

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ENGEL GEÇİŞ KATSAYILARININ YÜKSEK ENERJİLİ X IŞINLARI  
ALTINDA FARKLI ZIRHLAMA MATERYALLERİ İÇİN DENEYSEL  
OLARAK BELİRLENMESİ**

**Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
RADYASYON GÜVENLİĞİ VE KORUMA  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEMMUZ 2019**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ENGEL GEÇİŞ KATSAYILARININ YÜKSEK ENERJİLİ X IŞINLARI  
ALTINDA FARKLI ZIRHLAMA MATERYALLERİ İÇİN DENEYSEL  
OLARAK BELİRLENMESİ**

**Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RADYASYON GÜVENLİĞİ VE KORUMA**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEMMUZ 2019**

**ANTALYA**

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

**ENGEL GEÇİŞ KATSAYILARININ YÜKSEK ENERJİLİ X IŞINLARI  
ALTINDA FARKLI ZIRHLAMA MATERYALLERİ İÇİN DENEYSEL  
OLARAK BELİRLENMESİ**

**Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ  
RADYASYON GÜVENLİĞİ VE KORUMA  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez  
Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Proje Merkezi tarafından  
FYL-2019-4436 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**TEMMUZ 2019**

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

**ENGEL GEÇİŞ KATSAYILARININ YÜKSEK ENERJİLİ X IŞINLARI**  
**ALTINDA FARKLI ZIRHLAMA MATERYALLERİ İÇİN DENEYSEL**  
**OLARAK BELİRLENMESİ**

**Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKİ**  
**RADYASYON GÜVENLİĞİ VE KORUMA**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez 05/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet BOZKURT (Danışman)  
Prof. Dr. Bayram DEMİR  
Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

## ÖZET

### ENGEL GEÇİŞ KATSAYILARININ YÜKSEK ENERJİLİ X IŞINLARI ALTINDA FARKLI ZIRHLAMA MATERYALLERİ İÇİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ

Yüksek Lisans Tezi, Radyasyon Güvenliği ve Koruma Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Temmuz 2019; 47 sayfa

4, 6 ve 10 MV enerjilerde foton demeti üreten bir doğrusal hızlandırıcı cihazında birincil radyasyon zırhlama tasarımı amacıyla kurşun, çelik ve normal beton materyalleri için geniş demet engel geçiş katsayıları ölçümler yolu ile belirlenmiştir. Bu katsayıların elde edildiği ölçüm düzeneğinde kaynak bariyer arası mesafesi (SDD) 100 cm olarak ayarlanmıştır. Ölçümlerde dedektör olarak farmer tipi bir iyon odası kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinde dedektör, yeterli build-up sağlayacak 2-4 cm kalınlıkta su eşdeğeri katı fantom içerisine ve ışın merkezi ekseninde, engelin dış duvarından 30 cm uzağa yerleştirilmiştir. Çalışmada  $3 \times 3$ - $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> aralığındaki farklı cihaz alan açıklıklarında beton materyali için engel geçiş katsayıları ölçümler yolu ile elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler kullanılarak beton materyaline ait farklı cihaz alan açıklıklarında TVL değerleri hesaplanmıştır ve TVL değerlerinin cihaz alan açıklığına göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca çalışmada kaynak dedektör arası mesafenin 130, 230 ve 330 cm olarak ayarlandığı üç farklı ölçüm düzeneğinde her bir enerji için engelsiz bağıl doz değerleri ölçümler yolu ile elde edilmiştir ve bu değerlerin etkin alan boyutuna bağımlılığı da incelenmiştir. Bunun sonucunda geniş demet koşullarının  $20 \times 20$  cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığı sonrasında olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada kaynak dedektör arası 130 cm mesafede ve cihaz alan açıklığı  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup>'de kurşun, çelik ve beton materyalleri için elde edilen TVL değerleri, literatürde kullanılan değerlere uyarlanarak  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığı için TVL değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada belirlenen dar ve geniş demet TVL değerlerinin literatür değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Birincil radyasyon TVL, Engel geçiş katsayıları, Doğrusal hızlandırıcı, Yüksek enerjili x-ışınları, Zırhlama

**JÜRİ:** Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Prof.Dr. Bayram DEMİR

Doç.Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF BARRIER TRANSMISSION FACTORS FOR DIFFERENT SHIELDING MATERIALS UNDER HIGH ENERGY X-RAYS**

**Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ**

**MSc Thesis in Radiation Safety and Protection**

**Supervisor: Prof. Dr. Ahmet BOZKURT**

**July 2019; 47 pages**

Broad beam barrier transmission factors for lead, steel and ordinary concrete materials have been determined at 4, 6 and 10 MV photon energies in a linear accelerator device by means of measurements for design purposes of primary radiation shielding. In the setup where these factors were obtained, the distance from the source to barrier (SDD) was set to be 100 cm. A Farmer type ionization chamber was used as the detector in the measurements. In the measurement set-up, the detector was placed 30 cm away from the outer wall of the barrier in a 2-4 cm thick solid phantom made of water equivalent material in the centre of the beam to provide adequate build-up. In the study, radiation transmission factors for concrete material were measured in field areas between  $3 \times 3$ - $10 \times 10$  cm<sup>2</sup>. Then, using these values, TVL values of the corresponding field areas of concrete were calculated and the change of TVL values with respect to the field area TVL was evaluated. In addition, three different measuring setups where the distance from source to detector was varied as 130, 230 and 330 cm were studied for measuring barrier-free relative dose values at each beam energy and the dependence of these values on the effective field size were also examined. As a result, it has been observed that the broad beam conditions develop after  $20 \times 20$  cm<sup>2</sup> field area. In the study, TVL values were also obtained for lead, steel and concrete materials at a distance of 130 cm source to detector distance and at device field area of  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> and these values were adjusted to those in the literature for  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> to obtain TVL values of these materials for the maximum available field area. The narrow and broad beam TVL values determined in this study were found to be in good agreement with the literature.

**KEYWORDS:** Primary radiation TVL, Barrier transmission factors. Linear accelerator, High energy x-rays, Shielding

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Ahmet BOZKURT

Prof.Dr. Bayram DEMİR

Assoc.Prof.Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

## ÖNSÖZ

Bana bu yüksek lisans programı boyunca tüm bilgi ve deneyimini aktaran, tez çalışmamın her aşamasında ise büyük özveri ve hoşgörü ile çalışmalarına katkı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Ahmet Bozkurt'a, yoğun çalışmalarım sırasında sabır göstererek bana her konuda destek olan eşim Ali Çiftlikli'ye, küçük yaşına rağmen çalışmalarında bana destek ve ilham veren oğlum Efe Çiftlikli'ye, malzeme üretim süreçleri ile ilgili bilgi ve katkılarından dolayı kuzenim Gökçe Büyükdağ'a, motivasyon destekleri için anneme babama ve kız kardeşime, her zaman beni dinleyen ve her konuda bana destek olan kayınvalidem Oya Çiftlikli'ye, sağladığı mükemmel çalışma ortamı için Akdeniz Üniversitesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Aylin Fidan Korcum Şahin'e, yüksek lisans programı boyunca çalışma hayatımda bana destek olan mesai arkadaşlarıma, mesleki deneyim ve tecrübeleriyle bana destek olduğu için Doç. Dr. Nina Tunçel'e ve Doç. Dr. İsmail Hakkı Sarpün'e, proje ile ilgili süreçlerde bana yardımcı olan BAP birimi personeline, yüksek lisans programı boyunca destek ve yardımları için Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü personeline ve çalışmam sırasında küçük büyük yardımını esirgemeyen herkese en içten dileklerimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                                          | i    |
| ABSTRACT.....                                                                      | ii   |
| ÖNSÖZ .....                                                                        | iii  |
| AKADEMİK BEYAN .....                                                               | v    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                       | vi   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                               | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                            | ix   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                     | 1    |
| 2. KAYNAK TARAMASI .....                                                           | 5    |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                                         | 17   |
| 3.1. Zırlamanın Temel Yönleri.....                                                 | 17   |
| 3.2. Ölçüm Yöntemi .....                                                           | 19   |
| 3.2.1. Doğrusal hızlandırıcı cihazları.....                                        | 19   |
| 3.2.2. Linak tedavi odaları .....                                                  | 20   |
| 3.2.3. İyon odası ve elektrometre.....                                             | 21   |
| 3.2.4. RW3 katı su fantomu .....                                                   | 21   |
| 3.3. Engel Malzemeleri .....                                                       | 22   |
| 3.4. Ölçüm Düzeneği (Set-up).....                                                  | 23   |
| 3.4.1. Engel geçiş katsayılarının elde edilmesi için deneysel ölçüm düzeneği ..... | 23   |
| 3.4.2. Engelsiz dar demet ve geniş demet foton dozu ölçümleri .....                | 25   |
| 3.4.3. Dar demet engel geçiş katsayısı ölçüm düzeneği .....                        | 26   |
| 4. BULGULAR .....                                                                  | 28   |
| 4.1. Bağlı Dozun Etkin Alan Boyutuna Bağımlılığı .....                             | 28   |
| 4.2. Beton için TVL'nin Etkin Alan Boyutuna Bağımlılığı .....                      | 29   |
| 4.3. Betonun Engel Geçiş Katsayılarının SSD ve Engel Kalınlığına Bağımlılığı.....  | 29   |
| 4.4. Beton, Çelik ve Kurşun için Belirlenen Engel Geçiş Katsayıları.....           | 31   |
| 4.5. Beton, Çelik ve Kurşun için Belirlenen TVL ve HVL Değerleri.....              | 31   |
| 5. TARTIŞMA .....                                                                  | 33   |
| 6. SONUÇLAR .....                                                                  | 43   |
| 7. KAYNAKLAR .....                                                                 | 44   |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                     |      |

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Engel Geçiş Katsayılarının Yüksek Enerjili X Işınları Altında Farklı Zırhlama Materyalleri İçin Deneysel Olarak Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

05/07/2019

Özlem Yaşar TOYKAN ÇİFTLİKLİ

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|               |                                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| 0,5           | : ondalık gösterim                                         |
| $B_{bir}$     | : birincil fotonlar için engel geçiş katsayısı             |
| $B_{IDR}$     | : birincil engelin arkasında kabul edilebilir doz seviyesi |
| $B(\mu x, E)$ | : birikim faktörü                                          |
| $d$           | : engelin dışından tedavi cihazı merkezine uzaklık         |
| $d_{bir}$     | : kaynak ile korunacak kişi arası mesafe                   |
| $DR_0$        | : cihaz merkezinde 1 saatteki doz hızı                     |
| Gy            | : Gray                                                     |
| H             | : fotonların eşdeğer doz hızı                              |
| I             | : foton demetinin intensitesi                              |
| kV            | : kilo Volt                                                |
| mR            | : mili röntgen                                             |
| MV            | : milyon Volt                                              |
| $\mu$         | : doğrusal zayıflama katsayısı                             |
| $\mu Sv$      | : mikrosievert                                             |
| $n_B$         | : TVL cinsinden gerekli zırh materyali kalınlığı           |
| $\rho$        | : materyal yoğunluğu                                       |
| P             | : tasarım hedef dozu                                       |
| $P_{IDR}$     | : anlık tasarım dozu limiti                                |
| rem           | : Rem                                                      |
| Sv            | : sievert                                                  |
| T             | : meşguliyet faktörü                                       |
| U             | : klinik iş yükü                                           |
| W             | : iş yükü                                                  |

## **Kısaltmalar**

$^{60}\text{Co}$  : Kobalt 60

ALARA: As Low As Reasonably Achievable (Makul Ölçüde Ulaşılabilir)

BSS : Basic Safety Standards (Temel Güvenlik Standartları)

HVL : Half Value Layer (Yarı değer kalınlığı)

IAEA : International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu)

ICRP : International Commission on Radiological Protection (Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi)

ICRU : International Commission on Radiation Units and Measurements (Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümler Komitesi)

IDR : Instantaneous Dose Rate (Anlık Doz Hızı)

Linak : Linear Accelerator (Doğrusal Hızlandırıcı)

mfp : Mean Free Path

MPD : Maximum Permissible Dose (Maksimum Müsade Edilen Doz)

MU : Monitör Unit (Monitör Birim)

NCRP : National Council on Radiation Protection and Measurements (Ulusal Radyasyondan Koruma Komitesi)

SAD : Source Axis Distance (Kaynak Eksen Mesafesi)

SDD : Source Detector Distance (Kaynak Dedektör Arası Mesafe)

TAEK : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

TLD : Thermoluminescent Dosimeter (Termolüminesans Dozimetre)

TVL : Tenth Value Layer (Ona-bir Değer Kalınlığı)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1.</b> S radyasyon kaynağından d kadar uzaktaki O noktasındaki bir engel ile korunacak bir bireyin temel korunma şeması, <b>a)</b> engelsiz maruziyet dozu P'; <b>b)</b> kaynak-birey arasına bulunduğu maruziyet dozu P. .... | 6  |
| <b>Şekil 2.2.</b> Doğrusal hızlandırıcılarda farklı tiplerde radyasyon üretimi.....                                                                                                                                                       | 8  |
| <b>Şekil 2.3.</b> Birincil ve ikincil (saçılan ve sızıntı) radyasyon kaynakları ile birincil ve ikincil engellerin şematik gösterimi (NCRP 2005).....                                                                                     | 8  |
| <b>Şekil 2.4.</b> Radyasyondan korumada alan sınıflandırmalarını ve engel yerleşimlerini belirten doğrusal hızlandırıcı odası temsili görüntüsü (NCRP, 1976). ....                                                                        | 9  |
| <b>Şekil 3.1.</b> Basitleştirilmiş bir doğrusal hızlandırıcı odası tasarım şeması. ....                                                                                                                                                   | 18 |
| <b>Şekil 3.2.</b> Işınlanma koşulları <b>(a)</b> dar-demet; <b>(b)</b> geniş-demet ....                                                                                                                                                   | 18 |
| <b>Şekil 3.3.</b> Elekta-Synergy doğrusal hızlandırıcı cihazı.....                                                                                                                                                                        | 20 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Gantry dönme ekseninin labirent eksenine paralel olduğu tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazı oda tasarım şeması.....                                                                                                      | 21 |
| <b>Şekil 3.5.</b> <b>a)</b> Farmer tip iyon odası; <b>b)</b> elektrometre.....                                                                                                                                                            | 22 |
| <b>Şekil 3.6.</b> Katı su fantomu .....                                                                                                                                                                                                   | 22 |
| <b>Şekil 3.7.</b> Engel materyalleri, <b>a)</b> kurşun ve çelik plakalar; <b>b)</b> beton bloklar .....                                                                                                                                   | 23 |
| <b>Şekil 3.8.</b> Engel geçiş katsayıları için önerilen ölçüm sistemi.....                                                                                                                                                                | 24 |
| <b>Şekil 3.9.</b> Engel geçiş katsayılarında ölçüm düzeneğinin temsili gösterimi.....                                                                                                                                                     | 26 |
| <b>Şekil 3.10.</b> Engel geçiş katsayısının ölçüm düzeni (setup).....                                                                                                                                                                     | 27 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Açık alan bağıl doz değerlerinin, 4, 6 ve 10 MV foton enerjilerinde, SDD 130 cm'de etkin alan boyutlarına göre değişimi.....                                                                                            | 28 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Betonun engel geçiş katsayısının çeşitli parametrelere göre değişimi.....                                                                                                                                               | 30 |
| <b>Şekil 4.3.</b> 4, 6 ve 10 MV foton enerjilerinde, SSD 130 cm ve 10*10 cm <sup>2</sup> etkin alan boyutunda engel geçiş katsayılarının kalınlığa göre değişimi, <b>(a)</b> beton; <b>(b)</b> çelik; <b>(c)</b> kurşun.....              | 32 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 2.1.</b> Çeşitli kuruluşlar tarafından önerilen yıllık etkin doz limitleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| <b>Çizelge 4.1:</b> Betonun SSD 130 cm'de farklı etkin alan boyutlarında 4, 6 ve 10 MV foton enerjileri için belirlenen <i>TVL1</i> ve <i>TVL2</i> değerleri (cm cinsinden).....                                                                                                                                                                                                                            | 29 |
| <b>Çizelge 4.2:</b> Farklı foton enerjileri, SSD ve engel kalınlıklarında betonun engel geçiş katsayıları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 30 |
| <b>Çizelge 4.3:</b> Beton, çelik ve kurşunun SSD 130 cm ve 10*10 cm <sup>2</sup> etkin alan boyutunda 4, 6 ve 10 MV enerjiler için belirlenen <i>TVL1</i> ve <i>HVL</i> değerleri (cm cinsinden).....                                                                                                                                                                                                       | 32 |
| <b>Çizelge 5.1.</b> Beton, çelik ve kurşunun, 4, 6 ve 10 MV foton enerjileri için SSD 130 cm'de <i>TVL10</i> ve <i>TVL40</i> değerleri (cm cinsinden). ( <i>TVL10</i> , 10*10 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında hesaplanan ve <i>TVL40</i> , 40*40 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığına uyarlanan TVL değerlerini sembolize eder).....                                                                | 34 |
| <b>Çizelge 5.2</b> Beton, çelik ve kurşunun 6 MV foton enerjisi için SSD 130 cm'de <i>TVL10</i> ve <i>TVL40</i> değerlerinin (cm cinsinden) Karzmark ve arkadaşlarının çalışması ile karşılaştırılması ( <i>TVL10</i> , 10*10 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında ve <i>TVL40</i> , 40*40 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder) .....                                   | 36 |
| <b>Çizelge 5.3.</b> Beton, çelik ve kurşunun, 4, 6 ve 10 MV enerjiler için SSD 130 cm'de <i>TVL10</i> ve <i>TVL40</i> değerlerinin (cm cinsinden) Maruyama ve arkadaşlarının çalışması ile karşılaştırılması. ( <i>TVL10</i> , 10*10 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında ve <i>TVL40</i> , 40*40 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder) .....                            | 37 |
| <b>Çizelge 5.4.</b> Bu tez çalışmasında beton için 10 MV enerjide 10*10 cm <sup>2</sup> elde edilip 40*40 cm <sup>2</sup> etkin alan boyutuna uyarlanan TVL değer sonuçlarının Tochilin ve LaRiviere'nın çalışması ile karşılaştırılması ( <i>TVL40</i> , 40*40 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında ve <i>TVL35</i> , 35*35 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder) ..... | 38 |
| <b>Çizelge 5.5.</b> Bu tez çalışmasında beton için 4 MV enerjide 10*10 cm <sup>2</sup> elde edilip 40*40 cm <sup>2</sup> etkin alan boyutuna uyarlanan TVL değer sonuçlarının Greene ve Massey'in çalışması ile karşılaştırması. ( <i>TVL10</i> 10*10 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder).....                                                                           | 38 |
| <b>Çizelge 5.6.</b> Bu tez çalışmasında elde edilen beton, kurşun ve çelik engellerinin 40*40 cm <sup>2</sup> cihaz alan açıklığında 6 MV TVL değer sonuçlarının NCRP 51 ve 151 numaralı raporla; Nelson ve LaRiviere'in 1984 yılındaki çalışmasıyla ve Rodgers'ın 2007 yılındaki çalışmasıyla karşılaştırması .....                                                                                        | 40 |
| <b>Çizelge 5.7.</b> Beton (2,35 g/cm <sup>3</sup> ), çelik (7,8 g/cm <sup>3</sup> ) ve kurşun (11,36 g/cm <sup>3</sup> ) materyallerinin 4 MV, 6 MV ve 10 MV enerjilerdeki TVL değerlerinin (cm cinsinden) NCRP 49, NCRP 151, IAEA 47 ile karşılaştırması .....                                                                                                                                             | 40 |

**Çizelge 5.8.** Bu çalışmada kullanılan beton materyaline ait TVL değerlerinin Facure ve Silva'nın çalışmasında kullandığı dört farklı beton materyali ve IAEA 47 numaralı raporu ile karşılaştırması ..... 42

**Çizelge 5.9.** 6 ve 10 MV enerjilerde bu tez çalışmasındaki beton materyaline ait TVL değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırması..... 42



## 1. GİRİŞ

X-ışınlarının 1895 yılında Wilhelm Roentgen tarafından keşfinden sonra tıp bilimi seyrini değiştirmeye başlamış ve bu ışınların hastalıkların teşhisi ve tedavisi için x-ışınlarının kullanılması gündeme gelmiştir. Bu uygulamalar sırasında radyasyona maruz kalan bazı kişilerde gözlenen cilt reaksiyonları ve göz tahrişleri, 1900'lü yıllara gelindiğinde x-ışınlarına maruziyetin zararlı etkileri olabileceğine dair genel bir kanı oluşmasına yol açmıştır.

Roentgen'in Kasım 1895'de x-ışınlarını keşfetmesinden birkaç ay sonra Temmuz 1896 yılında Marcuse tarafından x-ışını kaynaklı dermatit vakası tanımlanmıştır (Marcuse 1896). Radyasyonun zararlı etkilerine dair ilk çalışmanın 1896 yılında Nature dergisinde yayınlandığı bilinmektedir (Martin vd. 2012). Bu çalışma, x ışınlarının radyologların elleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenen sonuçlarını içermiş ve sonraki on beş yıl boyunca x-ışını deneylerinden ve tedavi denemelerinden elde edilen benzer çalışmalar yayınlanmıştır. 1900-1913 yılları arasında x ışınlarının kanser ve radyasyon kökenli cilt kanserleri oluşturabileceğine dair bir çok kanıt toplanmış ve böylece radyolojik korunma için temel bilgiler oluşmaya başlamıştır. 1902 yılında Rollins, Röntgen filmi çekimlerinde kullanılan fotoğraf plakasını birkaç dakika içinde buğulamayan düzeydeki radyasyon miktarının zararlı olmayacağını kabul etmiştir (McGinley 2002). Ancak bu dönemde radyasyondan korunma tekniklerinin formüle edilmesine yönelik çok az şey yapıldığı görülmüştür.

X-ışınlarının zararlı etkilerinin fark edilmesi ile birlikte zırhlama teknikleri ve çeşitli koruyucu materyaller geliştirilmiş olup, bilinen ilk zırhlama 1934 yılında Röntgen tarafından fotoğraf filmlerinin kararmasını önlemek ve x-ışınlarının meydana getirdiği flouresan ışığı gözlemlemek amacı ile karanlık bir oda şeklinde tasarlanmıştır. X-ışınlarının çeşitli malzemelerdeki transmisyon ölçümleri 1896 yılında Röntgen ve Tesla tarafından yapılmış ve metallerin x ışını saçma düzeyleri ise Tesla tarafından incelenmiştir (McGinley 2002).

X-ışınlarından korunma önlemlerini belirlemeye yönelik ilk çalışmalar 1915 yılında İngiliz Roentgen Derneği tarafından başlatılmıştır (Russ 1915). Aynı topluluk O dönemde radyasyon çalışanlarının korunmasına yönelik önlemler alınmasına karar vermiştir ancak Avrupa'nın içinde olduğu şiddetli savaş nedeniyle bu konuda önemli bir ilerleme olmamıştır. Savaştan hemen sonra Fransa'da korumaya yönelik bazı adımlar atılmış olsada, ilk röntgen ışın koruma komitesi Eylül 1920'de Amerikan Röntgen Işını Topluluğu ilk Radyasyondan Korunma Komitesi'ni oluşturmuştur. Mart 1921'de Londra Times'ta x-ışını işçilerinin durumuyla ilgili bazı kısa açıklamaların yayınlanmasının ardından, İngiliz Radyum Korunma Komitesi kurulmuştur (Henshaw 1941). İngiliz Radyum Korunma Komitesi radyasyondan korunma ile ilgili ilk tavsiyelerini ve Amerikan Radyasyondan Korunma Komitesi ise benzer önerilerini Temmuz 1921'de yayınlanmıştır (British Institute of radiology 1921; ARRS 1920). Her iki raporda, kaynak ile korunacak birey arasında kurşun engel kullanımı ve kaynak ile birey arası mesafenin arttırılması ile radyasyon maruziyetinin ve dolayısıyla zararlı etkilerin azalacağına vurgu yapılmıştır. Ayrıca bu raporlarda, x-ışını tüpünün metal bir koruma zırhına konulması ve tedavi odası duvarı tasarımlarına kurşun eklenmesi gerektiği de belirtilmiştir (McGinley 2002).

1925 yılında radyasyon-radyoaktivite miktar ve birimlerini belirleme, klinik radyoloji veya radyobiyolojide ölçüm-uygulama prosedürlerinin oluşturulması ve bu prosedürlerin uygulanmasında gerekli raporlamada tekdüzeliğin sağlanabilmesi amaçlarıyla Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümler Komisyonu (ICRU) kurulmuştur. Ayrıca bu dönemde yapılan önemli bir diğer gelişme ise tolerans doz limitlerini belirlemeye yönelik bir dizi araştırmacı tarafından 1928 yılına kadar yapılan çalışmaların sonuçlarının yayınlanmasıdır. Bu çalışmalarda radyasyonun çalışanlar üzerindeki etkisi incelenmiş, eritem etkisinin olduğu doz değerleri için kantitatif formül üretilerek tolerans dozlar eritem etkisi ile tanımlanmıştır (Henshaw 1941). 1928 yılında Amerikan Radyasyondan Korunma Komitesi radyasyondan korunma ile ilgili eritem dozu ve kan değerlerindeki değişiklikleri referans alan doz sınırlarını içeren radyasyondan korunma önerilerinin yayınlamıştır (Bureau of standards 1929). Aynı tarihte İkinci Uluslararası Radyoloji Kongresi bir araya gelerek sonradan Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) adını alacak olan Uluslararası X Işını ve Radyum Koruma Komitesi'ni oluşturmuş ve Birleşmiş Milletler ile benzer olan önerileri 1932 yılında yayınlamıştır (British Institute of radiology 1932). Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi radyasyon güvenliği ile ilgili erken dönemdeki diğer önerisinde, x ışınlarına ve radyuma karşı korunma ile ilgili olarak bir işçinin radyasyon içeren işlerde çalışması gereken süreyi haftada 5 gün, günde 7 saat olarak ve yılda bir ay tatil yapılması şeklinde kısıtlama yaklaşımını benimsemiştir.

1920 yılında Amerika'da kurulan Röntgen ve Radyumdan Korunma Danışma Komitesi 1921 yılında 15 numaralı raporunu yayınlamış ve 75-600 kV aralığındaki x ışınlarından korunmada kullanılacak minimum kurşun kalınlıklarını belirlemiştir. Komite, 24 Temmuz 1936'da 20 numaralı raporunu yayınlayarak 15 numaralı raporun bazı eksikliklerini gidermiştir (McGinley 2002).

1930'lu yıllardan önce x ışınlarının derin yerleşimli tümörlerin tedavi edilebilmesi için Röntgen tüpü çalışma voltajını 200 kV'dan yükseğe çıkartabilecek çalışmalar başlatılmıştır. 1933'de 1 MV mertebede tüp voltajı üretilen, 2 MV enerjide oldukça ağır olan Van De graff jeneratörleri ise 1939 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Derin yerleşimli tümörlerin tedavisi için daha yüksek enerjili ve daha az yer kaplayacak x ışını kaynaklarına duyulan ihtiyacın bir sonucu olarak 1941 yılında Kerns tarafından Betatron sistemi geliştirilmiş ve medikal betatronlar 1980'li yılların ilk başlarına kadar radyoterapi kliniklerinde kullanılmışlardır. Aynı dönemde ilk doğrusal hızlandırıcılar da üretilmiş ve İngiltere'de 1953 yılında Hammersmith hastanesinde ilk hasta tedavi edilmiştir. 1946 yılında Amerikan Röntgen ve Radyumdan Korunma Danışma Komitesi, Ulusal Radyasyondan Koruma Komitesi (NCRP) adını almış ve 1948 yılında yayınladığı raporunda radyasyondan korunma düzeyi günlük 0,1 Röntgen ve haftalık ise 0,3 Röntgen değerinden düşük tutulması şeklinde öneride bulunmuştur. 1950 yılında ise Uluslararası X Işını ve Radyum Korunma Komitesi Uluslararası Radyasyon Birim ve Ölçümleri Komitesi (ICRU) adını almış ve 1953 yılında NCRP ile ortak bir toplantı yaparak yıllık müsaade edilebilir doz limitini 5 Röntgen olarak belirlemişlerdir (McGinley 2002).

1950 yılında nükleer fisyonun keşfi ve nükleer endüstrinin doğuşundan kaynaklanan yeni sorunlarla başa çıkmak için ICRP kapsamını genişletmiş ve daha önce önerilen radyasyondan korunma ve doz limitlerini daha sık güncellenmeye başlamıştır. Mevcut serideki ilk rapor olan Yayın 1, 1958'de kabul edilen önerileri içerirken (ICRP,

1959), sonraki öneriler, Yayın 26 (ICRP 1977), Yayın 60 (ICRP 1991) ve Yayın 103 (ICRP 2007) olarak ortaya çıkmıştır.

1977 yılında yayınlanan ICRP 26 numaralı raporda radyasyonun etkileri ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır. Radyasyonun tüm insan vücudu üzerine etkilerinin hücrelere tek tek verilen hasarların toplamı şeklinde ele alınabileceği ve herhangi bir radyasyon hasarının organizma üzerinde iki farklı türde etkiye sebep olacağı vurgulanmıştır. Bunlardan ilki, deterministik etkiler olarak, diğeri ise stokastik etkiler olarak tanımlanmıştır. Belirli bir doz eşiğinin üzerinde gözlemlenen deterministik etkiler, hücre çoğalmasını baskılayan veya organlardaki hücre popülasyonlarının tükenmesine yol açan etkiler olup, maruz kalınan doz düzeyi arttıkça etkinin şiddetinin de artacağı etkilerdir. Günümüzde bu etkiler zararlı doku reaksiyonu olarak bilinmektedir. Stokastik etkiler ise, ortaya çıkması bir eşik doz gerektirmeyen ve dozun şiddetinin etkinin olasılığı ile ilişkilendirildiği etkilerdir. Bu sınıflama ışığında ICRP'nin 60 numaralı yayını ile radyasyondan korunmanın amacını iki başlıkta ele alan bir radyolojik korunma sistemi geliştirilmiştir. İlk amaç olarak deterministik etkilerin ortaya çıkmasının önlenmesi için maruz kalınan doz düzeylerinin organ bazında tanımlanan eşdeğer doz limitlerinin altında kalması önerilmiştir. İkinci amacı sağlamak üzere ise stokastik etkilerin ortaya çıkma olasılıklarının azaltılması için tüm vücut için tanımlanan etkin dozun sınırlandırılması yaklaşımı benimsenmiştir (ICRP 1991). Özellikle radyasyon çalışanları için stokastik etkilerin sınırlandırılması oldukça önemli bir konu olup, mesleki maruziyet düzeyleri radyasyondan korunmanın üç temel prensibi (gereklilik, optimizasyon ve doz sınırlandırması) ile kontrol altına alınmaya çalışılır.

İyonize edici radyasyon kaynağı içeren tesislerde kaynak personel dozunu belli bir düzeyin altında tutacak şekilde zırhlama yapılması yaklaşımı benimsenir. Herhangi bir radyasyon kaynağına karşı koruma sağlamak amacıyla nasıl bir zırh materyalinin tasarlanacağı, öncelikle radyasyon kaynağının yaydığı parçacıkların türü ile aktivite/intensite ve enerji spektrumu gibi özelliklerine bağlıdır. Alfa ve beta gibi yüklü parçacık radyasyonları, düşük yoğunluklu ve ince materyaller ile zırhlanabilirken, x ve gama ışınları gibi elektromanyetik radyasyonların uygun şekilde zırhlaması için atom numarası yüksek ve yoğun materyaller kullanılır. Nötronlar için ise, hidrojen zengin materyaller tercih edilir. Radyasyon kaynağının birim zamanda yaydığı parçacıkların sayısı da zırhlama tasarımında önemli bir parametredir. Özellikle yüksek aktiviteli radyasyon kaynakları için daha kalın zırh materyalleri tercih edilir.

Radyasyonun engel materyalindeki transmisyon özelliklerini sayısal değerler ile tanımlamak için ışının şiddetinin engel arkasında onda-bir değere düştüğü materyal kalınlığı olarak  $TVL$ , yarıya düştüğü kalınlık olarak da  $HVL$  tanımları yapılır. Bu değerler her materyalde radyasyonun türüne, enerjisine ve demet parametrelerine göre değişmektedir. Foton demeti bariyer materyaline girdiği zaman şiddetinin yarıya düştüğü kalınlık  $HVL$ , onda-bire düştüğü ilk kalınlık ise  $TVL1$  kalınlığıdır. Foton demeti materyal içerisinde ilerlerken şiddeti giderek azalacağından  $TVL1$  kalınlığı sonrasındaki ikinci onda-bir zayıflama kalınlığı daha düşük olacaktır ve bu nedenle ayrıca  $TVL2$  olarak tanımlanır. Benzer şekilde  $TVL2$  sonrasındaki onda-bir değer zayıflaması ise  $TVL3$  şeklinde ifade edilir.  $TVL$  değerlerinin eşitlenmeye başladığı noktada  $TVL_{eq}$  denilen kavram ortaya çıkmaktadır. Deneysel olarak bu değerlerin elde edilebilmesi için çok geniş demetlerde engel geçiş katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca, radyasyon kaynağının yaydığı parçacıkların enerjileri de zırlama pratiğinde önemli bir yer tutar. Bu anlamda kaynağın tek enerjili mi, yoksa bir spektrum dâhilinde parçacıklar mı ürettiğinin iyi bilinmesi gerekir (Shultis ve Faw 2005). Pratikte zırh materyalleri, genellikle tek enerjili kaynaklara göre tasarlanırlar ve gerekli zırh kalınlığı da lineer zayıflatma katsayısı yardımıyla hesaplanan yarı-değer kalınlığı (HVL) veya onda-bir kalınlığı (TVL) gibi kavramlar yardımıyla ifade edilir. Ancak bu hesaplamaların gerekli zırh kalınlığını olduğundan fazla verdiği bilinmektedir. Bu nedenle, zırh kalınlığını belirlerken zırh materyali içerisinde gerçekleşecek saçılmaları da dikkate alan birikim faktörü gibi farklı nicelikler kullanılır. Bu katsayılar ise, zırh materyalinin türüne ve ortalama serbest yol (mfp) cinsinden zırh kalınlığına bağlı olup, genellikle karmaşık Monte Carlo hesaplamaları ile belirlenir (Shultis ve Faw 2000).

Ancak çoğu radyasyon uygulamasında kaynak enerjisi bir spektruma sahip olduğundan, seçilecek zırhın türünün ve kalınlığının kaynaktan yayınlanacak her enerjideki radyasyonlar göz önüne alınarak belirlenmesi gerekir. Bunun için de kaynağın bulunduğu ortamda, kullanılacak zırh materyali ile yapılacak ölçümler sonucunda engel geçiş katsayıları belirlenir. Bu katsayılar, zırlama materyalinin türü ve kalınlığı ile kaynağın enerjisine göre oluşturulmuş tablolarda verilir. Ancak bu tablolar, sınırlı sayıda materyal türü ve radyasyon enerjisi için mevcuttur. Özellikle radyoterapi uygulamalarında kullanılan lineer hızlandırıcıların enerji spektrumuna uygun olarak üretilmiş engel geçiş katsayıları literatürde nadiren mevcuttur.

Bu tez çalışmasında, lineer hızlandırıcıların yaydığı yüksek enerjili x-ışınlarının zırhlanmasında yaygın olarak kullanılan bazı zırh materyallerinin engel geçiş katsayıları deneysel ölçümler ile belirlenmiştir.

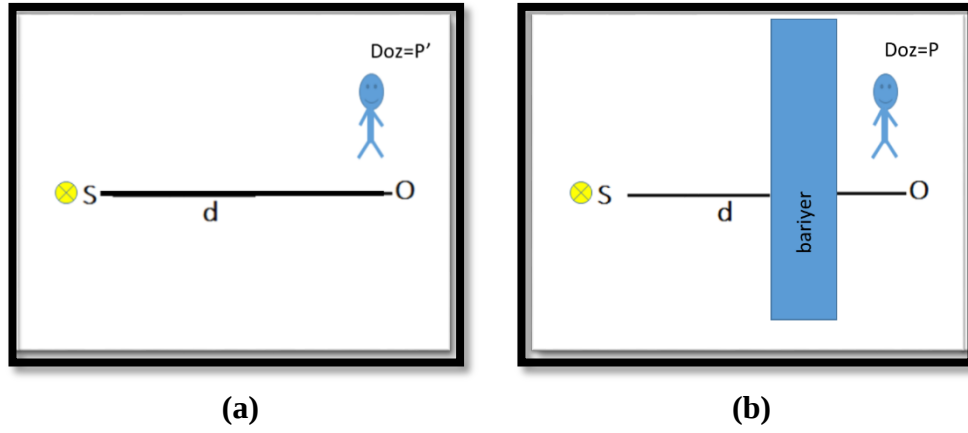
## 2. KAYNAK TARAMASI

NCRP, radyoterapi tesislerinde radyasyondan korumada iki temel ilkeyi benimser. İlki, kişinin maruziyet dozunun (tıbbi uygulamalar haricinde) mümkün olduğunca azaltılması, diğeri ise radyasyona duyarlı film ve cihaz gibi araçların hasar görerek işlevlerinin bozulmasının önlenmesidir (NCRP 1971).

Vücut dışı radyasyon kaynaklarına karşı korunmada radyasyon maruziyetini azaltmanın üç temel kuralından faydalanılır. İlk kural, bir bireyin radyasyon alanında bulunduğu sürenin mümkün olduğunca kısa tutulmasını hedefler ve süre kısaldıkça maruziyet miktarının da azalacağı prensibine dayanır. Diğer iki kural ise, kaynak ile birey arasına mesafe ile engel koyma prensipleridir; korunacak bireyin bulunduğu konumdaki radyasyon düzeyinin hem mesafe ile hem de araya konacak soğurucu bir malzeme katmanı ile azalacağı prensibine dayanır (NCRP 1976).

Tedavi amaçlı kullanılan radyoterapi cihaz teknolojileri sürekli gelişmektedir. Bununla paralel olarak bu cihazların konduğu odaların tasarımları da geliştiğinden zırh hesaplamaları için yayınlanmış raporlar da zaman içinde güncellenmektedir. İlk olarak 1971 yılında yayınlanan NCRP 39 numaralı rapor, radyoterapi tesislerinde radyasyondan korunma için temel kriterleri oluşturmuş (NCRP 1971), ardından 1976 yılında yayınlanan NCRP 49 numaralı rapor ise 10 MeV enerjiye kadar foton enerjileri üreten parçacık hızlandırıcıları için radyasyondan korunma amacıyla bir tasarım kılavuzu olmak üzere yayınlanmıştır (NCRP 1976). 1977 yılında yayınlanmış olan NCRP 51 numaralı rapor ise 10 MeV'den yüksek enerjili parçacık hızlandırıcı tesisleri için hazırlanmıştır (NCRP 1977). 1984 yılında yayınlanan NCRP 79 numaralı rapor ise bu tür lineer hızlandırıcılarda oluşan nötron düzeyinin şaşırtma koridorları ile zayıflatılmasını sağlayacak hesaplama tekniklerine dair daha detaylı zırhlama hesaplamaları içermiştir (NCRP 1984). Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu'nun (IAEA) 47 numaralı güvenlik raporu ise radyoterapi tesislerinde radyasyon güvenliği için rehberlik sağlamak üzere 2006 yılında yayınlanmıştır (IAEA 2006). NCRP son olarak 2005 yılında 151 numaralı raporunu doğrusal hızlandırıcı cihazları oda tasarımına klavuzluk sağlamak üzere yayınlamıştır (NCRP 2005).

Radyasyondan korunmak istenen bir noktadaki eşdeğer dozun tasarım doz hedef düzeyine düşürülmesi zırhlama yardımı ile gerçekleştirilir. Tasarım doz hedefi aşağıdaki şekilde basit olarak açıklanabilir. Şekil 2.1'de herhangi bir engelin yokluğunda radyasyondan korunacak bireyin alacağı doz  $P'$  ile gösterilmiştir. Bu dozun tasarım hedefi  $P'$ 'nin altında kalması için birey ile radyasyon kaynağı arasına uygun kalınlıkta bir engel yerleştirilir. Sonuç olarak tasarım hedefi, mesleki maruziyeti veya toplumun maruziyeti ile ilgili radyasyondan korunma seviyesi ile ALARA hedefleri göz önüne alarak belirlenen tolere edilebilir doz düzeyini temsil eder.



**Şekil 2.1.** S radyasyon kaynağından d kadar uzaktaki O noktasındaki bir engel ile korunacak bir bireyin temel korunma şeması, **a)** engelsiz maruziyet dozu  $P'$ ; **b)** kaynak-birey arasına bulunduğu maruziyet dozu  $P$

NCRP 49 nolu rapor, maksimum müsaade edilen eşdeğer doz (MPD) kavramını kullanmış ve bu kavram rapordaki tavsiyelerin temelini oluşturmuştur (NCRP 1976). Zırh tasarımında kullanılacak MPD değerleri NCRP'nin 39 nolu raporundan alınmış olup haftalık MPD değerleri radyasyon çalışanları için 100 mR, diğer bireyler için 10 mR olarak belirlenmiştir (NCRP 1971).

Radyasyon zırhları için tasarım doz hedefi günümüzde yürürlükteki yasal doz sınırlarına bağlıdır. IAEA, radyasyondan korunma ve radyasyon güvenliği ile ilgili uluslararası fikir birliği sağlanarak oluşturulmuş olan belirli standartları 1996 yılında yayınlamıştır (IAEA 1996). Bu yayın, günümüzde doz sınırlarını belirlemektedir. 1993 yılında yayınlanan NCRP 116 numaralı rapor, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın sınırlarını tanımlamaktadır (NCRP 1993). Ülkemizde ise 2000 yılında yayınlanan Radyasyon Güvenliği yönetmeliği iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın sınırlarını tanımlamaktadır (RGY 2000).

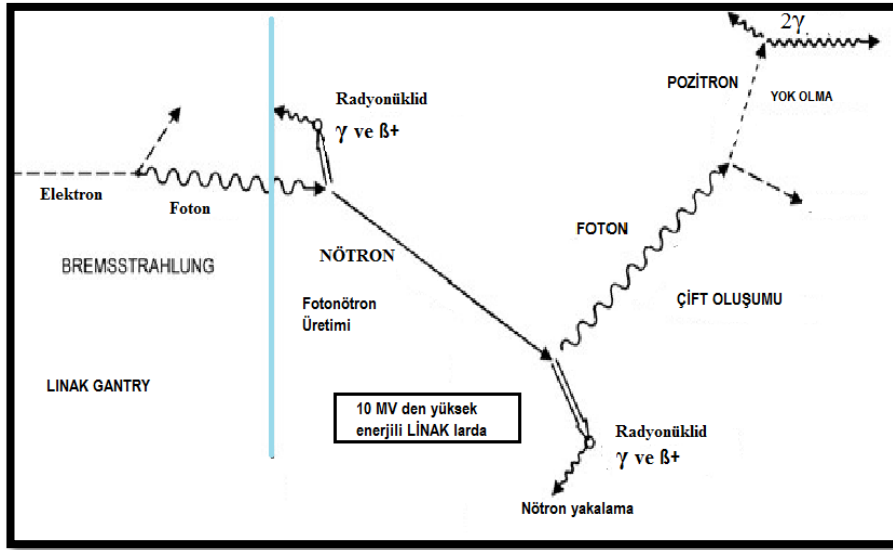
Uluslararası Radyolojik Korunma Komitesi (ICRP), iyonlaştırıcı radyasyon tehlikelerine karşı korunma ile ilgili daha önce yayınladığı önerilerini 2007 yılında revize ederek ICRP 103 numaralı raporu oluşturmuş ve operasyonel durumlarda halk ve çevrenin radyasyon güvenliği için düzenleyici tanımlar ve maruziyetle ilişkili risk düzeyi ile maruziyet limitlerini belirlemiştir (ICRP 2007).

Radyoterapi cihazları için engel tasarımına ilişkin önerilen ulusal etkin doz sınırları Çizelge 2.1'de özetlenmiştir (IAEA 2006, NCRP 1993, RGY 2000). Zırhlama tasarımlarında bu limitler ve ALARA esas alınarak tasarım doz hedefi genellikle çalışanlar için 10 mSv/yıl ve toplum üyesi bireyler için 1 mSv/yıl ya da 20  $\mu$ Sv/saat olarak alınır.

**Çizelge 2.1** Çeşitli kuruluşlar tarafından önerilen yıllık etkin doz limitleri

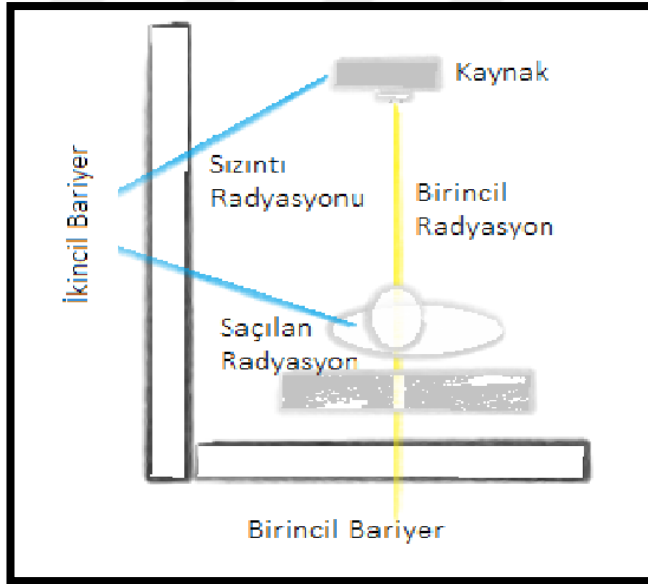
| Doz Limiti               | IAEA                                                               | NCRP                                                               | ICRP                                                               | TAEK |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Mesleki maruziyet</b> | Ardışık 5 yılda ortalama 20 mSv ve herhangi bir yılda azami 50 mSv | 10 mSv/yıl, kümülatif yaş dozu*10 mSv ve herhangi bir yılda 50 mSv | Ardışık 5 yılda ortalama 20 mSv ve herhangi bir yılda azami 50 mSv |      |
| <b>Halk maruziyeti</b>   | 1 mSv                                                              | 1 mSv , özel durumlarda 5 mSv                                      |                                                                    |      |

Radyoterapi tesislerinde zırhlama tasarımında cihazda üretilen radyasyonun türü ve enerjisi önemlidir. Doğrusal hızlandırıcı cihazlarından yayımlanan radyasyon, bremsstrahlung foton demetinin yanı sıra bu fotonlar tarafından üretilen ikincil radyasyonları da içerir. Doğrusal hızlandırıcı cihazlarında foton üretimi cihazın gantry denilen yaklaşık 80 cm'lik kafa kısmında gerçekleşmektedir. Gantry yaklaşık 1 m'lik bir kola bağlıdır, izo-sentirik yerleşimlidir ve hasta masası etrafında 360° dönebilmektedir. Hızlandırılan elektronların hedefe çarptırılmasıyla üretilen bremsstrahlung fotonları kolime edilerek tedavi masasına yönlendirilir. Foto-nötron üretimi ise hem cihazın gantry bölümünde, hem de koruyucu engellerde gerçekleşebilir. Birincil radyasyon fotonlarının 8 MeV civarı nötron bağlama enerjisinin üzerinde enerjiye sahip olması durumu, foto-nötron oluşumuna neden olur. Bu şekilde üretilen foto-nötronlar ise Şekil 2.2'de gösterildiği gibi büyük ölçüde koruyucu engellerde gerçekleşen nötron yakalama fotonlarının üretilmesine yol açarlar (IAEA 2006). NCRP 79 numaralı raporunda 10 MV'den yüksek enerjilerde çalıştırılan doğrusal hızlandırıcılar için nötronların önemli olduğunu, bu enerjiden düşük enerjili cihazlarda ise nötron katkısının önemsiz olduğu belirtilmiştir (NCRP 1984). Bu nedenle, 10 MV altı çalıştırılan doğrusal hızlandırıcıların zırhlamasında genellikle sadece fotonlar ve elektronların ele alınması yeterlidir. Ancak kurşun ve çelik gibi malzemelerden veya lamine engellerden oluşan oda zırhlaması ile oluşacak nötronların zayıflatılması bu enerji aralığında da önemlidir ve ek koruyucu katmanları gerekebilir. Şekil 2.1'de doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan radyasyon türleri yer almaktadır. Çizginin sağındaki radyasyonlar, 10 MV üzerinde foton enerjisine sahip olan hızlandırıcılarda önem kazanmaktadır.



**Şekil 2.2.** Doğrusal hızlandırıcılarda farklı tiplerde radyasyon üretimi

Doğrusal hızlandırıcılar için yapılan zırhlama hesaplarında birincil ve ikincil radyasyonlar dikkate alınır (Şekil 2.3). Birincil radyasyon, doğrudan hasta tedavisi için kullanılan ve cihazın ürettiği radyasyondur. Birincil radyasyon hasta ve diğer yapılarla etkileştiğinde ya da gantry kafasından sızdığına ise ikincil radyasyon oluşmaktadır.

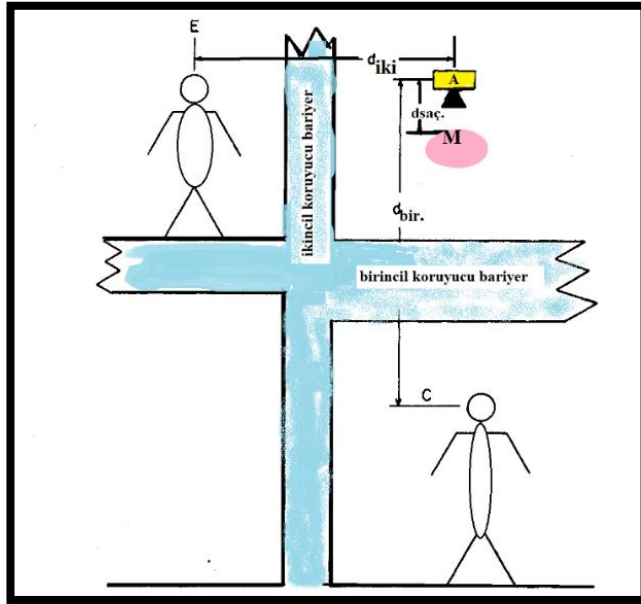


**Şekil 2.3.** Birincil ve ikincil (saçılan ve sızıntı) radyasyon kaynakları ile birincil ve ikincil engellerin şematik gösterimi (NCRP 2005)

Zırhlama tasarımlarında birincil engeller, doğrudan kaynaktan yayılan radyasyonu tasarım hedefinin altına indirmek için uygulanır ve uygun şekilde tasarlandığında tüm ikincil radyasyon kaynakları için de yeterli koruma sağlar. Birincil engel, tedavi ünitesinden çıkarak doğrudan engеле yönelen foton ışınını zayıflatmak için odanın iki duvarı, tavanı ve zeminine cihazın maksimum alan açıklığı ve saçılmaları da dikkate alacak boyutta uygulanır. Birincil engelin ayrıca foton ışınının ikincil ürünlerinden kaynaklanan ikincil radyasyon dozunu da eşit şekilde zayıflatması beklenir. Örneğin doğrusal hızlandırıcı gantry’de ve birincil engelde birincil ışın tarafından üretilen foto-nötronların da birincil engel tarafından zayıflatılması gerekmektedir (NCRP 2005). İkincil engel ise, odanın birincil engel haricindeki tüm taban, tavan ve duvarlarına sızan ve saçılan radyasyonlara karşı uygulanır.

Şekil 2.1’de (P) engel kullanımı ile O noktasındaki bireyin maruziyet dozunun (P’) tasarım hedefine düşürülmesi amaçlanmaktadır. NCRP 39 numaralı raporda önerilen radyasyon alanları sınıflandırmasına göre zırh tasarımında kullanılan tasarım hedefi kontrolü alanlarda 10 mSv, kontrolsüz alanlarda 1 mSv’dir (NCRP 1971).

NCRP 49’da alan sınırlandırması Şekil 2.4’de olduğu gibi tanımlanmıştır. Koruyucu muhafaza ile çevrili x-ışını kaynağından (A) çıkan birincil demet, hastadan (M) geçtiğinde ek şiddeti bir miktar azalır ve bu şekilde kaynaktan  $d_{bir}$  kadar uzaktaki C noktasında bulunan bireyin radyasyon maruziyeti, hasta ve birincil engel tarafından azaltılmış olur. Kaynaktan  $d_{iki}$  mesafesi kadar uzakta duran E kişinin radyasyon maruziyetine birincil engelden saçılan radyasyon ile gantry’den sızan radyasyon neden olur. Saçılan ve sızan radyasyonun düzeyi E noktasındaki bireye ulaşmaya kadar ikincil engel tarafından zayıflatılarak tasarım doz hedefinin altına düşürülmektedir (NCRP 1976).



**Şekil 2.4.** Radyasyondan korumada alan sınıflandırmalarını ve engel yerleşimlerini belirten doğrusal hızlandırıcı odası temsili görüntüsü (NCRP 1976)

Birincil engel ile yeterli radyasyon koruması sağlamak için, engelden geçen eşdeğer dozun tasarım hedefine ( $P$ ) oranının bire eşit veya birden küçük olması gerekir. Günümüzde zırhlama tasarımında yol gösterici olarak kullanılan NCRP 49 ve 151 numaralı raporlarda birincil engel hesaplaması için 1925 yılında Mutscheller tarafından geliştirilmiş aşağıda tanımlanan ampirik bağıntı kullanılmaktadır (NCRP 1976; NCRP 2005). Bu formülde yer alan değerler, bitişik alanların kullanım bilgileri, meşguliyetleri, odanın duvarlarının zemininin ve tavanının birincil veya ikincil engel olup olmadığı gibi bir takım bilgilerin planlama aşamasında bilinmesi gerekmektedir.

$$B_{bir} = \frac{Pd_{bir}^2}{WUT} \quad (2.1)$$

Bu denklemde  $P$ , tasarım hedefi olup engelin arkasında bir haftalık zaman diliminde alınacak eşdeğer doz değeridir (Sv/hafta). Işın merkezinden korunacak olan noktaya olan mesafe  $d_{bir}$  ile gösterilmiştir ve birimi metredir.  $W$ , iş yükü olup, ışın merkezinden 1 m mesafede haftalık soğurulan foton dozu değeridir ve birimi Gy/haftadır.  $U$ , ilgili duvarın kullanım yüzdesini temsil eder.  $T$ , ilgili alanın meşguliyet faktörüdür. Bu nicelikler yardımıyla fotonlar için hesaplanan engel geçiş katsayısı ( $B_{bir}$ ) ise birimsiz bir niceliktir.

IAEA 47 numaralı rapor radyoterapi ünitelerinin birincil engel kalınlığı hesaplamaları için ünitenin çalıştığı doz hızını da dikkate alan aşağıdaki ampirik hesaplama yöntemini önermektedir. Bu rapora göre, anlık doz hızını ( $IDR$ ) birincil engelin arkasında tolere edilebilir bir seviyeye ( $B_{IDR}$ ) indirmek için gereken engel geçiş katsayısı aşağıdaki şekilde belirlenir (IAEA 2006).

$$B_{IDR} = \frac{P_{IDR}(d + SAD)^2}{DR_0} \quad (2.2)$$

Burada  $P_{IDR}$ , anlık tasarım dozu limitidir.  $d$ , engelin dışında tedavi cihazı merkezine metre cinsinden uzaklık olup,  $SAD$  kaynak ile cihaz merkezi arası mesafedir (doğrusal hızlandırıcı için 1 m).  $DR_0$  ise cihaz merkezinde 1 saatteki doz hızıdır ( $Gy/h$ ).

Engel geçiş katsayısı hesaplandıktan sonra, öngörülen koşullar altında seçilen zırh materyalinden birincil engel için kaç  $TVL$  değerinde kalınlık gerekeceği aşağıdaki bağıntı ile elde edilir.

$$n_B = -\log(B_{bir}) \quad (2.3)$$

$TVL$  değerleri ise, zırhlama materyalinin türü ve kalınlığı ile kaynağın enerjisine göre daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlardan oluşmuş tablolar halinde NCRP 49 ve IAEA 47 yayınlarında bulunmaktadır (NCRP 1976; IAEA 2006). Yukarıdaki hesaplamalar, tablolardan elde edilecek  $TVL$  değerleri ile birlikte kullanıldığında zırh tasarımı için gerekli birincil engel kalınlığı belirlenmiş olacaktır.

1984 yılında Nelson ve LaRiviere, klinik lineer hızlandırıcılarda birincil ve saçılan radyasyonun sıradan beton için engel geçiş katsayılarını ve  $TVL$  değerlerini Morse programı ile hesaplamışlardır (Nelson ve LaRiviere 1984). NCRP 151 ve IAEA

47 numaralı raporlarda lineer hızlandırıcılarda birincil ve ikincil radyasyonun belirli engel materyalleri için engel geçiş katsayıları ve TVL değerleri Nelson'un yaptığı çalışmada elde edilen bu sonuçlara dayanmaktadır (NCRP 2005; IAEA 2006).

Yüksek enerjili x-ışınlarının transmisyon özelliklerinin bilinmesi, doğrusal hızlandırıcı odası zırhlama tasarımında önemli bir unsurdur. Kirn ve Kennedy'nin 1954 yılında yaptıkları çalışmada, betatronlar ile elde edilen 6-38 MV enerjilerdeki fotonların betondaki zayıflama eğrileri deneysel yolla elde edilmiştir (Kirn ve Kennedy 1954). Miller ve Kennedy daha sonra bu eğrilerin 39-200 MV enerjiler için de değişmeyeceğini deneysel ve teorik yöntemlerle hesaplamış ve 1956 yılında yayınlamıştır (Miller ve Kennedy 1956).

1960 öncesinde betatron ve siklotron cihazlarına yönelik zırhlama tasarımları için 1955 yılında ABD Ulusal Radyasyondan Korunma Komitesi, 100 MV'e kadar olan enerjilerde çalışan betatron ve sinkrotronların çevresinde kullanılacak beton kalkanların kalınlıkları için önerilerde bulunmuştur (NBS 1954).

Doğrusal hızlandırıcı cihazlarının 1960 yılı sonrasında artan kullanım ihtiyacı ile oluşan radyasyondan korunma gereksinimleri nedeniyle, 1977 yılında NCRP 51 numaralı raporunu yayınlamıştır. Bu raporda, betatronlar ile elde edilen farklı foton enerjilerinin betondaki zayıflama eğrileri Kirn ve Kennedy'nin daha önce bahsedilen çalışmasından alınarak ekstrapole edilmiştir (NCRP 1977; Kirn ve Kennedy 1954). NCRP Rapor 51, birincil engelin foton demetini zayıflatmasıyla ilgili değerlerin maksimum alan açıklığında ve birincil engele minimum 3 m mesafede yapılmasını önermektedir. Günümüzde kullanılan klinik doğrusal hızlandırıcı cihazlarının maksimum alan açıklığı kaynaktan 100 cm uzakta  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 'dir. NCRP 51 numaralı rapor önerilerine göre alınacak ölçümlerde cihaz açıklığının bu değerine karşılık 3 m mesafede engel üzerinde oluşan alan etkin alan açıklığı ise  $120 \times 120 \text{ cm}^2$  olmaktadır.

Kase vd. 2003 yılında bu rapordaki önerileri dikkate alarak çeşitli bileşimlerdeki beton engellerin radyasyon iletimi özelliklerini ölçümler yoluyla incelemişlerdir. Ölçümler  $7 \times 7 \times 4,75 \text{ m}^3$  oda boyutlarında araştırma amaçlı kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazından alınmıştır (Kase vd. 2003).  $122 \times 122 \text{ cm}^2$ 'lik etkin alan boyutunda en ağır 1100 kg'lık beton bloklar için engel geçiş katsayıları elde edilmiştir. Bu çalışmanın da göstermiş olduğu gibi engel geçiş katsayılarının ölçümler yoluyla elde edilmesi pratikte mümkün değildir. Bu nedenle bu değerler genelde bilgisayar destekli programlar yoluyla hesap edilmektedir.

Radyasyonun maddesel ortamda zayıflatıcı özelliklerinin Monte Carlo ile hesaplanma çalışmaları 1950'li yıllardan itibaren başlamıştır. Martin 1955 yılında yaptığı bir çalışmada, çeşitli kalınlıklardaki su ortamının 0,66 MeV radyasyon alanındaki zayıflatıcı özellikleri Ulusal Standartlar Bürosu otomatik bilgisayarı (SEAC) kullanılarak Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır (Martin 1955). Bunun devamı olarak Martin 1956 yılında yaptığı çalışmada ise demir, su, kurşun ve kalayın 0,66-10 MV aralığındaki fotonları zayıflatıcı özelliklerini yine SEAC bilgisayarını kullanarak Monte Carlo simülasyonları ile hesaplamış ve elde ettiği değerlerin Kirn ve Kenedy'nin 1954 yılında yaptıkları çalışmanın deneysel sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Martin ve Doggett 1956; Kirn ve Kenedy 1954).

Greene ve Massey 1961 yılında yaptıkları çalışmada, 4 MV enerjili doğrusal hızlandırıcıda 2,2 g/cc yoğunluklu beton engel için birincil ve ikincil radyasyonun zayıflama özellikleri deneysel ölçümler yolu ile incelemiştir (Greene ve Massey 1961). Ölçümler kaynak dedektör arası mesafe 3 m'de gerçekleştirilmiş ve ilk engel dedektörün hemen önüne yerleştirilerek artan engel kalınlıkları için tekrarlanmıştır. En geniş etkin alan boyutu  $90 \times 75 \text{ cm}^2$  ve beton engellerin alan boyutu ise  $120 \times 105 \text{ cm}^2$ 'dir. Etkin alan boyutu  $12 \times 12$ - $75 \times 90 \text{ cm}^2$  aralığında olan transmisyon ölçümleri alınarak TVL değerlerinin etkin alan boyutu bağımlılığı incelenmiştir.  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutu için bulunan TVL değeri, alan boyutunun  $65 \times 65 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutuna kadar artırılmasıyla yaklaşık 1,3 kat kadar artmıştır.  $65 \times 65 \text{ cm}^2$  alan boyutu sonrasında geniş demet koşulları elde edilmiş ve TVL değerlerinin etkin alan boyutunun artmasıyla değişmediği gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada birincil radyasyona ek olarak duvar ve cihazlar tarafından saçılma ve sızıntı kaynaklı doz katkısının TVL ölçümüne etkisi incelenmiş ve bu katkı kaynaklı TVL değerindeki belirsizliğin %1'in altında olduğu bulunmuştur.

1968 yılında Karzmark ve Capone birincil radyasyon, ikincil saçılma radyasyonu ve ikincil sızıntı radyasyonun beton çelik ve kurşun engeldeki zayıflama özelliklerinin incelendiği üç çalışma yapmışlardır. Bunlardan ilkinde 6 MV enerjili x-ışınlarının dar demet ve geniş demet koşullarında kurşun, çelik ve beton materyallerinde birincil radyasyon zayıflama özelliklerini ölçümler yoluyla elde etmişlerdir (Karzmark ve Capone 1968(a)). Çalışmada dar demet koşullarında tüm materyallerin transmisyon ölçümlerinde etkin alan boyutu  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  olarak alınmıştır ve kaynak dedektör arası mesafe 320 cm'dir. Geniş demet koşullarında alınan transmisyon ölçümlerinde ise kaynak dedektör arası mesafe 260 cm'dir ve saçılma kaynaklı radyasyon dozunun iyon odasına katkısını engellemek için iyon odası kurşun koruma içerisine yerleştirilmiştir. Aynı yıl yaptıkları ikinci çalışmalarında ise Karzmark ve Capone aynı koşullarda 6 MV x-ışınlarının kurşun, çelik ve beton materyallerinde ikincil saçılma radyasyonunun zayıflama özelliklerini ölçümler yoluyla elde etmişlerdir (Karzmark ve Capone 1968(b)). Üçüncü çalışmalarında ise ikincil sızıntı kaynaklı radyasyonun transmisyon özellikler deneysel koşullar altında incelenmiştir (Karzmark ve Capone 1968(c)).

1971 yılında Maruyama ve arkadaşları, bir doğrusal hızlandırıcı ve iki betatron ile 6 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazı fotonlarının kurşun, demir, ağır beton (3,31 g/cc) ve normal betondaki (2,26 g/cc) geniş demet zayıflama katsayılarını deneysel ölçümler yoluyla elde etmişlerdir (Maruyama vd. 1971).

1979 yılında Tochilin ve LaRiviere 10 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil ve ikincil radyasyonların beton materyalindeki ( $2,35 \text{ g/cm}^3$ ) zayıflama özelliklerini ve zayıflama özelliklerinin alan boyutuna bağımlılığını deneysel yöntemlerle incelemiştir (Tochilin ve LaRiviere 1979). Birincil radyasyon transmisyon ölçümlerinde farmer tip iyon odası ve 2,5 cm su eşdeğeri build-up fantom kullanılmıştır. Ölçümlerde TVL değerinin alan boyutu bağımlılığı etkin alan boyutu  $5 \text{ cm}^2$  ve  $35 \text{ cm}^2$  aralığında incelenmiş,  $20 \text{ cm}^2$  sonrasında geniş demet koşullarının sağlandığı TVL değerinin değişmediği gözlemlenmiştir.

1983 yılında Fred vd. 18 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil ve ikincil radyasyonların sıradan beton ve çelik için transmisyon özelliklerini, TVL değerlerini deneysel yöntemlerle incelemiştir (Fred vd. 1983). TVL ölçümlerini

farmer tipi iyon odası kullanarak  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  alan boyutları sonrasında yani geniş demet koşulları altında elde etmişlerdir. Ölçümlerde iyon odasında yeterli dozun toplanabilmesi amacıyla dedektör önüne 3 cm su eşdeğeri fantom yerleştirilmiştir. Kaynak dedektör arası 200 cm mesafede etkin alan boyutu  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  için geniş demet koşulları elde edilmiştir. Engel için seçilen materyaller fantomun hemen önüne yerleştirilmiş ve çelik ile beton için TVL değerleri sırasıyla 3,4 cm ve 13,5 cm olarak bulunmuştur. Beton TVL değerlerini Maruyama ve arkadaşları ile Kirn ve Kenedy'nin çalışmalarında bulunan değerler ile karşılaştırmışlardır (Maruyama vd. 1971; Kirn ve Kenedy 1954).

1984 yılında LaRiviere, araştırma amaçlı kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazında oluşan 24 MV enerjili birincil ve ikincil radyasyonların sıradan betondaki ( $2,40 \text{ g/cc}$ ) zayıflama özelliklerini deneysel ölçümler ile incelemiştir (LaRiviere 1984). Cihaz odasının alan boyutları,  $9,2 \times 6,7 \text{ m}^2$  ve yüksekliği 4,88 m'dir. Ölçümlerde  $15 \text{ cm}^3$  iyon odası  $2,9 \text{ cm}^3$ 'lük su eşdeğeri build-up fantomu kullanılmıştır. Kaynak iyon odası arası mesafe 6 m kadar arttırılarak farklı etkin alan boyutlarında transmisyon değerlerinin değişimi incelenmiştir. Dedektör iyon odası arası 100 cm mesafede alınan  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutu için elde edilen ortalama TVL 47,0 cm olarak bulunmuştur.  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutu sonrasında geniş demet koşulları oluşmaya başlayarak  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ -  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  alan boyutlarında sabit 47,5 cm geniş demet TVL değeri elde edilmiştir.

1984 yılında Nelson ve LaRiviere yaptıkları bir diğer çalışmada, 6, 10 ve 25 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil ve ikincil radyasyonların sıradan beton için ( $2.35 \text{ g/cm}^3$ ) geniş demet koşullarında engel geçiş katsayılarını ve TVL değerlerini Morse programı ile simülasyon yaparak hesaplamışlardır (Nelson ve LaRiviere 1984). Beton engelin birincil radyasyon TVL değeri 6 MV için 36,7 cm, 10MV için 41 cm, 25 MV için ise 48,2 cm olarak belirlenmiştir.

1993 yılında Barish'in yaptığı çalışmada, doğrusal hızlandırıcı cihazlarının zırhlamasında kullanılmak üzere Ladit adı verilen ağır betonun ( $4,7 \text{ g/cm}^3$ ) radyasyon geçirgenliği özelliklerini incelemiştir (Barish 1993). Çalışmada 8-16 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı foton demetleri ile transmisyon ölçümleri yapılmış ve Ladit materyalinin sıradan betona göre radyasyon zayıflatma özelliğinin iki kat daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Binalardaki katlar arasındaki mesafelerin zırhlama açısından elverişsiz şekilde dar olması bazen ince bir birincil zırhlama kalınlığı gerektirebilmektedir. Tasarım aşamasında özellikle tavan için bazen primer zırhlama mesafesi 1 m veya daha az olacak şekilde sınırlandırılması gerekebilmektedir. Özellikle asgari kalınlıkta bir zırhlama alanı olan yapılarda metal ve betondan oluşan lamine engellerin kullanımı gerekli olabilmektedir. Bu amaçla lamine engel kullanımı ile maliyet ve kullanım alanı arasında optimizasyon yapılarak çeşitli türlerde koruyucular tasarlanmaktadır.

McGinley'nin 1992 yılında yaptığı çalışmada 18-15 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı odalarının zırhlama tasarımında beton-kurşun ya da beton-çelik lamine engel kullanımında radyasyon engellerinde foto-nötron üretimi ile ilgili bir dizi bilgi yayınlamıştır (McGinley 1992). Engel dışındaki foto-nötron seviyelerine ek olarak, koruyucu malzemelerde nötronların yakalama ve inelastik saçılma reaksiyonları

kaynaklı oluşan gama ışınlarının da radyasyondan korunma açısından hesaba dahil edilmesi gerektiğini göstermiştir.

1994 yılında McGinley ve Butker doğrusal hızlandırıcı odalarının zırhlamasında kullanılan çeşitli türde lamine birincil tavan engellerinin radyasyon geçirgenliği performansını ölçümler yoluyla incelemiştir (McGinley ve Butker, 1994). Nötron ve foton eşdeğer doz oranları, her bir engel dışında ayrı ayrı ölçülmüş ve ölçülen foton seviyesi ile hesaplanan x-ışını sızıntısı seviyesine dayanılarak nötronların zırh malzemeleriyle etkileşimleri sonucu üretilen fotonlardan kaynaklanan eşdeğer doz oranı tahmin edilmiştir. Ayrıca fotonlar ve nötronlar için polietilen koruma parametreleri belirlenmiştir. NCRP 79 numaralı raporunda verilen teknikler kullanılarak tasarlanan tavan engellerinde aşırı radyasyon sızıntısı yaşandığı tespit edilmiştir (NCRP 1984).

1976'da yayınlanan NCRP 49 numaralı rapor, birincil, saçılan ve sızan radyasyon dâhil olmak üzere, 10 MV'e kadar olan enerjiler için x-ışınlarının ve gama ışınlarının tıbbi kullanımına yönelik zırhların nasıl hesaplanacağı açıklanmıştır (NCRP 1976). Bununla birlikte bu raporda, doğrusal hızlandırıcılar için saçılan radyasyon verileri sadece 6 MV enerjili fotonlar için mevcuttur ve sızıntı radyasyonunun birincil radyasyona eşdeğer olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, 4-25 MV aralığındaki tüm enerjiler için ek veriler ölçmeye ihtiyaç duyulmuştur.

Nogueira ve Biggs 2002 yılında yaptığı bir çalışmada 4, 6 ve 10 MV enerjili doğrusal hızlandırıcılarda saçılma kaynaklı olarak 30° ile 135° açı aralığında oluşan ikincil radyasyonun kurşun malzemedeki zayıflama özellikleri MCNP Monte Carlo programı ile simülasyon yapılarak elde edilmiştir (Nogueira ve Biggs 2002). Çalışmada 30° ile 135° arasındaki saçılma açılarında en geniş TVL değeri 30°'de elde edilmiştir. TVL değerlerinin açılara bağlı değişimi 4 MV için 3,5 cm ile 0,3 cm arasında, 6 MV için 3,8 cm ile 0,6 cm arasında ve 10 MV için 4,2 cm ile 0,7 cm arasındadır. MCNP simülasyonu ile elde ettikleri ikincil saçılma kaynaklı radyasyonun kurşun engeldeki zayıflama özelliklerinin, Karzmark ve Capone'un 1968 yılındaki çalışmasının ölçümlere dayalı sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir (Karzmark ve Capone 1968(b)).

2003 yılında Kase ve arkadaşları araştırma amaçlı kullanılan 6-18 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazında ikincil radyasyonun farklı beton örnekleri için zayıflama özelliklerini ölçümler yoluyla incelemişlerdir. TVL değerlerinin hesaplandığı etkin alan boyutu cihazın maksimum alan açıklığı olan 40\*40 cm<sup>2</sup>'de ve kaynaktan 3 m mesafede 120\*120 cm<sup>2</sup> olarak ayarlanmıştır. Beton engellerin alan boyutlarının ise 122\*122 cm<sup>2</sup> olduğu ve en ağır beton bloğun 1100 kg olduğu vurgulanmıştır (Kase vd. 2003). Çalışmada aynı yoğunlukta farklı atomik bileşene sahip beton materyallerinin farklı TVL değerlerine sahip olduğu gösterilmiştir.

2007 yılında Rodgers, 6 MV enerjili Stereotaktik Radyocerrahi (SRS) cihazlarında zırhlama amaçlı olarak kullanılan dört farklı beton, kurşun ve çelik materyallerinin radyasyon zayıflama özelliklerini dar demet ve geniş demet koşullarında Monte Carlo simülasyonu ile hesaplamıştır (Rodgers 2007). Çalışmada, ikisi 2,3 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu fakat farklı atomik bileşime sahip, ikisi ise 2,35 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu fakat farklı kimyasal bileşime sahip dört farklı beton için hesaplamalar yapılmıştır. Yaygın olarak bu cihazların zırhlaması için NCRP 51 numaralı raporlarında önerilen ve doğrusal hızlandırıcı cihazları için elde edilmiş olan TVL değerlerinin kullanıldığı belirtilmiştir (NCRP 1977). Ancak bu cihazlardaki maksimum alan açıklığının doğrusal

hızlandırıcı cihazlarının maksimum alan açıklığı olan 40\*40 cm<sup>2</sup>'den çok daha küçük yani 6\*6 cm<sup>2</sup> olması nedeni ile bu cihazların zırhlanmasında özel TVL değerlerinin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu şartlarda yani 6\*6 cm<sup>2</sup> alan için TVL değerlerini ölçümler yolu ile elde etmişler ve mevcut TVL değerlerinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada geniş demet koşullarında elde edilen beton, kurşun ve çelik materyallerinin 6 MV enerjideki TVL değerleri NCRP 51 ve 151 numaralı raporlara; Nelson ve LaRiviere'nin 1984 yılında yapmış oldukları çalışmaya ait değerler ile karşılaştırılmıştır (NCRP 1977; NCRP 2005; Nelson ve LaRiviere 1984).

Facure ve Silva'nın 2007 yılında yaptıkları çalışmada, klinik lineer hızlandırıcıların zırhlanmasında ağır beton kullanımı için engel geçiş katsayıları Monte Carlo programı ile simülasyon yapılarak hesaplanmış ve farklı yoğunluklardaki beton örneklerinin yoğunluklarına göre TVL değerlerinin değişimi karşılaştırılmıştır (Facure ve Silva 2007). Çalışma sonucunda, zırhlamada yüksek yoğunluklu betonlar kullanıldığında, normal betonlardan yoğunluk ölçeklemesi ile elde edilen TVL değerlerinin genellikle aşırılığa kaçarak fazla maliyete neden olduğu gösterilmiştir. Bunun nedeni olarak da ağır betonlarda homojen olmayan karışımların bulunması gösterilmiştir.

Jones ve arkadaşları 2009 yılında klinik lineer hızlandırıcılarda birincil ve ikincil zırhlama amaçlı kullanılan mangadens ağır beton (3,8 g/cm<sup>3</sup>) örneklerinin zırhlama özelliklerini deneysel biçimde incelemişlerdir (Jones vd. 2009). Ölçümlerde 0,6 cc Farmer tipi iyon odası ile 2 cm build up sağlamak için su eşdeğeri fantom kullanılmış ve ayrıca sintilasyon dedektörü kullanılmıştır. İyon odası ile yüksek doz ölçümleri yapılırken, daha hassas olan sintilasyon dedektörü ile de düşük enerjili ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Mesbahi ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları bir çalışmada ise lineer hızlandırıcılarla elde edilen 9 MV ve 18 MV enerjili fotonların ve Co60 gama ışınlarının üç farklı beton örneğinde doğrusal zayıflama katsayıları ve HVL değerleri deneysel ölçümler ile elde edilmiştir (Mesbahi vd. 2013). Beton örnekler saf barit (3,4 g/cm<sup>3</sup>), %5 kolemanit katkılı barit (3,23 g/cm<sup>3</sup>) ve %10 kolemanit katkılı barit (3,06 g/cm<sup>3</sup>) olarak üç farklı türde hazırlanmıştır. Sırasıyla 9 MV ve 18 MV enerjide HVL değeri saf barit için 4,47-5,68 cm, %5 kolemanit katkılı barit 4,68-5,92 cm, %10 kolemanit katkılı barit 4,95-6,18 cm olarak elde edilmiştir. Kolemanit katkısının artması ile engelin zayıflatıcı özelliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada iki tür barit-kolemanit betonu için foto-nötron üretimi Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır. Barit betona kolemanit eklenmesi, labirent kapısında daha düşük foto-nötron üretimine neden olmuştur, ancak barit-kolemanit betonların basınç dayanımı testlerinin barite göre daha zayıf olduğu ve foton zayıflama katkısının da daha düşük olduğu elde edilen sonuçlar arasındadır.

Mesbahi ve Rezvan'ın 2017 yılında yaptığı bir başka çalışmada ise klinik lineer hızlandırıcıların zırhlanmasında kullanılan farklı yoğunluktaki beton örneklerinin saçılma özellikleri MCNP Monte Carlo kodu kullanılarak incelenmiştir (Mesbahi ve Rezvan 2017). Çalışmada çelik-manyetit katkılı beton (5,11 g/cm<sup>3</sup>), kurşun-magnetit katkılı beton (4,62 g/cm<sup>3</sup>), datoline-galena katkılı beton (4,42 g/cm<sup>3</sup>), ilmenit katkılı beton (3,69 g/cm<sup>3</sup>), barit katkılı beton (3,45 g/cm<sup>3</sup>) ve sıradan betonun zırhlama amaçlı

kullanımında saçılımın açığa bağımlılığı incelenmiştir. En fazla bağımlılığın sıradan betonda en az bağımlılığın ise datoline-galena katkılı betonda olduğu gösterilmiştir.

Doğrusal hızlandırıcı odalarının zırhlamasında yaygın olarak kurşun, çelik ve farklı yoğunluklardaki beton malzemeleri kullanılmaktadır. Bu materyallerin birincil engel olarak kullanımlarında gerekli kalınlıklarının hesaplamaları ise NCRP 151, IAEA 47 raporlarında verilen hazır tabloları ile elde edilmektedir. Genellikle Monte Carlo simülasyonları ve hesaplama modelleri ile elde edilen bu TVL değerlerinin ölçümler ile doğrulanması oldukça yararlı olacaktır. Literatürde yer alan ölçüme dayalı TVL değerlerinin birçoğu ise araştırma amaçlı doğrusal hızlandırıcı cihazlarından ya da betatronlardan elde edilen TVL değerlerini içermektedir. Klinik doğrusal hızlandırıcı cihazları ile elde edilmiş TVL değerleri kısıtlı sayıda bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında radyoterapide kullanılan klinik lineer hızlandırıcıların ürettiği foton demetleri için çeşitli zırhlama materyallerinin engel geçiş katsayıları klinik doğrusal hızlandırıcı cihazında deneysel ölçümler ile belirlenecektir. Cihaza özgü ve gerçek foton spektrumları kullanılarak elde edilecek engel geçiş katsayıları, herhangi bir ihmal, yaklaşıklık ya da model içermeyecek ve böylece radyoterapi doğrusal hızlandırıcı odalarının zırhlama işlerinde referans olarak kullanılabilir. Bu yöntemle elde edilecek geçiş faktörleri ile tasarlanacak zırh malzemeleri daha gerçekçi radyasyon korunması sağlayacaktır. Ayrıca, ölçümlerde izlenecek yöntem ile tüm x-ışını üreten sistemler için de engel geçiş katsayıları ve kalınlık eğrilerinin oluşturulması mümkün olacaktır. Bu değerlerin kullanımı ile zırhlama malzemelerinin farklı oranlardaki karışımları kullanılarak istenen boyut ve özellikte yeni zırh materyallerinin tasarımı yapılabilecektir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Zırhlamanın Temel Yönleri

Harici radyasyon maruziyetini tolere edilebilir bir düzeyde tutmanın ve böylece radyasyonun olumsuz etkilerinden bireyleri korumanın süre, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel prensibi vardır. Korunacak bir bireyin radyasyon maruziyeti, kaynak yakınında geçirilecek süre kısa tutularak; kaynağa olan mesafe artırılarak; ya da kaynak ile arasına radyasyonu soğuracak bir materyal engel konarak azaltılabilir.

Kanser hastalarının radyasyon ile tedavisinde kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazlardan yayımlanan birincil ve ikincil radyasyonlara karşı korunmada bu prensiplerden en önemlisi, cihazın bulunduğu tedavi odasının duvarlarının zırhllanmasıdır. Zırhlama, odanın tüm duvar, tavan ve zeminlerine uygulanarak, cihazın ürettiği birincil radyasyona karşı birincil engeller, saçılan ve sızıntı kaynaklı ikincil radyasyondan korunmak için de ikincil engeller kullanılır. Şekil 3.1’de basitleştirilmiş bir doğrusal hızlandırıcı (linak) odasının tasarım şeması yer almaktadır.

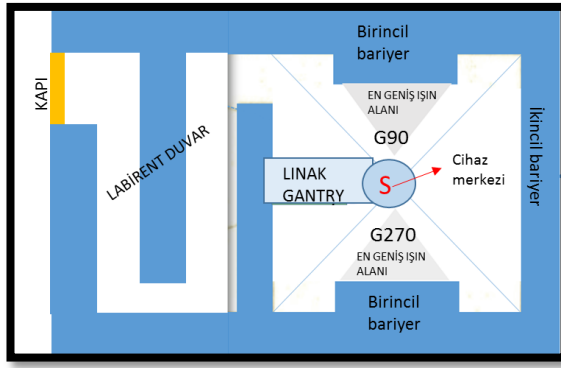
Doğrusal hızlandırıcı tesislerinin zırhlama tasarımında hangi tür ve kalınlıkta materyalin kullanılacağı belirlenirken, cihazın yaydığı radyasyonun türü, enerjisi ve miktarı dikkate alınır. Sonlu kalınlıktaki bir materyal içinden geçen bir demetteki fotonlar malzemeyi oluşturan atomlarla etkileşime girdiklerinde fotonların bir kısmı saçılmaya bir kısmı da soğurulmaya uğrayacağından foton demetinde bir azalım gözlenir. Materyal içinde hiç etkileşime uğramayan fotonlar ise enerji kaybetmeden ve doğrudan değiştirilmeden engeli aşar. Foton etkileşimleri genellikle tesir kesiti şeklinde olasılıklar ile ifade edildiğinden fotonların bu şekilde zayıflaması istatistiksel bir süreç olarak ele alınır.

Maddesel ortam içerisindeki foton davranışları, basitleştirilmiş şekilde ince hedef-dar demet koşulları altında incelenir. İyi geometri koşulları olarak da bilinen bu yaklaşımda, tek enerjili parçacıklardan oluşan bir demetteki fotonlardan sadece saçılmaya ya da soğurulmaya uğramayanların engeli aşacağı ve dozun hesaplanmak istendiği noktada yer alan detektöre ulaşacağı var sayılır. Bu durumun saçılan fotonların da detektöre ulaşabildiği geniş demet koşullarından farkı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Böylece, dar demet koşulları altında tek enerjili bir foton demetinin ilk intensitesinin ( $I_0$ ) belli kalınlıktaki ( $x$ ) engelden geçtikten sonra ne kadar zayıflayacağı ( $I(x)$ ), Beer Lambert yasası ile ifade edilir.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıdaki  $\mu$ , *doğrusal zayıflama katsayısı* olarak bilinir ve fotonların birim uzunluk başına etkileşime girme olasılığı olarak tanımlanır. Ortam kalınlığı genellikle cm olarak alındığından,  $\mu$ ’nün birimi  $cm^{-1}$  olur. Değeri, malzemenin türüne ve fotonların enerjisine bağlı olarak değişir ve genellikle literatürdeki tablolarda  $cm^2/g$  cinsinden  $\mu/\rho$  şeklinde ( $\rho$  materyalin  $g/cm^3$  cinsinden yoğunluğu olmak üzere) kütleli zayıflama katsayısı olarak mevcuttur (Berger vd. 2010).

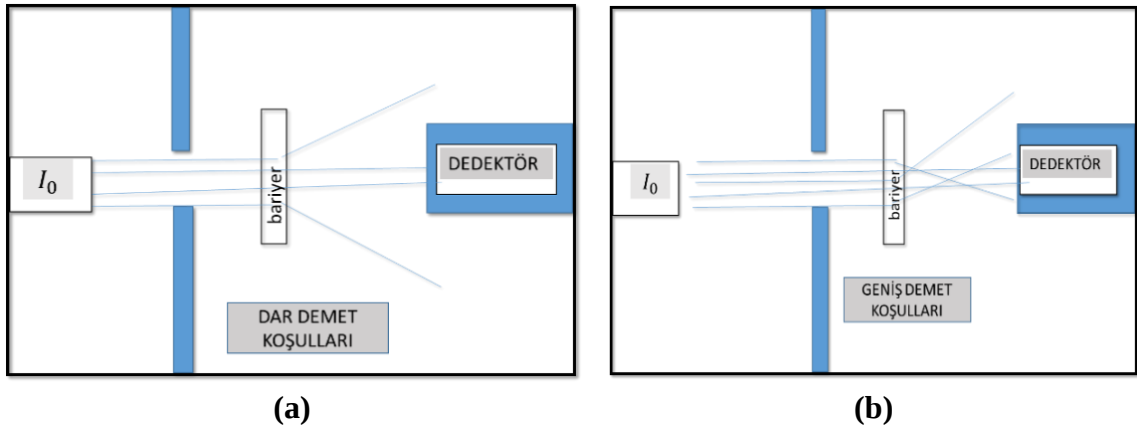


Şekil 3.1. Basitleştirilmiş bir doğrusal hızlandırıcı odası tasarım şeması

Belli bir radyasyon türü için gerekli bir malzemenin zırh kalınlığını belirlemede Beer-Lambert yasası oldukça faydalı olur. Ancak denklemin türetilmesinde kullanılan ideal geometri koşulları, kalın bir zırhın gerektiği bir durumda deneysel olarak oluşmaz. Çünkü demet ince ve tek enerjili fotonlardan oluşsa dahi, kalın engel içerisinde meydana gelecek etkileşimler sonucu detektöre saçılmaya uğrayan farklı enerjilerde fotonlar da ulaşacaktır (Şekil 3.2(b)). Bu durumda dedektörün kaydettiği foton intensitesi, denklemin öngördüğünden daha yüksek çıkacaktır. Bu durumu aşmak için, dedektöre saçılarak ulaşan ikincil fotonların da varlığını hesaba katan bir düzeltme faktörü hesaplamalara dâhil edilir.

$$I(x) = B(\mu x, E) I_0 e^{-\mu x} \quad (3.2)$$

Burada  $B(\mu x, E)$ , *birikim faktörü* adı verilen birimsiz bir katsayı olup, birincil radyasyon ile saçılma kaynaklı ikincil radyasyonun toplamının, birincil radyasyona oranı olarak tanımlanır ve bu nedenle değeri her zaman 1'den büyüktür.  $B(\mu x, E)$ , zırhlama malzemesinin kalınlığına, kaynak ve geometrisine bağlıdır.



Şekil 3.2. Işınlanma koşulları (a) dar-demet; (b) geniş-demet

Farklı malzeme türleri ve kalınlıkları için birikim faktörleri, çeşitli hesaplama modelleri ile bulunabilmektedir. Bunlara örnek olarak Taylor formu ve Berger formu verilebilir (Martin 2012). Ancak birikim faktörleri, sınırlı sayıda materyal türleri ve kalınlıkları ile radyasyon enerjileri için tanımlıdır. Kompozit özellikte malzemeler ve spektrumlu kaynaklar söz konusu olduğunda, Taylor ya da Berger formülleri gibi yaklaşık bağıntılarla  $B(\mu x, E)$ 'in hesaplanması ya da literatürdeki tablolardan temin edilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle pratikte, karmaşık enerjili kaynaklar ve farklı zırhlama materyalleri için zırh kalınlıkları, engel geçiş katsayısı ( $B$ ) yardımıyla belirlenir.  $B$ , kaynaktan  $x$  mesafedeki foton doz eşdeğer hızının ( $H$ ),  $d$  mesafeye yerleştirilmiş engeli geçerek  $x$  mesafesine ulaşan fotonların eşdeğer doz hızına ( $H_0$ ) bölümü şeklinde tanımlanır ve Denklem 2.1'deki gibi hesaplanır.

$$B = H/H_0 \quad (3.3)$$

### 3.2. Ölçüm Yöntemi

#### 3.2.1. Doğrusal hızlandırıcı cihazları

Doğrusal hızlandırıcı cihazları, elektron hızlandırıcısı ile elde edilen elektron demetlerini yüksek atom numaralı bir hedefe çarptırarak yüksek enerjili x-ışını demeti üretirler. Bu cihazlar, araştırma amaçlı uygulamalarda, gıda ışınlamalarında, paketleme-sterilizasyonda, tıbbi uygulamalar için radyoterapide ve daha bir çok yararlı uygulamada kullanılmaktadır. Araştırma amaçlı kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazlarının boyutları tedavi amaçlı kullanılan cihazlara göre çok daha büyüktür.

Bu tez çalışmasında ölçümler için Elekta marka ve Synergy model tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazı kullanılmıştır (Elekta 2013). Bu cihazın sahip olduğu 4, 6 ve 10 MV maksimum enerjili üç farklı foton spektrumu, doğrusal bir elektron hızlandırıcısından elde edilen elektron ışınlarının tungsten hedefe çarptırılıp manyetik bir alanda 90° bükülmesiyle elde edilir. Bu şekilde üretilen bremsstrahlung spektrumu, çeşitli filtrelerden geçirilerek bir kolimatörden ortaya çıkar. Elekta Synergy (Şekil 3.3) cihazında kaynak ve kolimatör çıkışı mesafesi 55 cm, cihaz merkezi kaynaktan 100 cm mesafededir. Bu cihaz için ışın merkezinden 1 metre uzaklıktaki 10\*10 cm<sup>2</sup>'lik bir alanın 4, 6 ve 10 MV enerjili x-ışını spektrumları, yoğunluğu su eşdeğeri bir ortamda kaynaktan 1 metre mesafede yüzde 50 doz için merkezi eksen derinliği sırasıyla 14,15, 16 ve 18,24 cm değerindedir.



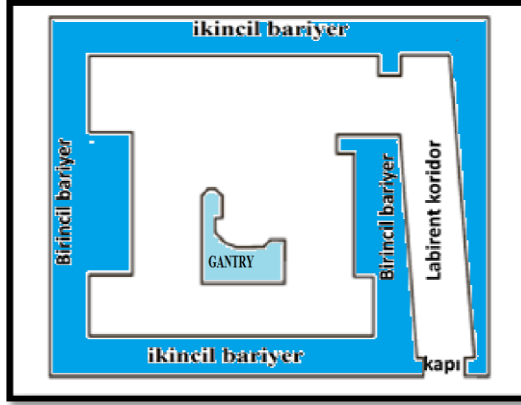
**Şekil 3.3.** Elekta-Synergy doğrusal hızlandırıcı cihazı

### 3.2.2. Linak tedavi odaları

Tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazlarının oda planı, birincil ve ikincil engellerin bulunduğu duvar ve tabanlardan, şaşırtmalı labirent koridorundan ve lamine zırlı tedavi odası kapısından oluşur. Şaşırtmalı koridorlar, her tasarımda yer almazken zırlı kapılar ve ışın yönelimine göre duvar, zemin ve tavan birincil ve ikincil engeller her tasarımda yer almaktadır. Doğrusal hızlandırıcı cihazlarında cihaz boyutları nedeni ile en küçük oda boyutları  $6*6 \text{ m}^2$  gibi bir değer olabilmektedir. En küçük oda boyutlarının tasarlandığı bir doğrusal hızlandırıcı cihazında birincil duvarlar yaklaşık olarak  $130*130 \text{ cm}^2$ 'lik birincil ışın alanı tarafından taranmaktadır. Zırhlama tasarımında birincil ışın tarafından taranan alan birincil engel hesapları ile elde edilen şekilde zayıflatıcı materyal ile zırhlamakta, saçılan ve sızıntı kaynaklı ikincil radyasyon için ise diğer duvarlar ikincil engel hesaplamaları ile elde edilen kalınlıkta zırh materyali ile zırhlamaktadırlar.

Doğrusal hızlandırıcı cihazlarında saçılan katkının kapıya ulaşmasını engellemek için şaşırtma koridorları (labirent) kullanılabilir. Tedavi odası kapılarında ise cihaz enerjisinin dikkate alındığı ve oda planındaki değerlere göre özel hesaplamaların yapıldığı, lamine zırhlama metodları kullanılmaktadır.

Elekta-Synergy cihazında, gantry kısmında kolime edilerek oluşturulan foton demetinin cihaz kafasından kolimatör çıkışına kadar olan mesafesi  $55 \text{ cm}$ 'dir. Doğrusal hızlandırıcı hedefinden (anot) sonra ışın merkezi eksenindeki  $100 \text{ cm}$  mesafe cihazın izo-merkezi olarak adlandırılır ve gantry kısmı bu nokta etrafında  $360^\circ$  hareket edebilir. Birincil radyasyon alanı, bu dönüş sırasında tavan, taban ve duvarlara doğrudan yönelen alan boyutu olarak tanımlanır ve zırhlama tasarımındaki birincil engeller bu bölgelerde yer alır (Şekil 3.4). Doğrusal hızlandırıcı odalarının birincil engellerle zırhlamasında beton, kurşun ve çelik gibi materyaller kullanılır.



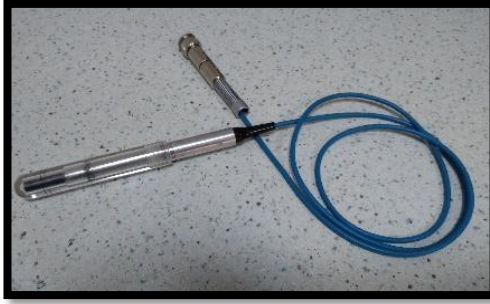
**Şekil 3.4.** Gantry dönme ekseninin labirent eksenine paralel olduğu tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazı oda tasarım şeması

### 3.2.3. İyon odası ve elektrometre

Bu çalışmanın engel geçiş katsayılarının elde edildiği rölatif (bağıl) doz ölçümlerinde PTW farmer tipi iyon odası ve elektrometre kullanılmıştır (Tochilin ve LaRiviere 1979). İyon odasının aktif hacmi  $0,6 \text{ cm}^3$  olup mutlak foton ve elektron dozimetrisi amaçlı kullanılmaktadır (Şekil 3.5). IAEA'nin TRS 398 numaralı raporunda tanımlanan absorbe doz ölçümlerinde ve  $0,5 \text{ cm}$  build-up kapağı ile hava kerma dozu ölçümlerinde kullanıma uygundur (IAEA 2000). Foton enerji aralığı  $30 \text{ kV}$ - $50 \text{ MV}$  arasında, elektron enerji aralığı  $10$ - $45 \text{ MeV}$  arasındadır. İyon odası duvarı grafit koruyucu ve build-up kapağı ise akrilik malzemeden üretilmiştir. İyon odasının su veya hava kerması tarafından absorbe doz ölçümlerinde kullanılabilmesi için kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.

### 3.2.4. RW3 katı su fantomu

Fantomlar, kalibrasyon ve kalite kontrol ölçümlerini izlemek için kullanılan ekipmanlardır (Şekil 3.6). Akrilik levha fantomu,  $70 \text{ kV}$  ile  $50 \text{ MV}$  arasında foton radyasyonu ve  $1$ - $50 \text{ MeV}$  arasında elektron radyasyonu için kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır (Hill vd. 2008). Ölçümlerde geri saçılma sağlamak için, katı su fantomu levhaları radyasyon dedektörünün altına yerleştirilir. RW3 katı fantom,  $^{60}\text{Co}$ ,  $25 \text{ MV}$  foton ve  $4$ - $25 \text{ MeV}$  değişen elektron enerjisi aralığında suya eşdeğerdir. Katı fantom seti  $1 \text{ mm}$  kalınlığında 1 plaka,  $2 \text{ mm}$  kalınlığında 2 plaka,  $5 \text{ mm}$  kalınlığında 1 plaka ve her biri  $10 \text{ mm}$  kalınlığında 29 plakadan oluşmaktadır. Tüm fantomların boyutu  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 'tür. Her iki fantom türü için çeşitli dedektör tiplerine özgü adaptör plakaları mevcuttur.



(a)



(b)

Şekil 3.5. a) Farmer tip iyon odası; b) elektrometre



Şekil 3.6. Katı su fantomu

### 3.3. Engel Malzemeleri

Bu çalışmada incelenen zırh malzemeleri kurşun, çelik ve betondur. Beton örneklerin alındığı beton harmanına giren malzeme miktarları 1365 kg kum, 725 kg 5/15 tip agrega, 180 lt su, 300 kg çimento (Cem2, ALL 42,5), 2 kg beton katkısı içermektedir. Beton örnekler yapı denetim laboratuvarında  $15*15*15\text{ cm}^3$ 'lük numune kaplarında  $15*15\text{ cm}^2$  alan boyutunda ve 2, 3, 4, 5, 10, 15 cm genişlikte özel olarak üretilmiştir.  $2*15*15\text{ cm}^3$ 'lük beton plakaların üretimi için aynı tür agregaların daha küçük boyutlu olanları kullanılmıştır.  $15*15*15\text{ cm}^3$  boyutlardaki beton blokların ortalama ağırlığı 8 kg'dır ve beton blokların üretici tarafından tanımlanan yoğunluğu ise  $2,35\text{ kg/cm}^3$ 'tür. Kurşun malzeme (yoğunluğu:  $11,34\text{ g/cm}^3$ ) üreticiden 2 mm kalınlığında tek plaka halinde temin edilmiş ve  $15*15\text{ cm}^2$  boyutlarında plakalar halinde kestirilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik plakalar 5 mm'lik  $15*15\text{ cm}$  alan boyutunda hazır kesilmiş olarak temin edilmiştir. Kullanılan çelik materyali için yoğunluk  $7,8\text{ g/cm}^3$ 'tür (Şekil 3.7).



(a)



(b)

**Şekil 3.7.** Engel materyalleri, **a)** kurşun ve çelik plakalar; **b)** beton bloklar

### 3.4. Ölçüm Düzenegi (Set-up)

#### 3.4.1. Engel geçiş katsayılarının elde edilmesi için deneysel ölçüm düzenegi

Doğrusal hızlandırıcı odalarının zırhlama tasarımı için NCRP 151 numaralı rapor ve IAEA 47 numaralı raporları en güncel iki rapordur (NCRP 2005; IAEA 2006). NCRP 151 numaralı raporda, çeşitli foton enerjilerinde farklı engel materyallerinin TVL değerleri yer almaktadır. Bu tabloda 4 MV enerjide beton materyaline ait değerler Nelson ve LaRiviere'nin 1984 yılında yapmış olduğu çalışma değerlerinin ekstrapolasyonu ile elde edilmiş, 30 MV'e kadar olan değerler ise Kirn ve Kennedy'nin 1954 yılında yapmış olduğu çalışmadan elde edilmiştir (Nelson ve LaRiviere 1984; Kirn ve Kennedy 1954). NCRP 151 numaralı rapor, TVL değerlerinin ölçümlerinin düzenegi ile ilgili bilgileri içermemekte ancak NCRP 51 numaralı raporu referans vermektedir (NCRP 1977).

NCRP 51 numaralı raporda ise o dönem kullanımda olan betatron cihazlarının zırhlaması için geliştirilmiş ölçüm düzenegi tanımlanmıştır. Rapor, ölçüm noktasının kaynak merkezi ekseninde, engel materyali arkasında 30 cm mesafede olmasını ve ölçümlerin maksimum alan açıklığında alınmasını önermektedir. Raporda 0,5-176 MeV aralığındaki elektronlar tarafından üretilen x ışınlarının beton engeldeki geniş demet transmisyon eğrileri yer almaktadır. Bu değerler, Kirn ve Kennedy'nin betatron ile elde ettikleri ölçüm sonuçlarını ve Karzmark ve Capone'un çalışmasındaki ölçüm sonuçlarını içermektedir (Kirn ve Kennedy 1954; Karzmark ve Capone 1968 (a)). Bu nedenle, Karzmark ve Capone'un çalışmasında kullandığı ölçüm düzenegi TVL değerlerinin deneysel olarak hesaplanmasında referans olarak kullanılmaktadır (NCRP 1977).

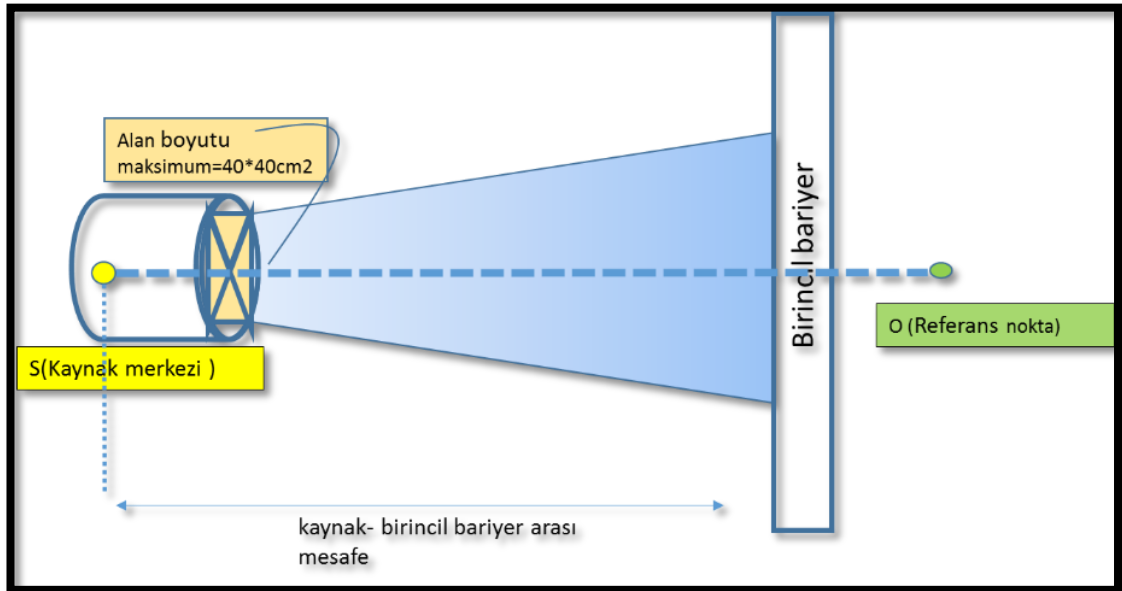
Karzmark ve Capone, bazı materyallerin dar ve geniş demet soğurma katsayılarını ölçümler yoluyla elde etmişlerdir (Karzmark ve Capone 1968(a)). Dar demet koşullarında tüm materyallerin transmisyon ölçümlerinde etkin alan boyutu  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  ve dedektör-kaynak mesafesi 320 cm olarak alınmıştır. Geniş demet koşullarında alınan ölçümlerde ise kaynak dedektör arası mesafe 260 cm alınmış ve saçılan fotonların iyon odasına katkısını engellemek için iyon odası kurşun koruma içerisine yerleştirilmiştir. Geniş demet koşullarında alınan transmisyon ölçümlerinde maksimum

etkin alan boyutları kurşun için  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  çelik ve beton için ise  $60 \times 60 \text{ cm}^2$ 'dir. Ölçümlerde  $35 \text{ cm}^3$  doku eşdeğeri iyon odası ve 6 MV enerjide yeterli doz birikiminin iyon odası haznesinde toplanabilmesi için 1,3 cm build-up pleksi kalınlığı kullanılmıştır. Engel materyalleri beton için  $66 \times 66 \text{ cm}^2$ , çelik için  $61 \times 61 \text{ cm}^2$ , kurşun için  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  boyutlarındadır.

Engel geçiş katsayılarının deneysel koşullar altında elde edilmesini McGinley Şekil 3.8'de görüldüğü gibi tanımlamıştır (McGinley 2002). Engel geçiş katsayıları, cihazın  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  olan maksimum alan açıklığında engel varken ve yokken engelden 30 cm mesafede alınan doz ölçümlerinin oranlanması ile hesaplanmaktadır.

Doğrusal hızlandırıcı tesislerin zırhlamasında kullanılan beton, çelik, kurşun materyallerinin birincil radyasyon zayıflatma özelliklerinin deneysel yollarla incelendiği çeşitli çalışmalarda Şekil 3.8'de basitleştirilmiş biçimde tanımlanan ölçüm yöntemi kullanılmıştır (Greene ve Massey 1961; Karzmark ve Capone 1968(a); Maruyama vd. 1971; Tochilin ve LaRiviere 1979; Fred vd. 1983; LaRiviere 1984; Kase vd. 2003; Jones, Peet ve Horton 2009).

Yöntemde kaynak engel arası mesafe, cihazın birincil engele olan maksimum uzaklığı olarak tanımlanmıştır. Bu koşullarda alınacak ölçümlerde kaynak engel arası mesafe en düşük oda boyutları için 300 cm olmaktadır. Bu yöntemde ölçüm noktasının kaynak merkezi ekseninde ve engel materyali arkasında 30 cm mesafede olması önerilmiştir. Bu öneriler doğrultusunda klinik bir doğrusal hızlandırıcı cihazının transmisyon ölçümleri ancak cihaz Gantry açısı  $270^\circ$  ayarlanarak ölçülebilmektedir. Karzmark ve Capone'nun çalışmasında geniş demet koşullarında elde edilen TVL değerleri bu şartlar altında alınan deneysel ölçümler ile elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Engel geçiş katsayıları için önerilen ölçüm sistemi

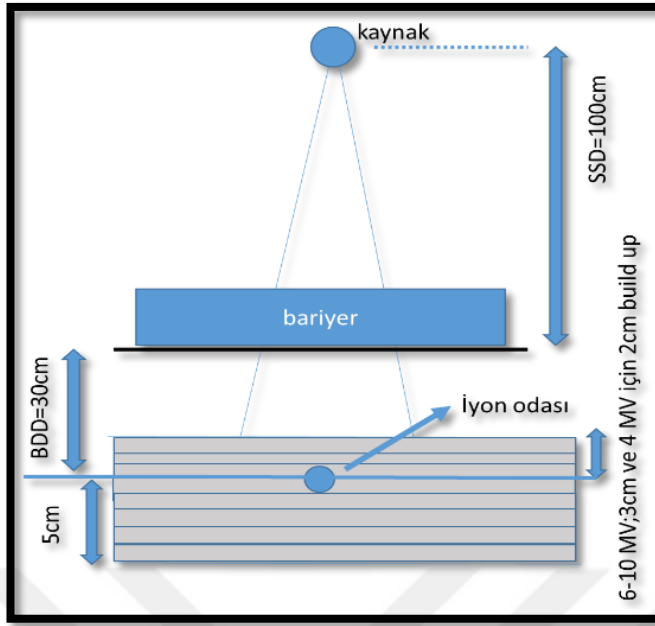
Doğrusal hızlandırıcıların zırh hesaplarında kullanılan TVL değerleri McGinley'nin önerdiği yöntemle ölçülürken bazı zorluklarla karşılaşılır. Bunlar, oda boyutlarının ölçüm için uygun olmaması ve engel malzemelerinin yüksek hacim ve kütlesi nedeniyle üretimi ve cihaz içerisine taşınmasındaki gibi zorluklardır. Bu nedenle TVL değerleri genellikle Monte Carlo yöntemi ile hesaplanmaktadır (Nelson ve LaRiviere 1984).

Deneysel koşullar altında TVL değerlerinin geniş alan boyutlarının elde edilmesi zorluğunun üstesinden gelmek için daha küçük alanlarda TVL değerinin değişiminin incelendiği bazı çalışmalar bulunmaktadır (Greene ve Massey 1961; Maruyama vd. 1971; Tochilin ve LaRiviere 1979; Rodgers 2007 ).

Elekta Synergy cihazında maksimum alan açıklığı  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 'dir ve bu alan açıklığından ışın merkezi ekseninde 300 cm mesafeye yerleştirilecek gerekli engel materyali ise yaklaşık  $130 \times 130 \text{ cm}^2$  yüzey alanına sahip olmalıdır. Yapmış olduğumuz tez çalışması için ölçüm düzeni cihaz odasının boyutlarına göre tasarlanmıştır. Tüm ölçümlerde cihaz gantry açısı  $90^\circ$  ve cihaz masası  $270^\circ$  ayarlanmış, ölçüm düzeni ise cihazın tedavi masası üzerine yerleştirilmiştir. Ölçümler, farmer tipi 0,6 cc iyon odası kaynak merkezi ekseninde engelin olması durumunda engelin 30 cm arkasında alınmıştır. Farmer tipi iyon odası suya eşdeğer bir katı fantom içine yerleştirilmiş ve iyon odası aktif ölçüm noktası kaynak merkezi eksenine hizalanmıştır. İyon odasının yeterli dozu toplayabilmesi için 4 MV enerjide 2 cm ve 6-10 MV enerjide ise 3 cm RW3 fantom materyali ile build-up amaçlı olarak iyon odası önüne yerleştirilmiştir. İyon odasının arkasına 5 cm kalınlığında RW3 fantom yerleştirilmiş, fantom saçılma kaynaklı radyasyonun iyon odasına geri ulaşmasını engellemek için kullanılmıştır. Şekil 3.9'da ölçüm düzeneği, iyon odası ve engel yerleşimleri yer almaktadır.

#### 3.4.2. Engelsiz dar demet ve geniş demet foton dozu ölçümleri

Engelsiz açık alan ölçümleri, kaynak ölçüm noktası arası mesafe 130 cm, 230 cm, 330 cm olmak üzere üç farklı şekilde ayarlanarak elde edilmiştir. 130 cm kaynak dedektör mesafesi için alınan ölçümlerde 4, 6 ve 10 MV enerjilerde etkin alan boyutları minimum  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ , maksimum  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  olmak üzere 10 farklı alan boyutunda 100 MU ile ışınlama yapılmış ve doz okuma değerleri elde edilmiştir. 230 cm ve 330 cm kaynak dedektör mesafesi için alınan ölçümlerde 4, 6 ve 10 MV enerjilerde etkin alan boyutları minimum  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ , maksimum  $80 \times 80 \text{ cm}^2$  olmak üzere 12 farklı alan boyutunda 100 MU ile ışınlama yapılmış ve absolut doz okuma değerleri elde edilmiştir.



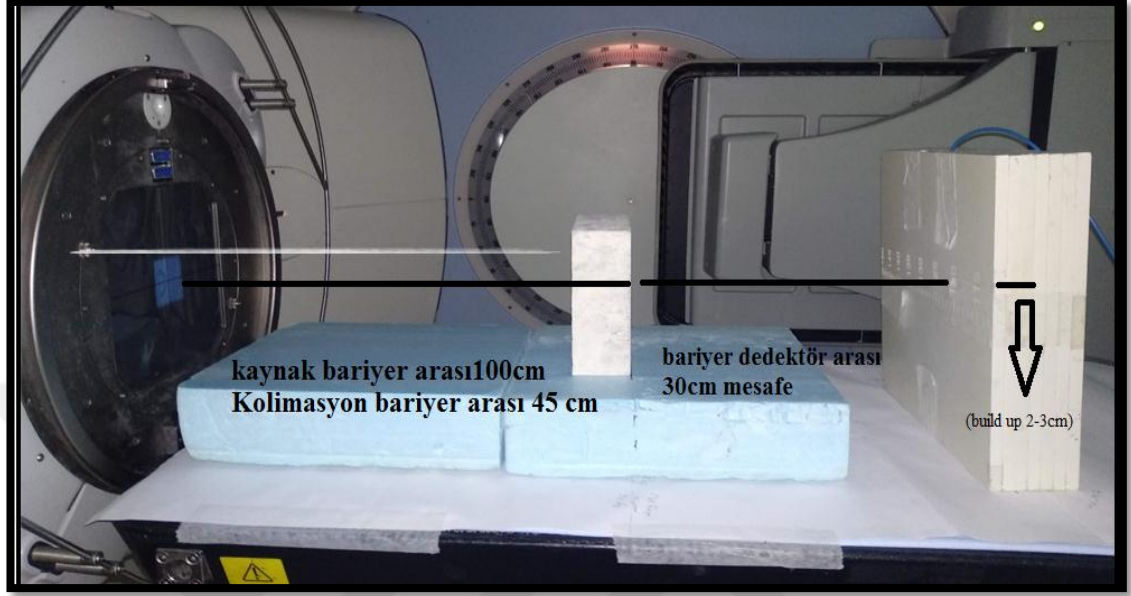
Şekil 3.9. Engel geçiş katsayılarında ölçüm düzeneğinin temsili gösterimi

### 3.4.3. Dar demet engel geçiş katsayısı ölçüm düzeneği

Engel geçiş katsayıları ölçümünde, engel materyallerinin cihaz masası tarafından taşınabilecek malzeme ağırlığı dikkate alınarak maksimum  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde kaynak engel arası 100 cm, 200 cm ve 300 cm olan üç farklı düzenek kullanılmıştır. Tüm ölçümlerde cihaz gantry açısı  $90^\circ$ , cihaz masası  $270^\circ$ 'ye ayarlanmıştır. Her bir materyalin transmisyon ölçümü için önce engel materyali yokken, ardından her bir engel kalınlığı ile ölçümler alınmıştır. Engelin bulunduğu durumda iyon odasında okunan doz değerinin korumasız doz ölçümüne bölünmesiyle engel geçiş kat sayıları her bir materyal kalınlığı için elde edilmiştir.

Kaynak-engel mesafesi 100 cm ile alınan engel geçiş katsayısı ölçümleri maksimum  $12 \times 12 \text{ cm}^2$ 'lik bir etkin alan boyutu için  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  yüzey alanına sahip engel materyalleri kullanılarak elde edilmiştir. Cihaz merkezinde 100 cm mesafede alınan bu ölçümlerde en son blok alanı  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  olacak şekilde etkin alan boyutları ayarlanmıştır. Bu nedenle, cihaz alan açıklığı etkin alan boyutuna eşittir. Aynı ebatlardaki engel materyalleri ile  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $8 \times 8$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutlarında kurşun, çelik ve beton engellerinin transmisyon ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.10'da gösterilen ölçümlerde kullanılan Elekta Synergy cihazında kaynak ve kolimatör çıkışı mesafesi 55 cm, cihaz merkezi kaynaktan 100 cm mesafededir (Elekta 2013). Kaynak engel arası 100 cm olan ölçümlerde engel materyalinin ölçüm kalınlığı maksimum 45 cm'ye kadar elde edilebilmiştir. Transmisyon ölçümlerinde kaynak dedektör arası mesafe 130 cm, engel dedektör arası mesafe 30 cm olarak ayarlanmıştır. Farklı kalınlıklardaki engel materyaline ait geçiş faktörü ölçümlerinde engel plakaları cihaz merkezinden başlanarak 45 cm kolimatör kafasına kadar olan mesafe boyunca artan kalınlıklarda sıralanarak ölçümler tekrarlanmıştır. Kaynak engel mesafesi 200 cm ve

300 cm olan engel geçiş katsayısı ölçümleri ise yalnızca etkin alan boyutu  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  olan alan boyutları için elde edilmiştir.



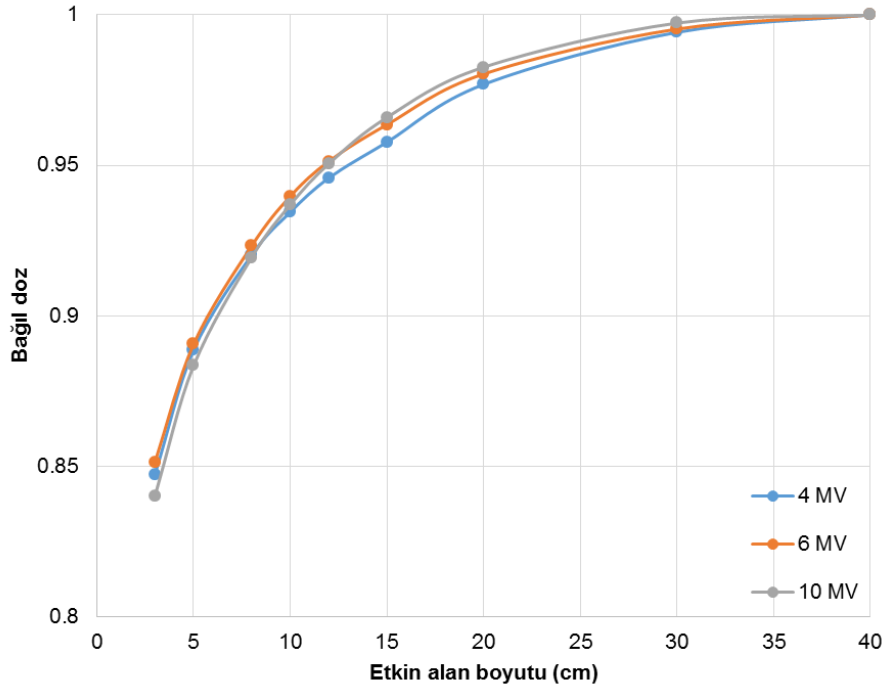
Şekil 3.10. Engel geçiş katsayısının ölçüm düzeni (setup)

#### 4. BULGULAR

##### 4.1. Bağlı Dozun Etkin Alan Boyutuna Bağımlılığı

Çalışmada öncelikle geniş demet koşullarının hangi alan boyutundan sonra oluştuğu incelenmek istenmiş ve bu amaçla kaynak-dedektör mesafesi (SDD) 130 cm alınarak ve herhangi bir soğurucu malzeme kullanılmadan; 3\*3, 5\*5, 8\*8, 10\*10, 12\*12, 15\*15, 20\*20, 30\*30 ve 40\*40 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutlarında açık alan bağlı doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alan boyutları için üç farklı foton enerjisinde (4, 6 ve 10 MV) elde edilen bağlı doz değerleri en büyük alan boyutundaki (40\*40 cm<sup>2</sup>) bağlı doz değerine normalize edilerek bağlı doz oranlarının etkin alan boyutuna göre değişimi Şekil 4.1'deki gibi çizilmiştir.

Şekil 4.1'de farklı foton enerjileri için elde edilen bağlı doz değerleri birbirine oldukça yakın çıkmakla birlikte, 10 MV enerjili demetin küçük alan boyutlarında daha düşük bağlı doz oranı ile başlayarak, alan büyüklüğü arttıkça daha düşük enerjilerdeki bağlı doz oranlarını aştığı söylenebilir. Aynı enerjiye ait bağlı doz değerleri incelendiğinde, etkin alan boyutu arttıkça, bağlı doz oranının önce hızlı şekilde arttığı ve yaklaşık 20\*20 cm<sup>2</sup> alan boyutuna ulaşıldığında ise yavaşça artmaya devam ederek 1,00'a yaklaştığı görülmektedir. Bu gözleme dayanarak, 20\*20 cm<sup>2</sup> alan boyutu ile geniş demet koşullarının yeterince doğrulukla sağlanacağı söylenebilir.



**Şekil 4.1.** Açık alan bağlı doz değerlerinin, 4, 6 ve 10 MV foton enerjilerinde, SDD 130 cm'de etkin alan boyutlarına göre değişimi

#### 4.2. Beton için TVL'nin Etkin Alan Boyutuna Bağımlılığı

Beton materyali için engel geçiş katsayılarının farklı foton enerjilerinde etkin alan boyutuna bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek amacıyla, üç farklı foton enerjisinde (4, 6 ve 10 MV), dört etkin alan boyutunda (3\*3, 5\*5, 8\*8 ve 10\*10 cm<sup>2</sup>), kaynak-dedektör mesafesi (SDD) 130 cm alınarak farklı engel kalınlıkları için bağıl doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bağıl doz değeri, ilgili enerjideki engel kullanılmadan elde edilen bağıl doz değerine bölünerek engel geçiş katsayısı (*B*) elde edilmiştir. Engel geçiş katsayıları üzerinde doğrusal interpolasyon işlemi yapılarak *B*=0,1'deki kalınlık değeri *TVL*1 ve *B*=0,01'deki kalınlık değeri de *TVL*2 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin demet enerjisine ve alan boyutuna bağımlılığı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Betonun SSD 130 cm'de farklı etkin alan boyutlarında 4, 6 ve 10 MV foton enerjileri için hesaplanan *TVL*1 ve *TVL*2 değerleri (cm cinsinden)

| Alan (cm <sup>2</sup> ) | 4 MV  |       | 6 MV  |       | 10 MV |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | TVL1  | TVL2  | TVL1  | TVL2  | TVL1  | TVL2  |
| 3*3                     | 21,29 | 44,72 | 25,47 | 46,62 | 29,26 | 50,5  |
| 5*5                     | 21,4  | 44,81 | 25,66 | 47,61 | 29,47 | 50    |
| 8*8                     | 21,74 | 45,12 | 26    | 48,12 | 29,93 | 50,42 |
| 10*10                   | 22    | 45,43 | 26,19 | 49,55 | 30,67 | 52,7  |

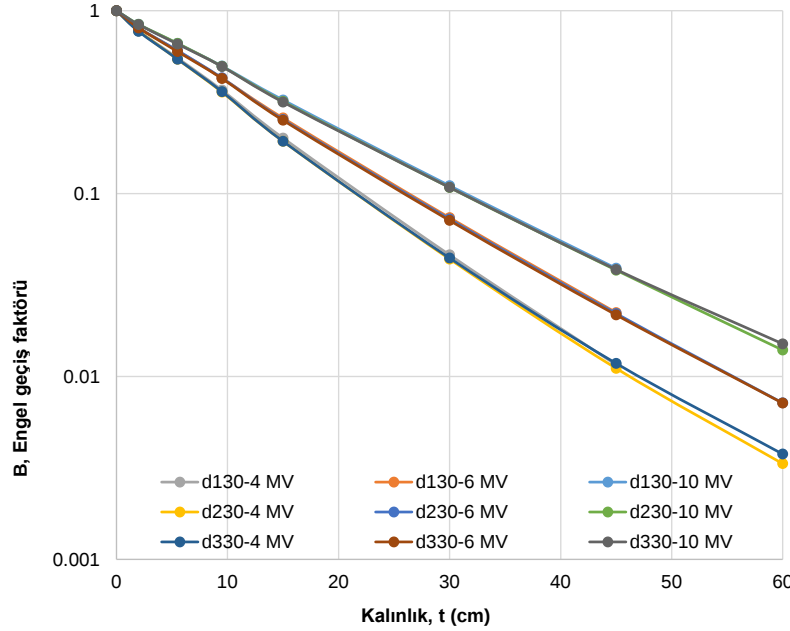
Çizelge 4.1'de aynı etkin alan boyutunda farklı TVL değerleri karşılaştırıldığında en düşük TVL değerinin 4 MV'de olduğu, en yüksek TVL değerinin ise 10 MV enerjide olduğu görülmüştür. Bu gözleme dayanarak TVL değerinin artan enerji ile arttığı söylenebilir. Aynı enerjide farklı etkin alan boyutları karşılaştırıldığı zaman ise en düşük TVL değerinin 3\*3 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda, en yüksek TVL değerinin ise 10\*10 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda olduğu görülmektedir. Buradan artan etkin alan boyutu ile TVL değerlerinin arttığı çıkarımı yapılabilir.

#### 4.3. Betonun Engel Geçiş Katsayılarının SSD ve Engel Kalınlığına Bağımlılığı

Bağıl dozun ve buna dayanılarak hesaplanan engel geçiş katsayılarının farklı foton enerjilerinde ve SSD uzaklıklarında nasıl değiştiğini incelemek amacıyla, üç farklı foton enerjisinde (4, 6 ve 10 MV), 12\*12 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda, üç farklı SSD değeri için (130, 230 ve 330 cm), farklı kalınlıklarda beton engel kullanılarak (2, 5.5, 9.5, 15, 30, 45 ve 60 cm) bağıl doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm enerjilerde beton bariyerine ait SDD 130 cm, 230 cm ve 330 cm'de etkin alan boyutunun 12\*12 cm<sup>2</sup> olabilmesi için cihaz alan açıklığı sırasıyla 12\*12 cm<sup>2</sup>, 6\*6 cm<sup>2</sup> ve 4\*4 cm<sup>2</sup> olarak açılmıştır. SDD 130 cm mesafede en fazla 45 cm kalınlığa kadar, SDD 230 cm ve 330 cm mesafede alınan ölçümlerde ise 60 cm kalınlığa kadar engel geçiş katsayısı ölçümleri alınabilmektedir. Bölüm 4.2'de anlatıldığı şekilde betonun engel geçiş katsayıları (*B*) Çizelge 4.2'deki gibi hesaplanmış ve engel kalınlığına göre nasıl değiştiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Farklı foton enerjileri, SDD ve engel kalınlıklarında betonun engel geçiş katsayıları

|        | SDD 130 |       |       | SDD 230 |       |       | SDD 330 |       |       |
|--------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| t (cm) | 4 MV    | 6 MV  | 10 MV | 4 MV    | 6 MV  | 10 MV | 4 MV    | 6 MV  | 10 MV |
| 0      | 1,000   | 1,000 | 1,000 | 1,000   | 1,000 | 1,000 | 1,000   | 1,000 | 1,000 |
| 2      | 0,776   | 0,808 | 0,842 | 0,775   | 0,806 | 0,843 | 0,770   | 0,805 | 0,839 |
| 5,5    | 0,551   | 0,604 | 0,662 | 0,543   | 0,606 | 0,663 | 0,544   | 0,598 | 0,658 |
| 9,5    | 0,368   | 0,428 | 0,498 | 0,359   | 0,429 | 0,496 | 0,361   | 0,426 | 0,495 |
| 15     | 0,201   | 0,259 | 0,325 | 0,193   | 0,254 | 0,319 | 0,193   | 0,252 | 0,316 |
| 30     | 0,046   | 0,074 | 0,110 | 0,044   | 0,073 | 0,108 | 0,044   | 0,071 | 0,108 |
| 45     | 0,012   | 0,022 | 0,039 | 0,011   | 0,022 | 0,038 | 0,012   | 0,022 | 0,038 |
| 60     |         |       |       | 0,003   | 0,007 | 0,014 | 0,004   | 0,007 | 0,015 |



**Şekil 4.2.** Betonun engel geçiş katsayısının çeşitli parametrelere göre değişimi

Şekil 4.2’de farklı enerjiler için aynı SDD mesafesinde elde edilen transmisyon eğrileri incelendiğinde, her SDD mesafesi için aynı kalınlıktaki engel geçiş katsayılarının 4 MV enerjide en düşük, 10 MV enerjide ise en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bu gözleme dayanarak aynı SDD mesafesi için aynı kalınlıktaki engel geçiş katsayısının artan enerji ile arttığı söylenebilir. Farklı SDD mesafelerinde aynı enerjiye ait transmisyon eğrileri incelendiğinde ise bu eğrilerin yaklaşık olarak üst üste çakıştığı gözlenmektedir. Buradan farklı SDD mesafelerinde elde edilen engel geçiş eğrilerinin uyum içerisinde olduğu ve engel geçiş katsayısı ölçümlerinin SDD 130 cm mesafede alınması ile SDD 330 cm mesafede alınması arasında bir farklılık

olmayacağı çıkarımı yapılabilir. Ayrıca TVL değerlerinin değişiminde cihaz alan açıklığının değil, etkin alan boyutunun daha önemli olduğu gözlenmiştir.  $35 \times 35 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutuna kadar TVL ve HVL değerlerini belirlemek için bu grafikteki transmisyon eğrileri kullanılabilir. Ancak, NCRP 51 numaralı raporun önermiş olduğu  $130 \times 130 \text{ cm}^2$ 'lik etkin alan boyutunda elde edilecek transmisyon eğrilerinin deneysel ölçüm alınarak oluşturulabilmesi için en düşük SDD'nin 330 cm mesafede olması gerektiği anlaşılmaktadır.

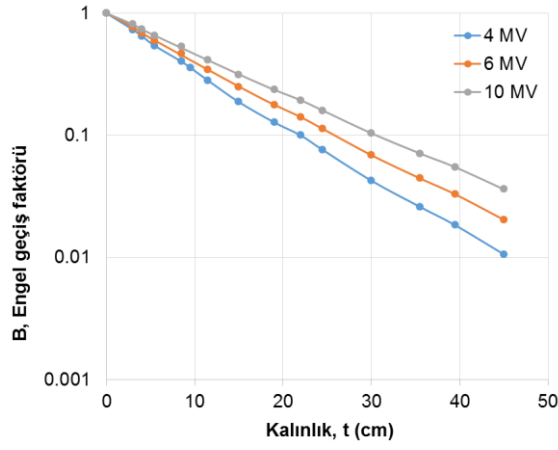
#### 4.4. Beton, Çelik ve Kurşun için Belirlenen Engel Geçiş Katsayıları

Engel geçiş katsayılarının farklı foton enerjilerinde malzeme özelliklerine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmek istenmiştir. Bu amaçla, üç farklı foton enerjisinde (4, 6 ve 10 MV),  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda, kaynak-dedektör mesafesi (SDD) 130 cm alınarak, farklı engel kalınlıklarında bağlı doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir foton enerjisi için elde edilen bağlı doz değerleri, o enerjide engel kullanılmadan belirlenen bağlı doz değerine bölünerek engel geçiş katsayıları ( $B_{bir}$ ) beton, çelik ve kurşun malzemeleri için elde edilmiş ve hesaplanan engel geçiş katsayılarının engel kalınlığına göre değişimi Şekil 4.3 (a)-(c)'de verilmiştir.

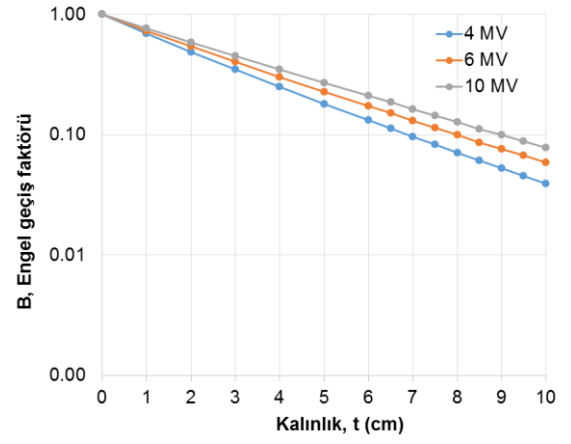
Şekil 4.3 (a)-(c)'de farklı engel materyali için engel geçiş katsayısının foton enerjisi ile arttığı ve engel kalınlığı ile azaldığı görülmektedir. Materyal özellikler açısından irdelendiğinde ise, aynı enerjide ve aynı kalınlıkta en düşük engel geçiş katsayısına kurşunun ve en yüksek değer ise betonun sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle engel geçiş katsayısı değerinin engelin yapıldığı materyalinin atom numarası ve yoğunluğu ile azalmakta olduğu sonucuna varılabilir.

#### 4.5. Beton, Çelik ve Kurşun için Belirlenen TVL ve HVL Değerleri

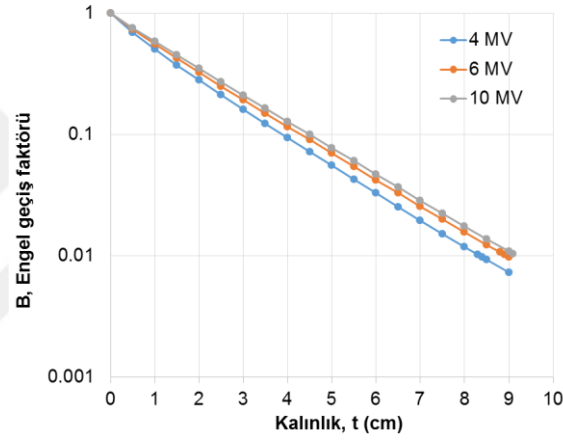
Şekil 4.3'de her bir materyal için verilen transmisyon eğrileri yardımıyla incelenen üç enerjide her bir materyale ait TVL1 ve HVL değerleri doğrusal interpolasyon yöntemiyle hesaplanmış ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'te beton, çelik ve kurşunun SDD 130 cm mesafede  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda 4, 6 ve 10 MV enerjiler için belirlenen TVL1, TVL2 ve HVL değerleri incelendiği zaman aynı materyale ait değerlerin 4 MV enerjide en düşük, 10 MV enerjide ise en yüksek değere sahip olduğu gözlenmektedir. Bu gözleme dayanarak SDD 130 cm mesafede  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda aynı materyale ait TVL1, TVL2 ve HVL değerlerinin artan enerji ile artacağı söylenebilir. Aynı enerjide farklı materyallere ait TVL1, TVL2 ve HVL değerleri incelendiğinde ise en düşük TVL1, TVL2 ve HVL değerlerinin kurşun materyalinde, en yüksek TVL1, TVL2 ve HVL değerinin ise beton materyalinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu gözleme dayanarak materyal yoğunluğunun artması ile TVL1, TVL2 ve HVL değerinin azalacağı söylenebilir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.3.** 4, 6 ve 10 MV foton enerjilerinde, SSD 130 cm ve 10\*10 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda engel geçiş katsayılarının kalınlığa göre değişimi, **(a)** beton; **(b)** çelik; **(c)** kurşun

**Çizelge 4.3.** Beton, çelik ve kurşunun SSD 130 cm ve 10\*10 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda 4, 6 ve 10 MV enerjiler için belirlenen TVL1 ve HVL değerleri(cm cinsinden)

| Enerji | Beton |       |      | Çelik |       |      | Kurşun |      |      |
|--------|-------|-------|------|-------|-------|------|--------|------|------|
|        | TVL1  | TVL2  | HVL  | TVL1  | TVL2  | HVL  | TVL1   | TVL2 | HVL  |
| 4 MV   | 21,98 | 45,43 | 6,01 | 6,9   | 12,32 | 1,94 | 3,9    | 8,35 | 1,03 |
| 6 MV   | 26,19 | 49,55 | 7,6  | 7,98  | 12,9  | 2,3  | 4,32   | 8,95 | 1,22 |
| 10 MV  | 30,67 | 52,7  | 9,31 | 9,01  | 13,34 | 2,64 | 4,5    | 9,15 | 1,33 |

## 5. TARTIŞMA

Doğrusal hızlandırıcı cihazlarının 1960 yılı sonrasında artan kullanım ihtiyacı ile birlikte radyasyondan korunma gereksinimlerindeki artış sonucu 1977 yılında NCRP 51 numaralı raporunu yayınlamıştır. Bu raporda, farklı foton enerjilerinin betondaki zayıflama eğrileri, Kirn ve Kennedy'nin 1954 yılında yapmış oldukları çalışmadan alınarak ekstrapole edilmiştir (NCRP 1977; Kirn ve Kennedy 1954). NCRP 51, engel geçiş katsayılarının deneysel olarak elde edilmesi için alınacak ölçümlerin cihazın maksimum alan açıklığında, kaynak engel mesafesinin en az 3 m olacak şekilde alınmasını önermektedir. Ancak daha önce de belirtildiği gibi pratikte bu mümkün değildir; çünkü bu genişlikte bir engel materyalinin üretilmesi ve tıbbi doğrusal hızlandırıcılarda bu tarz bir ölçümün alınması cihaz oda boyutlarındaki kısıtlamalar nedeniyle olanaksızdır. Bu nedenle bu tür ölçümler genellikle araştırma amaçlı doğrusal hızlandırıcı cihazları kullanılarak yapılmıştır (LaRiviere 1984; Kase vd. 2003). Kase vd., bu rapordaki önerileri dikkate alarak çeşitli bileşimlerdeki beton engellerin ikincil radyasyon transmisyon özelliklerini ölçümler yoluyla incelemişlerdir (Kase vd. 2003). Ölçümlerde kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazının oda boyutları  $7*7*4,75\text{ m}^3$ 'dir ve bu cihaz araştırma amaçlı olarak kullanılan bir doğrusal hızlandırıcı cihazdır. Bu çalışmada kullanılan beton engellerin ölçümleri en fazla  $122*122\text{ cm}^2$  ve ağırlığı ise  $1100\text{ kg}$ 'dır. Bu çalışmada görüldüğü gibi engel geçiş katsayılarının ölçümler yoluyla elde edilmesi pratikte mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bu değerler genelde bilgisayar destekli programlar yoluyla hesaplanmaktadır (Nelson ve LaRiviere 1984; Rodgers 2007).

Bu tez çalışmasında, 4, 6 ve 10 MV enerjilerde çeşitli kalınlıklarda beton, çelik ve kurşun materyallerin  $10*10\text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda bağıl doz ölçümleri alınarak transmisyon eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen bu eğrilerden beton, çelik ve kurşun materyallerine ait HVL, TVL1 ve TVL2 değerleri lineer interpolasyon tekniği ile belirlenmiştir. Kullanılan ölçüm düzeneğinde en geniş etkin alan boyutu linak cihazının maksimum alan açıklığı ile aynıdır ve  $40*40\text{ cm}^2$ 'dir. Bu etkin alan boyutu için TVL1 değerleri Maruyama ve arkadaşları tarafından elde edilen etkin alan boyutu TVL değişimine uyarlanması yoluyla elde edilmiştir (Maruyama vd. 1971). Bu şekilde bu tez çalışmasında beton, çelik ve kurşun materyalleri için elde edilen geniş demet TVL değerleri Çizelge 5.1'de yer almaktadır.

Engel geçiş katsayılarının ölçümü için önerilen ölçüm düzeneğinin klinik doğrusal hızlandırıcılarda uygulanmasında karşılaşılan bir başka zorluk ise kaynak dedektör arası SDD mesafesinin 3 m olarak alınmasıdır. Bu nedenle, doğrusal hızlandırıcı cihazı için kullanılacak engel materyalinin 3 m mesafede engel üzerinde kapladığı etkin alan boyutunun  $120*120\text{ cm}^2$ 'lik alanı kaplayacak büyüklükte olması gerekir. Ancak bu durumda yüksek ağırlık ve hacimlerde engel malzemesi üretimi, ölçüm noktasına taşınması ve ölçüm düzeneğine yerleşimi gibi konularda zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorluklara karşın ölçümlerde SDD mesafesinin azaltılması bir alternatif olabilmektedir.

**Çizelge 5.1.** Beton, çelik ve kurşunun, 4, 6 ve 10 MV foton enerjileri için SDD 130 cm'de *TVL*10 ve *TVL*40 değerleri (cm cinsinden). (*TVL*10, 10\*10 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında hesaplanan ve *TVL*40, 40\*40 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığına uyarlanan *TVL* değerlerini sembolize eder)

| Enerji       | Beton         |               | Çelik         |               | Kurşun        |               |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|              | <i>TVL</i> 10 | <i>TVL</i> 40 | <i>TVL</i> 10 | <i>TVL</i> 40 | <i>TVL</i> 10 | <i>TVL</i> 40 |
| <b>4 MV</b>  | 21,98         | 26,78         | 6,9           | 8,26          | 3,9           | 4,93          |
| <b>6 MV</b>  | 26,19         | 32,5          | 7,98          | 9,08          | 4,32          | 5,25          |
| <b>10 MV</b> | 30,67         | 39,1          | 9,01          | 10,2          | 4,50          | 5,46          |

Bu tez çalışmasında beton bariyerinin 12\*12 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda engel geçiş eğrileri üç farklı kaynak dedektör mesafesi ve üç foton enerjisi için ayrı ayrı elde edilmiştir ve bu değerler Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen grafik sonuçlarına bakıldığında, SDD mesafesinin değişmesiyle *TVL* değerlerinin değişmediği görülmektedir. Bu sonuca bağlı olarak bu çalışmada engel geçiş katsayısı ölçümlerinin SDD 130 cm'de alınmasına karar verilmiştir.

Literatürde rastlanan bazı çalışmalarda daha küçük alan boyutları için transmisyon özellikleri ve artan alan boyutuna bağımlılık incelenmiştir (Greene ve Massey 1961; Karzmark ve Capone 1968 (a); Maruyama vd. 1971; Tochilin ve LaRiviere 1979; Rodgers 2007). Greene ve Massey deneysel olarak yaptıkları çalışmalarında, 4 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazında SDD 3 m mesafede 65\*65 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutunda ve yaklaşık 22\*22 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığı sonrasında geniş demet koşullarını elde etmiştir. Karzmark ve Capone tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazı ile elde edilen 6 MV enerjili fotonlarda beton, kurşun ve çelik bariyerinde dar demet *TVL* değerlerini ölçümler yoluyla elde etmişlerdir. Çalışmada 20\*20 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutu sonrasında geniş demet koşulları oluşmuş ve *TVL* değerlerinin çok fazla değişmediği görülmüştür. Maruyama ve arkadaşları 4-30 MV enerji aralığında bir doğrusal hızlandırıcı ve iki betatron cihazıyla elde edilen foton demetlerinin doğrusal hızlandırıcı cihazlarında SDD 150 cm ve betatron cihazlarında SDD 200-300 cm mesafelerde beton, çelik ve kurşun *TVL* değerlerinin etkin alan boyutuna bağımlılığını ölçümler yolu ile incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen transmisyon eğrileri de geniş demet koşullarının 20\*20 cm<sup>2</sup> alan açıklığı sonrasında oluştuğunu göstermiştir. Tochilin ve LaRiviere, 10 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil radyasyonların beton materyalindeki (2,35 g/cm<sup>3</sup>) *TVL* değerinin alan boyutu bağımlılığını deneysel ölçümler ile incelemiştir. Çalışmada cihaz alan açıklığı boyutu 5\*5 cm<sup>2</sup> ve 35\*35 cm<sup>2</sup> aralığında incelenmiş ve 20\*20 cm<sup>2</sup> sonrasında geniş demet koşullarının sağlanarak *TVL* değerinin değişmediği gözlemlenmiştir. Rodgers, 6 MV foton demetinde beton için *TVL* değerlerinin etkin alan boyutuna bağımlılığını Monte Carlo simülasyonu ile incelemiştir. Çalışmada elde edilen transmisyon eğrilerinin alan boyutuna bağımlılığı incelendiği zaman ve 20\*20 cm<sup>2</sup> alan boyutu sonrasında geniş demet koşullarının oluşarak *TVL* değerlerinde çok fazla değişime yol açmadığını görmüştür. Bu tez çalışmasında bağıl dozun etkin alan boyutuna bağımlılığı incelenmiş ve Şekil 4.1'de sunulmuştur. En geniş alan açıklığı olan 40\*40 cm<sup>2</sup> için elde edilen engel geçiş katsayısı değerleri 20\*20 cm<sup>2</sup> alan açıklığında %2'lik bir fark ile elde edilmektedir. Bu gözlem ışığında geniş demet koşullarının literatürle uyumlu şekilde 20\*20 cm<sup>2</sup> alan açıklığı sonrasında oluştuğu anlaşılmıştır.

1968 yılında Karzmark ve arkadaşları doğrusal hızlandırıcı cihazı ile elde edilen 6 MV enerjili foton spektrumu için dar demet ve geniş demet soğurma katsayılarını çelik, kurşun ve  $2,35 \text{ g/cm}^3$  yoğunluktaki beton materyallerinde ölçümler yoluyla elde etmişlerdir (Karzmark ve Capone 1968(a)). Dar demet soğurma katsayılarının, bir radyasyon ışını karakteristiğinin tanımlanmasında temel fiziksel öneme sahip olduğu vurgulanarak ölçüm düzeneği için, dedektör ve kaynak arası mesafe 320 cm alınmıştır. Saçılan katkının dedektöre ulaşmasını engellemek için dedektörün yan ve arka duvarları 10 cm kalınlığındaki kurşun plaka ile kaplanmıştır ve kolimatör açıklığı önüne de saçılan radyasyon demetini oluşturmak amacı ile 10 cm kalınlığında bir kurşun plaka yerleştirilmiştir. Geniş demet soğurma katsayısı ölçümlerinde deney düzeneği için, dedektör ve kaynak arası mesafe 260 cm alınmıştır. Gantry sızıntı katkısının dedektöre ulaşmasını engellemek için ise dedektörün yan duvarları 10 cm kalınlığında kurşun plaka ile kaplanmış ve ayrıca kolimatör açıklığı önüne de 5 cm kalınlığında bir kurşun plaka yerleştirilmiştir. Dedektör duvardan 75 cm mesafe ile yerleştirilerek duvardan gelen saçılma katkısı ihmal edilmiştir. Ölçümlerde etkin alan boyutu, dedektör üzerindeki alan boyutu olarak kabul edilmiş ve beton için maksimum  $66 \times 66 \text{ cm}^2$ , kurşun için  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  ve çelik için  $61 \times 61 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutlarına kadar TVL değerleri elde edilmiştir. Dar ve geniş demet koşullarında alınan engel geçiş katsayısı değerleri, engel materyallerinin ışın merkezi ekseninde dedektörün hemen önüne sırayla eklenmesiyle ölçülmüştür. Ölçümlerde  $35 \text{ cm}^3$  doku eşdeğeri iyon odası ve 6 MV enerjide dedektörde yeterli dozun toplanması için 1,3 cm build-up kap kullanılmıştır. Engel geçiş katsayısının 6 MV enerjili fotonlarda etkin alan boyutu bağımlılığı beton için  $10 \times 10$ - $80 \times 80 \text{ cm}^2$ , kurşun için  $10 \times 10$ - $25 \times 25 \text{ cm}^2$  ve çelik materyali için  $10 \times 10$ - $80 \times 80 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutu aralıklarında incelenmiştir.

Greene ve Massey yaptıkları çalışmada birincil radyasyona ek olarak duvar ve cihazlar tarafından saçılma ve sızıntı kaynaklı doz katkısı iyon odasının tedavi odasında farklı noktalara yerleştirilmesi ile alınan ölçümlerle elde etmiş ve bu katkının ise %0,08 kadar olduğunu saptamıştır (Greene ve Massey 1961). Bu tez çalışmasında birincil radyasyon için engel geçiş katsayısı ölçümlerinde Karzmark ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadan farklı olarak Greene ve Massey'in sonuçları dikkate alınmış ve iyon odasının saçılma katkısını azaltmak için koruyucu zırh kullanılmamıştır (Karzmark ve Capone 1968(a)). Ayrıca Karzmark ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ölçüm düzeneğinde dedektör hemen engel malzemesi arkasına yerleştirilmiştir. Ancak daha sonra yayınlanan NCRP 49 numaralı rapor önerileri doğrultusunda, ölçüm düzeneğinde dedektör ve son bariyer arası mesafenin 30 cm olması önerilmektedir (NCRP 1976). Bu nedenle, bu tez çalışmasında alınan ölçümlerde NCRP 49 numaralı raporun önerileri dikkate alınmış ve Karzmark ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadan farklı olarak dedektör ile zırh materyali arası 30 cm boşluk bulundurularak ölçümler bu şekilde elde edilmiştir. Çizelge 5.2'de bu çalışmada elde edilen 6 MV enerjide beton, kurşun ve çelik materyallerinin  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  etkin alan boyutunda TVL değerlerinin Karzmark ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırması yer almaktadır.

**Çizelge 5.2.** Beton, çelik ve kurşunun 6 MV foton enerjisi için SSD 130 cm’de *TVL*<sub>10</sub> ve *TVL*<sub>40</sub> değerlerinin (cm cinsinden) Karzmark ve arkadaşlarının çalışması ile karşılaştırılması (*TVL*<sub>10</sub>, 10\*10 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında hesaplanan ve *TVL*<sub>40</sub>, 40\*40 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında uyarlanan TVL değerlerini sembolize eder)

| Enerji               | Beton                    |                          | Çelik                    |                          | Kurşun                   |                          |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                      | <i>TVL</i> <sub>10</sub> | <i>TVL</i> <sub>40</sub> | <i>TVL</i> <sub>10</sub> | <i>TVL</i> <sub>40</sub> | <i>TVL</i> <sub>10</sub> | <i>TVL</i> <sub>40</sub> |
| <b>Karzmark 1968</b> | 27,18                    | 29,46                    | 7,11                     | 9,09                     | 4,57                     | 5,13                     |
| <b>Bu çalışma</b>    | 26,19                    | 32,5                     | 7,98                     | 9,08                     | 4,32                     | 5,25                     |

1971 yılında Maruyama ve arkadaşları bir doğrusal hızlandırıcı ve iki betatron cihazıyla elde edilen 4, 6, 10, 20 ve 30 MV enerjili fotonların normal beton, ağır beton, çelik ve kurşun materyallerinde zayıflama özelliklerini deneysel koşullar altında incelemişlerdir (Maruyama vd. 1971). Enerji aralığı 4-32 MV ve 8-31 MV olan iki betatron cihazı ile 6 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazı fotonlarının kurşun, demir, ağır beton (3,31 g/cm<sup>3</sup>) ve normal betondaki (2,26 g/cm<sup>3</sup>) geniş demet zayıflama katsayılarını deneysel ölçümler yoluyla elde etmişlerdir. Ölçümlerde 50 cm<sup>3</sup>’lük pleksi duvarlı iyon odası kullanılmıştır. Doğrusal hızlandırıcı cihazında ölçümlerde kaynak iyon odası arası mesafe 150 cm olarak betatronlarda ise 200 cm ve 500 cm olarak alınmıştır. Ölçümlerde iyon odasında dozun toplanabilmesi için 4-10 MV enerji aralığında 7 cm, 10-32 MV enerji aralığında ise 9 cm su eşdeğeri fantom build-up amaçlı kullanılmıştır. Çalışmada SDD 150 cm ve 200 cm mesafede sırayla doğrusal hızlandırıcı ve betatron cihazlarında alınan ölçümlerde; normal beton engeller 50\*25\*12,5 cm<sup>3</sup> ve 30\*20\*20 cm<sup>3</sup> ağır beton engeller 100\*100\*10 cm<sup>3</sup>, kurşun ve demir engeller 50\*50\*1 cm<sup>3</sup> boyutlardadır. Ölçümlerde saçılan radyasyon katkısının dedektöre ulaşmaması için iyon odasının kaynak yönü dışındaki beş cephesi 25 cm kalınlığında beton blok ile zırhlanmıştır. İyon odası yönündeki ilk blok için etkin alan boyutları beton ve ağır betondaki zayıflamaların ölçümünde 90\*90 cm<sup>2</sup>, demir ve kurşunda 40\*40 cm<sup>2</sup> olarak ayarlanmıştır. Kolimatör sızıntısı ve saçılma kaynaklı doz katkısının detektöre ulaşmasını engellemek için iyon odası ve kaynak arasına 20 cm kurşun plaka konulmuştur. TVL değerinin alan boyutuna bağımlılığı için en geniş etkin alan boyutları, ağır beton ve sıradan beton için 80\*80 cm<sup>2</sup> kurşun ve demir için ise 40\*40 cm<sup>2</sup> olarak ayarlanmıştır. Ayrıca çalışmada bu dört engel materyalin beş farklı foton enerjisi için TVL değerlerinin alan boyutuna bağımlılığı incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında birincil radyasyon engel geçiş katsayısı ölçümlerinde Maruyama ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadan farklı olarak ve Greene ve Massey’in sonuçları dikkate alınmış ve iyon odasının saçılma katkısını azaltmak için koruyucu zırh kullanılmamıştır (Greene ve Massey 1961). Bu tez çalışmasında normal beton yoğunluğu 2,35 g/cm<sup>3</sup> iken, Maruyama ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada normal beton yoğunluğu 2,26 g/cm<sup>3</sup>’dür ve bu nedenle TVL değerlerinde farklılıkların gözlenmesi olasıdır. Maruyama ve arkadaşları, 4 MV enerjideki ölçümleri doğrusal hızlandırıcı cihazında SDD 150 cm mesafede, 6 MV ve 10 MV enerjideki ölçümleri ise betatron cihazında SDD 200-500 cm mesafelerde almışlardır. Bu tez çalışmasında alınan ölçümler tüm enerjilerde doğrusal hızlandırıcı cihazı ile ve SDD 130 cm sabit mesafede alınmıştır.

Çizelge 5.2’de Maruyama ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki TVL değerlerinin bu tez çalışmasında elde edilen değerlerle karşılaştırması yer almaktadır. Her iki çalışma arasında gözlenen en büyük fark beton materyalindeki sonuçlarda oluşmaktadır. Bunun ise çalışmalarda kullanılan beton materyalleri arasındaki yoğunluk farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 5.3.** Beton, çelik ve kurşunun, 4, 6 ve 10 MV enerjiler için SSD 130 cm’de TVL10 ve TVL40 değerlerinin (cm cinsinden) Maruyama ve arkadaşlarının çalışması ile karşılaştırılması. (TVL10, 10\*10 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında ve TVL40, 40\*40 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder)

| Enerji |               | Beton |       | Çelik |       | Kurşun |       |
|--------|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|        |               | TVL10 | TVL40 | TVL10 | TVL40 | TVL10  | TVL40 |
| 4 MV   | Maruyama 1971 | 23    | 28    | 6,85  | 8,2   | 3,8    | 4,8   |
|        | Bu çalışma    | 21,98 | 26,78 | 6,9   | 8,26  | 3,9    | 4,93  |
| 6 MV   | Maruyama 1971 | 26,6  | 33    | 8     | 9,1   | 4,2    | 5,1   |
|        | Bu çalışma    | 26,19 | 32,5  | 7,98  | 9,08  | 4,32   | 5,25  |
| 10 MV  | Maruyama 1971 | 30,6  | 39,0  | 9,0   | 10,2  | 4,65   | 5,3   |
|        | Bu çalışma    | 30,67 | 39,1  | 9,01  | 10,2  | 4,50   | 5,46  |

Tochilin ve LaRiviere, 10 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan radyasyonların beton materyalindeki (2,35 g/cm<sup>3</sup>) TVL değerlerinin alan boyutuna bağımlılığını incelemişlerdir (Tochilin ve LaRiviere 1979). Çalışmada alınan ölçümlerde SDD mesafesi 3,95 m olarak ayarlanmış ve dedektör olarak farmer tipi iyon odası kullanılmıştır. İyon odasında yeterli doz değeri elde edebilmek için 2,5 cm su eşdeğeri build-up fantom kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan doğrusal hızlandırıcı cihazının en geniş alan açıklığı 35\*35 cm<sup>2</sup> olması nedeniyle TVL değerinin alan boyutu bağımlılığı 5\*5 cm<sup>2</sup> ve 35\*35 cm<sup>2</sup> etkin alan boyutu aralığında incelenmiş, 20\*20 cm<sup>2</sup> sonrasında geniş demet koşullarının sağlanarak TVL değerinin değişmediği gözlemlenmiştir. Tochilin ve LaRiviere’nın yapmış olduğu çalışmadaki TVL değeri sonuçlarının bu tez ile karşılaştırması Çizelge 5.3’de yer almaktadır. Maksimum cihaz alan açıklığında elde edilen TVL değerleri yapmış olduğumuz tez çalışması sonuçları ile karşılaştırıldığında TVL değerinde %1,46 farklılık görülmektedir. Bu farklılığın Tochilin ve LaRiviere’nın yapmış olduğu çalışmadaki alan açıklığının 35\*35 cm<sup>2</sup>, bu tez çalışmasında ise 40\*40 cm<sup>2</sup> olması nedeniyle oluştuğu düşünülebilir.

**Çizelge 5.4.** Bu tez çalışmasında beton için 10 MV enerjide  $10*10\text{ cm}^2$  elde edilip  $40*40\text{ cm}^2$  etkin alan boyutuna uyarlanan TVL değer sonuçlarının Tochilin ve LaRiviere'nın çalışması ile karşılaştırılması (TVL40,  $40*40\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığında ve TVL35,  $35*35\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder)

|                                   | TVL (cm)      |
|-----------------------------------|---------------|
| <b>Tochilin ve LaRiviere 1979</b> | 38,54 (TVL35) |
| <b>Bu çalışma</b>                 | 39,1 (TVL40)  |

Greene ve Massey çalışmasında 4 MV enerjili tıbbi doğrusal hızlandırıcı cihazında  $2,2\text{ g/cm}^3$  yoğunluklu beton engel için primer ve sekonder radyasyonun zayıflama özelliklerini incelemiştir (Greene ve Massey 1961). Birincil radyasyon transmisyon ölçümlerinde SDD 3 m olarak ayarlanmıştır ve dedektör olarak iyon odası kullanılmıştır. İyon odası cihaz merkezi eksenine göre konumlandırılarak son bariyerin hemen arkasına yerleştirilmiştir. Ölçümlerde cihaz alan boyutları maksimum alan açıklığına kadar açılammış, en fazla  $26*26\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığına kadar TVL ölçümleri alınabilmektedir. Bu alan boyutu için son blok üzerinde görülen etkin alan boyutu ise maksimum  $90*75\text{ cm}^2$  olmuştur. Çalışmada etkin alan boyutunun artmasıyla TVL değeri değişiminin yer aldığı grafik üzerinden  $10*10\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığı için elde edilen TVL değeri 27,43 cm ve  $26*26\text{ cm}^2$  alan açıklığı için elde edilen TVL değeri 30,48 cm bulunmuştur. TVL değerinin alan boyutuna bağımlılığı incelenmiş ve  $22*22\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığı sonrasında geniş demet koşulları elde edilerek TVL değerinde değişim gözlenmemiştir. Sonuçlar, literatürde 2 MV ve 6 MV birincil ışın zayıflatma değerlerinin interpolasyonu ile elde edilen 4 MV zayıflama değerleri ile uygun bulunmuştur (HMSO 1957). Çizelge 5.5'de Greene ve Massey'in yapmış olduğu çalışmadaki TVL değeri sonuçlarının bu tez çalışması ile kıyaslanması yer almaktadır. Greene ve Massey'in çalışmasında TVL10 değerindeki farkın çalışmalardaki beton bariyerlerin yoğunluk farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 5.5.** Bu tez çalışmasında beton için 4 MV enerjide  $10*10\text{ cm}^2$  elde edilip  $40*40\text{ cm}^2$  etkin alan boyutuna uyarlanan TVL değer sonuçlarının Greene ve Massey'in çalışması ile karşılaştırması. (TVL10  $10*10\text{ cm}^2$  cihaz alan açıklığında TVL değerlerini sembolize eder)

|                              | Beton TVL10 (cm) |
|------------------------------|------------------|
| <b>Greene ve Massey 1961</b> | 27,43            |
| <b>Bu çalışma</b>            | 21,98            |

Fred ve arkadaşları, 18 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil ve ikincil radyasyonların sıradan beton ve çelik için transmisyon özelliklerini ve TVL değerlerini deneysel yöntemlerle incelemişlerdir (Fred vd. 1983). Birincil radyasyon transmisyon ölçümlerinde SDD 2 m olarak ayarlanmış ve dedektör olarak farmer tipi iyon odası kullanılmıştır. Çalışmada geniş demet TVL değerlerinin elde edildiği deneysel düzende cihaz alan boyutları  $25*25\text{ cm}^2$  olarak ayarlanmıştır.

Ölçümlerde iyon odasında yeterli dozun toplanabilmesi amacıyla dedektör önüne 3 cm su eşdeğeri fantom yerleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinde beton ve çelik engelleri iyon odasının bulunduğu katı fantomun hemen önüne yerleştirilmiş ve transmisyon ölçümleri bu şekilde alınmıştır. Bu çalışmada bu tez çalışmasından farklı olarak SDD mesafesi 200 cm alınmış ve engel dedektör arası 30 cm mesafe kullanılmamıştır. Ayrıca bu çalışmada alan açıklığı NCRP 51 önerilerinde önerilen  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  olan maksimum alan açıklığı olarak ayarlanmamış, geniş demet TVL değerleri  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  alanda elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  alan boyutu için TVL değerleri elde edilmiştir. Fred ve arkadaşlarının çalışması 18 MV enerjide beton ve çelik materyaline ait birincil engel TVL değerlerinin sonuçlarını verdiği için bu tez çalışması ile karşılaştırılması yapılamamaktadır. Ancak bu çalışma sonuçları bu tez çalışmasının sonuçlarının kıyaslandığı Maruyama ve arkadaşlarının 1971 yılındaki çalışmasının sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu bulunmuştur.

Rodgers, dört farklı beton, kurşun ve çelik materyallerinin 6 MV enerjide dar ve geniş demet koşullarında transmisyon özelliklerini Monte Carlo simülasyonu ile hesaplamıştır (Rodgers 2007). Simülasyonda kaynak cihaz merkezi arası mesafe 80 cm SDD mesafesi beton için 4,8 m ve 6,8 m, kurşun ve çelik için 3,3 m ve 5,3 m olarak ayarlanmıştır. Çalışmada geniş demet koşullarında elde edilen beton, kurşun ve çelik materyallerinin 6 MV enerjideki TVL1 değerleri NCRP 51 ve 151 numaralı raporları ile Nelson ve LaRiviere 1984 yılında yapmış oldukları çalışmaya ait değerler ile karşılaştırılmıştır (NCRP 1977, 2005; Nelson ve LaRiviere 1984). Bu çalışmadaki TVL değeri sonuçlarının, bu tez çalışması, NCRP 151, Nelson ve LaRiviere'nin 1984 yılında yaptığı çalışma ile NCRP Rapor 51 ile karşılaştırması Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında 6 MV enerjide kurşun ve çelik materyalleri için elde edilen TVL değerleri diğer dört çalışma ile elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında uyumludur. Ancak tez çalışmasında 6 MV enerjide beton materyali için elde edilen TVL değerleri bu dört çalışmadan düşüktür. Nelson ve LaRiviere 1984 yılında yaptığı çalışmada ve bu değerlerin varian marka cihaza uyarlanması ile NCRP 151 numaralı raporda yer alan TVL değerleri Monte Carlo simülasyonu ile edilmiştir ancak simülasyonda hesaplama düzeneği ile ilgili bilgi yer almadığı için bu tez çalışması ile karşılaştırılamamaktadır. Rodgers yaptığı çalışmada ise beton materyaline ait TVL değerleri tez çalışmasından farklı olarak SDD 6,8 m mesafede, kurşun materyali için ise SDD 3,3 m mesafede, çelik materyali için ise 5,3 m mesafede Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında tüm materyallere ait TVL değerleri SDD 1 m mesafede elde edilmiştir. Rodgers'ın çalışması ile tez çalışması TVL değerleri karşılaştırıldığında 6 MV enerjide değerlerinin SDD mesafeleri yaklaştıkça arttığı görülmektedir ve en iyi uyum sırası kurşun, çelik ve beton olarak sıralanır. Bu nedenle beton materyalindeki TVL değerindeki farklılığın SDD mesafesi farklılığı kaynaklı olabileceği düşünülebilir. Son olarak NCRP 51 numaralı raporda yer alan TVL değerleri ise Kim ve Kennedy'nin 1954 yılında betatronlar ile elde edilen 6 MV enerjili fotonlar ile elde edilmiştir ve bu nedenle bu tez çalışması ile elde edilen değerlerden daha yüksek değerlerin elde edilmesi bu nedenle olabilir (Kim ve Kennedy 1954, NCRP 1977). Bu tez çalışmasında elde edilen TVL değerleri tıbbi doğrusal hızlandırıcılarda ölçümler yolu ile elde edilmiş olduğu için bahsi geçen bu dört çalışma ile farklılıkların oluşması beklenebilir. Daha anlamlı bir karşılaştırma olabilmesi için ise daha önce bahsi geçen Karzmark'ın 6 MV enerjili doğrusal hızlandırıcılar ile elde ettiği TVL

değerlerinin karşılaştırılması yapılabilir. Bu çalışmada elde edilen beton TVL değerleri ise bu tez çalışmasına diğer çalışmalardan daha yakındır.

Bu tez çalışmasında elde edilen beton, çelik kurşun materyallerinin 4, 6 ve 10 MV enerjilerdeki TVL değerlerinin NCRP 49, NCRP 151, IAEA 47 ile karşılaştırması Çizelge 5.7’de yer almaktadır (NCRP 1976, 2005; IAEA 2006). NCRP 151 numaralı rapor NCRP 49 numaralı raporda yer alan TVL değerlerini kullanmıştır. NCRP 49 numaralı raporda yer alan TVL değerleri ise Kim ve Kenedy’nin 1954 yılında yaptıkları çalışma sonuçlarını içermektedir, bu çalışmada elde edilen 4 MV enerjide TVL değerleri betatron cihazlarına aittir. IAEA 47 numaralı raporda ise 4 MV enerjide TVL değerleri daha önce bahsi geçen Nelson ve LaRiviere’nin Monte Carlo simülasyonu ile elde ettiği değerlerin Varian marka doğrusal hızlandırıcı cihazına uyarlanması ile elde edilen değerleri içermektedir. Bu nedenler tez çalışmasında elde edilen 4 MV enerjide TVL değerlerinin literatür karşılaştırmasında cihaz farklılığı kaynaklı daha düşük olduğu düşünülebilir.

**Çizelge 5.6.** Bu tez çalışmasında elde edilen beton, kurşun ve çelik engellerinin 40\*40 cm<sup>2</sup> cihaz alan açıklığında 6 MV TVL değer sonuçlarının NCRP 51 ve 151 numaralı raporla; Nelson ve LaRiviere’in 1984 yılındaki çalışmasıyla ve Rodgers’ın 2007 yılındaki çalışmasıyla karşılaştırması

| Materyal | Bu çalışma | Rodgers (2007) | NCRP 51 | NCRP 151 | Nelson ve LaRiviere (1984) |
|----------|------------|----------------|---------|----------|----------------------------|
| Beton    | 32,5       | 35,3           | 35      | 37       | 36,7                       |
| Çelik    | 9,08       | 10,35          | 9,9     | 10       |                            |
| Kurşun   | 5,25       | 5,49           | 5,5     | 5,7      |                            |

**Çizelge 5.7.** Beton (2,35 g/cm<sup>3</sup>), çelik (7,8 g/cm<sup>3</sup>) ve kurşun (11,36 g/cm<sup>3</sup>) materyallerinin 4 MV, 6 MV ve 10 MV enerjilerdeki TVL değerlerinin (cm cinsinden) NCRP 49, NCRP 151, IAEA 47 ile karşılaştırması

| Materyal     | NCRP 49 | IAEA 47 | NCRP 151 | Bu çalışma |
|--------------|---------|---------|----------|------------|
| <b>4 MV</b>  |         |         |          |            |
| Çelik        | -       | 9,1     | 9,9      | 8,26       |
| Kurşun       | 5,3     | 5,3     | 5,7      | 4,93       |
| Beton        | 29,2    | 29      | 35       | 26,76      |
| <b>6 MV</b>  |         |         |          |            |
| Çelik        | -       | 9,8     | 10       | 9,08       |
| Kurşun       | 5,6     | 5,5     | 5,7      | 5,25       |
| Beton        | 34,5    | 34,3    | 37       | 32,49      |
| <b>10 MV</b> |         |         |          |            |
| Çelik        | -       | 10,5    | 11       | 10,20      |
| Kurşun       | -       | 5,6     | 5,7      | 5,46       |
| Beton        | -       | 38,9    | 41       | 39,1       |

Facure ve Silva'nın 2007 yılında yaptıkları çalışmada, 4, 6 ve 10 MV enerjiler için dört farklı beton malzemesinin engel geçiş katsayılarını ve TVL değerlerini Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır. Çalışmada elde edilen çeşitli yoğunluklarda beton TVL değerlerinin bu tez çalışmasında elde edilen 2,35 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu beton ve IAEA 47 numaralı rapor ile karşılaştırılması Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Nelson ve LaRiviere yaptıkları çalışmada, 6, 10 ve 25 MV enerjili doğrusal hızlandırıcı cihazlarında oluşan birincil radyasyonların sıradan beton için (2,35 g/cm<sup>3</sup>) geniş demet koşullarında engel geçiş katsayılarını ve TVL değerlerini Morse programı ile simülasyon yaparak hesaplamışlardır (Nelson ve LaRiviere 1984). Beton engelin birincil radyasyon TVL değeri 6 MV için 36,7 cm ve 10 MV için 41 cm olarak belirlenmiştir. Jones ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada 6, 10 ve 15 MV enerjide foton demetlerinin mangadens ağır beton (3,8 g/cm<sup>3</sup>) örneklerinin TVL değerlerini ölçümler ile elde etmiştir (Jones, Peet ve Horton 2009). Ölçümlerde 0,6 cc Farmer tipi iyon odasının önüne build-up sağlamak için 2 cm su eşdeğeri fantom kullanılmıştır. Birincil radyasyon ölçümleri Gantry 90° ayarlanarak ışın merkezine 3 m mesafeye farklı kalınlıklarda zırh malzemeleri dedektörün hemen önüne yerleştirilmiştir. Dar demet koşulları için etkin alan boyutu 2\*2 cm<sup>2</sup> alan boyutu kullanılmış ve geniş demet koşulları için etkin alan boyutu 40\*40 cm<sup>2</sup> kullanılmıştır. İkincil radyasyon ölçümleri için cihaz aynı şekilde konumlandırılmış, fakat alan boyutu 40\*40 cm<sup>2</sup> açılarak ölçüm seti gantry kafasının arkasında 3 farklı yönde 3 m mesafe ile konumlandırılmıştır. Dedektörlerin diğer yönlerdeki saçılmalarından etkilenmemesi için ise, dedektör ve katı su fantomlarını oluşturan düzenek 3-6 cm kurşun koruma bloklar içerisine yerleştirilmiştir. Primer ölçümlerden sekonder radyasyon ölçümleri çıkartılmıştır. Ayrıca tüm ölçümlerde malzemeler arasına termoluminesans dozimetreler (TLD) yerleştirilmiş ve iyon odası ile elde edilen doz değerleri TLD sonuçları ile karşılaştırılarak uyumlu oldukları bulunmuştur. Ölçümler 4 farklı beton zırh kalınlığında tekrarlanmış ve bu kalınlıklara karşı 6, 10 ve 15 MV foton demetlerinin geniş demet TVL değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ağır beton TVL değerlerinin yapmış olduğumuz tez çalışması, Facure ve Silva'nın 2007 yılında yaptığı çalışmada kullandığı ağır beton örneği TVL değerleri, Nelson ve LaRiviere'nin 1984 çalışması sonuçları ve IAEA 47 ile karşılaştırması Çizelge 5.9'da yer almaktadır. Jones ve arkadaşları ile Facure ve Silva'nın yaptığı iki çalışmada ağır beton materyalleri için TVL değerlerinde azalma olduğu, buna karşılık IAEA 47 nolu raporda ve bu tez çalışmasında kullanılan normal betonlarda ise bu değerin arttığı görülmektedir.

**Çizelge 5.8.** Bu çalışmada kullanılan beton materyaline ait TVL değerlerinin Facure ve Silva'nın çalışmasında kullandığı dört farklı beton materyali ve IAEA 47 numaralı raporu ile karşılaştırması

|                 | Bu çalışma             | IAEA 47                  | Facure ve Silva 2007       |                            |                                 |      |
|-----------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|------|
| Beton türü      | Normal beton           | Barit katkılı ağır beton | Limonit katkılı ağır beton | Limonit katkılı ağır beton | Ferro-fosfor katkılı ağır beton |      |
| Beton yoğunluğu | 2,35 g/cm <sup>3</sup> | 2,57g/cm <sup>3</sup>    | 3,30g/cm <sup>3</sup>      | 3,76 g/cm <sup>3</sup>     | 4,82 g/cm <sup>3</sup>          |      |
| 4 MV            | 26,76                  | 29                       | 26,5                       | 20,5                       | 18,9                            | 14,7 |
| 6 MV            | 32,49                  | 34,3                     | 28,4                       | 22,7                       | 19,5                            | 15,9 |
| 10 MV           | 39,1                   | 38,9                     | 30,3                       | 24,7                       | 21,3                            | 18,5 |

**Çizelge 5.9.** 6 ve 10 MV enerjilerde bu tez çalışmasındaki beton materyaline ait TVL değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırması

| Enerji | Bu çalışma<br>(2,35 g/cm <sup>3</sup> ) | Nelson ve LaRiviere<br>(2.35 g/cm <sup>3</sup> ) | IAEA 47<br>(2.35 g/cm <sup>3</sup> ) | Jones vd.<br>(2008)<br>(3,8 g/cm <sup>3</sup> ) | Facure ve Silva<br>(2007)<br>Limonit (3.76 g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 6 MV   | 32,49                                   | 36,7                                             | 34,3                                 | 21,3                                            | 19,5                                                           |
| 10MV   | 39,1                                    | 41                                               | 38,9                                 | 24,1                                            | 21,3                                                           |

Bu tez çalışması ile elde edilen beton materyaline ait TVL değerlerinin aynı yoğunluktaki beton materyalleri için literatür ile karşılaştırıldığında 6MV enerjide değerlerin daha düşük 10 MV enerjide daha uygun olduğu görülmektedir. IAEA 47 numaralı raporda yer alan değerler Nelson ve LaRiviere'nin hesaplama yöntemi ile Varian marka doğrusal hızlandırıcı cihazına uyarlanarak elde edilmiş sonuçları içermektedir. Tez çalışmasında elde edilen TVL değerleri ise Elekta marka doğrusal hızlandırıcı ile elde edilmiştir. Değerlerdeki farklılıkların cihaz farkı nedeniyle oluşabileceği düşünülebilir.

## 6. SONUÇLAR

Doğrusal hızlandırıcı cihazlarının zırhlamasında yaygın olarak beton, kurşun ve çelik materyallerinden yararlanılmaktadır. Özellikle beton materyali, içeriğindeki hidrojen zenginliği, nötronlara karşı koruyucu olması ve düşük maliyet gibi nedenlerle tercih edilmektedir. Ayrıca beton üretiminde limonit, barit ve ferro-fosfor gibi agregaların farklı oranlarda karışımıyla çok çeşitli yüksek yoğunlukta betonlar üretilmektedir. Normal beton yoğunluğu  $2,2-2,35 \text{ g/cm}^3$  arasında iken,  $2,6 \text{ g/cm}^3$ 'den daha yüksek yoğunluktaki betonlar yüksek yoğunluklu ya da ağır beton olarak sınıflandırılmaktadır. Yüksek yoğunluklu beton örneklerin zırhlama amaçlı kullanımı, özellikle dar yerleşim planı bulunan tesislerde ve cihazların modifiye edilmesi ya da mevcut odasına yeni bir cihaz yerleşimi gibi durumlarda ek koruyucu gerektiğinde tercih edilebilmektedir.

Ancak birincil radyasyon zırhlamasında ağır betonların transmisyon özellikleri ve dolayısıyla TVL tabloları nadir olarak bulunmaktadır. Facure ve Silva'nın yapmış oldukları çalışma, beton yoğunluğunun artmasının transmisyon özelliklerinin değişimi ile ilgili belirsizliklere neden olacağını göstermiş ve transmisyon özellikleri için atomik bileşenlerin önemli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle ağır beton ile zırhlama planı yapılan tesislerde kullanılacak beton örnekleri ile transmisyon özelliklerinin belirlenmesi önemli olmaktadır. Bu değerler için bu tez çalışmasında önerilen ölçüm metodlarının kullanımı daha doğru kalınlık hesabı vermede yardımcı olacaktır.

Beton üretiminde önemli bir diğer konu beton bileşiminde kullanılan agregaların coğrafi konuma göre içerik olarak farklılık göstermesidir. Bu durum normal beton üretiminde kullanılan agregaların atomik bileşenlerinin coğrafi konumlara göre değiştiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle zırhlama hesaplarında hazır TVL tablolarında kullanılan TVL değerlerinin kullanımı yerine, kullanılacak beton örneklerinden alınacak numunelerin transmisyon analizleri ile elde edilecek TVL değerleri kullanılarak yapılacak hesaplamalar daha doğru zırh kalınlığı değerleri verecektir.

Bu tez çalışmasında klinik doğrusal hızlandırıcıların birincil bariyer zırhlamasında yaygın olarak kullanılan beton, çelik ve kurşun materyallerine ait engel geçiş katsayıları, cihaz alan açıklığı  $10*10 \text{ cm}^2$  için elde edilmiş ve elde edilen değerlerden TVL değerleri hesaplanmıştır. Ancak zırhlama hesaplarında NCRP 51 ve 49 numaralı raporları, TVL değerlerinin maksimum alan açıklığında ölçülmesini önerdiğinden (NCRP 1976; 1977), TVL değerleri Maruyama ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma sonuçlarına uyarlanmış ve  $40*40 \text{ cm}^2$  alan açıklığı için TVL değerleri türetilerek Çizelge 5.2'de yer almaktadır (Maruyama vd. 1971). Bu çalışmada elde edilen TVL değerlerinin literatür ile belirgin bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Doğrusal hızlandırıcıların zırh tasarımında daha önceden hesaplanmış ve raporlarda yer alan tabloların kullanılması yerine her cihazın kendi yerleşim planı ve özelliklerine göre belirlenecek cihaza özgü TVL değerlerinin elde edilebilmesi zırh kalınlığı hesaplarındaki belirsizlikleri azaltacaktır.

Bu tez çalışmasında tanımlanmış olan ölçüm yöntemi ile cihaz odası tasarımı sırasında ve inşaat öncesinde alınacak beton örnekleri temelinde yapılacak TVL hesaplamaları çok daha doğru kalınlık değerleri verecektir.

## 7. KAYNAKLAR

- American Roentgen Ray Society. 1920. *Proceedings of the annual meeting*.
- Barish, R. J. 1993. Evaluation of a new high-density shielding material. *Health physics* 64(4):412-416.
- Berger, M.J., Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S., Sukumar, R., Zucker, D.S. and Olsen, K. 2010. NIST Standard Reference Database 8 (XGAM). NIST, PML, Radiation Physics Division. DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X> [Son erişim tarihi: 01.05.2019]
- British X-Ray and Radium Protection Committee. 1921. X-ray and radium protection. *J. Roentgen. Soc.*, 17: 100-103
- British Institute Of Radiology. 1932. International recommendations for x-ray and radium protection. *In British Institute of Radiology Year Book*.
- Bureau Of Standards. 1929. X-ray and radium protection. Bur. Standards Circular No. 374 United States.
- ELEKTA. 2013. Agility TM and Integrity TM R3.x, Information for Treatment Planning Systems, 05, Document ID: 1504231 01.
- Facure, A. and Silva, A. X. 2007. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design. *Applied Radiation and Isotopes* 65(9): 1023-1028.
- Fred. A. G., Bello, J. and Purdy, J. A. 1983. Attenuation of primary and scatter radiation in concrete and steel for 18 MV X-rays from a Clinac-20 linear accelerator. *Health physics* 45(5):969-973.
- Greene, D. and Massey, J. B. 1961. Some measurements on the absorption of 4 MV x rays in concrete. *The British journal of radiology* 34(402): 389-391.
- Henshaw, P. S. 1941. Biologic significance of the tolerance dose in x-ray and radium protection. *Journal of the National Cancer Institute*, 1(6), 789-805.
- Hill, R. F., Brown, S. and Baldock, C. 2008. Evaluation of the water equivalence of solid phantoms using gamma ray transmission measurements. *Radiation Measurements* 43.7:1258-1264.
- HMSO 1957. Code of practice for the Protection of Persons Exposed to Ionizing Radiations. London.
- IAEA Safety Reports Series, No. 115, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Publications, Austria.
- IAEA, 2000. International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. Technical Report Series no. 398, Vienna.
- IAEA 2006. International Atomic Energy Agency Safety Reports Series, No. 47, Radiation protection in the design of radiotherapy facilities. IAEA Publications, Austria.

- ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1–3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4).
- Jones, M. R., Peet, D. J. and Horton, P. W. 2009. Attenuation Characteristics of MagnaDense High-Density Concrete at 6, 10 and 15 MV for Use in Radiotherapy Bunker Design. *Health physics* 96:67-75.
- Karzmark, C. J. and Capone, T. 1968a. Measurements of 6 MV x rays primary radiation absorption in lead, steel and concrete. *The British journal of radiology* 41(481):33-39.
- Karzmark, C. J. and Capone, T. 1968b. Measurements of 6 MV x rays. II. Characteristics of secondary radiation." *The British journal of radiology* 41(483): 222-226.
- Karzmark C.J. Capone T. 1968c. Measurements of 6 MV x rays, Part III. Characteristics of secondary radiation. *Brit J Radiol* 41:227-230.
- Kase K. R., Nelson W. R., Fasso A., Liu J. C., Mao X., Jenkins, T. M., Kleck, J. H. 2003. Measurements of accelerator-produced leakage neutron and photon transmission through concrete. *Health physics*, 84(2), 180-187
- Kirn, F. S. and Kennedy, R. J. 1954. Betatron X-rays: How much concrete for shielding. *Nucleonics (US) Ceased publication*, 12.
- Lariviere, P. D. 1984. Transmission in concrete of primary and leakage x rays from a 24-MV medical linear accelerator. *Health physics* 47(6): 819-827.
- Marcuse, W. 1896. Dermatitis und Alopecie nach Durchleuchtungs versuchen mit Röntgenstrahlen. *Deutsche med. Wchnschr.*, 22: 481-483
- Martin, A., Harbison, S., Beach, K. and Cole., P. 2012. An Introduction to Radiation Protection 6E. CRC Press, 259 sayfa.
- Martin, B. J. 1955. Reflection and transmission of gamma radiation by barriers: Monte Carlo calculation by a collision density method. *J Research of Natl Bur Stands* 55, 6, 343.
- Martin, B. J. and Doggett, J. 1956. Reflection and transmission of gamma radiation by barriers: Semi-analytic Monte Carlo calculation. *J Res Nat Bur Stand* 56: 89-98.
- Maruyama, T., Kumamoto, Y. Kato, Y., Hashizume, T. and Moriyuki, Y. 1971. Attenuation of 4-32 MeV X-rays in Ordinary Concrete, Heavy Concrete, Iron and Lead. *Health physics*, 20(3): 277-284.
- McGinley P. H. 1992. Photoneutron production in the primary barriers of medical accelerator rooms. *Health physics* 62(4):359-362.
- McGinley, P. H. and Butker, E. K. 1994. Laminated primary ceiling barriers for medical

- accelerator rooms. *Physics in Medicine and Biology* 39(9):1331.
- McGinley, P. H. 2002. Shielding techniques for radiation oncology facilities. *Madison: Medical Physics Publishing*, 151 sayfa.
- Mesbahi, A., G. Alizadeh, S.O. Gholamreza and A. A. Azarpeyvand. 2013. A new barite-colemanite concrete with lower neutron production in radiation therapy bunkers. *Annals of Nuclear Energy* 51:107-111.
- Mesbahi, A. and Rezvan K. 2017. Neutron and photon scattering properties of high density concretes used in radiation therapy facilities: A Monte Carlo study. *Polish Journal of Medical Physics and Engineering* 23(3):61-65.
- Miller, W. and Kennedy, R. J. 1956. Attenuation of 86-and 176-MeV synchrotron x-rays in concrete and lead. *Radiation research*, 4(5): 360-366.
- National Bureau of Standards. 1954. Protection Against Betatron-Synchrotron Radiations up to 100 Million Electron Volts., Handbook, 55: 45. ABD.
- NCRP Report No. 39, 1971. Basic radiation protection criteria. Recommendations of the National Committee on Radiation Protection and Measurements, NCRP Publications, Bethesda, Maryland.
- NCRP Report No. 49, 1976. Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV, NCRP Publications, Bethesda, Maryland.
- NCRP Report No. 51, 1977. Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities, NCRP Publications, Bethesda, Maryland.
- NCRP Report No. 79, 1984. Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators, NCRP Publications, Bethesda, Maryland.
- NCRP Report No. 116, 1993. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation, NCRP Publications, Bethesda, MD.
- NCRP Report No. 151, 2005. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage x-and Gamma-ray Radiotherapy Facilities, NCRP Publications, Bethesda, Maryland.
- Nelson, W. R. and LaRiviere, P. D. 1984. Primary and Leakage Radiation Calculations at 6-MeV, 10-MeV and 25-MeV. *Health Phys.*, 47: 811.
- Nogueira, I. P. and Biggs, P. J. 2002. Measurement of TVLs in lead for 4, 6 and 10 MV bremsstrahlung x-ray beams at scattering angles between 30° and 135°. *Health physics* 83(2):255-260.
- Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Resmi Gazete, Tarih/Sayı 24.03.2000/23999. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
- Rodgers, J. E. 2007. Analysis of tenth-value-layers for common shielding materials for a robotically mounted stereotactic radiosurgery machine. *Health physics* 92(4): 379-386.
- Russ, S. 1915. Hard and soft X-rays. *Arch. Roentgen Ray*, London, 19: 323-325.
- Shultis, J. K. and Faw, R. E. 2000. Radiation shielding. American Nuclear Society, La Grange Park

- Shultis, J. K. and Faw, R. E. 2005. Radiation shielding technology. *Health physics*. 88(4): 297-322.
- Tochilin, E., and LaRiviere, P. D. 1979. Attenuation of primary and leakage radiation in concrete for x-rays from a 10 MV linear accelerator. *Health physics* 36(3):387-392.



## ÖZGEÇMİŞ

**Özlem Yaşar Toykan Çiftlikli**

**ozlemtoykan@gmail.com**



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|                            |                                                                                                           |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek Lisans<br>2017-2019 | Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,<br>Radyasyon Güvenliği ve Koruma Anabilim Dalı,<br>Antalya |
| Yüksek Lisans<br>2014-2016 | Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü,<br>Radyoterapi Fiziki Anabilim Dalı, Antalya            |
| Lisans<br>2000-2006        | Pamukkale Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik<br>Bölümü, Denizli                                  |

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                                            |                                                                                     |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Radyoterapi Fizikçisi<br>2007-Devam Ediyor | Akdeniz Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Radyasyon<br>Onkolojisi Anabilim Dalı, Antalya |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|

## ESERLER

### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Tunçel N., Karakuş İ., Dündar E., Toykan Ciflikci O., "A review of TLD's zero-count based on temperature and radiation history of them", 3rd International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), ADANA, TÜRKİYE, 10-12 Mayıs 2017, vol.154, pp.1-32-

### Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Karakuş İ., Tunçel N., Dündar E., Sindir B., Toykan Ö., Çeçen Y., et al., "Farklı Prostat Tedavi Planlarının Dozimetrik Olarak Dvh Değerlendirmesi İle Karşılaştırılması", XII. National Medical Physics Congress Ankara- TÜRKİYE, Ekim 2009 , ss.88
- 2- Y., Yavuz M.N., "Mamariya İnterna Endikasyonlu Meme Kanseri Hastalarının Geniş Tanjansiyel İle Elektron Foton Kombinasyonlu Tanjansiyel Tedavi Planlarının Dozimetrik Değerlendirilmesi", 13. Medikal fizik Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.134-134
- 3- Dündar E., Tunçel N., Karakuş İ., Sindir B., Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Genç M., "İntact Meme Radyoterapisinde İmrt'nin Üstünlüklerinin İncelenmesi", 13. Medikal fizik Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.129-129
- 4- Çeçen Y., Tunçel N., Dündar E., Toykan Çiftlikli Ö. , Sindir B., Karakuş İ., Korum A.F., "Yüksek Riskli Prostat Kanseri İmrt'Sinde Görüntü Kılavuzluğunda Radyoterapinin (IGRT) Hedef Hacimlere Ve Riskli Organlara Katkısının Dozimetrik Olarak İncelenmesi", 13. Medikal fizik Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.130-130
- 5- Tunçel N., Sindir B., Dündar E., Karakuş İ., Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Genç M., "Tüm Vücut Işınlamasında Orta-Hat Dozunun Doğrulanması; Yarı İletken İle İn-Vivo Dozimetrisi", 13. Medikal fizik Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.62-63
- 6- Dündar E., Tunçel N., Karakuş İ., Sindir B., Toykan Ö., Çeçen Y., et al., "İntact Meme Radyoterapisinde İMRT'nin Üstünlüklerinin İncelenmesi", XIII. National Medical Physics Congress, 2011, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.129-
- 7- Karakuş İ., Tunçel N., Dündar E., Sindir B., Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Aksu M.G., "Prostat Kanseri İMRT Ve Konformal Tedavi Radyoterapi Planlarının Dozimetrik Olarak Karşılaştırılması", 13. Medikal fizik Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, no.P88, ss.131-131
- 8- Sindir B., Tunçel N., Dündar E., Karakuş İ., Çeçen Y., Toykan Ö., et al., "İMRT Planlarının Dozimetrik Kalite Kontrolü", XII. National Medical Physics Congress, İZMİR, TÜRKİYE, 17-19 Kasım 2011, ss.129-
- 9- Karakuş İ., Toykan Çiftlikli Ö. , Sindir B., Dündar E., Tunçel N., Çeçen Y., Pehlivan B., Yavuz A.A., "Gantri Aplikatörlü 2d Array İyon Odasının Açısal

- Cevabının Araştırılması Ve IMRT Kalite Kontrolüne Etkisi", 10. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 19-23 Nisan 2012, ss.235-235
- 10- Ozdemir B.S., Aksu M.G., Karakuş İ., Korcum A.F., Mersin S., Toykan Çiftlikli Ö. , Tunçel N., Yavuz M.N., "Serviks Kanserinde Küratif Kemoradyoterapi", X. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 19-23 Nisan 2012, ss.256-256
- 11- Korcum A.F., Mersin Çeçen S., Toykan Çiftlikli Ö. , Genç M., Aksu M.G., Karakuş İ., et al., "Endometriyum Kanserinde Postoperatif Radyoterapi: Prognostik Faktörler ve Sağkalım İncelemesi", X. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 19-23 Nisan 2012, ss.254-254
- 12- Çatan N.İ., Çeçen Y., Karakuş İ., Genç M., Canbolat A., Sindir B., Toykan Çiftlikli Ö. , Yavuz M.N., "VMAT Tekniğiyle Planlanan Baş-Boyun Kanseri Hastalarında Biyolojik Ve Fiziksel Tabanlı Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması", 11. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 23-27 Nisan 2014, ss.296-297
- 13- Vida Bidari, Zeynep Özge Can, Beyza Şirin Özdemir, Özlem Toykan Çiftlikli, Taylan Bükülmez, Ertuğrul Dünder, Ali Aydın Yavuz "Endometrium Kanseri Hastalarının Alan-İçi-Alan Box Planları İle IMRT Planlarının Karşılaştırılması" Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi AD. XI.Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 19-23 Nisan 2014, ss.299-299
- 14- Ozdemir B.S., Aksu M.G., Korcum A.F., Bükülmez T., Toykan Çiftlikli Ö. , Şimşek T., Genç M., "Evre I Endometrium Karsinomunda Adjuvan Radyoterapi Sonuçlarımız", XI.Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi, ANTALYA, TÜRKİYE, 23-27 Nisan 2014, cilt.29, no.Supp 1, ss.204-204
- 15- Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Yazgan Ç., Korcum Şahin A.F., Aksu M.G., "Pelvik Bölge Radyoterapisinde Belly Board Kullanımında Günlük Masa Eksen Hareketlerinin Değerlendirilmesi", 15. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 16-19 Mayıs 2015, ss.130-131
- 16- Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Yazgan Ç., Sindir B., Yavuz M.N., "Elekta Synergy Ve Elekta Synergy Platform Lineer Hızlandırıcı Cihazlarında Beş Yıllık Performans Değerlendirilmesi", 15. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 16-19 Mayıs 2015, ss.150-151
- 17- Toykan Çiftlikli Ö. , Çeçen Y., Yazgan Ç., Sindir B., Yavuz A.A., "Elekta Synergy Ve Elekta Synergy Platform Lineer Hızlandırıcı Uzun Dönem Foton Output Stabilitesi Değerlendirmesi", 15. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 16-19 Mayıs 2015, ss.150-151
- 18- Toykan Çiftlikli Ö., Bozkurt A., Tuncel N., "Investigation of Field Size Dependence of Transmission Properties of Mega Voltage X Rays", 5rd International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), Amasya, TÜRKİYE, 3-5 Mayıs 2019