

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOKLU GEOMETRİ TEKNİĞİ KULLANILARAK HIZLANDIRICILARIN  
BİLGİSAYARDA MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Şükrü ADIGÜL**

**Anabilim Dalı : Fizik**

**Programı : Nükleer Fizik**

**MANİSA – 2006**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOKLU GEOMETRİ TEKNİĞİ KULLANILARAK HIZLANDIRICILARIN  
BİLGİSAYARDA MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Şükrü ADIGÜL**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.06.2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 31.09.2006**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nurdoğan CAN**

**Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr.Turgay Karalı**

**Doç.Dr.Tahsin Babacan**

**MANİSA – 2006**

| Bölüm No   | İÇİNDEKİLER                                                         | Sayfa No |
|------------|---------------------------------------------------------------------|----------|
|            | İçindekiler                                                         | I        |
|            | Şekil Listesi                                                       | III      |
|            | Çizelge Listesi                                                     | IV       |
|            | Kısaltmalar Listesi                                                 | V        |
|            | Teşekkür                                                            | VI       |
|            | Özet                                                                | VII      |
|            | Abstract                                                            | VIII     |
| 1.         | GİRİŞ                                                               | 1        |
| 2.         | RADYASYON MADDE ETKİLEŞMESİ                                         | 2        |
| 2.1.       | Fotonların Madde İle Etkileşmesi                                    | 2        |
| 2.1.1.     | Fotoelektrik Olay                                                   | 3        |
| 2.1.2.     | Compton Olayı                                                       | 3        |
| 2.1.3.     | Çift Oluşumu Olayı                                                  | 4        |
| 2.2.       | $\beta$ -Parçacıklarının Maddeyle Etkileşmesi                       | 4        |
| 3.         | PARÇACIK HIZLANDIRICILARI                                           | 6        |
| 3.1.       | Giriş                                                               | 6        |
| 3.2.       | Parçacık Hızlandırıcıları İle İlgili Önemli Tanımlar                | 7        |
| 3.3.       | Birimler                                                            | 8        |
| 3.4.       | Hızlandırıcı Tipleri                                                | 8        |
| 3.4.1      | Yüksek –Voltaj Hızlandırıcıları                                     | 10       |
| 3.4.1.1    | Gerilim Yükselteçler                                                | 11       |
| 3.4.1.2    | Yük Taşımalı Sistemler                                              | 11       |
| 3.4.2      | Çevrimsel Hızlandırıcılar                                           | 12       |
| 3.4.2.1    | Lineer Hızlandırıcılar                                              | 12       |
| 3.4.2.1.a) | <i>Proton ve Ağır İyon Lineer Hızlandırıcıları</i>                  | 13       |
| 3.4.2.1.b) | <i>Elektron Lineer Hızlandırıcısı</i>                               | 14       |
| 3.4.2.2    | Dairesel Hızlandırıcılar                                            | 15       |
| 3.4.2.2 a) | <i>Siklotron</i>                                                    | 15       |
| 3.4.2.2 b) | <i>Mikrotron</i>                                                    | 15       |
| 3.4.2.2 c) | <i>Sinkrotron</i>                                                   | 15       |
| 3.4.2.2 d) | <i>Depolama Halkası</i>                                             | 15       |
| 3.4.2.2 e) | <i>Betatron</i>                                                     | 16       |
| 3.5        | Hızlandırıcıların Kullanım Alanları                                 | 16       |
| 3.6        | Hızlandırıcıların Tıp Alanında Kullanımı                            | 17       |
| 3.6.1.     | Tıbbi amaçlarla kullanılan Lineer Hızlandırıcıların temel parçaları | 18       |
| 4.         | MONTE CARLO YÖNTEMİ VE PARÇACIK SİMÜLASYONU                         | 19       |
| 4.1.       | Giriş                                                               | 19       |
| 4.2.       | Monte Carlo Yöntemiyle Parçacık Simülasyonu                         | 19       |

|                  |                                                                 |           |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.3</b>       | <b>EGS KOD SİSTEMİ</b>                                          | <b>21</b> |
| <b>4.3.1.</b>    | EGS'nin Gelişimi ve EGS1                                        | 22        |
| <b>4.3.2.</b>    | EGS2                                                            | 23        |
| <b>4.3.3</b>     | EGS3                                                            | 23        |
| <b>4.3.4.</b>    | EGS4                                                            | 24        |
| <b>4.3.4.1.</b>  | EGS4 Yeteneklerinin ve Biçimlerinin Özeti                       | 25        |
| <b>4.3.5.</b>    | EGSnrc                                                          | 27        |
| <b>4.4.</b>      | <b>BEAMnrc</b>                                                  | <b>32</b> |
| <b>4.4.1.</b>    | <b>BEAMnrc'nin Çalışma Temeli</b>                               | <b>32</b> |
| <b>5.1.</b>      | <b>EGS_mg ÇOKLU GEOMETRİ PAKETİ</b>                             | <b>34</b> |
| <b>5.1.</b>      | Primitiv                                                        | 34        |
| <b>5.2.</b>      | Nesneler ve Özellikleri                                         | 34        |
| <b>5.3.</b>      | Gruplar ve Özellikleri                                          | 35        |
| <b>5.4.</b>      | Akış                                                            | 35        |
| <b>5.5.</b>      | Geometride Bölgelerin Sıralanması                               | 35        |
| <b>5.6.</b>      | Öncelik Numarası Atanması                                       | 36        |
| <b>5.7.</b>      | Geometrik Dönüşümler                                            | 37        |
| <b>5.7.1.</b>    | Nesnenin Çevrilmesi ve Döndürülmesi                             | 37        |
| <b>5.7.2.</b>    | Bir Grubun Çevrilmesi ve Döndürülmesi                           | 38        |
| <b>5.8.</b>      | Primitiv Tipleri                                                | 40        |
| <b>5.9.</b>      | Kullanıcı Kodları                                               | 42        |
| <b>5.9.1.</b>    | HOWFAR Alt Döngüsü                                              | 42        |
| <b>5.9.2.</b>    | AUSGAB Alt Döngüsü                                              | 42        |
| <b>5.9.3.</b>    | HOWNEAR Alt Döngüsü                                             | 42        |
| <b>5.10.</b>     | EGS-mg Çoklu Geometri Veritabanı                                | 43        |
| <b>5.10.1.</b>   | Koleksiyon dosyaları (collections.mgdat)                        | 43        |
| <b>5.10.2.</b>   | Grup Dosyaları (groups.mgdat)                                   | 43        |
| <b>5.10.3.</b>   | Primitiv Dosyaları (primitives.mgdat)                           | 44        |
| <b>5.10.4.</b>   | Geometri, Materyal ve Öncelik Girdileri                         | 44        |
| <b>5.10.4.1.</b> | Geometri Girdileri                                              | 44        |
| <b>5.10.4.2.</b> | Materyal Girdileri                                              | 46        |
| <b>5.10.4.3.</b> | Öncelik Girdileri                                               | 46        |
| <b>5.10.6.</b>   | Çoklu Geometri Veri Tabanında Kullanıcının Geometri Oluşturması | 46        |
| <b>6.</b>        | <b>EGS_mg VERİ TABANINDA MODELLENEN GEOMETRİ ELEMANLARI</b>     | <b>49</b> |
| <b>6.1</b>       | <b>MLC</b>                                                      | <b>52</b> |
| <b>7.</b>        | <b>Sonuç</b>                                                    | <b>54</b> |
| <b>7.1.</b>      | <b>Öneriler</b>                                                 | <b>54</b> |
|                  | <b>Kaynaklar</b>                                                | <b>55</b> |
|                  | <b>Özgeçmiş</b>                                                 | <b>56</b> |

| <b>Şekil<br/>No</b> | <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                                                                                                  | <b>Sayfa<br/>No</b> |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>3.1</b>          | SLAC Lineer Elektron Hızlandırıcısı                                                                                                                   | <b>9</b>            |
| <b>3.2</b>          | Radyasyon Onkolojisi kliniklerinde kullanılan LINAK cihazı                                                                                            | <b>17</b>           |
| <b>3.3</b>          | Linak'ın temel parçaları                                                                                                                              | <b>18</b>           |
| <b>4.1</b>          | MacPharson ve arkadaşları tarafından yapılmış, durdurma kuvveti ölçüm deneyi                                                                          | <b>20</b>           |
| <b>4.2</b>          | MacPherson ve arkadaşları tarafından yapılmış, durdurma kuvveti ölçüm deneyinin yakından görünümü                                                     | <b>21</b>           |
| <b>4.3</b>          | EGSnrc kod sisteminin çalışma prensibini gösteren akış diyagramı                                                                                      | <b>29</b>           |
| <b>4.4</b>          | EGSnrc programında foton transferini gösteren akış diyagramı                                                                                          | <b>30</b>           |
| <b>4.5</b>          | EGSnrc programında elektron transferini gösteren akış diyagramı                                                                                       | <b>31</b>           |
| <b>4.6</b>          | BEAMnrc sisteminin kullanım aşamaları                                                                                                                 | <b>33</b>           |
| <b>5.1</b>          | Üç nesneye sahip bir geometride bölge numaraları                                                                                                      | <b>36</b>           |
| <b>5.2</b>          | Kartezyen koordinatlarda bir eksen etrafında döndürme işleminin gösterimi                                                                             | <b>38</b>           |
| <b>5.3</b>          | Bir nesnenin döndürülmesi                                                                                                                             | <b>39</b>           |
| <b>5.4</b>          | Kübik primitiv                                                                                                                                        | <b>40</b>           |
| <b>5.5</b>          | Silindir primitiv. Burada z eksenine üzerine yerleştirilmiş 3 paralel düzlem tarafından kesilmiş 4 tane silindirin oluşturduğu primitiv görülmektedir | <b>41</b>           |
| <b>5.6</b>          | Küre primitif, 4 tane küreden oluşmaktadır                                                                                                            | <b>41</b>           |
| <b>5.7</b>          | Construct_Geometry alt döngüsünün yapısı                                                                                                              | <b>48</b>           |
| <b>6.1</b>          | MLC multilif kolimatörün ölçekli çizimi                                                                                                               | <b>50</b>           |
| <b>6.2</b>          | MLC multilif kolimatörün bölgelere ayrılmış modeli                                                                                                    | <b>51</b>           |
| <b>6.3</b>          | MLC kodunun EGS sisteminde görünümü                                                                                                                   | <b>53</b>           |

| <b>ÇİZELGE<br/>NO</b> | <b>ÇİZELGE LİSTESİ</b>                                                   | <b>SAYFA<br/>NO</b> |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>2.1</b>            | Dünyadaki hızlandırıcıların kategorik dağılımı                           | <b>6</b>            |
| <b>6.1</b>            | Geometrilerde kullanılan element ve bileşenler için renk kodları tablosu | <b>49</b>           |

**KISALTMA LİSTESİ**

| <b>Kısaltma</b>  | <b>Açılımı</b>                    |
|------------------|-----------------------------------|
| <b>EGS</b>       | Elektron gama sağanağı            |
| <b>MC</b>        | Monte Karlo                       |
| <b>mg</b>        | Çoklu geometri                    |
| <b>Id</b>        | Kimlik numarası                   |
| <b>NRCC</b>      | Kanada Ulusal Araştırma Konseyi   |
| <b>Med.Phys.</b> | Medikal Fizik                     |
| <b>Linac</b>     | Lineer Hızlandırıcı               |
| <b>MLC</b>       | Multilif (çok yapraklı) kolimatör |

**TEŞEKKÜR**

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca ders ve tez aşamasında her türlü desteğini esirgemeyen bölüm başkanımız Sayın Doç. Dr. Nurdoğan CAN'a, Monte Carlo Yöntemi ve EGSnrc programı ile tanışıp bu konuda çalışma yapmama teşvik eden Sayın Yrd.Doç.Dr.Gültekin YEĞİN'e, gece gündüz her türlü sorunumda çekinmeden danışabildiğim değerli hocam, yakın dostum Araş.Gör.Mehmet AYVACIKLI'ya, EGSnrc deneyimlerini özveriyle paylaşan değerli arkadaşım Ümit AYYILDIZ'a,yıllardan beri maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**ÖZET**

**ÇOKLU GEOMETRİ TEKNİĞİ KULLANILARAK HIZLANDIRICILARIN BİLGİSAYARDA  
MODELLENMESİ**

**Mehmet Şükrü Adıgöl**

Bu çalışmada, Monte Carlo yöntemiyle doz hesaplaması yapan EGS\_mg paketinde kullanılmak üzere lineer hızlandırıcıların bazı iç parçaları modellenmiştir. Hazırlanan MLC modellemesi, EGS-mg paketi kullanılarak sanal lineer hızlandırıcı oluşturmak isteyen kullanıcılar için yararlı olacaktır. Yapılan modellemede ayrıntılı ve ölçekli çizimlerle Çoklu Geometri Tekniği'ne uygun yazılmış primitiv mevcuttur.

**Anahtar Kelimeler:** EGSnrc, lineer hızlandırıcı, Monte Carlo, Çoklu Geometri.

**ABSTRACT**

**Modelling The Accelerators On Computer By Using the Multi Geometry Technique**

**Mehmet Şükrü Adıgöl**

In this study, some inside materials used in EGS\_mg package calculated dose with Monte Carlo have been modelled. This MLC modelling will be useful for users to form the virtual linac by using EGS\_mg package. In this modelling primitive which is suitable to the Multiple Geometry Technique with the detailed and measured drawings is available.

**Key Words:** EGSnrc, Linac, Monte Carlo, Multi Geometry.

## 1. GİRİŞ

Kanser hastalığının tedavisinde kullanılan multidisipliner yaklaşımlardan biri olan radyoterapi, bu hastalıkla mücadele etmede oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Baş-boyun kanserlerinden “erken evre nazofarenks kanserinde” tek tedavi seçeneği radyoterapidir. Son yıllarda radyoterapi alanında meydana gelen gelişmeler sayesinde, çoğu kanser türü, artık tedavi edilebilir hastalıklar kapsamına dahil edilmiştir.

Gelişen teknolojiyle, eksternal radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcıların, sağladıkları elektron ve yüksek foton enerjisiyle vücudun farklı derinlik ve bölgelerindeki kanserli hücreler yok edilmekte, yapılan detaylı simülasyon ve hesaplamalarla da hastalısız dokular radyasyonun zararlı etkilerinden mümkün olduğunca korunmaktadır. Bu noktada , hasta tedavi edilmeden önce , vücudun hangi dokularının ne kadar doz alacağı, kritik organların tolerans dozları da göz önüne alınarak , tümöre verilebilecek optimum dozun hesaplanması ve tedavi konfigürasyonunun planlanması büyük önem kazanmaktadır.

Radyasyonun doku içerisindeki doz dağılımının, tedavi öncesinde belirlenerek, gerekli simülasyonun yapılabilmesi oldukça karmaşık işlemler gerektirir. Bununla birlikte, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, hesaplamalarda bilgisayar simülasyonlarının yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Bu konuda yapılan çalışmalar Monte Carlo simülasyonu kullanan EGS, Geant, MCNP, Penelope ve BEAMnrc gibi birçok simülasyon programının geliştirilmesini sağlamıştır. Bu programlar içerisinde EGS programının son versiyonu olan EGSnrc kod sistemi ve BEAMnrc düşük ve yüksek enerjilerde etkileşimleri başarılı bir şekilde simüle etmektedir. Birçok programda ihmal edilen etkileşimler EGSnrc de hesaplamalara katılmakta ve lineer hızlandırıcıdan çıkan doz spektrumunu başarılı bir şekilde simüle edilmektedir. Elektron ve foton enerjilerinde yapılan çalışmaların yanı sıra tedavi amaçlı lineer hızlandırıcılarda fotonötronların Monte Carlo simülasyonu da yapılabilmektedir.[1]

EGS\_mg sistemi için hazırlanmış benzer bir çalışma Ü. Ayyıldız [2] tarafından hazırlanan, “Radyoterapide Kullanılan Kaynak Ve Dedektörlerin Çoklu Geometri Tekniği İle EGSnrc Monte Carlo Modellemesi” isimli yüksek lisans çalışmasında brakiterapide kullanılan tohumlar (seed) için gerçekleştirilmiştir.

## 2. RADYASYON MADDE ETKİLEŞMESİ

Radyasyon, madde içerisinde hareket ederken o maddenin atom ve molekülleriyle etkileşerek soğurulur. Soğurulma, radyasyonun sahip olduğu enerjiyi yitirerek tutulmasıdır. Bu enerji ısıya dönüşür ve madde tarafından emilir. 1g Ra-226 ışımayla çevreye 2 cal/s enerji yayar. Kömürün 8000 cal/g'lık enerjisinin yanında radyoaktivitenin enerjisi küçük gibi görünebilir. Ancak Ra-226 bunu 1620 yıl yarı ömürle devamlı verir. 1g radyum ölçülemeyeceği kadar zayıflayınca kadar 3200000 Kcal enerji üretir. Buna göre 1g Ra-226'nın radyoaktivite enerjisi 400 kg iyi cins kömürün kimyasal enerjisine eşittir.

İyonlaştırıcı radyasyonların madde içerisinde geçerken sebep oldukları olaylar farklı özelliklere sahip olduğu için radyasyonun cinsine bağlı olarak parçacık özellikli radyasyonlar ve elektromanyetik özellikli radyasyonlar diye ayrı ayrı incelenirler.

### 2.1. Fotonların Madde İle Etkileşmesi

Elektromanyetik radyasyonlar, parçacık özellikli radyasyonlardan farklı olarak madde ile etkileşimi ihtimaller doğrultusunda gerçekleşir. Elektromanyetik radyasyon madde ile 3 temel etkileşmeye göre etkileşir ve enerji kaybeder. Bu etkileşmeler;

- 1- Fotoelektrik olay
- 2- Compton olayı
- 3- Çift oluşumu olayı 'dır.

$\gamma$ -ışınları ve x-ışınlarının madde içerisindeki soğurulmasından, toplam olarak üç süreç sorumludur. Düşük foton enerjilerinde tek yol Compton saçılmasıdır, çünkü Fotoelektrik etki için birkaç eV ve Çift oluşumu için 1.02 MeV kesin eşik enerjisi değerleri vardır [4].

$\gamma$ -ışınları ve x-ışınları temelde aynı özelliklere sahip olmakla beraber elektromanyetik spektrum içinde farklı bölgelerde bulunurlar. Her ikisinde madde içerisinde etkileştiklerinde aynı etkileri bırakırlar.  $\gamma$  ve x ışınları madde içerisinde ilerlerken rasgele yöne ve doğrultularda enerji bırakırlar. Maddenin yapısına, yoğunluğuna ve kalınlığına bağlı olarak enerjilerini ortama aktarırlar. Paralel bir elektromanyetik radyasyon demeti için,  $I$  şiddeti,  $\Delta x$  maddenin kalınlığı ve  $\Delta I$  şiddet kaybını vermek üzere;

$$\Delta I = -I\mu\Delta x \quad (1.1)$$

şeklinde değişir. Burada  $\mu$ , soğurucu ortamın lineer soğurma katsayısıdır. Başlangıçtaki şiddetin değişimi ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1.2)$$

$I_0$  başlangıç şiddetindeki radyasyon demeti, soğurucu ortamdan geçtikten sonra şiddetin değeri  $I$  olacaktır.

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimini inceleyelim;

### 2.1.1. Fotoelektrik Olay

Belirli bir enerjiye sahip olan fotonlar madde içerisinde ilerlerken elektronlara rastlayabilirler. Böyle bir durumda foton elektronla etkileşecek ve sahip olduğu enerjiyi elektrona aktaracaktır. Elektron aldığı enerjiyle yörüngeden ayrılarak serbest hale geçecektir. Kazandığı enerjiyi kinetik enerji olarak kullanan elektron madde içerisinde ilerlerken  $\beta$ -parçacıklarının yapmış olduğu etkileşimleri gerçekleştirerek sahip olduğu enerjiyi harcar. Fotoelektrik etki oluşturabilecek olan elektromanyetik radyasyon genellikle 0,5 MeV altında bir enerjiye sahiptir.

### 2.1.2. Compton Olayı

Genellikle 0,5 MeV enerjiden daha yüksek enerjilerdeki elektromanyetik radyasyon serbest haldeki bir elektronla etkileştiğinde ya da bağlanma enerjisi çok düşük olan yörünge elektronlarıyla etkileştiğinde Compton saçılması olayı gözlenir.

Foton ile elektronun etkileşmesi sonucunda foton enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve saçılarak kalan enerjisiyle yoluna devam eder. Başlangıçta  $\nu$  frekansına sahip olan foton saçıldıktan sonra daha küçük  $\nu'$  frekansına sahip olacaktır. İki frekans değeri arasındaki enerji miktarı elektronun kinetik enerjisi olur. Saçılan foton yeni fotoelektrik olaylar yada yeni Compton saçılmaları yaparak yoluna devam eder. Etkileşme sonucunda ortaya çıkan elektronlar ise  $\beta$ -parçacıkları etkileşiminde olduğu gibi etkileşimler yaparak yoluna devam edecektir.

Compton olayı sonrasında saçılan fotonun enerjisi aşağıdaki gibi değişir.

$$h\nu - h\nu' = T \quad (1.3)$$

Elektromanyetik radyasyonun dalga boyundaki değişim miktarı gelen fotonun dalga boyundan bağımsızdır. Dalga boyundaki değişim, dolayısıyla enerjideki değişim saçılan fotonun saçılma açısına bağlıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda - \lambda' = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (1.4)$$

Compton olayı olasılığı, soğurucu maddenin atom numarasına bağlı olarak orantılı olarak artar.

### 2.1.3. Çift Oluşumu Olayı

Bir foton, bir elektron ve bir pozitron halinde maddeleşebilir. Bu süreçte elektromanyetik enerji durgun enerjiye dönüşmektedir. Bir atom çekirdeği yakınında bir elektron-pozitron çifti oluşturulduğunda hiçbir korunum ilkesi de bozulmuş olmaz. Elektronun sahip olduğu  $q = -e$  ve pozitronun sahip olduğu  $q = +e$  yükleri toplamı sıfırdır. Bu durum fotonun yüküne eşittir. Benzer şekilde, elektronun ve pozitronun enerjileri, kütle enerjileride dahil, fotonun enerjisine eşittir. Çift oluşumu boş uzayda meydana gelmez. Enerjinin ve momentumun korunabilmesi için bir çekirdeğe yakın bir yerde gerçekleşmelidir.

Bir elektron yada pozitronun durgun enerjisi  $m_0c^2$ , 0.51 MeV dir. Bu durumda çift oluşumu en az 1.02 MeV kadarlık bir foton enerjisi gerektirir. Bu değerin üstündeki foton enerjilerinde, artan enerji elektronun ve pozitronun kinetik enerjisine dönüşecektir. Maksimum foton dalga boyu 0.012 Å olur. Böyle dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalar gama ışınları olarak adlandırılır. Radyoaktif çekirdek reaksiyonları sonucunda ve kozmik ışınlar içerisinde mevcuttur.

Çift oluşumunun karşıtı, bir elektron ve pozitronun birleşerek bir foton çifti yaratmak suretiyle yok olmasıdır. Fotonların doğrultuları, hem enerji hemde çizgisel momentumun korunmasını sağlayacak şekildedir. Yok olma olayının gerçekleşmesi için bir çekirdek ya da başka bir parçacık gerekli değildir.

### 2.2. $\beta$ -Parçacıklarının Maddeyle Etkileşmesi

$\beta$ -parçacıkları, aktif çekirdeklerin bozulması sırasında çekirdekteki fazla enerjinin  $E=mc^2$  eşitliğine göre kütleye dönüşmesiyle oluşan, kinetik enerjiye sahip elektronlardır. Aksi söylenmedikçe negatif elektrik yüküne sahip olduğu kabul edilir. Bir  $\beta$ -parçacıklarının durgun kütlesi bir yörünge elektronu kütlesine eşit olduğundan soğurucu ortamı oluşturan çekirdek kütlesinden çok küçüktür.  $\beta$ -parçacıkları ve yörünge elektronları negatif elektrik yükü taşıdıklarından aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olarak birbirlerine elektrostatik bir itme kuvveti uygularlar. Buna karşılık çekirdekle zıt elektrik yüküne sahip olduklarından dolayı aralarında bir çekim kuvveti oluşur. Bu durumlar göz önünde bulundurularak,  $\beta$ -parçacıklarının madde ile etkileşmesinde aşağıda belirtilen olayların gözlenmesi söz konusudur.

$\beta$ -parçacıkları içinden geçtiği yapının elektronları ile çarpışarak saçılabilir, bu olay saçılma olarak adlandırılır. Rastladığı elektronlara bir miktar enerji vererek onları uyarır. Bu elektron bulunduğu yörüngeden daha üst yörüngelere geçer. Elektron yeni yörüngesinde çok fazla kalamaz ve kısa bir süre sonunda eski yörüngesine geri döner. İki yörünge arasındaki enerji farkını, bu enerjiye eşit bir foton yayınlayarak dışarı verir. Enerji seviyesi, soğurucu yapının atomlarına bağlıdır ve karakteristik X-ışını şeklinde olur. Bu olay uyarılma (eksitasyon) olarak adlandırılır.

$\beta$ -parçacıkları, etkileştiği maddenin atomlarına elektronları koparacak seviyede enerji verdiği takdirde maddede iyonlaşmaya sebep olacaktır. Maddenin elektronu atomdan ayrılarak bir iyon çifti oluşturur. Bu olay iyonlaşma olarak adlandırılır.

Yüksek enerjili  $\beta$  parçacıkları, içinden geçtiği ortamın atomları arasından geçerken, elektrostatik kuvvetlerin etkisinde kalarak hızlarını değiştirir ve frenlenirler. Bu esnada sürekli bir spektrum oluşturan eden x ışını yayınlarlar. Bu x ışınlarına frenleme ışınları veya “Bremsstrahlung” adı verilir.

$\beta$ -parçacıkları madde içerisinde yukarıda belirtilen etkileşimleri enerji seviyesine göre yaparak enerjisini ortama aktarır.  $\beta$ -parçacıkları madde içerisinde hareket ederken zikzaklar çizerek ilerler ve her bir etkileşimde bir miktar kinetik enerjisini ortama aktarır. Kinetik enerjisi sıfıra indiğinde serbest elektrona dönüşür.

$\beta$ -bozunumu yapan aktif çekirdeklerde protonun nötrona dönüşmesiyle pozitronlar ortaya çıkar. Pozitronlar, elektrik yükleri hariç diğer tüm özellikler  $\beta$ -parçacıkları ile aynıdır. Soğurucu ortam içerisinde ilerlerken  $\beta$ -parçacıkları ile aynı etkileşimleri pozitif yük durumuna göre gerçekleştirir. Yaptığı etkileşimler sonucunda, kinetik enerjisi belirli bir enerji değerinin altına indiğinde ortamdaki elektronlardan birisi ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda birbirlerini yok ederler. Sahip oldukları enerji, ortama bırakılan 2 adet  $\gamma$  fotonuna dönüşür. Bu olay pozitron-elektron annihilasyonu olarak adlandırılır [4].

### 3. PARÇACIK HIZLANDIRICILARI

#### 3.1. Giriş

On dokuzuncu yüzyıl başında fizikçiler Crookes tüpleri ve içinde elektrot bulunan boşaltılmış cam sistemlerle deneyler yaptılar. J.J Thomson 1890'da elektronu keşfi sırasında bir Crookes tüpü kullandı. Röntgen "X" ışınlarını 1896'da bir Crookes tüpü kullanarak keşfetti. Daha sonra "X" ışınları tüpü Coolidge tarafından kullanılan pratik bir alet haline getirildi. Rutherford 1920'deki bir konferansta nükleer fizik araştırmalarında kullanılması için parçacık hızlandırıcılarının geliştirilmesini önerdi. Atom çekirdeğinin anlaşılmasında daha ileri gelişmeler için çok daha yüksek enerjili parçacıklara ihtiyaç olduğunu işaret etti.

Hızlandırıcıların tarihsel gelişimine bakıldığında, kapasitelerinde dikkat çekici ilerlemeler olduğu görülmüş, bilim, tıp ve endüstrideki uygulamalarında bu gelişmeler maksimum enerji kapasitesini 50 sene içerisinde 10 milyondan fazla bir çarpanla ve demet akım kapasitesini de aynı büyüklükteki bir çarpanla arttırmıştır. Hızlandırılan atomik parçacıkların çeşidi artmış, parçacık hızlandırma işleminin maliyeti düşürülmüştür. Bu gelişmeler bir çok amacın birleşimiyle ortaya çıkmıştır. Var olan yeni metotlara yeni hızlandırma metotlarının tasarlanarak eklenmiş ve teknolojik gelişmeler sürekli olarak devam etmiştir.

Tıpta kullanılan hızlandırıcılardaki gelişmeler hızlandırılabilen parçacıkların çeşidinin artması, demetlerin kontrolündeki kesinlik ile cihazların maliyeti ve sağlamlığı üzerine odaklanmıştır. Endüstriyel uygulamalar sürekli olarak hızlandırıcı maliyetindeki düşüş üzerine, demet akımı ve hızlandırılan parçacıkların çeşidinin artırılması üzerine ve artan taşınabilirlik ile küçültme işlemi üzerine genişletmiştir.

2000 yılı itibariyle dünyadaki toplam hızlandırıcı sayısı 15000 civarındadır.

**Çizelge 2.1** Dünyadaki hızlandırıcıların kategorik dağılımı [5].

| KATEGORİ                                          | SAYISI       |
|---------------------------------------------------|--------------|
| İyon aşılama ve yüzey modifikasyonu               | 7000         |
| Endüstriyel amaçlar                               | 1500         |
| Nükleer olmayan araştırmalar                      | 1000         |
| Radyoterapi                                       | 5000         |
| Tıbbi izotop üretiminde                           | 200          |
| Hadronterapi                                      | 20           |
| Sinkrotron ışınımı kaynağı olarak                 | 70           |
| Parçacık fiziği ve nükleer fizik araştırmalarında | 110          |
| <b>TOPLAM</b>                                     | <b>15000</b> |

### 3.2. Parçacık Hızlandırıcıları İle İlgili Önemli Tanımlar

**Elektron Volt (eV):** Hızlandırıcı fiziğinde kullanılan enerji birimidir. Bir eV, elektronun 1 voltluk potansiyel farkını aşarken kazandığı enerjidir.

**RF Rezonans Boşluğu:** İçerisinde parçacıkları hızlandırmayı sağlayacak şekilde yüksek frekanslarda (MHz, GHz) boyuna elektrik alanının uyarıldığı normal veya süperiletken metaller kullanılarak oluşturulan ortam.

**Yüksek Voltaj Hızlandırıcıları:** İçindeki her bir parçacığın yüksek bir potansiyel farkından ( $\Delta V$ ) bir kere geçtiği parçacık hızlandırıcısı. Yüksek voltaj hızlandırıcısının ana çeşitleri: Cockcroft-Walton Hızlandırıcılar, Van de Graaff jeneratörleri ve Marx Jeneratörleridir.

**İndüksiyon Hızlandırıcıları:** Faraday'ın indüksiyon yasası gereği magnetik akının zamanla değişimi yoluyla dairesel yörünge boyunca indüklenen elektrik alanı yardımıyla hızlandırmanın gerçekleştirildiği dairesel hızlandırıcıdır.

**Lineer Hızlandırıcı (linak):** Hızlandırmanın doğrusal bir yol boyunca sıralanmış bir veya birden fazla RF rezonans boşluğu ile gerçekleştirildiği hızlandırıcıdır.

**Dairesel Hızlandırıcı:** Parçacıkların, RF boşluklarında hızlandırıldıkları ve magnetik alanlar yardımıyla dairesel yörüngelerde tutulduğu hızlandırıcıdır.

**Devirsel Hızlandırıcı:** Her bir parçacığın çok yüksek enerjilere hızlandırılması için bir potansiyel farkından defalarca geçirildiği hızlandırıcıdır.

**Çarpışan Demet Deneyi:** Çarpışma sürecinde, zıt doğrultuda ikinci bir demetin hedef olarak kullanıldığı deney türüdür. Bu tür deneyler yeni parçacıkları oluşturmak ve özelliklerini incelemek için yapılır.

**Sabit Hedef Deneyi:** Bir demetin hızlandırıldıktan sonra sabit bir hedefe çarptırıldığı deney türüdür. Bu tür deneyler saçılma veya ikincil demetlerin üretilmesi amacıyla yapılır.

**Odaklama Sistemi:** Hızlandırma ve depolama süresince demet içerisinde ideal yörüngeden sapmış parçacıkların ideal yörüngeye yaklaştırılmasını sağlayan ve genel olarak kuadropol magnetlerin kullanıldığı magnetik optiksel sistem.

**Betatron:** Daha çok elektronlar ve hafif parçacıklar için geliştirilmiş dairesel indüksiyon hızlandırıcısıdır. Sabit yarıçaplı bir daire üzerinde parçacıkları muhafaza etmek için kılavuz magnetik alan zaman içinde artırılır.

**Mikrotron:** Elektronların bir radyo frekansı (rf) ile salınan gerilim etkisiyle hızlandırıldığı ve yarıçapları farklı tüm yörüngelerin aynı hızlandırma bölgesinden geçtiği dairesel hızlandırıcıdır.

**Siklotron:** Daha çok proton ve ağır iyonların bir radyo frekansı (rf) ile salınan gerilim ile hızlandırıldığı ve enerjisi artan demetlerin zaman içinde merkezden dışa doğru spiral çizdikleri hızlandırıcıdır. Hızlandırılmış demet bir noktadan çıkarılarak deneyde kullanılır.

**Sinkrotron:** Parçacık demetinin bir veya çok sayıda RF rezonans boşluğu tarafından hızlandırıldığı ve zamanla artan bir magnetik alan tarafından sabit yarıçaplı bir yörüngede tutulduğu dairesel hızlandırıcıdır.

**Depolama Halkası:** Zaman içinde sabit bir magnetik alanın kullanıldığı sinkrotron benzeri bir halkadır. Burada bir veya daha fazla parçacık demeti çarpışma öncesi uygun kaliteye ulaşmış halde tutulabilirler.

Parçacık hızlandırıcıları temelde atomik parçacıkların kinetik enerjilerini arttırmak amacıyla kurulan düzeneklerdir. Bu parçacıklar elektrik yükü bulunan elektronlar, protonlar ve bunların anti-parçacıkları veya ağır iyonlar olabilir. Parçacıklar elektromagnetik alanların neden olduğu kuvvetlerce hızlandırılırlar ve hepsi aynı doğrultuda hareket ederler.

Hızlandırılmış parçacıklar, yüksek enerji fiziği ve nükleer fizik deneyleri ile bilimsel araştırmalarda, tıpta veya endüstride kullanılırlar. Parçacık demetleri istenilen enerjiye hızlandırıldıktan sonra hedefe çarpması için yönlendirilir. Hızlandırılan parçacıklar demet içinde fiziksel etkilere maruz kalırlar ve demet kalitesi açısından bu etkiler hızlandırıcıların tasarımı esnasında ciddi olarak incelenmelidir.

### 3.3. Birimler

Hızlandırılan parçacıkların ulaşacağı son enerji değeri bir parçacık hızlandırıcısının en önemli parametrelerinden birisidir. Parçacıklar elektronun yükü olan e'ye eşit veya onun katları kadar yüke sahip olurlar ve Volt olarak ölçülen potansiyel farklarında hızlandırılırlar. Bu nedenle enerjinin doğal birimi elektron volt (eV)'dur.

Elektron volt çok küçük bir enerji birimidir. ( $1 \text{ eV} = 1.610^{-19}$  Joule). Atom içerisindeki enerji seviyeleri için, hızlandırıcılarda olduğundan daha çok kullanılır. Bu yüzden elektron volt' un hızlandırıcıları tanımlamak için kullanılan katları vardır. Örneğin ;

$$1\text{keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV} = 10^3 \text{ keV}$$

$$1\text{GeV} = 10^9 \text{ eV} = 10^3 \text{ MeV}$$

$$1\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 10^3 \text{ GeV}$$

Parçacık hızlandırıcılarının enerjilerinde birkaç yüz keV' den birkaç TeV' e kadar değerlere rastlanabilir. Parçacık hızlandırıcılarının boyutları bir masa üzerine sığacak cihazlardan çevresi kilometreleri bulan dairesel hızlandırıcılara kadar uzanır.

Bir hızlandırıcıyı tanımlamak için kullanılan önemli diğer parametreler, birim zamanda hızlandırılan parçacık yoğunluğunu içine alan demet akım şiddeti, demet akısı ve demetin enine boyutlarıdır. Şayet sözkonusu bir çarpıştırıcı ise en önemli iki parametre birim zamanda ve birim yüzeyde etkileşme oranını veren ışınlık (L, luminosite) ve yeni parçacıklar üretmek üzere kullanılabilir enerjinin ölçüsü olan kütle merkezi enerjisidir ( $E_{cm}$ ) [5].

### 3.4 Hızlandırıcı Tipleri

Hızlandırıcılar iki sınıfa ayrılabilir;

1. Hızlandırma işlemi için yüksek bir DC gerilim farkı kullananlar
2. Radyo Frekans salınımlı elektromagnetik alanlar kullananlar.

Yüksek gerilim hızlandırıcıları bir toprak ucuna göre yüksek gerilim değerlerine sahiptir. Birçok yüksek gerilim hızlandırıcılarında Cockcroft-Walton takımı ve Marx jeneratöründe olduğu gibi, bir gerilim katlayıcı devre kullanılır ve yük terminale elektronik olarak taşınır. Diğerlerinde, Van de Graaff hızlandırıcısında olduğu gibi, aynı zamanda elektrostatik jeneratör olarak da bilinir, yük terminale kuşak sisteminin hareketiyle mekanik olarak taşınır. Van de Graaff içinde negatif iyonların yüksek gerilime hızlandırıldığı Tandem Van de Graaff'a genişletilebilir. Daha sonra elektronları alınarak pozitif yüklü iyonlar haline gelirler ve potansiyel farkı yardımı ile kinetik enerjileri artacak şekilde hızlanırlar.

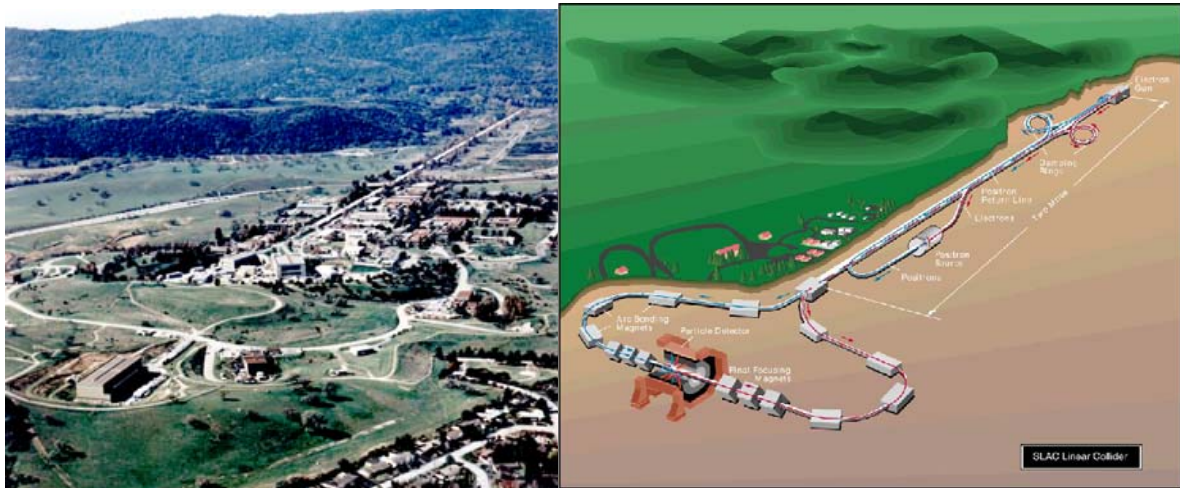
Yüksek gerilim hızlandırıcıları kıvılcım saçma veya zemine (toprağa) boşalmalara karşı yüksek voltaj tutulmasının pratik problemleri tarafından tepe enerjisi içinde sınırlanmıştır. Cockcraft – Walton ve Marx jeneratörleri yaklaşık olarak 1 MV'a kadar ulaşabilirler Van de Graaff jeneratörleri 25 MV'a kadar ulaşmıştır ve Tandem'ler parçacıkları 50 MeV'e kadar hızlandırmışlardır.

Çevrim hızlandırıcıları daima zaman içinde değişen hızlandırıcı alanlara sahiptir. Parçacığın hareketi bu değişim ile eşzamanlılık oluşmuştur. (Eğer alanlar sabitse onlar bu sınıfın enerji limitlerine sahip yüksek voltaj hızlandırıcıları olacaktır.)

Lineer hızlandırıcılarda, her bir parçacık hızlandırıcı yapılarından (RF rezonans boşlukları) ardışık olarak bir kere geçer. Dairesel hızlandırıcılar da aynı hızlandırıcı yapıdan yinelemeli olarak geçmeleri için parçacıklar kapalı bir yörünge çevresinde magnetik alan kullanılarak bükülür.

Işık hızlarına yakın hızlarda hareket eden elektronlar ve diğer parçacıklar için olan lineer hızlandırıcılar özel bir dalga kılavuzu içinde hareketli bir elektro magnetik dalga kullanırlar. Elektronlar dalganın tepesinde bir okyanus dalgasının üzerindeki bir sörfçü gibi hareket ederler. En büyük lineer elektron hızlandırıcısı olan ve iki mil uzunluğundaki 50 GeV'lik Stanford Lineer Hızlandırıcısı (SLAC) Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Işık hızından daha yavaş hareket eden parçacıklar için değişik bir yapıya ihtiyaç vardır. Çünkü dalga hızı parçacıkların basamakta kalmalarını sağlamak için yeterli derecede düşürülemez. Bu durumda parçacıkları yavaşlatma alanlarında korumak için sürüklenme tüpleri kullanılır. En büyük lineer proton hızlandırıcısı Los Alamos Ulusal Laboratuvarındaki 800 MeV'lik hızlandırıcıdır [5].



Şekil 3.1 SLAC Lineer Elektron Hızlandırıcısı [6].

Siklotron ilk dairesel hızlandırıcıdır. Parçacıklar bir dairenin merkezine enjekte edilir ve sabit manyetik alan içinde bir yandan enerji kazanırken bir yandan da dışarıya doğru spiral çizerler. Parçacıklar iki "D" şeklindeki sürüklenme tüpü arasında kalan bölgeye geçerken hızlandırma meydana gelir. Parçacık hızları radyo frekansı (RF) hızlandırma gerilimi ile eşzamanlı olmalıdır. Yüksek enerjiler için, bu eşzamanlılık devam ettirilemez ve hızlandırıcı voltaj sinkro-siklotron'da frekans modülasyonuna tabi tutulur. Daha yeni siklotronlar eşzamanlılığı devam ettirmek için değişik alanlarda kullanılır. Modern sinkrotronlar bir kaç MeV'den bir kaç GeV'e kadar işlem yapmak için inşa edilmişlerdir. Elektronlar için siklotronlar kullanışlı bir cihaz değildir. Yerine parçacıkların enerji kazanırken daha uzun yörüngelerde hareket ettikleri mikrotron daha uygundur.

Bir GeV'den daha ileriye gitmek için kullanılan, içinde parçacıkların dönme esnasında sabit bir yarıçapta kalmalarını sağlamak için manyetik alanın zamanla artırıldığı dairesel hızlandırıcılar sinkrotronlardır. Hızlandırma sırasında parçacıklarla olan eşzamanlılığı korumak için alan sürekli değiştirilir. En büyük sinkrotron süper iletken mıknatıslardan yararlanan Fermi Laboratuvarındaki TEVATRON'dur. Protonları ve anti-protonları 1TeV'e kadar hızlandırarak çarpıştırır.

Depolama halkaları sinkrotronlarla aynıdır fakat magnetik alan parçacıkların dönmeye devam edebilmeleri için sabit tutulur. Her iki doğrultuda parçacık çevrimli depolama halkalarından demet çarpıştırma deneylerinde yararlanır.

Betatron, parçacıkların, değişen magnetik alanların indüklendiği elektrik alanlar tarafından hızlandırıldığı dairesel indüksiyon hızlandırıcısıdır.

Keyfi bir yüksek enerji için bir sinkrotron inşa etmek prensipte mümkün olmasına rağmen daha sonraki aşamada ekonomik olarak imkansız olmaktadır. Parçacık hızlandırmanın daha ileri ve yeni yollarını arayan birçok hızlandırıcı bilim adamı vardır. Belki lazerlerde veya plazmalarda parçacıkların hızlandırılması ve kılavuzluğu için yoğun elektromanyetik alanların kullanımı mümkün olacaktır. Bu çalışma toplu hızlandırıcıların şekillenmesi ve birçok ilgi çekici fikirleri ile halen araştırma aşamasındadır.

### 3.4.1 Yüksek –Voltaj Hızlandırıcıları

Bir yüksek voltaj hızlandırıcısında, bir uç veya elektrot yüksek voltajla yüklenir ve parçacıklar toprak potansiyeli ile bu yüksek potansiyel arasında hızlandırılır. Eğer terminal +V voltajı ile yüklenmişse, tek yüklü pozitif iyon hızlandırıcısında eV enerjisi kazanacaktır. Böylece terminal toprağa göre +V potansiyeldedir ve mümkün olan maksimum voltaj, tutma potansiyeli ile sınırlıdır.

Yüksek voltaj üretmenin en basit yolu, bir kaç voltaj yükseltici transformatör sistemi ile yapılır. X-ışınları makineleri, bu metotla 1 MV' a kadar voltaj (gerilim) üretirler. Demet sadece alternatif çevrimin (ac) yarısında hızlandırılır ve atma boyunca enerji değişir.

Demet parçacıklarının saçılmasını önlemek için, düşük basınçlara kadar boşaltılmış bir hızlandırıcı tüp kullanılmalıdır. Gerilim zayıflaması, bir kıvılcımı önlemek için bir tüp boyunca düzgün bir şekilde dağılmalıdır. Yaklaşık 1 MeV üzerindeki gerilimler için, hızlandırıcı tüp boşluğunun dışı hemen hemen her zaman yüksek dielektrik sabitli basınçlı gaz (sülfür-hekzaflorur) tarafından yalıtılmıştır.

Elektrik yükü yüksek gerilim üretmek üzere terminale getirilir. Yük, voltaj çoğaltan devrelerle elektronik olarak veya hareketli sistemlerle mekanik olarak getirilebilir.

#### 3.4.1.1 Gerilim Yükselticiler

İlk başarılı yüksek voltaj hızlandırıcısı, Cockcroft ve Walton hızlandırıcısıdır. Voltaj ikileyici bir devrenin kurulmasıyla yapılmıştır. İki tane doğrultucu, alternatif akım dalgasının zıt tarafında bir kondansatörün iki kat voltajla yüklemesine etki ederler. Bu prensip birçok duruma genişletilebilir. Cockcroft ve Walton, Greinacher devresini kullandılar ve ilk hızlandırıcı tüpünü geliştirdiler. Onlar, protonları 300 keV' e kadar hızlandırmışlar ve 1932' de, iki  $\alpha$  parçacığı üretmek için protonları lityumla bombardıman ederek, suni olarak laboratuarlarda hızlandırılan parçacıklarla iki nükleer reaksiyonu gerçekleştirdiler. Modern Cockcroft-Walton jeneratörleri, yaklaşık 1MV' a kadar voltajlara ulaşabilir. Özel basınç sistemleri, 3 MV' a kadar inşa edilmiştir. Cockcroft-Walton jeneratörleri yüksek enerji hızlandırıcı sistemlerinin ilk aşaması olarak yaygın bir biçimde kullanılmıştır. Çünkü çok iyi enerji regülasyonu yapılmış demetler üretilebilir. Marx jeneratörü de prensipte aynıdır. Doğrultucu sistem, kapasitörlere dışardan takılır. Temelde, kapasitörler paralel olarak yüklenmişlerdir. Kıvılcım aralığı boyunca seri olarak boşalırlar.

Marx jeneratörleri ilk olarak, 1920' lerde yüksek voltaj üreterek elektrik üretimi ve elektriği iletme aletini test etmek için kullanıldı. Onlar, modern hızlandırıcı çalışmalarında çok yoğun (1000-10000A<sup>0</sup>), kısa süreli (10-50 ns), 1-10 MeV' lik parçacıkları üretmek için kullanıldı. Parçacık enerjisi, puls sırasında çok zayıf olarak regüle edilir.

#### 3.4.1.2 Yük Taşımalı Sistemler

Terminale mekanik olarak yük taşıyan aletlerin en önemlisi elektrostatik jeneratörler veya Van de Graaff jeneratörüdür. Yük, yüksek voltaj ucuna hareket eden bir kayış ile taşınır. Çoğu modern hızlandırıcılarda, bu kayış bir çok yalıtkan metal halkadan yapılmıştır. Van de Graaff hızlandırıcıları, 1930' larda nükleer fizik biliminin anlaşılmasında önemli rol oynamıştır.

Bir elektrostatik jeneratör, 25 MeV' lik bir terminal voltajı üretir. Negatif iyonları toprak ucundan yüksek pozitif voltaja hızlandırarak etkin voltajı iki katına çıkarmak mümkündür. Demeti bir metal halkadan geçirerek, elektronları da çıkararak pozitif iyonlar toprak potansiyeline geri hızlandırılır. Bu tekrarlar (tandem) Van de Graaff jeneratörü yüksek enerji üretir ancak; düşük yoğunluktadır. Çünkü çıkarma işlemi mükemmel bir verimle yapılamaz. Bir elektrostatik jeneratörlerdeki demet akımı 10-20  $\mu$ A kadar büyük olabilir. Fakat tekrardaki ( tandem) demet akımı 1  $\mu$ A mertebesinde [5].

### 3.4.2 Çevrimsel Hızlandırıcılar

Yüksek enerjili parçacıklar üretmek için düşük voltajın tekrarlı bir şekilde kullanıldığı iki çeşit hızlandırıcı vardır: Hızlandırıcı yapının belli bir serisinde,

1. Her bir parçacığın bir kez geçtiği lineer hızlandırıcılar,
2. Her bir parçacığın kapalı bir yörünge içerisinde (tam olarak dairesel olması gerekmez) dolaştığı ve aynı hızlandırıcı yapı içerisinde tekrar geçtiği dairesel hızlandırıcılardır.

Manyetik alan, kapalı yörüngeler boyunca parçacıkların yörüngelerini bükmek için kullanılır. Bir çevrimsel hızlandırıcı içinde, hızlandırıcı kuvvet zamanla değişmeli. (yüksek voltaj hızlandırıcılarında da kuvvetlerin tersine) Eğer hızlandırıcı kuvvet zamanla değişmezse, yüksek enerji üretmek için tekrar tekrar kullanılamaz.

#### 3.4.2.1 Lineer Hızlandırıcılar

Lineer hızlandırıcıda parçacıklar çok iyi bir yaklaşıklığa kadar düz bir yol izlerler. Bu parçacıklar E elektrik alanının etkisi ile istenilen yönde hızlandırılabilirler ve statik E veya B alanları kullanarak manyetik merceğin etkisiyle demet içinde odaklanabilirler. Bazı durumlarda zamanla değişen harmonik alanlar radyo frekans kuadropol odaklama (RFQ) sistemi ile yapılır.

Bugünkü hızlandırıcılarda, hızlandırıcı kuvveti sağlayan elektrik alanı, demet yakınındaki dielektrik ortam veya iletkenlerle şekillendirilir. Parçacıklar hızlandırıcının içinden geçerken, parçacık demetinin kinetik enerji artışı hızlandırıcının elektrik alanda depo edilen enerjisinin azalmasıyla karşılanır. Statik alanın korunumlu doğası nedeniyle yüksek voltaj hızlandırıcıları, lineer hızlandırıcıların daha temel bir biçimi olan maksimum sabit elektrik potansiyeli ile maksimum parçacık kinetik enerji kazancına sınırlandırılmıştır. Bu ise iletkenlerin bir düzlem ile desteklenebilir veya yapılabilir olmasını gerektirir. Pratik durumlarda bu birkaç milyon voltur. Eğer hızlandırıcı elektrik alan zamanla değişiyorsa, sürekli hızlandırma sağlanabilir. Bu oluşturulabilirse, maksimum parçacık kinetik enerjisine fiziksel bir limit gelmez. Lineer hızlandırıcıda hızlandırıcı alan enerjisinin önemli bir kısmı hızlanan dalgada bulunur. Hızlandırıcı kuvvet hızlandırıcının eksenini boyunca E büyüklüğü ile orantılıdır ( $F=qE$ ). İlerleyen dalga alanı zamanla ve hızlandırıcı boyunca z uzaklığı ile değişir.

$$E = E_0 \cos[w(t - z/v_w) + \phi_i] \quad (3.1)$$

Burada w dalganın frekansıdır.  $v_w$  dalganın faz hızı ve  $\phi_i$  sabittir. Hızlandırmanın başında dalga boyunun, başlangıç değeri hesaplanır. ( $t=0, z=0$ ) Eğer hızlandırılan parçacıklar hızlandırıcı eksenini boyunca  $v_p$  hıza sahipse onların konumu:

$$z = v_p t \quad (3.2)$$

Sonuç olarak, eğer lineer hızlandırıcıda  $v_w = v_p$  olacak şekilde kurulursa, parçacıklar z-ekseni boyunca sabit bir kuvvet tarafından hızlandırılırlar.

$$F = qE_0 \cos(\phi_i) \quad (3.3)$$

Hızlandırıcının etkin olması parçacığın salınımlı alanı sadece dalga tepeleri yakınında ( $\phi_i=0, 2\pi, 4\pi, \dots$ ) yakalaması gerekir. Böylece zamanla değişen alanlara uygun lineer hızlandırıcılardaki bu demetler paketçikli halde olmalıdır. Paketçiklerin aralığı  $v_{\lambda_w}/c$ 'dir. Burada  $\lambda$  hızlandırıcı harmonik alanın serbest-uzay dalga boyudur. Hızlanan parçacıkların hızları;

$$v_p/c = \{1 - [1/(1 + (T/m_0 c^2))]^2\}^{1/2} \quad (3.4)$$

Burada T hızlanan parçacığın kinetik enerjisi,  $m_0 c^2$  durgun kütle enerjisi, c ışık hızıdır. Kinetik enerji, durgun kütle enerjisinden çok küçük ise.  $T \ll m_0 c^2$  durumunda ,

$$v_p/c \approx (2T/m_0 c^2)^{1/2} \quad (3.5)$$

ifadesine indirgenir. Durgun kütle enerjisi kinetik enerjiden çok fazla ise;

$$v_p/c \approx 1 \quad (3.6)$$

yaklaşıklığı bulunur. Denklem (3.4) , hız ile kinetik enerji arasındaki bağıntıyı verir. Lineer hızlandırıcı için ön hızlandırıcılar, yüksek voltaj doğru akım veya puls- doğru akım hızlandırıcılarıdır. Birkaç yüz kilowattan, birkaç yüz milyon voltlara kadar çalışırlar. Protonlar ve ağır iyonların durgun enerjileri bir kaç GeV'dir. Bunlar ön hızlandırıcıdan ışık hızı "c" nin sadece küçük bir kesri olan hızlarda çıkarlar. Elektronlar 511 keV' lik bir durgun kütle enerjisine sahiptir. Öyle ki, 80keV' lik bir ön hızlandırıcı, elektronların hızını  $0,5c$ ' ye kadar çıkartılabilir. Hızlandırıcıda dalganın verimli bir şekilde elde edilebilmesi için gerekli olan düzenlemeler, istenen dalga hızına bağlıdır. Proton, ağır iyon ve elektronlar için lineer hızlandırıcıların düzenlenmesi farklıdır.

#### **3.4.2.1.a) Proton ve Ağır İyon Lineer Hızlandırıcıları**

İlerleyen dalga sistemi, parçacık hızlarının  $c$ ' den çok az olduğu durumlarda işlemez çünkü; dalga, parçacığın hızını yakalaması için yeteri kadar yavaşlatılamaz. Eğer dalga hızı parçacık hızından büyükse, dalga her bir parçacığı geçer. Geçerken azaltıcı kuvvetlerle karşılaşır. Dalganın sinüzoidal değişiminin alan kısmında yavaşlatıcı kuvvetlerle karşılaşır. İlerleyen dalga yerine, duran dalga kullanılırsa ve iletken sürüklenme tüpleri negatif alan bölgesindeki parçacık izlerinin yakınına yerleştirilirse bu parçacıkların alanları korunur.

Sürüklenme tüpü (drift tubes) lineer hızlandırıcıları, proton veya ağır iyonların hızlandırılmasında kullanılır. Yüksek yoğunluk demetleri üretme yeteneğindedir. Sürüklenme tüplerinin bulunması duran dalga lineer hızlandırıcısındaki frekansın seçimini etkiler. Hızlandırıcı frekans, sürüklenme tüplerinin çok küçük odaklama elemanları içermesi nedeniyle çok büyük olmaz. Proton

lineer hızlandırıcısında yaklaşık 200 MHz frekans kullanılır. Ağır iyon lineer hızlandırıcıları daha düşük hızda enjeksiyon yapar.

Lineer hızlandırıcıdaki RF boşluklar (kaviteler), yani hızlandırıcı bölgesi elektromanyetik alan içerir. 200 MeV' lik proton lineer hızlandırıcısı yaklaşık 500 ft uzunluğundadır. Puls uzunluğu , ortalama RF gücü sadece birkaç kV olacak kadar kısadır. Her bir kavite için ayrı yükselticiler, ana osilatör tarafından eş zamanlılık sağlar. 200 MeV' lik protonların 200 mA' lik pik akımları proton sinkrotronu için enjektörlerle kazanılır. Puls uzunluklu lineer hızlandırıcılar, yüksek yoğunluk istenilen uygulamalar için yapılır. Daha yüksek enerjiler için bir duran dalga lineer hızlandırıcısı, ilerleyen dalga lineer hızlandırıcısına enjekte edilmek için kullanılır. Bu durumda parçacığın hızı ışık hızı "c" ile karşılaştırılabilir değerdedir. Duran dalga lineer hızlandırıcıları, sürüklenme tüpleri ve bakır linig, neobiyum gibi süper iletken metaller ile yerleştirilebilir ve geri kalan sistem 2-4K süper iletken sıcaklığına kadar soğutulur. Süper iletkenin kullanımı uzun puls ve sürekli dalga lineer hızlandırıcıları için ekonomiktir. Parçacıklar Faraday kanununa göre zamanla değişen magnetik alanla indüklenen elektrik alanlar tarafından hızlandırılır. Bir lineer indüksiyon hızlandırıcısında, manyetik alanlar eş zamanlı olarak puls şeklindedir. Lineer indüksiyon hızlandırıcıları, kısa pulslu (10-50 ns), yüksek şiddetli (1000A) ve 10-50 MeV enerjili demetler üretmek için kullanışlıdır.

#### **3.4.2.1.b) Elektron Lineer Hızlandırıcısı**

Bu çeşit lineer hızlandırıcıda dalga hızı, ışık hızından daha az olarak sabittir. Verimli bir iletken düzenlemesi, ihtiyaç duyulan boyuna elektromanyetik hızlandırma dalgasını destekler. Bu dalga kılavuzu silindirik bir borudur. Periyodik olarak çeyrek ve yarım dalga boyları arasında yer alan diyaframlarla yüklenmiştir. Dalga hızı borunun çapı ile kontrol edilir ve dalga boyuna yaklaşık olarak eşittir. Gücün aktığı hız, dalga kılavuzu diyaframındaki deliğin boyutları ile kontrol edilir.

Böyle bir lineer hızlandırıcının çalışma dalga uzunluğu verimli bir hızlandırma için ve verimli bir hızlandırıcı dalga ile taşınan mikrodalga gücünün üretimi için aynı zamanda bir ihtiyaç olarak ortaya çıkar. Çalışılan dalga uzunluğu 3-30 cm' dir ve bugün en çok 10 cm. kullanılır. 10 cm. çalışma dalga boyunda 0,02mm. tolerans verilmelidir. Daha kısa dalga boylarında toleranslar daha küçüktür. Doğru dalga hızının devam ettirilmesi dalga kılavuzu sıcaklığının  $1^0$  kesrine regülasyonunu gerektirir.

Ana osilatör tarafından uygun senkronizasyonla çok sayıda birim ihtiyaç duyulduğu kadar dizilebilir. Bakır (Cu) hızlandırıcı, dalga kılavuzu bunun metresi başına 3-5,4 MW'lık bir güç için, uzunluğun metresi başına 15-20 MV' luk etkin hızlandırıcı olarak devam ettirilebilirler. Böylece Stanford Lineer hızlandırıcısının 3000 m çıkış enerjisi, 50 MW' da puls yapan güç yükseltici yaklaşık 50 GeV civarında olacaktır. Magnetron tüplerin birkaç milyon elektronvolt çıkış enerjili linaklar için güç kaynakları olarak kullanıldılar. Klystron amplifikatörleri mikrodalga frekanslarda geçerli seçimdir. Bugün Klystronlar 50 MW pik gücünde ve birkaç mikrosaniye puls uzunluklu olarak yayılabilmektedir. 1GW'a kadar kapasiteli tüpler, 1 mikrosaniyenin kesrine kadar düşünülmektedir.

Proton veya ağır iyon lineer hızlandırıcısı gibi, normal bakır iletken yerine süperiletken yerleştirmek mümkündür. [ niobium veya kurşun, sıvı helyum sıcaklığı ( $2-4,5 K^0$ ) çalışır] mikrodalga

gücünün miktarı hızlandırıcı alanı korumak için ihtiyaç duyulmaktadır,  $10^5$  - $10^6$  çarpanı kadar azaltılmıştır.

### 3.4.2.2 Dairesel Hızlandırıcılar

Lineer hızlandırıcılara benzer şekilde, dairesele hızlandırıcılar da zamanla değişen alanlar parçacıkları hızlandırmak için kullanılır. Ayrıca burada parçacıkları kapalı bir yol etrafında bükerek tekrar hızlanan yapıya getirmek için manyetik alanlar olmalıdır. Hızlandırıcı yapılar ve manyetik alanlar değişik hızlandırıcılarda çok farklı olabilir.

#### 3.4.2.2 a) Siklotron

En eski dairesele hızlandırıcı Lawrance tarafından bulunan ve ilk olarak 1932 yılında Lawrance ve Livingston tarafından kullanılan siklotron idi. Siklotronda, parçacıklar siklotronun merkezine enjekte edilir ve dışa doğru spiral şeklinde hızlandırılır. Zamandan bağımsız düzgün manyetik alan bükülme ile bu spirallerin oluşmasını sağlar. Siklotrondaki geçit tüpler 'dees' denilen (içi boş) oyuklar şeklindedir. Parçacıklar içi boş oyuklar arasındaki yarıktan geçerken hız kazanır.

#### 3.4.2.2 b) Mikrottron

Rölativistik etkiler siklotronlar için bir limit koyar. Elektronlar için düşük enerjilerde en uygun olan mikrottrondur. Basit bir mikrottronda elektron yörüngeleri hızlandırma kavitesine teğet olan bir dizi dairedir. Bu dairelerden her birinin dönme periyodu hızlandırma gerilimi toplam periyot sayısından farklıdır ve elektron paketçikleri hızlandırma gerilimi ile aynı fazdadır. Mikrottronlar koşu yolu biçiminde yapılır ve elektronları 100 MeV'den daha büyük enerjilere kadar hızlandırmak için kullanılır.

#### 3.4.2.2 c) Sinkrotron

1 GeV' den büyük enerjiler farklı şekillenmiş sinkrotron gerektirir. Önceki tartışılan tüm dairesele hızlandırıcılarda manyetik alanlar zamanla değişmez idi. Sinkrotronda parçacığın enerjisi hızlandırma gerilimin radyo frekansına bağlı olarak arttıkça, manyetik alanda artar. Parçacık yörüngesinin yarıçapı sabittir. Sinkrotron manyetik alanlarının sabit alan şekillenişlerinde olduğu gibi, tam daire değil de, daha çok tamamen küçük deliklere kadar yayılması gerekir. Bundan dolayı sinkrotron GeV mertebesindeki enerjiler için daha ekonomik bir tasarımdır. Çevre uzunluğu 4 mil, yani 6 km. olan en büyük sinkrotron protonları bir TeV' e yakın enerjilere kadar hızlandırılabilir. Yüksek enerjilerde elektron sinkrotronları lineer hızlandırıcılara göre hiç ekonomik değildir.

#### 3.4.2.2 d) Depolama Halkası

Depolama halkaları genel görünüş açısından sinkrotronlarla aynıdır. Eğici manyetik alanlar zamana göre sabittir ve parçacık demetleri devamlı döner. Bazı projelerde iki depolama halkası birbirine sarılmış şekilde olur, parçacık demetleri zıt yönlerde döner ve kesişme noktasında çarpışır. Başka projelerde, parçacık ve anti-parçacık demetleri (elektronlar ve pozitronlar veya protonlar ve anti-protonlar) aynı yolda ve aynı manyetik alanda zıt yönlerde dönerler. Burada, demetleri

çarpışmadan sonra işaretlenen çarpışma noktasında tutan küçük yardımcı alanlar da vardır. Elektron sinkrotronlarına benzer şekilde elektron depolama halkalarında da sinkrotron ışınlamı ulaşabilecek enerjiye bir limit koyar. Günümüz teknolojiyle süper iletken mikro dalga boşlukları kullanılarak depolama halkalarında birkaç 100 GeV enerji elde edilebilir.

#### 3.4.2.2 e) Betatron

Lineer hızlandırıcılar gibi, parçacıkları dairesel indüksiyonla da hızlandırmak mümkündür. Dairesel indüksiyon hızlandırıcılarına Betatron denir. Bunlar elektron hızlandırmak için kullanılır, çoğu betatron tıbbi ve endüstriyel amaçlarla 20- 30 MeV enerjili elektronları elde etmek için kullanılır. En büyük betatron 300 MeV enerjili elektronlar üretebilir.

### 3.5 Hızlandırıcıların Kullanım Alanları

- **Yüksek Enerji Fiziği**
  - Sabit hedef deneyleri
  - Depolama halkalarında çarpışan demetler
  - Lineer çarpıştırıcılar
- **Nükleer Fizik**
  - Elektron/proton hızlandırıcıları
  - İyon hızlandırıcıları/ çarpıştırıcılar
  - Sürekli demet yapıları
  - Sabit hedef deneyleri
- **Güç Üretimi**
  - Durgun füzyon
  - Seyrek yakıt çeşitleri
- **Endüstri**
  - X-ışınları ile radyografi
  - İyon aşılama
  - İzotop üretimi/ ayrışımı
  - Malzeme testleri
  - Gıda sterilizasyonu
  - X-ışınları litografisi (taşbasması)
- **Tıp**
  - Radyoterapi
  - Sağlık fiziği
  - Anjiyografi
  - Mikrocerrahi

### 3.6 Hızlandırıcıların Tıp Alanında Kullanımı

Hızlandırıcılar tıbbın önemli iki kolu olan teşhis ve tedavinin her ikisinde de kullanılmaktadır. Kullanımları X-ışınları makinelerine oldukça benzemektedir. Gerçekten bir X-ışını makinesi parçacık hızlandırıcısıdır. İçinde elektronlar hızlandırılmakta ve X-ışını üretimi için bir hedefe çarpıtılmaktadır. Bu X-ışınları vücuttaki dokuları, kemikleri ve organları test etmek için teşhiste bir yardımcı olarak kullanılırlar.

X-ışınları aynı zamanda ışıma yoluyla kanserli tümörlerin öldürülmesiyle yapılan tedavide kullanılırlar. Burada yüksek enerjili elektronlar daha fazla iç içe giren X-ışınları üretmek için kullanılırlar. En yüksek enerjiler yaklaşık olarak 0.5-10 MeV' dir. Ek olarak ağır parçacık hızlandırıcıların kanser tedavisinde kullanılmak üzere proton, nötron veya ağır iyonlar üretiminde kullanılırlar. Bir çok durumda bu ağır parçacıklar elektronlardan veya X-ışınlarından daha iyi sınırlanır. Tedavi sırasında enerjileri 10 MeV' den birkaç GeV' e kadar değişen ağır parçacıklar kullanılır [5].

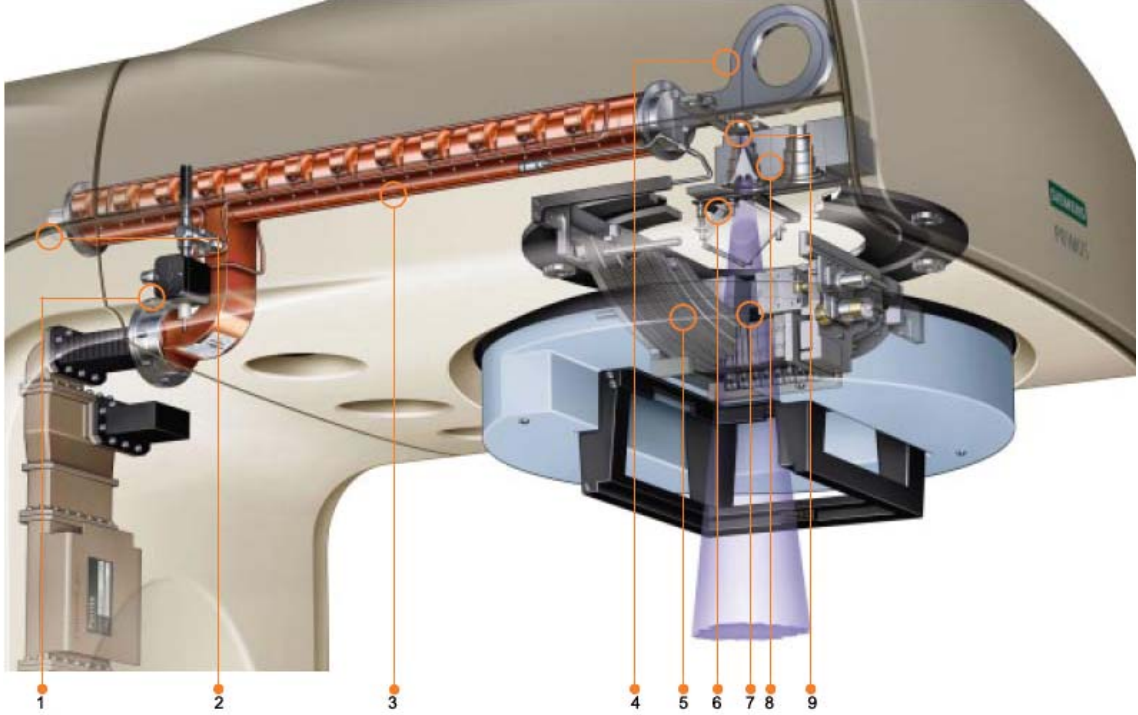


**Şekil 3.2.** Radyasyon Onkolojisi kliniklerinde kullanılan LINAK cihazı [7].

Parçacık hızlandırıcıları tıpta aynı zamanda teşhiste yardımcı olmak üzere vücut sistemine alınmış kimyasalların hareketlerini izlemek için kullanılan radyoaktif izotopların üretiminde de kullanılır.

### 3.6.1. Tıbbi amaçlarla kullanılan lineer hızlandırıcıların temel parçaları

Şekil 3.3 de lineer hızlandırıcıyı oluşturan temel parçalar görülmektedir. Şekilde numaralandırılmış kısımlar,



**Şekil 3.3** Linak temel parçaları [7].

- 1. Vakum İyon Pompası** :  $10^{-9}$  mbar yüksek vakum sağlayarak elektronların diğer partiküllerle etkileşerek enerji (hız) kaybetmelerini önleyen vakum sistemi.
- 2. Elektron Tabancası** : Hızlandırıcıda hızlandırılmak üzere elektron üreten flaman.
- 3. Dalga klavuzu** : Elektromanyetik dalgalar yardımıyla elektronun hızlandırılan vakumu tüp.
- 4. 270° demet bükücü** : Hızlandırılmış elektronların enerji ve odağını bozmadan hedef'e doğru bükerek demet bükücü mknatıs.
- 5. Multilif kolimatör** : x ekseninde radyasyon alanını belirleyen, istenilen şekli alabilen çok yapraklı kolimatör.
- 6. İyon Odası** : Foton ve elektron enerjileri için bulunan iki ayrı odası radyasyon alanı içindeki her düzlemsel her noktanın aynı dozu aldığından emin olunmasını sağlar
- 7. Y Jawları** : Işın diverjansına uyacak, penumbra (yarı-gölge) nin y doğrultusundaki boyutunu belirleyen tungsten blok.
- 8. Foton Kolimatörü** : Hedefe çarpan elektronların ürettiği fotonların ilk kolime edildiği kısım.
- 9. Hedef** : Yüksek doz hızına sahip foton üretmek için bakır-tungsten alaşımlı ve su ile soğutulan hedef parça.

## 4. MONTE CARLO YÖNTEMİ VE PARÇACIK SİMÜLASYONU

### 4.1. Giriş

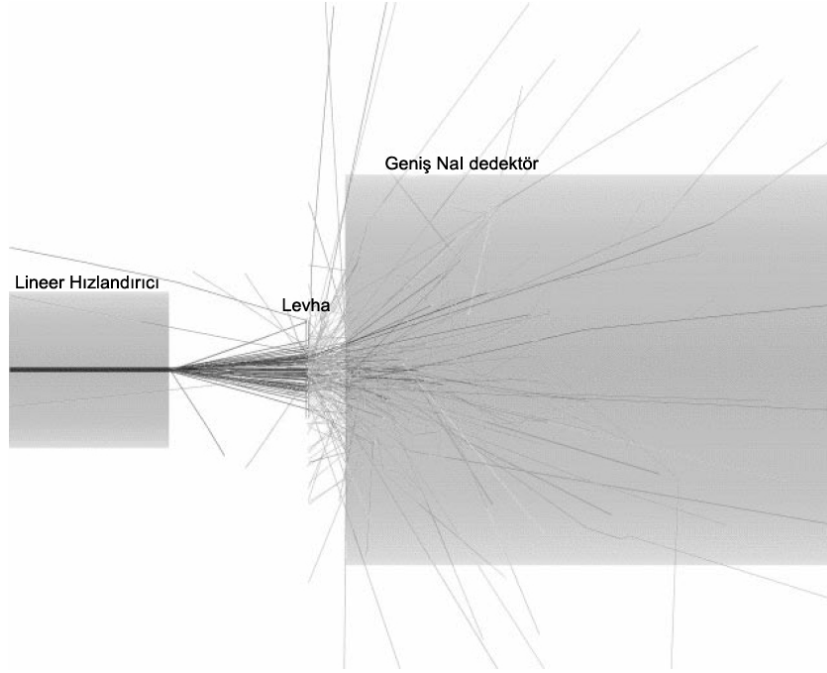
Monte Carlo parçacık transportu, çeşitli fiziksel işlemler için etkileşim olasılıklarını taklit ederek ve rasgele sayılar kullanarak problemi çözmede kullanılır. Monte Carlo tekniği son 50 yıldır medikal fiziğin önemli bir parçası olmuştur. Bu teknik çok sayıda farklı uygulamaya sahip olsa da , özellikle Monte Carlo parçacık simülasyonu kullanılarak elektron ve foton transferinden oluşan radyasyon iletimiyle ilgilenilmiştir.[8]

Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak Monte Carlo yöntemi gittikçe yaygın olarak kullanılır hale gelmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden bir tanesi, bu yöntem kullanılarak hesaplama maliyetlerinin çarpıcı bir şekilde düşmesidir. Bu nedenle çok maksatlı ve uzmanlaşmış kod sistemleri (EGS, GEANT, BEAM gibi) artmaktadır. Bu artış radyoterapi fiziğini sürekli geliştirmektedir.

### 4.2. Monte Carlo Yöntemiyle Parçacık Simülasyonu

Radyasyon madde etkileşmesi oldukça karmaşık bir işlemdir. Birinci bölümde sistemin genel etkileşimlerinden bahsedilmişti. Bu tip etkileşmeler sonucunda birçok olaylar gözlenmektedir. Radyasyonla ilgili olan bu etkileşimlerin mekanizmasının bilinmesi ve sonuçlarının etkin bir şekilde hesaplanması uygulama alanlarında büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde bu etkileşimler ve sonuçları bilinmektedir. Ancak sistemlerin karmaşık yapıları ve hesaplamalardaki matematiksel işlemler olayı çok daha karmaşık bir hale getirmekte ve bu da sonuçların sağlıklı bir şekilde elde edilmesine engel olmaktadır.



**Şekil 4.1.** MacPharson ve arkadaşları tarafından yapılmış, durdurma kuvveti ölçüm deneyi [9].

Monte Carlo (MC) tekniği her türlü enerji menzili için uygulanabilinen, bir yöntemdir. Örnek olarak şekil 4.1’de deneysel bir düzenek gösterilmiştir. Lineer hızlandırıcıdan çıkan monoenerjik olmaya yakın parçacıklar, ileri doğrultuda ilk saçılmaya lineer hızlandırıcı çıkış penceresinde uğrarlar (ihmal edilebilecek kadar düşük saçılmalar). İnce metal yaprakta saçılan elektronlar geniş Nal dedektörde toplanırlar. Nal dedektör elektronları tamamen soğurur (geri saçılan az sayıda elektron haricinde) ve hızı düşen elektronlar Bremstrahlung ışıması yaparlar.

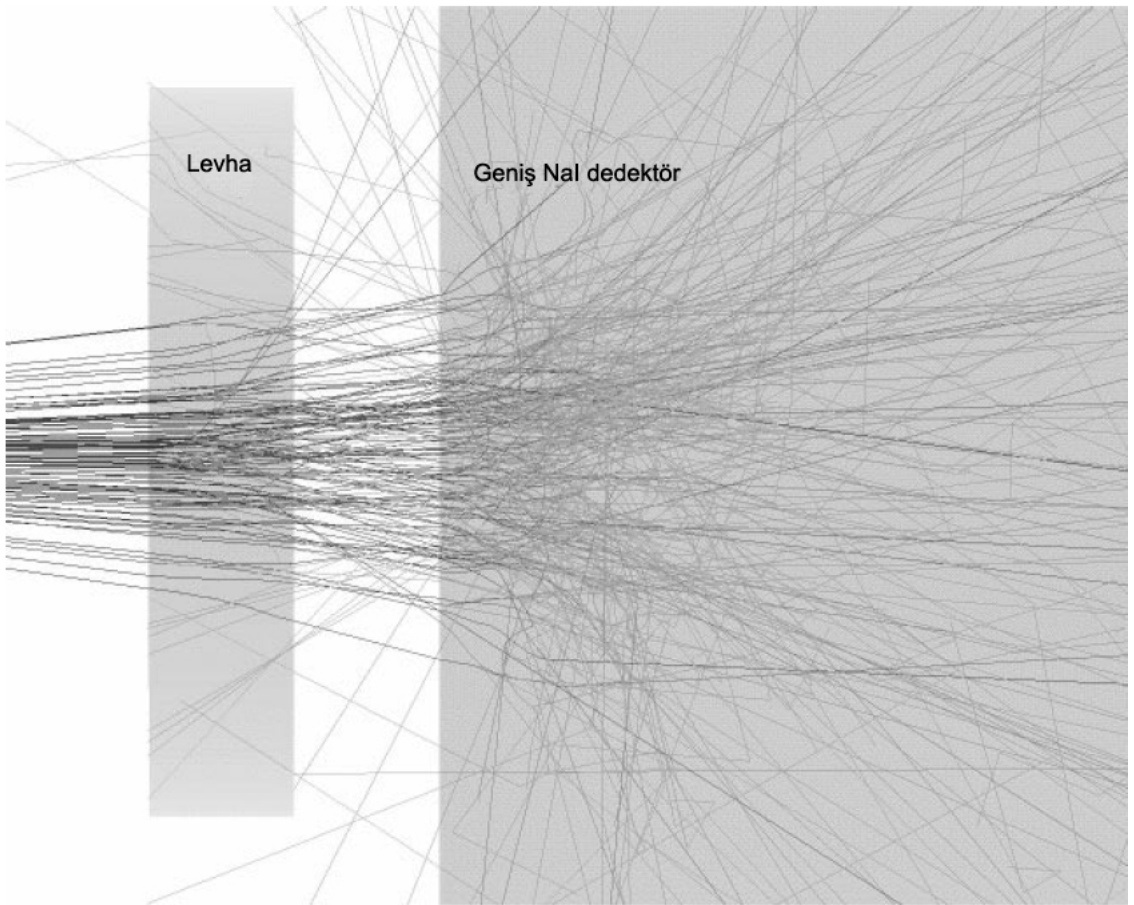
Şekil 4.1’de eletron ve fotonların izlediği yollar düz çizgi segmentleri olarak görülmektedir. Şekil 4.2’de 20MeV enerjili elektronların ince plastik levhadan geçerken, elektron ve fotonların izlediği yollara yakından bakılmaktadır. Monte-Carlo yöntemi ile metal yaprakta biriken enerji büyük bir hassasiyetle hesaplanabilir.

Radyasyonun keşfedilmesinden bu yana etkileşim sisteminin incelenmesi amacıyla birçok deneyler yapılmış ve sonuçlar alınmıştır. Bugün ise bu etkileşimler sonucunda çok daha hassas sonuçlar alınması önem kazanmıştır. Bunu sağlamak için gerçekleştirilen deneyler fiziksel sınırların engellerine takılmakta ve istenildiği kadar doğru sonuçlar elde edilememektedir. Sistemin bu engellerini aşabilmek, etkileşim mekanizmasını kontrol edebilmek ve sağlıklı sonuçlar alabilmek için bilgisayar simülasyonları kullanılmaktadır.

Radyasyonun taşınması simülasyonlarında, radyasyon kaynağının özellikleri, parçacıkların ve fotonların karakteristik yapıları, başlangıç koşulları, sistemi oluşturan maddelerin özellikleri ve etkileşim ihtimalleri gibi birçok bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla beraber her bir etkileşimin olabilecek sonuçlarının hesaplanması ve oluşacak ikincil

radyasyonların da sistemde oluşturacakları etkilerinin hesaplanması gereklidir. Bu durumlar sistem analizini oldukça güçleştirmektedir.

Parçacık taşınmasının Monte Carlo simülasyonu fiziksel gerçekliğe bağlıdır. Parçacıklar, kaynağı ifade eden dağılıma göre örneklenirler, çarpışma alanına kadar ( ortalama serbest yola bağlı olarak değişen) belirli bir mesafe kat ederler ve bir başka enerji içine ya da diferansiyel kesite ilişkin bir yöne dağılırlar. Benzer şekilde yeni üretilen parçacıkların da bu denli iyi taşınması gerekmektedir. Bu uygulama tüm parçacıklar soğuruluncaya ya da geometriden ayrılincaya kadar devam eder. İlgilenilen miktar, verilen MC parçacıklarının sayısının ortalamasıyla hesaplanabilir.



**Şekil 4.2.** MacPherson ve arkadaşları tarafından yapılmış, durdurma kuvveti ölçüm deneyinin yakından görünümü [9].

#### 4.3. EGS KOD SİSTEMİ

EGS kod sistemi (Elektron Gama Sağıanağı), fotonların ve elektronların taşınması için Monte Carlo simülasyonunu kullanan bir bilgisayar programıdır. Fotonların ve elektronların

taşıması için kullanılan birçok genel amaçlı kod sisteminden birisidir (EGS, PENELOPE, ITS ve MCNP). EGS kod sistemi, 1970'li yıllarda Stanford Lineer Accelerator Center (SLAC) da Richard Ford ve Ralph Nelson tarafından yüksek enerjiler için bir fizik aracı olarak geliştirilmeye başlanmıştır [10]. İlerleyen yıllarda yapılan çalışmalarla EGS kod sistemi 10 KeV ile 50 MeV arasındaki düşük enerjilerde çalışabilen ve tıbbi uygulamalarda da kullanılan bir programa dönüştürülmüştür.

EGS kod sisteminde, simülasyon için yapılandırılmış bir takım alt programlar kullanıcının kendi geometrisini yazmasına ve temel temel EGS kodlarına dokunmadan rutinleri değiştirmesine olanak sağlayacak şekildedir.

Program temelde iki kısımdan meydana gelir. EGS standart kod sistemi ve kullanıcı tarafından yazılan kullanıcı kodu bölümüdür. EGS standart kod kısmı ancak kullanıcının yazdığı kod kısmı ile birlikte çalışır.

#### 4.3.1. EGS'nin Gelişimi ve EGS1

Monte Carlo metodu başlangıçta Ulam ve Von Neumann tarafından ortaya atıldı. Tekniği ilk olarak Goldberger, nükleer bozulmalarda üretilen yüksek enerjili parçacıklar için kullandı.

Çeşitli sonuçlara ulaşmak için tamamen farklı iki kod 1960'ların başında elektromanyetik çerçeveli bir ortamı simüle etmek için yazıldı. Bunlardan ilki Zerby ve Moran tarafından Oak Ridge National Laboratory'de yazıldı ve SLAC inşasını kolaylaştırmak ve yüksek enerjili elektron demeti sağanağını sağlayacak çeşitli araç ve yapılarının fizik ve mühendislik problemlerini önceden tahmin etmek için kullanılmıştır.

İkinci kod Nagel tarafından geliştirildi ve birkaç eklenti yapılarak yayınlandı [11]. Orijinal Nagel kodu ile birlikte Ford ve Nelson, SHOWER1 diye adlandırılan silindirik geometri kurşun içinde 1000 MeV den küçük yüksek enerjili elektronlar için Fortran kodunu yazdılar. Altı önemli elektron foton etkileşimine (bremsstrahlung, elektron-elektron saçılması, iyonizasyon kayıpları, çift oluşumu, compton saçılması ve fotoelektrik olay) Coulomb saçılmasını da eklediler.

Nicoli orijinal Nagel kodlarına eklentiler yaparak SHOWER2 olarak bilinen kodları geliştirdi. Ağustos 1966'da SHOWER2 kodu Nagel tarafından SLAC'a getirildi ve Nicoli'nin yaptığı değişmelerle MIT ' te çalıştırıldı.

Nelson'nun yönetiminde programcı J.Ryder, SHOWER3 kodlarını modüler bir şekilde üretti ve SHOWER3 ün ihtiyaç duyduğu ayrılma oranları ve tesir kesidi için uygun katsayılardan oluşan PREPRO şeklinde adlandırılan ön işlem kodlarını yazdı. 1972 de B.Talwar, Nelson'un liderliğinde SHOWER3/PREPRO versiyonunu bazı elementler için başarıyla test etti.

Şubat 1972 de gerekli fizik formülasyonları ve kod eklentileriyle kodlar yeniden yazıldı. Stanford Üniversitesi Higt Energy Physics Laboratory (HELP) in ürettiği bu versiyon SHOWER4

olarak sunuldu. Buna uygun olan ön işlem kodları da yenilenerek SHINP (SHower INPut) olarak adlandırıldı. Bu kodlarla dedektör çözünürlükleri ve gama dedektörleriyle ilgili birçok çalışmalar yapıldı.

Ford, minimum girişe ihtiyaç duyacak kullanıcı kodlarıyla direkt olarak çalışabilen shower kodları için ön işlem kodları yapmayı amaçlıyordu. SHOWER3/PREPRO ve SHOWER4/SNINP içinde yeni bir sağanak başlatmak istendiği zaman kullanıcı ön işlemci kodları için literatürden foton tesir kesiti değerlerine bakması gerekiyordu. Ford sağanak kodları için ihtiyaç duyulan verileri otomatik olarak üreten ön işlem kodlarını yeniden yazdı. Nelson ise ihtiyaç duyulan tesir kesiti değerlerini 1 den 100'e kadar olan elementler için Storm ve Israel'den sağladı.

Esneklik ve kolaylık için kullanılan FORTRANIV ün NAMELIST okuma kolaylığı, sağanak kodları ve ön işlem kodları için gerekli olan verileri okumakta kolaylık sağlamaktadır. Oluşturulan bu yeni kodlar tekrar adlandırılarak Electron Gama Shower (EGS) oluşturuldu. Bu kodlara eşlik eden ön işlem kodları ise PEGS (Preprocessor for EGS) olarak adlandırıldı. Fortran IV dilinde yazılan bu kodlar versiyon 1 olarak sunuldu (EGS1 ve PEGS1) [12].

#### 4.3.2. EGS2

Oluşan gelişmeler sonucunda EGS1 in birçok parçacık için keyfi karmaşık geometrilerde sonuç ve çıktıya sahip olamayacağı anlaşıldı. Bu nedenle Ford, çoklu geometrik yapıların gerekli olduğunu düşündü. EGS1'in ana kontrol programıyla birlikte EGS1'deki tüm sonuç, çıktıları ve kullanıcı ara yüzünün değiştirilmesi gerekiyordu. Böylece EGS1 kodları, geometrileri ve oluşan sonuçları sırasıyla tanımlamak için iki destek programı (HATCH ve SHOWER) ve bunların ihtiyaç duyduğu kullanıcı tarafından yazılan iki sabrutine (HOWFAR ve AUSGAB) dönüştü.

Fortran dilinde oluşturulan MORTRAN2 dilinde EGS1 ve PEGS1 kodları esneklik ve taşınabilirlik eklenerek yeniden yazıldı. MORTRAN2 dilinde yazılmış olan TESTSR kodları ile ayrılmış ve yeniden yapılandırılmış ama kodlar test edildi. Gözden geçirmeler 1975 yılında tamamlanarak EGS, PEGS ve TESTSR bileşenleri EGS kod sistemi versiyon 2 olarak isimlendirildi. Versiyon 2, EGS2, PEGS2 ve TESTSR2 olarak ta adlandırılır.

#### 4.3.3. EGS3

EGS2'nin estetik olarak hoşta gitmeyen bir yönü de; sadece 16 bit değer kümesinden alınan basamak uzunluğu kullanılarak elektronları çeşitli uzaklıklardan etkileşim noktaları veya sınırlarına taşımak için elektron taşıma rutini (ELECTR) kullanılan gerekli olan karmaşık kontrol mantığıdır. Bu işlem genel çoklu bölge bir çevrede Nagel'in ayrık dar açılı çoklu saçılma

şemasını uygulamak için gerekli olmuştur. Ek olarak EGS2 tarafından hesaplanan geriye saçılan foton akımının yayınlanmamış HEPL verileriyle yapılan karşılaştırmalar olduğu kadar Bremsstrahlung açısız dağılım ölçümlerinin ETRAN kullanılarak EGS2 ile Berger ve Seltzer sonuçlarının karşılaştırılması [13]. EGS2'nin geri doğru yönelimlerde çok küçük olan ve bir ya da faktöre bağlı olan değerleri tahmin edebileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenlerle ve uygulamanın geniş bir evrenselliğe ulaşabilmesi için (ör: ince bir levhaya çarpan monokromatik elektron akımının çıkışta sürekli açısız dağılımı olması gibi); Ford, 1976 yazında rasgele basamak uzunlukları için sürekli çoklu-saçılma dağılımını doğru olarak simüle edilebilecek çoklu saçılma şemasını uygulamayı denemiştir. Bazı düşünceler sonrasında Messek ve Crawford tarafından kullanılan eklentiler planlandı. Bu ekin kodlarının çoğu Science Applications Inc.'de Ford tarafından yazılmış ve 1977 Ağustos'unda SLAC'a getirilmiş ve burada derlenmiş ve Nelson ve Ford tarafından test edilmiştir. Bu sistemin kullanılması CMS (Sürekli Çoklu Saçılma) adı verilen ve kendi başına çalışan kodların kullanılarak yapıldığı bir kereliğine yapılan ölçümlerin (once-only calculation) kullanılmasını gerektirmiştir. Bu esnada SLAC'a getirilen PEGS'nin 2. versiyondaki fiziğin aynısını içerdiği söylemek gerekir ancak makinenin daha bağımsız olması için kısmen yeniden yazıldığını belirtmek gerekir. TESTSR koduna eklenen diğer bir seçenek, yeni EGS çoklu saçılma örnekleme routine'i, MSCAT'ın denenmesine izin vermek için eklenmiştir.

EGS, PEGS ve TESTSR'nin bu versiyonları EGS Kod Sisteminin 3.versiyonu (yani EGS3, PEGS3, TESTSR3) olarak adlandırılan bölümünü içerir. Deneylere ve diğer Monte Carlo sonuçlarına göre yapılan ardışık EGS3 karşılaştırmaları yazarlar tarafından yapılmış (Jenkins, Nelson ve diğerleri) ve ortak kanatlar kodun temel güvenilirliğini ortaya koymuştur .[14]

EGS3 Kod Sistemi 1978 yılında ortaya çıkarılmış olup Nagel'in orijinal kodundan kendisini ayırtan pek çok biçimleri içermektedir. SHOWER1 en değerli olanı olup:

1. Shower'lar her element, bileşik veya karışım için ( $Z:1$ 'den 100'e kadar) simüle edilebilir.
2. Parçacıkların taşınması için enerji değişimi, fotonlar için 100 GeV'den 1 keV'e ve yüklü parçacıklar için 1.5 MeV'e (toplam enerji) parçacık taşınması hesaplamalarının başlayabilmesi için yeterli olur.
3. Foton ve yüklü parçacıklar kodun daha hızlı bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde düzenli basamaklar yerine rasgele taşınır.

4. Pozitronların uçuşta veya istirahatta birbirlerini yok etmesine izin verilmiş ve annihilasyon kuantası sıfırlanmıştır.
5. Elektron ve pozitronlar asimptotikden ziyade sırasıyla düz, Moller ve Bhabha çapraz kesitlerine tabi tutulmuştur.
6. Örneklem şemaları daha etkili olmuştur.
7. EGS3 kullanıcı arayüzüyle daha fazla esneklik sağlamış ve kodun iç detayları hakkında aşırı bilgili olmaya gerek kalmayacak ve kullanıcı tarafından kodun içine hata eklemesine gerek kalmayacak şekilde bir alt döngü paketi haline gelmiştir.
8. Kullanıcı tarafından kullanılan geometri kullanıcı tarafından yazılan bir alt program olan HOWFAR sayesinde özelleştirilebilir. Her ne kadar geometri imkanları yörüngelerin bilinen yüzeylerle (ör: düzlem, silindir, koni, küre ve kutu) kesişmelerini belirleyecek kadar gelişmiş ve de mevcuttur.

#### 4.3.4. EGS4

EGS4 olarak adlandırılan yeni geliştirilmiş sürüm eski EGS3 versiyonuna göre çeşitli ilerleme ve değişikliklerle sunulmuştur.

##### 4.3.4.1. EGS4 Yeteneklerinin ve Biçimlerinin Özeti

Aşağıdakiler bağlı olduğu fizik dalı ve gerçek anlamda neyin simüle edilebildiğini belirten açıklamaların yer aldığı EGS4 Kod Sistemi'nin ana şekillerinin özetidir:

1. Elektron ve fotonların (+/-) radyasyon transportu her eleman, bileşik veya karışımla simüle edilebilir. Bu PEGS4 veri hazırlama paketi olup 1'den 100'e kadar elementler için çapraz kesit tabloları kullanarak EGS4 tarafından kullanılan verileri yaratır.
2. Hem foton ve de yüklü parçacıklar belirli aşamalardan ziyade rasgele taşınmaktadır.
3. Yüklü parçacık kinetik enerjileri dinamik sınırı birkaç on KeV 'den birkaç bin GeV 'e kadar değişmektedir. Akla yatkın üst sınır çok yüksek olabilir fakat fiziğin geçerliliği yine de sorgulanmaktadır.
4. Foton enerjilerinin dinamik sınırı 1 KeV ile birkaç GeV arasında değişmektedir.
5. EGS4 Kod Sistemi içine alınan fizik işlemleri şunlardır:
  - a. Bremsstrahlung üretimi (düşük enerjilerde Elwer korreksiyonunu dışarıda tutarak)

- b. Uçuşta ve dinlenmede pozitron annihilasyonu
  - c. Molière çoklu dağılımı.(Yani çekirdeklerden Coulomb saçılması). Kapalı açılı sürekli dağılımdan (ayrıktan ziyade) örneklenmiştir. Bu rasgele seçilmiş çok teoriyi geçersiz kılmayacak şekilde aşırı geniş ve de çok küçük olmayacak şekilde gelişigüzel basamak boyutlarıyla seçilerek yapılır.
  - d. Möller ( $e^-e^-$ ) ve Bhabba ( $e^+e^-$ ) saçılımı. Asemptotik formüllerinin kullanılmasından ziyade daha kesin formüller.
  - e. Ayırık etkileşimler arasında yüklü parçacık izlerine uygulanan sürekli enerji kaybı
  - f. Total durdurucu güç yumuşak bremsstrahlung ve çarpışmadan kaybolan enerjilerden oluşmaktadır.
  - g. Çarpışma kaybı dansite etkisinin Sternheimer müdahalesiyle Bethe-Bloch durdurucu gücüyle belirlenmektedir.
  - h. Çift oluşumu
  - i. Compton saçılması
  - j. Koherent (Rayleigh) saçılması bir seçenek olarak eklenebilir.
  - k. Fotoelektrik etki.
  - l. Ne floresan fotonlar ne de Auger elektronları subroutine PHOTO'nun default versiyonunda oluşmamış veya taşınmamıştır.
  - m. Diğer kullanıcı tarafından yazılmış PHOTO versiyonları oluşturulabilse de bu K $\alpha$  ve L-edge fotonlarının transport ve oluşumuna izin verir
6. PEGS4 12 altprogram ve 85 fonksiyondan oluşan tek başına çalışan veri işlemcisidir. Çıktı EGS4 tarafından direkt kullanım şeklindedir.
- a. PEGS4 çapraz kesitte parçalı-lineer geniş sayıda enerji aralığı oluşturmakta ve dallanma oranı verisi vermektedir.
  - b. Genelde kullanıcı EGS4 tarafından ihtiyaç duyulan ortam dosyalarını bir kere elde ettiğinde bir kereliğine PEGS4 kullanacaktır.
  - c. PEGS4 kontrol girişi Fortran 'ın NAMELIST 'ten okuma kolaylığından yararlanmaktadır.
  - d. EGS4 için veri oluşturmak için gerekli seçeneklere ek olarak PEGS4, EGS4 tarafından kullanılan her bir fiziksel niceliği çizme opsiyonu olduğu kadar teorik spectra ile UCTESTSR Kullanıcı Kodu tarafından üretilen örneklenmiş dağılımları karşılaştırmaktadır.
7. EGS4 altprogramlarına ek olarak esnek kullanıcı ara yüzü data bloku içermektedir.
- a. Bu kodun iç ayrıntılarını bilmeyi gerektirmeyen bir kullanma rahatlığı sağlıyor.
  - b. Mortran3 dilinin makro kullanım kolaylığı kabiliyetiyle kullanıcı tarafından yapılan değişikliklerin kodlara hata sokma olasılığını azaltmaktadır.

- c. EGS4'ün 13 altprogramı Akış çizelgesi mevcuttur.
  - d. EGS4 materyal kesit alanı ve PEGS4 tarafından yaratılan ve yerleştirilen dallanma oranı verisini kullanmaktadır.
8. Verilmiş herhangi bir problemin geometrisi kullanıcı tarafından yazılmış HOWFAR adlı altprogram tarafından özgülleştirilebilir ve sonuçta dışarıdan yardımcı altprogram kullanılabilir.
- a. Düzlem, silindir, koni, küre vs.. için yedek geometri routine'leri kendi kodlarını yazmak istemeyenler için EGS4 Kod Sistemi ile sağlanır.
  - b. Bu döngülerin makro versiyonları makro tanımlama setinde vardır (EGS4MAC dosyası). Eğer kullanılırsa sıklıkla daha hızlı simülasyonu çalıştırır.
  - c. MORSE-CG Combinatorial Geometri Paketi HOWFAR'ın içinde yer alabilir Buna karşın tecrübeler göre daha yavaş simülasyon oluşturmaktadır.
  - d. Özel olarak tasarlanmış HOWFAR altprogramıyla yazılmış manyetik alanda transport oluşmaktadır veya daha genel anlamda (ör. elektrik alanı da içererek) ELECTR altprogramında bu amaçla uygun olarak yerleştirilmiş Mortran3 makro örnekleriyle transport oluşmaktadır.
9. Kullanıcı AUSGAB olarak adlandırılan kullanıcı tarafından yazılmış alt programı kullanarak sonuçlama yapar ve bilgiyi çıktıdan alır.
- a. Yedek alt program ECNSV1 korunmak veya diğer amaçlar için enerjinin izini almak için sağlanmıştır.
  - b. Yedek alt program NTALLY kaç kere enerjinin ECNSV1 dizileri içinde sonuçları tutmak için sağlanmıştır.(Bir çeşit olay sayacı)
  - c. Yedek alt program WATCH olay be olay, basamak be basamak takip için sağlanmıştır.
10. EGS4 "örnekleme önemliliği"ni gerçekleştirmekte ve diğer varyans redüksiyon teknikleri gerçekleştirmektedir.
11. Radyasyon transportunun başlangıcı:
- a. Pi-sıfır bozulmasından (yani CALL SHOWER deyiminde IQI=2'yi kullan) iki fotonlu shower'ı başlatmak için bir seçenek vardır.
  - b. Kullanıcının menoenerjetik parçacık aracılığı veya bilinen bir dağılımdan örnekleme yoluyla (ör. Senkrotron radyasyon spektrumu) transportu başlatma seçeneği vardır.

- c. Transportun uzaysal ve/veya açısal dağılımları olan kaynaklardan başlayabilme imkanı vardır.

2001 yılında Lin SY ve arkadaşları EGS4 kullanıcı kodunu kullanarak tedavi amaçlı lineer hızlandırıcıda farklı enerjideki elektronların su içerisindeki simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. [15]

Yine EGS4 kodu kullanılarak yapılan bir çalışmada, 10MV ve 20MV foton enerjilerinde oluşan doz dağılımına etki eden elektron kontaminasyonu hesaplanmış ve farklı derinliklerde meydana gelen katkıları simüle edilmiştir. [16]

#### 4.3.5. EGSnrc

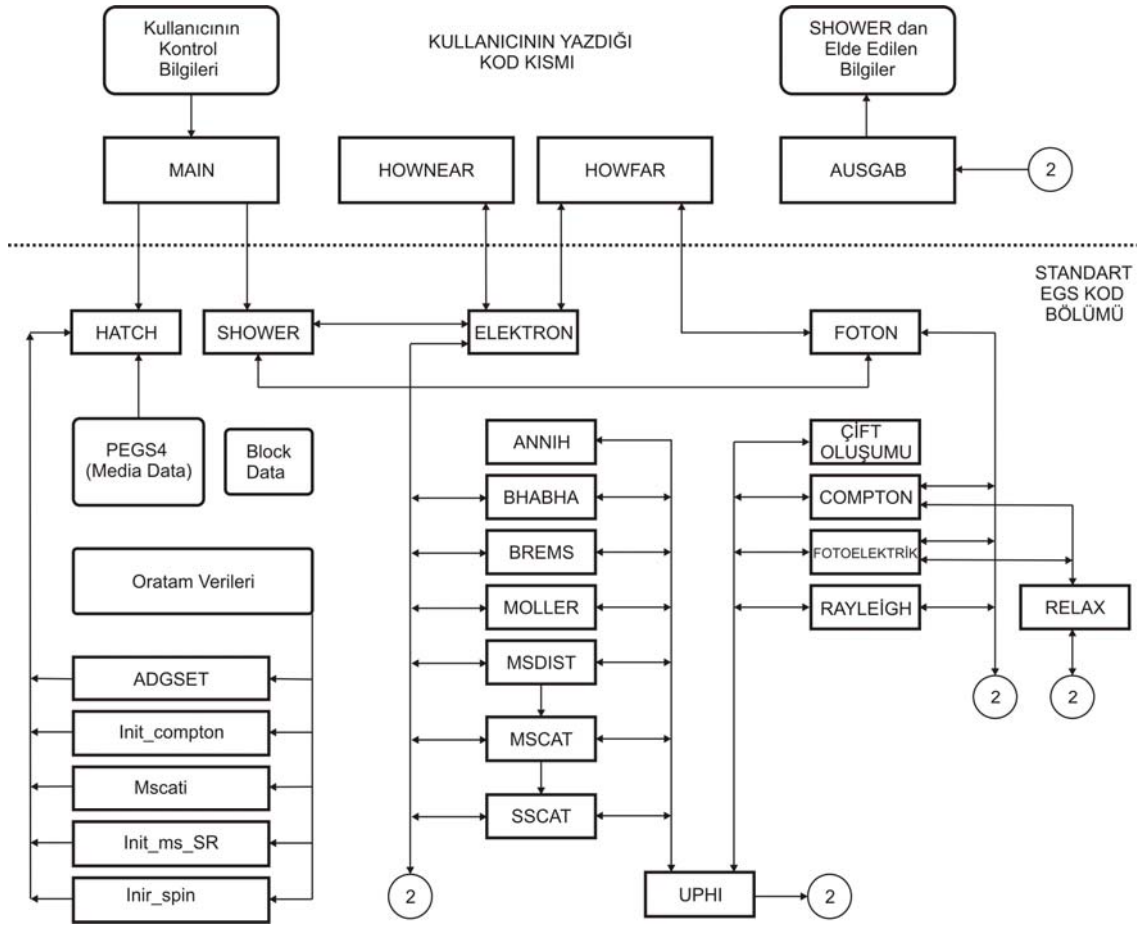
EGSnrc esnek bir kullanıcı ara yüzüne sahip standart ve alt programlar paketidir. Oluşturulan esnek kullanıcı ara yüzü sayesinde kullanıcı, standart kod kısmının ayrıntılarını tam olarak anlamaya gerek duymadan programı rahatlıkla kullanabilmektedir. Kod, Fortran dilinin Mortran 3 geliştirilmiş moduyla yazılmıştır. Elektron, foton ve pozitronların nakledilmesinde element, bileşik veya karışımların kullanılmasına izin vermektedir.

Programı oluşturan bölümlerden MAIN, sürücü rutindir. Kullanıcı kontrol bilgilerini kullanarak EGS kod bölümünü aktif hale sokar. MAIN sürücü rutini, HATCH ve SHOWER olarak adlandırılan alt programlara bağlıdır. HATCH alt programı, PEGS4 tarafından oluşturulan ortam datalarını okur. SHOWER alt programı ise parçacık-madde etkileşimini her bir parçacık için gerçekleştirmektedir. Kullanıcı ortamın geometrisini belirlemek üzere HOWFAR ve HOWNEAR kısımlarını uygun şekilde yazmaktadır. Ayrıca yine kullanıcı tarafından AUSGAB kısmı, parametrelerin hesaplanmasına olanak sağlayan bir puanlama rutindir. Burada etkileşimle ilgili ayrıntılar ayarlanabilir. AUSGAB tan elde edilen sonuçlar, EGS sistemi tarafından modellenen tüm fiziksel işlemlerin bir özetini sunar. [17]

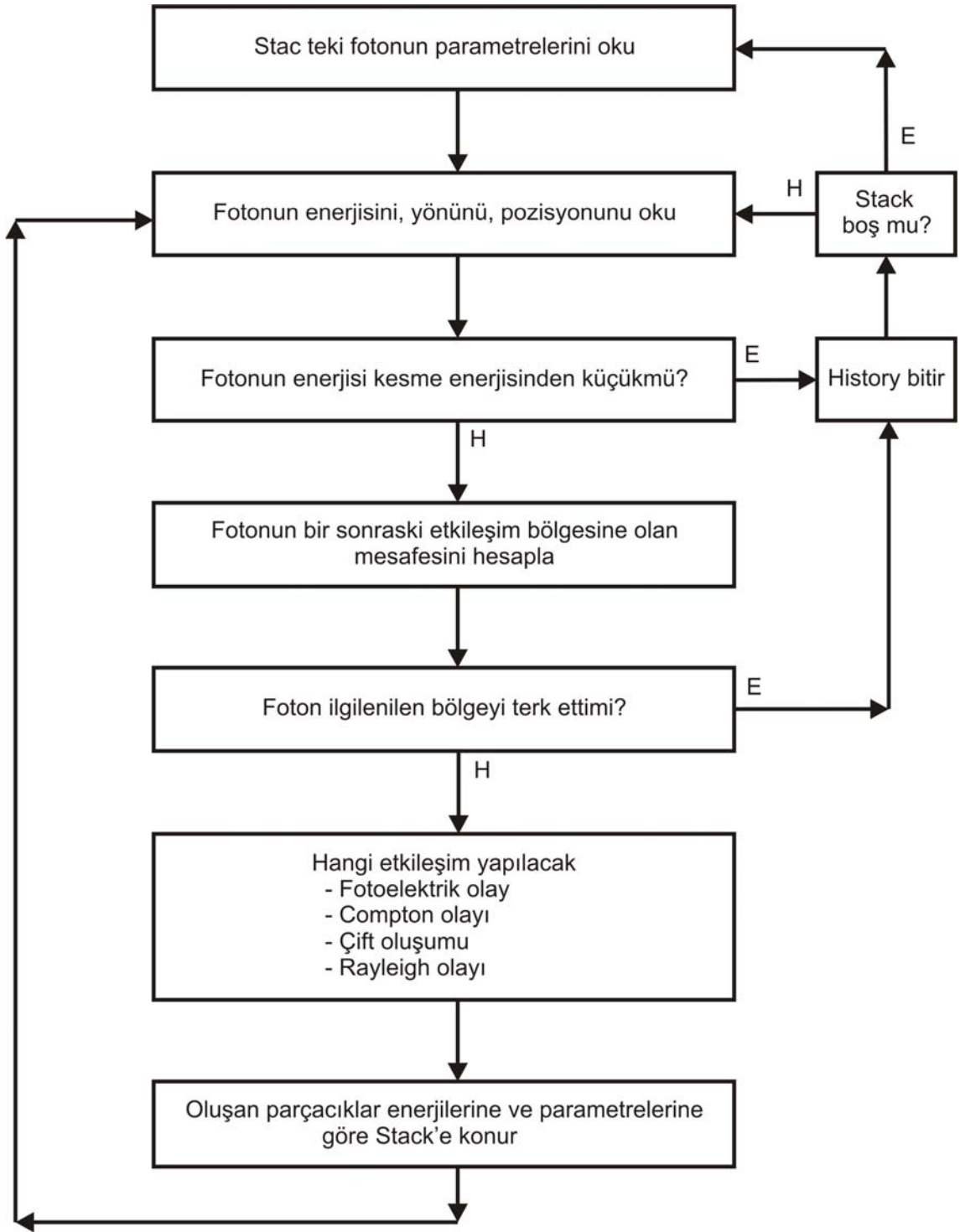
EGS kullanılan materyaller için etkileşim tesir kesidi bilgilerini üretmek için PEGS (EGS işlemcisi) kullanır. PEGS, 12 alt programdan ve 85 fonksiyondan oluşan bağımsız bir bilgi işleme kod sistemidir. 1-100 arasındaki elementler için tesir kesidi tablolarını kullanarak EGSnrc tarafından kullanılmak üzere bilgiler üretir.

HOWFAR geometri rutindir. Modellenecek olan geometri kullanıcı tarafından yazılır ve HOWFAR olarak adlandırılır. PEGS4 tarafından hazırlanan bilgilerin tümü HATCH rutini tarafından okunur ve SHOWER gelen parçacığın türünü belirleyerek ona göre çeşitli işlemler gerçekleştirir. Etkileşime girecek olan tüm parçacıklar, kesme enerjisine ulaşıncaya kadar geometriyi terk edinceye kadar takip edilir.

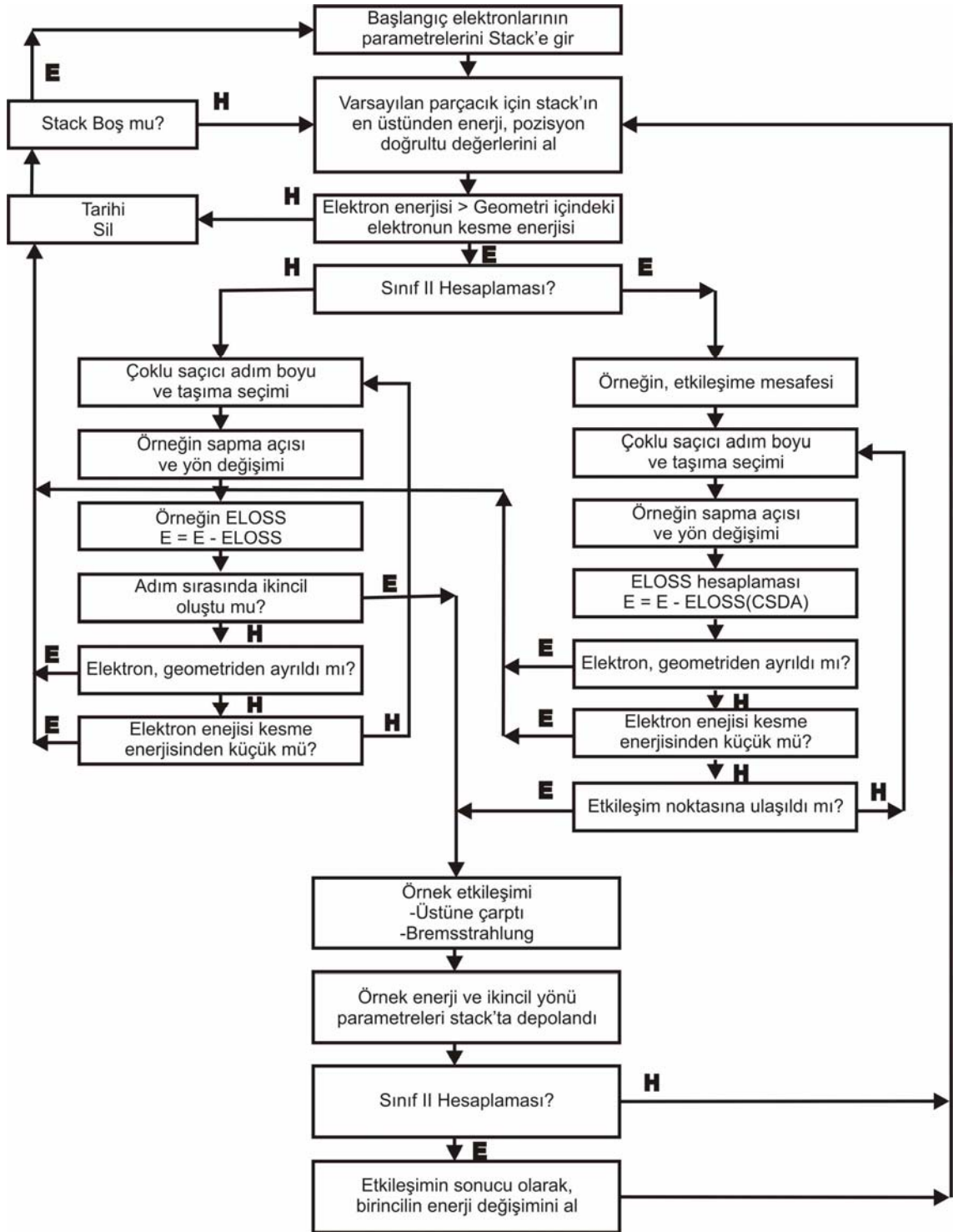
EGSnrc kod sisteminin çalışma prensibi aşağıdaki akış şemasında verilmiştir.



**Şekil 4.3** EGSnrc kod sisteminin çalışma prensibini gösteren akış diyagramı [17].



**Şekil 4.4** EGSnrc programında foton transferini gösteren akış diyagramı.[18]



Şekil 4.5 EGSnrc programında elektron transferini gösteren akış diyagramı [19].

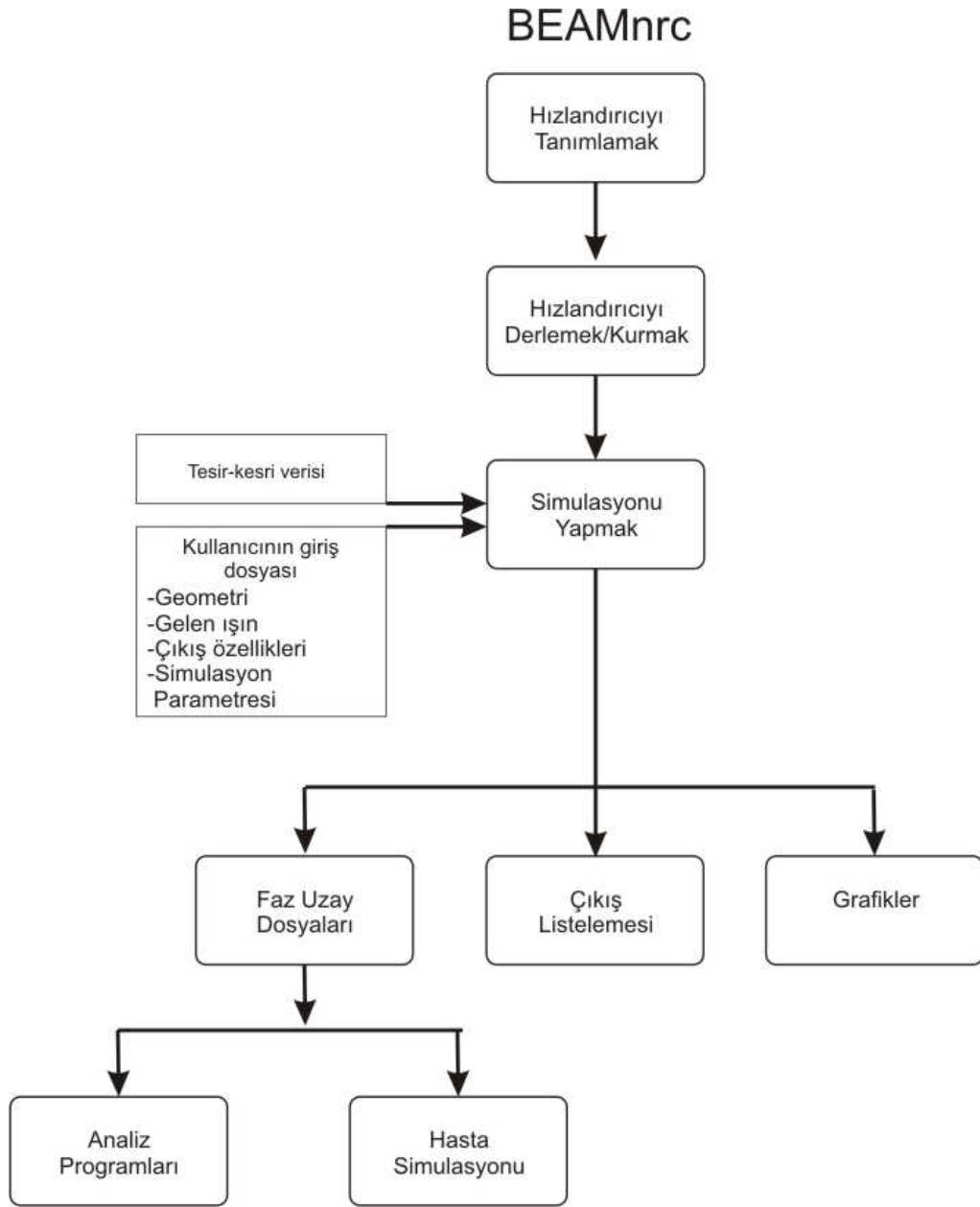
#### 4.4. BEAMnrc

BEAMnrc, EGSnrc'nin ışınlam hareketi kodunu kullanır. Önceki bölümlerde ele alınan EGSnrc'deki fizik komutlarını kullanmaktadır ve EGS4'den sonra, özellikle düşük enerjilerde, elektronların esnek saçılmaları için tesir kesrinin rölativistlik spin etkisini, Compton ve fotoelektrik olaylardan sonra atomik relaksasyonu simüle edebilme kabiliyeti ve elektron taşıma ve çoklu saçılma algoritmaları gibi EGSnrc'deki büyük geliştirmeleri barındırmaktadır. Bu gelişmeler hesaplamaların hassasiyetine büyük katkıda bulunur. EGSnrc ve BEAMnrc, tipik hızlandırıcıların verimli ve hassas simüle edilmesinde kullanılır.

##### 4.4.1. BEAMnrc'nin Çalışma Temeli

BEAMnrc ile hızlandırıcı simülasyonunda genel adımlar şekil 4'de şematik olarak gösterilmiştir. Hızlandırıcıyı tanımlama ve kurma aşamasında, kullanıcı EGS sistemine hangi kodları bir araya getirip hangi modülü çalıştıracaklarını tanımlar. Bu aşamada geniş bir hızlandırıcı seçeneği tanımlıdır (düzleyici filtrenin birinci kolimatörün önünde ya da arkasında olması gibi).

Çalıştırma aşamasında program, hızlandırıcıda kullanılan belirli materyaller için foton ve elektron tesir-kesri içeren büyük miktarda veriyi okur. Bu veriler PEGS4 adı verilen bir kod tarafından üretilmektedir (EGSnrc sistemi içinde yer almaktadır) ya da dışarıdan veri dosyası olarak verilebilmektedir. Bununla birlikte BEAMnrc özel bir hızlandırıcı için detaylar bir giriş dosyası ile tanımlanabilir (örneğin vakum çıkış penceresinden belirli uzaklıkta bulunan ve belirli kalınlıkta materyallerden yapılmış dört saçılma levhası bulunan bir hızlandırıcı). Kullanıcı radyasyon geçiş modelindeki birçok parametre ve çeşitli değişkenleri kontrol ederek simülasyon aşamasına geçilir.



**Şekil 4.6** BEAMnrc sisteminin kullanım aşamaları [20].

Simülasyonun son aşaması, çıkış verisinin analizidir. Bu çıkış verisi hem faz uzak dosyaları (yüzlerce olmazsa, onlarca Mbyte ile ölçülebilir), çıkış listesi ya da seçime bağlı olarak EGS Windows'da 3 boyutlu grafik dosyası olarak elde edilir. Sonuç olarak hızlandırıcı için elde edilecek veriler yardımıyla hızlandırıcı bilgisayar ortamında analiz edilebilir ya da hasta simülasyonunda kullanılabilir.

## 5.1. EGS-mg ÇOKLU GEOMETRİ PAKETİ

EGS-mg, EGS kod sisteminde kompleks geometrilerin kolayca modellenmesini sağlamak amacıyla Çoklu Geometri tekniğini kullanarak geliştirilmiş bir geometri paketidir [21]. Kullanıcı standart EGS girdi dosyalarının yanı sıra geometri inşası ve tanımlamalarından oluşan birkaç yardımcı dosyayla kontrol işlemini yapar. EGS-mg paketinin içerisinde geometri modellemek için üç çeşit primitiv mevcuttur. Bunlar, sphere, rectilinear ve cylinder (küre, düzlem ve silindir) primitivleridir. Bu üç çeşit primitiv ayrı ayrı yada birlikte ve çeşitli kombinasyonlarda kullanılarak kompleks geometrilerin modellenmesi yapılabilir.

### 5.1. Primitiv

Özel bir geometriye sahip elemanlardır. EGS-mg paketi içerisinde üç çeşit primitiv vardır. Bu primitivler, küre, düzlem ve silindirdir. Primitivler aşağıda belirtilen özelliklere sahiptirler;

- **Kimlik Numarası (ID number):** Primitivleri tanımlamak için kullanılan kimlik numarasıdır.
- **Başlık (Title):** Primitivin adıdır.
- **Çevirme (Translation):** Kartezyen sistemdeki bir primitivin pozisyonunu tanımlayan bir özelliktir.
- **Dönme (Rotation):** Bir primitivin doğrultusunu tanımlayan bir özelliktir.
- **Suretini Çıkarma (Duplication):** Bir primitiv geometri içerisinde birden çok kullanılabilir. Farklı farklı primitivler oluşturmak yerine bir primitiv dönme ve çevirmeleri tanımlanarak birçok kez kullanılabilir. Bu yöntem *duplication* olarak adlandırılır.

### 5.2. Nesneler ve Özellikleri

Nesneler, primitivlerin oluşturduğu fiziksel gerçekliklerdir. Primitivler EGS-mg veritabanı içerisinde tanımlanırlar, nesneler ise EGSnrc çalıştıktan sonra tanımlanan primitivler kullanılarak oluşturulurlar.

### 5.3. Gruplar ve Özellikleri

Grup metodu EGS-mg'nin en güçlü özelliklerinden birisidir. Grup, ilgili nesnelerin bir zincir halinde birlikte tanımlanmasıdır. Grup içerisinde “kök” olarak adlandırılan nesne grubun sahibidir ve diğer tüm nesneleri kontrol eder. EGS-mg 'nin grup özelliği sayesinde kullanıcı, kök nesnenin dönüşüm ve yersel parametrelerini değiştirerek grubu oluşturan tüm nesneleri kontrol eder.

### 5.4. Akış

Nesneler hafızada sıralanmış düzenli olarak depolanırlar. Bu “stream” olarak adlandırılır. Her nesne sıralamada ilk olarak hangi nesnenin geleceğini belirten bir sıra numarası alırlar. Objeler eğer diğerinden önce geliyorsa diğer objenin üzerinde bazı safhalarda öneme sahiptir. Örneğin, grup içerisinde bir nesne sahip olduğu nesneden sonra gelmemelidir. Grubun kökü olan nesne grubun bütün elemanlarından daha küçük bir sıra numarasına sahip olur.

Nesnelerin akışı (stream) gibi primitivlerin de bir akış sırası vardır. Primitivlerin akışı sadece nesnelerin akışını üretmek için kullanılır ve başka amaçlar için kullanılmaz.

### 5.5. Geometride Bölgelerin Sıralanması

EGS kod sisteminde her bir sınır 1'den maksimuma giden değerlerde özel sıra numarasına sahiptir. Bölgelerin sıralanması yeni çoklu geometri paketinde farklı bir yolla önemsiz olarak ele alınmıştır. Bu sayede bir sistemin geometrisi bağımsız nesneler tarafından şekillenir ve her bir nesne birçok sınıra bölünebilir.

Sıralar EGS-mg de aşağıdaki gibi düzenlenirler;

Bir nesneden bölgelerin numarası  $m_i$  olsun. Burada  $i = 1 \dots N$ ,  $N$  akıştaki (stream) nesnenin numarası ve akıştaki bütün nesnelerin bölgelerdeki toplam numarası  $j^{\text{th}}$ ,  $M_j$ ;

$$M_j = \sum_{i=1}^j m_i \quad j \leq N$$

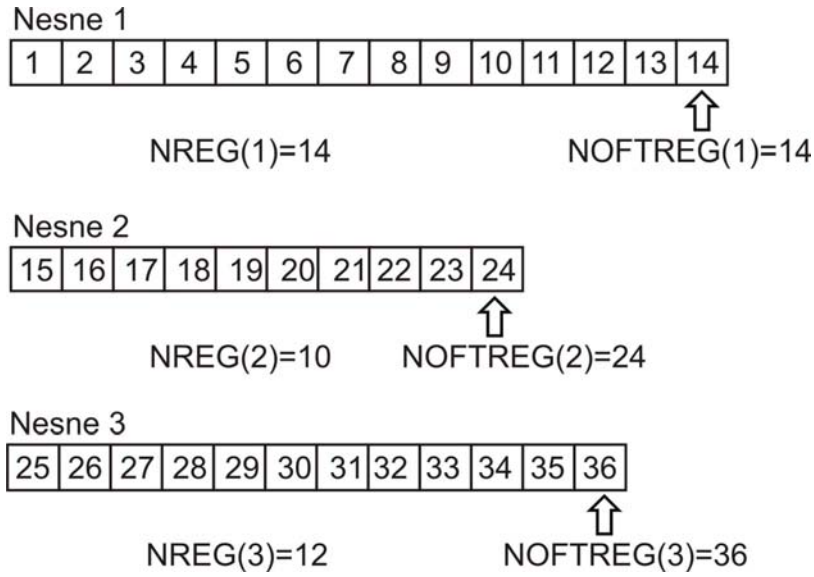
olarak verilir.

Burada verilen bir nesne  $i$ , bölge numaraları birinci bölgeden son bölgeye aşağıdaki gibi ayrılır.

$$M_{i-1} + 1, M_{i-1} + 2, \dots, M_{i-1} + m_i$$

Tanıma göre her bir bölge, sahip olduğu nesneler önemszenmeden 1 'den maksimum değere ( $M_N$ ) kadar sınırlara ayrılır. Bu nedenle sınırların sıralanışı EGS kod sistemindeki gibi olur.

Geometride bölgelerin sırasını daha açık anlamak için, özel bir geometride bölgelerin düzene konulması aşağıdaki şekilde verilmiştir. Buradaki geometri 3 nesneden oluşmaktadır. Her bir nesnede bölgelerin numaraları 14, 10 ve 12 dir.



**Şekil 5.1** Üç nesneye sahip bir geometride bölge numaraları

## 5.6. Öncelik Numarası Atanması

EGS-mg paketi içerisinde bazı bölgeler, hesaplama parametrelerine bağlı olarak (ortam numaraları, kesilme enerjileri gibi) kullanıcının tercih ettiği özel öncelik numaralarına sahiptirler. Bir bölgenin öncelik numarası IPRIOTY değişkeni tarafından belirlenir.

Basitçe bir öncelik numarası negatif sayıları da kapsayan bir tamsayı değeri olabilir. Diğer taraftan bu varsayım, her bir bölgenin öncelik numaraları geometrik objeler için sıralı numaralar çarpan faktörüne göre atanır. Çarpan faktörü \$PRFACT değişkeni tarafından belirlenir.

Her bir nesnede bölgeleri önemli (IMPORTANT) ve tamamlayıcı (COMPLEMENTARY) olarak adlandırılan iki grupta sınıflandırılır. Önemli bölgeler nesneleri oluşturur ve yüksek öncelik numarasına sahip olur. Tamamlayıcı bölgeler ise herhangi bir nesnenin artık uzayını oluşturur. Kullanıcılar geometrinin bu bölümüyle fazla ilgilenmezler. Parçacık transferinin tam

olarak yapılabilmesi için dış uzayın da tanımlanması gerekmektedir. Önemli bölgelerde tüm noktaların gerçek (virtual) olması gerekmektedir.

EGS-mg 'de önemli bölgeler pozitif önem numarasına ve tamamlayıcı bölgeler de negatif önem numarasına sahip olmaktadır. Böylece önemli bölgeler tamamlayıcı bölgelerden ayrılırlar.

Önemli ve tamamlayıcı bölgeler EGS-mg veri tabanında tanımlanmaktadır. Bir bölgenin önemli yada tamamlayıcı olmasına bağlı olarak geometri başlangıcı uygulamasında program tarafından her bir bölge özel öncelik numaralarına ayrılır.

## 5.7. Geometrik Dönüşümler

### 5.7.1. Nesnenin Çevrilmesi ve Döndürülmesi

Geometri dönüşümü bir nesnenin pozisyonunu ve doğrultusunu değiştirmek için uygulanır. Bu aşağıda belirtildiği şekilde nesne üzerinde çevirmeler veya rotasyonlarla sağlanır.

Kartezyen koordinatlar tarafından belirlenen bir uzayda nesne tanımlansın. Tanımlanan nesnenin orijin noktası  $O=\{x,y,z\}$  olsun. Nesneye yapılacak çevirme işlemi her eksen üzerindeki noktaların kaydırılmasıyla  $O'=\{x',y',z'\}$  orijin pozisyonunu değiştirir. Böylece eski terimlerle yeni pozisyon aşağıdaki gibi yazılır.

$$x' = x + x_0$$

$$y' = y + y_0$$

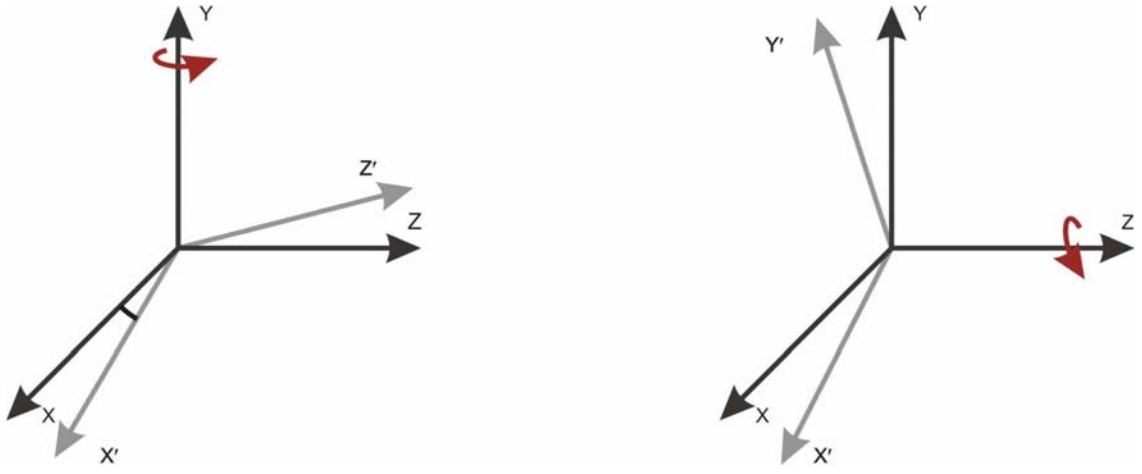
$$z' = z + z_0$$

Burada  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  değerleri  $x$ ,  $y$  ve  $z$  üzerindeki kaydırma mesafeleridir.

Döndürme işlemi nesnenin yönelimini değiştirmek için kullanılır. Bir döndürme işlemi iki aşamada tamamlanır. Birinci aşamada nesne uzayı pozitif  $Q$  açısıyla  $y$  eksenini çevresinde döndürülür. İkinci aşamada  $\phi$  açısıyla  $z$  eksenini etrafında döndürülür.

Böylece geometri dönüşümü 5 değişkene ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ,  $Q$ ,  $\phi$ ) bağlı olarak yapılır. Parçacık transferi süresince her nesnenin pozisyonu ve yönelimi  $xct$ ,  $yct$ ,  $zct$ ,  $uct$ ,  $wct$  değişkenlerinde tanımlanır.

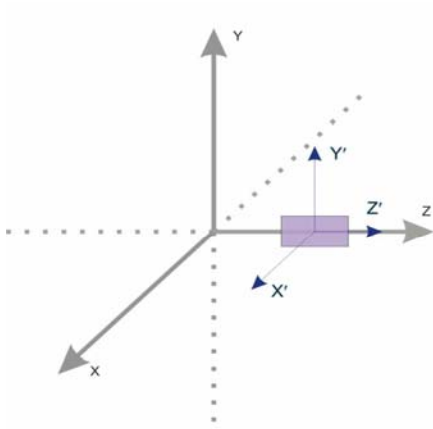
Bir döndürme işlemi, sadece parçacık pozisyonunu değil, hatta EGSnrc kod sistemindeki üç değişken,  $u(np)$ ,  $v(np)$  ve  $w(np)$  tarafından saptanan parçacık yönünü de değiştirir. Bu nedenle döndürülmüş bir nesne uzayında parçacığın transferi döndürülmüş koordinat sistemine göre en iyi şekilde dönüştürülür.



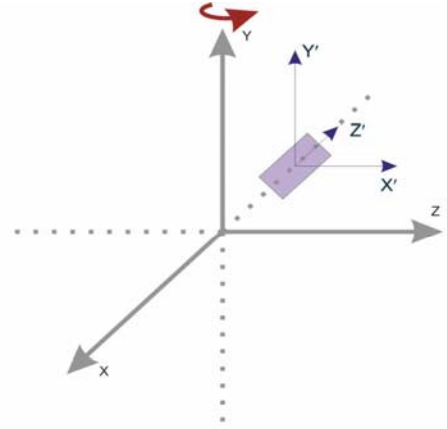
**Şekil 5.2** Kartezyen koordinatlarda bir eksen etrafında döndürme işleminin gösterimi [2].

### 5.7.2. Bir Grubun Çevrilmesi ve Döndürülmesi

Nesneler grubunda diğer nesneler tarafından sahiplenilmiş birçok nesne olabilir. EGS-mg paketinde sahiplerine göre yerleştirilmiş bir alt nesnenin pozisyonu ve doğrultusu kabul edilir. Bunun sonucunda grupta bir sahip nesne hareket ettirildiğinde yada döndürüldüğünde alt nesneler sahiplerine göre pozisyon ve doğrultuları değişmeyecek şekilde hareket ederler. Bu metot kök nesnenin altındaki tüm nesneler zinciri için uygulanır.

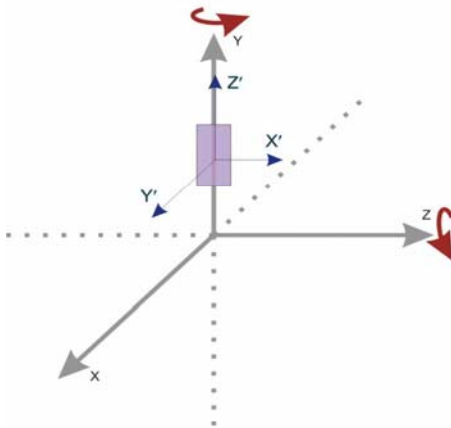


$$\begin{aligned} X' &\rightarrow X \\ Y' &\rightarrow Y \\ Z' &\rightarrow Z \end{aligned}$$



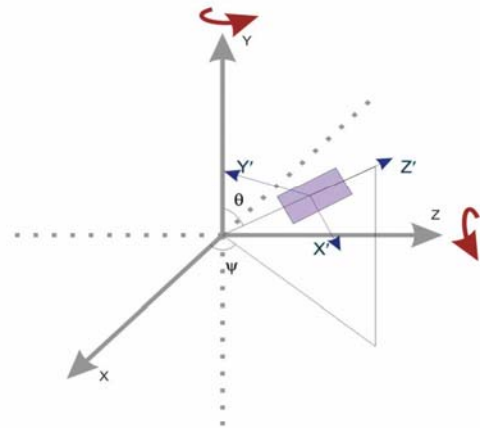
$$\theta = 90 \quad \varphi = 0$$

$$\begin{aligned} X' &\rightarrow Z \\ Y' &\rightarrow Y \\ Z' &\rightarrow -X \end{aligned}$$



$$\theta = 90 \quad \varphi = 90$$

$$\begin{aligned} X' &\rightarrow Z \\ Y' &\rightarrow X \\ Z' &\rightarrow Y \end{aligned}$$



$$\theta = 45 \quad \varphi = 360 - \lambda \quad \varphi = 345$$

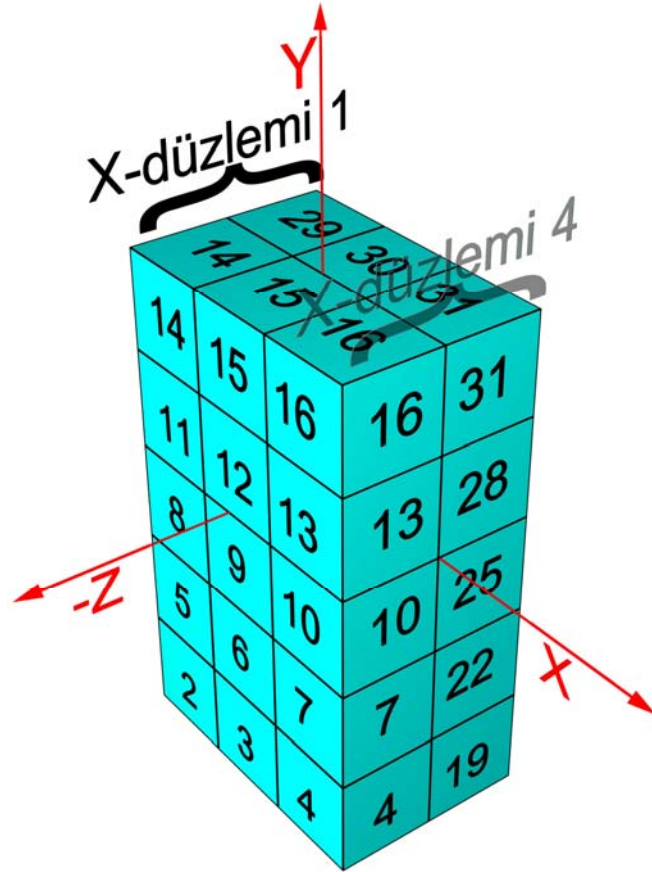
**Şekil 5.3** Bir nesnenin döndürülmesi [2].

### 5.8. Primitiv Tipleri

EGS-mg paketinde, 3 tip primitiv; küp, silindir ve küre mevcuttur. Bunları kullanarak kesin olarak pek çok karmaşık sistemler modellenebilse de bazı geometriler değişik tipte primitiv kullanımının geometriye iştirak etmesini gerektirmektedir (ör: koni primitivleri veya paralel olmayan düzlem primitivleri vs.). EGS-mg paketinde mevcut olan primitiv tipleri ve özellikleri aşağıda incelenmektedir.

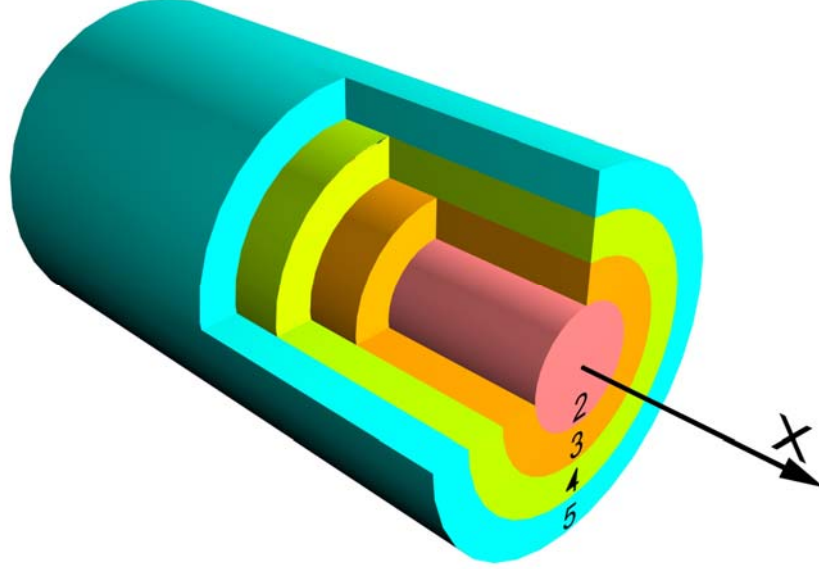
İlk primitiv tipi kübik primitivdir. Bu primitivl küp şeklindeki nesneleri modellemek için kullanılırlar. Paralel düzlemler her eksen üzerine bir tane gelecek şekilde yerleştirilirler. Eksenler isteğe bağlı olarak küp şeklinde primitivler elde etmek için eksenler üzerinde belirlenen noktalara yerleştirilirler. Paralel düzlemlerin sınırladığı hacimler bölgeler olarak adlandırılırlar.

Bir eksen boyunca sıralanan düzlemlerin maksimum numarası aşağıda belirtilen değişkenler tarafından belirlenirler. Bir geometri içerisinde eksenlerdeki düzlem koordinatları XBOUND, YBOUND ve ZBOUND olarak adlandırılan 3 değişken tarafından kayıt edilir.



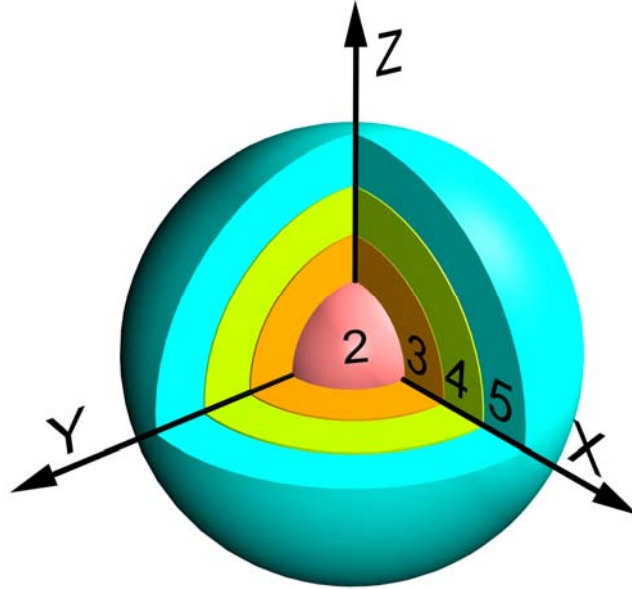
Şekil 5.4 Kübik primitiv [2].

İkinci bir tip primitiv silindir primitivdir. Bu tür primitifler silindir biçimli nesnelerin modellenmesi için kullanılır. Geometri, iç içe geçmiş silindirlerden ve bu silindirleri kesen paralel düzlemlerden oluşur. Bir geometrideki bütün nesneler için silindir çapları ve z eksenini düzlem koordinatları CYLRADZ ve ZPLANE değişkenleri içerisinde bulunur.



**Şekil 5.5** Silindir primitif. Burada z eksenini üzerine yerleştirilmiş 3 paralel düzlem tarafından kesilmiş 4 tane silindirin oluşturduğu primitif görülmektedir [2].

Üçüncü primitiv tipi küresel şekilli nesneleri modellemek için kullanılır. Aynı orijinli küreler, bir küre primitifi oluştururlar. Böyle bir primitif aşağıda gösterilmektedir.



**Şekil 5.6** Küre primitif, 4 tane küreden oluşmaktadır [2].

## 5.9. Kullanıcı Kodları

### 5.9.1. HOWFAR Alt Döngüsü

EGS kod sisteminde parçacık transferinin geometride doğru bir şekilde gitmesi HOWFAR alt döngüsü tarafından sağlanır. HOWFAR'da program transfer esnasında bölge içerisindeki bir sonraki etkileşim mesafesini kontrol eder. Eğer etkileşimde bir sınır bölgesi değişimi yoksa bir sonraki etkileşim mesafesi USTEP ve yeni bölge numarası IRNEW olduğu gibi kalır. Eğer etkileşimde sınır olursa, etkileşimin olduğu bölge için USTEP ve IRNEW içerisine bulunulan bölgenin sınır mesafeleri ve bölgenin indeks numaraları yerleştirilir.

EGS-mg paketinde parçacık transferi, eş zamanlı olarak bütün nesneler içerisinde parçacığı transfer etmek için çoklu geometri tekniğini kullanır. Bununla sınırların kontrolü bütün nesneler için tekrar edilir. Bunun için önemsiz nesnelerin sınırları ihmal edilir ve sadece önemli nesnenin sınırları kontrol edilir. Bu yapılırken USTEP ve IRNEW değişkenleri yukarıda tanımlandığı gibi gerek duyulduğunda yeniden değiştirilir.

\$CALCULATE-USTEP-IN-HOWFAR ifadesi HOWFAR alt döngüsü içerisinde bulunur ve bütün nesneler için nesnenin türüne bakmaksızın hesaplamaları yapar ve geometrinin oluşturulmasını sağlar.

### 5.9.2. AUSGAB Alt Döngüsü

EGS kod sisteminde AUSGAB subroutini parçacık transferi esnasında meydana gelen olaylarla ilgili bazı değerleri belirlemek için kullanılır. EGS-mg geometri paketi kullanıldığında AUSGAB alt döngüsünün de hiçbir ek ifadeye gerek duyulmaz.

### 5.9.3. HOWNEAR Alt Döngüsü

EGS kod sisteminde HOWNEAR alt döngüsü, yüklü parçacığın pozisyonundan geometrinin sınır yüzeylerine olan dik uzaklık mesafesini hesaplamakta kullanılır. Özel bir geometri için HOWNEAR alt döngülerini yazmak kullanıcının sorumluluğundadır. Bununla birlikte EGS-mg paketiyle beraber yazılmış olan bir HOWNEAR alt döngüsü dağıtılmaktadır ve EGS kod sisteminde olduğu gibi yararlanılmaktadır.

## 5.10. EGS-mg Çoklu Geometri Veritabanı

EGS-mg çoklu geometri veri tabanında primitiv tipi, sınır boyutları, ortam numaraları ve öncelik numaraları gibi primitivlerle ilgili tüm bilgiler veritabanı içerisinde depolanmıştır. Bu veritabanında aşağıdaki dosyalar bulunurlar.

|                           |                                                            |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>collections.mgdat:</b> | Primitivlerin genel özelliklerinin saklandığı dosya.       |
| <b>primitives.mgdat:</b>  | Primitivlerin fiziksel özelliklerinin saklandığı dosya.    |
| <b>groups.mgdat:</b>      | Tüm gruplar için Id numara zincirlerinin saklandığı dosya. |

### 5.10.1. Koleksiyon dosyaları (collections.mgdat)

Primitivlerin genel özellikleri bu dosyada depolanmıştır. Bu özellikler kimlik numarası, primitiv ismi, primitiv kopya sayısı, çevirme ve dönme. Dosyanın formatı aşağıdaki gibidir,

Kart 1:

|           |                                                                                    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Id_ob     | : Primitivin kimlik numarası                                                       |
| slabel_ob | : Primitiv tipi                                                                    |
| label_ob  | : Primitivin ismi.                                                                 |
| idubl_ob  | : Sureti çıkartılan primitivin Id numarası. Primitiv suret değilse bu alan 0 olur. |
| lct_ob    | : Geometri dönüşümlerinin uygulanıp uygulanmadığını belirten ilgeç.                |

Kart 2: (Sadece lct\_ob=1 olduğunda gereklidir.)

|       |                                                    |
|-------|----------------------------------------------------|
| x_inp | : x ekseninde kaydırma mesafesi.                   |
| y_inp | : y ekseninde kaydırma mesafesi                    |
| z_inp | : z ekseninde kaydırma mesafesi                    |
| t_inp | : y eksen etrafında dönme açısı (derece cinsinden) |
| p_inp | : z eksen etrafında dönme açısı (derece cinsinden) |

Burada primitivin sahipliğine bağlı olarak CARD 2’de belirtilmiş olan eksenler üzerinde kaydırma mesafesi sahibine göre göreceli mesafeler olduğuna dikkat edilmelidir.

### 5.10.2. Grup Dosyaları (groups.mgdat)

Grup ; bağlantılı primitivlerden oluşan kümedir. Primitiv grupları **groups.mgdat** dosyalarında bildirilmiştir. Primitivlerin kimlik numaralarını birbirlerine bağlanabilmek için kullanılmıştır. ESG-mg veri tabanı tarafından eklenen her primitiv için **groups.mgdat** dosyası içinde bir satır bulunması gerekir. Bu açıdan iki alanın olması gerekmektedir. İlk alan primitivin

kimlik numarası ve ikinci alan objenin sahip olduğu alt-primitivlerin tam sayısını içermektedir. İkinci alan 0 ise, primitivin alt-primitivi yok demektir. Buna karşın, ikinci alanın pozitif tam sayısı varsa primitivin alt primitivleri olduğu kadar bu alanda girilen sayı ve alt-primitivlerin Id numaraları takip eden satır içinde girilmelidir.

### 5.10.3. Primitiv Dosyaları (primitives.mgdat)

Bu veri dosyalarında primitivin geometrisi tanımlanmıştır. Aşağıdaki özellikleri bulunur.

- Primitivlerde kullanılan ortam isimleri ve materyal sayıları
- Sınırlar ve bölgelerin ortam numaraları
- Bölgelerin öncelik sayıları

### 5.10.4. Geometri, Materyal ve Öncelik Girdileri

#### 5.10.4.1. Geometri Girdileri

Bir primitivin fiziksel boyutları geometri girdileri girilerek belirlenir. Her bir tip primitiv için çeşitli girdi kümeleri gereklidir. Bir primitivin tipi PRIMITIVE TYPE ile girilen girdidir. Primitiv tip için 3 seçenek vardır. Bunlar: kübik, silindirik ve küreseldir.

Bir kübik primitiv için, INPUT X, INPUT Y ve INPUT Z girdileri her bir ekseninde üçlü kümeli düzlem tarif etmektedir. Bir silindirik primitiv için, INPUT CYLINDER ve INPUT Z girdileri, silindirlerin yarıçapı ve z-düzlem sayılarını belirlemek için girilmektedir. Bir küresel primitiv için INPUT SPHERE girdisi kürelerin yarıçapını belirlemek için girilmektedir.

Sınırları girmek için iki ayrı yol vardır. Bunlar ya Groups veya Individual seçeneğini seçerek olmaktadır. Eğer Groups seçildiyse, eşit kalınlıktaki levha kümeleri girilebilir. Yapılan tercihe göre, kodun tüm boyutlarıyla cm boyutunda ek girdilere ihtiyacı vardır, şöyle ki:

#### Eğer primitiv kübik ise;

Only if INPUT X = Groups

|                       |     |                                      |
|-----------------------|-----|--------------------------------------|
| X OF FRONT FACE       | (R) | # İlk dilimin başlangıcı             |
| NUMBER OF X SLABS (M) |     | # Gruptaki düzlemsel dilimler        |
| X SLAB THICKNESS (M)  |     | # Gruptaki her bir dilimin kalınlığı |

Only if INPUT X = Individual

|                    |     |                                      |
|--------------------|-----|--------------------------------------|
| DEPTH X BOUNDARIES | (M) | # Geometrik x planının koordinatları |
|--------------------|-----|--------------------------------------|

Only if INPUT Y = Groups

|                       |     |                                      |
|-----------------------|-----|--------------------------------------|
| Y OF FRONT FACE       | (R) | # İlk dilimin başlangıcı             |
| NUMBER OF Y SLABS (M) |     | # Gruptaki düzlemsel dilimler        |
| Y SLAB THICKNESS (M)  |     | # Gruptaki her bir dilimin kalınlığı |

Only if INPUT Y = Individual

DEPTH Y BOUNDARIES (M) # Geometrik y planının koordinatları

Only if INPUT Z = Groups

Z OF FRONT FACE (R) # İlk dilimin başlangıcı

NUMBER OF Z SLABS (M) # Gruptaki düzlemsel dilimler

Z SLAB THICKNESS (M) # Gruptaki her bir dilimin kalınlığı

Only if INPUT Z = Individual

DEPTH Z BOUNDARIES (M) # Geometrik z planının koordinatları

#### **Eğer primitiv tipi silindirik ise;**

Only if INPUT CYLINDER = Groups

NUMBER OF CYLINDERS (M) # Gruptaki silindir numarası

RING THICKNESS (M) # Gruptaki silindir kalınlığı

Only if INPUT CYLINDER = Individual

RADII (M) # Geometride belirtilen silindirin yarı çapı

Only if INPUT Z = Group

Z OF FRONT FACE (R) # İlk dilimin başlangıcı

NUMBER OF Z SLABS (M) # Gruptaki düzlemsel dilimler

Z SLAB THICKNESS (M) # Gruptaki her bir dilimin kalınlığı

Only if INPUT Z = Individual

DEPTH Z BOUNDARIES (M) # Geometrik z planının yarıçapı

#### **Eğer primitiv küre ise;**

Only if INPUT SPHERE = Group

NUMBER OF SPHERES (M) # Gruptaki küre numarası

SPHERE THICKNESS (M) # Gruptaki her bir kabuğun kalınlığı

Only if INPUT SPHERE = Individual

RADII (M) # Geometride belirtilen kürenin yarıçapı

Bazı durumlarda primitiv, primitivin belirli alanından daha geniş bir geometri içerisinde yer alabilir. Böyle bir geometride primitivin dış boyutları geometrinin sınırları dışına taşacaktır. (Bir başka deyişle, işaretlenmiş parçacık primitivin dış sınırına çarpar çarpmaz atılacak ve bu durum parçacık geometri içinde herhangi bir yerde bulunduğunda gerçekleşecektir.)

EXTEND OUTER DIMENSIONS girdisi program tarafından otomatik olarak primitivin dış sınırlarını genişletmek amacıyla kullanılabilir. Girdiyi ON haline getirmek model olarak denenebilir ve programı, primitivin dış sınırlarını, geometrinin dış sınırlarından öteye hareket ettirmeyi sağlar. Girdiyi OFF hale getirmek primitivin sınırlarını sabitlemektedir.

#### 5.10.4.2. Materyal Girdileri

Her bir geometrik alanın kendisiyle ilişkili bir materyale ihtiyacı vardır. Materyal isimleri "MEDIA" girdisi kullanılarak girilebilir. Materyal ismi PEGS4 veri kümesindekiyle aynı olmalıdır. Her bir ortam için maksimum 24 karaktere izin verilir.

Geometrik alanlar üzerinde materyalin görevi, **DESCRIBE MEDIA BY=** girdisine **Regions** veya **Planes** yazılarak iki şekilde başarılır. Eğer **DESCRIBE MEDIA BY= Regions** seçilirse, kullanıcı alan sayılarını uygun ortama göre doldurarak belirleyebilir. Eğer **DESCRIBE MEDIA BY= Planes** seçilirse, kullanıcı IX, IY, IZ, düzlem numaralarını kübik r bir primitiv için, düzlem (IZ) sayılarını ve küre (IX) sayılarını uygun ortamlara göre silindirik bir primitiv için doldurur. **DESCRIBE MEDIA BY=** girdisi küresel bir primitiv için gerekmemektedir.

#### 5.10.4.3. Öncelik Girdileri

Bölgeler öncelik numaralarına göre iki grupta kategorize edilebilir: important (önemli) ve complementary (tümleyici). Öncelikle tüm bölgelerin tümleyici olduğu kabul edersek ve de kullanıcı bu tümleyici alanlardan önemli birini seçmek isteyecekse bunu sadece öncelik girdisi kullanarak başarabilir.

Önemli bölgeler iki şekilde **DESCRIBE IMPORTANT REGIONS BY=** komutunu **Regions** veya **Planes**'e getirerek seçilebilir. Eğer **DESCRIBE IMPORTANT REGIONS BY= Regions** ise, kullanıcı önemli olan bölge numaralarını belirleyebilir. **DESCRIBE MEDIA BY= Planes** ise kullanıcı IX, IY, IZ ve düzlem numaralarını rectilinear bir primitiv için, düzlem (IZ) ve silindirik (IX) numaralarını önemli sayılan silindirik bir primitiv için belirleyebilir. **DESCRIBE IMPORTANT REGIONS=** komutunu küresel bir primitiv kullanmak gereksizdir.

Önemli ve tümleyici alanların tanımlanmasını tamamladığımızda, primitivin tüm bölgeleri önemli veya tümleyici öncelik durumuna göre ya negatif ya da pozitif öncelik sayısı ile ilişkilendirilir. Buna karşın bazı durumlarda, kullanıcının bazı bölgelerin öncelik numarasını değiştirmesi gerekebilir. Bu da **INCREASE OR DECREASE PRIORITIES** komutu ile başarılmaktadır. Bu komutun çok sayıda negatif veya pozitif tam sayının girilmesine ihtiyacı vardır. Girilen değer komutlarla belirlenen bölgelerin o anki öncelik sayısı değerine eklenir.

#### 5.10.6. Çoklu Geometri Veri Tabanında Kullanıcının Geometri Oluşturması

**Construct\_geometry** olarak adlandırılan sub-routine egs standart giriş dosyasında tanımlanmış gerekli tüm bilginin ortaya çıkarılması için kullanılır. **Construct\_geometry** alt

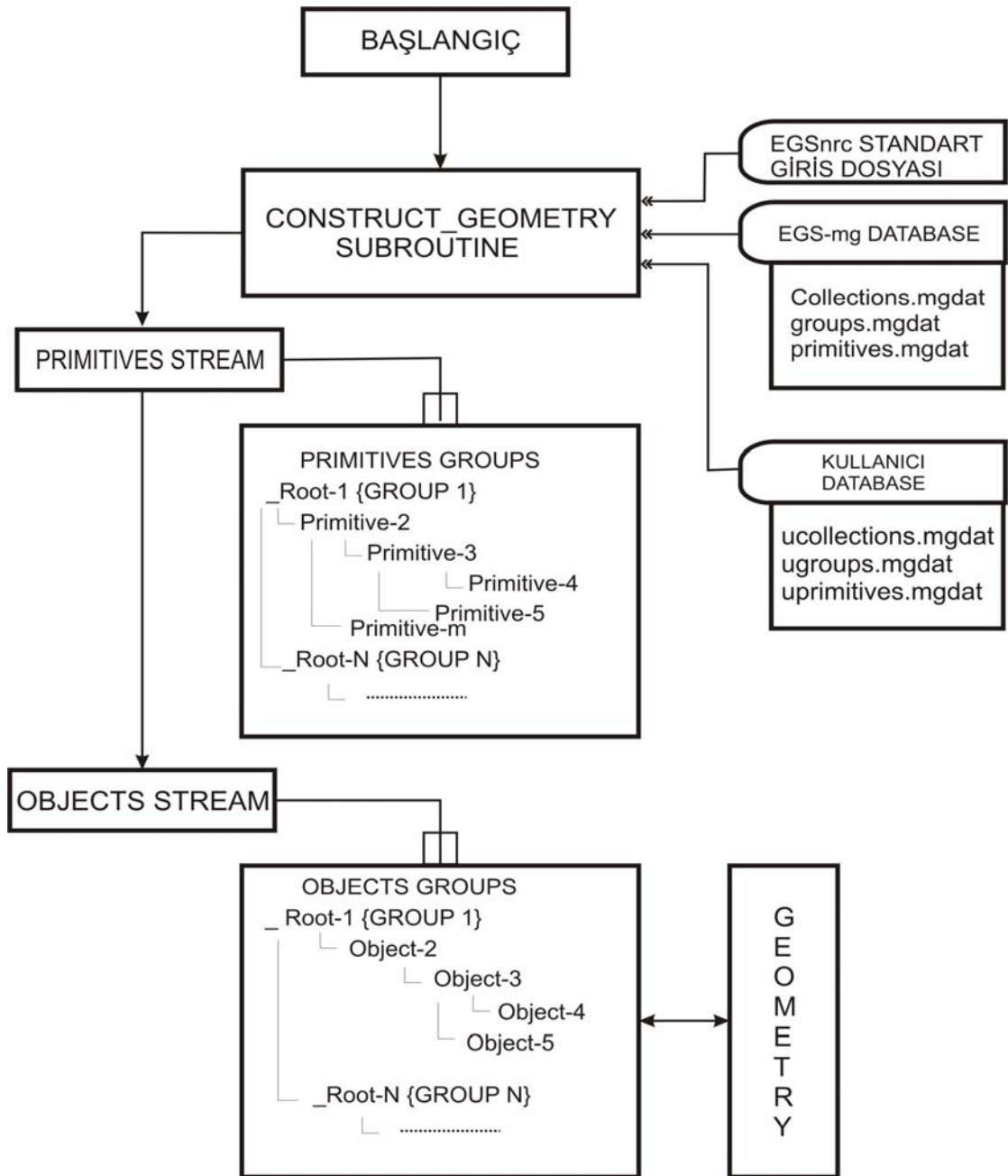
döngüsünün yapısı Şekil 5.7’de verilmiştir. EGS standart giriş dosyasında tanımlanan sistemin çoklu geometri bilgisini okuyarak bu alt döngüde aşağıdaki gibi ele alınır:

Öncelikle, program standart EGS giriş dosyasından grup Id numarasını (id\_inp) ve bu grubun suret (duplikasyon) sayısını okur (idup\_inp). Program, dönecek olan ve uzaya gönderilecek grupların geometri dönüşüm parametrelerini de okur.

İkinci olarak, program hangi primitivlerin o sıradaki gruptan olduğunu **groups.mgdat** dosyasından saptar. Daha sonra bu primitivler hakkındaki genel ve fiziksel bilgiyi özel bir sırada **collections.mgdat** ve **primitives.mgdat** dosyalarından okur ve sonra idup\_inp değerini kontrol eder. Eğer bu 1’den büyükse bu şu anki primitiv grubundan türevlenen nesne gruplarının suretinin yapılması istediğimiz anlamına gelir. Sonra da, nesne grupları idup\_inp kez suretlenir. Böylece aynı tipte pek çok nesne geometriye eklenir.

Program, bu okuma işlemini Id numarası 0’a eşitleninceye dek EGS standart giriş dosyasında tanımlanan tüm primitiv grupları için tekrar eder. Normalde bir grubun veya primitivin 0 Id numarası almasına izin verilmez. Eğer bu EGS standart giriş dosyasında gerçekleşirse bunun dosyada grupların sonu anlamına gelecek şekilde değişik bir anlamı vardır. Daha sonra program sonraki primitivlerin okunup tekrarlanmasını sona erdirir.

En sonunda, tüm primitiv ve nesneler ayrı akış olarak hafızada toplanırlar.



Şekil 5.7 “construct\_geometry” alt döngüsünün yapısı.

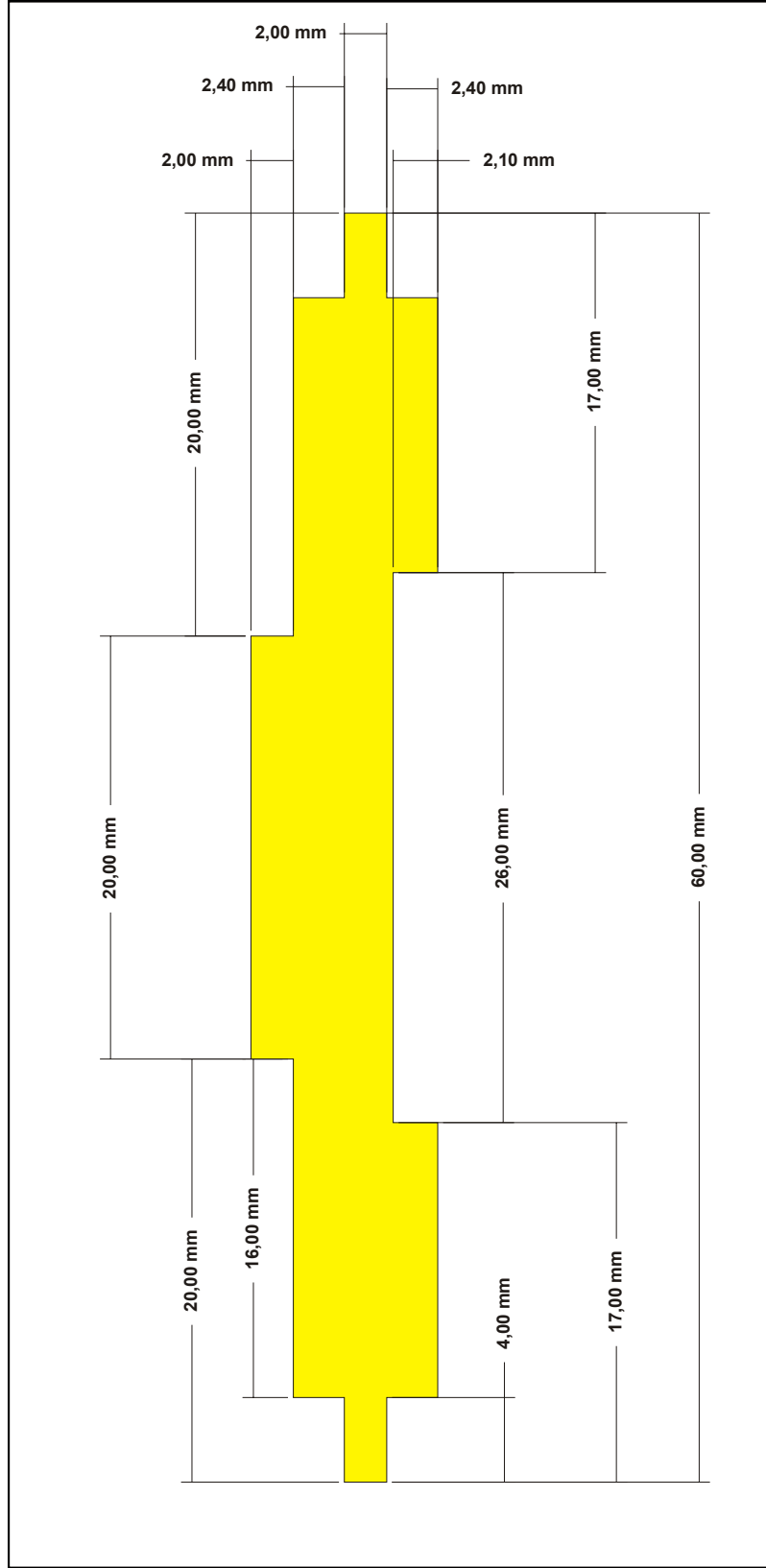
## 6. EGS-mg VERİ TABANINDA MODELLENEN LINEER HIZLANDIRICI ELEMANLARI

Bu çalışmada, EGS-mg paketinde kullanılmak üzere lineer hızlandırıcının iç yapısında bulunan çeşitli parçaları çoklu geometri yöntemini kullanarak modelledik. Çalışmadaki amacımız radyoterapide kullanılan linakların iç yapı elemanlarını modelleyerek, herhangi bir MC hesaplaması için esnek bir kullanım kolaylığı sağlayacak primitivlerin bu veri tabanına yerleştirilmesidir. Lineer hızlandırıcıyı oluşturan ve radyasyon etkileşimlerinin en fazla olduğu multilif kolimatör modellenerek kodlanmıştır.

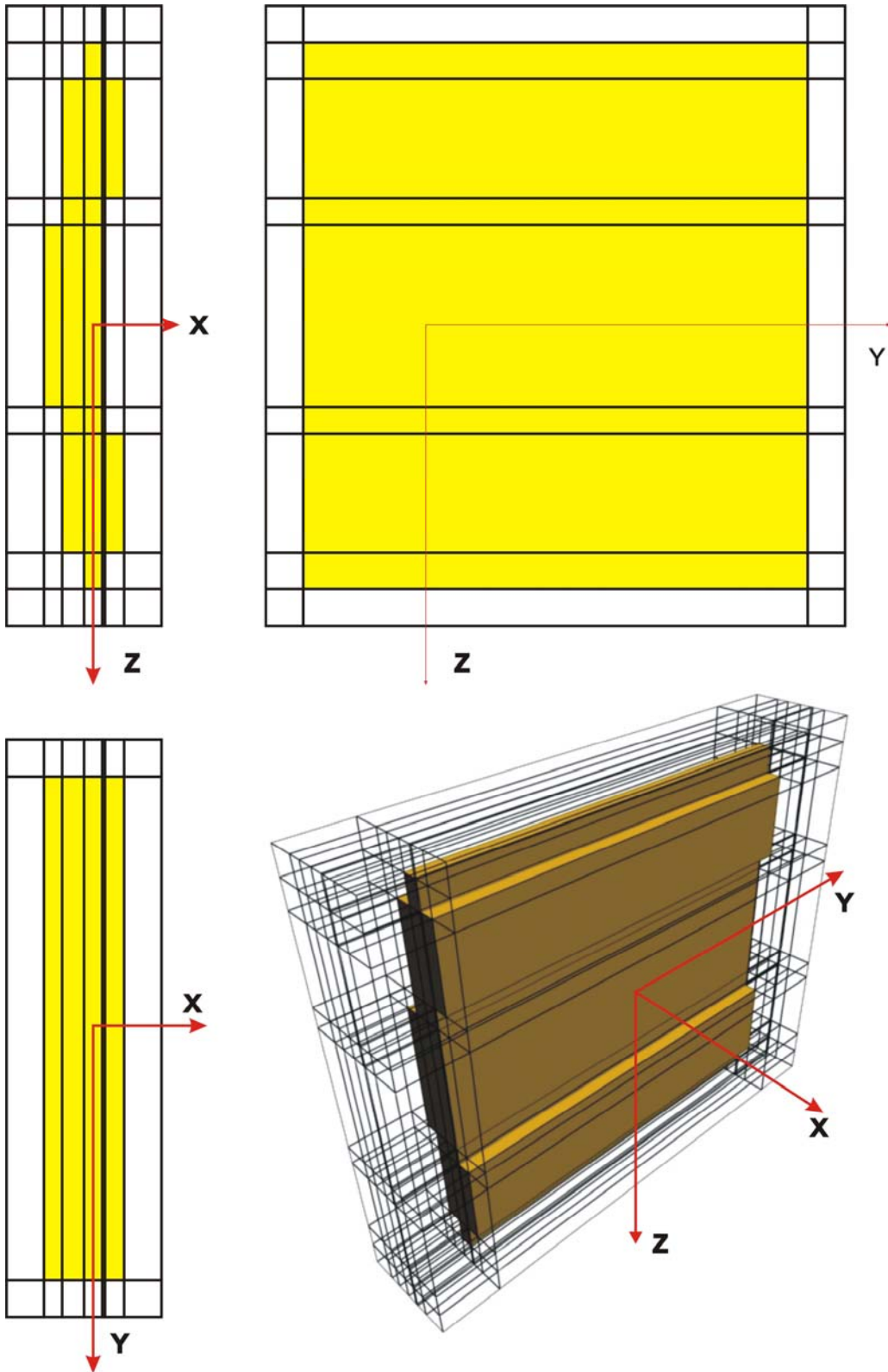
Aşağıda her bir geometride kullanılan ortam materyallerine ilişkin renk kodları tablo 6.1 de verilmiştir. EGS-mg veritabanına eklenen her bir primitiv için tanımlama bilgileri, primitivin ölçekli gerçek şekli, primitivin modelleme şekli ve primitivin veri tabanında bulunan yazılım bilgileri bulunmaktadır.

**Tablo 6.1** Geometrilere kullanılan element için renk kodları tablosu.

| RENK                                                                                | ELEMENT  | SEMBOL | 256 RENK KODU | RENK KODU (HEX) |       |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|---------------|-----------------|-------|------|
|                                                                                     |          |        |               | RED             | GREEN | BLUE |
|  | VACUUM   | -      | -             | 0               | 0     | 0    |
|  | TUNGSTEN | W      | 255.245.0     | FF              | F5    | 0    |



**Şekil 6.1.** MLC multifonksyon kolimatörün ölçekli çizimi.



Şekil 6.2. MLC multilif kolimatörün bölgelere ayrılmış modeli.

**6.1 MLC**

Multilif kolimatörün tek bir yaprağının EGS\_mg kod sisteminde kodlanması:

:Start MLC\_LEAF:

Primitive Type = rectilinear

Input X = groups

X of Front Face = -4.0

Number of X slabs = 1, 1, 1

X Slab Thickness = 3.95,1.0,3.95

Input Y = groups

Y of Front Face = -4.0

Number of Y slabs = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1

Y Slab Thickness = 3.56,0.21,0.03,0.20,0.24,0.20,3.56

Input Z = groups

Z of Front Face = -4.0

Number of Z slabs = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1

Z Slab Thickness = 1.00,0.40,1.30,0.30,2.00,0.30,1.30,0.40,1.00

Extend Outer Dimensions = Off

Media = TI

Set Medium Everywhere = 0

Describe Media By = Planes

Media Numbers = 1,1,1,1,1

For Media Start X Slab = 3,3,3,3,3

For Media Stop X Slab = 3,3,3,3,3

For Media Start Y Slab = 2,3,4,5,5

For Media Stop Y Slab = 2,3,4,5,5

For Media Start Z Slab = 5,3,2,3,7

For Media Stop Z Slab = 5,7,8,3,7

Describe Important Regions By = Planes

For Important Start X Slab = 3,3,3,3,3

For Important Stop X Slab = 3,3,3,3,3

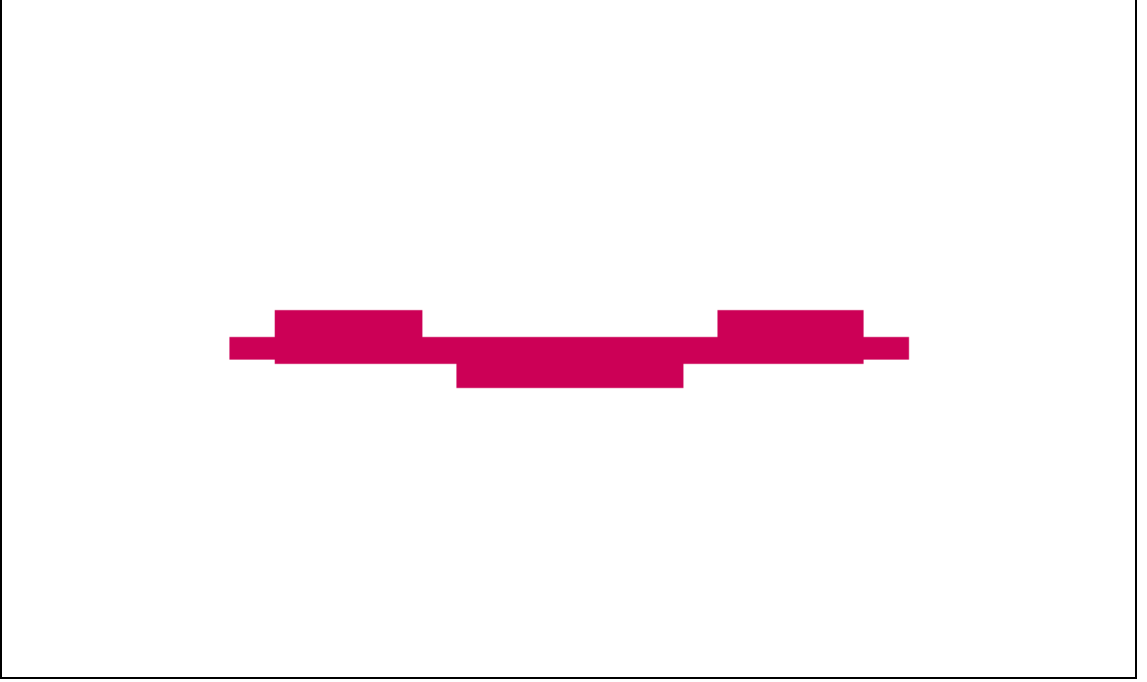
For Important Start Y Slab = 3,4,5,6,6

For Important Stop Y Slab = 3,4,5,6,6

For Important Start Z Slab = 5,3,2,3,7

For Important Stop Z Slab = 5,7,8,3,7

:Stop MLC\_LEAF:



**Şekil 6.3.** MLC kodunun EGS sisteminde görünümü.

## 7. SONUÇ

Bu çalışmada, Monte Carlo yöntemiyle doz hesaplaması yapan EGSnrc paketi içerisinde bulunan Çoklu Geometri (mg) paketinde kullanılmak üzere lineer hızlandırıcıların bazı iç aksamaları modellenmiştir.

Lineer hızlandırıcılarla yapılacak ışın tedavisinde, tedavi öncesinde hastanın hangi dokusunun ne kadar doz alacağını belirlenmesi, yapılacak hassas simülasyon ve hesaplamalarla mümkün olabilmektedir. Tedavi amaçlı kullanılan lineer hızlandırıcıların, Çoklu Geometri Tekniği kullanılarak modellenen iç aksamaları, çıkış izodozlarının ve radyasyon madde etkileşimlerinin hassas şekilde hesaplanabilmesi için bu konuyla ilgili veri bankasına eklenecektir.

Hazırlanan MLC modellemesi, EGS-mg paketi kullanılarak sanal lineer hızlandırıcı oluşturmak isteyen kullanıcılar için yararlı olacaktır. Yapılan modellemede ayrıntılı ve ölçekli çizimlerle Çoklu Geometri Tekniği'ne uygun yazılmış primitivler mevcuttur.

### 7.1. ÖNERİLER

Lineer hızlandırıcı dizaynı ve geliştirmesinde kullanılmak üzere hazırlanan bu çalışmada, lineer hızlandırıcıları oluşturan temel parçaların (hedef, MLC, jaw sistemi gibi) bir çok çeşidi göz önünde bulundurulmalıdır. Çeşitli ebatlarda ve modellerde parçaların EGS\_mg kod sistemi ile kodlanarak lineer hızlandırıcılar için oluşturulacak bu kütüphanenin genişletilmesi sağlanabilir. Oluşturulan kodların EGS sisteminde derlenmesi ile daha verimli çalışacak lineer hızlandırıcı tasarımları gerçekleştirilebilir.

### KAYNAKLAR

1. Pena J.,Franco L.,Gomez F.,Iglesias A.,Pardo J.,Pombar M., Monte Carlo study of Siemens PRIMUS photoneutron production, Phys Med Biol. 2005
2. Ayyıldız Ü., Radyoterapide Kullanılan Kaynak Ve Dedektörlerin Çoklu Geometri Tekniği İle EGSnrc Monte Carlo Modellemesi, yüksek lisans tezi, 2005
3. Algüneş, 2002
4. T.C. Basbakanlik Atom Enerjisi Kurumu, Bilimsel Yayınlar No:2
5. Amutkan Ö, Hizlandiricilarin: Gelisimi, Tipleri, Fizigi ve Kullanım Alanlari, 2002
6. Jean Deken, SLAC Archives and History Office, 2003  
<http://www2.slac.stanford.edu/gallery/default.asp>.
7. Siemens AG, Medical Solutions, Primus Linear Accelerator, brochure, 2004.
8. D.W.O. Rogers, Fifty Years Of Monte Carlo Simulations For Medical Physics, Phys.Med.Biol.51, 2006.
9. Bielajew A.F., Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport, 2001.
10. Ford R.L. and Nelson W.R., "The EGS code system - Version 3," Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-210, 1978.
11. Nagel ,1965.
12. Bielajew F., Hirayama H., Nelson W. R. and Rogers D. W. O., National Research Council of Canada Report NRC-PIRS-0436, 1994.
13. Berger et al,1970.
14. Nelson W. R. and Jenkins T. M., "Computer Techniques in Radiation Transport and Dosimetry," Plenum Press, New York, 1980.
15. Lin SY.,Chu TC.,Lin JP., Monte Carlo simulation of a clinical linear accelerator, Appl Radiat Isot. 2001.
16. Sheikh-Bagheri D., Rogers DW., Ross CK., Seuntjens JP., Comparison of measured and Monte Carlo calculated dose distributions from the NRC linac, Med Phys.,2000.
17. Kawrakow I., Rogers D. W. O., The EGS Code System, NRCC Report Pirs-701, 2001.
18. Bielajew F., NRCC Report Pirs-0393, 1993.
19. Bielajew F. and Rogers D. W. O., NRCC Report Pirs-0394, 1993.
20. D.W.O. Rogers, B. Walters, I. Kawrakow, BEAMnrc User Manual, NRCC Report Pirs-0509, 2005.
21. Yegin G. and Rogers DWO, "EGS-mg : The multi-geometry package for EGSnrc", April 10,2005.

**Özgeçmiş**

Soyadı : Adigül

Adı : Mehmet

Doğum tarihi : 01.06.1980

Doğum yeri : İzmir

**Eğitim Durumu**

İlkokul : 1986–1991 Yeşilyurt İlkokulu İzmir

Ortaokul : 1991–1994 Agah Efendi İlköğretim Okulu İzmir

Lise : 1994–1997 İzmir Eşrefpaşa Lisesi

Lisans : 1998–2003 Celal Bayar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Yüksek Lisans : 2003– ... Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü