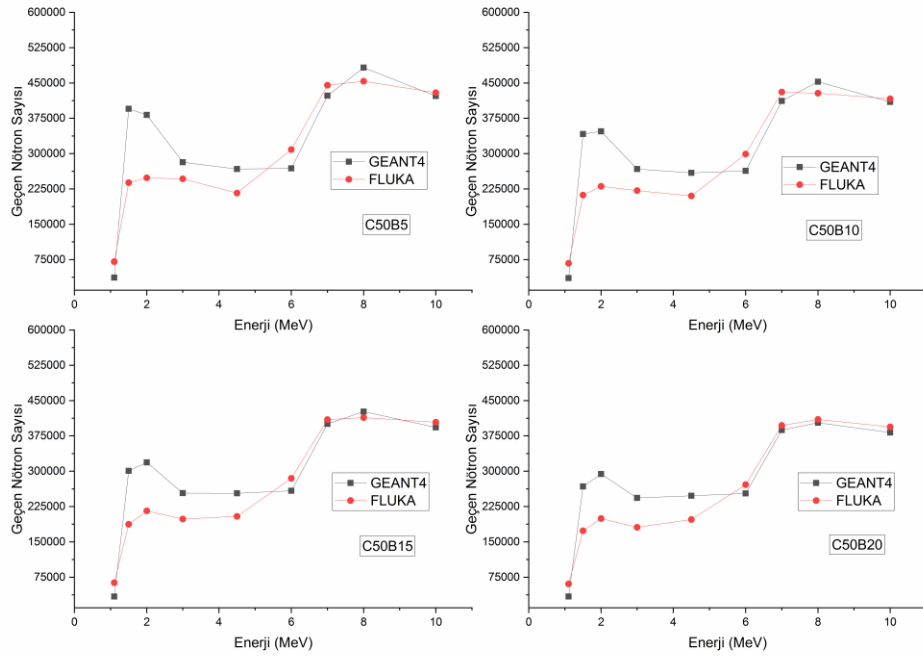
| Enerji | C50B5  |        | C50B10 |        | C50B15 |        | C50B20 |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| (MeV)  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1    | 36672  | 70576  | 35611  | 67061  | 33979  | 63095  | 33979  | 60731  |
| 1,5    | 395360 | 238303 | 341483 | 212037 | 300942 | 187311 | 267495 | 173559 |
| 2,0    | 382162 | 248649 | 347188 | 230482 | 318827 | 215661 | 294110 | 199722 |
| 3,0    | 281632 | 246554 | 267214 | 221635 | 253427 | 198443 | 243421 | 181056 |
| 4,5    | 267224 | 216123 | 259037 | 210167 | 253272 | 204111 | 247786 | 197552 |
| 6,0    | 268723 | 308570 | 263533 | 299021 | 258436 | 285033 | 252981 | 271492 |
| 7,0    | 423243 | 445233 | 411706 | 430819 | 400389 | 409528 | 387375 | 397337 |
| 8,0    | 482602 | 453620 | 452717 | 428324 | 426587 | 413875 | 402853 | 410153 |
| 10,0   | 422236 | 429535 | 409527 | 416502 | 393055 | 404145 | 382197 | 394176 |



Şekil 4.64 %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.65. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.66. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 20 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi

Tablo 4. 67. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

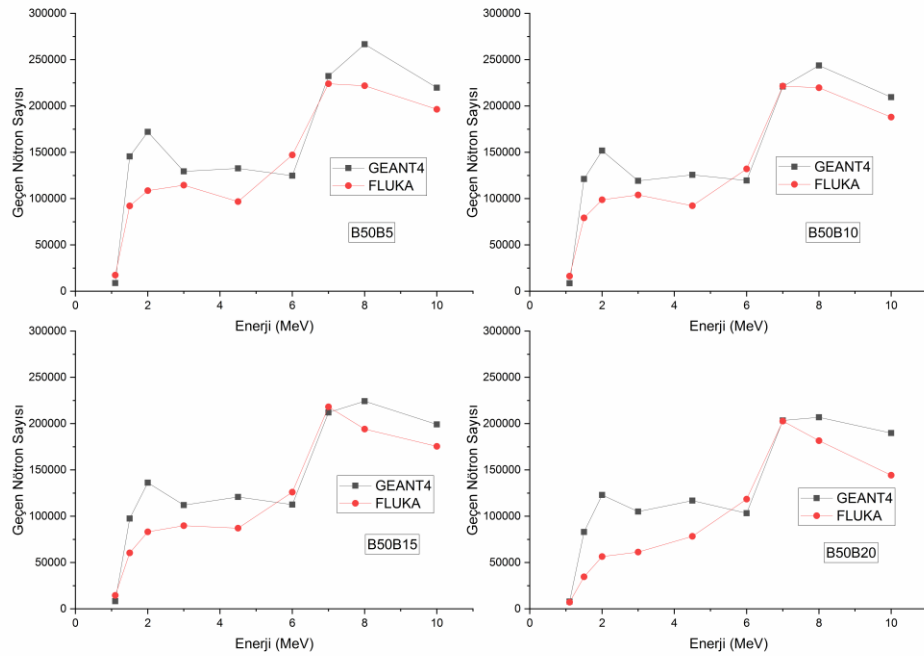
| Enerji<br>(MeV) | B50B5  |        | B50B10 |        | B50B15 |        | B50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 8789   | 17332  | 8524   | 16372  | 8220   | 14493  | 7943   | 7177   |
| 1,5             | 145494 | 92078  | 121233 | 79246  | 97525  | 60413  | 82982  | 34556  |
| 2,0             | 172068 | 108636 | 151859 | 98666  | 136180 | 83105  | 122941 | 56411  |
| 3,0             | 129306 | 114492 | 119170 | 103945 | 111989 | 89761  | 104978 | 61289  |
| 4,5             | 132549 | 96840  | 125643 | 92313  | 120828 | 87095  | 116760 | 78235  |
| 6,0             | 124680 | 147141 | 119623 | 132086 | 112527 | 125923 | 103256 | 118434 |
| 7,0             | 232322 | 224026 | 220946 | 221465 | 211970 | 218097 | 203329 | 202672 |
| 8,0             | 266646 | 221950 | 243665 | 219657 | 224203 | 194158 | 206775 | 181456 |
| 10,0            | 219646 | 196502 | 209541 | 187983 | 199023 | 175446 | 189756 | 144246 |

Tablo 4. 68. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

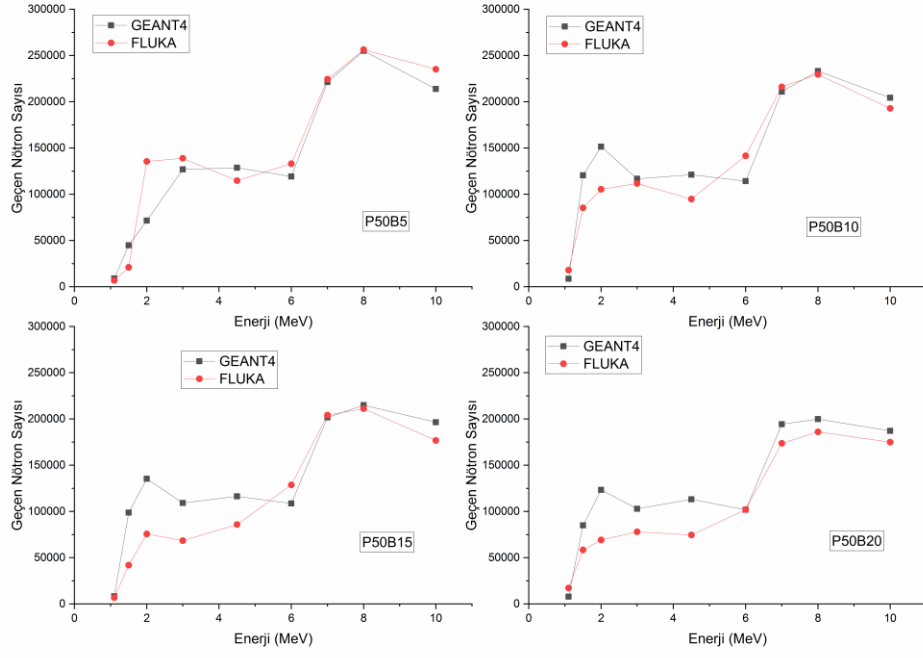
| Enerji<br>(MeV) | P50B5  |       | P50B10 |        | P50B15 |        | P50B20 |        |
|-----------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 8984   | 6814  | 8556   | 17969  | 8325   | 6772   | 7967   | 17181  |
| 1,5             | 144860 | 21012 | 120385 | 85383  | 98765  | 42008  | 84952  | 58334  |
| 2,0             | 171466 | 35561 | 151509 | 105457 | 135266 | 75680  | 123209 | 69115  |
| 3,0             | 126933 | 38829 | 116589 | 111680 | 109113 | 68442  | 102894 | 78005  |
| 4,5             | 128657 | 44772 | 121080 | 94857  | 116312 | 85835  | 113089 | 74509  |
| 6,0             | 119236 | 62943 | 114120 | 141549 | 108652 | 128713 | 101765 | 101947 |
| 7,0             | 221251 | 94341 | 210919 | 216144 | 201561 | 204081 | 194274 | 173654 |
| 8,0             | 254937 | 99613 | 233162 | 229561 | 214923 | 211059 | 199868 | 185962 |
| 10,0            | 213738 | 95094 | 204313 | 192839 | 196435 | 176718 | 187102 | 174905 |

Tablo 4. 69. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayısı

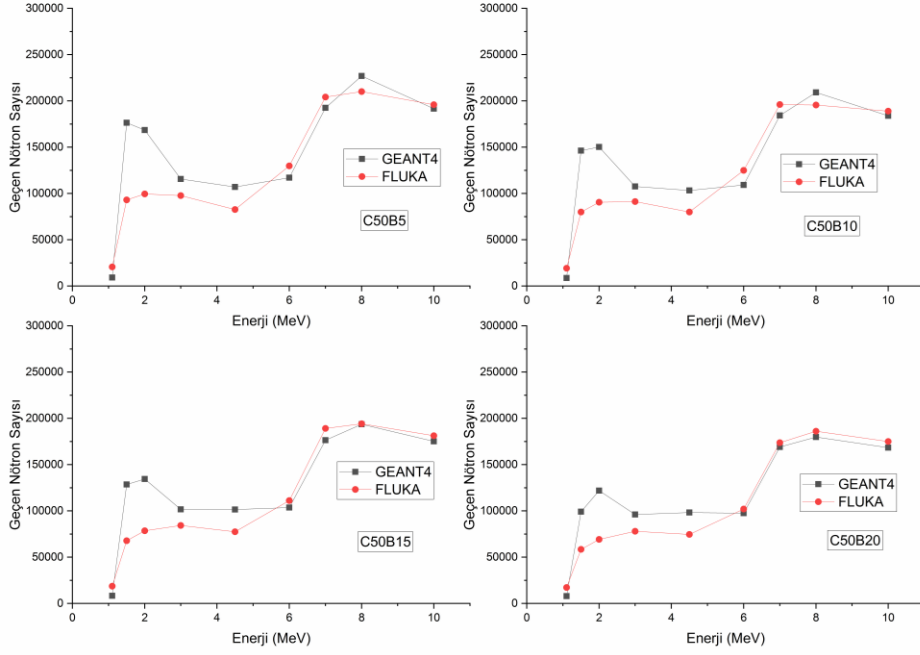
| Enerji<br>(MeV) | C50B5  |        | C50B10 |        | C50B15 |        | C50B20 |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  | GEANT4 | FLUKA  |
| 1,1             | 9096   | 20663  | 8633   | 19238  | 8245   | 18652  | 7886   | 14128  |
| 1,5             | 176356 | 93057  | 146150 | 79976  | 128554 | 67802  | 99042  | 53458  |
| 2,0             | 168441 | 99462  | 150257 | 90474  | 134396 | 78507  | 121874 | 63502  |
| 3,0             | 115660 | 97671  | 107579 | 91232  | 101567 | 84286  | 96030  | 72995  |
| 4,5             | 106915 | 82535  | 103300 | 79946  | 101378 | 77358  | 98138  | 70913  |
| 6,0             | 117067 | 129738 | 109065 | 124909 | 103585 | 111065 | 97423  | 97002  |
| 7,0             | 192406 | 204118 | 184159 | 196026 | 176422 | 189124 | 169029 | 170093 |
| 8,0             | 226937 | 209963 | 209196 | 195498 | 193528 | 194065 | 179805 | 183402 |
| 10,0            | 191601 | 195861 | 183800 | 188867 | 175086 | 181134 | 168332 | 173445 |



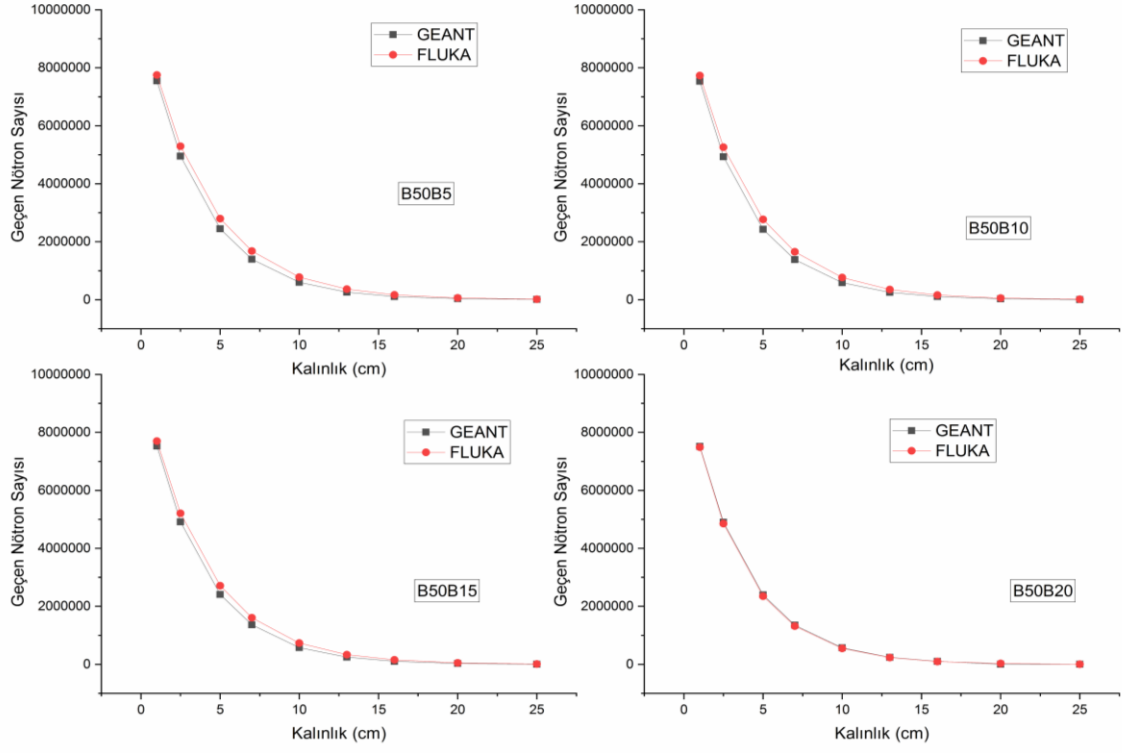
Şekil 4.67. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



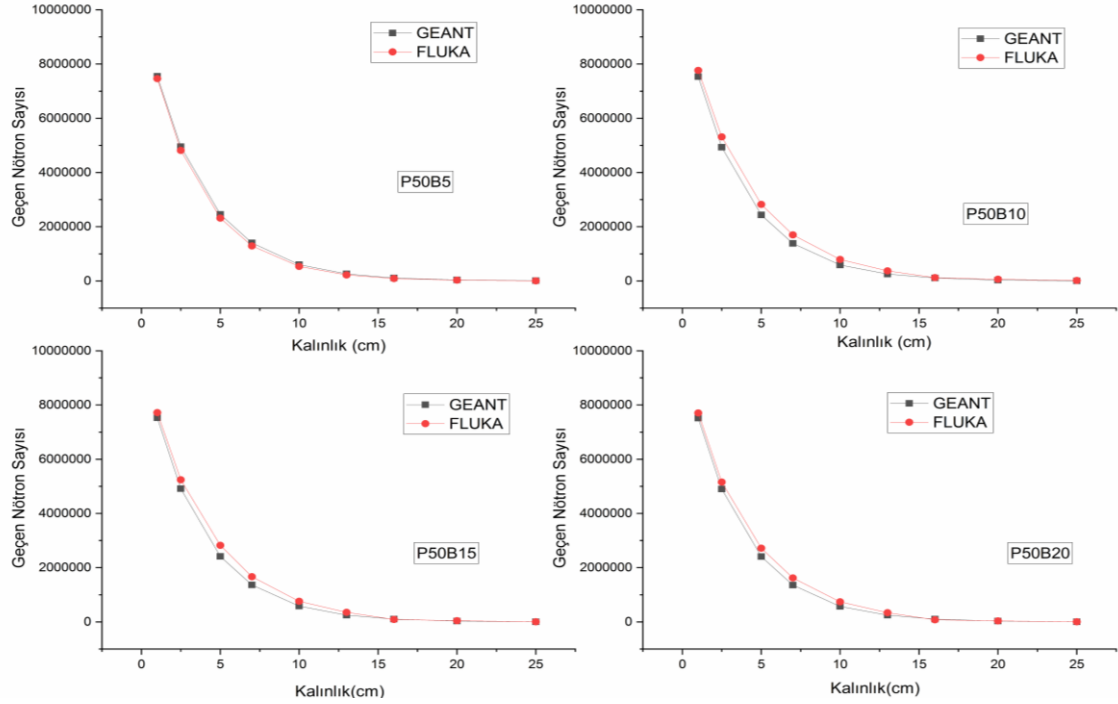
Şekil 4.68. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



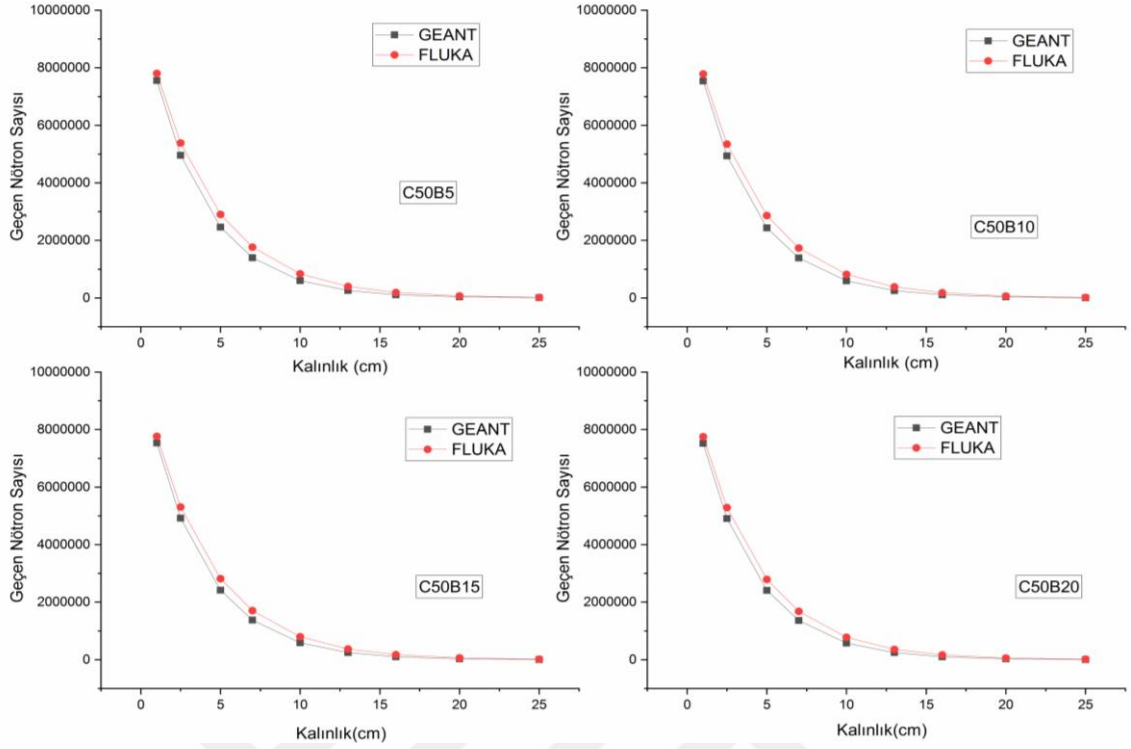
Şekil 4.69. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı 25 cm kalınlığındaki beton numunelerden farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



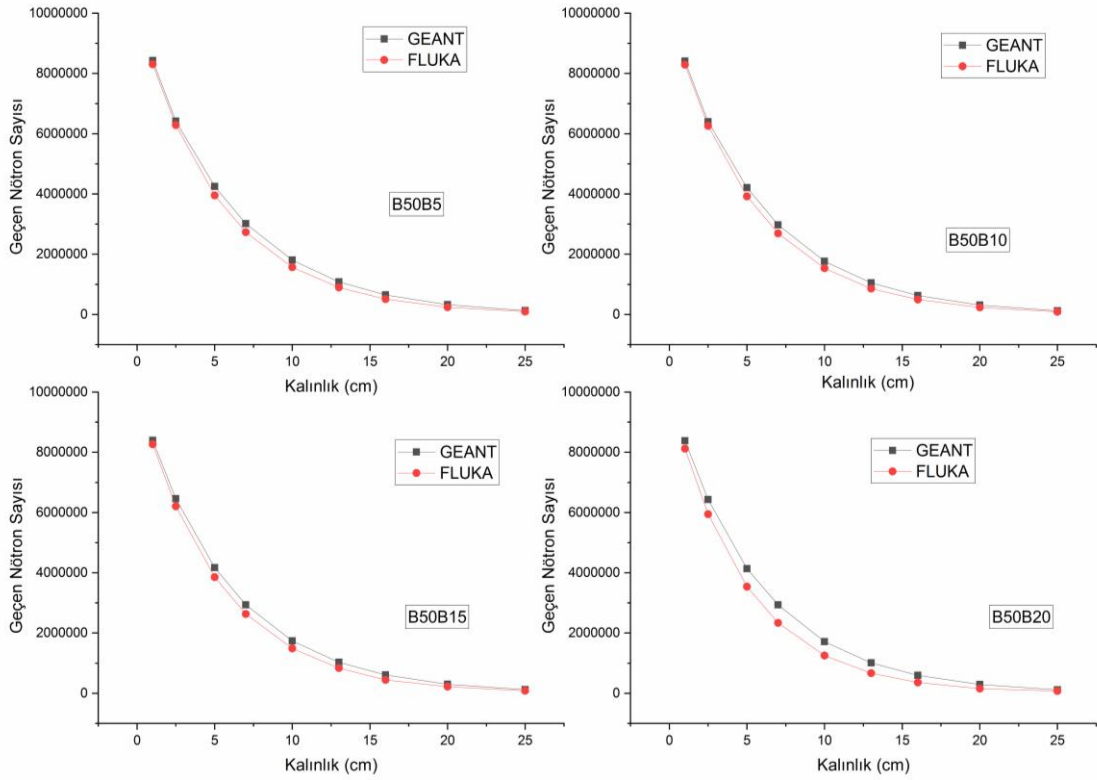
Şekil 4.70. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.71. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda göre geçen nötron sayılarının değişimi

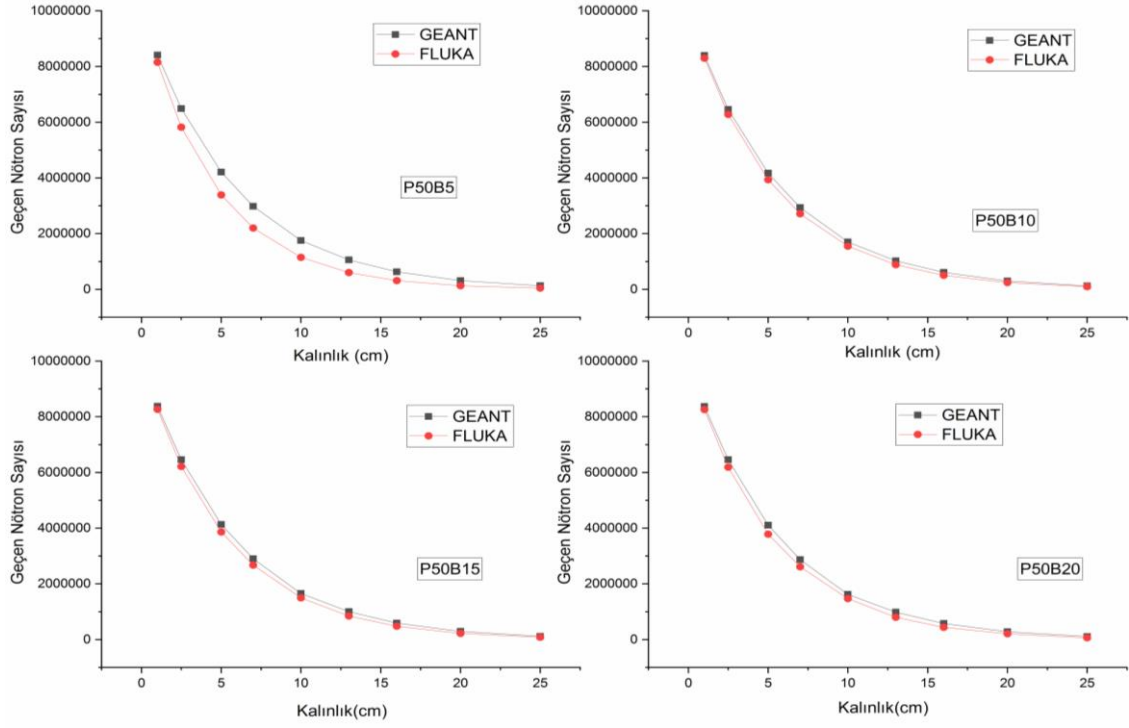


Şekil 4.72. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 1,1 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi

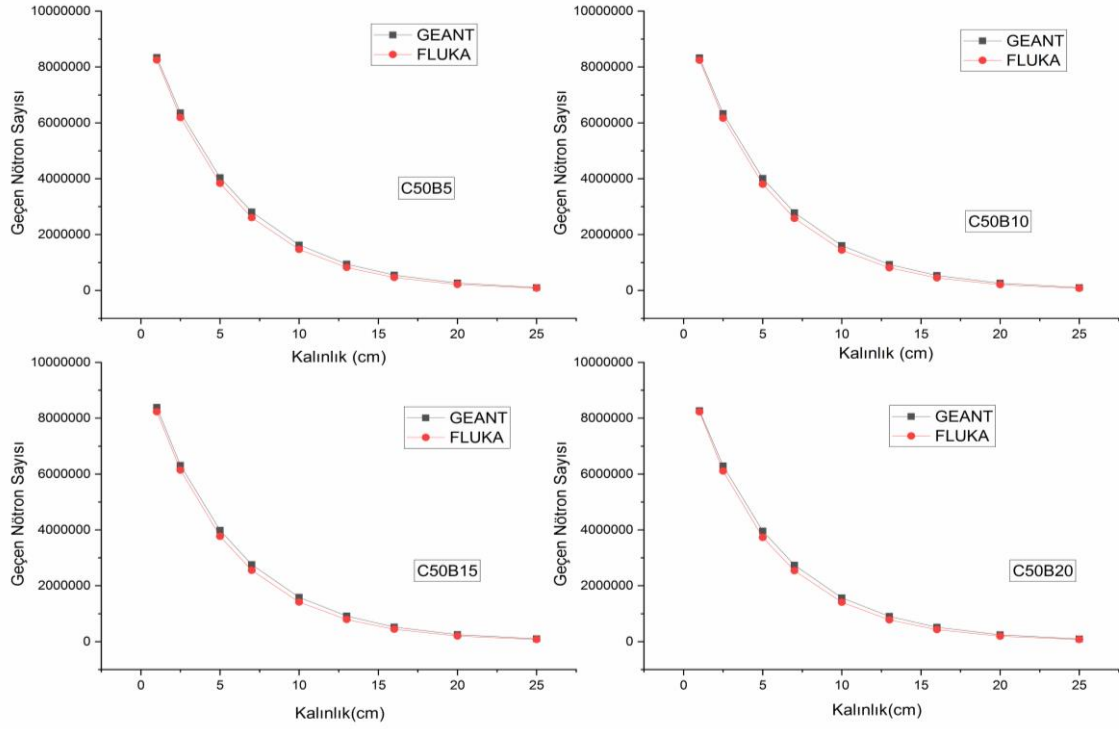


Şekil 4.73. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi

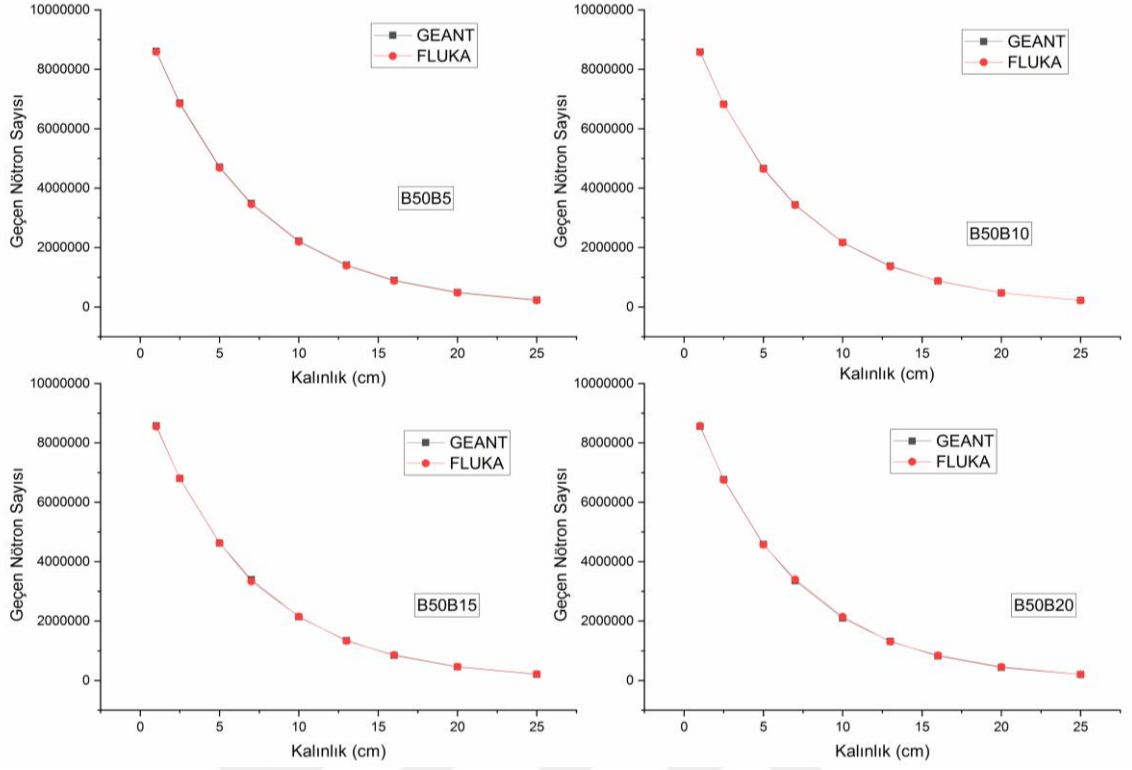




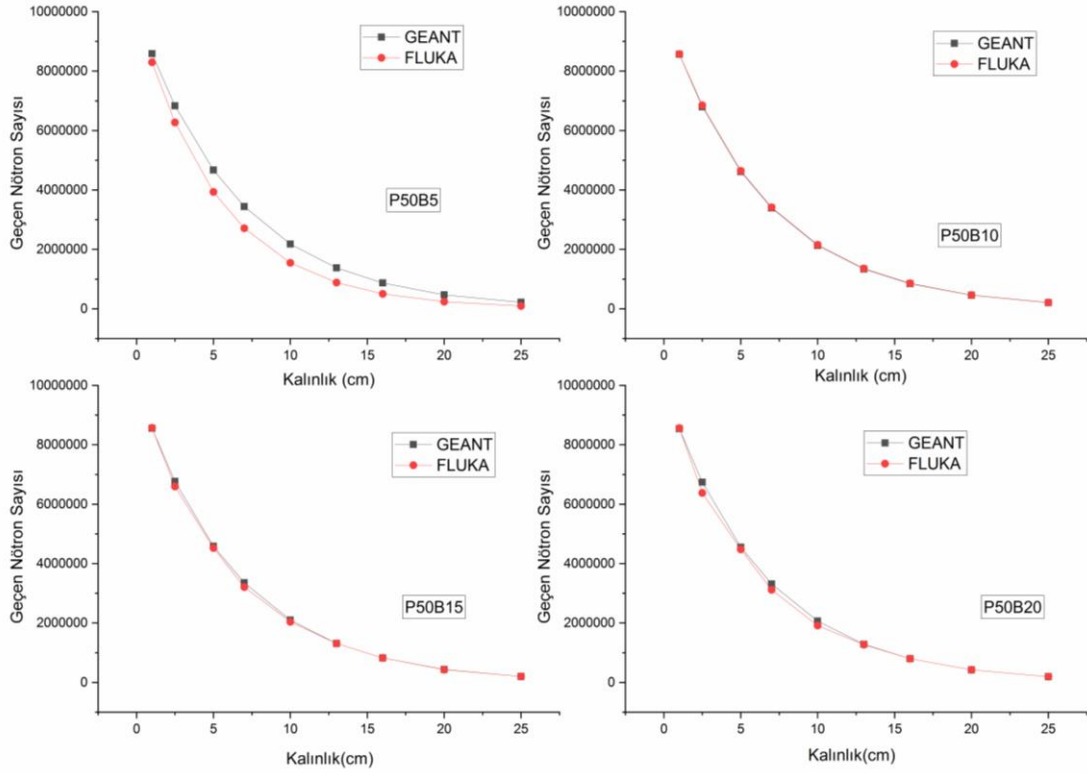
Şekil 4.74. %50 pirinç ve farklı oranlarda  $B_4C$  katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi



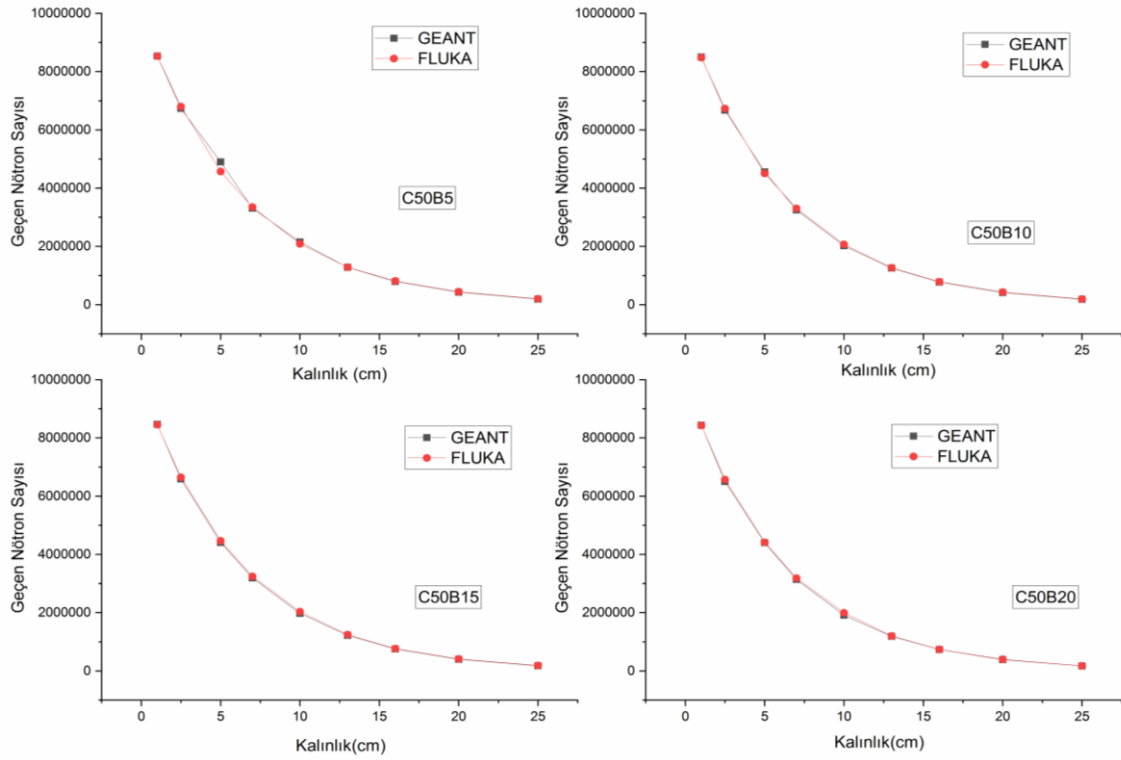
Şekil 4.75. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda  $B_4C$  katkılı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.76. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.77. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı enerjilerde geçen nötron sayılarının değişimi



Şekil 4.78. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin 7 MeV nötron enerjisinde farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının değişimi

Çalışmada kullanılan simülasyon programları aracılığı ile B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin hesaplanan toplam makroskobik tesir kesiti sonuçları aşağıda verilmiştir. 1 cm numune kalınlığında 4,5 MeV nötron enerjisinde 10 milyon nötron gönderilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Toplam makroskobik tesir kesiti, etkileşme olaylarının meydana gelmesi ihtimallerinin toplam ölçüsüdür ve geçen nötron sayısı ile ilişkilendirilir.

Nötronlar için OSY değeri ise GEANT4 yardımı ile hesaplanmıştır. OSY değeri için elde edilen bulgular Tablo 4.70-4.72’de verilmiştir. Bunun dışında hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları, teorik olarak hesaplanmıştır. Bunun için beton numuneler içerisindeki elementlerin kısmi yoğunlukları ve kütle uzaklaştırma tesir kesitlerinden yararlanarak ve karışım kuralı kullanılarak hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 4.73-4.75’de listelenmiş, buna göre çizilen grafikler Şekil 4.79-4.81’de verilmiştir.

Tablo 4. 70. %50 bronz katkı ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri

| Numune | Toplam Makroskobik<br>Tesir Kesidi (cm <sup>-1</sup> ) |        | OSY (mm)              |
|--------|--------------------------------------------------------|--------|-----------------------|
|        | GEANT4                                                 | FLUKA  | GEANT4                |
| B50B5  | 2,0325                                                 | 2,0320 | 4,9136 mm ± 0,2884 mm |
| B50B10 | 2,0331                                                 | 2,0328 | 4,9125 mm ± 0,2883 mm |
| B50B15 | 2,0344                                                 | 2,0343 | 4,9118 mm ± 0,2885 mm |
| B50B20 | 2,0347                                                 | 2,0345 | 4,9110 mm ± 0,2885 mm |
| B50    | 2,0316                                                 | 2,0315 | 4,9187 mm ± 0,2885 mm |
| SB     | 2,0290                                                 | 2,0287 | 4,9286 mm ± 0,2887 mm |

Tablo 4. 71. %50 pirinç katkı ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri

| Numune | Toplam Makroskobik<br>Tesir Kesidi (cm <sup>-1</sup> ) |        | OSY (mm)              |
|--------|--------------------------------------------------------|--------|-----------------------|
|        | GEANT4                                                 | FLUKA  | GEANT4                |
| P50B5  | 2,0343                                                 | 2,0337 | 4,9152 mm ± 0,2882 mm |
| P50B10 | 2,0346                                                 | 2,0342 | 4,9140 mm ± 0,2885 mm |
| P50B15 | 2,0361                                                 | 2,0357 | 4,9113 mm ± 0,2884 mm |
| P50B20 | 2,0367                                                 | 2,0362 | 4,9089 mm ± 0,2885 mm |
| P50    | 2,0324                                                 | 2,0322 | 4,9166 mm ± 0,2885 mm |
| SB     | 2,0290                                                 | 2,0287 | 4,9286 mm ± 0,2887 mm |

Tablo 4. 72. %50 paslanmaz çelik katkı ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkı beton numunelerin 4,5 MeV nötron enerjisi ve 1 cm kalınlık değerinde toplam makroskobik tesir kesitleri ve OSY değerleri

| Numune | Toplam Makroskobik<br>Tesir Kesidi (cm <sup>-1</sup> ) |        | OSY (mm)              |
|--------|--------------------------------------------------------|--------|-----------------------|
|        | GEANT4                                                 | FLUKA  | GEANT4                |
| C50B5  | 2,0364                                                 | 2,0362 | 4,9107 mm ± 0,2886 mm |
| C50B10 | 2,0365                                                 | 2,0365 | 4,9083 mm ± 0,2883 mm |
| C50B15 | 2,0368                                                 | 2,0370 | 4,9104 mm ± 0,2883 mm |
| C50B20 | 2,0386                                                 | 2,0389 | 4,9037 mm ± 0,2885 mm |
| C50    | 2,0345                                                 | 2,0343 | 4,9152 mm ± 0,2885 mm |
| SB     | 2,0290                                                 | 2,0287 | 4,9286 mm ± 0,2887 mm |

Tablo 4. 73. %50 bronz ve farklı oranlar B<sub>4</sub>C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri ( $\Sigma_R$ , cm<sup>-1</sup>)

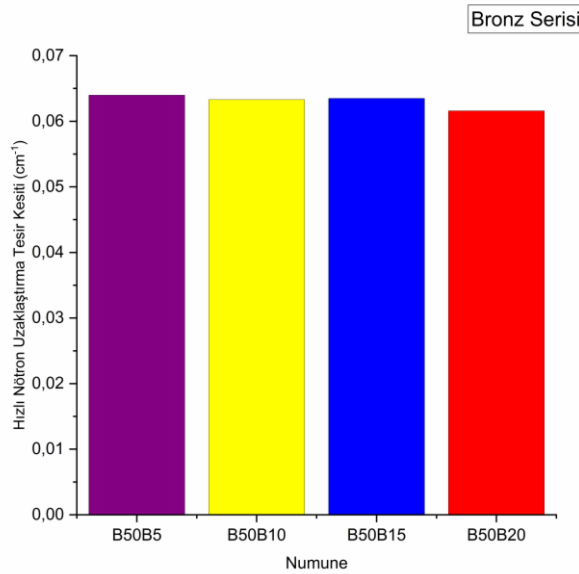
| Numune | B50B5<br>( $\rho$ =2,3289 g/cm <sup>3</sup> ) |                   | B50B10<br>( $\rho$ =2,2334 g/cm <sup>3</sup> ) |                   | B50B15<br>( $\rho$ =2,1751 g/cm <sup>3</sup> ) |                   | B50B20<br>( $\rho$ =2,0532 g/cm <sup>3</sup> ) |                   |
|--------|-----------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------|
|        | Element                                       | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                                     | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                                     | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                                     | Kısmi<br>Yoğunluk |
| O      | 0,5366                                        | 0,0217            | 0,4978                                         | 0,0202            | 0,4700                                         | 0,0190            | 0,4306                                         | 0,0174            |
| Na     | 0,0098                                        | 0,0003            | 0,0092                                         | 0,0003            | 0,0087                                         | 0,0003            | 0,0078                                         | 0,0003            |
| Mg     | 0,0149                                        | 0,0005            | 0,0138                                         | 0,0005            | 0,0131                                         | 0,0004            | 0,0121                                         | 0,0004            |
| Al     | 0,0452                                        | 0,0013            | 0,0420                                         | 0,0012            | 0,0396                                         | 0,0012            | 0,0363                                         | 0,0011            |
| Si     | 0,1425                                        | 0,0042            | 0,1333                                         | 0,0039            | 0,1259                                         | 0,0037            | 0,1154                                         | 0,0034            |
| S      | 0,0172                                        | 0,0005            | 0,0163                                         | 0,0005            | 0,0152                                         | 0,0004            | 0,0140                                         | 0,0004            |
| K      | 0,0100                                        | 0,0002            | 0,0094                                         | 0,0002            | 0,0089                                         | 0,0002            | 0,0080                                         | 0,0002            |
| Ca     | 0,6917                                        | 0,0168            | 0,6421                                         | 0,0156            | 0,6069                                         | 0,0147            | 0,5558                                         | 0,0135            |
| Fe     | 0,0345                                        | 0,0007            | 0,0322                                         | 0,0007            | 0,0302                                         | 0,0006            | 0,0277                                         | 0,0006            |
| Cu     | 0,6386                                        | 0,0119            | 0,5932                                         | 0,0110            | 0,5603                                         | 0,0104            | 0,5133                                         | 0,0095            |
| Sn     | 0,1127                                        | 0,0015            | 0,1047                                         | 0,0014            | 0,0990                                         | 0,0014            | 0,0905                                         | 0,0012            |
| B      | 0,0589                                        | 0,0034            | 0,1092                                         | 0,0063            | 0,1549                                         | 0,0089            | 0,1891                                         | 0,0109            |
| C      | 0,0163                                        | 0,0008            | 0,0304                                         | 0,0015            | 0,0431                                         | 0,0022            | 0,0526                                         | 0,0026            |
| Toplam | 2,3289                                        | 0,0640            | 2,2334                                         | 0,0633            | 2,1751                                         | 0,0635            | 2,0532                                         | 0,0616            |

Tablo 4. 74. %50 pirinç ve farklı oranlar B<sub>4</sub>C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri ( $\Sigma_R$ , cm<sup>-1</sup>)

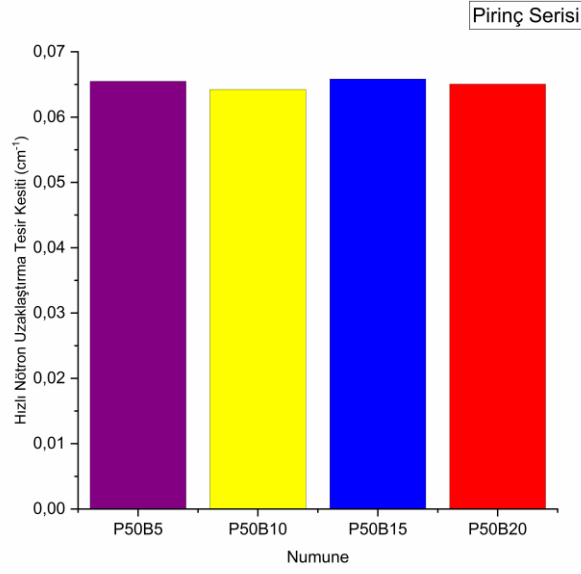
| Numune | P50B5                            |                   | P50B10                           |                   | P50B15                           |                   | P50B20                           |                   |
|--------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
|        | $(\rho = 2,3619 \text{ g/cm}^3)$ |                   | $(\rho = 2,2457 \text{ g/cm}^3)$ |                   | $(\rho = 2,2159 \text{ g/cm}^3)$ |                   | $(\rho = 2,1555 \text{ g/cm}^3)$ |                   |
|        | Element                          | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                       | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                       | Kısmi<br>Yoğunluk | $\Sigma_R$                       | Kısmi<br>Yoğunluk |
| O      | 0,5442                           | 0,0220            | 0,5006                           | 0,0203            | 0,4789                           | 0,0194            | 0,4520                           | 0,0183            |
| Na     | 0,0099                           | 0,0003            | 0,0092                           | 0,0003            | 0,0089                           | 0,0003            | 0,0082                           | 0,0003            |
| Mg     | 0,0151                           | 0,0005            | 0,0139                           | 0,0005            | 0,0133                           | 0,0004            | 0,0127                           | 0,0004            |
| Al     | 0,0458                           | 0,0013            | 0,0422                           | 0,0012            | 0,0403                           | 0,0012            | 0,0382                           | 0,0011            |
| Si     | 0,1445                           | 0,0043            | 0,1341                           | 0,0040            | 0,1283                           | 0,0038            | 0,1211                           | 0,0036            |
| S      | 0,0175                           | 0,0005            | 0,0164                           | 0,0005            | 0,0155                           | 0,0004            | 0,0147                           | 0,0004            |
| K      | 0,0102                           | 0,0003            | 0,0094                           | 0,0002            | 0,0091                           | 0,0002            | 0,0084                           | 0,0002            |
| Ca     | 0,7015                           | 0,0170            | 0,6456                           | 0,0157            | 0,6182                           | 0,0150            | 0,5835                           | 0,0142            |
| Fe     | 0,0350                           | 0,0007            | 0,0323                           | 0,0007            | 0,0308                           | 0,0007            | 0,0291                           | 0,0006            |
| Cu     | 0,5333                           | 0,0099            | 0,4914                           | 0,0091            | 0,4700                           | 0,0087            | 0,4438                           | 0,0083            |
| Zn     | 0,2284                           | 0,0042            | 0,2106                           | 0,0039            | 0,2016                           | 0,0037            | 0,1901                           | 0,0035            |
| B      | 0,0598                           | 0,0034            | 0,1098                           | 0,0063            | 0,1578                           | 0,0091            | 0,1985                           | 0,0114            |
| C      | 0,0165                           | 0,0008            | 0,0305                           | 0,0015            | 0,0567                           | 0,0028            | 0,0552                           | 0,0028            |
| Toplam | 2,3619                           | 0,0654            | 2,2457                           | 0,0642            | 2,2159                           | 0,0658            | 2,1555                           | 0,0650            |

Tablo 4. 75. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlar B<sub>4</sub>C katkısı yapılmış beton numunelerin içeriğindeki elementlerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numunenin toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri ( $\Sigma_R$ , cm<sup>-1</sup>)

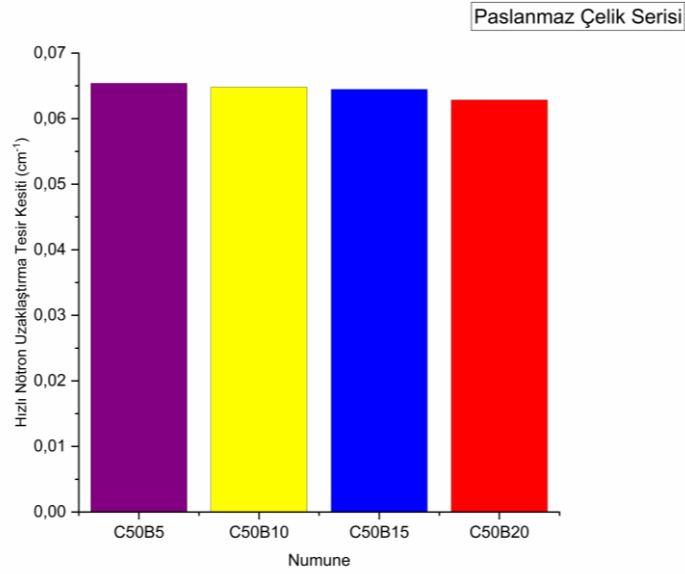
|         | C50B5                            |            | C50B10                           |            | C50B15                           |            | C50B20                           |            |
|---------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| Numune  | $(\rho = 2,2985 \text{ g/cm}^3)$ |            | $(\rho = 2,2113 \text{ g/cm}^3)$ |            | $(\rho = 2,1369 \text{ g/cm}^3)$ |            | $(\rho = 2,0355 \text{ g/cm}^3)$ |            |
| Element | Kısmi                            | $\Sigma_R$ | Kısmi                            | $\Sigma_R$ | Kısmi                            | $\Sigma_R$ | Kısmi                            | $\Sigma_R$ |
|         | Yoğunluk                         |            | Yoğunluk                         |            | Yoğunluk                         |            | Yoğunluk                         |            |
| O       | 0,5296                           | 0,0214     | 0,4929                           | 0,0200     | 0,4618                           | 0,0187     | 0,4268                           | 0,0173     |
| Na      | 0,0097                           | 0,0003     | 0,0091                           | 0,0003     | 0,0085                           | 0,0003     | 0,0077                           | 0,0003     |
| Mg      | 0,0147                           | 0,0005     | 0,0137                           | 0,0005     | 0,0128                           | 0,0004     | 0,0120                           | 0,0004     |
| Al      | 0,0446                           | 0,0013     | 0,0416                           | 0,0012     | 0,0389                           | 0,0011     | 0,0360                           | 0,0011     |
| Si      | 0,1407                           | 0,0041     | 0,1320                           | 0,0039     | 0,1237                           | 0,0036     | 0,1144                           | 0,0034     |
| S       | 0,0170                           | 0,0005     | 0,0161                           | 0,0004     | 0,0150                           | 0,0004     | 0,0138                           | 0,0004     |
| K       | 0,0099                           | 0,0002     | 0,0093                           | 0,0002     | 0,0085                           | 0,0002     | 0,0079                           | 0,0002     |
| Ca      | 0,6827                           | 0,0166     | 0,6357                           | 0,0154     | 0,5962                           | 0,0145     | 0,5510                           | 0,0134     |
| Fe      | 0,5532                           | 0,0118     | 0,5155                           | 0,0110     | 0,4832                           | 0,0103     | 0,4466                           | 0,0096     |
| Cr      | 0,1260                           | 0,0026     | 0,1174                           | 0,0024     | 0,1098                           | 0,0023     | 0,1018                           | 0,0021     |
| Ni      | 0,0816                           | 0,0016     | 0,0761                           | 0,0014     | 0,0712                           | 0,0014     | 0,0660                           | 0,0013     |
| B       | 0,0582                           | 0,0033     | 0,1081                           | 0,0062     | 0,1521                           | 0,0087     | 0,1875                           | 0,0108     |
| C       | 0,0161                           | 0,0008     | 0,0301                           | 0,0015     | 0,0423                           | 0,0021     | 0,0521                           | 0,0026     |
| Mo      | 0,0147                           | 0,0002     | 0,0139                           | 0,0002     | 0,0128                           | 0,0002     | 0,0120                           | 0,0002     |
| Toplam  | 2,2985                           | 0,0654     | 2,2115                           | 0,0648     | 2,1369                           | 0,0644     | 2,0357                           | 0,0629     |



Şekil 4.79. %50 bronz ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin ( $\Sigma_R$ ) karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.80. %50 pirinç ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin ( $\sum_R$ ) karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.81. %50 paslanmaz çelik ve farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile katkılanmış beton numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitinin ( $\sum_R$ ) karşılaştırmalı grafiği

#### 4.7. Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerine Ait Araştırma Bulguları

Üretilen bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin bazı mekanik özellikleri de incelenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalar üretilen betonun kalitesini

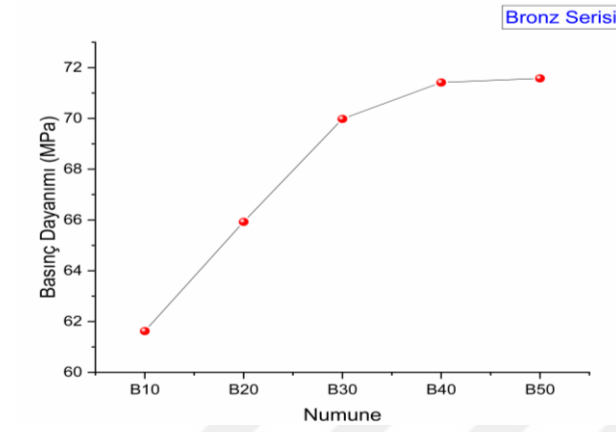
elirlmeye yöneliktir. Üretilen 5x5x5 cm<sup>3</sup> ebatında küp şeklinde olan numelerin basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı (UPV) ve Schmidt yüzey sertliği parametreleri belirlenmiştir. Her bir numuneden 3'er adet üretilmiştir. Daha tutarlı sonuçlar elde etmek adına incelenen parametrelerde 3 numunenin aritmetik ortalama sonucu alınmıştır. Basınç dayanım testleri basınç pres cihazı gerçekleştirilmiştir. Ultra ses geçiş hızı (UPV) deneylerinde okunan zaman değeri eşitlik (2.38)'de yerine konarak UPV değeri hesaplanmıştır. Yine burada herbir numune için ortalama değer alınmıştır. Scdmidt yüzey sertliği deneyi ise ASTM 2001 standartlarına göre çalışan Schmidt çekici gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 4.76'da listelenmiştir.

**Tablo 4. 76.** Üretilen tüm numunelerin ortalama basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve Schmidt yüzey sertliği için elde edilen değerler

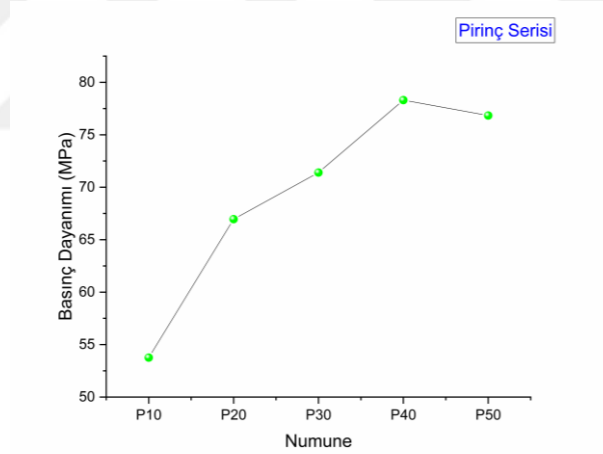
| Numune | Basınç Dayanımı (MPa) | Ultra Ses Geçiş Hızı (km/sa) | Yüzey Sertliği |
|--------|-----------------------|------------------------------|----------------|
| B10    | 53,76                 | 3,21                         | 19,67          |
| B20    | 66,96                 | 3,30                         | 20,33          |
| B30    | 71,40                 | 3,44                         | 19,40          |
| B40    | 78,31                 | 3,40                         | 20,33          |
| B50    | 76,84                 | 3,48                         | 20,67          |
| P10    | 61,63                 | 3,08                         | 20,00          |
| P20    | 65,93                 | 3,14                         | 18,43          |
| P30    | 69,98                 | 3,16                         | 18,67          |
| P40    | 71,41                 | 3,28                         | 18,93          |
| P50    | 71,58                 | 3,36                         | 19,33          |
| C10    | 21,00                 | 2,48                         | 19,67          |
| C20    | 29,00                 | 2,73                         | 21,00          |
| C30    | 31,13                 | 2,88                         | 21,67          |
| C40    | 42,00                 | 3,04                         | 21,33          |
| C50    | 48,00                 | 3,18                         | 22,33          |
| B50B5  | 55,74                 | 3,37                         | 18,33          |
| B50B10 | 48,27                 | 3,08                         | 19,67          |
| B50B15 | 47,28                 | 2,93                         | 20,67          |
| B50B20 | 37,25                 | 2,78                         | 19,50          |
| P50B5  | 47,05                 | 3,25                         | 19,33          |
| P50B10 | 28,84                 | 2,76                         | 18,67          |
| P50B15 | 10,82                 | 2,73                         | 17,67          |
| P50B20 | 7,23                  | 2,38                         | 16,67          |
| C50B5  | 33,84                 | 3,24                         | 17,00          |
| C50B10 | 27,84                 | 3,08                         | 16,67          |
| C50B15 | 19,75                 | 2,59                         | 16,67          |
| C50B20 | 16,99                 | 2,57                         | 15,43          |
| SB     | 36,43                 | 3,16                         | 14,66          |



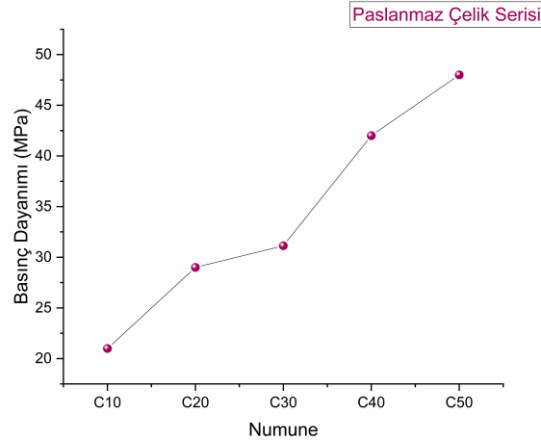
Şekil 4.82-4.87’de bazı basınç dayanımı grafikleri verilmiştir.



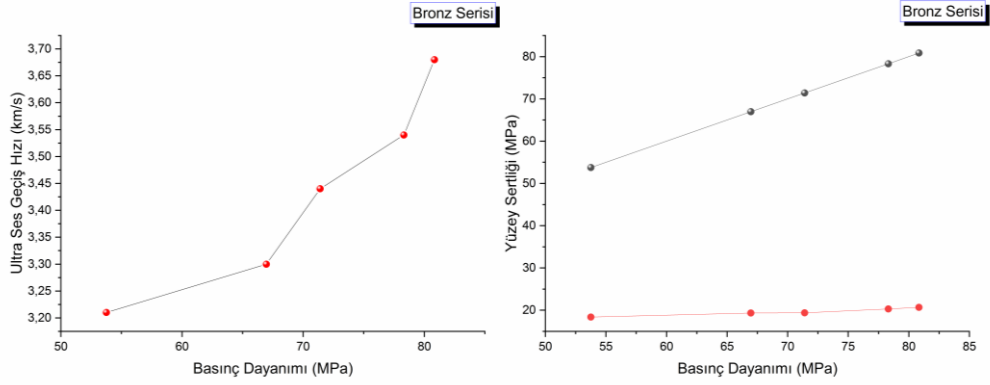
Şekil 4.82. Farklı oranlarda bronz katkıli numunelerin basınç dayanım grafiğı



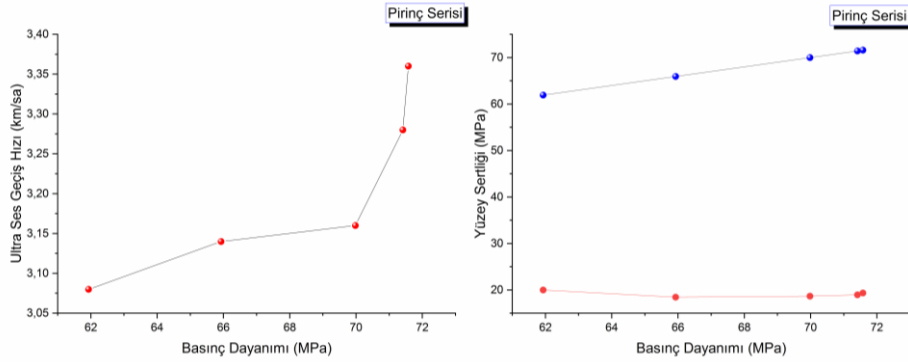
Şekil 4.83. Farklı oranlarda pirinç katkıli numunelerin basınç dayanım grafiğı



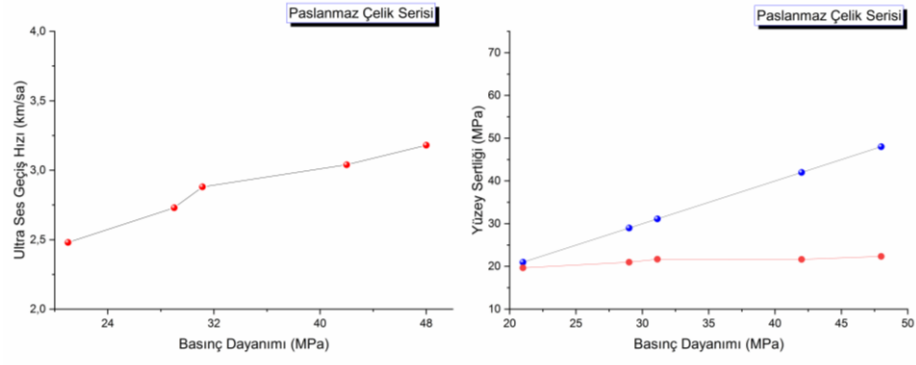
Şekil 4.84. Farklı oranlarda paslanmaz çelik katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği



Şekil 4.85. Farklı oranlarda bronz katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği



Şekil 4.86. Farklı oranlarda pirinç katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği



Şekil 4.87 Farklı oranlarda paslanmaz çelik katkılı numunelerin basınç dayanımının ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliğine karşı grafiği

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında %10, %20, %30, %40 ve %50 bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya bunlara ek olarak %5, %10, %15 ve %20 B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin gama radyasyonu azaltma performanslarını incelemek için kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve radyasyon koruma verimi olmak üzere 7 adet parametre belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar <sup>22</sup>Na, <sup>60</sup>Co, <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs ve <sup>241</sup>Am radyoaktif izotop kaynağından yayımlanan 59,5-1332,5 keV aralığındaki 11 farklı foton enerji değerinde HPGe dedektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen enerji değerleri Tablo 3.4'te, deney geometrisi ise ayrıntılı olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar teorik(WinXCOM), GEANT4 ve FLUKA aracılığı ile edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve aralarında %0,19-10,74 arasında değişen uyum olduğu görülmüştür. Gama radyasyonu belirlenen parametrelere ilişkin sonuçlar Tablo 4.1-4.42, grafikler ise Şekil 4.1-4.42'de verilmiştir.

Nötron radyasyonu zırlama çalışmalarında %50 bronz, pirinç veya paslanmaz çelik katkılanmış beton numunelere %5, %10, %15 ve %20 oranında B<sub>4</sub>C katkısı yapılmış beton numuneler incelenmiştir. Nötron zırlama sadece GEANT4 ve FLUKA simülasyon paketleri kullanılmıştır. Bu kısımda numuneden geçen nötron sayısı 1,1, 1,5, 2, 3, 4,5, 6, 7 ve 10 MeV enerji ve 1, 2,5, 5, 7, 10, 13, 16, 20 ve 25 cm numune kalınlıklarında ayrı ayrı incelenmiştir. 4,5 MeV enerji değerinde ve 1 cm numune kalınlığında toplam makroskobik tesir kesiti ve ortalama serbest yol değerleri de belirlenmiştir. Bunun yanında B<sub>4</sub>C katkılı olarak üretilen bütün numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri belirlenmiştir. Nötron radyasyonu zırlama çalışmalarına ilişkin elde edilen bulgular Tablo 4.43 – 4.75'de, grafikler ise Şekil 4.43 – 4.81'de sunulmuştur.

Ayrıca, üretilen beton numunelerin kullanılabilirliğini incelemek için basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve yüzey sertliği gibi mekanik özellikleri de belirlenmiştir. Bu deneyler sonrasında elde edilen veriler tablo ve grafikler Tablo 4.76'da ve Şekil 4.82-4.87'da sunulmuştur.

Gama radyasyonu zırhlamada kullanılan malzemenin yoğunluğundan bağımsız olan kütle azaltma katsayısı, radyasyon zırhlamada birincil göstergelerden biridir. Farklı oranlarda bronz, pirinç, paslanmaz çelik veya B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin deneysel, teorik, GEANT4 ve FLUKA yardımı ile hesaplanan kütle azaltma katsayılarına ilişkin sonuçlar Tablo 4.1-4.6'da, grafikler de Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir. Deneysel, teorik, GEANT4, FLUKA yöntemleri ile belirlenen kütle azaltma katsayısı arasındaki farklılık < %10,35'tir.

Elde edilen bulgular incelendiğinde hedef numune üzerine gönderilen fotonun enerjisi arttıkça kütle azaltma katsayısının azaldığı, saf betona ikame edilen bronz, pirinç veya paslanmaz çelik alaşımlarının katkı oranı artması ile kütle azaltma katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, % 50 alaşım içerikli numunelere farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ilavesinin yapılması ile kütle azaltma katsayısının azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın artan B<sub>4</sub>C ile arttığı belirlenmiştir.

Tablo ve grafikler incelendiğinde kütle azaltma katsayısı bakımından bütün numune serilerinde en iyi sonucun düşük enerjili 59,5 keV'de olduğu görülmektedir. Düşük enerjilerde kütle azaltma katsayısının çok hızlı düştüğü gözlenmiştir. Bu keskin azalmanın nedeni düşük enerji bölgesinde fotoelektrik tesir kesitinin baskın olmasıdır. Orta enerji bölgesinden sonra keskin bir azalış söz konusu değildir. Bu enerji bölgesinde kütle azaltma katsayısında çok hızlı olmayan bir azalma söz konusudur. Bu enerji bölgesinde Compton saçılması tesir kesiti etkindir. Yüksek enerji bölgesinde yine önemli bir değişim söz konusu değildir. Bu enerji bölgesinde çift oluşumu tesir kesiti baskındır.

Düşük enerji bölgelerinde baskın fotoelektrik tesir kesiti değeri  $Z^{4-5}$  (Z, atom numarası) ve  $E^{-3,5}$  (E, foton enerjisi) ile değişir. Orta enerji bölgesinde baskın Compton saçılması tesir kesiti değeri Z ve  $E^{-1}$  ile değişirken, yüksek enerji bölgesinde baskın çift oluşum tesir kesiti değeri  $Z^2$  ve E ile değişmektedir. Bu bağımlılıklar düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki kütle azaltma katsayısındaki değişimleri izah etmektedir.

Çalışılan bütün numuneler içerisinde 59,5 keV enerjide, kütle azaltma katsayısı farklı oranlarda bronz katkılı numuneler arasında en yüksek sonucu veren numune B50 kodlu numunedir. Bu enerjide B50 numunesi SB ile karşılaştırıldığında % 128,46 oranında bir iyileşme gözükmemektedir. Bu enerji değerinde farklı oranlarda pirinç katkılı numunelerde

ise en yüksek sonucu veren P50 kodlu numunedir. 59,5 keV enerjide P50 kodlu numune SB ile karşılaştırıldığında %79,86 oranında bir iyileşme vardır. 59,5 keV enerji değerinde farklı oranlarda paslanmaz çelik alaşımı ile katkılanmış numuneler incelendiğinde en yüksek sonucu veren C50 numunesidir. SB ile karşılaştırıldığında ise %57,71 oranında bir artış söz konusudur. Benzer karşılaştırma 81 keV’de SB ile yapıldığında B50 için % 81,9, P50 için %48,8, C50 için ise %31,2’lik bir iyileşme söz konusudur. Buradan bronz katkılı numunelerin gama radyasyonu zırhlaması için en uygun katkılı beton olduğu sonucuna varılabilir.

B50, P50 ve C50 kodlu numunelere %5, %10, %15 ve % 20 B<sub>4</sub>C ilave edilmesi ile üretilen beton numunelerin kütle azaltma katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. % 20 B<sub>4</sub>C katkılı B50B20 numunesi B50 ile karşılaştırıldığında %18,29’luk, %20 B<sub>4</sub>C katkılı P50B20 numunesi P50 ile kıyaslandığında %9,61 oranında ve %20 B<sub>4</sub>C katkılı C50B20 numunesi C50 ile karşılaştırıldığında %11,58’lik bir düşüş görülmüştür. Bu sonuçlara göre B<sub>4</sub>C oranının artması çalışılan numunelerde gama radyasyonu zırhlama etkisini azaltmaktadır. Bu düşüşe neden olarak, kullanılan alaşımlara göre B<sub>4</sub>C’ün yoğunluğunun az olması gösterilebilir. Katkılı beton numuneleri kütle azaltma katsayıları yönünden sıralarsak bronz serisi > pirinç serisi > paslanmaz çelik serisi olarak sıralanmaktadır. Aynı sıralama B<sub>4</sub>C katkılı numuneler içinde yapılabilir.

Kütle azaltma katsayısı yardımı ile belirlenen ilk önemli parametre lineer azaltma katsayısıdır. Yapılan çalışmada lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısının malzemenin yoğunluğu ile çarpımı sonucu bulunmuştur. Bu yüzden malzemenin yoğunluğu kütle azaltma katsayısının aksine gama radyasyonu zırhlamasını etkileyen bir etkidir. Lineer azaltma katsayısı için elde edilen bulgular Tablo 4.7-4.12’de ve Şekil 4.7-4.12’de verilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde hedef numune üzerine gönderilen foton enerjisinin artması ile lineer azaltma katsayısının azaldığı ve SB numunesine eklenen bronz, pirinç veya paslanmaz çelik katkısının oranının artması ile lineer azaltma katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak %50 alaşım içerikli numunelere farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ilavesinin yapılması ile lineer azaltma katsayısının azaldığı görülmüştür. Hedef üzerine gönderilen foton enerjisindeki artış ile lineer azaltma katsayısında hızlı bir düşüş görülmektedir. Orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise düşüş daha yavaştır. Bu parametrede de kütle azaltma katsayısında olduğu gibi fotoelektrik etki,

Compton saçılması ve çift oluşumu bahsedilen enerji bölgelerinde etkindir. Elde edilen lineer azaltma katsayısı sonuçlarına göre gama radyasyonu zırhlaması için en iyi sonucun bronz katkılı beton numuneler olduğu tespit edilmiştir. Bütün numune serilerinde 59,5 keV foton enerjisinde en yüksek lineer azaltma katsayısına ulaşılmıştır. Dolayısı ile düşük enerjilerde çalışılan numunelerin daha iyi gama radyasyonunu zırhladığı sonucuna varılmıştır.

Bir sonraki aşamada yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD) ve ortalama serbest yol (OSY) değerleri belirlenmiştir. Bu üç parametre de lineer azaltma katsayısı yardımı ile hesaplanmıştır. Yarı kalınlık değeri, ilk baştaki radyasyon şiddetini yarıya düşürecek malzeme kalınlığını, onda-bir kalınlık değeri başlangıçtaki radyasyon şiddetinin %10'a düştüğü kalınlığı ve ortalama serbest yol ise başlangıçtaki radyasyon şiddetinin %36,8'lik miktarının geçebildiği malzeme kalınlığını ifade etmektedir. Bu üç parametre ile lineer azaltma katsayısı arasında ters orantı vardır. Elde edilen parametre değerlerinin küçük olması, malzemenin radyasyon zırhlama açısından kullanılabilir olduğunu ifade etmektedir. YKD için elde edilen bulgular Tablo 4.13-4.18 ve Şekil 4.13-4.18'de, OKD için Tablo 4.19-4.24 ve Şekil 4.19-4.24'te, OSY değerleri için Tablo 4.25-4.30 ve Şekil 4.25-4.30'da sunulmuştur.

YKD, OKD ve OSY için elde edilen bulgular incelendiğinde foton enerjisinin artması ile her üç parametrenin değeri de artmıştır. Bir başka deyişle malzeme üzerine gönderilen foton enerjisi artıkça radyasyon zırhlama için kullanılacak malzemenin kalınlığını artırmak gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YKD değeri açısından en iyi sonucun B50 numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. 59,5 keV enerji değerinde SB numunesinin YKD değeri 0,7886 cm iken B50 numunesinin YKD değeri 0,2589 cm, P50 numunesinin YKD değeri 0,3420 cm ve C50 numunesinin YKD değeri 0,4365 cm olarak belirlenmiştir. En yüksek enerji olan 1332,5 keV enerji değerinde ise B50 numunesinin YKD değeri 5,0582 cm, P50 numunesinin 5,2079 cm ve C50 numunesinin ki ise 5,5110 cm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre enerji değeri artıkça YKD değeri artmaktadır. En iyi sonucun B50 numunesinde olduğu açıktır. Bu sonuçlara göre kıyaslama yapılırsa bronz katkılı numuneler radyasyon zırhlama malzemesi olarak diğer alaşımlarla katkılanan numunelere göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Benzer bir karşılaştırma OKD değerleri için yapılabilir. 59,5 keV enerjide OKD değeri SB için 2,6196 cm iken B50 için 0,8599 cm, P50 için 1,1360 cm ve C50 için 1,4500 cm olarak belirlenmiştir. 81,0 keV enerji değerinde SB için 4,1963 cm iken B50 için 1,7302 cm, P50 için 2,1924 cm, C50 için 2,7747 cm olarak elde edilmiştir. OSY değerleri kendi içinde karşılaştırıldığında en olumlu sonuçların bütün enerji değerlerinde bronz serisine ait olduğu gözlemlenmiştir.

59,5 keV enerji değerinde OSY değeri SB numunesi için 1,1377 cm iken, B50 numunesi için 0,3734 cm, P50 için 0,4934 cm ve C50 için 0,6297 cm olarak gerçekleşmiştir.

B50, P50 ve C50 numunelerine B<sub>4</sub>C katkısının yapılması ise YKD, OKD ve OSY değerlerini olumsuz etkilemektedir. 59,5 keV enerjide YKD değeri B50 numunesi için 0,2589 cm iken, B50B5 için 0,2822 cm, P50 için 0,3420 cm iken P50B5 için 0,3538 cm, C50 için 0,4365 cm iken C50B5 için 0,4393 cm olarak gerçekleşmiştir. 59,5 keV'de YKD sonucu B50 için 0,2589 cm iken B50B20 için 0,3257 cm, P50 için 0,3420 cm iken P50B20 için 0,4352 cm ve C50 için 0,4365 cm iken C50B20 için 0,5394 cm olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle B<sub>4</sub>C katkısı gama radyasyonu zırhlama için gerekli olan malzemenin kalınlık değerini artırmaktadır. Buna neden olarak B<sub>4</sub>C'ün yoğunluğunun kullanılan alaşımlara göre düşük olması gösterilebilir. YKD, OKD ve OSY parametrelerinin deneysel ile teorik, GEANT4 ve FLUKA sonuçları arasında sırasıyla %0,54-6,45, %0,41-7,13, %0,42-7,38 oranında farklılık bulunmaktadır. Bu farklılık oranları da deneysel belirsizlikler içinde kalmaktadır.

Bir diğer önemli parametre etkin atom numarası ( $Z_{etk}$ ) değeridir. Elde edilen kütle azaltma katsayıları kullanılarak bronz, pirinç, paslanmaz çelik ve B<sub>4</sub>C katkılı beton numunelerin etkin atom numaraları belirlenmiştir. Tablo 4.31-4.36 ve Şekil 4.31-4.36'da  $Z_{etk}$  değerleri sunulmuştur. Foton enerjisi arttıkça  $Z_{etk}$  azaldığı ancak katkı miktarı arttıkça  $Z_{etk}$  değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. 59,5 keV'de  $Z_{etk}$  değeri SB numunesi için 15,7775 iken B10 numunesi için bu değer 18,9367 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar kıyaslandığında %20,22 oranında bir artış olmuştur. B50 numunesine ait elde edilen  $Z_{etk}$  değeri, SB numunesi ile karşılaştırıldığında %57,15'lik bir artış söz konusudur. P10 numunesinin  $Z_{etk}$  değeri incelendiğinde benzer bir sonuç vardır ve artış oranı %16,6'dır. P50 numunesi SB ile karşılaştırıldığında %35,11'lik bir artış söz konusudur. C10



numunesi için de aynı şeyden bahsetmek mümkündür. Yine 59,5 keV’de artış oranı %3,61 olarak belirlenmiştir. C50 numunesinin  $Z_{etk}$  değeri SB ile kıyaslandığında ise %26,05 oranında arttığı belirlenmiştir.

Eğer radyasyon zırhlamada kullanılacak olan malzemeyi  $Z_{etk}$ ’ne göre belirleyecek olursak, en iyi gama radyasyonu zırhlama özelliğine sahip numuneler bronz katkılı olan numunelerdir. Bunu sırası ile pirinç ve paslanmaz çelik katkılı numuneler izlemektedir. Sonuç olarak daha büyük  $Z_{etk}$  değerine sahip olan zırhlama materyalinin fotonun enerjisini azaltma ihtimali düşük  $Z_{etk}$  değerine sahip olan materyale göre daha yüksek olduğu söylenebilir.

%50 alaşım içerikli numunelere %5-10-15-20 oranında  $B_4C$  eklendiğinde ise  $Z_{etk}$  değerinde düşüş gözlenmektedir. Çalışılan en yüksek enerji olan 1332,5 keV enerjide  $Z_{etk}$  değeri B50B5 numunesinde 14,4755, B50B10’da 13,7337, B50B15’te 13,1011, B50B20 numunesinde ise 12,5551 olarak belirlenmiştir. 59,5 keV’de ise P50B5’te 21,1170, P50B10’da 20,7698, P50B15’te 20,3859 ve P50B20 numunesinde ise  $Z_{etk}$  değeri 19,5730 olarak belirlenmiştir. 356,02 keV enerjide C50B5 numunesi için 14,3353, C50B10 numunesinde ise 13,6364, C50B15 numunesi için 13,0354 ve C50B20 numunesi için 12,5129 olarak belirlenmiştir.  $B_4C$  katkılı numunelerde  $Z_{etk}$  değerinin azalması yoğunluğa ve numunenin bileşiminde yer alan elementlerin kütle azaltma katsayılarına bağlanabilir.

Radyasyon zırhlamada en önemli parametrelerden biri radyasyon koruma verimliliğidir. Tablo 4.37-4.42 ve Şekil 4.37-4.42’de bu parametreye ait sonuçlar sunulmuştur. 81 keV’de SB numunesinde radyasyon koruma verimi %46,53 iken B10 numunesinde %56,83, B50 numunesinde bu oran %78,12’ye çıkmaktadır. Benzer bir karşılaştırma pirinç alaşımı katkılı numuneler için yapıldığında 81 keV’de SB için radyasyon koruma verimliliği % 46,83 iken P10 numunesinde %52,22, P50 numunesinde %70,59’a yükselmiştir. Paslanmaz çelik alaşımı katkılı numunelerde de aynı durumdan bahsedebiliriz. 81 keV enerji değerinde C10 numunesinin koruma verimi %49,06 iken C50 numunesinde %58,66 olarak gerçekleşmiştir. Alaşım katkısı yapılmış beton numunelerde radyasyon koruma verimi değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Tablo ve Şekil 4.37-4.42 incelendiğinde radyasyon koruma verimi açısından en yüksek sonuçların bronz katkısı yapılmış numunelerde olduğu açıktır. %50 alaşım içerikli numunelere  $B_4C$

katkısının yapılması ile radyasyon koruma veriminde düşüşler gözlemlenmiştir. B<sub>4</sub>C katkısının yapılması numunelerin yoğunluğunu azaltmıştır. Bu nedenle B<sub>4</sub>C katkısı yapılan numunelerin radyasyon koruma veriminde azalma olduğu söylenebilir.

Üretilen beton numunelerin gama radyasyon zırhlama yetenekleri dışında B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin nötron radyasyonu zırhlama parametreleri de incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre GEANT4 ve FLUKA yardımı ile belirlenen numuneden geçen nötron sayıları arasında en iyi sonuçların B<sub>4</sub>C miktarının artırıldığı numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. GEANT4'e göre 1,1 MeV enerji değerinde ve 1 cm numune kalınlığında B50B5 numunesinden geçen nötron sayısı %75,49 iken, B50B20 numunesinden geçen nötron sayısı %75,14, P50B5 numunesinden %75,52 iken P50B20 numunesinden geçen nötron sayısı %75,15, C50B5 numunesinden geçen nötron sayısı %75,57 iken C50B20 numunesinden %75,19 olarak gerçekleşmiştir. FLUKA'ya göre 1,1 MeV enerji değerinde geçen nötron sayısı B50B20'de %74,87, P50B20'de %74,16 değerinde olmuştur. 1,1 MeV ve 1 cm kalınlık değerinde C50B20'de geçen nötron sayısı %77,49 olarak gerçekleşmiştir.

GEANT4'e göre 4,5 MeV enerji değerinde ve 1 cm numune kalınlığında B50B20 numunesinde %83,18, P50B20'de %83,68 ve C50B20'de %82,68 oranında nötron geçişi gözlemlenmiştir. FLUKA'ya göre 4,5 MeV ve 1 cm numune kalınlığında geçen nötron sayısı oranı B50B20'de %81,22, P50B20'de %82,56, C50B20'de ise %82,23 olarak gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi numunelere B<sub>4</sub>C katkısının yapılması nötron geçişini genel olarak azaltmıştır. İki simülasyon kodunda genel olarak aynı davranışlarda bulunmuştur. Numune kalınlıklarının artması ile nötron geçişinin azaldığı görülmektedir. 25 cm numune kalınlığında ve 10 MeV enerji değerinde bütün numunelerde nötron geçişi bütün numunelerde %10'nun altına düşmüştür. Bu sonuçta, üretilen B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin nötron radyasyonu için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, B<sub>4</sub>C katkısının artması ile nötron makroskobik tesir kesitlerinin değerlerini artırmıştır. Bor elementinin nötron etkileşim tesir kesitinin malzeme içerisindeki diğer elementlere göre yüksek olması, bu sonuçları açıklamaktadır. İncelenen diğer parametreye göre OSY değeri B<sub>4</sub>C katkısının artması ile azalmıştır ki bu sonuçta nötron geçişi ile uyumlu bir sonuçtur. İncelenen son parametre hızlı nötron uzaklaştırma tesir

kesitidir ( $\Sigma_R$ ). Teorik olarak hesaplanan bu parametre numune içerisinde yer alan elementlerin kütle uzaklaştırma tesir kesiti ve ilgili elementin kısmi yoğunlukları dikkate alınarak belirlenmiştir. Her bir elementin  $\Sigma_R$  değeri toplanarak toplam  $\Sigma_R$  elde edilmiştir. Elde edilen  $\Sigma_R$  değerinin küçük olması numunenin nötronla etkileşme ihtimalinin azaldığını belirtmektedir.

Yapılan radyasyon zırhlama çalışmalarına ek olarak üretilen numunelerin basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve Schmidt yüzey sertliği belirlenmiştir. Tablo 4.76 incelendiğinde basınç dayanımı en yüksek olan numunelerin bronz katkılı numuneler olduğu görülmektedir. Daha sonrasında pirinç ve paslanmaz katkılı beton numuneler gelmektedir. SB numunesi ile karşılaştırma yapıldığında bronz katkılı numunelerin tamamı basınç dayanımı noktasında SB numunesinden daha iyi sonuçlar vermektedir. En yüksek basınç dayanımına sahip B50 numunesi SB numunesine göre %214,96 oranında bir artış sağlamıştır. Buna neden olarak beton bileşenleri ile bronz arasında daha homojen bir yapının oluşma ihtimali gösterilebilir.

Yapılan çalışmalara göre ultra ses geçiş hızı (UPV) deneylerinde en yüksek sonucu veren B50 numunesi P50 numunesine göre %14,47, C50 numunesine göre de %25,18 daha iyi sonuç vermiştir. Numuneler arasındaki UPV değerlerinde oluşan farklılığın numunelerde meydana gelen boşlukların neden olduğu söylenebilir.

Yüzey sertliği parametrelerinde ise en yüksek sonucu paslanmaz çelik katkılı numuneler vermiştir. Buna paslanmaz çelik bileşimindeki Ni, Cr, Mo gibi elementlerin kimyasal yapısı sebep olduğu düşünülmektedir.

%50 alaşım içerikli numunelere B<sub>4</sub>C katkısı yapıldığında bütün numunelerin basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir. Numunelere eklenen B<sub>4</sub>C miktarı arttıkça UPV ve yüzey sertliği değerleri de azalmıştır. Dolayısı ile B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin mekanik özelliklerinde düşüş eğilimi gerçekleşmiştir. Çalışılan bütün numunelerin mekanik parametrelerinin, numunelere B<sub>4</sub>C eklenmesi ile düştüğü gözlemlenmiştir. Buna neden olarak SB numunesine eklenen B<sub>4</sub>C miktarının artması ile numunedeki B<sub>4</sub>C'ün kapladığı

yüzey alanının artması gösterilebilir. Bu artış numune üretim aşamasında su/çimento oranının artırılması ile giderilebilmektedir.

Elde edilen bütün bulgular incelendiğinde;

Üretilen alaşım katkılı beton numuneler gama radyasyonuna karşı zırhlamada kullanılabilir.

Gama radyasyon zırhlamada alaşım katkılı beton numunelere B<sub>4</sub>C katkısının gama radyasyonu zırhlama kapasitesini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

B<sub>4</sub>C katkılı numunelerin nötron radyasyonu zırhlamada iyi sonuçlar verdiği ve bu yüzden de nötron radyasyonuna karşı B<sub>4</sub>C katkılı beton numuneler kullanılabilir.

Gama radyasyonu zırhlama için 7 adet parametrede de bronz katkılı numunelerin gama radyasyonu zırhlama kapasitesinin daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Gama radyasyonu zırhlama kabiliyetlerine göre sıralama yapılacak olursa en iyi radyasyon zırh malzemesi olarak bronz > pirinç > paslanmaz çelik katkılı numuneler olduğu gözlemlenmiştir.

Nötron radyasyonu zırhlamada genel olarak 1,1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV ve 3 MeV enerji değeri hariç olmak üzere çalışılan enerji değerlerinde B<sub>4</sub>C katkılı paslanmaz çelik numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Numune kalınlığının ve B<sub>4</sub>C katkısının artması ile nötron geçişinin azaldığı görülmüştür. Nötron radyasyonu zırhlama kabiliyetlerine göre sıralama yapılacak olursak 1,1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV ve 3 MeV hariç en iyi nötron radyasyon zırh malzemesi olarak paslanmaz çelik > pirinç > bronz katkılı numuneler olarak sıralanmaktadır.

Alaşım katkılı beton numunelere B<sub>4</sub>C katkısının hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri sonucunu kısmi yoğunluklar nedeni ile çok etkilemediği ancak numunelerin nötron geçişlerini destekler nitelikte olduğu gözlemlenmiştir.

Üretilen numunelerin basınç dayanımının ve ultra ses geçiş hızı parametrelerinde bronz katkılı numunelerde en yüksek sonuçların olduğu, paslanmaz çelik katkılı numunelerde ise Schmidt yüzey sertliğinin en yüksek sonuçlar olduğu ve bütün numunelerde B<sub>4</sub>C katkısının mekanik parametre değerlerini düşürdüğü görülmüştür.

Bütün bu sonuçlar, üretilen katkılı betonların radyasyonun yoğun olduğu alanlarda, nükleer santrallerde, tıbbi uygulama yapan alanlarda, araştırma-geliştirme laboratuvarlarında radyasyon zırhlama açısından alternatif malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



## KAYNAKLAR

Abdalla, A. A., Al-Naggar, T. I., Bashiri, A. M. and Alsareii, S. A. (2022). Radiation shielding performance for local granites. *Progress in Nuclear Energy*, 150 (104294).

Abdel-Aziz, M. M., Gwaily, S. E., Makarious, A. S. and El-Sayed Abdo A. (1995). Ethylene-propylene diene rubber/low density polyethylene/boron carbide composites as neutron shields, *Polym. Degrad. Stab.*, 50(2), 235-240.

Abdullah, Y., Yusof, M.R., Muhamad, A., Samsu, Z. and Abdullah, N.E. (2010). Cement-boron carbide concrete as radiation shielding material. *Journal of Nuclear and Related Technologies*, 7(2) 74–79.

Agar, O., Sayyed, M. I., Akman, F., Tekin, H. O. and Kaçal, M. R. (2019). An extensive investigation on gamma ray shielding features of Pd/Ag-based alloys. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 853-859.

Agar, O., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Korkmaz, M. E., Culfa, O. and Ertugay, C. (2019). Experimental investigation of photon attenuation behaviors for concretes including natural perlite mineral. *Results in Physics*, 12, 237-243.

Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... and Geant4 Collaboration., GEANT4—a simulation toolkit. (2003). *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303.

Ahmed, S. N. (2007). *Chapter 1-Properties and sources of radiation, in Physics and Engineering of Radiation Detection*, Elsevier, p.1-64.

Akkurt, I. and Malidarre, R. B. (2022). Physical, structural, and mechanical properties of the concrete by FLUKA code and phy-X/PSD software. *Radiation Physics and Chemistry*, 193(109958).

Akkurt, I., Al-Obaidi, S., Akyildirim, H. and Günoğlu, K. (2022). Neutron shielding for  $^{252}\text{Cf}$  source: FLUKA simulations and measurements. *Iran Journal Science Technology Transactions A:Science*, 46, 1055–1064.

Akkurt, I., Basyigit, C., Mavi, B., Akkaş, A. ve Günoğlu, K. (2011). Yüksek fırın cürufllu betonların radyasyon soğurma karakteristiklerinin belirlenmesi. *Journal of New World Sciences Academy*, 6(4), 1175-1181.

Akman, F., Durak, R., Turhan, M. F. ve Kaçal, M. R. (2015). Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients near the K edge in some samarium compounds, *Applied Radiation and Isotopes*, 101, 107-113.

Alfryyan, N., Alrowaili, Z. A., Somaily, H. H., Olarinoye, I. O., Alwadai, N., Mutuwong, C. and Al-Buriahi, M. S. (2022). Comparison of radiation shielding and elastic properties of germinate tellurite glasses with the addition of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Taibah University for Science*, 16(1), 183-192.

Al-Ghamdi, H., Elsafi, M., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H. and Tamayo, P. (2022). Performance of newly developed concretes incorporating WO<sub>3</sub> and barite as radiation shielding material. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 4103-4114.

Alharshan, G. A., Alrowaili, Z. A., Mahmoud, Z. M. M., Olarinoye, I. O. and Al-Buriahi, M. S. (2022). Effect of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> inclusion on the radiation shielding efficiency of TeO<sub>2</sub>-ZnO LiF-NaF glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 196.

Ali, M. A. E., Tawfic, A. F., Abdelgawad, M. A., Mohamed Mahdy, M. and Omar, A. (2022). Gamma and neutrons shielding using innovative fiber reinforced concrete, *Progress in Nuclear Energy*, 145, 104133.

Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, ... and Burkhardt, H. (2016). Recent developments in Geant4 . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 835, 186–225.

Almatari, M., Dong, M. G., Almousa, N., Sayyed, M. I., Khandaker, M. U., Alrashedi, M. F., Elsafi, M. (2022). Study the radiation attenuation properties of ball clay-cement-iron slag composites by experimental and theoretical methods. *Radiation Physics and Chemistry*, 200, 110348.

Alshahrani, B., Alrowaili, Z. A., Alsufyani, S. J., Olarinoye, I. O., Mutuwong, C. and Al-Buriahi, M. S. (2022). Determining the optical properties and simulating the radiation shielding parameters of Dy<sup>3+</sup> doped lithium yttrium borate glasses. *Optik*, 250 (1), 168318.

Alzahrani, J. S., Alothman, M. A., Eke, C., Al-Ghamdi, H., Aloraini, D. A. and Al-Buriahi, M. S. (2021). Simulating the radiation shielding properties of TeO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O-TiO glass system using PHITS Monte Carlo code. *Computational Materials Science*, 196 (110566).

Alzahrani, J.S., Eke, C., Alrowaili, Z. A., Boukhris, I., Mutuwong, C., Bourham, M. A., Al-Buriahi, M.S. (2022). A theoretical study on the radiation shielding performance of borate and tellurite glasses. *Solid State Sciences*, 129, 106902.

Amin, M. N., Ahmad, I., Iqbal, M., Abbas, A., Khan, K., Faraz, M. I., ... and Ullah, S. (2022). Computational models for investigating the radiation shielding potential of high-density concrete. *Materials*, 15 (13), 4573.

An, J. M., Lin, H., Pun, E. Y. B. and Li, D. S. (2022). Evaluation of gamma and neutron shielding capacities of tellurite glass system with Phy-X simulation software. *Physica B: Condensed Matter*. 634, 413433.

Annunziata, M. F. (2016). *Chapter 10- Radioactivity: introduction and history, from the quantum to quarks*, Boston: Elsevier, 361–389.

Arfa, M. M., Sadawy, M. M., Nooman, M. T., Farag, A. T. M., and El Shazly, R. M. (2022). The influence of heating on mechanical and nuclear properties of reactive powder concrete as a protective shield in nuclear facilities. *Progress in Nuclear Energy*, 143, 104046.

Aygün, B., Şakar, E., Agar, O., Sayyed, M.I., Karabulut, A. and Singh, V. P. (2021). Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications. *Progress in Nuclear Energy*, 133(103645).

Azreen, N. M., Rashid, R. S. M., Haniza, M., Voo, Y. L. and Amran, Y. H. M. (2018). Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass. *Construction and Building Materials*, 172, 370-377.

Babu S. M., Sarathi R., Imai T. and Tanaka T. (2021). Influence of gamma irradiation and water aging on the space charge characteristics of epoxy micro-nano composites. *Polymers*, 13 (6), 964.

Basdevant, J. L., Rich, J. and Spiro, M. (2004). *Fundamentals in nuclear physics: From nuclear structure to cosmology*, Springer.

Basu, A. ve Aydin, A. (2004). A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(7), 1211-1214.

Beiser A. (2003). *Chapter 12: Nuclear Transformations. Concepts of Modern Physics* (pdf), Mc Graw- Hill, 432–434.

Bijker, R. and Santopinto, E. (2015). Valence and sea quarks in the nucleon. *Journal of Physics. Conference Series*. 578(1), 012015.

Bilge A. N. ve Tuğrul A. B. (1990). *Endüstriyel Radyografinin Esasları*, İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.



Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., ... and Vlachoudis, V. (2014). The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear data sheets*, 120, 211-214.

Brodsky, A. (1978). *CRC Handbook of radiation measurement and protection*. Crc Press.

Brown, J. M., Curliss, D., and Vaia, R. A. (2000). Thermoset-layered silicate nanocomposites. Quaternary ammonium montmorillonite with primary diamine cured epoxies. *Chem. Mater.*, 12 (11)3376–3384.

Chanthima, N., Kaewkhao, J., Limkitjaroenporn, P., Tuscharoen, S., Kothan, S., Tungjai, M., ... and Limsuwan, P. (2017). Development of BaO–ZnO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses as a radiation shielding material. *Radiation Physics and Chemistry*, 137, 72-77.

Cheewasukhanont, W., Limkitjaroenporn, P., Sayyed, M.I., Kothan, S., Kim, H. J. and Kaewkhao, J. (2022). High density of tungsten gadolinium borate glasses for radiation shielding material: Effect of WO<sub>3</sub> concentration. *Radiation Physics and Chemistry*, 192 (109926).

Christensen, D. M., Iddins, C. J. and Sugarman, S. L., (2014). Ionizing radiation injuries and illnesses. *Emergency Medicine Clinics*, 32(1), 245–65.

Chu, V. W. S., Kan, M. W. K., Lee, L. K. Y., Wong, K. C. W., Tong, M. and Chan, A. T. C. (2021). The effect of the magnetic fields from three different configurations of the MRIgRT systems on the dose deposition from lateral opposing photon beams in a laryngeal geometry - A Monte Carlo study. *Radiation Medicine and Protection*, 2 (3), 103-111.

Daungwilailuk, T., Yenchai, C., Rungjaroenkiti, W., Pheinsusom, P., Panwisawas, C. and Pansuk, W. (2022). Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons. *Construction and Building Materials*, 326, 126838.

Davidson, M. (2014). Pioneers in optics: Johann wilhelm ritter and ernest rutherford. *Microscopy Today*, 22(2), 48-51.

Demir, D. and Keleş, G. (2006). Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 245(2), 501-504.

Demir, F. (2010). Determination of mass attenuation coefficients of some boron ores at 59.54 keV by using scintillation detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(1), 175–179.

Dong, M., Zhou, S., Xue, X., Xiating F., Yang, H., Sayyed, M. I., ... and Almousa, N. (2022). Upcycling of boron bearing blast furnace slag as highly cost-effective shield for protection of neutron radiation hazard: An innovative way and proposal of shielding mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 355(131817).

Dong, M. G., Xue, X. X., Elmahroug, Y., Sayyed, M. I. and Zaid, M. H. M. (2019). Investigation of shielding parameters of some boron containing resources for gamma ray and fast neutron. *Results in Physics*, 13(102129).

Eid, M. S., Bondouk, I. I., Hosam, Saleh H. M., Omar K. M., Sayyed M. I., El-Khatib, A.M., ... and Mohamed Elsafi M. (2022). Implementation of waste silicate glass into composition of ordinary cement for radiation shielding applications. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4),1456-1463.

Eisenbud, M. and Gesell T. (1997). *Environmental Radioactivity: From Naturel, Industrial and Military Sources*. Academic Press, Inc.

Elalaily, N. A., Abou-Hussien, E. M. and Saad, E. A. Bismuth silicate glass containing heavy metal oxide as a promising radiation shielding material. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 171(12), 840–854.

El-Samrah, M. G., Abreu Zamora, M. A., Novog, D. R. and Chidiac, S. E. (2022). Radiation shielding properties of modified concrete mixes and their suitability in dry storage cask. *Progress in Nuclear Energy*, 148(104195).

El-Sayed A. A., Fathy, I. N.,Tayeh B. A. and Almeshal I. (2022). Using artificial neural networks for predicting mechanical and radiation shielding properties of different nano-concretes exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 324 (126663).

El-Sayed Abdo, A. (2002). Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields. *Annals of Nuclear Energy*, 29(16), 1977–1988.

Esfehiani, S. M. R., Zareei, S., Madhkan, M., Ameri, F., Rashiadani, J. and Taheri, A. R. (2021). Mechanical and gamma-ray shielding properties and environmental benefits of concrete incorporating GGBFS and copper slag. *Journal of Building Engineering*, 33, (101615).

Eves B. J., Douth, J. J., Terry, A. E., Yin H., Moulin, M., Haertlein, V., ... and Squires, A.M. (2021) Elongation rate and average length of amyloid fibrils in solution using isotope-labelled small-angle neutron scattering. *RSC Chemical Biology*, 2, 1232-1238.

Fu X., Ji, Z., Lin,W., Yu, Y. and Wu, T. (2021) The advancement of neutron shielding materials for the storage of spent nuclear fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*, Article ID 5541047.

Galehdari, N. A. and Kelkar, A. D. (2017). Effect of neutron radiation on the mechanical and thermophysical properties of nanoengineered polymer composites. *Journal of Materials Research*, 32(2), 426-434.

Gallego, E., Lorente, A. and Vega-Carrillo, H. R. (2009). Testing of a high-density concrete as neutron shielding material, *Nuclear Technology*, 168(2), 399–404.

Gencel, O., Bozkurt, A., E. Kam, E. ve Korkut, T. (2011). Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing different hematite proportions. *Annals of Nuclear Energy*, 38(12), 2719-2723.

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B. and Levring, H., WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. (2012). *Radiation Physics and Chemistry*, 71(3-4), 653-654.

Giannelis, E. P. (1998). Polymer-layered silicate nanocomposites: Synthesis, properties and applications. *Applied Organometal Chemistry*, 12(10–11), 675–680.

Gökmen, U. Gamma and neutron shielding properties of B<sub>4</sub>C particle reinforced Inconel 718 composites. (2022). *Nuclear Engineering and Technology*, 54(3), 1049-1061.

Hager, I. Z., Rammah, Y. S., Othman, H. A., Ibrahim, E. M., Hassan, S. F. and Sallam, F. H. (2019). Nano-structured natural bentonite clay coated by polyvinyl alcohol polymer for gamma rays attenuation. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 13, 141-153.

Han, D., Kim,W., Lee, S., Kim, H. and Romero, P. (2018). Assessment of gamma radiation shielding properties of concrete containers containing recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 163, 122-138.

Harrison, C., Burgett, E., Hertel, N., E. Grulke, E. and El-Genk, M.S. (2008). Polyethylene/Boron composites for radiation shielding applications. *AIP Conference Proceedings*, 969, 484-491.

Hassanpour M., Faghihi S., Khezripour S., Rezaie M., Dehghanipour P., ... and Khandaker MU. (2022), Introduction of graphene/h-BN metamaterial as neutron radiation shielding by implementing monte carlo simulation. *Materials*,15(19), 6667.

Hassanpour, M., Rezaie, M., Salajegheh, E., Faruque, M. R. I., Khandaker, M. U. and Bradley, D. A. (2021). Studies of the mechanical and neutron shielding features of

concrete by incorporation of green additive materials: Experimental and numerical study. *Radiation Physics and Chemistry*, 191, 109846.

Hayouni Y. (2014). *Valorisation Des Déchets Miniers de Fluoro-barytine de Hammam Jedidi Dans L'amélioration Des Performances du Ciment Blanc*, Mémoire de master Faculté des Sciences de Gabès, 132.

Heniegal, A. M., Amin, M., Nagib, S. H., Youssef, H. and Agwa, I.S. (2022). Effect of nano ferrosilicon and heavyweight fine aggregates on the properties and radiation shielding of ultra-high performance heavyweight concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01543.

Igashira, M., Kitazawa, H. and Yamamuro, N. (1986). A heavy shield for the gamma-ray detector used in fast neutron experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 245(2-3), 432–437.

Issa, S. A. M., Kumar, A., Sayyed, M. I., Dong, M. G. and Elmahroug, Y. (2018). Mechanical and gamma-ray shielding properties of  $\text{TeO}_2\text{-ZnO-NiO}$  glasses. *Materials Chemistry and Physics*, 212, 12-20.

Jeans, J. (1947). *The Growth of Physical Science*, Cambridge University Press.

Joseph B. B. and George, S. (2020). The road to radiation safety and ALARA: A review. *Innovative Publication*, 6(4), 89–92.

Kaçal, M. R, Polat, H., Oltulu, M., Akman, F., Agar, O. ve Tekin, H. O. (2020). Gamma shielding and compressive strength analyses of polyester composites reinforced with zinc: an experiment, theoretical, and simulation based study, *Applied Physics A*, 126 (205).

Kaplan, M. F. (1989). *Concrete Radiation Shielding*. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Katubi, K. M., Ibraheem, A. A., Alwadai, N., Alrowaili, Z. A., Olarinoye, I. O., Sriwunkum, C., and Al-Buriahi, M. S. (2022). Enhancement on radiation shielding performance of  $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Li}_2\text{O} + \text{ZnO} + \text{Na}_2\text{O}$  glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 201.

Kaur, P., Singh, K. J., Kurudirek, M. and Thakur, S. (2019). Study of environment friendly bismuth incorporated lithium borate glass system for structural, gamma-ray and fast neutron shielding properties. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 223, 117309.

Kaya, D. (2019). *Normal Beton ve Özel Amaçlı Betonların Gama Radyasyonunu Zırlama Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü).

Kebaili, I., Znaidia, S., Alzahrani, J. S., Alothman, M.A., Boukhris, I., Olarinoye, I.O., ... and Al-Buriahi, M.S. (2021).  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80-x}\text{Bi}_x$  ( $x \leq 12$ ) chalcogenide glasses for infrared and gamma sensing applications: structural, optical and gamma attenuation aspects. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 15509-15522.

Khalaf, M. A., Cheah, C. B., Ramli, M., Ahmed, N. M., Al-Asady, A. M. A., Amal Mohamed A. M., ... and Tangchirapat, W. (2021). Engineering and gamma-ray attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete with nano calcium carbonate and silica, *Construction and Building Materials*. 267, 120878.

Khan, M. U., Shamsad, A., Akhtar, A. N. and Al-Gahtani H. A. (2020). Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation. *Progress in Nuclear Energy*, 130 (103550).

Kharita, M. H., Yousef S. and Alnassar M. (2011). Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy*, 53(2), 207-211.

Kharita, M. H., Takeyeddin, M., Alnassar, M. and Yousef, S. (2008). Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. *Progress in Nuclear Energy*, 50(1), 33-36.

Konya, J. and Nagy, N.M. (2018). *Nuclear and Radio-chemistry*, Amsterdam, Netherlands, 74–75.

Kornmann, X., Lindberg, H. and Berglund, L. A. (2001) Synthesis of epoxyclay nanocomposites: influence of the nature of the curing agent on structure. *Polymer*, 42(4), 1303-1310.

Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, 246–269.

Krane, K.S., (2001) *Nükleer Fizik I. Cilt*, (Çeviri Editörü: Başar Şarer). Palme Yayıncılık, Ankara.

Kwan-Hoong Ng, K. (2003). *Non-ionizing radiations sources, biological effects, emissions and exposures*. Proceedings of the international conference on non-ionizing

radiation at UNITEN (ICNIR2003). Electromagnetic Fields and Our Health, 20-22 October 2003.

L'Annunziata M.F.(2003). *Handbook of Radioactivity Analysis*. Elsevier Science, ABD.

Li, X., Cong, M., Yang, G. and Su, W. (2021). Designing neutron shield material for D-T neutron generator, *Journal of Physics: Conference Series*,1739, 012012.

Libeesh, N. K., Naseer, K. A., Arivazhagan, S., El-Rehim, A. F. A., Al-Misned, G. and Tekin, H.O. (2022). Characterization of Ultramafic–Alkaline–Carbonatite complex for radiation shielding competencies: An experimental and Monte Carlo study with lithological mapping. *Ore Geology Reviews*, 142 (104735).

Lindquist, K. (2009). *Handbook of Neutron Absorber Materials for Spent Nuclear Fuel Transportation and Storage Applications*. Electric Power Research Institute.

Luo, L., Chen, Z., Tao, Q., Xie, L., Jin, D., Li, Z. and Deng, D. (2022). Effects of high temperatures on the splitting tensile strength and gamma ray shielding performance of radiation shielding concrete. *Construction and Building Materials*, 343, 127953.

Roslan, M. K. A., Ismail, M., Kueh, A.B.H, Zin, M. R. M. High-density concrete: exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding, *Constr. Build. Mater.*, 215(2019), 718-725.

Madbouly, A. M., Sallam, O.I., Issa, S .A. M., Rashad, M., Hamdy, A., Tekin, H. O. and Zakaly, H. M. H. (2022). Experimental and FLUKA evaluation on structure and optical properties and  $\gamma$ -radiation shielding capacity of bismuth borophosphate glasses. *Progress in Nuclear Energy*, 148, 104219.

Mahmoud, M. E., El-Khatib, A. M., Badawi, M. S., Rashad, A. R., El-Sharkawy, R. M. and Thabet, A. A. (2018). Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*,145, 160–173.

Majed, D., Silarski, M. and Paryzch S. (2021). Design, structure, microstructure and gamma radiation shielding properties of refractory concrete materials containing Ba- and Sr-doped cements, *Materials Chemistry and Physics*, 260(124095).

Malkapur, S.M., Ghodke, S. S., Sujatha, P. N., Singh, Y., Shivakumar, K. S., Sen, M., ... and Pulgur, A.B. (2021). Waste-polymer incorporated concrete mixes for neutron and gamma radiation shielding, *Progress in Nuclear Energy*, 135, 103694.

Manjunathaguru, V. and Umesh, T. K. (2009). Simple parameterization of photon mass energy absorption coefficients of H-, C-, N- and O- based samples of biological interest in energy range 200-1500 keV. *Pramana J. Phys.*, 72(2), 375-387.

Mann, K. S. and Mann, S.S. (2021). Py-MLBUF: Development of an online-platform for gamma-ray shielding calculations and investigations. *Annals of Nuclear Energy*, 150, 107845.

Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S. and Gerward, L. (2008). On the effective atomic number: a comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 266, 3906-3912.

Martin, J. E. (2006). *Pyhsics for Radiation Protection: a handbook*, Wiley-WHC, Weinheim.

Masoud, M. A., Kansouh, W. A., Shahien, M. G., Sakr, K., Rashad, A. M. and Zayed, A. M. (2020). An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes. *Progress in Nuclear Energy*, 120(103220).

McCall, R. C. (1997). *Shielding for thermal neutrons*. Medical Physics, 24(1), 135–136.

Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, The Mcgraw Hill Companies, Inc.

Meyerhof, W. E. (1967). Elements of Nuclear Physics. McGraw-Hill series, New York, USA.

Mhamdi, S. (2010). *Etude Minéralurgique Des Rejets Miniers de Hammam Jedidi*, Mémoire de master, Faculté des Sciences de Tunis, 126.

Moradllo, M. K., Chung, C-W., Keys, M. H., Choudhary, A., Reese, S. R., and Weiss, W. J. (2020). Use of borosilicate glass powder in cementitious materials: Pozzolan reactivity and neutron shielding properties, *Cement and Concrete Composites*, 112, 103640.

Mortazavi, S. M. J., Mosleh-Shirazi, M. A., Roshan-Shomal, P., Raadpey N. and Baradaran-Ghahfarokhi M. (2010). High-performance heavy concrete as a multi-purpose shield. *Radiation Protection Dosimetry*, 142(2-4), 120-124.

Moulder, J. E. (2014). *Static Electric and Magnetic Fields and Human Health: Questions and Answers*. Electromagnetic Fields and Human Health, Medical College of Wisconsin.

Murty, M. V. R. and Cooper, B. H. (1999). Instability in molecular beam epitaxy due to fast edge diffusion and corner diffusion barriers. *Phys. Rev. Lett*, 83(352).

Nagaraj, N., Manjunatha, H. C., Vidya, Y. S., Seenappa, L., Sridhar, K. N. and Gupta, P. S. D. (2022). Investigations on lanthanide polymers for radiation shielding purpose. *Radiation Physics and Chemistry*, 199, 110310.

Nambiar, S. and Yeow, J.T.W. (2012). Polymer-composite materials for radiation protection. *Applied Materials & Interfaces*, 4(11), 5717–5726.

Nazaroff, W. W. and Nero, A. V. (1988) *Radon and its decay products indoor air*, United States.

Nikbin, I. M., Shad, M., Jafarzadeh, G. A. and Dezhnapanah S. (2019). An experimental investigation on combined effects of nano-WO<sub>3</sub> and nano-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the radiation shielding properties of magnetite concretes. *Progress in Nuclear Energy*, 117(103103).

Okuno, K. (2005). Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin. *Radiation Protection Dosimetry*, 115(1–4), 258–261.

Olarinoye, I. O., Alomairy, S., Sriwunkum, C. and Al-Buriahi, M.S. (2021). Effect of Ag<sub>2</sub>O/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> substitution on the radiation shielding ability of tellurite glass system via XCOM approach and FLUKA simulations, *Physica Scripta*, 96 (6), 065308.

Omran, O. L., Sadrmomtazi A. and Nikbin I. M. (2019). A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 229(116905).

Omran, O. L., Ali, S. And Nikbin, I. M. (2019). A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete, *Construction Building Materials*, 229, 116905.

Oray O. (2007). *Nükleer Enerji ve Çevre Bitirme Ödevi*. İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi.

Oto, B. ve Gür, A. (2013). Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. *International Journal of Physical Sciences*, 8(8), 310-314.



Öz, A., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., Alcan, H.G. ve Aydın, A.C. (2022). The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 342, Part B, 127923.

Özdemir, T., Akbay, I. K., Uzun, H. ve Reyhancan, I. A. (2016). Neutron shielding of EPDM rubber with boric acid: mechanical, thermal properties and neutron absorption tests. *Progress in Nuclear Energy*, 89, (102–109).

Papachristoforou, M. and Papayianni, J. (2018). Radiation shielding and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates. *Radiation Physics and Chemistry*, 149, 26-32.

Park, J., Her, S., Cho, S., Woo, S. M. and Bae, S. (2022). Synthesis and characterization of Polyethylene/B<sub>4</sub>C composite, and its neutron shielding performance in cementitious materials: Experimental and simulation studies. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104458.

Piotrowski, T. (2021). Neutron shielding evaluation of concretes and mortars: A review. *Construction and Building Materials*, 277, 122238.

Polat, R. ve İçelli, O. (2010). Measurement of the effective atomic numbers of compounds with cerium near to the absorption edge. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 615 (2), 201-210.

Prabhu, N. S., Hegde, V., Wagh, A., Sayyed, M. I., Agar, O. and Kamath, S. D. (2019). Physical, structural and optical properties of Sm<sup>3+</sup> doped lithium zinc alumino borate glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 515, 116-124.

Prokhorenko, E. M., Klepikov, V.F., Lvytvnenko, V.V., Zakharchenko, A. A. and Khazhmuradov, M. A. (2015). Modification of composite materials used for radiation protection. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 4 (9).

Roslan, M. K. A, İsmail, M., Kueh, A.B.H. and Zin, M.R.M. (2019). High-density concrete: Exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding. *Construction and Building Materials*, 215, 718-725.

Salimi, M., Ghal-Eh, N. and Amirabadi, E. A. (2018). Characterization of a new shielding rubber for use in neutron–gamma mixed fields. *Nucl. Sci. Tech.*, 29(36).

Saloman, E. B. and Hubbell, J.H. (1987). Critical Analysis of Soft X-ray Cross Section Data, *Nucl. Instr. Meth.* 255(1-2), 38-42.

Sayyed, M. I., Tekin, H. O., Kılıcoglu, O., Agar, O. and Zaid, M .H .M. (2018). Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: Comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results. *Results in Physics*, 11, 40-45.

Sayyed, M. I., Almousa, N. and Elsafi, M. (2022). Green conversion of the hazardous cathode ray tube and red mud into radiation shielding concrete. *Materials*, 15(15), 5316.

Seenappa, L., Manjunatha, H. C., Sridhar, K. N. and Hanumantharayappa C. (2018). Gamma, X-ray and neutron shielding properties of polymer concretes. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 56 (05), 383-391.

Seltborg, P., Polanski, A., Petrochenkov, S., Lopatkin, A., Gudowski, W. and Shvetsov, V. (2005). Radiation shielding of high-energy neutrons in SAD. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 550(1-2), 313–328.

Shultis, J. K. and Faw R. E. (2000). *Radiation shielding*, La Grange Park, IL: American Nuclear Society. Inc.

Singh, T., Kaur, P. and Singh, P. S. (2007) A study of photon interaction parameters in some commonly used solvents. *J.Radiol.Prot.*, 27(1).

Singh, V. P. and Badiger, N. M. (2014). Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Annals of Nuclear Energy*, 64, 301-310.

Singh, V. P., Badiger, N. M. and Kaewkhao, J. (2014). Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: Comparative study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 404, 167-173.

Singh, V. P., Badiger, N. M., Chanthima, N. and Kaewkhao, J. (2014). Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 98, 14–21.

Singh, V. P., Tekin, H. O., Badiger, N. M., Manici, T. and Altunsoy, E.E. (2018). Effect of heat treatment on radiation shielding properties of concretes. *Journal of Radiation Protection and Research*, 43 (1), 20-28.

Storm, E. and Israel, H. I. (1970). Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 7(6), 565-681.

Stuewer, R.H. (1986). *Gamow's theory of alpha- decay". In: Ullmann-Margalit, E. (eds) The Kaleidoscope of Science*. Boston Studies in the Philosophy of Science, 94.

Sukegawa, A. M., Anayama, Y., Okuno, K., Sakurai S. and Kaminaga A. (2011). Flexible heat resistant neutron shielding resin. *Journal of Nuclear Materials*, 417, 850–853.

Svikis, V. D. (December 1963–January 1964). Dense lithium fluoride for gamma-ray-free neutron shielding. *Nuclear Instruments and Methods*, 25, p. 93–105.

Şahin L. (2010). *Parçacıklar ve Radyasyonun madde ile etkileşmesi*, İstanbul Üniversitesi.

Tamayo, P., Thomas, C., Rico, J., Pérez, S. and Mañanes, A. (2022). Radiation shielding properties of siderurgical aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 319, 126098.

Taylor, J. R.; Zafiratos, C. D. and Dubson, M. A. (2004). *Modern Physics for Scientists and Engineers*. Prentice Hall.

Tekin, H. O., Sayyed, M. I. and Issa, S. A. M. (2018). Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with  $WO_3$  and  $Bi_2O_3$  micro and nano particles using MCNPX code. *Radiation Physics and Chemistry*, 150, 95–100.

Tekin, H. O., Singh, V. P. and Manici, T. (2017). Effects of micro-sized and nano-sized  $WO_3$  on mass attenuation coefficients of concrete by using MCNPX code. *Applied Radiation and Isotopes*, 121, 122–125.

Temir, A., Zhumadilov, K. S., Zdorovets, M. V., Korolkov, I. V., Kozlovskiy, A., and Trukhanov, A. V. (2021). Synthesis, phase transformations, optical properties and efficiency of gamma radiation shielding by  $Bi_2O_3$ - $TeO_2$ - $WO_3$  ceramics. *Optical Materials*, 113, 110846.

Tuna, T., Eker, A. A. ve Kam., E. (2021). Neutron shielding characteristics of polymer composites with boron carbide. *J. Korean Physical Society*, 78, 566–573.

Tuzluca, F. N. (2007). *Bazı elementlerin L tabakasından M ve N tabakasına boşluk geçiş ihtimallerinin ölçülmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Types and sources of radiation - Canadian Nuclear Safety Commission, Erişim Tarihi: 05.03.2023.

Velasco, L. A. E., León-Martínez, H. A. D., Murillo, C. G. H., Carrillo, H. R. V., Contreras, J. R. M., Barba, V. P. and Ortiz, A. S. (2022). Radiation shielding and dosimetric parameters of mexican artisanal bricks. *Applied Radiation and Isotopes*, 188 (110355).

Venugopal, V. and Bhagdikar, P. (2013). De broglie wavelength and frequency of scattered electrons in the compton effect. *Physics Education*, 29(1).

Waly, E. A. and Bourham M. A. (2015). Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials. *Annals of Nuclear Energy*, 85, 306-310.

Wang, J., Li, G. and Meng, D. (2014). Evaluation of the performance of peridotite aggregates for radiation shielding concrete. *Annals of Nuclear Energy*, 71, 436–439.

Wei, H., Lou, L., Yang, Z., He, R., Fan, J., Zhang, K., and Yang, W. (2021). Multifunctional composites silicone rubber/paraffin@ lead tungstate with different core/shell ratio for thermal regulation and gamma shielding. *Journal of Energy Storage*, 36, 102363.

Weisstein, E.W. (2014). "Radiation", *Eric Weisstein's World of Physics*, Wolfram Research. Retrieved 11.

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

Yaltay, N., Ekinci, C. E., Çakır, T. and Oto, B. (2015). Photon attenuation properties of concrete produced with pumice aggregate and colemanite addition in different rates and the effect of curing age to these properties. *Progress in Nuclear Energy*, 78, 25-35.

Yastrebinsky, R. N., Pavlenko, V. I., Karnauhov, A. A., Cherkashina, N. I., Yastrebinskaya, A. V., and Gorodov, A. I. (2021). Radiation resistance of a structural material based on modified titanium hydride. *Science and Technology of Nuclear Installations*, Article ID 6658431.

Yin S., Wang H., Wang S., Zhang J., and Zhu Y. Effect of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the radiation shielding performance of telluride lead glass system. *Crystals*. 12(2), 178.

Yonphan, S., Chaiphaksa, W., Kalkornsurapranee, E., Tuljittraporn, A., Kothan, S., Kaewjaeng, S., ... and Kaewkhao, J. (2022). Development of flexible radiation shielding materials from natural Rubber/Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 200, 110379.

Zalegowski, K., Tomasz P., Garbacz, A. and Adamczewski, G. (2020). Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 235, 117389.

Zayed, A. M., Masoud, M. A., Rashad, A. M., El-Khayatt, A. M., Sakr, K., Kansouh, W. A. and Shahien, M.G. (2020). Influence of heavyweight aggregates on the physico-mechanical and radiation attenuation properties of serpentine-based concrete. *Construction and Building Materials*, 260(120473).

Zeyad, A. M., Hakeem, I. Y., Amin, M., Tayeh, B. A. and Agwa, I. S. (2022). Effect of aggregate and fibre types on ultra-high-performance concrete designed for radiation shielding. *Journal of Building Engineering*, 58(104960).

Nükleer tıp uygulamaları için bir örnek. (<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/sources/nat-bg-sources.html>). Erişim Tarihi: 13.01.2023.

Radyasyon barındıran bazı endüstriyel kaynakların gösterimi. (<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>). Erişim Tarihi: 03.02.2023.

Radyasyon barındıran bazı nükleer yakıt çevrimi elemanlarının gösterimi. (<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>). Erişim Tarihi: 05.02.2023.

Radyasyon türüne göre uygulanabilen zırhlama malzemeleri. (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>). Erişim Tarihi: 11.02.2023.

Radyasyon maruziyetini etkileyen temel faktörler. (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari>). Erişim Tarihi: 11.02.2023.

