

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMIN  
RADYASYONU ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gizem ÇAKAL BİÇİCİ**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**MAYIS 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMIN  
RADYASYONU ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gizem ÇAKAL BİÇİCİ  
(302111009)**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Filiz BAYTAŞ**

**MAYIS 2015**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302111009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gizem ÇAKAL BİÇİCİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMIN RADYASYONU ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. A. Filiz BAYTAŞ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Zuhale ER**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **4 Mayıs 2015**  
**Savunma Tarihi :**      **26 Mayıs 2015**



*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, cam bilyeler ile gözenekli ortam oluşturularak gözenekli malzemelerin radyasyonu zayıflatma ve gözeneklilik özellikleri gama geçirgenlik tekniği kullanılarak incelenmiştir.

Yüksek Lisans Eğitimi hayatımın başlangıcından bu zamana kadar gerek ders aşamasında gerek tez aşamasında bilgi birikimini paylaşan, sabırlı, kararlı, cana yakın ve bunlarla birlikte sevgi dolu değerli hocam Sn. Prof. Dr. A. Filiz BAYTAŞ'a en içten duygularıyla saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen AİLEM'e ve daima beni motive eden ve bana yardımcı olan eşim H. Erçin BİÇİCİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Gizem Çakal Biçici  
(Fizikçi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
1.3 Hipotez.....	3
<b>2. GÖZENEKLİ ORTAMLARIN GAMA IŞINI GEÇİRGENLİK TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Gözenekli Ortam .....	5
2.2 Gözeneklilik .....	6
2.3 Gama Işını Geçirgenlik Tekniği.....	8
2.4 Gama Radyasyonunun Madde ile Etkileşmesi.....	9
2.5 Gama Işını Geçirgenlik Ölçümlerinin Gözenekli Ortamın İncelenmesinde Kullanımı .....	11
<b>3. DENEY KOŞULLARININ TANITIMI .....</b>	<b>13</b>
3.1 Deney Düzeneği .....	13
3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	15
<b>4. CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMDA RADYASYONUN ZAYIFLAMASI.....</b>	<b>19</b>
4.1 Gözenekli Ortam Modellerinin Radyasyon Zayıflatma Özelliklerinin İncelenmesi .....	19
4.1.1 M1 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	20
4.1.2 M2 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	21
4.1.3 M3 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	23
4.1.4 M4 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	24
4.1.5 M5 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	26
4.1.6 M6 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	27
4.1.7 M7 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar.....	29
4.2 Gözenekli Modellerin Gama Radyasyonunu Zayıflatma Mesafelerinin İncelenmesi .....	32
4.2.1 Gözenekli modellerin zırlama özellikleri .....	32
4.2.2 M3 ve M7 modellerinde gama radyasyonunun zayıflaması .....	34
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>37</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>41</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>43</b>



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Gözeneklilik ölçüm teknikleri .....	8
Çizelge 3.1 : <sup>60</sup> Co kaynağının radyoaktif özellikleri .....	13
Çizelge 3.2 : Modellerin tanımı ve kodlaması .....	16
Çizelge 4.1 : M1 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	21
Çizelge 4.2 : M2 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	22
Çizelge 4.3 : M3 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	24
Çizelge 4.4 : M4 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	25
Çizelge 4.5 : M5 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	27
Çizelge 4.6 : M6 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	28
Çizelge 4.7 : M7 modelinin kuru ve su ile doyurulmuş lineer zayıflatma katsayıları vegözeneklilik .....	29
Çizelge 4.8 : Gözenekli modellerin bağıl sayım-gözeneklilik açısından karşılaştırılması .....	31
Çizelge 4.9 : Modellerin kuru ortamdaki $\mu_k$ , $\lambda$ , $x_{1/2}$ ve $x_{10}$ değerleri .....	33
Çizelge 4.10 : Modellerin su ile doyurulmuş ortamdaki $\mu_d$ , $\lambda$ , $x_{1/2}$ ve $x_{10}$ değerleri .....	33
Çizelge 4.11 : Su ile doyurulmuş ortamdaki $\lambda$ , $x_{1/2}$ ve $x_{10}$ değerlerinin kuru ortamdaki değerlerine göre bağıl değişimi .....	34



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Doğal gözenekli ortam örnekleri .....	5
Şekil 2.2 : Metalik köpük.....	6
Şekil 2.3 : Tek düze kürelerin kübik ve eşkenar dörtgen dizilişi .....	7
Şekil 2.4 : Gama geçirgenlik tekniği şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.5 : Fotoelektrik olayın şematik gösterimi .....	9
Şekil 2.6 : Compton saçılmasının şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.7 : Çift oluşumu şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	14
Şekil 3.2 : Ölçüm sırasında deney düzeneğinin görünümü .....	14
Şekil 3.3 : Kaynak kolimatörün şematik gösterimi .....	14
Şekil 3.4 : Algılayıcı kolimatörün şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.5 : Dar demet geometrisini sağlayan kolimatörlerin görünümü.....	15
Şekil 3.6 : Pleksiglas kap .....	16
Şekil 3.7 : Sırasıyla arkadan öne doğru M1,M2,M3 .....	17
Şekil 3.8 : M4 ve M5 modelleri .....	17
Şekil 3.9 : M6 ve M7 modelleri .....	17
Şekil 3.10 : Pleksiglas kap üzerinde sayım alınan noktaların ölçekleri .....	18
Şekil 4.1 : M1 modelinin görünümü .....	20
Şekil 4.2 : M1 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.....	21
Şekil 4.3 : M2 modelinin görünümü .....	22
Şekil 4.4 : M2 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.....	23
Şekil 4.5 : M3 modelinin görünümü .....	23
Şekil 4.6 : M3 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.....	24
Şekil 4.7 : M4 modelinin görünümü .....	25
Şekil 4.8 : M4 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı .....	26
Şekil 4.9 : M5 modelinin görünümü .....	26
Şekil 4.10 : M5 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı .....	27
Şekil 4.11 : M6 modelinin görünümü.....	28
Şekil 4.12 : M6 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.....	28
Şekil 4.13 : M7 modelinin görünümü.....	29
Şekil 4.14 : M7 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.....	30
Şekil 4.15 : M3 modeli ile yapılan radyasyon zayıflatma ölçümü.....	35
Şekil 4.16 : M3 modelinde radyasyon zayıflaması .....	36
Şekil 4.17 : M7 modeli ile yapılan radyasyon zayıflatma ölçümü.....	36
Şekil 4.18 : M7 modelinde radyasyon zayıflaması .....	36





## CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMIN RADYASYONU ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİ

### ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, çeşitli çaptaki cam bilyeler ile düzenli, dağınık ve irili ufaklı gözenekli ortam modelleri oluşturularak gama geçirgenlik tekniği ile gözenekli ortamların gözeneklilik yapıları ve radyasyonu zayıflatma özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Gama geçirgenlik tekniği, geniş uygulama alanı bulunan tahribatsız bir yöntemdir. Ölçüm yapılacak malzeme kaynak ile dedektör arasına yerleştirilir, malzemeye gelen radyasyon şiddeti ile çıkan radyasyon şiddetinin sonuçları birarada değerlendirilir. Gama geçirgenlik tekniği, bilimsel çalışmalardan başka, sanayide, tıpta ve tarımda kullanılmaktadır. Sanayide demir, çelik gibi metallerin kalınlık ölçümlerinde, tıpta görüntüleme cihazlarının temelinde gama geçirgenlik yöntemi yer almaktadır. Tarımda ise toprağın suyu tutması ve gözenekliliği gibi araştırmalarda faydalanılmaktadır.

Gözenekli ortamlar, akciğerlerimizden dokulara, ekmekten tahtaya kadar doğada birçok malzemede karşımıza çıkmaktadır. Gözenekli ortamların, yalıtım malzemeleri, filtreler, ses ve ısı emilimi, gemi, uzay, uçak ve otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok alanda kullanımları vardır. Gözenekli malzemeler, hafif yapılar olmaları, enerji emiliminin yüksek olması ve yüksek performansı ucuz sağlamaları nedeniyle tercih edilirler. Öte yandan, küresel parçacıklarla oluşturulan gözenekli ortamlar en fazla çalışılan modellerdir. Özellikle kimya mühendisliğinde küresel parçacıklarla oluşturulan (paketlenen) gözenekli ortamların yapısal özelliklerinin ısı, kütle ve enerji transferi üzerindeki etkisi önem kazanmaktadır. Bu nedenle bu tip yapıların özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, cam bilyelerle oluşturulacak gözenekli ortamların radyasyon zayıflatma özelliklerinin incelenmesi ve böylece zırh malzemesi olarak kullanılabilirliklerinin araştırılmasıdır. Ayrıca bilyelerle oluşturulan ortamların gözenek dağılımlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, gözenekli ortam olarak üç farklı çaptaki cam bilyeler, pleksiglas kaplar içerisine yerleştirilerek, oluşturulan yedi farklı gözenekli ortam modeli kullanılmıştır. İlk olarak kuru modeller için gamaışını geçirgenlik ölçümleri yapılmış, daha sonra modeller suya doyurularak aynı ölçüm işlemleri tekrarlanmıştır. Tüm modellerde, sayımlar iki seviye ve sekiz farklı nokta olmak üzere alınmıştır. Daha sonra iki farklı model kullanılarak kalınlık ölçümü yapılmış ve gözenekli modellerin radyasyon zayıflatma kalınlıkları incelenmiştir.

Ölçümler, dar demet geometrisini sağlayan kolimatörler, NaI(Tl) sintilasyon algılayıcısı ve çok kanallı analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her ölçümün başında kaynak kolimatöre yerleştirilen <sup>60</sup>Co radyoizotopunun malzeme yokken üç kez ard arda sayım alınarak kaynak sayımı elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla M1-7 modelleri kolimatörler arasına yerleştirilerek ard arda sekiz farklı noktadan üçer kez

olmak üzere sayımlar alınmıştır. Malzeme kalınlığı olarak kabın kalınlığı alınmış ve lineer zayıflatma katsayısı hesaplanmıştır.

Gözeneklilikleri bulunmak istenilen modeller, su ile doyurularak aynı ölçüm işlemleri tekrarlanarak sayımlar alınmıştır. Literatürde bulunan denklemler kullanılarak her bir nokta için yerel gözeneklilik hesabı yapılmış ve tablolarla verilmiştir. Bunun yanı sıra en iyi zayıflatmaya sahip olan iki model seçilerek, kalınlık ölçümü iki seviyeden yapılmış, kalınlığa bağlı radyasyonun zayıflaması grafiklerle verilmiştir.

## **RADIATION ATTENUATION BY POROUS MEDIA CONTAINING SPHERICAL GLASSES**

### **SUMMARY**

Porous media is encountered in everyday life, in technology, and in nature. Examples of porous materials in daily life are sand, soil, ceramic, lungs as well as bread. The application fields of porous media are automotive, ship building, construction, air and space industries, as well as manufacture of insulation materials, and filters. There are many examples where porous media play important roles in technology and, conversely, many different types of technology that depend on or make use of porous media.

In recent years, the need of high damping materials has been increasing in many areas. Since high damping capacity materials reduce noise, they are mostly used and highly effective for environmental issues. Additionally, porous materials are used in fields such as attenuation of radiation shielding of nuclear waste and storage. Porous media can be used for shielding of radiation since they are lightweight and cost-efficient materials.

A new ultra-light structure based on the application of open-cell metal foams has been designed and investigated to determine its ability for attenuation of gamma-rays and thermal neutrons in. The radiation attenuation abilities of dry foams and foams filled with water and borated water are different from that of bulk Aluminum. The metallic foam by itself attenuates less gamma-ray as compared to bulk material, while the mass attenuation coefficients of foams filled with water is higher than that of bulk metals. Open-cell aluminum foams have been observed to be promising lightweight gamma-ray and thermal neutron shielding materials. In terms of the weight-saving advantage, the foams may be better gamma-ray shielding materials at the present energies.

Gamma transmission method based on a gamma radiation emitting from source of photons can pass through the material with the penetrated material to be inspected which is obtained by comparing the radiation data. The gamma-ray transmission method is used for the study of porous media properties. The porosity and linear attenuation coefficient are measured by using gamma attenuation data.

Gamma transmission technique are widely used in industry, medicine, agriculture as well as in scientific research. This method is used determination of material thickness in industrial lead, aluminum, steel and medical imaging devices based on gamma transmission method as well as agriculture, the information about soil porosity is achieved by using this method. The radiation attenuation properties of porous media can be determined by gamma-ray transmission technique and the method is also used to determination of properties of porous media.

Sphere packings are the most-studied type of porous media. Ordered structures include rhombohedral packings and cubic packings. Disordered packings exhibit a much smaller porosity range. The packing structure in fixed beds affects local fluid,

heat, and mass transport, which in turn influences macroscopic parameters in many chemical engineering operations. The packing structure for spherical particles is the most well studied and well understood of these systems.

Aim of this study is to examine the radiation attenuation properties of the porous media which includes spherical glasses and to search the ability of shielding of materials. Also, it is aimed that the porosity distributions of these materials are determined. The basis of this master's thesis is the investigation of structures of various porous media by using gamma transmission technique. The experimental works were performed on the existing narrow beam geometry in ITU Energy Institute  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray source and gamma permeability apparatus are used.

In this thesis, gamma radiation attenuation properties of a porous medium that includes spherical glasses were investigated by using the gamma transmission technique. Spherical glasses have various diameters such as 10, 5 and 1 mm. Porous media were obtained from spherical glasses inserted in a container at different models as regular, dispersed and mixed forms. Firstly, the gamma transmission measurements were carried out with dry porous materials which includes spherical glasses inserted into the Plexiglas container. In another part of the experiments, the porosity of the porous media with spherical glasses was determined. For this reason, all porous materials were saturated by water and gamma transmissions from saturated materials were measured in the same experimental conditions.

In all of the experiments, the measurements were performed for eight points of the container which includes spherical glasses. Through the use of radiation attenuation data for dry and saturated materials and basic equations, the porosities of porous media which contain spherical glasses were calculated. Porosity is a fraction of the volume of voids over the total volume and it is between 0 and 1. Local porosity values of porous model were performed by saturated medium. For this aim, the water was poured on the surface of porous medium in the Plexiglas container. The porous models were saturated means that the samples had 1 cm water content above the surface of porous medium. After saturation process, the gamma transmission measurements were taken at the same conditions that of dry medium.

Local porosity values of porous model were performed by saturated medium. For this aim, the water was poured on the surface of porous medium in the Plexiglas container. The porous models were saturated means that the samples had 1 cm water content above the surface of porous medium. After saturation process, the gamma transmission measurements were taken at the same conditions that of dry medium.

The experimental set-up consist of a NaI(Tl) detector (Ortec Model 802) and  $^{60}\text{Co}$  gamma source with 1250 keV gamma photons. Source-detector distance is 6,5 cm. The radioactive source was shielded by pin-hole collimator to obtain a narrow beam. The detector and source were housed in a 50 mm thick lead with a 7 mm diameter holed collimator. Size of Plexiglas container which is used to obtain porous material models with spherical glasses has 3x5x8 cm.

It was formed seven porous medium models with spherical glasses in this study. Models M1 and M2 were obtained that the spherical glasses were placed in the container over and over orderly. The spherical glasses have minimum diameter in model M3 and this material looks like sand. In model M4 was obtained that 5 mm diameter spherical glasses were placed in the container dispersedly. M5, M6 and M7 models were obtained that 10, 5 and 1-1,30 mm diameter spherical glasses were

placed in the container using two kinds of spherical glasses such as 10-1-1,30 mm, 5-1-1,30 mm and 10-5 mm, respectively.

The lowest porosity was determined for model M3 that included the smallest spherical glasses. Besides, the highest porosity was determined for model M1 that included the largest spherical glasses. The results showed that the attenuation of radiation decreases as the porosity of medium increases, and the porosity distribution in all porous models were not homogenous. However, the porosity values of models were closer in the bottom of container and near the container walls.



## 1. GİRİŞ

Radyasyon, televizyon ve radyoda iletişimi sağlayan radyo dalgaları, mutfakta kullanılan mikrodalga fırınlar, tıpta ve endüstride kullanılan X-ışınları ve güneş ışınları olmak üzere günlük hayatımızda karşımıza çıkmaktadır. İyonize radyasyon, atomdan elektron koparabilen ve dolayısıyla iyonize edebilen radyasyon türüdür. İlk iyonize radyasyonun varlığı 1895 yılında Wilhelm Röntgen tarafından X-ışınlarının keşfiyle başlamıştır. Daha sonra 1896 yılında Henri Becquerel tarafından doğal radyoaktivitenin keşfiyle devam etmiştir. Günümüze kadar gelen sürede radyasyonun hayatımızda kullanım alanları gittikçe artmıştır. Sanayi, tıp, güvenlik birimleri, silah üretimi, güç santralleri, atık yönetimi, sterilizasyon, arkeoloji olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Radyasyonun kullanım alanlarının artmasıyla birlikte güvenlik önlemlerinin alınması ile ilgili çalışmalarda önem kazanmıştır. İyonize radyasyonun malzeme ile etkileşmesi ile fotonun zayıflama katsayısının incelenmesi, malzemenin özelliğinin belirlenmesinde ve radyasyondan korunma açısından önemli olmaktadır. Bununla ilgili yapılan çalışmalarda teorik ve deneysel olmak üzere çok sayıda element için foton zayıflatma katsayıları belirlenmiştir. Hubbell [1] tarafından yapılan teorik çalışmada metallere biyolojik kökenli malzemelere kadar birçok farklı elementin kütleli zayıflatma katsayıları 1 keV – 20 MeV aralığındaki enerjilerle hesaplanmıştır.

Gama geçirgenlik tekniği kullanılarak foton zayıflatma katsayısını deneysel olarak bulmak mümkündür. Gama ışınları, malzeme ile etkileşmesi sonucu malzemedan çıkan radyasyon miktarına bakılarak ölçüm yapılan tahribatsız bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Gama geçirgenlik yöntemi ile El-Kateb ve Abdul-hamid [2] tarafından yapılan deneysel çalışmada ise, farklı malzemeler için foton zayıflatma katsayıları belirlenmiş ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Gözenekli ortamlar, gama ışını geçirgenlik tekniği kullanılarak özellikleri tayin edilebilir malzemelerdir. Gözeneklilik, gözenekli ortamların en önemli özelliklerinden biridir ve gama ışını geçirgenlik yöntemi ile bulunabilmektedir.

### **1.1 Tezin Amacı**

Gama geçirgenlik tekniği tahribatsız, hızlı ve güvenilir bir yöntemdir, bu yüzden sanayide, tıpta ve tarımda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, cam bilyelerden oluşturulan çeşitli gözenekli ortamların gama radyasyonunu zayıflatmaları ve gözeneklilik değerleri gama geçirgenlik tekniği ile deneysel olarak incelenmiştir.

### **1.2 Literatür Araştırması**

Literatürde, gözenekli ortam incelemelerinde çoğunlukla toprak ile yapılan çalışmalarda gama geçirgenlik tekniğinin kullanımı yaygındır. Toprak numunelere gama ışını gönderilip, gama verimi yüksek olan NaI(Tl) sintilasyon algılayıcısı tarafından numuneden geçen radyasyon miktarının ölçülmesi sonucu elde edilen zayıflama bilgisi incelenmiştir.

Baytaş ve Akbal [3] çalışmalarında gözenekli bir ortam olan toprağın özelliklerini gama ışını geçirgenlik tekniği kullanarak araştırmıştır. Türkiye'nin farklı bölgelerinden toprak örnekleri toplanmış ve 468 keV <sup>192</sup>Ir; 662 keV <sup>137</sup>Cs ve 1173 keV <sup>60</sup>Co enerjili gama ışınları ve NaI(Tl) detektörü kullanılarak toprak örneklerinin radyasyonu zayıflatmaları ölçülmüştür. Kuru toprağın kütle zayıflatma katsayısı farklı foton enerjileri için geçirgenlik ölçümlerinden hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, toprak örnekleri kalitesi bilinen su ile doyurulmuş, ortamın gözenekliliği ve su tutma özellikleri saptanmıştır. Sonuç olarak, eklenen su miktarı arttıkça ıslak toprağın lineer zayıflatma katsayısı kuru toprağinkine göre çok daha büyük olmaktadır. Gözeneklilik arttıkça toprağın su tutma kapasitesinin azaldığı görülmüştür.



Toprak ile yapılan diğer bir alışma, Medhat [4] tarafından toprak örneklerin radyasyon zayıflatmalarını ölçmek için, tek enerjili gama ışını, gama spektrometresi ve HpGe detektör kullanılmıştır. Toprağın kütle soğurma katsayıları geçirgenlik ölümlerinden hesaplanmıştır. WinXCom programı toprağın kütle soğurma katsayılarını hesaplamak için kullanılmıştır. Teorik ve deneysel değerler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Baytaş ve İşhakoğlu [5] çalışmalarında ise gözenekli ortam olarak kumu incelemişlerdir. Gama ışını geçirgenlik tekniği, bir gözenekli ortamın gözenekliliği, sıvı içeriği ve sıvı doygunluğunu tanımlamak için kullanılmıştır. Gama kaynağı olarak <sup>60</sup>Co (1332 keV), gözenekli ortam olarak Ottawa kumu ve sıvılar olarak su, etanol ve LNAPL (toluen) kullanılmıştır. Sıvının yoğunluğu arttıkça kum içerisinde kılcallık yoluyla yükselmesi artmıştır. Yoğunluğu en az olan etanoldür ve en az yükselmeye sahip olduğu görülmüştür. Gözenekli ortamın en uzun sürede suya, en kısa sürede LNAPL'e doyduduğu tespit edilmiştir.

Rabie ve diğerleri [6] zırhlamaya yönelik yaptıkları çalışmada gözenekli ve gözenekli olmayan alüminyum malzemelerin gama ışınları ve termal nötronları zayıflatmasını incelenmişlerdir. Sonuçlar ağırlıkça avantajlı olmasından dolayı gözenekli malzemelerin zırh malzemesi olarak kullanılabilereği gösterilmiştir.

Erdem ve diğerleri [7] yaptıkları çalışmada, insanların kozmik ışınlardan, doğal kaynaklı radyoizotoplardan, evlerde ve yiyeceklerde bulunan radyasyona maruz kaldığından, yüksek radyasyon seviyelerinin olduğu yerlerden korunmak amacıyla radyasyon zırhlamasının gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Bu çalışmada, kurşun içeren katı atık malzemenin gama radyasyonunu zırhlama özellikleri incelenmiştir. Atık malzeme aynı zamanda gözenekli bir yapıya sahiptir. Foton zayıflatma katsayısı deneysel olarak bulunmuş, beton ve kurşun için teorik olarak da hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılmış ve bu hafif malzemenin binalarda gama radyasyonunu zırhlama amacıyla kullanılabilereğine karar verilmiştir.

### **1.3 Hipotez**

Gama ışını geçirgenlik tekniği, zırh malzemesi olarak da kullanılabilen gözenekli ortamların gözeneklilik hesaplarında ve gama radyasyonunun zayıflatma özelliklerinin araştırılmasında kullanılan tahribatsız ve güvenilir bir yöntemdir.

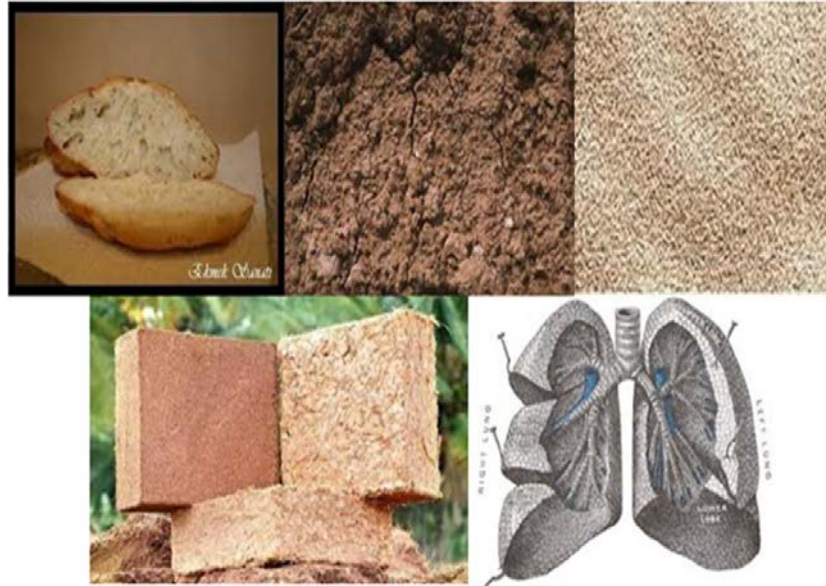


## 2. GÖZENEKLİ ORTAMLARIN GAMA IŞINI GEÇİRGENLİK TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

### 2.1 Gözenekli Ortam

Gözenekli malzemeler, günlük hayatımızda doğada ve teknolojide karşımıza çıkmaktadır. Gözenekli ortamlar, düzgün ve dağınık olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal gözenekli ortamlara örnekler; kum, toprak, tahta, akciğerler, kemikler ve ekmek verilebilir. Şekil 2.1’de doğal gözenekli ortam örnekleri verilmiştir. Doğal gözenekli ortam içinde bulunan boşluklar dağınık bir yapıdadır. Bir malzemeye gözenekli ortam denebilmesi için aşağıdaki özelliklerden en az birine sahip olması gerekir [8].

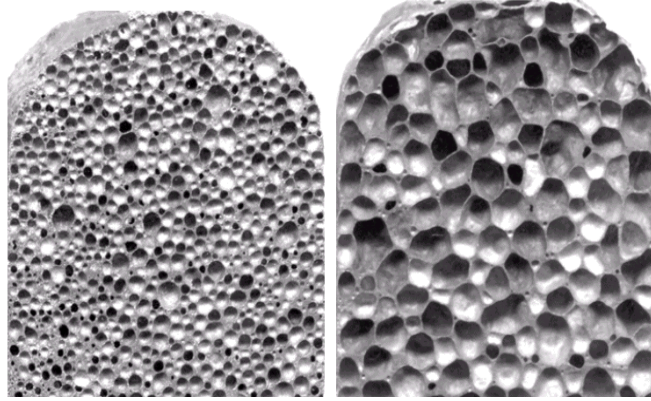
- Malzeme kendi boyutları ile karşılaştırıldığında içerisinde çok küçük ve birbiri ile irtibatlı boşluklar içerir. Bir katı iskelet içerisinde oluşan bu boşluklar, hava, su vb. akışkanlar veya farklı akışkanlardan oluşan karışımlar içerir.
- Akışkan katı malzemenin bir ucundan girip öbür ucundan çıkabilmelidir.



Şekil 2.1 : Doğal gözenekli ortam örnekleri.

Günümüzde, gözenekli malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Petrolün yeraltından çıkartılması, jeotermal enerji, kimyasal ve nükleer atıkların depolanması, yalıtım malzemelerinde, çakıl yataklı nükleer reaktörlerin tasarımında, doku içinde kan akışı ve ısı geçişi problemlerinde, hava ve uzay araçlarında aerodinamik ısınmanın önüne geçmek için kullanılan ısıl kalkan problemleri gibi çok sayıda bilimsel ve teknik alanda gözenekli ortam modellemesi kullanılmaktadır [9].

Teknolojinin birçok alanında gözenekli malzemeleri görmek mümkündür. Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Metalik köpükler; otomotiv, hava ve uzay, gemi inşa ve yapı endüstrisi, spor malzemelerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de metalik köpük örneği görülmektedir [10].



Şekil 2.2 : Metalik köpük.

## 2.2 Gözeneklilik

Gözeneklilik, bir malzeme içerisindeki boşlukların hacminin katı ve boşluk hacminden oluşan toplam hacme oranına denir.

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_t} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $\varepsilon$  gözenekliliği,  $V_g$  boşluk hacmini,  $V_t$  ise toplam hacmi göstermektedir.  $V_k$  katı hacmi olmak üzere,  $V_t = V_g + V_k$  şeklindedir. Denklem hacimlerin oranı şeklindedir ve dolayısıyla gözenekliliğin birimi yoktur. Bir malzemenin gözenekliliği 0 ile 1 arasında değişmektedir [8].

Mutlak veya toplam, ve etkin olmak üzere tip gözeneklilik vardır. Bunlar;

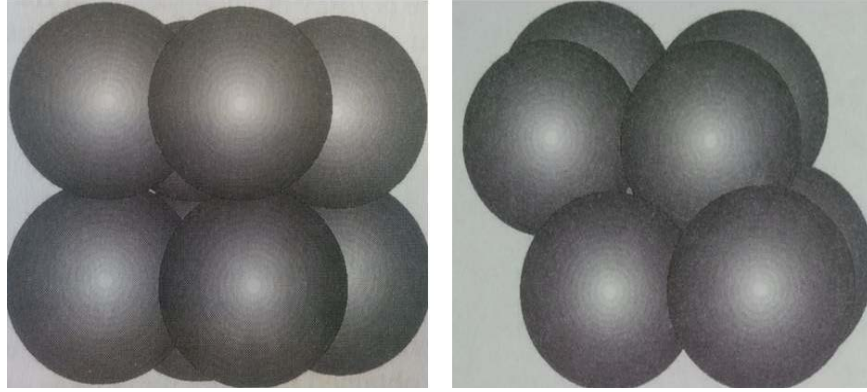
- Mutlak gözeneklilik: Gözenek ilişkileri düşünülmezsizin kaba hacme göre oransal boşluk hacmidir.

- Etkin gözeneklilik: Kaba hacim birbiri ile ilişkili boşlukların meydana getirdiği orandır.

Tekdüze kürelerin düzgün sıralanışı göz önüne alınarak, gözenekliliğin malzemenin yapısına bağlı değişimi incelenebilir. Şekil 2.3’de sırasıyla tekdüze kürelerin kübik ve eşkenar dörtgen şeklinde dizilişi sonucu birim hücrelerde oluşan gözeneklilik görülmektedir.

Teorik olarak tekdüze kürelerin sıralanışı sonucu oluşan gözeneklilik ile kürelerin büyüklüğü birbirinden bağımsız ise de, doğal maddelerde durum aynı değildir. Tekdüze tane boyutundaki kumlarda tane boyutunun küçülmesi ile gözenekliliğin arttığı görülmektedir. Yani tane boyutu, tekdüze tane büyüklüğüne sahip katlaşmamış doğal maddelerde bunların gözeneklilik değerleri ile ters orantılıdır [11].

Tane büyüklüğünün çeşitli olması, büyük tanelerin arasında kalan boşlukların daha küçük boyuttaki tanelerle dolmasına ve gözenekliliğin azalmasına yol açar. Bu nedenle, tane boyutu değişken olan bir malzeme, iyi elenmiş ve tane boyutu neredeyse tekdüze hale getirilmiş bir malzemedен daha düşük değerde bir gözenekliliğe sahiptir.



**Şekil 2.3 :** Tek düze kürelerin kübik ve eşkenar dörtgen dizilişi [12].

Mutlak (gerçek) gözeneklilik ve etkin (effektif) gözeneklilik için farklı ölçüm teknikleri mevcuttur. Çizelge 2.1’de farklı ölçüm teknikleri ile ölçümde kullanılan büyüklükler verilmiş olup hangi gözeneklilik türünün belirlendiği ve bölgesel olarak ölçümün mümkün olup olmadığına değinilmiştir. Bölgesel gözeneklilik ölçüm olasılığı sadece fotoğraf ve gama geçirgenlik tekniğinde mümkün olmaktadır [13].

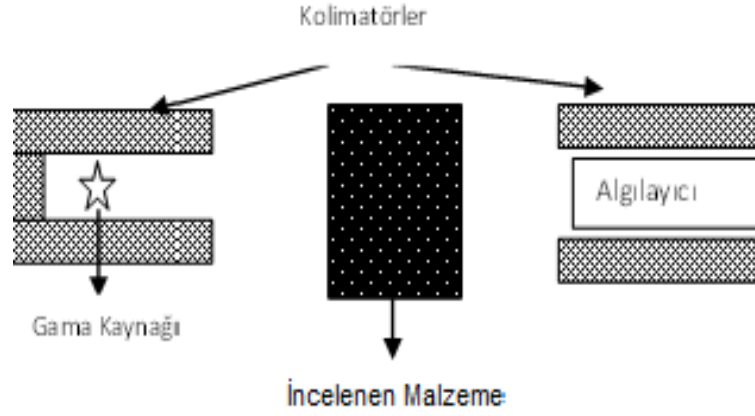
**Çizelge 2.1** : Gözeneklilik ölçüm teknikleri [13].

Teknik	Temel İlke	Ölçüm Büyüklüğü	Gözeneklilik Türü	Bölgesel Ölçüm Olasılığı
Doğrudan Ölçüm	Kaba hacmin toplam hacme oranı	Hacim	Mutlak	Yok
Fotoğraf (İki boyutlu)	Katı alanların toplamının boşluk alanlarınıninkine oranı	Alan	Mutlak	Var
Emme (Islatan sıvı)	Islatan akışkanı tamamen emmiş kütlenin kuru kütleye oranı	Kütle ve Hacim	Etkin	Yok
Civa Enjeksiyonu (Islatmayan sıvı)	Ortam içerisinde ilerleyen civanın hacmi	Hacim	Etkin	Yok
Gaz Enjeksiyonu	Genleşmeden önce ve sonraki ortamı bir arada tutan basınç	Basınç ve Hacim	Etkin	Yok
Gamma Işını Geçirgenliği	Genleşmeden önce ve sonraki ortamdan geçen gama ışınının aynı kalınlıktaki bir katı maddeden geçerkenki zayıflatması ile karşılaştırılması	Radyasyon Şiddeti	Mutlak	Var

Bu yüksek lisans tez çalışmasında da, farklı çaplardaki cam bilyelerin düzgün, dağınık ve irili ufaklı bir şekilde pleksiglas kap içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulan farklı gözenekli ortamların gama radyasyonunu zayıflatma özellikleri incelenmiştir.

### 2.3 Gama Işını Geçirgenlik Tekniği

Endüstri, tıp, tarım gibi birçok farklı dalda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan gama geçirgenlik tekniği şematik olarak Şekil 2.4'de görülmektedir. Gama kaynağından çıkan fotonlar madde ile etkileşime girerek zayıflarlar ve diğer taraftaki algılayıcıya ulaşırlar. Algılayıcıya gelen fotonlar, bu defa algılayıcı malzemesi ile etkileşip zayıf bir sinyal üretirler. Bu sinyal yükselticide ölçülebilir düzeye getirilir ve sayıcıdan okunan değer radyasyonun birim zamandaki şiddetini verir. Gama fotonunun zayıflaması, incelenen malzemenin özelliklerine bağlı olarak gerçekleşir. Bu nedenle gama-ışını geçirgenlik deneyi ile elde edilen sonuçlar malzemenin özellikleri hakkında doğrudan bilgi vermektedir.



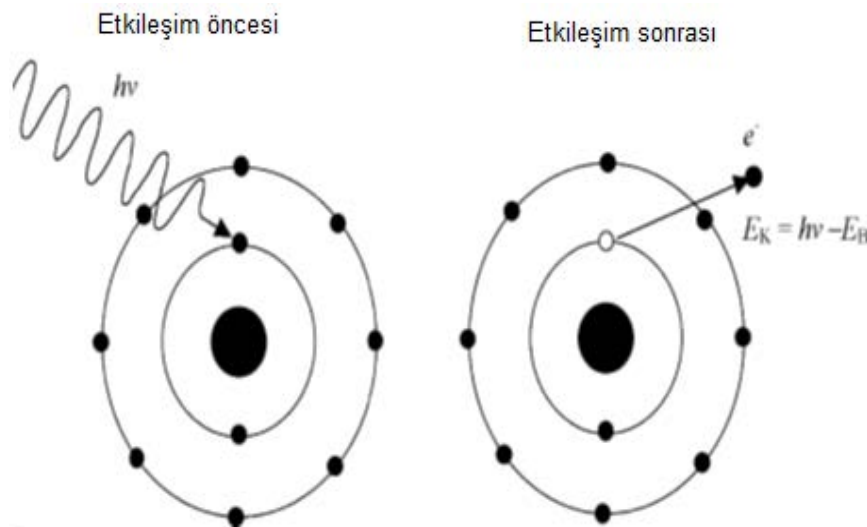
Şekil 2.4 : Gama geçirgenlik tekniği şematik gösterimi.

## 2.4 Gama Radyasyonunun Madde ile Etkileşmesi

Gama ışınlarının madde ile etkileşimi mekanizmaları, enerjilerine bağlı olarak düşük enerjiden yükseğe doğru fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur.

Fotoelektrik Olay;

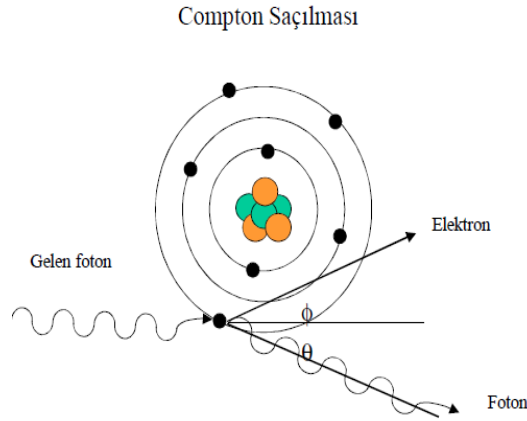
Fotonun soğurucu atomla çarpışıp tamamının soğurulması “fotoelektrik olay” olarak bilinir. Foton enerjisinin soğurulması sonucu iç yörüngeden fotoelektron atılır. Fotoelektronun atılmasını takiben, dış yörüngeden diğer bir elektron boşluk bulunan yörüngeye geçer, bu geçişte karakteristik X-ışınları yayımlanır. Bunlar, ilk gama radyasyonu ile karşılaştırıldıklarında düşük enerjilidirler. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi Şekil 2.5’te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Fotoelektrik olayın şematik gösterimi[14].

### Compton Saçılması;

Gama ışını soğurucu madde atomunun dış elektronuyla esnek çarpışma yapınca Compton saçılması gerçekleşir. Çarpışmada moment ve enerji korunur, gelen foton enerjisinin bir kısmı elektrona transfer edilir ve foton geliş yolundan sapar. Saçılan fotonun enerjisi bir miktar azalmış olur. Compton saçılması foton ve elektron arasında olduğundan, miktarı serbest elektronların sayısına bağlıdır. Compton saçılmasında, gelen fotonun enerjisi elektronun atoma bağlanma enerjisi yanında çok büyük olduğu için elektron serbest kabul edilir. Şekil 2.6'da Compton saçılması şematik olarak gösterilmiştir. Saçılan foton daha düşük enerjili olduğundan ortamda fotoelektrik etkileşme yapabilir.

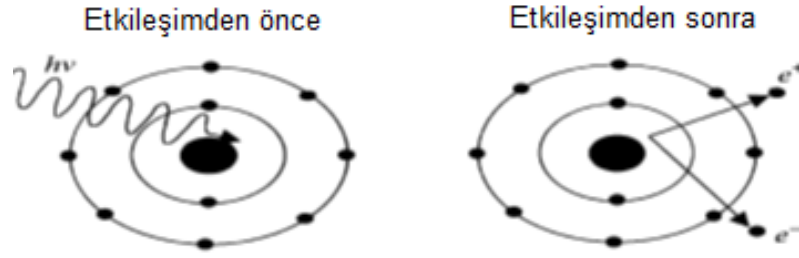


**Şekil 2.6 :** Compton saçılmasının şematik gösterimi[14].

### Çift Oluşumu;

Gama ışınının enerjisi, elektronun durgun enerjisinin iki katından 1,02 MeV'den fazla ise çift oluşumu olasılığı artar. Çift oluşumunda, foton çekirdeğin coulomb alanı etkisi ile kaybolur, yerine elektron pozitron çifti oluşur. Çift oluşumunun şematik gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir. Gama fotonunun enerjisi 1,02 MeV'in üstünde olduğu zaman bu enerji genellikle elektron ve pozitron tarafından kinetik enerjisi olarak paylaşılır. Pozitron yavaşlayıp malzeme atomlarının birisinin elektronu ile birleşerek birbirine zıt yönde yayınan iki tükeniş (annihilation) fotonuna dönüşür. Çift oluşumu olasılığı malzemenin atom numarasının karesi ile orantılı olarak artar. Öte yandan, gama fotonunun enerjisinin artmasıyla fotoelektrik ve compton olayları azalır ve çift oluşum olasılığı artar [15].





Şekil 2.7 : Çift oluşumu şematik gösterimi[14].

## 2.5 Gama Işını Geçirgenlik Ölçümlerinin Gözenekli Ortamın İncelenmesinde Kullanımı

Gama fotonu, içinde akışkan içermeyen kuru bir malzeme içerisinde Lambert-Beer kanuna göre üstel şekilde zayıflar.

$$I_k = I_0 \exp(-\mu_k x_k) \quad (2.2)$$

$I_0$  gelen radyasyonun şiddetini,  $I_k$  kuru gözenekli ortam tarafından zayıflatılmış radyasyonun şiddetini,  $x_k$  (cm) kuru malzeme kalınlığını,  $\mu_k$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) malzemenin lineer zayıflama katsayısını göstermektedir.

Malzeme suya doyurulduktan sonra, doymuş malzemede zayıflayan radyasyon şiddeti,

$$I_{sd} = I_0 \exp(-\mu_k x - \mu_s x_{sd}) \quad (2.3)$$

şeklinindedir [16]. Burada;  $I_{sd}$  doymuş gözenekli malzemeden geçen radyasyon şiddetini,  $x_{sd}$  (cm) %100 doymuş ortamda temsili sıvı kalınlığını,  $\mu_s$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) suyun lineer zayıflama katsayısını göstermektedir. Gözenekli ortamın suya doyması, suyun yavaş bir şekilde ortama eklenmesi ve bu işlemin gözenekli ortam yüzeyinde 1 cm su kalıncaya kadar devam etmesi ile gerçekleşir [16]. Denklem (2.2) ve (2.3) kullanılarak temsili sıvı kalınlığı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$x_{sd} = \frac{\ln(I_k / I_{sd})}{\mu_s} \quad (2.4)$$

Gözeneklilik tanımından hareketle, kuru gözenekli malzeme kalınlığı ve temsili sıvı kalınlığı kullanılarak gözeneklilik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon = \frac{x_{sd}}{(x_{sd} + x_k)} \quad (2.5)$$

Denklem (2.4), (2.5)'de yerine konup yeniden düzenlenirse gözeneklilik aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{X_k \mu_s}{\ln(I_k/I_{sd})}\right)^{-1} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da görüldüğü gibi kuru gözenekli ortam kalınlığı, suyun lineer zayıflatma katsayısı, kuru gözenekli ortamdan geçen radyasyon şiddeti ve suya doymuş gözenekli ortamdan geçen radyasyon şiddeti kullanılarak, gözeneklilik deneysel olarak belirlenebilmektedir.

### 3. DENEY KOŞULLARININ TANITIMI

#### 3.1 DeneY Düzenegİ

Bu tez çalışmasında, değişik çaptaki cam bilyelerle oluşturulan gözenekli ortam modellerinde radyasyonun zayıflatması ve gözenek yapısının belirlenmesi, dar demet geometrili gama geçirgenlik düzeneği kullanılarak incelenmiştir. DeneY düzeneği şematik olarak Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.2’de ölçüm sırasında deneY düzeneğinin fotoğrafı bulunmaktadır.

Radyasyon kaynağı;

Bu çalışmada radyasyon kaynağı olarak <sup>60</sup>Co radyoizotopu kullanılmıştır. Kullanılan kaynak İ.T.Ü Enerji Enstitüsü Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı’na ait Radyoizotop Laboratuvarı’ndan temin edilmiştir. Kaynağın radyoaktif özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1 :** <sup>60</sup>Co kaynağının radyoaktif özellikleri.

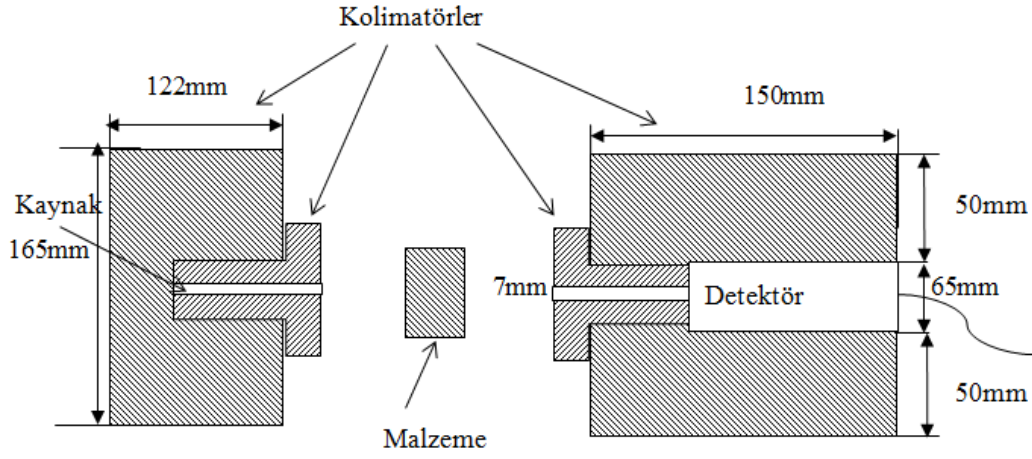
Kaynak	Yarıömür(yıl)	Enerji(keV)	Aktivitesi(μCi)
<sup>60</sup> Co	5,27	1173(100) 1332(100)	8,38

Sayım sistemi;

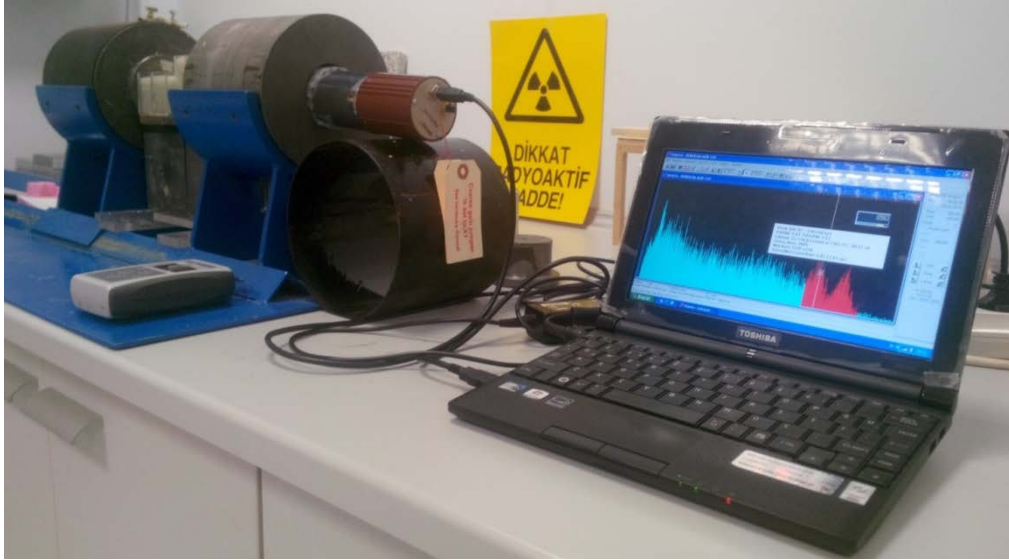
Çalışmada gama verimi yüksek olan NaI(Tl) sintilasyon algılayıcı ve bir ORTEC marka MODEL 802-2x2 çok kanallı analizörü kullanılmıştır.

Kurşun kolimatörler;

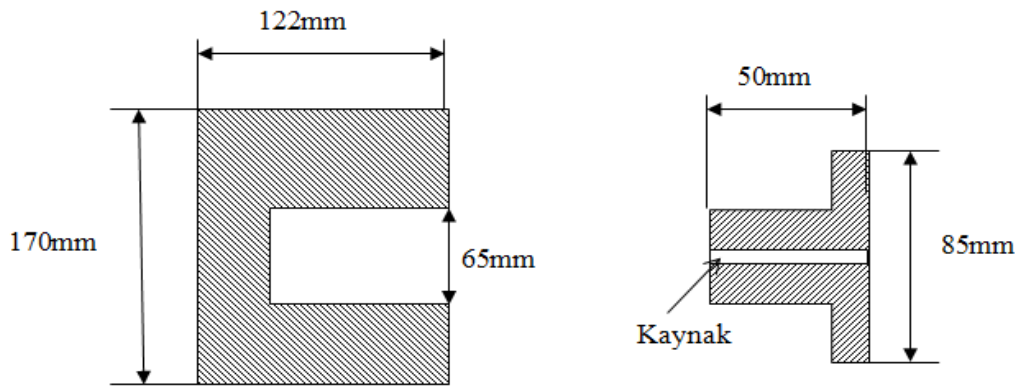
Dar demet geometrisi malzemenin incelenen kesitine ait yerel özelliklerin belirlenmesini sağlamaktadır. Ölçüm düzeneğinde dar demet geometrisi, kaynak ve algılayıcı tarafına yerleştirilen kolimatörler ile oluşturulmaktadır. Kaynak ve algılayıcı kolimatörlerinin şematik gösterimleri Şekil 3.3 ve 3.4’te verilmiştir. Şekil 3.5’te deneY düzeneğinde kolimatörlerin yerleşimi görülmektedir.



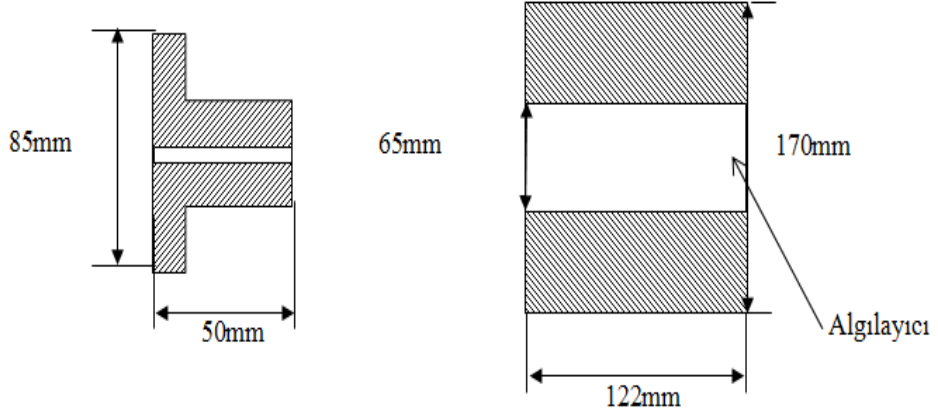
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şematik gösterim.



Şekil 3.2 : Ölçüm sırasında deney düzeneğinin görünümü.



Şekil 3.3 : Kaynak kolimatörün şematik gösterimi.



Şekil 3.4 : Algılayıcı kolimatörün şematik gösterimi.



Şekil 3.5 : Dar demet geometrisini sağlayan kolimatörlerin görünümü.

### 3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Cam bilyeler;

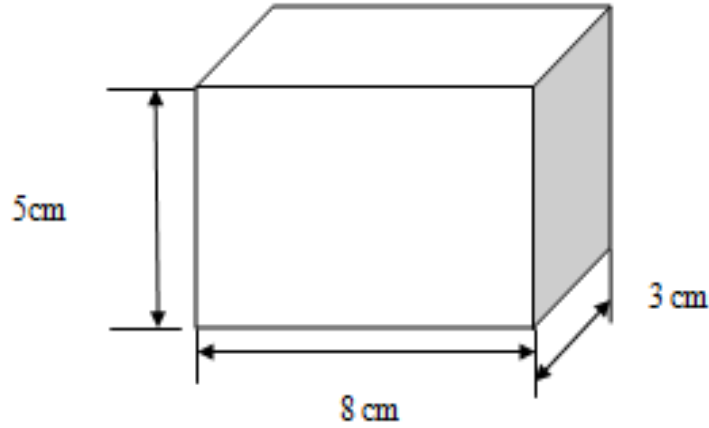
Çapları en büyüğü 10 mm, ikincisi 5 mm ve en küçüğü 1-1,30 mm olan cam bilyelerin ana maddesi ( $\text{SiO}_2$ ) silisyumdur. Üç farklı çaptaki cam bilyeler kullanılarak farklı modeller tasarlanmıştır. Cam bilyeler pleksiglas kap içerisine düzgün, dağınık ve irili ufaklı olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Deney kabı;

Deneyde pleksiglas malzemeden yapılmış 3x5x8 cm boyutlarında prizmatik bir kap kullanılmıştır. Kabın et kalınlığı 3 mm'dir. Şekil 3.6'da şematik olarak pleksiglas kabın boyutları gösterilmiştir.

## Modeller

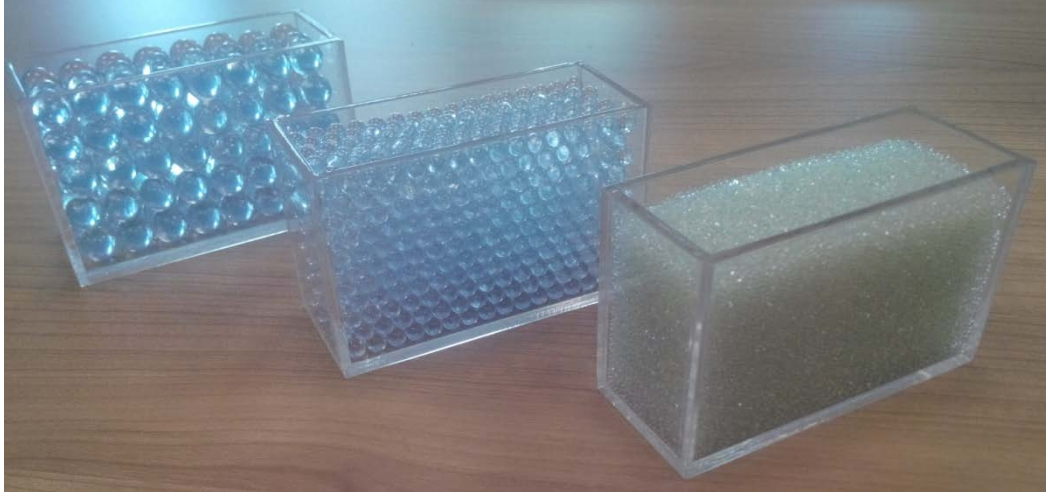
Farklı gözenekli ortamlar elde etmek için üç farklı çaptaki cam bilyelerle modeller oluşturulmuştur. Deneysel çalışmaların takibini kolaylaştırmak amacı ile oluşturulan modeller Çizelge 3.2’de görüleceği gibi kodlanmıştır. Modellerin görünümü ise Şekil 3.7 , Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmiştir.



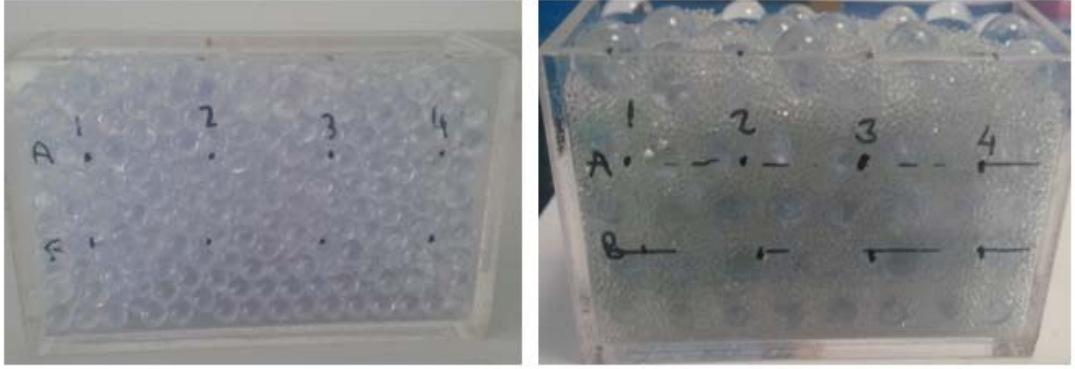
Şekil 3.6 : Pleksiglas kap.

Çizelge 3.2 : Modellerin tanımı ve kodlaması.

M1	10 mm çaplı cam bilyelerin pleksiglas kap içerisine düzenli dizilmesi
M2	5 mm çaplı cam bilyelerin pleksiglas kap içerisine düzenli dizilmesi
M3	1-1,30 mm çaplı cam bilyelerin pleksiglas kap içerisine yerleştirilmesi
M4	5 mm çaplı bilyelerin gelişi güzel yerleştirilmesi
M5	10 mm çaplı bilyelerin düzenli dizilerek aralarına 1-1,30 mm çaplı cam bilyelerin doldurulması
M6	5 mm çaplı cam bilyelerin boşluklarının 1-1,30 mm çaplı cam bilyelerle doldurulması
M7	Bir sıra 5 mm çaplı cam bilyeler bir sıra 10 mm çaplı bilyelerle oluşturulan model



Şekil 3.7 : Sırasıyla arkadan öne doğru M1,M2,M3.

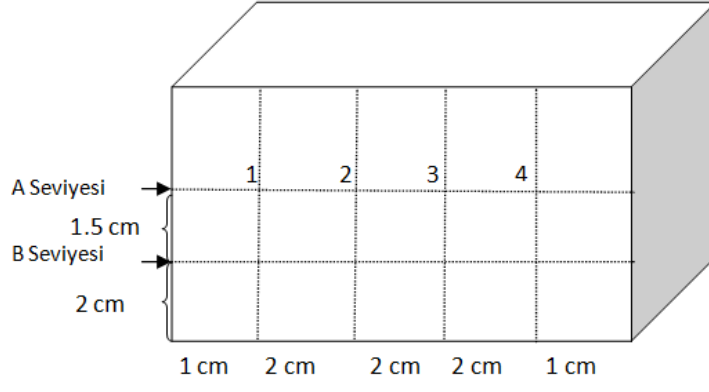


Şekil 3.8 : M4 ve M5 modelleri.



Şekil 3.9 : M6 ve M7 modelleri.

Şekil 3.8'den de görüleceği gibi, gözenekli yapı hakkında daha çok bilgi edinmek amacı ile sayımlar pleksiglas kap üzerine iki seviyeden ve dörder farklı noktadan olmak üzere 8 noktadan gerçekleştirilmiştir. Ölçüm alınan noktaların ölçeklendirilmesi Şekil 3.10'da verilmiştir.



**Şekil 3.10** : Pleksiglas kap üzerinde sayım alınan noktaların ölçekleri.



## **4. CAM BİLYELERLE OLUŞTURULAN GÖZENEKLİ ORTAMDA RADYASYONUN ZAYIFLAMASI**

Bu yüksek lisans tez çalışmasında cam bilyelerle oluşturulan gözenekli ortamda radyasyonun zayıflaması ve gözenekli modellerin gözenek yapısı deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda gözenekli ortamların kuru ve suya doyurulmuş halleri kullanılmıştır. Radyasyonun kuru ve suya doyurulmuş malzemede zayıflaması ile ilgili bilgiler gözenekli yapının özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

### **4.1 Gözenekli Ortam Modellerinin Radyasyon Zayıflatma Özelliklerinin İncelenmesi**

Cam bilyelerle yapılan deneysel çalışmalarda dar demet geometrili gama geçirgenlik sistemi kaynak kolimatörü ile algılayıcı kolimatörü arasındaki uzaklık 6,5 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. İki farklı seviye ve sekiz farklı nokta olmak üzere ölçüm alınacak noktalardan radyasyonun geçmesini sağlamak için düzenek hazırlanmıştır.  $^{60}\text{Co}$  kaynağı kaynak kolimatöre yerleştirilmiş, 600'er saniye sayım süresi alınmış ve  $^{60}\text{Co}$  radyoizotopu için 1,25 MeV ortalama enerji pikindeki değerler ölçülmüştür. İlk olarak ortamda malzeme yokken ard arda üç sayım alınarak kaynak sayımı,  $I_0$  değerleri, saptanmıştır. Tez çalışmasında kolaylık olması için gözenekli ortam modelleri kodlarla tanımlanmıştır. Tüm modeller için kuru ve su ile doyurulmuş malzeme için sayımlar ortam sayımında olduğu gibi ard arda üç kez alınmıştır. Elde edilen sayımlardan her bir model için bağıl sayımlar hesaplanmış ve malzeme kalınlığı olarak pleksiglas kabın kalınlığı alınarak Lambert Beer Kanunu'na göre Denklem (2.2) kullanılarak lineer zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra kuru ve su ile doyurulmuş modellerin radyasyon zayıflatma değerleri, suyun lineer zayıflatma katsayısı ve Denklem (2.6) kullanılarak her bir model için yerel gözeneklilik hesapları yapılmıştır. Suyun lineer zayıflatma katsayısı aynı dar demet geometrili ölçüm sistemi ve 1,25 MeV enerji için 0.056999 1/cm dir [14].

Her bir modelin sekiz farklı noktadan alınan sayımların ortalamasıyla elde edilen kuru ortam için bağıl radyasyon şiddeti,  $I_k/I_0$ ,  $\mu_k$  (kuru ortamın lineer zayıflatma katsayısı),  $\mu_d$  (su ile doymuş ortamın lineer zayıflatma katsayısı) ve  $\epsilon$  (gözeneklilik) değerleri şekil ve çizelgelerle verilmiştir.

#### 4.1.1 M1 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

Pleksiglas kap içerisine Şekil 4.1'deki gibi düzgün olarak yerleştiren M1 modelinde kuru ve su ile doyurulmuş sayımlar gama geçirgenlik tekniği kullanılarak, A ve B seviyeleri olmak üzere sekiz farklı noktadan, ilk olarak kuru ortam için, daha sonra su ile doyurulmuş ortam için sayımlar alınmıştır. Alınan sayımlardan yola çıkarak Denklem (2.2) kullanılarak kuru ve suyla doymuş ortamların lineer zayıflatma katsayıları ve Denklem (2.6) kullanılarak da gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kalınlık olarak kabaca kabın genişliği 3,6 cm alınmıştır.

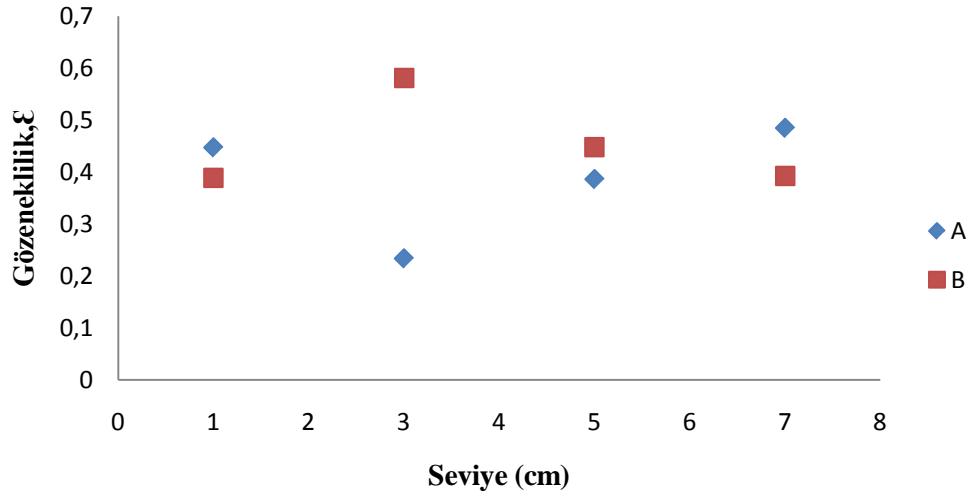


Şekil 4.1 : M1 modelinin görünümü.

M1 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Suyu doymuş ortamda, gözenekler su ile dolduğu için radyasyon zayıflatma miktarında ve dolayısıyla lineer zayıflatma katsayısında artış olmuştur. Yerel gözeneklilik değerleri sekiz farklı nokta için 0.23356 ile 0.58123 arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra A ve B seviyeleri için ortalama gözeneklilik değerlerine bakılacak olursa B seviyesindeki gözeneklilik miktarı daha fazladır. Bunun nedeni, ölçüm alınan noktalar kap içerisine bilyeler yerleştirilmeden önce belirlenmiştir. A seviyesinde ölçüm alınan noktalar bilyeler üzerine geliyorken, B seviyesinde bazı noktalarda boşlukla karşılaşmıştır. A ve B seviyelerinin gözeneklilik dağılımı Şekil 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** M1 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.03809	0.09821	0.44710
A2	0.05904	0.09043	0.23356
A3	0.02677	0.07665	0.38612
A4	0.02147	0.08911	0.48468
B1	0.04694	0.09713	0.38824
B2	0.02546	0.11860	0.58123
B3	0.03239	0.10025	0.44739
B4	0.05870	0.10940	0.39150



**Şekil 4.2 :** M1 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.2 M2 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M2 modelinde, pleksiglas kap içerisine 5 mm çaplı cam bilyeler düzgün bir şekilde dizilmiştir. Cam bilyeler tabakalar halinde iki bilye arasına bir bilye gelecek şekilde dizilmiştir. Dizilim sırasında meydana gelen duvar etkisi nedeniyle kabın bir tarafında bilyelerde düzensizlik meydana gelmiştir. M2 modeli pleksiglas kap içerisine Şekil 4.3'deki gibi yerleştirilmiştir.

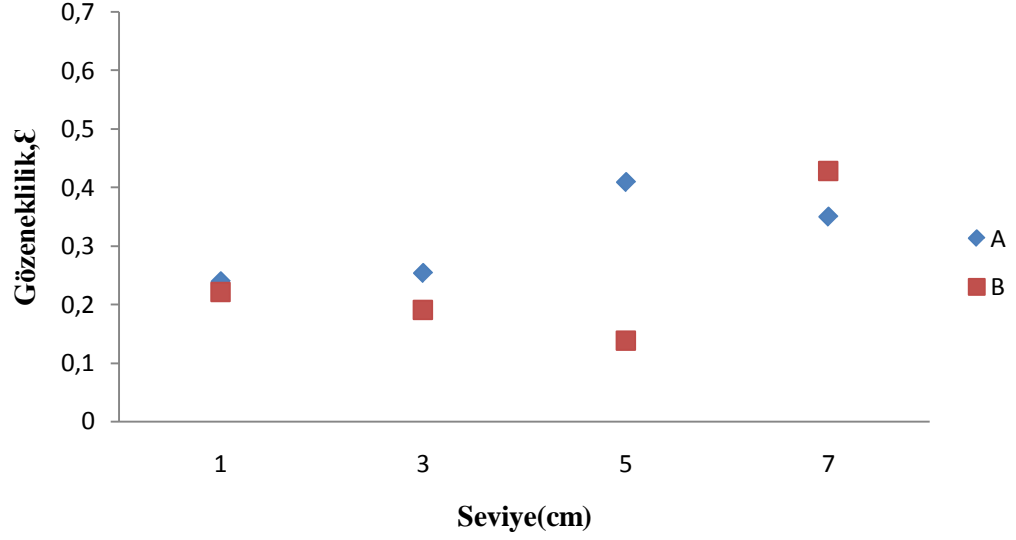


**Şekil 4.3 :** M2 modelinin görünümü.

M1 modelinde uygulanan deneysel çalışmalar ve hesaplamalar M2 modeli için tekrarlanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. M2 modeli için seviyelere göre gözeneklilik dağılımı Şekil 4.4’de görülmektedir. 5 mm çaplı cam bilyelerin pleksiglas kap içerisinde diziliminden meydana gelen duvar etkisi nedeniyle A3, A4 ve B4 seviyelerinde gözeneklilik değerlerinin diğer seviyelerden fazla olduğu, kabın tabanından yüzeye doğru gittikçe düzensizliğin ve gözenekliliğin arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra taban seviyeye yakın olan B seviyesine indikçe gözenekliliğin azaldığı ve alt tabakadaki dizilimin daha sıkı olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** M2 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.08530	0.10325	0.23954
A2	0.09406	0.11344	0.25372
A3	0.08476	0.12417	0.40873
A4	0.09339	0.12402	0.34959
B1	0.09018	0.10630	0.22043
B2	0.11546	0.11921	0.19021
B3	0.09358	0.10268	0.13772
B4	0.09400	0.13651	0.42727



**Şekil 4.4 :** M2 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.3 M3 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M3 modelinde yer alan cam bilyeler tıpkı kum tanelerine benzemektedir. Çok küçük oldukları için düzenli dizmek mümkün değildir. Bu yüzden kap içerisine belli bir seviyeye kadar doldurulmuştur. Kuru ve su ile doyurulmuş gözenekli ortam için, iki seviye ve sekiz farklı noktadan sayımlar alınmıştır. M1 ve M2 modeli için yapılan ölçümler ve hesaplamalar M3 modeli içinde tekrarlanmıştır. M3 modelinin dizilimi Şekil 4.5’te verilmiştir.



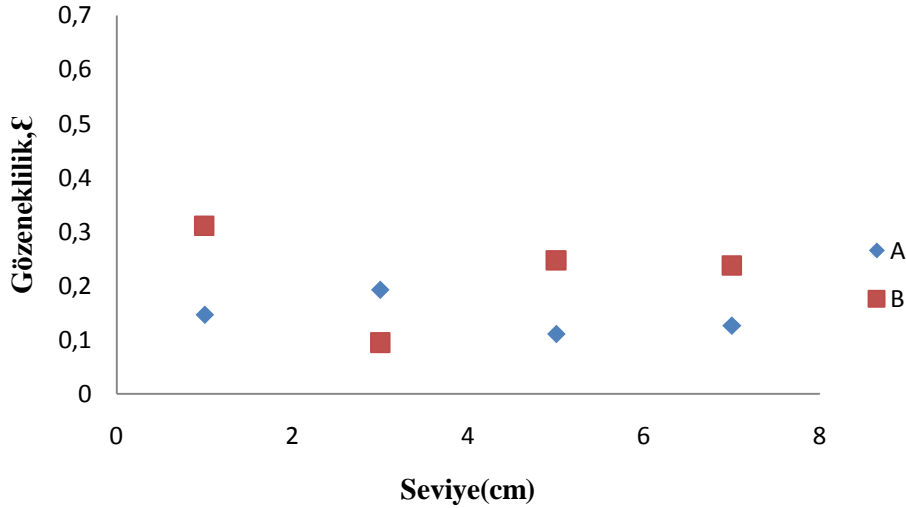
**Şekil 4.5 :** M3 modeli.

Sayımlardan yararlanılarak lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik hesapları yapılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.3’de verilmiştir. Dağınık gözeneklilik

yapısında olduğu için, her bir noktadaki gözeneklilik değerlerinde farklılıklar görülmüştür. Buna ek olarak, Şekil 4.6’da M3 modeli için yerel gözeneklilik dağılımı gösterilmiştir. En az gözeneklilik M3 modelinde bulunmuştur. Genel gözeneklilik dağılımına bakıldığında bir kaç nokta dışında gözeneklilik değerleri birbirine yakındır.

**Çizelge 4.3 :** M3 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.08345	0.09014	0.14670
A2	0.10159	0.11211	0.19286
A3	0.10461	0.10860	0.11066
A4	0.11093	0.11608	0.12646
B1	0.10425	0.12681	0.31044
B2	0.10793	0.11074	0.09399
B3	0.10762	0.12317	0.24660
B4	0.11341	0.12799	0.23675



**Şekil 4.6 :** M3 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.4 M4 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M4 modelinde 5 mm çaplı cam bilyeler kap içerisine gelişigüzel yerleştirilmiştir. 10 mm çaplı cam bilyelerle büyük boşluklar meydana geldiği için, bu çaptaki bilyeler gelişigüzel yerleştirilerek model oluşturulmamıştır. 1-1,30 mm çaplı cam bilyeler ise çok küçük olduğu için sadece dağınık yerleştirilebilmiştir. 5 mm çaplı cam bilyelerle ilk olarak düzgün dizilerek ölçüm alınmıştır. Daha sonra gelişigüzel dizilmesi mümkün olduğundan M4 modeli oluşturulmuştur. Gözeneklilik değerlerinin

gelişigüzel dizilmesi sonucu nasıl değiştiği incelenmiştir. M4 modelinin pleksiglas kap içerisine dizilimi Şekil 4.7’de verilmiştir.

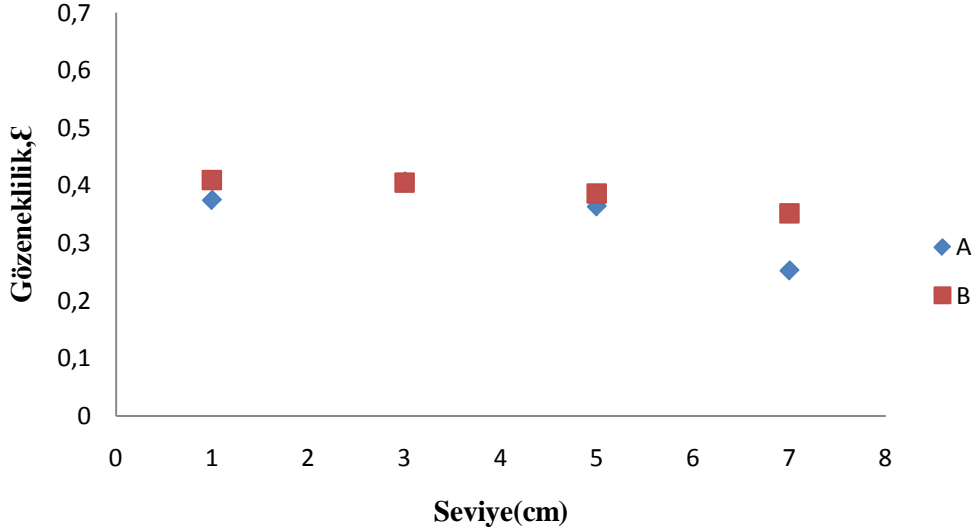


**Şekil 4.7 :** M4 modeli.

M4 modeli için yapılan hesaplamalar ve elde edilen değerler Çizelge 4.4’de verilmiştir. M4 modelindeki gözeneklilik değerleri 0.25177 ile 0.40884 arasında değişmektedir. Bölgesel olarak gözeneklilik değerleri birbirine yakındır. Bunun nedeni düzensiz dizilimden dolayı oluşan boşluklardandır. M2 modelinde ise gözeneklilik değerleri 0.13772 ile 0.40873 arasında değişmektedir. Gözenekliliğin azalmasının nedeni düzenli dizilim sonucu boşlukların azalmasıdır. Gözenekliliğin seviyeye bağlı değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.

**Çizelge 4.4 :** M4 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

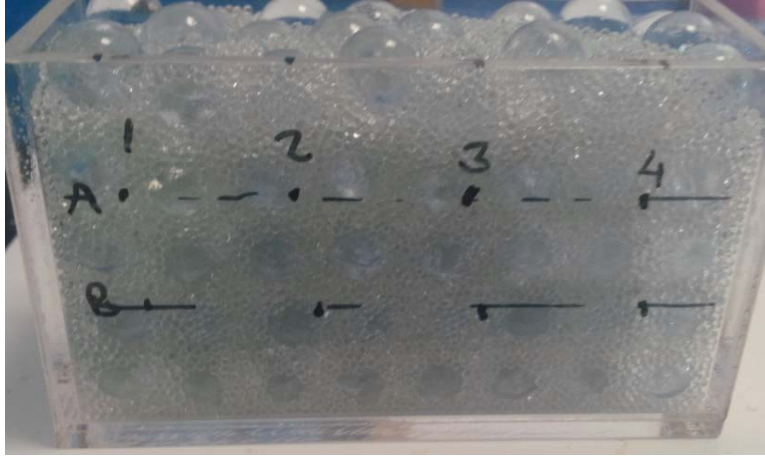
Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon_s$ Gözeneklilik
A1	0.08750	0.12148	0.37411
A2	0.08202	0.12092	0.40622
A3	0.08915	0.12157	0.36314
A4	0.10067	0.11976	0.25177
B1	0.09494	0.13427	0.40884
B2	0.10999	0.14850	0.40377
B3	0.11120	0.14678	0.38492
B4	0.11729	0.14804	0.35107



**Şekil 4.8 :** M4 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.5 M5 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M5 modeli 10 mm çaplı cam bilyeler düzenli dizilmesi ve aralarına en küçük çaplı cam bilyelerin doldurulması ile oluşturulmuştur. Dolayısıyla gözenekli malzemedeki boşluklar 1-1.30 mm çaplı cam bilyelerle doldurulmuştur. M5 modelinin pleksiglas kap içerisindeki görünümü Şekil 4.9’da verilmiştir.



**Şekil 4.9 :** M5 modeli.

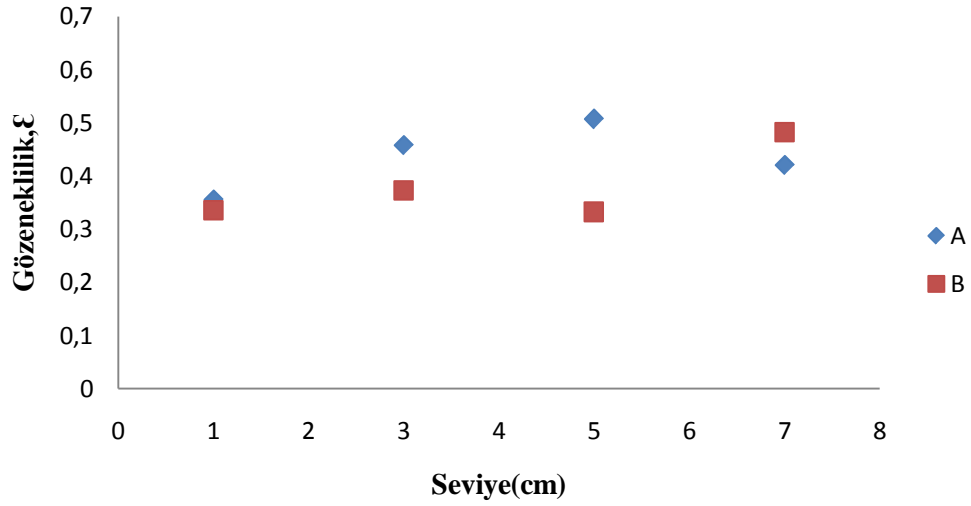
Diğer modellere uygulanan deneysel işlemler M5 modeli için tekrarlanmıştır. Elde edilen sayımlardan hesaplamalar yapılarak Çizelge 4.5’de verilmiştir. Gözeneklilik değerlerinin 0.33214-0.50665 arasında değişmekte olduğu bulunmuş ve yerel gözeneklilik dağılımına göre A3, A4 ve B4 seviyelerinde en fazla olduğu



görülmüştür. Fakat gözeneklilik dağılımı bütün noktalar düşünüldüğünde birbirine yakındır. Gözeneklilik ve seviye dağılımı Şekil 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.5 :** M5 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

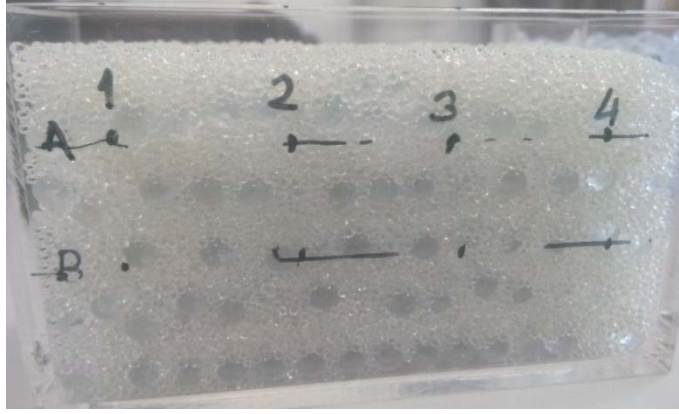
Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.09716	0.12733	0.35568
A2	0.09306	0.13997	0.45825
A3	0.09676	0.15400	0.50665
A4	0.09989	0.14000	0.42074
B1	0.11169	0.13915	0.33536
B2	0.12386	0.15639	0.37239
B3	0.12352	0.15056	0.33214
B4	0.13392	0.16329	0.48176



**Şekil 4.10 :** M5 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.6 M6 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M6 modelinde ilk olarak 5 mm çaplı cam bilyeler düzenli olarak dizilmiş, üzerine 1-1.30 mm çaplı cam bilyeler dökülmüştür. Bir sıra 5 mm çaplı cam bilyeler bir sıra ise 1-1.30 mm çaplı cam bilyeler olacak şekilde oluşturulan M6 modelinin dizilimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

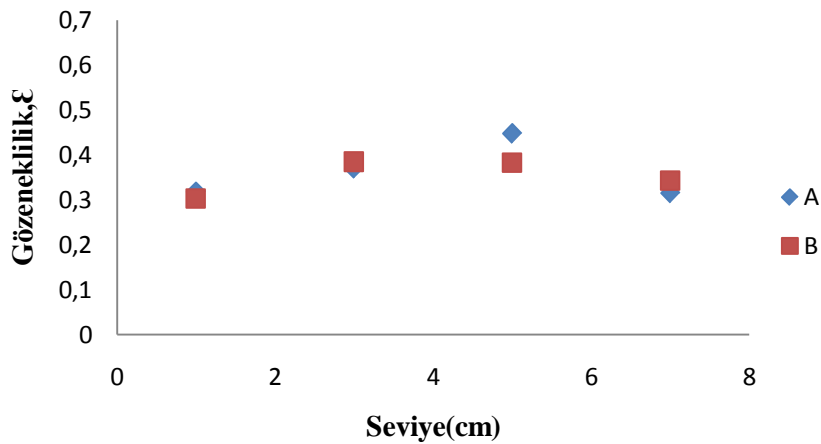


Şekil 4.11 : M6 modeli.

M6 modeli için deneysel ölçümler tekrarlanmış, hesaplamalar yapılmış ve elde edilen değerler Çizelge 4.6’da verilmiştir. Gözeneklilik değerleri birbirine yakın ve 0.30216-0.44668 arasında değişmektedir. A3 seviyesi dışında tüm noktalardaki gözeneklilik değerleri birbirine çok yakındır ve düzgün bir dağılım görülmüştür. Gözeneklilik ve seviyeye bağlı dağılım Şekil 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 : M6 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.08296	0.11288	0.31821
A2	0.08847	0.12514	0.36920
A3	0.08342	0.13275	0.44668
A4	0.10625	0.13569	0.31435
B1	0.11251	0.14050	0.30216
B2	0.10786	0.14672	0.38413
B3	0.11713	0.15560	0.38145
B4	0.11003	0.14292	0.34161



Şekil 4.12 : M6 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

#### 4.1.7 M7 modeli ile yapılan deneysel çalışmalar

M7 modelinde 5 mm çaplı cam bilyelerle, 10 mm çaplı cam bilyeler sırayla dizilerek gözenekli ortam oluşturulmuştur. 10 mm çaplı bilyeler arasında kalan boşluklar 5 mm çaplı cam bilyelerle doldurulmuştur. M7 modelinin pleksiglas kap içerisinde dizilimi Şekil 4.13’de verilmiştir.

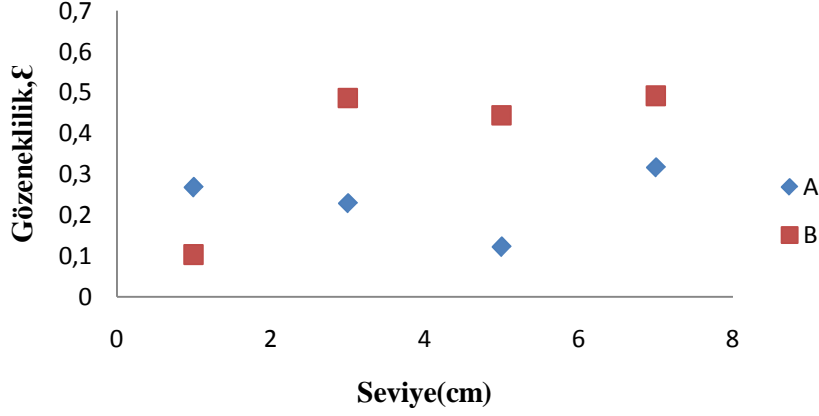


Şekil 4.13 : M7 modeli.

M7 modeli için elde edilen değerler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Gözeneklilik değerleri 0.10244 ile 0.49088 arasında değişmektedir. M7 modelinde en iyi zayıflatma, en yüksek zayıflatma katsayısı ve en düşük gözeneklilik elde edilmiştir. Şekil 4.14’te gözenekliliğin seviyeye bağlı değişimi verilmiştir.

Çizelge 4.7 : M7 modeli için kuru ve suya doymuş malzemenin lineer zayıflatma katsayıları ve gözeneklilik.

Seviye	$\mu_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_d$ (cm <sup>-1</sup> )	$\epsilon$ , Gözeneklilik
A1	0.10770	0.12022	0.26685
A2	0.12021	0.12881	0.22795
A3	0.11825	0.11788	0.12122
A4	0.12462	0.14227	0.31647
B1	0.12567	0.12394	0.10244
B2	0.08954	0.13495	0.48481
B3	0.10444	0.14152	0.44284
B4	0.09509	0.14182	0.49088



**Şekil 4.14 :** M7 modelinin A ve B seviyeleri olmak üzere 8 farklı noktadaki gözeneklilik dağılımı.

Tüm modeller radyasyonu zayıflatmaları açısından bağıl sayım ile gözeneklilik değerleri kullanılarak Çizelge 4.8’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.8 incelendiğinde, en yüksek gözeneklilik değerinin 10 mm çaplı bilyelerin düzenli dizildiği M1 modelinde, en düşük gözeneklilik değerinin ise en küçük çaplı bilyelerin oluşturduğu M3 modelinde olduğu görülmektedir. Bağıl sayım değeri modellerin kuru hallerinde iken alınan sayımın kaynak sayımına oranı şeklindedir ve radyasyonun malzemedeki zayıflamasını temsil etmektedir. Çizelge 4.8, bu açıdan incelendiğinde radyasyonu en az zayıflatan modelin M1 olduğu, en fazla zayıflatan modelin ise 10 ve 5 mm’lik bilyelerle oluşturulan M7 modeli olduğu anlaşılmaktadır. Gözenekliliğin en küçük olduğu M3 modelinde de radyasyonun zayıflaması M7 modeline yakındır. Öte yandan, 10 mm’lik bilyelerin düzenli olarak dizildiği M1 modelinde en büyük gözeneklilik ve en az radyasyon zayıflatma özelliği söz konusu iken, 10 mm’lik bilyelerin diğer küçük çaplı bilyeler ile karıştırılması ile elde edilen M5 ve M7 modellerinin gama radyasyonunu zayıflatma özellikleri iyileşmektedir.

**Çizelge 4.8 :** Gözenekli modellerin bağıl sayım-gözeneklilik açısından karşılaştırılması.

Seviye	M1( çap:10mm düzenli dizilim)		M2 (çap: 5mm düzenli dizilim)		M3(çap: 1-1,30 mm düzensiz yerleşim)		M4(çap: 5mm düzensiz yerleşim)		M5(çap:10mm düzenli diziliş, kalan boşluklar 1-1,30mm ile dolu)		M6 (çap:5mm düzenli diziliş, kalan boşluklar 1-1,30mm ile dolu)		M7(çap:10mm düzenli diziliş, kalan boşluklar 5 mm ile dolu)	
	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$	$I_k/I_0$	$\epsilon$
A1	0.87184	0.44710	0.73559	0.23954	0.74050	0.14670	0.72978	0.37411	0.70482	0.35568	0.74179	0.31821	0.67859	0.26685
A2	0.80852	0.23356	0.71273	0.25372	0.69367	0.19286	0.74432	0.40622	0.71531	0.45825	0.72723	0.36920	0.64871	0.22795
A3	0.90810	0.38612	0.73699	0.40873	0.68619	0.11066	0.72544	0.36314	0.70584	0.50665	0.74057	0.44668	0.65329	0.12122
A4	0.92559	0.48468	0.71447	0.34959	0.67074	0.12646	0.69598	0.25177	0.69793	0.42074	0.68214	0.31435	0.63848	0.31647
B1	0.84451	0.38824	0.72275	0.22043	0.68707	0.31044	0.71049	0.40884	0.66890	0.33536	0.66694	0.30216	0.63609	0.10244
B2	0.91239	0.58123	0.65990	0.19021	0.67802	0.09399	0.67301	0.40377	0.64023	0.37239	0.67820	0.38413	0.72443	0.48481
B3	0.88990	0.44739	0.71397	0.13772	0.67878	0.24660	0.67009	0.38492	0.64103	0.33214	0.65593	0.38145	0.68659	0.44284
B4	0.80950	0.39150	0.71290	0.42727	0.66478	0.23675	0.65555	0.35107	0.66912	0.48176	0.67918	0.34161	0.71009	0.49088
Ortalama	0.87129	0.41997	0.71366	0.27840	0.68746	0.18305	0.70058	0.36798	0.68039	0.40787	0.69612	0.35722	0.67203	0.30668

## 4.2 Gözenekli Modellerin Gama Radyasyonunu Zayıflatma Mesafelerinin İncelenmesi

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde gözenekli modellerin gama radyasyonunu zayıflatma mesafeleri hesaplanmış ve en düşük gözeneklilik değerine sahip M3 modeli ile en iyi radyasyon zayıflatma özelliğine sahip M7 modelleri için deneysel olarak kalınlığa bağlı radyasyonun zayıflaması incelenmiştir.

### 4.2.1 Gözenekli modellerin zırlama özellikleri

Bir malzemenin zırlama özelliklerini belirleyen ortalama serbest yol,

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (4.1)$$

yarı tabaka kalınlığı,

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4.2)$$

malzemeye gelen radyasyonu %10'a indiren tabaka kalınlığı

$$x_{10} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Çalışmada, cam bilyelerle oluşturulan gözenekli ortamların kuru ve suya doymuş hallerinin zırlama açısından incelenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, Denklem (4.1), (4.2) ve (4.3)'de yer alan lineer zayıflatma katsayısı,  $\mu$ , kuru ortamlar için modellerde sekiz farklı ölçüm noktasında elde edilen  $\mu_k$  değerlerinin ortalaması, suya doymuş ortamlar için de yine sekiz noktadan elde edilen  $\mu_d$  değerlerinin ortalaması şeklinde kullanılmıştır. Söz konusu ölçüm noktaları için bulunan  $\mu_k$  ve  $\mu_d$  değerleri Çizelge 4.1-4.7'de yer almaktadır. Tüm gözenekli modeller için elde edilen ortalama serbest yol, yarı tabaka kalınlığı ve malzemeye gelen radyasyonu %10'a indiren kalınlık sonuçları, kuru malzemeler için Çizelge 4.9'da, suya doymuş malzemeler için Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9** : Modellerin kuru ortamdaki  $\mu_k$ ,  $\lambda$ ,  $x_{1/2}$  ve  $x_{10}$  değerleri.

Model	$\mu_{k\text{ ort}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda$ (cm)	$x_{1/2}$ (cm)	$x_{10}$ (cm)
M1	0.03861	25.90	17.95	59.63
M2	0.09384	10.65	7.38	24.53
M3	0.10422	9.59	6.65	22.09
M4	0.09909	10.09	6.99	23.23
M5	0.10998	9.89	6.30	20.93
M6	0.10108	9.89	6.85	22.77
M7	0.11069	9.03	6.26	20.80

**Çizelge 4.10** : Modellerin su ile doydurulmuş ortamdaki  $\mu_d$ ,  $\lambda$ ,  $x_{1/2}$  ve  $x_{10}$  değerleri.

Model	$\mu_{d\text{ ort}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda$ (cm)	$x_{1/2}$ (cm)	$x_{10}$ (cm)
M1	0.09747	10.25	7.11	23.62
M2	0.11619	8.60	5.96	19.81
M3	0.11445	8.73	6.05	20.11
M4	0.13266	7.53	5.22	17.35
M5	0.14633	6.83	4.73	15.73
M6	0.13652	7.32	5.07	16.86
M7	0.13142	7.62	5.27	17.51

Gözenekli ortam suya doydurulduktan sonra, gözenekler su ile dolu olduğu için doğal olarak ortamda radyasyonun zayıflaması daha fazla olmaktadır. Bu nedenle Çizelge 4.10'da yer alan suya doymuş ortamlar için ortalama serbest yol, yarı kalınlık ve radyasyonu %10'a indiren tabaka kalınlıkları, Çizelge 4.9'daki kuru ortam değerlerine göre daha küçüktür. Bu durum bilyelerle oluşturulan gözenekli ortam modellerinin suya doyduruldukları takdirde zırlama özelliklerinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

Suya doydurulmuş ortamlardaki ortalama serbest yol, yarı tabaka kalınlığı ve radyasyonu %10'a indiren tabaka kalınlığının kuru ortamdaki değerlerine göre bağlı değişimi aşağıdaki gibi bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 4.11'de verilmiştir.

$$\epsilon = \frac{\alpha_k - \alpha_d}{\alpha_k} \times 100 \quad (4.4)$$

Burada  $\epsilon$  bağıl değişimi,  $\alpha_k$  kuru ortamdaki parametreyi (ortalama serbest yol, yarı tabaka kalınlığı veya radyasyonu %10'a indiren kalınlık) ve  $\alpha_d$  suya doymuş ortamdaki parametreyi göstermektedir. Çizelge 4.11'den görüleceği gibi bağıl değişim gözenekliliği en büyük olan M1 modelinde en fazla, gözenekliliği en küçük olan M3 modelinde de en azdır.

**Çizelge 4.11 :** Su ile doyurulmuş ortamdaki  $\lambda$ ,  $x_{1/2}$ ,  $x_{10}$  değerlerinin kuru ortamdaki değerlerine göre bağıl değişimi.

Model	Bağıl değişim (%)		
	$\lambda$	$x_{1/2}$	$x_{10}$
M1	60.42	60.38	60.38
M2	19.24	19.24	23.82
M3	8.96	9.02	8.96
M4	25.37	25.32	25.31
M5	30.94	24.92	24.84
M6	25.98	25.98	25.95
M7	15.61	15.81	15.81

#### 4.2.2 M3 ve M7 modellerinde gama radyasyonunun zayıflaması

Tez çalışmasında bu aşamaya kadar elde edilen sonuçlar, en küçük çaplı bilyelerle oluşturulan M3 modelinin en küçük gözenekliliğe ve 10 ile 5 mm çaplı bilyelerle oluşturulan M7 modelinin de radyasyonu en iyi zayıflatma özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Aslında radyasyon zayıflatma özellikleri birbirine yakın olan M3 ve M7 modelleri için kalınlığa bağlı radyasyonun değişimi incelenmiştir. Bu defa ölçümler A ve B seviyeleri için birer noktadan gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktaları Şekil 3.10'daki iki seviye için de 2 ve 3 noktaları arasındaki mesafenin orta noktasıdır. Yeni ölçüm noktaları grafiklerde, A seviyesi için A' ve B seviyesi için B' şeklinde belirtilmiştir. Deneylerde iki adet 3,6 cm kalınlıklı kap ile üç adet 2,7 cm kalınlıktaki pleksiglas deney kaplarında gözenekli modeller aynı koşullar altında oluşturulmuştur.

İlk olarak kaynak sayımı  $I_0$  değerinin sayımları üç kez olmak üzere 10'ar dakika alınmıştır. 3,6 cm kalınlıklı pleksiglas kap içerisinde yer alan M3 modeli ile üç kez ve 10'ar dakika olmak üzere A' ve B' seviyelerinden sayımlar alınmıştır. Daha sonra ölçülen kabın yanına bir tane daha 3,6 cm kalınlıklı M3 modeli ile doldurulmuş pleksiglas kap yerleştirilmiştir. Aynı ölçümler elde ettiğimiz 7,2 cm kalınlıklı model



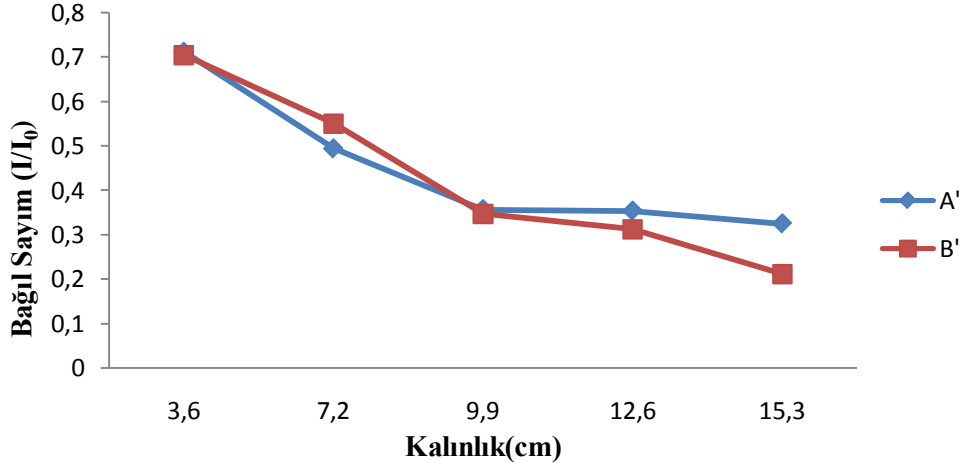
için tekrarlanmıştır. 2,7 cm kalınlıklı pleksiglas kapların içerisine yerleştirilen M3 modeli için ölçümler sırasıyla kalınlık miktarı arttıkça tekrarlanmıştır. Son pleksiglas kap eklendikten sonra elde edilen ölçüm sistemi Şekil 4.15'te verilmiştir. Her bir kalınlık ölçümü A' ve B' seviyeleri için bağıl sayım hesaplaması yapılmış ve kalınlığa bağılı grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Deneyler M7 modeli ile de aynı şekilde tekrarlanmıştır. M7 modeli ile ölçüm yapılan deney düzeneği Şekil 4.17'de verilmiştir. Bağıl sayımın kalınlığa bağılı grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.18 incelendiğinde her iki modelde de yaklaşık 9,9 cm civarına kadar bağıl sayım daha hızla düşmekte, kalınlık arttıkça eğri düzleşmeye yaklaşmaktadır. M3 modelinde A' ve B' seviyelerindeki bağıl sayım birbirine çok yakındır, 9,9 cm kalınlığında her iki seviye için de bağıl sayım değeri 0,35 civarındadır. Buna karşılık Şekil 4.18'den görüleceği gibi M7 modeli için 9,9 cm kalınlığında A' seviyesindeki bağıl sayım değeri yaklaşık 0,36 olurken B' seviyesinde bu değer 0,25'dir.

Öte yandan Şekil 4.16'da görüldüğü gibi 9,9 cm'den sonra kalınlık arttıkça B' seviyesinde bağıl sayım değeri A' seviyesine göre daha düşük değere ulaşmaktadır. M7 modelinde ise aynı bölgede her iki seviyenin bağıl sayım değerleri birbirine yaklaşmaktadır. 15,3 cm ortam kalınlığında ise bağıl sayım, M3 modelinde A' seviyesi için yaklaşık 0,32 ve B' seviyesi için 0,21, M7 modelinde her iki seviye için de 0,23 değerindedir. Sonuçlar B seviyesinde her iki model için de daha sıkışık bir yerleşme durumu olduğunu ve gözeneklilik ile beraber yerleşme düzeninin de radyasyon zayıflatma da önemli olduğunu gösteriyor.



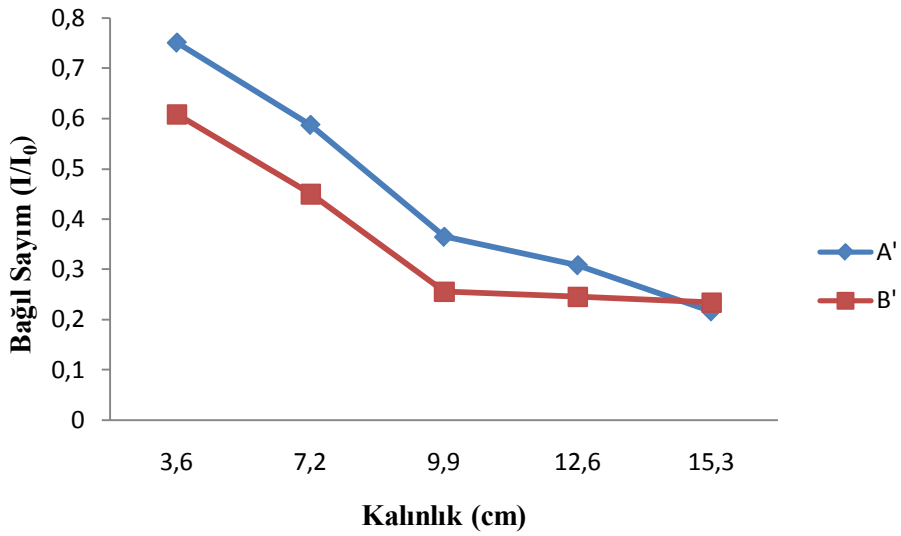
Şekil 4.15 : M3 modeliyle yapılan radyasyon zayıflatması ölçümü.



Şekil 4.16 : M3 modelinde radyasyonun zayıflaması.



Şekil 4.17 : M7 modeliyle yapılan radyasyon zayıflaması ölçümü.



Şekil 4.18 : M7 modelinde radyasyon zayıflaması.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gözenekli malzemelerin, hafif ve ucuz olmalarından dolayı, son zamanlarda zırhlama malzemesi olarak kullanım olanaklarının incelenmesi literatürde geniş yer bulmaktadır. Gözenekli bir malzemenin radyasyonu zayıflatma özelliklerinin belirlenebilmesi için, gözenekliliği ve gözenek dağılımı konusunda fikir sahibi olunması gerekmektedir. Gözenekli malzemelerin gözenek yapısının incelenmesi, aynı zamanda tahribatsız bir yöntem olan, gama ışını geçirgenlik tekniği kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, üç farklı çapa sahip cam bilyelerle oluşturulan gözenekli ortam modellerinin gama ışını geçirgenlik tekniği ile yapısal özellikleri belirlenmiş ve ortamların radyasyonu zayıflatma özellikleri 1,25 MeV enerjili gama ışınları ile incelenmiştir. Çalışmada 10, 5 ve 1-1,30 mm çaptaki cam bilyelerin düzenli ve geliş güzel olarak pleksiglas kaplarda yerleştirilmesi ile 7 farklı gözenekli ortam modeli oluşturulmuştur. Sayımlar kabın düşeyde iki seviyesinden ve yatayda dörder farklı noktadan olmak üzere sekiz noktadan üçer kez ölçüm alınarak yapılmıştır. Gözenek yapısının incelenebilmesi için, gözenekli ortamın kuru ve bir akışkana doymuş hallerinin gama ışınını zayıflatma ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, oluşturulan herbir model için yapılan deneysel çalışmalarda, kuru ortamdaki radyasyonun zayıflaması ile ilgili ölçümler yapılmış ve alınan sayımlarla önce ortamların lineer zayıflatma katsayıları bulunmuştur. Daha sonra akışkan olarak su kullanılmış ve ortamlar suya doyurulmuştur. Gama ışını geçirgenlik sayımları kuru ortamlarla aynı noktalarda tekrarlanmıştır. Ortamlar suya doyurulunca, gözenekler su ile dolduğu için lineer zayıflatma katsayısı değeri artmaktadır, çünkü ortamın radyasyonla etkileşme olasılığı artmaktadır. Kuru ve suya doymuş ortamlardaki radyasyon şiddeti değerleri ve suyun lineer zayıflatma katsayısı kullanılarak gözeneklilik değerleri yerel olarak bulunmuştur. Sonuçlar, gözenekliliğin tüm modeller için homojen dağılmadığını, en büyük gözenekliliğin ve dolayısıyla en az radyasyon zayıflatma özelliğinin 10 mm çaplı cam bilyelerin düzenli yerleştirilmesi ile oluşturulan M1 modelinde olduğunu göstermiştir. Bu modelde gözeneklilik 0.23356 ile 0.58123 arasında değişmektedir. En küçük

gözeneklilik 1-1,30 mm çaplı cam bilyelerle oluşturulan M3 modelinde elde edilmiştir ve gözeneklilik 0.11066 ile 0.31044 değerleri arasındadır. Bu arada gözeneklilik değeri 0.10244 ile 0.49088 arasında değişen, 10 ve 5 mm çaplı bilyelerle oluşturulan M7 modelinin radyasyonu zayıflatması en iyi seviyede çıkmıştır. M3 ve M7 modellerinin ortalama bağıl sayım değerleri ( $I_k/I_0$ ) birbirine çok yakındır. Bu durum radyasyonun zayıflaması açısından, gözenekliliğin tek başına belirleyici unsur olmadığını, bilyelerin yerleşim düzeninin de önemli olduğunu göstermektedir. Nitekim 10 mm'lik bilyelerin tek başına düzenli dizildiği M1 modelinin radyasyonu zayıflatmasını belirleyen ortalama bağıl sayım değeri 0,87129 iken, 10 mm ve 1-1,30 mm çaplı bilyelerle oluşturulan M5 ve 10 mm ile 5 mm'lik bilyelerle oluşturulan M7 modelinde bağıl sayım değerleri sırasıyla 0,68039 ve 0,67203 şeklindedir. Buna karşılık M5 modelinin ortalama gözenekliliği M1 modeline yakındır, M7 modelininki ise 0,30668 civarındadır.

Tez çalışmasında cam bilyelerle oluşturulan gözenekli ortam modellerinin zırlama özelliklerinin belirlenmesi amacı ile, ortalama serbest yol, yarı tabaka kalınlığı ve gelen radyasyonu %10'a indiren tabaka kalınlıkları saptanmıştır. Sonuçlar, kuru ortamlar için düzensiz yerleştirilen ve farklı çaplarda bilyeler içeren modellerde ortalama serbest yol ve tabaka kalınlıklarının daha küçük değerler aldığını göstermiştir. Gözenekli ortamlar suya doyurulunca, tüm modeller için kuru hallerine göre ortalama serbest yol ve tabaka kalınlıkları azalmıştır. Sonuç olarak, bu tip bir gözenekli ortam gama radyasyonu için zırh malzemesi olarak tasarlanırken, farklı çaplarda bilyelerin kullanılması, kap içerisine çok düzenli bir dizilimle bilyelerin yerleştirilmesi yerine büyük çaplı bilyeler arasına küçük çaplıların katılması ve ortamın akışkana doyurularak kullanılması radyasyonun zayıflatılmasında daha etkili olacaktır. Deneysel çalışmaların sonunda, radyasyon zayıflatma özellikleri birbirine yakın iki model için bağıl sayım-kalınlık eğrileri oluşturulmuştur. Bu amaçla, pleksiglas kaplar içine yerleştirilerek ardarda konan ortamlarda radyasyonun zayıflaması incelenmiştir. Modellerden biri en küçük gözenekliliğe sahiptir, en küçük çaplı bilyelerle oluşturulmuştur (M3), diğeri ise yaklaşık iki kat daha büyük gözenekliliğe sahiptir ve 10 ile 5 mm'lik bilyelerle oluşturulmuştur (M7). Her iki modelde de aynı kalınlık değerine kadar bağıl sayım hızla düşmektedir, ancak bu noktada bağıl sayım değeri modeller için aynı değildir. Gözenekliliği daha büyük olan M7 modelinde kabın alt seviyesinde bağıl sayım daha düşük değere inmektedir.

Sonuç gözeneklilik kadar gözenekli ortamı oluşturan bilyelerin yerleşim şeklinin de radyasyonun zayıflatılmasında etkili olduğunu göstermiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Hubbell, J. H.** (1982). Photon mass attenuation and energy-absorption coefficient from 1 keV to 20 MeV, *Applied Radiation & Isotopes*, **33**, 1269-1290.
- [2] **El-Kateb, A. H., Abdul-hamid, A. S.** (1991). Photon attenuation coefficient study of some materilas containing hydrogen, carbon nad oxygen, *Applied Radiation & Isotopes*, **42**, 303-307.
- [3] **Baytaş, A. F., Akbal, S.** (2002). Determination of soil parameters by gamma-ray transmission, *Radiation Measurements*, **35**, 17–21.
- [4] **Medhat, M.** (2012). Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil, *Annals of Nuclear Energy*, **40**, 53–59
- [5] **İshakoğlu, A.** (2002). *Gözenekli ortamda akışkan doyması ve kılcal basınç-doyma arasındaki ilişkisinin gama ışını zayıflatma tekniği ile incelenmesi*, (yüksek lisans tezi), İTÜ, Nükleer Enerji Enstitüsü.
- [6] **Rabiei, A.** (2012). Novel light-weight materials for shielding gamma ray, *Radiation Physics and Chemistry*, **96**, 27-37.
- [7] **Erdem, M., Baykara, O., Doğrucu, M., Kuluozturk, F.** (2010). A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray, *Radiation Physics and Chemistry*, **79**, 917-922.
- [8] **Dullien, F. A. L.** (1992). *Porous media fluid transport and pore structure*, Academic Press, San Dieogo.
- [9] **Cebe, M. C.** (2014). *Gözenekli ortam olarak toprağın özelliklerinin gama ışını geçirgenlik tekniği ile saptanması*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- [10] **Yavuz, İ.** (2010). Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, *Electronic Journal of Vehicle Technologies (EJVT)*, **2**, 49-58.
- [11] **Collins, E., Çeviri: Saydam T.** (1973). *Akışkanların gözenekli ortamlardaki akışı*, Çağlayan Basımevi.
- [12] **Pinder, George F. and Gray, William G.** (2008). *Essentials of Multiphase Flow and transport in Porous media*, A John Wiley&Sons. Inc., Publication, 6-7.
- [13] **Kaviany, M.** (1995). *Principles of heat transfer in porous media*, Springer-Verlag, NewYork.
- [14] **Gedik, S.** (2014). *Gözenekli malzemelerde radyasyonun zayıflaması*, (yüksek lisans tezi), İTÜ, Enerji Enstitüsü.
- [15] **Bilge, A. N.** (1985). *Nükleer Tekniklerin Endüstriye Uygulanması*, Türkiye Atom Enerji kurumu, (s.22-25).

- [16] Moseley, W. A. and Dhir, V. K. (1996). Capillary pressure-saturation relations in porous media including the effect of wettability, *Journal of Hydrology*, **178**, 33-53.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** : Gizem ÇAKAL BİÇİCİ  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Zeytinburnu/ 01.06.1989  
**E-Posta** : gizemcakal\_61@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2010, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
- **Yükseklisans** :2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı, Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

**Bıçıcı Cakal G., Baytas A. F.** (2015): Radiation attenuation by porous media containing spherical glasses. *Fifth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2015) – SECOTOX*, June 14-18, 2015, Mykonos Island, Greece.