RADYASYON ZIRHLAMA İÇİN YENİ, HAFİF, KOMPOZİT MALZEMELER

Aslı ARAZ

Danışman: Prof. Dr. Rıdvan DURAK

Doktora Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

RADYASYON ZIRHLAMA İÇİN YENİ, HAFİF, KOMPOZİT MALZEMELER

(New, Lightweight Composite Materials for Radiation Shielding)

DOKTORA TEZİ

Aslı ARAZ

Danışman: Prof. Dr. Rıdvan DURAK

Erzurum

Aralık, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Aslı ARAZ tarafından hazırlanan "Radyasyon Zırhlama için Yeni, Hafif, Kompozit Malzemeler" başlıklı çalışması 18/12/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yüksel ÖZDEMİR *Atatürk Üniversitesi*	…….....
Danışman:	Prof. Dr. Rıdvan DURAK *Atatürk Üniversitesi*	…….....
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Refik DİLBER *Atatürk Üniversitesi*	…….....
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Gökhan APAYDIN *Karadeniz Teknik Üniversitesi*	…….....
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ferdi AKMAN *Bingöl Üniversitesi*	…….....

Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerinde Doktora Öğrenim Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2019-7182

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Rıdvan DURAK danışmanlığında sunulan "Radyasyon Zırhlama için Yeni, Hafif, Kompozit Malzemeler" başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	**Tezin Benzerlik Oranı (%)**	**Maksimum Oran (%)**
Giriş	*3*	**30**
Kuramsal Temeller	*16*	**30**
Materyal ve Yöntem	*15*	**35**
Bulgular	*0*	**20**
Tartışma	*0*	**20**
Tezin Geneli	*12*	**25**

Not: *Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının* ***%5'den*** *büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	**Tez Danışmanı**
Aslı ARAZ	Prof. Dr. Rıdvan DURAK
Tarih girmek için burayı tıklayınız	Tarih girmek için burayı tıklayınız
İmza:	İmza:

***** Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde yapılmıştır. Bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde tecrübelerini, kıymetli bilgilerini, desteğini ve tavsiyelerini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Rıdvan Durak'a en içten şükranlarımı sunarım.

Değerli vakitlerini ayırarak tez çalışma sürecimi takip edip, kıymetli bilgileriyle beni yönlendiren ve sonuçları değerlendiren Tez Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Rıdvan Durak, Sayın Prof. Dr. Yüksel ÖZDEMİR ve Prof. Dr. Refik DİLBER'e minnettarlığımı ifade ederim.

Çalışmalarımın farklı aşamalarında yapmış oldukları katkılardan dolayı Sayın Doç. Dr. Esra KAVAZ'a, Sayın Doç. Dr. Burak ERDEMCİ'ye, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin AYGÜN'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatma AKDEMİR'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, FDK-2019-7182 kodlu proje kapsamında Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nin destekleriyle gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca gösterdikleri her türlü özveri ve desteklerinden dolayı aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aslı ARAZ

ÖZET

DOKTORA TEZİ
RADYASYON ZIRHLAMA İÇİN YENİ, HAFİF, KOMPOZİT MALZEMELER

Aslı ARAZ

Danışman: Prof. Dr. Rıdvan DURAK

Amaç: Bu çalışmada, farklı kalınlık ve gözenek boyutuna sahip açık hücreli alüminyum köpüklerin çeşitli katkı maddeleriyle (epoksi, B_2O_3, CaO, CeO_2, TeO_2, BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2, 316L paslanmaz çelik) doldurulmasıyla elde edilen yeni kompozit malzemelerin gama, X-ışını ve nötron zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmanın ölçümleri farklı üç deney sisteminde gerçekleştirilmiştir. Gama ölçümleri için Ultra Ge dedektörü kullanılmıştır ve ^{241}Am, ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarıyla numuneler bombardıman edilmiştir. X-ışını ölçümleri için lineer hızlandırıcı kullanılarak 6 MV (~2 MeV)'lik foton enerjisi için ölçümler yapılmıştır. Nötron ölçümleri için BF_3 gazlı nötron dedektörü ve ^{241}Am-Be nötron kaynağı kullanılmıştır.

Bulgular: Gama ölçümlerinden elde edilen deneysel verilerle numunelerin kütle azaltma katsayıları hesaplanıp, WinXCOM programıyla bulunan teorik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 6 MV'lik X-ışınları için lineer ve kütle azaltma katsayı değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Numunelerin kütle azaltma katsayıları kullanılarak yarı değer kalınlık, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca 0,015-15 MeV enerji aralığında enerji soğurma (EABF) ve maruziyet (EBF) buildup faktörleri 40 ortalama serbest yol (MFP)'ye kadar hesaplanmıştır. Numunelerin hızlı nötronlara karşı koruma potansiyeli, eşdeğer doz ölçümleri (EAD) yapılarak ve makroskopik tesir kesiti değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir.

Sonuç: Farklı kalınlık ve gözenek boyutlarına sahip metal köpüklerin nükleer radyasyon zırhlama kabiliyetleri değerlendirildiğinde, yüksek oranda CeO_2, TeO_2, Bi_2O_3, WO_3 ve paslanmaz çelik içeriği bulunan numunelerin hem gama ve X-ışını hem de nötron zırhlama noktasında daha kabiliyetli olduğu gözlemlendi. Ayrıca aynı epoksi karışımıyla doldurulan metal köpüklerden, kalınlığı ve gözenek boyutu daha küçük olanların radyasyon soğurma kabiliyetlerinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal köpük, radyasyon zırhlama, kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, buildup faktörü.

Aralık 2020, 146 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

NEW, LIGHTWEIGHT COMPOSITE MATERIALS FOR RADIATION SHIELDING

Aslı ARAZ

Supervisor: Prof. Dr. Rıdvan DURAK

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the usability as gamma, X-ray, and neutron shielding material of new composite materials, which are open-cell aluminum foams with different thicknesses and pore sizes, obtained by filling with various additives.

Method: The measurements of this study were carried out in three different experimental systems. Ultra Ge detector was used for gamma measurements and the samples were bombarded with ^{241}Am, ^{133}Ba, and ^{137}Cs radioactive sources. Measurements were made for photon energy of 6 MV (~ 2 MeV) using a linear accelerator for X-ray measurements. BF_3 gas neutron detector and ^{241}Am-Be neutron source were used for neutron measurements.

Findings: The mass attenuation coefficients of the samples were calculated with experimental data obtained from the gamma measurements and compared with the theoretical values found with the WinXCOM program. In addition, LAC and MAC values for 6 MV (~ 2 MeV) X-rays were acquired experimentally. Half-value layer (HVL), effective atomic number and electron density parameters were calculated employing the mass attenuation coefficients of the samples. Moreover, energy absorption (EABF) and exposure (EBF) buildup factors in the energy range of 0.015-15 MeV were computed up to 40 mean free path (MFP). The shielding potential of the samples against fast neutrons was assessed by performing equivalent dose measurements (EAD) and calculating macroscopic cross section values.

Results: When nuclear radiation shielding capabilities of metal foams with different thicknesses and pore sizes were evaluated, it was observed that samples with high CeO_2, TeO_2, Bi_2O_3, WO_3, and stainless steel content were more capable of both gamma and X-ray and neutron shielding. It was also concluded that among the metal foams filled with the same epoxy mixtures, those with smaller thickness and pore size had better radiation absorption capabilities.

Keywords: Metal foam, radiation shielding, mass attenuation coefficient, effective atomic number, effective electron density, buildup factor.

December 2020, 146 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ xiii
GİRİŞ 1
KURAMSAL TEMELLER 10
Metal Köpükler 10
Metal köpük üretiminin tarihsel gelişimi 10
Metal köpüklerin sınıflandırılması 11
Metal köpüklerin temel özellikleri ve kullanım alanları 12
Metal Köpük Üretim Yöntemleri 18
Radyasyon 25
İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitleri 26
Alfa parçacıkları 26
Beta parçacıkları 27
X-ışınları 29
Gama ışınları 35
Nötronlar 36
Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri 37
Radyasyon Zırhlama 38
Radyasyon Zırhlama Malzemeleri 40
Gama ve X-ışınları zırhlama malzemeleri 40
Nötron zırhlama malzemeleri 42
Mevcut nötron-gama radyasyonu zırhlama malzemeleri 44
Radyasyonun Madde ile Etkileşimi 44
Nötronların madde ile etkileşimi 44
Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi 47

Tesir kesiti 52
Elektromanyetik radyasyonun soğrulması 55
Etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunun ölçülmesi 57
Foton buildup faktörü 59
MATERYAL ve YÖNTEM 61
Ultra Ge Dedektörü 61
Nötron Dedektörleri 64
^{241}Am-Be Nötron kaynağı 66
Lineer Hızlandırıcı (LINAC) 67
İyon Odası 69
Metal Köpüklere Doldurulan Katkı Maddeleri 70
Numunelerin Hazırlanması 74
Deney Geometrisi 79
Gama-ışını ölçümleri için deney geometrisi 79
Nötron ölçümleri için deney geometrisi 80
X-ışını ölçümleri için deney geometrisi 81
ARAŞTIRMA BULGULARI 83
TARTIŞMA VE SONUÇ 119
KAYNAKLAR 127
ÖZGEÇMİŞ 131

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. X-ışını diyagram çizgilerinin Siegbahn ve IUPAC gösterimleri 34
Tablo 2. Al-6101 dökme alaşım ve bu alaşımdan üretilen köpüğün kimyasal bileşimindeki element konsantrasyonları (%) 74
Tablo 3. Bu çalışmada kullanılan alüminyum köpüğün fiziksel özellikleri 75
Tablo 4. 1. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 76
Tablo 5. 2. Serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 76
Tablo 6. 3. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 77
Tablo 7. 4. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 77
Tablo 8. 5. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 77
Tablo 9. 6. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 77
Tablo 10. 7. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 78
Tablo 11. 8. Serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri 78
Tablo 12. 1. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 84
Tablo 13. 2. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 85
Tablo 14. 3. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 86
Tablo 15. 4. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 87
Tablo 16. 5. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 88
Tablo 17. 6. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 89
Tablo 18. 7. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 90
Tablo 19. 8. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri 91
Tablo 20. Numunelerin X-ışınları için lineer (μ) ve kütle azaltma katsayısı (μ_m) değerleri 92
Tablo 21. Hızlı nötronlar için numunelerin soğurduğu eşdeğer doz yüzdeleri 115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) Kapalı gözenekli metal köpük ve tetragonal gözenek modeli, b) Açık gözenekli köpüğün SEM görüntüsü ve tetragonal gözenek modeli 12
Şekil 2. Metal köpükler için genel basma (stress/strain) eğrisi 13
Şekil 3. Metal köpüklerin otomobillerde kullanımı 14
Şekil 4. Metal köpüklerin ısı değiştirici yapımında kullanımı 14
Şekil 5. Alusion köpükten yapılmış yarı saydam yer altı girişi ve çan kulesi anıtı 15
Şekil 6. İşlevsel uygulamalar için ürün dizisi (filtreler) 15
Şekil 7. Açık hücreli alüminyum köpüğün yoğun trafikli alanlarda ses soğurucu olarak kullanımı 16
Şekil 8. Metal köpükten üretilmiş implant malzeme 17
Şekil 9. Kriyojenik uydu tankında ana bileşen olarak alüminyum köpük kullanımı. 18
Şekil 10. GASAR yöntemi ile metal köpük üretimi 19
Şekil 11. Hassas döküm yöntemiyle metal köpük üretimi 20
Şekil 12. Boşluk tutucu maddeler etrafına döküm yöntemiyle metal köpük üretimi 21
Şekil 13. Eriyik gaz enjeksiyon yöntemiyle metal köpük üretimi 22
Şekil 14. Eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme yöntemiyle metal köpük üretimi 23
Şekil 15. FORMGRIP yöntemiyle metal köpük üretimi 23
Şekil 16. Toz metalurjisi yöntemi ile metal köpük üretimi 25
Şekil 17. Radyasyon türleri. 26
Şekil 18. Alfa bozunumu 27
Şekil 19. β- bozunumu 27
Şekil 20. β +bozunumu. 28
Şekil 21. Elektron yakalama 28
Şekil 22. X-ışını polarizasyonunu gösteren Barkla deneyi 29
Şekil 23. X-ışınlarının dalga tabiatına sahip olduğunu gösteren Laue'nin deneyi 30
Şekil 24. Sürekli X-ışınlarının oluşumu 31
Şekil 25. Karakteristik X-ışını oluşumu 33
Şekil 26. Bir atomda ilgili elektron geçişleri sonucu yayımlanan karakteristik X-ışınları. 35
Şekil 27. Gama ışını yayınlaması 36
Şekil 28. Temel radyasyon zırhlama süreci 38
Şekil 29. Radyasyondan korunma kuralları 39

Şekil 30. Tipik radyasyon zırhlama malzemeleri 40
Şekil 31. Nötronun elastik saçılması 45
Şekil 32. Nötronun inelastik saçılması 45
Şekil 33. Fotoelektrik olay 48
Şekil 34. Çift oluşumu 50
Şekil 35. Compton olayı 51
Şekil 36. Tesir kesiti ile gelen demetin şiddeti arasındaki ilişki ve tesir kesitinin geometrik yorumu 53
Şekil 37. X-ışınlarının bir madde ile etkileşmesi sırasında meydana gelebilecek temel olaylar 56
Şekil 38. Ultra Ge dedektör kristali ile foton etkileşimi 62
Şekil 39. Sayma sisteminin şematik gösterimi. 63
Şekil 40. BF_3 nötron dedektörü 66
Şekil 41. BF_3 nötron dedektörü verim eğrisi. 66
Şekil 42. Nötron kaynağı 67
Şekil 43. Lineer hızlandırıcının bileşenleri 68
Şekil 44. İyon odası 70
Şekil 45. a) Lazer kesimi yapılmadan önce b) Lazer kesimi yapldıktan sonra Al-6101 metal köpük 75
Şekil 46. Numune hazırlama basamakları 79
Şekil 47. Gama-ışını ölçümleri için deney geometrisi. 80
Şekil 48. Nötron ölçümleri için deney geometrisi 81
Şekil 49. X-ışını ölçümleri için deney geometrisi 82
Şekil 50. 1. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 93
Şekil 51. 1. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 93
Şekil 52. 1. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 94
Şekil 53. 2. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 94
Şekil 54. 2. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 95
Şekil 55. 2. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 95
Şekil 56. 3. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 96
Şekil 57. 3. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 96
Şekil 58. 3. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 97
Şekil 59. 4. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 97
Şekil 60. 4. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 98

Şekil 61. 4. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 98
Şekil 62. 5. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 99
Şekil 63. 5. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 99
Şekil 64. 5. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 100
Şekil 65. 6. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 100
Şekil 66. 6. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 101
Şekil 67. 6. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 101
Şekil 68. 7. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 102
Şekil 69. 7. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 102
Şekil 70. 7. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 103
Şekil 71. 8. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi 103
Şekil 72. 8. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi 104
Şekil 73. 8. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi 104
Şekil 74. 4. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi.....105
Şekil 75. 5. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi.....106
Şekil 76. 6. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi.....107
Şekil 77. 8. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi.....108
Şekil 78. Seçilen bazı metal köpük numuneler için EABF değerlerinin nüfuz etme derinliğine karşı değişimi (0,015, 0,15, 1,5 MeV için) 109
Şekil 79. 4. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0.015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi 110
Şekil 80. 5. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0.015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi 111
Şekil 81. 6. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0.015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi 112
Şekil 82. 8. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0.015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi 113
Şekil 83. Seçilen bazı metal köpük numuneler için EBF değerlerinin nüfuz etme derinliğine karşı değişimi (0,015, 0,15, 1,5 MeV için). 114
Şekil 84. 1. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....116

Şekil 85. 2. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....116
Şekil 86. 3. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....116
Şekil 87. 4. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....117
Şekil 88. 5. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....117
Şekil 89. 6. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....117
Şekil 90. 7. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....118
Şekil 91. 8. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri.....118

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

B_2O_3	: Bor oksit
BaO	: Baryum oksit
Bi_2O_3	: Bizmut oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CeO_2	: Seryum oksit
Cr_2O_3	: Krom oksit
EABF	: Enerji soğurma buildup faktörü
EBF	: Maruziyet buildup faktörü
HVL	: Yarı değer kalınlık
I	: Soğrulmadan geçen foton şiddeti
LINAC	: Lineer hızlandırıcı
MFP	: Ortalama serbest yol
SS	: Paslanmaz çelik (stainless steel)
TeO_2	: Tellür dioksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
WO_3	: Tungsten trioksit
N_e	: Etkin elektron yoğunluğu
I_0	: Gelen foton şiddeti
μ_m	: Kütle azaltma katsayısı
$\sum$	: Makroskopik tesir kesiti
σ_{ta}	: Toplam atomik tesir kesiti
Z_{etk}	: Etkin atom numarası
μ	: Lineer azaltma katsayısı
σ	: Tesir kesiti
σ_{te}	: Toplam elektronik tesir kesiti

GİRİŞ

Yeryüzündeki tüm canlılar, havada, suda ve toprakta bulunan doğal radyasyona ve çeşitli sistemlerden üretilen yapay radyasyona maruz kalmaktadır. Son yüzyılda nükleer enerjinin, bilimsel, endüstriyel, tıbbi ve zirai gibi çeşitli alanlarda kullanımının artmasıyla canlıların radyasyona maruz kalma miktarları da artmıştır. Nükleer enerji kullanımının çeşitli avantajları olmasına rağmen, yüksek dozda radyasyona maruz kalınması canlılara ciddi zararlar vermektedir. İyonlaştırma özelliği olan, yüksek enerjili, nüfuz etme kabiliyeti yüksek radyasyonlar, canlılarda deterministik ve stokastik olmak üzere iki tür etkiye sebep olmaktadır. Deterministik etkiler, yüksek dozda radyasyona maruz kalınmasından kısa bir süre sonra meydana gelen, ölüme varan sonuçları olabilen etkilerdir. Bu etkilerin hücreye verdiği zarar, dozun hızına ve şiddetine bağlı olarak değişir. Stokastik etkiler ise radyasyona maruz kalındıktan çok uzun zaman sonra bile etkisini gösterebilen etkilerdir. Yüksek dozda alınan radyasyon, hücre hasarına neden olur ve hücrenin kendisini yenilemesini engelleyerek ya da yavaşlatarak kanser oluşmasına sebep olur. Çekirdek kaynaklı radyasyonlar, DNA üzerinde mutasyona neden olabilir ve nesilden nesile aktarılabilirler. Bu nedenle oldukça tehlikelidirler.

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmada, radyasyon kaynağına olan uzaklık, zaman ve zırhlama olmak üzere üç faktör önemlidir. Radyasyon kaynağından mümkün olduğu kadar uzak mesafede durarak ve kaynak yakınındaki çalışma süresini azaltarak maruz kalınan radyasyon doz miktarı azaltılabilir. Bu önlemlere rağmen radyasyon dozu yeterince azalmıyorsa, zırhlama da yapılması gerekir.

Zırhlama, radyasyondan korunmak amacıyla radyasyona maruz kalan sistem ile radyoaktif kaynağın bir engel yardımıyla birbirinden ayrılması sonucu radyasyon etkisinin yok edilmesi veya minimum düzeylere indirilmesidir. Zırhlama yapıldığında, kaynaktan çıkan radyasyon, zırhlama malzemesinin atomlarıyla etkileşip iyonlaştırma meydana getirir ve bu yolla enerjisini tamamen veya kısmen kaybeder. Radyasyon zırhlamada kullanılacak malzemenin seçimi, radyasyonun türüne göre farklılık gösterir. X- ve γ- ışınlarından korunma için yüksek yoğunluklu malzemeler, nötronlar için ise hafif yoğunluklu malzemeler kullanılır.

Gelişen teknolojiyle birlikte radyasyon zırhlamasında kullanılan malzemelerin çeşitliliği de artmıştır. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle tasarımlarda tek bir malzeme kullanmak yerine aynı özelliği gösteren malzeme bileşimleri kullanılmaya başlanmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında beton, cam, kurşun içerikli malzemeler ve çeşitli

alaşımların radyasyon zırhlamada sıklıkla kullanılan malzemeler olduğu görülmektedir. Gama ve X-ışınlarından korunmada beton ve kurşun gibi yüksek yoğunluklu malzemeler kullanılırken, nötronlardan korunmada su, bor veya grafit gibi daha hafif malzemeler kullanılmaktadır.

Bir malzemenin radyasyon zırhlamada kullanımında bazı radyasyon azaltma parametrelerinin bilinmesi önemlidir. Bu parametrelerden biri olan kütle azaltma katsayısının hesaplanması, zırhlama malzemesi olarak kullanılacak farklı madde ve bileşiklerin radyasyona karşı koruyucu zırh olup olamayacağı hakkında ön bilgi vermektedir. Malzemelerin birbiri ile karşılaştırmalı değerlendirmesi için de kütle azaltma katsayısının kullanılması uygundur (Knoll, 2002). Ayrıca bu parametre, toplam atomik tesir kesiti, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu gibi diğer önemli parametrelerin hesaplamalarında da kullanılmaktadır.

Etkin atom numarası, radyasyonun madde ile etkileşimini gösteren bir özellik olması nedeniyle radyasyon zırhlama çalışmalarında soğurulan radyasyon miktarının hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu parametrenin bilinmesi, bilinmeyen bir nesnenin veya malzemenin yapısı ve kimyasal bileşenleri hakkında ön bilgi sağlayabilir. Ayrıca etkin atom numarası, ihtiyaca bağlı olarak ilgilenilen enerji için bir element yerine bir kompozit malzeme seçilerek alternatif malzeme kullanımına imkân sağlayan bir parametredir (Tekerek 2019).

Bileşik, alaşım ve karışım gibi çoklu elementli malzemelerin kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, buildup faktörü gibi radyasyon azaltma parametrelerinin ölçümü, uzay fiziğinde, astronomide, nükleer fizikte, nükleer silah yapımında, katıhal fiziğinde kozmik çalışmalarında, jeolojide, plazma fiziğinde, uydu yapımında, dozimetri ve daha birçok radyasyon uygulamasında önemli bir yer tutmaktadır.

Literatüre bakıldığında çeşitli malzemelerin radyasyon zırhlamadaki etkinliğinin incelendiği, kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, buildup faktörü gibi önemli parametrelerinin hesaplandığı birçok çalışma görülmektedir. Bu malzemelerden en çok kullanılanlar, farklı içeriklerde hazırlanmış cam ve betonlardır.

Singh *et al.* (2008) radyasyon zırhlama malzemesi olarak baryum borat flyash camların çeşitli enerjilerde kütle azaltma katsayılarını hesaplamışlar ve elde ettikleri sonuçları standart beton malzemelerin kütle azaltma katsayılarıyla karşılaştırmışlardır. Singh *et al*. (2014) silikat ve borat ağır metal oksit camların radyasyon koruma güçlerinin araştırıldığı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin lineer azaltma katsayıları, etkin atom numaraları ve buildup faktörleri hesaplanmıştır. Ayrıca hızlı nötronlar için makroskopik tesir kesitleri (Σ_R) hesaplanmıştır. Bizmut silikat camların üstün radyasyon koruma özelliklerine sahip olduğunu ve kurşun camlarla değiştirilmesinin uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Yasaka *et al.* (2014) çinko bizmut borat camlarının gama radyasyonundan korumadaki etkilerini incelemişler ve elde ettikleri sonuçları teorik değerleriyle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada elde edilen verilerle çinko bizmut camların kurşunsuz zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Oto *et al*. (2015) barit, manyetit, limonit, hematit ve serpantin cevherlerinin kütle azaltma katsayılarını çeşitli foton enerjiler için belirlemiş ve seçilen enerjilerde cevherlerin etkin atom numaralarını, elektron yoğunluklarını hesaplamışlardır. Ayrıca bu cevherlerin buildup faktörlerini kurşun, çelik manyetit beton, beton ve bizmut borosilikat cam ile karşılaştırmışlardır. Baritin diğer cevher örnekleri arasında, radyasyon zırhlama için daha üstün özelliklere sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Sayyed *et al.* (2017) tellüryum oksit esaslı camların gama ışını koruma kabiliyetini incelemişlerdir. Buildup faktörlerinin foton enerjisine ve ortalama serbest yola bağlı olduğunu bulmuşlardır. Elde edilen veriler, bu tür camların radyasyon zırhlamada etkin olduğunu göstermiştir ve WO_3 in molar kesrinin cam bileşiğinde artmasıyla etkinliğinin de arttığı sonucuna varmışlardır. Kavaz (2019) yaptığı çalışmada dolomit, hematit ve goetit mineralleri içeren lityum borat camların radyasyon zırhlama kabiliyetlerini incelemiştir. HPGe dedektör kullanarak ^{133}Ba radyoaktif kaynağıyla numuneleri bombardıman etmiştir. Ölçümlerden elde ettiği deneysel verilerle camların etkin atom numarası ve yarı değer kalınlıklarını hesaplayıp WinXCOM programı temelli hesapladığı teorik değerleri ile karşılaştırmıştır. Ayrıca 0,015-15 MeV enerji aralığında maruziyet buildup faktörlerini hesaplamıştır. Akıllı (2019) yaptığı tez çalışmasında Bi_2O_3-$PbCl_2$-TeO_2 sisteminin optik, ısıl, fiziksel ve yapısal özelliklerini inceleyerek sistemin camlaşma davranışını belirlemiş ve sistemin cam haritasını oluşturmuştur. Üretilen camların radyasyon zırhlama özelliklerini inceleyerek, XCOM yazılımı aracılığıyla ve kütle azaltma katsayılarını da kullanarak yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yolu (MFP), etkin atom numarası (Z_{etk}) ve etkin elektron yoğunluğunu (N_e) hesaplamıştır. Ayrıca, üretilen camların betonla ve mevcut ticari camlarla radyasyon zırhlama açısından karşılaştırmasını yaparak, üretilen camların bu kapsamda yüksek lullanım potansiyeline sahip olduğunu tespit etmiştir.

Demir (2008) ağır betonların X- ışını, gama ışını ve nötron soğurmadaki etkinliğini incelemiştir. CdTe katıhal dedektörü, sintilasyon sayacı, iyon odası, He nötron dedektörü ve doğrusal hızlandırıcı (LINAC) kullanarak ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Barit agregalı betonların fotonlar için, kolemanit agregalı betonların ise nötronlar için daha iyi soğurma özelliği gösteren malzeme olduklarını tespit etmiştir. Başka bir çalışmada ise Oto and Gür (2013) manyetit cevheri oranının beton örneklerinin gama radyasyon zırhlama özellikleri üzerindeki etkisini NaI (TI) dedektör kullanarak incelemişlerdir. Beton örneklerde artan manyetit oranı ile lineer azaltma katsayılarının arttığını gözlemlemişlerdir. Ipbüker *et al.* (2015)

yaptıkları bir çalışmada yeni bir çimento-bazalt karışımının radyasyon koruma özelliklerini incelemişlerdir. Yaltay *et al.* (2015) pomza agregası ve kolemanit ilavesi ile üretilen farklı oranlarda hafif betonun radyasyon zırhlama özelliklerini ve bu betonun kür yaşının radyasyon zırhlama üzerindeki etkisini ^{60}Co radyoaktif kaynağını kullanılarak araştırmışlardır. Kolemanit ilavesinin hafif betonun radyasyon zırhlamadaki etkinliğini artırdığını ancak hafif betonun kolemanit oranı ve radyasyon azaltma özellikleri ile özellikle uzun süreli kür süresi arasında doğrudan orantılı bir ilişki olmadığı sonucuna varmışlardır. Tekin *et al*. (2018) mikro ve nano boyutlardaki WO_3 ve Bi_2O_3 katkı maddelerinin hematit serpantin betonunun radyasyon zırhlama özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, hem mikro hem de nano ölçeklerde WO_3 ve Bi_2O_3 ile harmanlanmış hematit serpantin betonu için kütle azaltma katsayısını, genel amaçlı Monte Carlo simülasyon kodlarını (MCNPX) kullanarak 0,142-1,33 MeV foton enerji aralığında hesaplamışlardır. Sonuçlar, nanopartiküllerin kütle azaltma katsayısı değerlerinin seçilen tüm enerjilerde mikro partiküllerden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kaya (2019) yaptığı bir çalışmada normal beton ve özel amaçlı üretilen hafif, ağır ve çelik lifli betonların radyasyonu azaltma özellikleri ^{60}Co ve ^{137}Cs gama radyoizotop kaynaklarını kullanılarak incelemiştir. Farklı kalınlıktaki beton örneklerinin radyasyonu azaltma oranları ve yarı değer kalınlıklarını hesaplamış ve bu değerlerin malzemelerin yoğunluk ve kimyasal özellikleri ile ilişkili olduğunu gözlemlemiştir.

Radyasyon zırhlamadaki kabiliyetlerinin sıklıkla incelendiği diğer malzeme türleri ise farklı element veya bileşiklerin eklenmesiyle hazırlanmış kompozit malzemeler ve alaşımlardır. Korkut (2010) üç farklı borlu cevher (kolemanit, üleksit ve tinkal) ile bor içeren beş farklı bileşiğin (MgB_2, $NaBH_4$, KBH_4, B_2O_3 ve H_3BO_3) nötron radyasyonunu zırhlama parametrelerini incelemiştir. Malzemelerin içerisinde bulunan bor ve hidrojen miktarlarının, malzemelerin hızlı nötronları zırhlama kabiliyetini nasıl etkilediğini araştırmış, bor ve hidrojen konsantrasyonunun malzemenin nötron zırhlama özelliğini artırdığı sonucuna varmıştır. Büyük (2013) yaptığı çalışmada tungsten, titanyum ve bor içeren kompozit malzemelerin gama ve nötron radyasyonu azaltma etkinliğini incelemiş, azaltma katsayıları, yarı-değer kalınlık değeri ve onda bir değer kalınlık değerini hesaplamıştır. Kütle azaltma katsayılarını XCOM programıyla teorik olarak hesaplamış deneysel değerlerle karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, tungsten borürün radyasyon zırhlamada etkin bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Shin *et al.* (2014) polietilen/bor içeren kompozitlerin radyasyon azaltma etkilerini araştırmışlardır. Belgin *et al*. (2015) yeni bir radyasyondan korunma malzemesi olarak polyester esaslı hematit dolgulu kompozitlerin radyasyon azaltma etkilerini incelemişlerdir. Kompozitlerin kütle azaltma katsayılarının kurşununkinin %98'ine karşılık geldiğini

bulmuşlardır. Aygün (2015) CERN-FLUKA ve GEANT4 Monte Carlo simülasyon kodlarını kullanarak Re-B, Re-Li, Re-Li-Ta, Re-Li-B, Re-Li-Fe, Re-Li-Ni, Re-Li-Cr, Ni-Cr-Fe-B_4C-W-Re, Ni-Cr-Re**,** Ni-Cr-B_4C, Ta-Ni-W, Ta-Cr-W, W-Cu-Fe, W-Cu-Ni ve W-Cu-Ni-Fe alaşımlarını üreterek sinterleme işleminden sonra, numunelerin hızlı nötron eşdeğer doz ölçümlerini yapmıştır ve bu alaşımların korozyona dayanımlarını ve mekanik özelliklerini bir takım testlerle incelemiştir. Chang *et al.* (2015) γ-ışınları radyasyonundan korunmada tungsten/epoksi kompozitlerinin etkilerini incelemişlerdir. ^{60}Co kaynağı kullanılarak alınan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, kompozitteki tungsten miktarının artmasıyla koruyuculuk özelliğinin arttığını göstermiştir. Yıldırım (2018) yaptığı tez çalışmasında farklı alüminyum alaşımlarını ^{137}Cs radyoaktif kaynakla bombardıman edip gama ışınlarını azaltma etkinliğini incelemiştir. Alaşımların kütle azaltma katsayılarını deneysel ve teorik olarak hesaplayıp karşılaştırmıştır. Ayrıca yarı kalınlık ve onda bir kalınlıklarının tayinini yapmıştır. Manjunatha *et al.* (2018) bazı alüminyum bazlı camsı alaşımların X-ışını, gama ve nötron azaltma parametrelerini hesaplamışlardır. $Al_{60}Y_{33}Ni_5Co_1Fe_{0.5}Pd_{0.5}$ alaşımının X-ışını ve gama azaltma $Al_{86}Y_7Ni_5Co_1Fe_{0.5}Pd_{0.5}$ alaşımının ise nötron azaltmada etkin birer alaşım olduğunu bulmuşlardır. Akman *et al.* (2019) yaptıkları bir çalışmada Fe/Cr16/Ni72, Fe/Cr21/Ni32.5, Fe/Cr25/Ni20, Fe/Cr18/Ni10 ve Fe/Cr17/Ni7 üçlü alaşımların gama ışını azaltma performanslarını incelemişlerdir. Alaşımların lineer ve kütle azaltma katsayılarını, ortalama serbest yol, yar değer kalınlık, onda bir kalınlık değeri ve çeyrek değer kalınlık parametrelerini deneysel olarak hesaplayıp teorik değerleriyle karşılaştırmışlardır. Deneysel ve teorik sonuçlara göre, Fe/Cr16/Ni72 alaşımının en iyi radyasyon zırhlama özelliklerine sahip olduğunu, Fe/Cr17/Ni7 alaşımının ise seçilen alaşımlar arasında en kötü radyasyon zırhlama özelliklerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Özge (2019) Co-60 radyoaktif kaynağı ile Pb-Sn alaşımını bombardıman etmiş ve Geiger-Müller sayacını kullanarak radyasyon azaltma etkinliğini incelemiştir. 1173 keV ve 1332 keV enerjileri için deneysel kütle azaltma katsayısını hesaplamış ve aynı enerji değerleri için XCOM dan elde ettiği teorik değerlerle karşılaştırmıştır. Aygün (2020) üç farklı tipte paslanmaz çelik örneği tasarlayıp bu alaşımların gama ve nötron azaltma etkinliklerini incelemiştir. Hızlı nötronların radyasyon korumadaki etkinliğini toplam makroskopik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve transmiyon sayısını Geant 4 kodunu kullanarak hesaplamıştır. Aynı zamanda gama azaltma paremetlerini de hesaplamıştır. Yeni paslanmaz çelik numunelerin hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda nötronu 316LN paslanmaz çelikten daha iyi soğurduğunu bulmuştur. Levet *et al.* (2020) Fe-B alaşımlarının gama ve nötron azaltma özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel olarak kütle azaltma katsayılarını 0,0532-0,7785 MeV foton enerjilerinde hesaplamış daha sonra HVL, Z_{etk}, N_e, EABF ve EBF parametrelerini hesaplamışlardır. Nötron doz transmisyon ölçümleri yapıp Σ_R değerlerini hesaplamışlardır.

Kullanımı fazla olan geleneksel radyasyon zırhlama malzemelerinin koruma kabiliyetlerinin yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Örneğin; ağır betonlar, oksijen, silikon ve kalsiyum gibi etkili bir koruma için istenmeyen yüksek miktarda element içerir. Kurşun ise düşük işlenebilirliğe ve fazla toksisiteye sahiptir. Bu dezavantajlardan dolayı zırhlamada, radyasyon zayıflatma gücü yüksek, düşük kütle yoğunluğuna sahip ve çevre dostu malzeme kullanımı tercih edilir. Zırhlamada kullanılan malzemenin radyasyonun etkisini azaltma özelliğinin yanı sıra hem ekonomik hem daha mukavemetli hem de çok hafif olması istenilen özellikler arasındadır. Son yıllarda kullanımı artan metal köpükler, bu özelliklere sahip malzemeler olması nedeniyle radyasyon zırhlama çalışmalarında önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır.

Metal köpükler, fiziksel, mekanik, akustik, ısıl ve elektriksel açıdan birçok önemli özelliğe sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde birçok alanda kullanılmaktadırlar. Metal köpüklerin en önemli avantajları, ağırlıklarının düşük olmasıdır. Aynı ağırlıkta ve gözenekli yapıda olmayan malzemelere kıyasla eğilme mukavemetleri çok yüksektir. Darbe ve titreşimleri yönden bağımsız olarak sönümleyebilirler. Geri çevrilebilen, çevre dostu malzemelerdir. Gözenek yapılarına göre metal köpükler kapalı ve açık hücreli olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmada da kullanılan açık hücreli köpükler, gaz veya sıvı ortamın içinden geçmesini sağlayan birbirine bağlı bir katı destek ağından oluşur. Bu tür köpüklere çeşitli dolgu maddeleri eklenerek yeni kompozit malzemeler elde edilebilir. Katkı maddeleri ile doldurulan açık hücreli köpükler sadece hafif ve yüksek özgül yüzey alanı sergilemekle kalmaz, aynı zamanda iyi bir radyasyon kalkanı kabiliyetine ve iyi işlenebilirliğe sahip olur.

Metal köpük üretiminde en yaygın kullanılan metal alüminyumdur. Hammadde bulmada kolaylık ve ekonomiklik, düşük erime sıcaklığı, önemli ölçüde darbe mukavemeti, ses, enerji ve titreşim soğurma kabiliyeti gibi özellikleri alüminyum köpüklerin tercih edilme sebeplerindendir. Alüminyum metal köpükler oldukça iyi rijitlik özelliğine sahiptirler ve bu özellikleri sayesinde polimer köpükten daha ince bir kalınlıktayken bile aynı seviyede enerji soğurabilirler.

Metal köpüklerin çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır. Farklı yöntemlerle üretilen köpüklerin çeşitli özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Çinici (2004) yaptığı çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum bazlı metal köpük üretmiştir. Alüminyum köpük malzemelerde üretim parametrelerinin gözenek ebatına, şekline ve lineer genişlemesine etkilerini araştırmıştır. Vendra and Rabiei (2007) ilk kez yerçekimi döküm tekniğiyle kompozit metal köpük üretmişlerdir. Statik sıkıştırma altındaki malzemenin enerji emme davranışını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, üretilen kompozit köpüklerin, benzer

malzemelerden üretilen piyasada bulunan diğer metal köpüklerden daha yüksek bir enerji emme kapasitesine sahip olduğunu, aynı zamanda daha yüksek bir mukavemet/yoğunluk oranına sahip olduğunu göstermiştir. Zaman (2011) çamur köpüklendirme yöntemi ile açık hücreli alüminyum köpük ve %2 ile %4 bakır katkılı alüminyum köpük üretmiştir. Yaptığı X-ışını kırınım (XRD) analizlerinde, normal atmosfer şartlarında yapılan sinterlemeler sonucunda bakır katkılı köpüklerin yapılarında CuO ve Cu_2O oluştuğunu, argon atmosferinde yapılan sinterlemelerde ise bu bakır oksit yapılarının azaldığını görmüştür. Rabiei and Garcia-Avila (2013) paslanmaz çelik bir matrikse gömülü, farklı küre boyutları, farklı yüzey pürüzlülüğü ve farklı karbon içeriğine sahip içi boş çelik küreler kullanarak toz metalurjisi tekniği ile çelik-çelik kompozit metal köpükler üretmişlerdir. Üretilen malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini optik ve taramalı elektron mikroskopi, enerji dağılımlı spektroskopi, yarı statik ve dinamik sıkıştırma yükü testlerini kullanarak incelemişlerdir. Xu and Hao (2014) eriyik köpükleştirme yöntemi kullanılarak farklı gözenekli alüminyum köpükler üretip bu malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Onuklu (2015) toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum ve mekanik alaşımlama ile üretilen alüminyum 2024 alaşımı olmak üzere iki farklı matris malzemesine, kübik bor nitrür (kBN) ve alümina (Al_2O_3) katkıları yapılarak kompozit köpük üretimi yapmıştır. Üretilen köpüklerin mekanik özellikleri ve karakterizasyonunu inceleyerek takviye yapılmamış köpüklerin özellikleri ile karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlardan yola çıkarak borik asidin köpürtücü malzeme olarak kullanılabilirliğini tespit etmiştir. Sunar (2019) infiltrasyon ve karıştırma döküm yöntemleri kullanılarak farklı oranlarda bor karbür ilave edilmiş açık gözenekli alüminyum metal köpük numuneler üretmiştir. Mikroyapı karakterizasyonunu, optik mikroskobu, X-ışını kırınım analizi, taramalı elektron mikroskobu ve görüntü işleme yöntemleriyle yapmıştır. Basma ve sertlik deneyleri yaparak farklı oranlarda bor karbür ilavesinin ve gözenek morfolojisinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bor karbür takviyesinin sertlikte ve basma dayanımında artışa sebep olduğunu ve bor karbür takviyesinden bağımsız olarak düzenli gözenek morfolojisine sahip numunelerin düzensiz gözenek morfolojisine sahip numunelerden daha yüksek basma dayanımına sahip olduğunu tespit etmiştir.

Metal köpüklerin farklı özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma olmasına rağmen radyasyon koruma kabiliyetlerinin araştırıldığı sınırlı sayıda çalışma vardır. Xu *et al.* (2010) açık hücreli metal köpüklerin, su ve borlu suyla doldurulmuş açık hücreli köpüklerin gama ve termal nötron azaltma etkinliklerini incelemişler ve döküm alüminyum ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, boş metal köpüğün gama azaltma etkinliğinin döküm alüminyuma göre daha az olmasına rağmen suyla doldurulmuş köpüğünkinin daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Chen *et al*. (2014) döküm alüminyum, kapalı hücreli alüminyum metal

köpük ve açık hücreli alüminyum metal köpüğün gama ışını azaltma etkilerini incelemişlerdir. Altı set halinde hazırlanan örneklerin farklı enerjilerde kütle azaltma katsayılarını hesaplamışlar ve teorik değerleriyle karşılaştırmışlardır. Kapalı hücreli köpüklerin dolgu maddeli açık hücreli köpüklere göre daha iyi radyasyon zırhlama özelliği sergilediğini gözlemlemişlerdir. Chen *et al.* (2015) kapalı hücreli kompozit metal köpükler ile açık hücreli alüminyum köpüğün nötron azaltma etkilerini incelemişlerdir. Düşük atom numaralı hidrojen, bor, karbon gibi dolgu malzemeleriyle doldurulmuş açık hücreli metal köpüklerin kapalı hücreli kompozit metal köpüklere göre daha iyi nötron azaltma etkinliğine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Chen *et al.* (2015) başka bir çalışmada ise farklı boyutlarda ve farklı matris malzemeleri kullanılarak üretilen çelik-çelik ve alüminyum-çelik kompozit metal köpüklerin X-ışını, gama ve nötron azaltma etkinliklerini incelemişlerdir. Bu malzemelerin azaltma etkinliklerini saf kurşun, alüminyum A356'ninkilerle karşılaştırmışlardır. Ayrıca elde edilen deneysel verileri XCOM, Monte Carlo Z ve MCNP programlarından bulunan teorik verilerle karşılaştırmışlardır. Çelik-çelik ve alüminyum-çelik kompozitlerin X-ışını azaltmada A356 ya göre daha etkin olduğunu bulmuşlardır. Saf kurşunla karşılaştırdıklarında ise kompozitlerin kurşuna göre daha hafif ve çevre dostu olmalarının yanı sıra daha iyi azaltma etkinliği gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Gedik and Baytaş (2015) farklı kompozit metal köpüklerin ve toprak ile kum numunelerinin gama ışını azaltma etkinliklerini ^{60}Co radyoaktif kaynağını kullanarak incelemişlerdir. Numunelerin lineer azaltma katsayılarını hesaplamışlardır. Sonuçları gözenekli ortamın gözenek dağılımı ve radyasyon azaltma etkinliğine göre karşılaştırmışlardır. SiC ve Al_2O_3 metal köpüklerinin büyük gözenek değerleri olması nedeniyle kum ve toprağın metal köpüklere göre daha iyi radyasyon azaltma özelliği gösterdiği sonucuna varmışlardır. Uzun *et al.* (2016) kapalı hücreli AlSi7 metal köpük ile AlSi7 bulk malzemenin gama ışını azaltma özelliklerini inceleyerek karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, AlSi7 dökme malzemenin, kapalı hücreli AlSi7 köpüklere kıyasla yüksek yoğunlukları nedeniyle daha iyi gama ışınları azaltma etkinliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu tez çalışmasında, katkı maddeleriyle (epoksi, B_2O_3, CaO, CeO_2, TeO_2, BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2, 316L paslanmaz çelik) doldurulmuş farklı kalınlık ve farklı gözenek boyutuna sahip açık hücreli alüminyum köpük numunelerinin gama, X-ışını ve nötron azaltma kabiliyetleri incelenmiştir. Gama ölçümleri için Ultra Ge dedektörü kullanılmıştır. ^{241}Am, ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarıyla numuneler bombardıman edilmiştir. X-ışını ölçümleri için lineer hızlandırıcı kullanılarak 6 MV (~2 MeV) lik X-ışını foton enerjisi için ölçümler yapılmıştır. Bu enerjiye sahip X-ışınlarını dedekte etmek için iyon odası kullanılmıştır. Nötron ölçümleri için BF_3 gazlı nötron dedektörü ve ^{241}Am-Be nötron kaynağı kullanılmıştır. Gama ölçümlerinden elde edilen deneysel verilerle numunelerin kütle azaltma katsayıları hesaplanıp,

WinXCOM programıyla hesaplanan teorik değerleriyle karşılaştırılmış ve uyum içerisinde oldukları görülmüştür. Numunelerin kütle azaltma katsayı değerleri kullanılarak yarı değer kalınlık (HVL), ortalama serbest yol (MFP), onuncu değer kalınlık (TVL), etkin atom numarası (Z_{etk}) ve elektron yoğunluğu (N_e) parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca 0,015-15 MeV enerji aralığında maruziyet (EBF) ve soğurma (EABF) buildup faktörleri hesaplanmıştır. Köpük numunelerinin nötron azaltma kabiliyetlerini belirlemek için etkin nötron yakalama tesir kesitleri ($\sum_R$) ve eşdeğer soğurma doz oranları (EAD) hesaplanmıştır. Son olarak da 6 MV lik X-ışınları için lineer ve kütle azaltma katsayı değerleri hesaplanmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Metal Köpükler

Metal köpükler, yeni fiziksel, mekanik, termal, elektriksel ve akustik özelliklere sahip özel bir gözenekli malzeme sınıfıdır. Metal köpüklerin en belirleyici özelliği çok yüksek gözenekliliktir ve tipik olarak hacminin % 75-95'i boşluk alanlarından oluşur. Gözenekler kapatılabilir (kapalı hücreli) veya birbirine bağlı bir ağ (açık hücreli) oluşturabilirler. Metal köpükler, nispeten düşük yoğunluğa sahip hücresel bir yapı sergilerler ve yüksek mukavemet, sertlik, yüksek darbe enerjisi ve ses emme kapasitesi, yangın geciktirme ve ısı dağılımına sahiptirler. Genellikle hafif yapısal bileşenlerde ve sandviç panellerde, darbe koruması için enerji soğurma sistemlerinde, elektronik cihazlar için ısı emici olarak ve akustik yalıtım malzemesi olarak kullanılırlar.

Metal köpük üretiminde en çok kullanılan metaller alüminyum, demir ve titanyumdur. Bunların dışında karbon, bakır, kurşun, kalay, çinko, platin, gümüş, nikel, molibden metalleri ve demir-krom, kobalt-krom, nikel-bakır gibi alaşımlar kullanılarak da köpük üretimi yapılmaktadır. Metal köpükler, birçoğu hala geliştirme aşamasında olan bir dizi yeni işleme teknikleriyle üretilmektedir. Bu üretim yöntemleri şunlardır: Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi, infiltrasyon yöntemi, boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm yöntemi, eriyik metal içerisine gaz enjektesi yöntemi, eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi yöntemi, sıvı metal yolu köpük üretim yöntemi ve toz metalurjisi yöntemidir.

Metal köpük üretiminin tarihsel gelişimi

Metal köpük üretimi ile ilgili çalışmalar yüz yıl öncesine dayanmaktadır. İlk olarak 1925 yılında üretilmeye başlayan metal köpükler yıllar içerisinde farklı yöntemlerle üretilmeye devam etmiştir. 1980'li yıllardan itibaren metal köpük araştırmaları tüm dünyada artmaya başlamıştır. 1987'de Japonya'da Shinko Wire şirketinde Ca ve TiH_2 gibi köpürtücü maddeleri eriyik alüminyuma ekleyip bu bileşimi karıştırma yoluyla ekonomik ve hızlı bir üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu işlem Alporas ismi verilerek ticarileştirilmiştir (Akiyama *et al.* 1987). Gaz enjekte ederek köpükleştirme 1990 yılında Kanada, Montreal'de Alcan International firmasında keşfedilmiştir (Jin *et al.* 1990). 1990'ların ortalarında, metal köpüklerin üretiminde kullanılan mevcut proseslerin geliştirilmesiyle ilgili çalışmalarda dalgalanma görülmüştür. Bu dönemde, birçok bireysel araştırma projelerine ek olarak dünyada iki büyük araştırma programı başlatılmıştır. 1996'dan sonra sürdürülen dört yıl süreli bu programlarda; İngiltere ve

ABD'deki üniversitelerle araştırma bağlantılı "Çok hafif metal yapılar üzerinde çok disiplinli araştırma girişimi" ve 1999'da birkaç Alman üniversitesi tarafından "Hücresel metaller için DFG öncelik programı" çalışmaları yapılmıştır. 2000 yılında eriyik ve toz metalurjisi yöntemleriyle köpükleştirmenin bazı avantajlarını birleştiren ve FORMGRIP olarak adlandırılan bir teknik geliştirilmiştir (Gergely and Clyne 2000). 20. yüzyılın son çeyreğinde dünya genelinde birçok şirket alüminyum metal köpük üretimine başlamıştır. Bu şirketlerden en önemlilerinden biri Japonya'da Shinko Wire Company şirketidir. Günümüzde de çeşitli yöntemlerle metal köpük üretimi devam etmekte ve farklı alanlarda kullanımı artmaktadır.

Metal köpüklerin sınıflandırılması

1) Yoğunluklarına Göre Metal Köpükler

Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu olmak üzere üç çeşit metal köpük bulunmaktadır. 0,1 g/cm^3 değerinden daha düşük yoğunlukta olanlar düşük yoğunluklu, 0,1-0,3 g/cm^3 olanlar orta yoğunluklu, 0,3 g/cm^3'den daha yüksek yoğunluktaki malzemeler ise yüksek yoğunluklu metal köpük malzemelerdir. Düşük yoğunluklu köpüklerin tipik gözenek boyutları 300 μm'den daha düşüktür. Yüksek yoğunluklu köpükler ise 100 μm'den daha düşük gözenek boyutlarına sahiptirler.

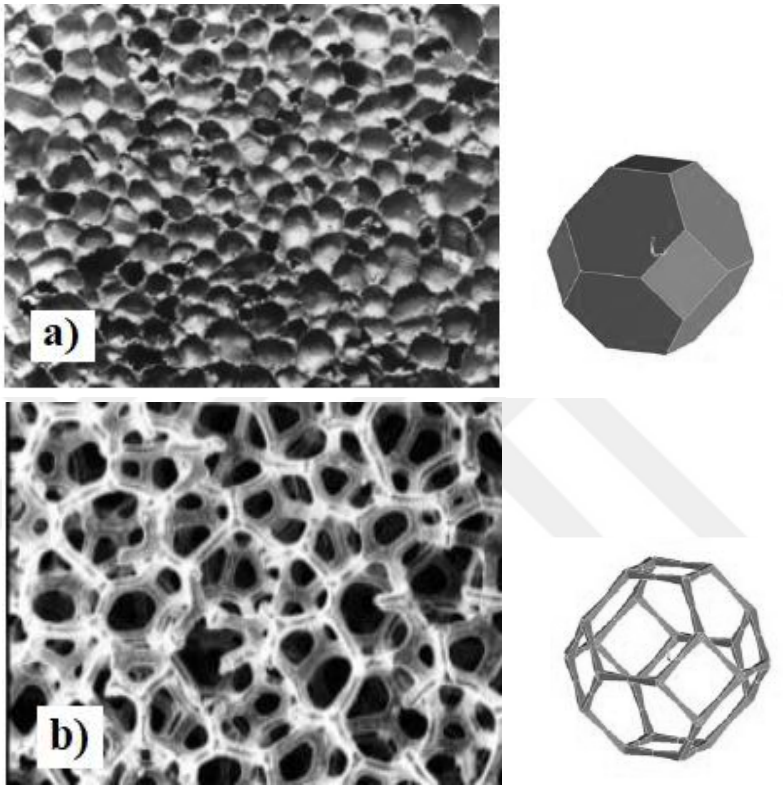
2) Ana Malzemelerine Göre Metal Köpükler

Doğada bulunan süngerler, mercanlar, ağaç gövdeleri aslında birer gözenekli malzemelerdir. Aynı şekilde insan kemiği içerisinde bir gözenekli yapı mevcuttur. Bu şekilde doğada bulunan malzemeler doğal köpükler olarak nitelendirilirler. Bunların haricinde insanlık tarafından üretilen yapay gözenekli malzemeler, kendilerini oluşturan ana malzemenin ismi ile değerlendirilirler. Örneğin; seramik malzemeden yapılanlara seramik köpükler, metal malzemeden yapılanlara metal köpükler ve bunlara benzer şekilde polimer malzemelere de polimer köpükler denilir.

3) Gözenek Yapılarına Göre Metal Köpükler

a) Açık hücreli köpükler: Hücreli yapısı içerisinde hücre duvarları bulunmayan, gözenekleri birbiriyle bağlantılı halde olan köpüklerdir (Şekil 1.a). Böyle malzemelerde gaz fazının sürekli olduğu söylenebilir. Katı fazı ise kirişlerden meydana gelmektedir. Kirişler birleşerek metal köpüğün katı gövdesini oluştururlar. Çoğunlukla düşük yoğunluğa sahip olan bu tip köpükler genellikle akustik ve darbe sönümleme, filtreler ve ısı değiştiriciler gibi kullanım alanlarına sahiptirler. Birbirleri ile bağlantılı olan gözenekleri arasında oluşan boşlukları ve geniş yüzey alanları sayesinde bu tip köpükler, yüksek ısıl iletkenlik katsayılarına sahiptirler.

b) Kapalı hücreli köpükler: Gözeneklerin birbirinden hücre duvarıyla ayrıldığı köpük tipidir (Şekil 1.b). Bu tip köpük içerisinde, sınırlı ve birbirinden bağımsız gaz fazının olduğu söylenebilir. Katı fazı ise hücre duvarları ile birleşen kirişlerden meydana gelmektedir. Kirişler ve hücre duvarları birleşerek metal köpüğün katı gövdesini oluştururlar. Bu tip köpüklerin darbe sönümleme kabiliyetleri açık hücreli olanlara göre daha iyidir. Darbe sönümleme özelliklerinin yanı sıra, oldukça iyi mukavemet ve rijitlik özellikleri sayesinde yapısal amaçlı kullanımlar için uygundurlar. Bunlara ek olarak iyi yalıtım özelliklerinden ısıl yalıtımı uygulamalarında da kullanılırlar.

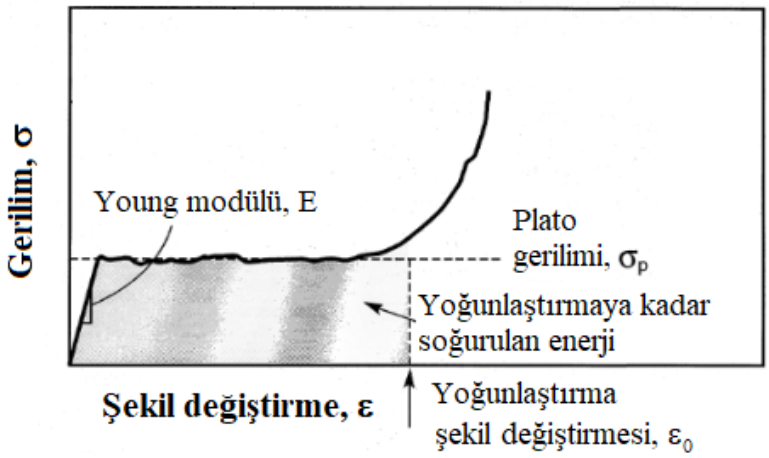


Şekil 1. a) Kapalı gözenekli metal köpük ve tetragonal gözenek modeli, b) Açık gözenekli köpüğün SEM görüntüsü ve tetragonal gözenek modeli

Metal köpüklerin temel özellikleri ve kullanım alanları

Metal köpükler, fiziksel, mekanik, akustik, ısıl ve elektriksel açıdan birçok önemli özelliğe sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde birçok alanda farklı amaçlarla kullanılmaktadırlar. Metal köpüklerin en önemli avantajı ağırlıklarının düşük olmasıdır. Aynı ağırlıkta ve gözenekli yapıda olmayan malzemelere kıyasla eğilme mukavemetleri çok yüksektir. Darbe ve titreşimleri yönden bağımsız olarak sönümleyebilirler. Ayrıca elektromanyetik kalkan özelliğine sahiptirler. Geri çevrilebilen, çevre dostu malzemelerdir. Metal köpük malzemelerin otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı, biyomedikal uygulamalar gibi yapısal kullanım alanları ile filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal sistemler, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi işlevsel kullanım alanları mevcuttur.

Metal köpükler plato stresi özelliği gösterirler ve sıkıştırılabilirler. Böylece üzerlerine gelen darbe enerjisini, plastik deformasyona, şekil değiştirmeye dönüştürerek sönümlerler.

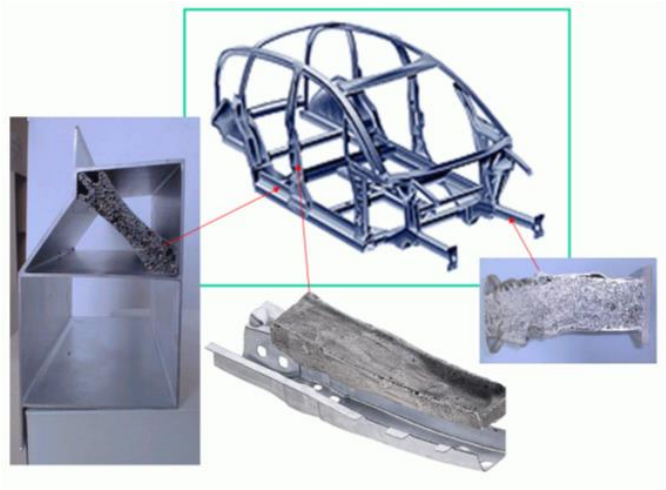


Şekil 2. Metal köpükler için genel basma (stress/strain) eğrisi (Evans *et al.* 1999)

Şekil 2'de verilen metal köpüklerin gerilime karşı şekil değiştirme grafiği, doğrusal elastik bölge, çökme bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölge olan elastik bölgedeki deformasyon, hücre duvarlarındaki gerilme ile ilgilidir. İkinci bölge plato (çökme) bölgesidir ve bu bölgede, hücre duvarlarında elastik burkulma ve kırılma oluşmaktadır. Bu bölgede, şekil değiştirmenin artışına karşılık çökme gerilmesi çok az artar veya sabit kalır. Üçüncü bölge olan yoğunlaşma bölgesinde gerilme kritik değere ulaştığında hücre duvarları birbirine dokunmaya başlar ve sonrasında malzeme yoğunlaşır. Bu bölgede gerilme değeri hızlı bir şekilde artar. Metal köpüklerin basma dayanım özellikleri, malzemenin yoğunluğuna, kendisini oluşturan alaşımın akma dayanımına ve hücre duvarlarındaki kusurlara bağlıdır. Basma ya da çökme gerilmesi köpüğün yoğunluğu ve akma dayanımı ile doğru orantılıdır (Tiryaki 2016). Alüminyum veya bakır gibi malzemelerden üretilmiş metal köpük malzemeler deforme olduklarında veya bozulduklarında kolayca geri dönüştürülebilirler. Bu özellikleri sayesinde yeniden ergitme ve köpükleştirme işlemleri gerçekleştirilebilir veya kaliteli hurda olarak maddi kazanç sağlanabilir.

Metal köpükler çok iyi kesme kuvvetiyle birlikte düşük yoğunluğa sahiptir. Bu yüzden iki levha arasında sıkıştırılmış metal köpüklerin (sandviç) konstrüksiyonlarda kullanımı oldukça uygundur. Alüminyum köpük paneller, sertlik-ağırlık oranı, ateşe dayanıklılığı ve titreşim sönümleyebilme özellikleri sayesinde gemi yapımında, kapılarda, ambar kapakları ve duvarlarında kullanılabilir.

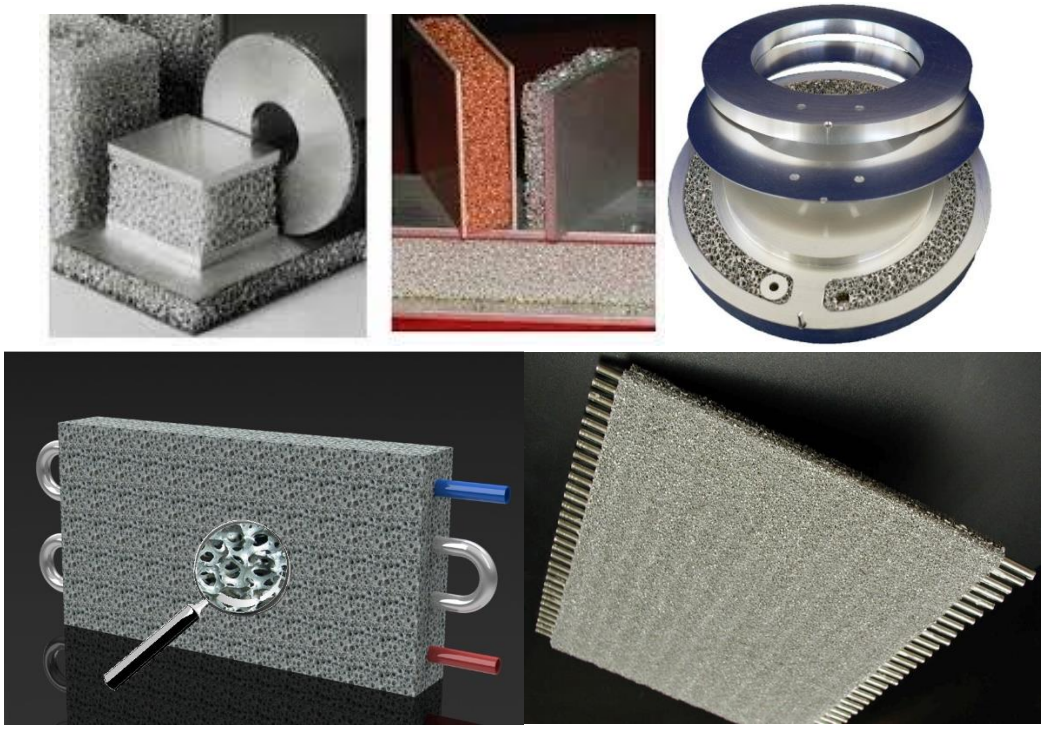
Otomobil ve trenlerin çarpışma ihtimali yüksek olan bölgelerinde, çarpma enerjisini dağıtarak deformasyonu kontrol etmede metal köpüklerin enerji soğurma özelliğinden yararlanılır. Ayrıca metal köpükler ses absorbe ve ısı yalıtımı özelliklerinden dolayı da otomotiv endüstrisinde kullanılabilir (Çinici 2012).



Şekil 3. Metal köpüklerin otomobillerde kullanımı

Açık hücreli köpükler, esneyebilme/şekil değiştirme ve yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahip oldukları için katalizör olarak kullanılırlar. Örneğin; nitrojen oksitin egzos dumanından uzaklaştırılmasında kullanılır (Degischer and Krizszt 2002).

Alüminyum köpükler, fiziksel ve mekanik özellikleri, işlenebilirliğinin kolaylığı ve sektörel avantajları sayesinde en yaygın olarak üretilen köpüklerdir. Bu köpüklerin ses, titreşim ve enerji soğurma, darbe mukavemet kabiliyetleri oldukça iyidir. Yüksek termal iletkenliğe sahip olan açık hücreli alüminyum köpükler ısı değiştiricisi olarak kullanılmaktadırlar. Isı değiştiriciler, endüstriyel fırınlarda, hava soğutmalı kondansatörlerde, kimyasal elektronik reaktörlerde, bilgisayar çiplerinde ve elektronik parçalarda kullanılmaktadır.



Şekil 4. Metal köpüklerin ısı değiştirici yapımında kullanımı

Metal köpükler, organik hücresel yapısı ve benzersiz yüzeyleri sayesinde tasarım amaçları için çok dikkat çekici bir malzeme sınıfı olmuştur. Kabarcıklı bir yüzeye sahip kapalı hücreli köpükler, ilk açık hücre tabakasına sahip kesilmiş kapalı hücreli köpükler veya malzemenin gözenek boyutuna ve kalınlığına bağlı olarak az çok yarı saydam olan açık hücreli köpükler, son yıllarda mimaride ilgi çekici bir malzeme haline gelmiştir. Alüminyum köpük paneller olan Alusion köpükler dış cephe yapımında kullanımının yanı sıra farklı mimari uygulamalar da kullanılmaktadır. Örneğin Şekil 5'te gösterildiği gibi bir yer altı girişinde veya bir çan kulesi anıtının bir parçası olan bir klaronun destek yapısında kullanılmıştır.



Şekil 5. Alusion köpükten yapılmış yarı saydam yer altı girişi ve çan kulesi anıtı

Açık hücreli alüminyum köpüklerin sıvı/gaz geçirgenliği ve korozyon direnci oldukça iyidir. Bu özellikleri sayesinde filtre (Şekil 6) ve ayırıcı olarak kullanılmaktadır. Sıvı akışını sağlayabildikleri için suda çözünmüş istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak amacıyla su arıtıcılarında kullanılmaktadırlar (Zaman 2011).



Şekil 6. İşlevsel uygulamalar için ürün dizisi (filtreler)

Kapalı hücreli alüminyum köpükler, araçların motor kısımlarında, helikopterlerin kuyruklarında, uzay araçlarının iniş takımlarında, viyadük altında ses emici bariyerlerde, çatı kaplamalarında, bina cephelerinde ve denizcilik sektöründe kullanılmaktadır (Zaman 2011). Metal köpükler yanıcı değildir; kapalı hücreli alüminyum köpüklerin hücre yüzeylerinin oksidasyonunun, doğrudan aleve karşı olağanüstü bir direnç sağladığı görülmektedir.

Metal köpüklerin bazı ahşap benzeri özellikleri vardır. Hafif, sert ve ahşap vidalarıyla birleştirme yeteneğine sahiptirler. Bu özellikleriyle mobilya, duvar panelleri yapımında kullanılırlar.

Metal köpüklerin hücresel yapıları, geniş bir frekans aralığında iyi bir akustik ve titreşim soğurmasına olanak sağlar. Sesin iç kısımlara veya hücrelere girmesine ve titreşmesine izin veren herhangi bir açık gözenekli yapı, akustik enerjiyi soğurmaktadır. Bir ses dalgası yapıya girerken, dalganın basınç darbesi gözenek duvarları veya kirişlerinin titremesine neden olur. Ortaya çıkan mekanik hareketle, ısı enerjisi olarak yayılır. Metal köpüklerdeki gözeneklerin özellikleri, farklı frekanslarda ses emilimini etkiler. Açık hücreli köpüklerde bu özellik daha iyi sonuç verir. Gözenek boyutu köpüklerin akustik soğurma verimini etkiler. Gözenekler ne kadar küçükse, soğurma verimliliği o kadar büyük olur (García-Moreno 2016). İyi bir ses soğurma özelliğine sahip olan açık hücreli köpükler susturucu yapımında kullanılmaktadır. Metal köpüklerin sönümleme kapasitesi, katı metallerden 10 kat kadar daha büyüktür. Köpük paneller, birim alan başına aynı kütleye sahip katı levhadan daha yüksek doğal eğilme titreşim frekanslarına sahiptir. İyi elektrik iletimi, mekanik mukavemet ve düşük yoğunluk, metal köpüklerin elektriksel ekranlamada kullanımı uygun kılmaktadır.



Şekil 7. Açık hücreli alüminyum köpüğün yoğun trafikli alanlarda ses soğurucu olarak kullanımı

Açık hücreli köpüklerin kullanım alanlarından biri de biyomedikal uygulamalarıdır. Titanyum metal köpükler sahip oldukları biyo uyumluluk, korozyona dayanıklılık ve düşük özgül ağırlık gibi özellikleri sebebiyle bu alanda kullanılırlar. Titanyum gibi biyo-uyumlu

malzemelerden üretilen metal köpükler gözenekli yapıları sayesinde vücuda eklenen bölgede daha fazla doku oluşması ve bu dokuların gözeneklere doğru büyümeleri sayesinde yüksek verimli vücut implantlarının üretilmesine imkan sağlamaktadırlar (García-Moreno 2016).

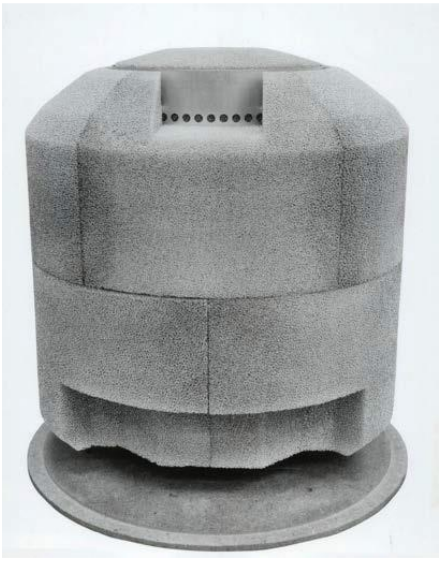


Şekil 8. Metal köpükten üretilmiş implant malzeme

Açık hücreli köpükler, gaz veya sıvı ortamın içinden geçmesine izin veren birbirine bağlı katı destekler içeren bir ağdan oluşur. Bu eşsiz yapı, boş gözeneklerin çeşitli dolgu maddeleri ile doldurularak köpüğün radyasyon kapasitesini geliştirmemizi sağlar. Elde edilen dolgu maddeli açık hücreli köpükler sadece hafif ve yüksek spesifik yüzey alanı sergilemekle kalmaz, aynı zamanda mükemmel radyasyon kalkanı verimliliğine ve iyi işlenebilirliğe de sahip olurlar (Xu *et al.* 2010).

Kriyojenik[1] şartlarda, akışkanların depolanmasında homojen ısıtmak ve soğutma sağlamak için açık hücreli metal köpükler kullanılmaktadır. Ayrıca, alüminyum köpükler kısmen dolu depolarda sıvının istenmeyen hareketlerini azaltmak için deflektör olarak kullanılmaktadır. Bu depo, kızılötesi teleskop sistemlerinde sıvı azot depolanmasını sağlamaktadır.

[1] Kriyojeni, fizikte çok düşük sıcaklıklarda yapılan üretim ve işlemler için kullanılan terimdir.



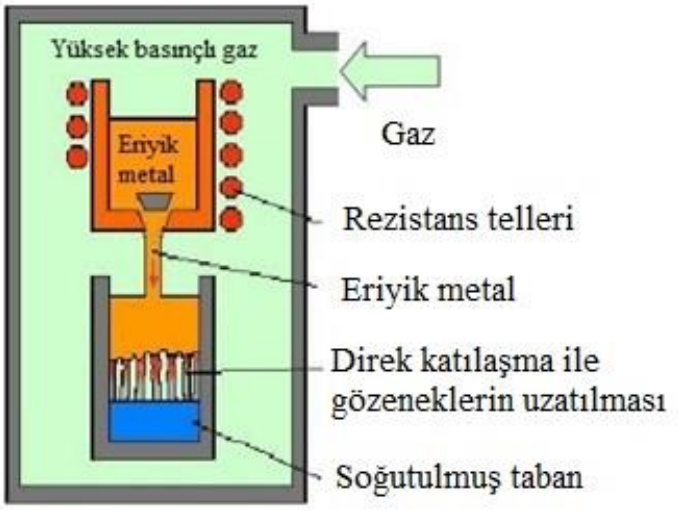
Şekil 9. Kriyojenik uydu tankında ana bileşen olarak alüminyum köpük kullanımı.

Metal Köpük Üretim Yöntemleri

Açık hücreli metal köpük üretim yöntemleri

1) Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi

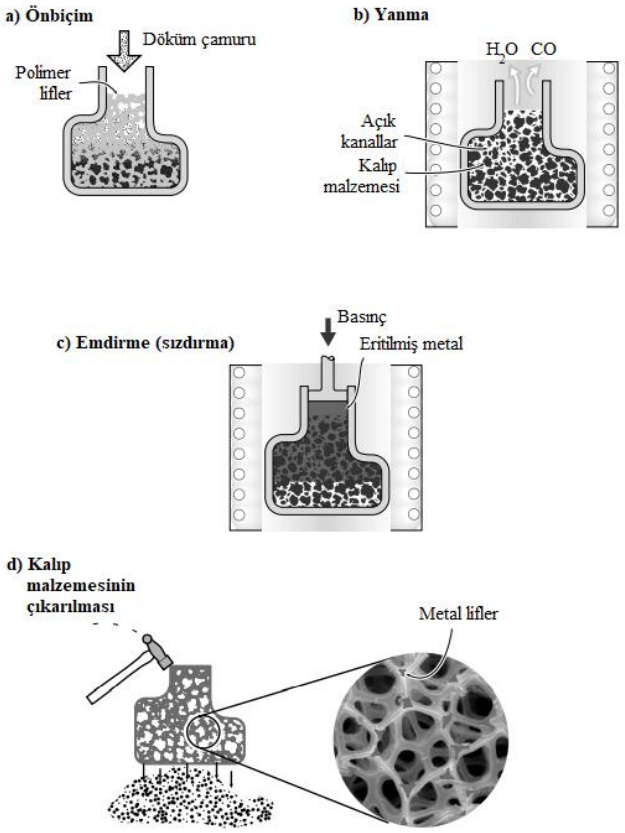
Bazı sıvı metallerin hidrojen ile ötektik oluşturmasının gözlemlenmesiyle geliştirilen bir yöntemdir. Ötektik; ayrı bileşenlerin veya bunların herhangi bir karışımının erime noktalarından daha düşük olan tek bir sıcaklıkta eriyen ve katılaşan bir madde karışımını (sabit oranlarda) ifade eder. GASAR diye de adlandırılan bu yöntemde öncelikle metal ergitilir. Ergitme işlemi yüksek basınçta gerçekleştirilir ve sıcaklık hızlıca düşürülerek yapı ani ötektik dönüşümle katı+gaz formuna dönüştürülür. Düzenek içerisine hidrojen gazı gönderilir ve bu gaz eriyik metal tarafından emilir. Emilme işleminden sonra metal gaz tarafından bozunmaya uğrar ve metal içinde gaz kabarcıkları oluşur. Gazı sönümlemiş sıvı, alt kısmı soğutulan bir tanka transfer edilir ve sıvı haldeki metal, tankın tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Bu yöntem ile üretilen metal köpüklerin gözenek şekilleri küresel ve çapları 10 μm ile 10 mm aralığında olur. Bu yöntemle yapılan köpük üretiminde alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve çeşitli alaşımlar kullanılır.



Şekil 10. GASAR yöntemi ile metal köpük üretimi

2) İnfiltrasyon yöntemi

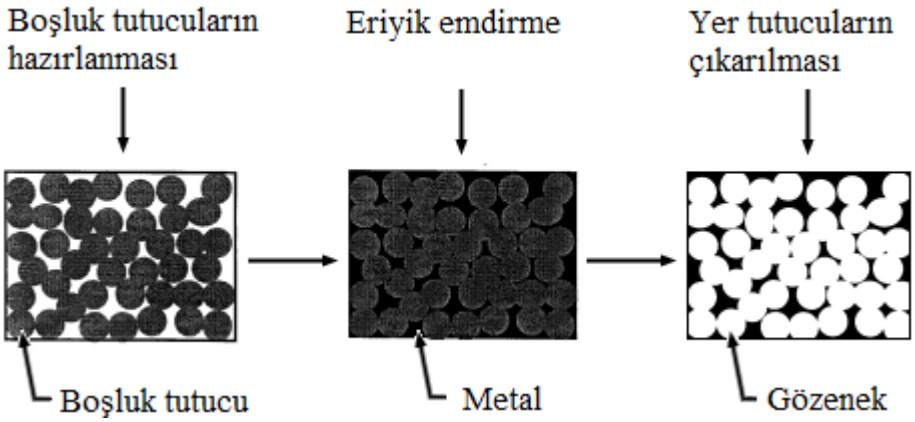
Hassas döküm yöntemi ile açık gözenekli köpüklerin üretim yöntemidir. Bu yöntem infiltrasyon olarak adlandırılır ve DUOCEL yöntemi olarak bilinir. Eriyik metal bir tür katı kalıp içerisine dökülür ve gözenek şekli bu kalıp vasıtasıyla meydana gelir. Düşük bağıl yoğunluğa ve geniş aralıkta çeşitli gözenek boyutlarına sahip polimer köpükler bu yöntemde model olarak kullanılır. Kullanılan model kuma gömülür ve kurutulduğu zaman döküm kalıbı çamuru ile kaplanır. Kalıp polimer modeli ayrıştırmak ve döküm malzemeyi katılaştırmak için fırın içerisinde pişirilir. Sonuç olarak kalıp soğutularak metal alaşımı ile doldurulur. Soğutulduktan sonra orijinal polimer köpüğe benzeyen metal köpük ayrıştırılarak alınır. Bu yöntem, 1-5 mm aralığında gözenek boyutunda ve 0,05 gibi düşük bağıl yoğunluğa sahip açık gözenekli köpük üretimi için kullanılabilir.



Şekil 11. Hassas döküm yöntemiyle metal köpük üretimi

3) Boşluk (yer) tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm yöntemi

Bu yöntemde, kalıp boşluğuna ısıya dayanıklı boşluk tutucu malzemeler doldurularak, döküm gerçekleştirilir. Boşluk tutucu malzeme seçiminde düşük yoğunluğa sahip organik ya da inorganik olan yuvarlak tutucular tercih edilir. Boşluk tutucular eriyik ile emdirildikten sonra su ya da ısıl işlemle giderilerek metal köpük elde edilir. Döküm işleminden sonra tanecikler ya metal ürün olarak kalır ya da uygun bir çözücü ile çıkarılır. Bu yöntemde boşluk tutucu kullanıldığı için üretilen köpüğün gözenek boyutu dağılımı kolaylıkla kontrol edilebilir. Ancak bu yöntem ile üretilen köpüklerin maksimum gözeneklilik oranı %80'dir. Erime noktası düşük olan alüminyum, kurşun, magnezyum, çinko, kalay gibi metallerin köpükleştirme işlemi bu yöntemle yapılabilir.

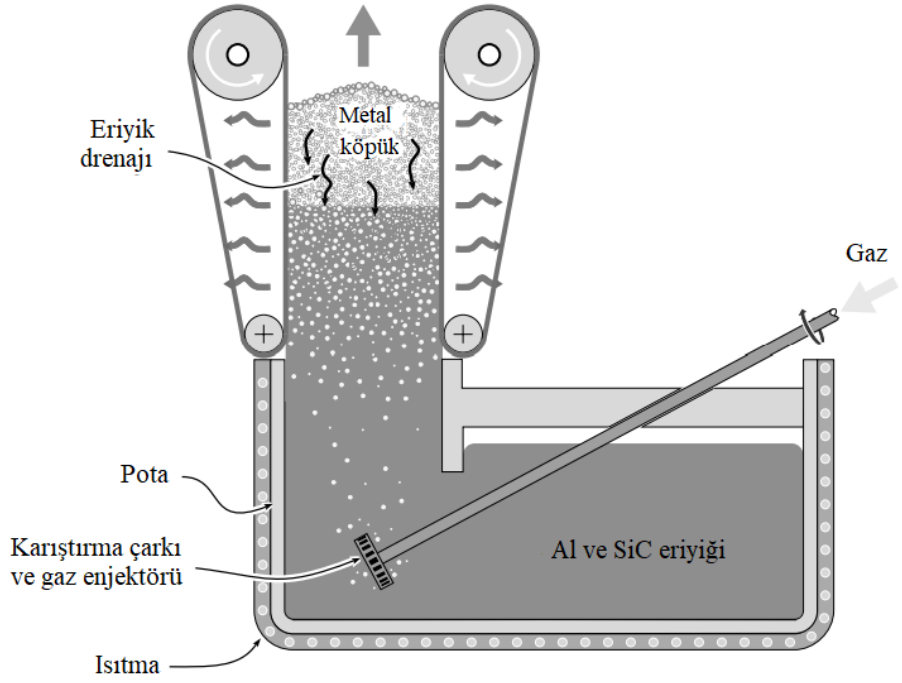


Şekil 12. Boşluk tutucu maddeler etrafına döküm yöntemiyle metal köpük üretimi

Kapalı hücreli metal köpük üretim yöntemleri

1) Eriyik metal içerisine gaz enjeksiyon yöntemi:

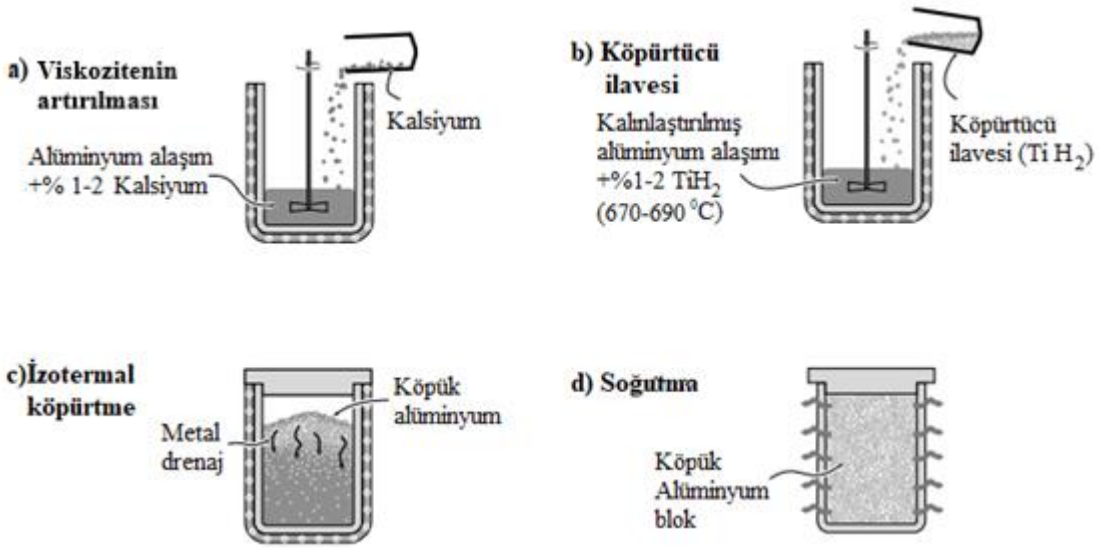
Bu yöntemde temel amaç, sıvı metal içerisine dışarıdan gaz enjekte ederek eriyik içerisinde gaz boşlukları meydana getirmektir. Elde edilen gaz baloncuklarını dengelemek ve sıvı metal yüzeyine kaçmalarını önlemek için sıvının viskozitesini artırmak gerekir. Viskoziteyi arttırmak için genellikle sıvı metale SiC, Al_2O_3 veya MgO gibi seramik parçacıklar ilave edilir ve eriyik karıştırılır. İkinci adımda ise enjekte edilecek gaz (hava, nitrojen, argon) özel tasarlanmış döner çarklar veya titreşimli üfleçler vasıtasıyla püskürtülmesi ile düzgün gaz baloncukları oluşturulur. Bu baloncuklar dağılarak yüzeye çıkarlar ardından konveyöre çekilirler ve soğuma ve katılaşmaya bırakılırlar. Bu yöntemle üretilen metal köpükler 0,069-0,54 g/cm^3 yoğunluk aralığında ve %80-98 gözenekliliğe sahip olabilirler. Ortalama gözenek boyutları 3-25 mm arasında ve gözenek duvarı kalınlıkları 50-85 μm arasında değişiklik gösterebilir. Bu değerler gaz akışına, çark hızına, üflecin titreşim frekansına ve diğer parametrelere göre değişiklik gösterebilir.



Şekil 13. Eriyik gaz enjeksiyon yöntemiyle metal köpük üretimi

2) Eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilave edilmesi yöntemi:

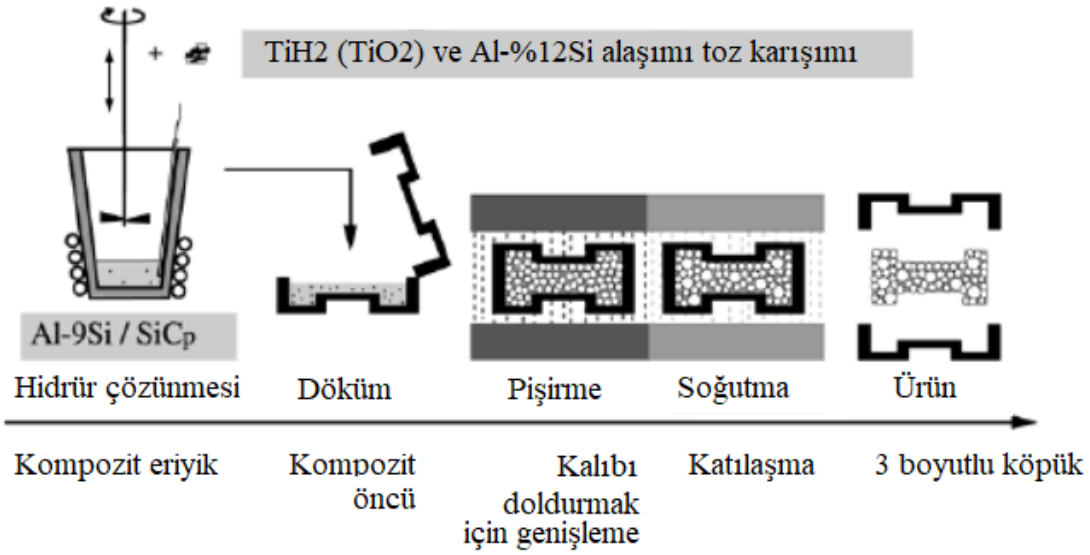
Bu yöntemde, eriyik metal içine TiH_2, ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi köpürtücü maddeler eklenerek köpürtme işlemi yapılır. Köpürtücü madde, uygun sıcaklıkta çözünerek gaz açığa çıkarır ve köpükleşme meydana gelir. Bu yöntem iki basamakta gerçekleşir. Birinci basamakta, köpürtme işlemi yapılacak metal atmosfer ortamında ve sabit sıcaklıkta eriyik hale getirilir. Bu işlem sırasında viskoziteyi ayarlamak için belli oranlarda Ca, Al_2O_3, kalsiyum-alüminyum oksit veya kalsiyum oksit eriyik içerisine eklenerek belli bir hızda ve belli bir süre karıştırılır. Viskozite istenilen değere geldikten sonra ikinci aşamaya geçilir. Eriyik içerisine, köpürmeyi sağlamak üzere parçacık şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2, $CaCO_3$) ilave edilir. Köpürtücü maddenin ayrışmasıyla H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkar. Açığa çıkan gaz köpürmeye neden olur. Kademeli olarak malzeme genleşmeye başlar ve köpükleşme sabit basınçta gerçekleşir. Toplam köpükleşme tipik bir uygulama için yaklaşık 15 dakika alabilir.



Şekil 14. Eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme yöntemiyle metal köpük üretimi

3) Sıvı metal yolu ile köpük üretim yöntemi (FORMGRIP):

FORMGRIP (Foaming of Reinforced Metal by Gas Release in Precursor) yönteminin ilk aşamasında titanyum hidrür (TiH_2) tozlarına ısıl işlem uygulanır ve yüzeyde titanyum oksit film tabakası oluşturulur. Daha sonra hidrür eriyik alüminyumla karıştırılır. İkinci aşamada ise karışım titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi için ısıl işlem uygulanarak köpükler elde edilebilir.



Şekil 15. FORMGRIP yöntemiyle metal köpük üretimi

4) Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurjisi yöntemi ile metal köpük elde etme işlemi birkaç aşamadan oluşur. Bu aşamalar şunlardır:

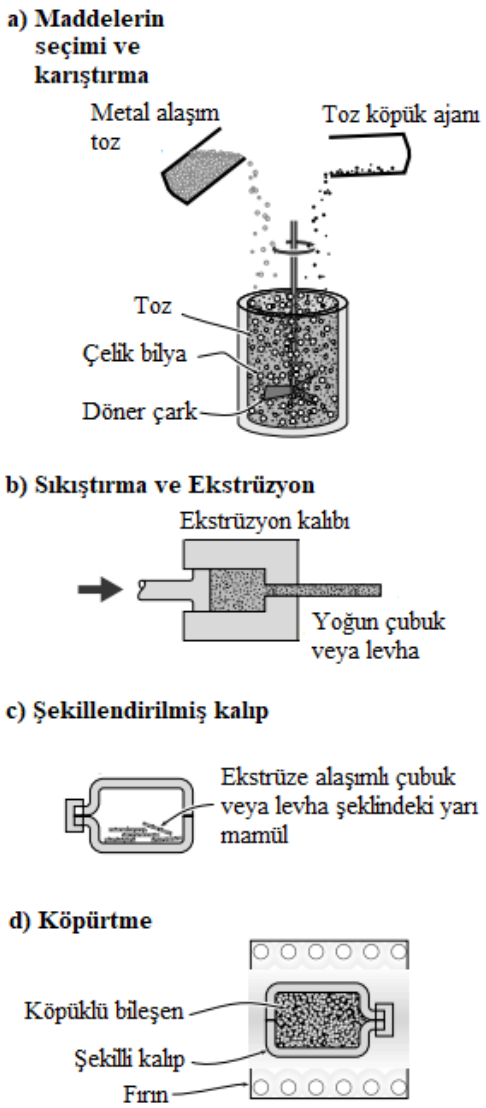
Karıştırma: Öncelikle karışımda kullanılacak metal tozuyla gaz oluşturacak köpürtücü madde tozları belli oranlarda hazırlanır ve homojen şekilde karıştırılır. Yeterli derecede karıştırılan karışım sıkıştırılarak yarı bitmiş ürün elde edilir.

Gözenek Oluşumunun Başlangıcı: Preslenerek tablet haline getirilen karışım fırına konulur. Fırında uygulanan sıcaklık arttıkça, köpürtücü madde içerisindeki gaz ayrışarak gözeneklerin çekirdeğini oluşturmaya başlar. Köpürtücü maddenin ayrıştığı ve alaşımın ergidiği sıcaklık değerlerine bağlı olarak çekirdek oluşumu, katı, yarı katı ya da sıvı hâlde gerçekleşebilir.

Gözeneklerin Büyümesi: Ayrışmakta olan köpürtücü maddeden çıkan gazın sürekliliği sayesinde çekirdekler büyür ve bir araya gelerek köpüğü oluşturur. Gözenek boyutu belli bir büyüklüğe gelince ısıtman durdurulur. Isıtma devam ederse gözeneklerde çökme meydana gelir.

Katılaşma: Hızlı soğutma, gözeneklerin bozulmasına ya da gözenek duvarlarında çatlaklar oluşmasına sebep olur. Çok yavaş soğutma ise kararsız durumdaki köpüğün çökmesine sebep olur. Bu istenmeyen durumların oluşmaması için metal uygun zamanlamayla ve uygun hızda katılaştırılmalıdır. Gözeneklerdeki çökmeyi engellemenin bir diğer yolu ise viskoziteyi artırmaktır. Viskoziteyi artıran katkı maddeleri genellikle homojen dağıtılmış ve sıvının içinde katı olarak kalan oksitler veya karbürler gibi metal olmayan parçalardan oluşur. Yarı mamul parçaların tam genişlemesi için gerekli olan zaman, sıcaklığa ve numunenin boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişir. Metal köpüklerde, köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanıldığı Al köpüklerde, köpüğün yoğunluğu alüminyum yoğunluğu ile orantılıdır. Bu orantı kullanılan tozların ağırlıkları ölçülerek yapılır. Al ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılan köpürtücü madde miktarının % 0,5-2,5 gibi düşük olduğu bulunmuştur.

Köpürtme işlemi, belli bir sıcaklıkta ve belli bir süre sonra kesilirse belli bir yoğunluk elde edilecektir. Köpürtme işlemine devam edilirse daha düşük yoğunluk hatta köpükte çökmeler görülecektir. Bu durumda gözenek yapısı bozulacaktır (Çinici 2012).



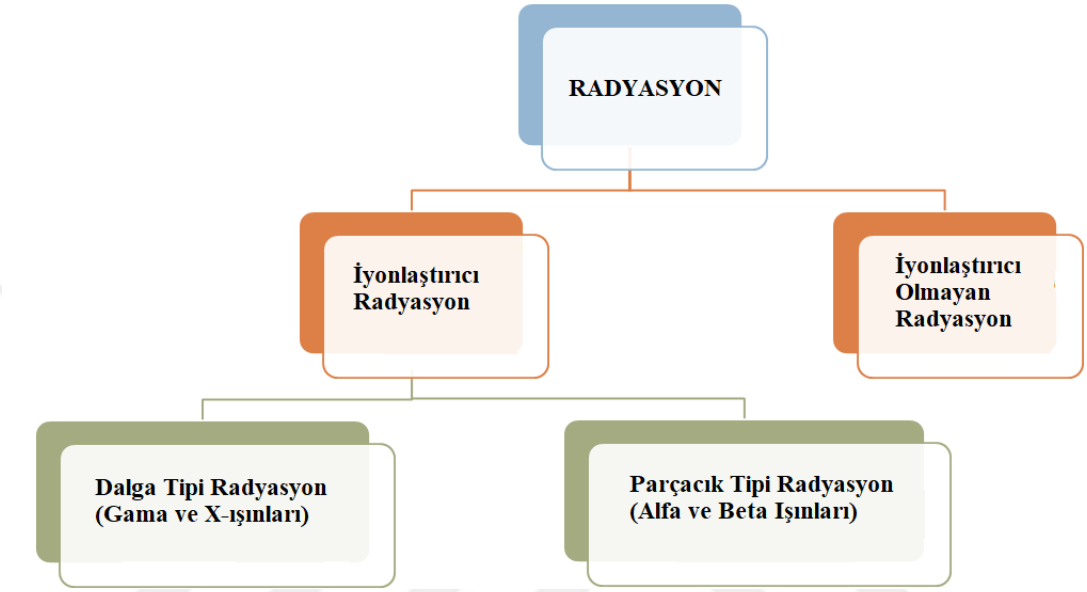
Şekil 16. Toz metalurjisi yöntemi ile metal köpük üretimi

Radyasyon

Radyasyon esas itibariyle su, hava, uzay vb. gibi ortamlar boyunca dalga veya parçacık (α, β, p...) olarak yayılan enerji paketi olarak tanımlanır. Radyasyon genel olarak dalga ve parçacık radyasyonu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Parçacık tipi radyasyonlar, belli bir kütle ve enerjiye sahiptir. Dalga tipi ise belli bir enerjiye sahip ancak kütlesizdir. Parçacık radyasyonları hızla hareket eden mermiler gibidirler, çok küçüktürler ve çıplak gözle görülmezler. Dalga tipi radyasyonlar ise titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgaları gibidir (elektromanyetik dalgalar). Bütün elektromanyetik dalgalar ışık hızıyla hareket ederler. Parçacık ve dalga tipi radyasyonlar da maddeyle etkileşmelerine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki gruba ayrılır. İyonlaştırıcı radyasyonlar, etkileştiği maddede iyonlaşma meydana getirirler. İyonlaşma, cansız maddelerde ve tüm canlılarda oluşabilir. İyonlaştırma meydana getirdikleri için bu tip radyasyonlar canlılar için oldukça

zararlıdır. Başlıca iyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri; alfa ve beta parçacıkları, gama ve X-ışınları ve küçük ihtimalli de olsa nötronlardır.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar, iyonlaştırıcı olanlara kıyasla daha küçük enerjiye sahiptirler ve bu tip radyasyonlar madde içerisinden geçerken molekül ve atomların dönme, titreşim veya elektronik enerji değerlerini değiştirirler. Ultraviyole, kızılötesi, radyo dalgaları ve mikrodalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon çeşitleridir.



Şekil 17. Radyasyon türleri.

İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitleri

Alfa parçacıkları

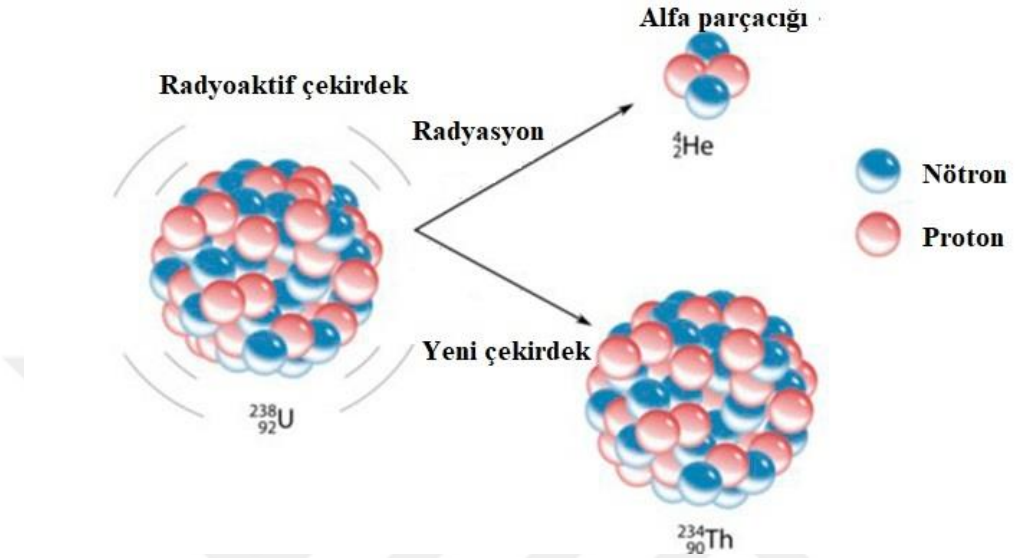
Proton ve nötron fazlalığından dolayı kararsız halde olan çekirdek kararlı hale geçerken bir alfa parçacığı yayınlar. Alfa parçacıkları iki kez iyonlaşmış He atomlarıdır. Alfa bozunmasında bir ana çekirdek, bir alfa parçacığı ile bir ürün çekirdek oluşturarak parçalanır. Çekirdek iki proton ve iki nötronunu kaybeder dolayısıyla kütlesi dört, birim yükü iki birim azalır. Bu bozunumda proton, nötron sayıları ve toplam enerji korunur.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He(\alpha) + Q \qquad (2.1) $$

Alfa parçacıkları uranyum, toryum, polonyum ve radyum gibi kütle numarası 200'den büyük olan radyonüklitlerden yayınlanır. Enerjileri 4-9 MeV aralığındadır. Yüklü parçacıklar olduklarından elektrik ve manyetik alanda saparlar. Doğal radyasyon kaynaklarının yaydığı en iyonize edici parçacıklardır.

Alfa parçacıklarının giricilik özellikleri oldukça azdır ve küçük kalınlıkta maddeler ile durdurmak mümkün olmaktadır. Bunun nedeni, diğer radyasyon çeşitlerine bakıldığında büyük

elektrik yüklü olmalarıdır. Fazla miktardaki bu yük sebebiyle, alfa parçacığı bir madde içinden geçerken yoğun bir iyonlaşma meydana getirir ve enerjisini hızlı bir şekilde kaybeder. Enerjilerini kaybeden alfa parçacıklarının ilerleme mesafesi çok kısa olmaktadır. Bu sebeple de normal süreçte dış radyasyon tehlikesi yaratmamaktadırlar. Fakat yaralar, solunum ve mide vasıtası ile vücuda girdikleri takdirde tehlikeli bir hale gelmektedir.

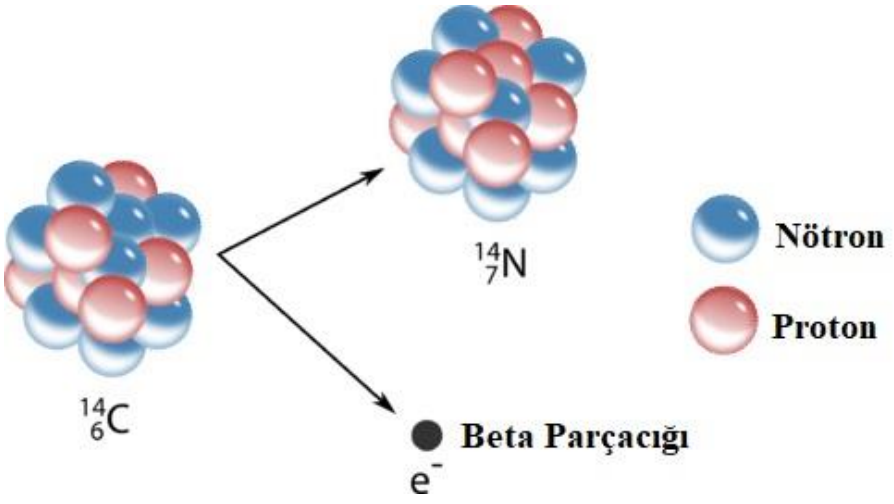


Şekil 18. Alfa bozunumu

Beta parçacıkları

Beta parçacıkları, kararsız çekirdeklerden yayınlanan pozitif (β^+) veya negatif (β^-) yüklü elektronlardır. Beta bozunumu üç şekilde gerçekleşir. Çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek içindeki nötron bozunuma uğrayarak bir protona, bir elektrona ve antinötrinoya dönüşür.

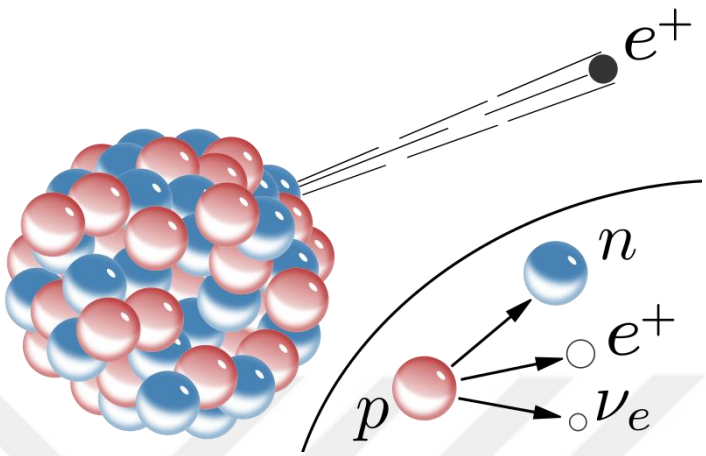
$$n \rightarrow p + e^- + \upsilon^- \tag{2.2}$$



Şekil 19. β^- bozunumu

Atomdaki kararsızlık nötron azlığından kaynaklanıyorsa protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona dönüşür. Nötron çekirdekte kalır ve bir pozitron yayınlanır. Bu durumda proton sayısı bir azaldığı için atom numarası değişir, kütle numarası sabit kalır.

$$p \rightarrow n + \beta^{+} + \upsilon \tag{2.3}$$

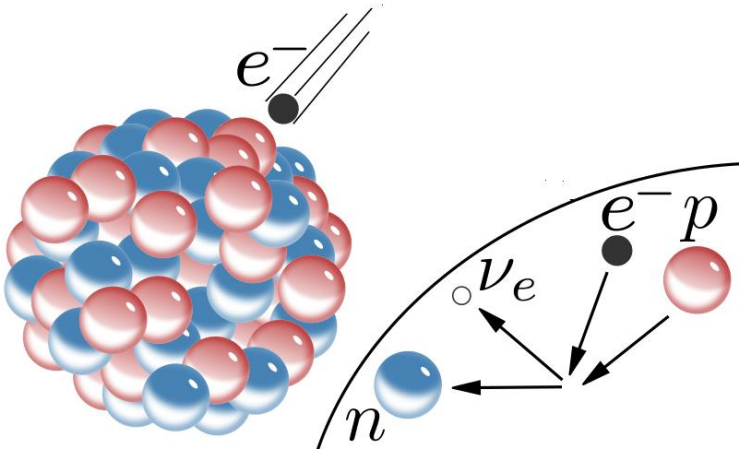


Şekil 20. β^{+}bozunumu.

Kararsızlık proton fazlalığından ise çekirdeğe yakın yörüngelerdeki elektronlardan biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektron ile proton birleşir ve nötron ile nötrino meydana gelir.

$$p + e^{-} \rightarrow n + \upsilon \tag{2.4}$$

Pozitron bozunumunda olduğu gibi bu bozunumda da proton sayısı bir eksilir, kütle numarası sabit kalır. Yörüngede elektronun oluşturduğu boşluk üst yörüngelerdeki başka bir elektronla doldurulur ve bu geçişte karakteristik X-ışınları yayınlanır.



Şekil 21. Elektron yakalama

Beta parçacıkları, belli bir yük ve kütleye sahip oldukları için bir maddeyle etkileştiklerinde iyonlaşmaya meydana getirirler. İyonlaştırıcı güçleri alfaya göre daha azdır.

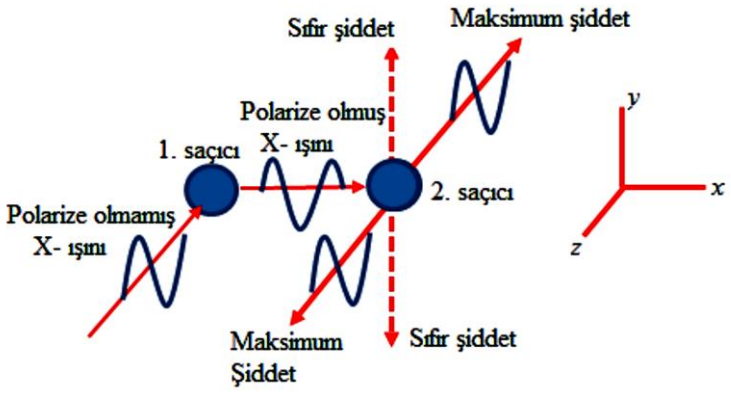
Giricilik güçleri ise alfa parçacıklarına göre çok daha fazladır. Beta parçacıklarının zararlı etkisinden korunmak için ince alüminyum levhadan yapılmış bir zırh malzemesi kullanmak yeterli olur. Sıfırdan maksimuma kadar değişen enerji değerlerine sahiptirler. Sahip oldukları maksimum enerjiye son nokta enerjisi denir. Farklı noktalarda görüntü oluşturması enerji ve şiddetlerinin farklı olduğunu gösterir. Alfa parçacıkları gibi bir yüke sahip olduklarından dolayı elektrik ve manyetik alanda saparlar.

X-ışınları

W.C. Roentgen, katot ışınları üzerinde çalışırken, üstünü siyah bir kartonla örttüğü Crookes tüpünden yüksek gerilimli elektrik akımı geçirdiğinde, odada bulunan bir kavanoz içindeki baryumlu platin siyanür kristallerinde kuvvetli bir fluoresans olayı meydana geldiğini farketmiştir. Siyah kartonu geçebilen ve fluoresan yaratma özelliği olan yeni bir ışını bulduğunu anlayarak, bu ışın üzerindeki çalışmalarını sürdürmüştür. Yine bir rastlantı ile bu ışının penetrasyon gücünün olduğunu ve bunun, değişik cisimlerde farklı olduğunu görmüştür. Bulduğu bu ışını X-ışını olarak adlandırmıştır.

İvmeli yükler elektromanyetik ışıma yapar. Elektron da ivmeli bir yüktür ve hızlı elektronun yavaşlatılmasıyla oluşan X-ışınları da elektromanyetik dalgalardır. X-ışınlarının elektrik ve manyetik alanlar içinde bir sapmaya uğramadan doğru yollar boyunca ilerlediği, saydam olmayan maddeler içinden kolayca geçtiği, fosforlu maddelerin parlamasına yol açtığı ve fotoğraf plakalarına etki ettiği, keşiflerinden kısa süre sonra bulunmuştur.

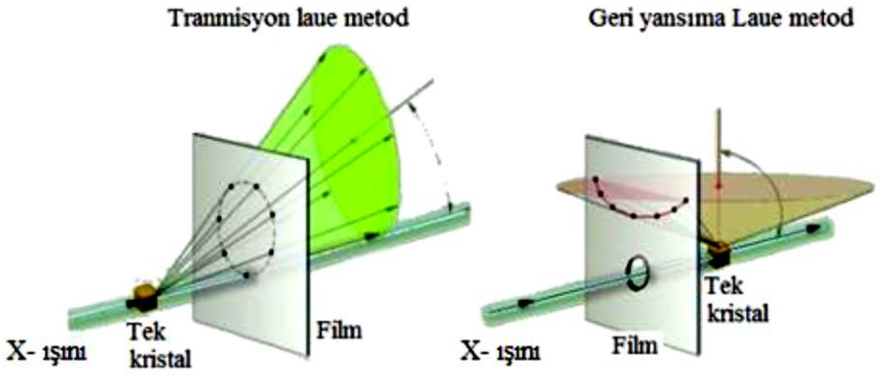
Barkla, X-ışınlarının polarizasyonunu açıklayarak, bu ışınların dalga özelliğine sahip olduğunu ilk kez ortaya çıkarmıştır. Barkla'nın yaptığı deneyde (Şekil 22), -z yönünde kutuplanmamış bir X-ışını demeti bir karbon blok üzerine düşürülür ve saçılmaya uğrar. X-ışınlarının elektrik vektörleri, karbon atomlarına ait elektronları titreştirir ve ışıma yapmalarına sebep olur.



Şekil 22. X-ışını polarizasyonunu gösteren Barkla deneyi

Elektromanyetik dalgaların elektrik alan vektörü dalganın yayılma doğrultusuna diktir ve ilk X-ışınları yalnızca x-y düzlemi içinde kalan elektrik alan vektörüne sahiptir. +x yönünde saçılan X-ışını, yalnızca y doğrultusunda elektrik alan vektörüne sahip olabilir ve bu nedenle düzlem polarizedir. Bu polarizasyonu göstermek için, ışının yolu üzerine sağdaki gibi bir başka karbon blok konur. Bu bloktaki elektronlar, yalnızca y doğrultusunda titreşmektedirler ve bu yüzden sadece x-z düzlemi içinde yayılan X-ışınları ışıma yapar, y doğrultusunda ışıma olmaz. Saçılan X-ışınlarının x-z düzlemi dışında gözlenememesi X-ışınlarının dalga özelliğini doğrulamaktadır.

Bir kırınım ızgarasındaki yarığın genişliği kırınıma uğrayan dalganın dalgaboyu ile karşılaştırılabilir olması gerekmektedir. Fakat X-ışınları için önerilen dalga boyları çok küçük olduğu için X-ışınlarının gerektirdiği dar aralıklarla kırınım ağları yapmak keşfinin ilk dönemleri için mevcut sistemlerle mümkün değildi. Von Laue X-ışınları için bir kırınım yarığı olarak tek bir kristalin kullanılabileceğini farketmiştir. 1850'de, bir kristalin örgü olarak düzenlendiğini öne sürmüş ve bir katıda moleküller arası mesafenin 10 nm civarında olduğunu söylemiştir. Öyleyse X-ışınları bir dalga ise, bir kristaldeki atomlar onları kırınıma uğratabilirdi. Bu deneyle Laue 1912'de X-ışınlarının aynı zamanda dalga tabiatına da sahip olduğunu göstermiştir. 1913'de Moseley, çizgi spektrumlarındaki çizgilerin hedef elementlerin karakteristiği olduğunu ve bunların atom numaraları gibi ardışık olduğunu göstermiştir. Böylece 1920'lerin başında bilinmeyen elementler keşfedilerek periyodik tablonun oluşturulma çalışmaları başlamıştır. Tarihsel gelişim süreci, Bragg'ın, X-ışınlarının yansıma kanununu bulması, X-ışını spektrumlarının teorisinin Summerfeld tarafından çalışılması ve 1929'da Larson tarafından X-ışınlarının anormal dispersiyonunun keşfedilmesiyle devam etmektedir.



Şekil 23. X-ışınlarının dalga tabiatına sahip olduğunu gösteren Laue'nin deneyi

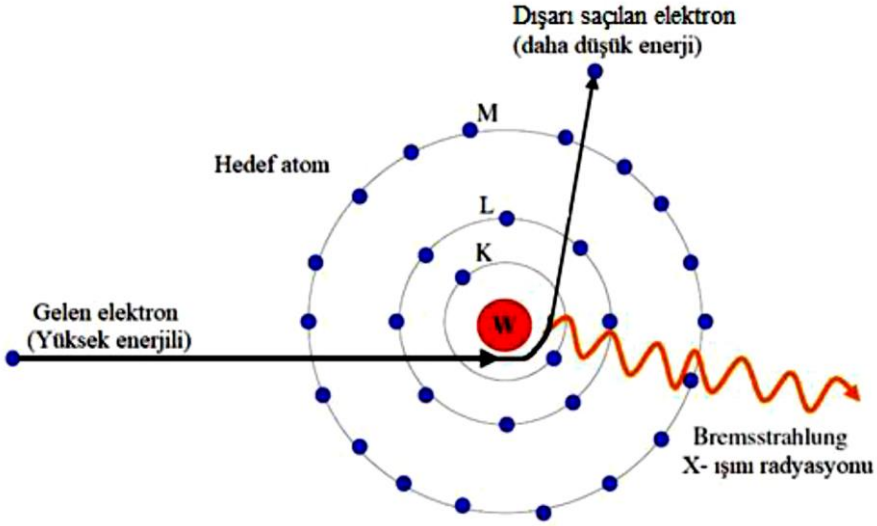
Elektromanyetik yayımlama kaynağına göre yapılan sınıflandırmaya göre gama ışınlarından radyo dalgalarına kadar yayılmış sürekli ışıma dizisine elektromanyetik spektrum denir. Spektrumda dalga boyları yaklaşık 10^{-12}-10^{-8} m aralığında olan elektromanyetik dalgalar X-ışınları olarak kabul edilmektedir. X-ışınları, görünür ışıktan 10^{-4} kat daha küçük dalga

boyuna ve 10^4 kat daha enerjiye sahiptir. Elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili kısmında yer alan X-ışını bölgesinin sınırlarına baktığımızda keskin bir şekilde ayrılmadığını görürüz. Kısa dalga boylu kısmı γ-ışınlarının sınırı ile uzun dalga boylu kısmı ise morötesi ışığın sınırı ile karışır. X-ışınları, sürekli X-ışınları ve karakteristik X-ışınları olmak üzere iki grupta incelenir.

Sürekli X-ışınları

Sürekli X-ışınları, yüksek enerjili yüklü parçacıkların (elektron, proton veya α parçacıkları gibi) ağır çekirdeklerin Coulomb alanından geçerken enerji kaybetmeleri veya nükleer saçılmalarla hedef içerisinde adım adım yavaşlatılmaları sonucu meydana gelir. Sürekli X- ışını, yüksek hızlı elektronlarla atom çekirdeğinin etkileşmesiyle ortaya çıkar.

De Broglie dalga modeline göre; elektron kendine eşlik eden elektromanyetik dalga ile çekirdeğin çevresinde hareket ederken aniden saçılmaya uğrar ve farklı bir yönde ivmelenir. Bu şekilde enerjisinin bir kısmını ya da tamamını kaybeder. Elektronun kaybettiği bu enerji elektromanyetik radyasyon olarak boşluğa yayılır. Bu ışınım, sürekli ya da frenleme ışınımı olarak adlandırılır. Elektron böyle ışınımlar yaparak enerjisini kısmen ya da tamamen kaybeder. Yüksek enerjili elektronlar bir hedefe çarptığında enerjilerinin yaklaşık %1'lik kısmıyla sürekli X-ışınları oluşur. Sürekli X-ışını spektrumları geniş bir frekans aralığını kapsayan sürekli bir ışımaya karşılık gelmektedir. Bu nedenle sürekli X-ışınlarına beyaz X-ışınları da denir.



Şekil 24. Sürekli X-ışınlarının oluşumu

Analitik amaçlarla kullanılan X-ışınları dört şekilde elde edilir: Yüksek enerjili bir elektron demeti ile bir metal hedef bombardıman edilir (X-ışını tüpü), fluoresan X-ışınları (ikincil ışınlar) elde etmek için bir maddeye X-ışınları (birincil) gönderilir, X-ışını emisyonu olan bir radyoaktif kaynak ve sinkrotron kaynaklar kullanılır. En yaygın kullanılan X- ışını kaynağı, X- ışını tüpleridir. İçinden elektrik akımı geçirilen bir telin ısıttığı bir katot,

termoiyonik ışıma yolu ile elektron salar. Katot ile metal hedef arasına uygulanan yüksek voltaj, elektronları hedefe doğru hızlandırır. Hedef yüzeyi elektron hüzmesine göre belli bir açıya sahiptir. Elektronların yavaşlamadan hedefe varmalarını sağlamak için tüpün havası boşaltılmıştır. Hedefe çarpan elektronların çok az bir kısmı enerjilerini bir defada ve tümüyle bir X- ışını fotonu olarak yayımlayabilir. Bu elektronlar minimum dalgaboylu ışımaları oluştururlar. Minimum dalga boyu ($\lambda_{\min}$) hedef üzerine gelen elektronun tüm kinetik enerjisini ($E = eV_0$) tek bir fotona vermesine karşılık geldiğine göre, E_x yayımlanan X- ışınının enerjisi olmak üzere;

$$E = eV_0 \tag{2.5}$$

$$E_x = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \tag{2.6}$$

yazılabilir. Buradan $\lambda_{\min}$ için

$$\frac{hc}{\lambda_{\min}} = eV_0 \rightarrow \lambda_{\min} = \frac{hc}{eV_0} \tag{2.7}$$

ifadesi elde edilir.

Bir X- ışını tüpünde elektronlar tarafından oluşturulan sürekli X- ışını spekturumu, uyarıcı elektronların maksimum enerjilerine karşılık gelen, $\lambda_{\min}$ kısa dalgaboyu sınırıyla karakterize edilir. (2.7) eşitliğinde, *h* Planck sabiti, *c* ışık hızı, *e* elektronun yükü ve V_0 ise tüpe uygulanan potansiyeldir. Kısa dalgaboyu sınırı ile uygulanan potansiyel arasındaki bu ilişki Duane-Hunt kanunu olarak bilinir. Sürekli ışıma ihtimali;

$$P \propto \frac{q^2 Z^2 T}{M_0^{\,2}} \tag{2.8}$$

ile verilir. Burada, *q* elektron yükü cinsinden parçacığın yükü, *Z* hedef maddesinin atom numarası, *T* parçacığın kinetik enerjisi ve *M0* ise parçacığın durgun kütlesidir. Protonlar ve ağır parçacıklar elektron kütlesine göre daha büyük kütleye sahip olduklarından λ spektrumunun şiddeti elektronların meydana getirdiğinden dört milyon kez daha küçüktür. X-ışını tüpünde elektronların oluşturduğu sürekli X- ışını spektrumu şu özelliklerle karakterize edilir.

- Kısa dalgaboyu limiti λ_{min}; bu dalgaboyu altında radyasyon gözlemlenmez.
- Maksimum şiddetin dalgaboyu λ_{max} yaklaşık olarak $\lambda_{min/2}$ dir.
- Toplam şiddet, tüp voltajı ve hedef maddesinin atom numarası (*Z*) ile orantılıdır.

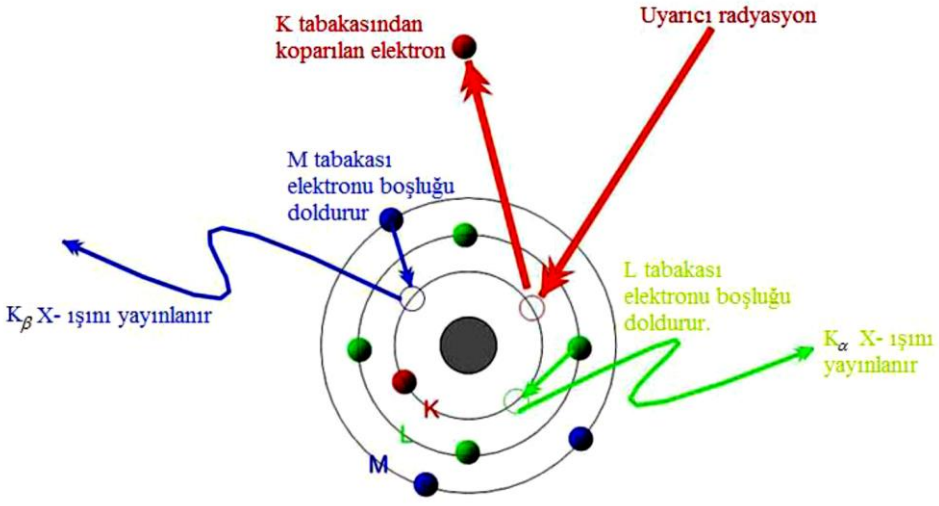
Sürekliliğin dağılımı;

$$I(\lambda)d\lambda = KiZ\left[\frac{\lambda}{\lambda_{\min}} - 1\right]\frac{1}{\lambda^2}d\lambda \qquad (2.9)$$

Kramer formülü ile verilir. *K* orantı katsayısı ve *i* akımdır. Bu ifadeden görüldüğü gibi şiddet dağılımı tüp akımı (*i*) ve atom numarası (*Z*) ile orantılıdır.

Karakteristik X-ışınları

Klasik düşünceye göre, bir atomun elektronları, merkezde bulunan çekirdek etrafında yörüngelerde dolanırlar. Yörüngelerde hareket eden elektronlar, sahip oldukları hızlarından dolayı bir kinetik enerjiye ve çekirdekten olan uzaklıklarına göre de bir potansiyel enerjiye sahiptirler. Elektronların toplam enerjileri çekirdekten uzaklaştıkça yani dış yörüngelere doğru artmaktadır. Bu özellik sayesinde yörüngelerde hareket eden elektronlar yüksek hızla dönmelerine rağmen konumlarını korurlar. Elektronların uzaysal konumları herhangi bir enerji etkisi ile bozulursa iç veya dış tabakalara doğru elektron geçişleri olur. Atomun bir iç tabakasından elektron sökülmesi durumunda oluşan boşluk, üst tabakadaki elektronlar tarafından doldurulur. Bu geçiş işlemi belli geçiş kurallarına ve minimum enerji prensibine uygun olarak gerçekleşir ve bu geçiş esnasında iki tabaka arasındaki enerji farkı kadar bir X-ışını yayımlanır. Yayınlanan X-ışını malzemeye özgü özellikler taşıdığı için karakteristik X-ışını olarak adlandırılır.



Şekil 25. Karakteristik X- ışını oluşumu

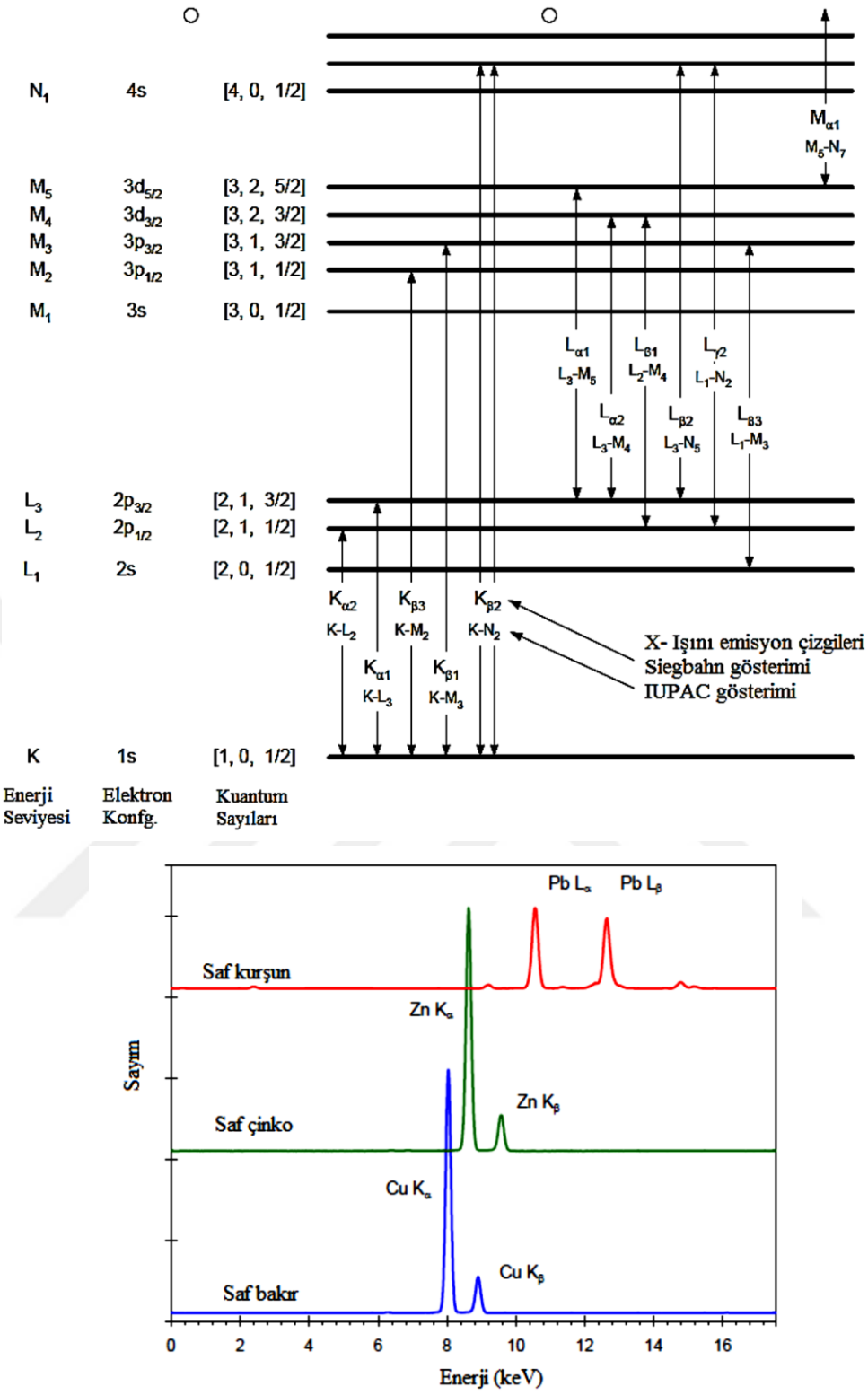
Atomlar, elektron yörüngeleri arasındaki enerji farkına eşit enerjiyi soğurarak veya yayımlayarak kuantum mekaniği ile açıklanabilen izinli yörüngeler arasında geçişler yapabilirler. Atom enerji soğurduğunda üst seviyelere çıkar ve bu duruma uyarma denir. Uyarılmış durumdaki atom enerji yayımlayarak temel hale geçer. Temel hale geçiş tek bir

adımda veya birkaç adımda olabilir. Bu geçişlerde seviyeler arası enerji farkına eşit enerjili bir foton (karakteristik X-ışını) yayımlanır. Bunlar spektrumda karakteristik çizgiler denilen K_α , K_β , L_l, $L\alpha$, L_β , L_η , L_γ , M_α , M_β , ... çizgilerini oluştururlar. Bir tabakadaki bir boşluk üst tabakalardaki bir elektron ile doldurulduğunda yayımlanan X-ışınlarının Siegbahn ve IUPAC gösterimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. X- ışını diyagram çizgilerinin Siegbahn ve IUPAC gösterimleri

Siegbahn	**IUPAC**	**Siegbahn**	**IUPAC**	**Siegbahn**	**IUPAC**	**Siegbahn**	**IUPAC**
$K\alpha_1$	K-L_3	$L\alpha_1$	L_3-M_5	$L\gamma_1$	L_2-N_4	$M\alpha_1$	M_5-N_7
$K\alpha_2$	K-L_2	$L\alpha_2$	L_3-M_4	$L\gamma_2$	L_1-N_2	$M\alpha_2$	M_5-N_6
$K\beta_1$	K-M_3	$L\beta_1$	L_2-M_4	$L\gamma_3$	L_1-N_3	$M\beta$	M_4-N_6
$K\beta_{2'}$	K-N_3	$L\beta_2$	L_3-N_5	$L\gamma_4$	L_1-O_3	$M\gamma$	M_3-N_5
$K\beta_{2''}$	K-N_2	$L\beta_3$	L_1-M_3	$L\gamma_{4'}$	L_1-O_2	$M\xi_1$	M_5-N_3
$K\beta_3$	K-M_2	$L\beta_4$	L_1-M_2	$L\gamma_5$	L_2-N_1	$M\xi_2$	M_4-N_2
$K\beta_{4'}$	K-N_5	$L\beta_5$	L_3-$O_{4,5}$	$L\gamma_6$	L_2-O_4		
$K\beta_{4''}$	K-N_4	$L\beta_6$	L_3-N_1	$L\gamma_8$	L_2-O_1		
$K\beta_{5'}$	K-M_5	$L\beta_7$	L_3-O_1	$L\gamma_{8'}$	L_2-N_6		
$K\beta_{5''}$	K-M_4	$L\beta_9$	L_1-M_5	$L\eta$	L_2-M_1		
		$L\beta_{10}$	L_1-M_4	$L\ell$	L_3-M_1		
		$L\beta_{15}$	L_3-N_4				
		$L\beta_{17}$	L_2-M_3				

Bir atomun K tabakasındaki boşluğun L tabakasında bulunan bir elektron tarafından doldurulması sonucunda yayımlanan fotonun frekansı, karakteristik spektrumunun K_α çizgisine karşılık gelir. K tabakasındaki boşluk M tabakasındaki bir elektron tarafından doldurulduğunda ise K_β çizgisine karşılık gelen fotonlar yayımlanır. Hedef metali üzerine gelen elektronların enerjileri K tabakasından elektron sökecek kadar büyük değilse, L, M, N, … tabakalarından birinden bir elektron sökülebilir ve bu kez K tabakasına benzer olarak L tabakasında meydana gelen boşluğun M, N, ... tabakalarındaki elektronlarla doldurulması esnasında $L\ell$, $L\alpha$, L_β …, M tabakası için M_α , M_β , M_γ… ve N tabakası için N_α , N_β … çizgileri kısaca L, M ve N serileri ortaya çıkmış olur (Kavaz 2016).



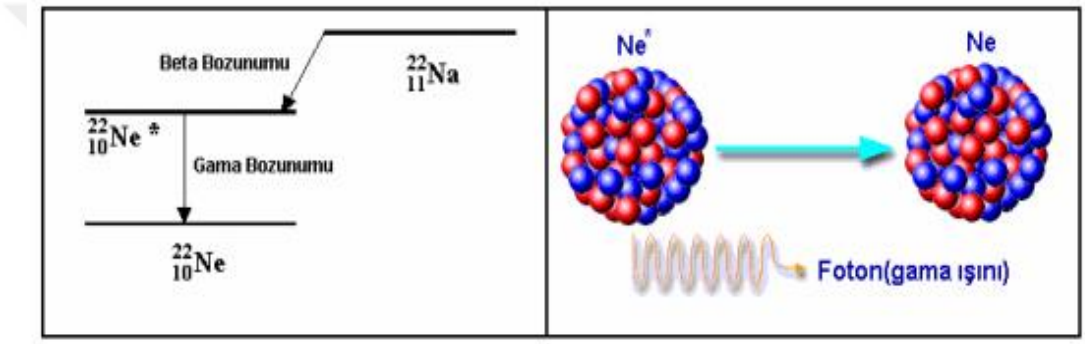
Şekil 26. Bir atomda ilgili elektron geçişleri sonucu yayımlanan karakteristik X- ışınları.

Gama ışınları

Radyoaktif bozunum sonrası uyarılmış halde olan radyoaktif bir çekirdek kararlı duruma geçerken bir foton yayınlayarak önce düşük enerji seviyesine sonra da temel enerji seviyesine döner. Enerji seviyeleri arasındaki bu geçiş sırasında gama ışını yayınlanır. Bu durumda yarı kararlı çekirdeğin atom ve kütle numarası sabit kalır ve böyle bozunmaya

izomerik bozunma denir. Gama ışınlarının yayınlanması sadece radyoaktif bozunma sonrası olmaz. Yüksek enerjili bir parçacığın başka parçacık ile çarpışmasıyla, bir parçacık ve onun karşıt parçacığının birbirlerini yok etmesiyle de gama ışınları meydana gelebilir.

Gama ışınları 10^{-10} m ile 10^{-14} m arasındaki dalgaboyu elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu elektromanyetik dalgalarıdır. Yüksek enerjili olduklarından madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar ve gazları iyonlaştırabilirler. Radyoaktif maddelerden yayınlanan gama ışınlarının enerjileri 30 keV-7 MeV aralığında olur. Fisyon olayıyla yayınlanan gamaların enerjileri ise 1010 MeV ve üzerindedir. Gama ışınlarının giricilikleri beta ve alfa parçacıklarından kat kat fazladır. 20 cm kalınlıktaki kurşun bir bloktan geçebilirler. Giriciliklerinin fazla olması sebebiyle insan vücudundan kolayca geçerler ve dokularda önemli ölçüde hasarlar meydana getirirler. Yüksüzdürler, elektrik ve manyetik alanda sapmazlar.



Şekil 27. Gama ışını yayınlaması

Nötronlar

Nötronlar, atom çekirdeğinde bulunan elektrikçe yüksüz parçacıklardır. Kütlesi elektronun kütlesinden 1839 kat daha fazladır. Yaklaşık 13 dakikalık bir yarı ömre sahip olan nötronlar, kararsız halde bulunan çekirdeklerden 7–8 MeV' lik bağ enerjisinden daha yüksek bir enerjiye sahip oldukları zaman yayınlanır. Nötronlar fisyon olayı esnasında, nükleer reaksiyonlarla ve hızlandırıcılar aracıyla elde edilirler. Yüksüz olduklarından vücut içerisine kolayca nüfuz edebilir ve dolaylı olarak dokularda iyonizasyonla zararlar oluştururlar. Çok düşük enerjili (eV veya altında) nötronlar bile Coulomb engelinden etkilenmeden, çekirdeğe girerek çekirdek reaksiyonlarını başlatabilirler.

1930'da H. Becker ve W. Bothe radyoaktif polonyum kaynağından çıkan alfa parçacıkları ile bor ve berilyum gibi elementleri bombardıman ettiklerinde, delip geçebilme gücü çok yüksek olan bir radyasyon yayınlandığını gözlemlemişlerdir. Daha sonraki çalışmalar bu radyasyonun kalın levhaları delebildiğini, manyetik ve elektrik alandan etkilenmediğini ortaya koymuştur. Fazla bir iyonlaşmaya neden olmadığı için sis odasında hiçbir iz bırakmamaktadır. Elektromanyetik bütün özelliklerini gösterdiğinden, bilinmeyen bu

radyasyonun yüksek enerjiye sahip olan fotonlardan ortaya çıkan elektromanyetik radyasyon olduğu düşünülmüştür. Curie ve Joliot, bu ışının parafinden geçtiğinde yüksek enerjili proton yayınlandığını gözlemlemişler ve protonun menzilini kullanarak, enerjisini 5,3 MeV olarak hesaplamışlardır. Eğer bu ışın gama ışını olsaydı, protonların parafinden Compton olayına benzer bir çarpışma ile koparılmaları gerekirdi. Compton kayması hesaplarına göre, bu kadar yüksek enerjili proton koparabilecek gama ışınlarının enerjisinin en az 52 MeV olması gerekir ve bu enerjili gama ışını son derece gerçek dışıdır. 1932'de Chadwick bu ışının, kütlesi hemen hemen protonun kütlesine eşit olan yüksüz bir parçacık olduğunu ileri sürmüştür ve yaptığı saçılma deneyleri ile hipotezini doğrulamıştır.

Nötronları enerjilerine göre şöyle sıralayabiliriz:

- Soğuk nötronlar E < 0,003 eV
- Yavaş (termal) nötronlar E≅0,003eV – 0,4 eV
- Yavaş (epitermal) nötronlar E≈0,4eV – 100 eV
- Orta nötronlar E≅100 eV– 200 keV
- Hızlı nötronlar E≅200 keV – 10 MeV
- Yüksek Enerjili (Rölâtivistlik) E >10 MeV

Nötronların, fizik, jeofizik ve kimya araştırmaları, hidrojen atomlarının moleküllerdeki yer tayini, uzay araştırmaları, materyal bilimi araştırmaları, uçak sanayi, silah yapımı, hızlandırıcı sürümlü sistemler (ADS) üretimi, süper iletken üretimi, kristalize malzeme üretimi, tıbbi tanı malzemeleri, manyetizma ve süper iletkenlik yapımı, transuranic (uranyumdan sonraki elementler) elementlerin belirlenmesi, medikal izotop üretimi, nötron aktivasyon analizi, kanser tedavisi, yüksek enerjili plastik üretimi olmak üzere birçok kullanım alanı vardır.

Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri

Yüksek dozda uygulanan radyasyon, insanlarda, hayvanlarda, bitkilerde ve bazı mikro organizmalarda fiziksel, biyolojik ve kimyasal olmak üzere çeşitli zararlı etkilere sebep olur. İyonlaştırıcı radyasyon türleri, etkileştiği ortamda iyonlaşma meydana getirmesi sebebiyle oldukça tehlikelidirler. Bu tip radyasyonlar bir dokuya nüfuz ettiğinde, doku hücrelerindeki suyu iyonlaştırırlar ve serbest radikallerin ortaya çıkmasına sebep olurlar. Böylece hücrenin bölünmesine ve kontrol mekanizmasının bozulmasına yol açarlar.

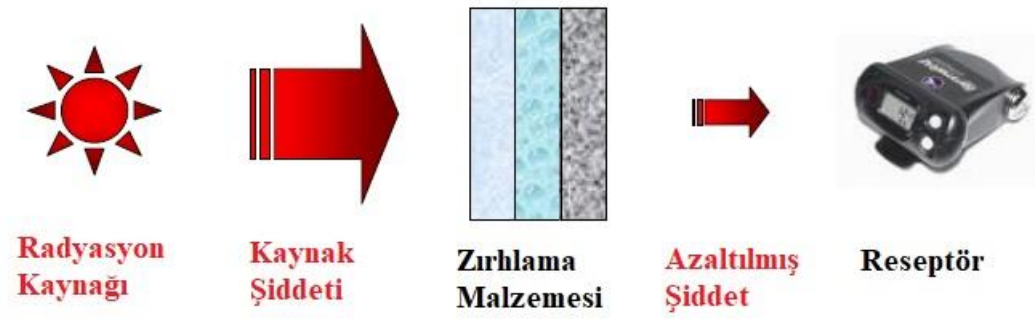
Radyasyonun sebep olduğu biyolojik etkiler deterministik etkiler ve stokastik etkiler olarak sınıflandırılır. Deterministik etkiler yüksek dozda radyasyona maruz kalınması durumundan kısa bir süre sonra meydana gelen ve ölümle sonuçlanabilen etkilerdir. Hücre tarafından aniden çok yüksek dozda radyasyon alınması ciltte yanma ve kızarıklık, üreme

organlarında ise kısırlığa neden olur. Bu etkilerin hücreye verdiği zarar dozun hızına ve şiddetine bağlı olarak değişir. Radyasyona maruz kalınması durumunda erken dönemde, bulantı, kusma, iştahsızlık, kaşıntı, ateş, baş ağrısı, tansiyon düşmesi gibi belirtiler görülebilir. Stokastik etkiler ise radyasyona maruz kalındıktan çok uzun zaman sonra bile etkisini gösterebilirler. Radyasyon hücre hasarına neden olur ve hücrenin kendisini yenilemesini engelleyerek ya da yavaşlatarak kanser oluşmasına sebebiyet verir. Çekirdek kaynaklı radyasyonlar DNA üzerinde mutasyona neden olabilir ve nesilden nesile aktarılabilirler. Bu nedenle oldukça tehlikelidirler.

α ve β parçacıkları yüklü parçacıklar olduklarından direkt iyonize etkili radyasyonlardır. Bu nedenle üst dokuyla etkileşime girerek orada birikirler ve dokunun iç kısmına geçemezler. Üst dokuda deterministik etkilerden birisi olan cilt yanığına sebep olur. γ ve nötronlar ise yüksüz olmalarından dolayı dokunun iç kısımlarına girebilirler ve buradaki yapıyı bozarak kalıcı genetik rahatsızlıklara sebebiyet verirler.

Radyasyon Zırhlama

Radyasyonlar, yüksek enerjileri, nüfuz etme kapasiteleri ve iyonlaştırma özelliklerinden dolayı kolaylıkla canlı organizmalara nüfuz edip zarar verebilirler. Bu nedenle radyasyondan uygun bir yöntemle korunmak gereklidir. Radyasyon korunmasının hedefi, etkileştiği canlı dokularında oluşturacağı etkileri tamamen önlemek veya minimum düzeye indirgemektir.



Şekil 28. Temel radyasyon zırhlama süreci

Radyasyondan korunmada alınacak tedbirler zaman, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel kurala dayanmaktadırlar. Zaman kuralında radyasyona maruz kalınma süresini minimum düzeye indirilerek alınan doz miktarının azaltması amaçlanır. Mesafe kuralında ise herhangi bir radyasyon kaynağından canlıya geçecek doz miktarını azaltmak için kaynaktan uzak olabilme şartı geçerlidir. Radyoaktif kaynağa olan uzaklık arttıkça maruz kalınan radyasyon miktarı da azalır.



Şekil 29. Radyasyondan korunma kuralları

Radyasyondan korunmak için kaynak yakınında çalışma süreleri ve kaynağa olan uzaklık en aza indirilse bile radyasyondan etkilenmemek mümkün değildir. Bunun için özellikle nükleer reaktörler ve nükleer tıp gibi yerlerde çalışanların sağlığını korumak adına radyasyonla geçirdikleri süre de göz önünde bulundurulduğunda zırhlama en etkili çözümdür. Zırhlama, radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için radyasyona maruz kalan sistem ile kaynağın, bir engel yardımıyla birbirinden ayrılmasıyla radyasyon etkisinin yok edilmesi veya minimum düzeylere indirilmesidir. Zırhlama ile radyasyonun, zırhlama malzemesinin atomlarıyla etkileşip doğrudan veya dolaylı olarak iyonlaştırma gerçekleştirmesi ve bu şekilde enerjisini tamamen veya kısmen kaybederek doz seviyesinin zararsız hale gelmesi sağlanır.

Radyasyon zırhlamanın birçok önemli işlevi vardır. Bunlardan en önemlisi, radyoaktif kaynak yakınında çalışan kişilerin maruz kaldığı etkiyi azaltmasıdır. Bu amaçla yapılan zırhlama, biyolojik zırhlama olarak adlandırılır. Bazı reaktörlerde, reaktör kabına gelen gama ışınlarının yoğunluğunu azaltmak için zırhlama yapılır. Bu zırhlama, kabı gama ışını emilimi nedeniyle aşırı ısınmadan korur ve nötronlardan kaynaklanan radyasyon hasarını azaltır. Bu zırhlama ise termal zırhlama olarak adlandırılır. Bunların yanı sıra bazı askeri teçhizatlarda olduğu gibi çeşitli hassas elektronik cihazları koruma amaçlı zırhlama yapılmaktadır.

Zırhlama, radyasyon kaynağının zırhlanması ve kaynağın bulunduğu ortamın zırhlanması olarak iki farklı şekilde yapılır. Kaynağın zırhlanması kolimatörlerle ve dış koruyucu bölmelerinin takviyesi ile yapılır.

Radyasyon zırhlamasında, zırhlama malzemesini geçen radyasyonun şiddetindeki değişim radyasyonun çeşidinden bağımsız üstel bir ifade olan Beer-Lambert yasasıyla ifade edilir. Zırhlama sonrası radyasyon şiddetindeki değişim zırhlama öncesi şiddetle ve zırh malzemesinin kalınlığıyla doğru orantılıdır ve azaldığı için negatif işaretlidir.

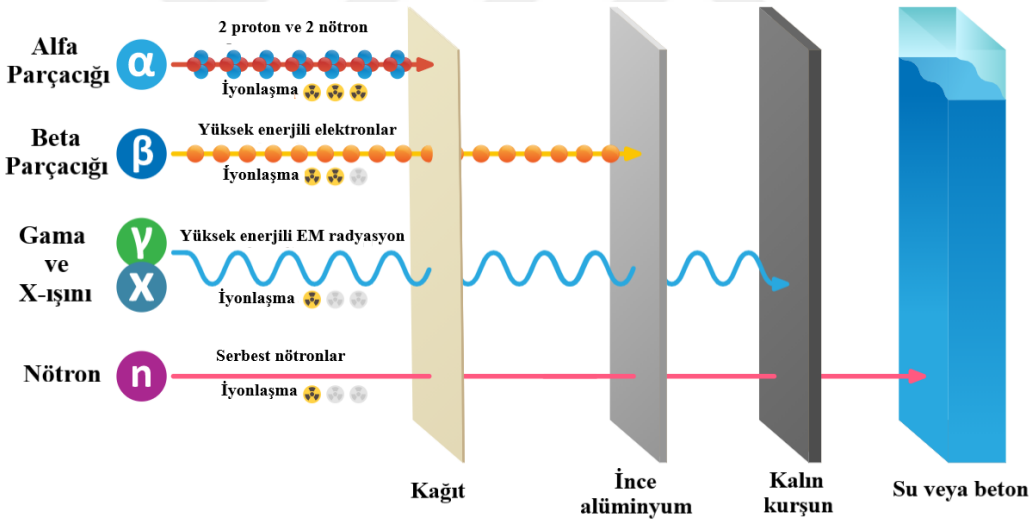
Zırhlama, daha güvenli bir iş yeri oluşturmak, yasal gereklilikleri karşılamak ve yüksek kaliteli performansı sürdürmek için nükleer tesisler endüstrisinde, tıbbi sistemlerde,

radyoizotop projelerinde, parçacık hızlandırıcı çalışmalarında ve diğer birçok alanda yaygın olarak uygulanır.

Radyasyon Zırhlama Malzemeleri

Radyasyon zırhlama tasarımı yapılırken kullanılacak malzemenin seçimi çok önemlidir. Uygun bir koruyucu malzeme türü seçmek için, korunan radyasyonun türü, radyasyonun enerjisi ve doz azaltma seviyesi dikkate alınmalıdır. Bu özelliklerin yanı sıra zırh malzemesinin ekonomik, mukavemetli, hafif olması, toksik özellikli madde içermemesi, kullanım alanının geniş olması aranılan özellikler arasındadır.

Radyasyon zırhlamada kullanılacak malzemenin seçimi, radyasyonun türüne göre farklılık gösterir. Koruyucu malzemenin etkinliği, gelen radyasyon ve soğurucu ortamın atomları arasındaki etkileşimler tarafından belirlenir. Meydana gelen etkileşimler esas olarak radyasyon tipine, radyasyonun enerjisine ve soğurucu ortamın atom numarasına bağlıdır. X- ve γ- ışınlarından korunmada yüksek yoğunluklu malzemeler, nötronlarda ise hafif yoğunluklu malzemeler kullanılır.



Şekil 30. Tipik radyasyon zırhlama malzemeleri

Gama ve X- ışınları zırhlama malzemeleri

Gama ve X- ışınlarında korunmada yüksek atom numaralı, yoğunluğu fazla olan malzemeler kullanılır. Kurşun, farklı içerikli beton, cam ve alaşımlar gama ve X- ışını zırhlamalarında sıklıkla kullanılan malzemelerdir.

Kurşun: Kurşun ve alaşımları, yüksek atom numarası ve yoğunluğu nedeniyle genellikle gama ve X- ışınlarının zararlı etkilerine karşı en uygun maliyetli koruyucu malzemelerdir. Kurşun, özellikle minimum malzeme ağırlığı ve kalınlığına ihtiyaç duyulduğunda, zırhlama geçici veya taşınabilir olması gerektiğinde, kullanımı yararlı olacak

bir malzemedir. Kurşun, zırhlama malzemesi olarak dikdörtgen kurşun tuğlalar şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun tuğlalardan oluşan yapılar ve radyoaktif numunelerin depolanması ve taşınması için kalın kaplar gibi laboratuvar ekipmanı için çeşitli kurşun koruma cihazları mevcuttur. Kişisel korumada kurşun önlükler, tiroid kalkanları ve kurşun eldivenlerde kullanılır. Ticari olarak temin edilebilen diğer bazı koruyucu malzemeler için, daha kolay kalıplanabilen ve şekillendirilebilen plastik veya epoksi bileşimlere yüksek oranda kurşun dahil edilebilir. Kurşunun gama ve X- ışını radyasyonu için büyük azaltma katsayısına ek olarak, nükleer uygulamalar için önemli avantajları, imalat kolaylığı, yüksek korozyon direnci, iyi termal iletkenlik gibi özellikleri de vardır.

Radyasyon zırhlamada etkin bir malzeme olan kurşunun çeşitli avantajlarının olmasına rağmen solunduğunda veya yutulduğunda son derece zehirlidir. Kurşunun bilinen toksisitesinin yanı sıra, oda sıcaklığında düşük erime noktası, yüksek yoğunluk, düşük mukavemet, yumuşaklık ve yüksek işlenebilirlik gibi bazı başka dezavantajları da vardır. Bu nedenle son yıllarda, kurşun bazlı koruyucu malzemelere alternatif olacak yeni malzeme türleri geliştirme çabaları önemli ölçüde artmıştır.

Paslanmaz Çelik: Paslanmaz çelikler, özellikle sıvı metal soğutmalı hızlı üreyen reaktör, gelişmiş gaz soğutmalı reaktör, kaynar su reaktörü ve basınçlı su reaktörü olmak üzere çeşitli nükleer ortamlarda son derece önemli olan bir malzeme sınıfıdır. En az yaklaşık %11 krom içeren demir bazlı alaşımlardan oluşan bir ailedir. Korozyona dayanıklılık, estetik çekicilik, ısıya dayanıklılık, düşük yaşam döngüsü maliyeti, tamamen geri dönüşümlü, üretim ve temizlik kolaylığı gibi özellikleri mevcuttur. Maruz kaldığı ışınlama arttıkça hemen hemen tüm mühendislik özelliklerinde bir bozulma meydana gelir. Genellikle, zırhlama malzemesinin boyutunun veya konfigürasyonunun, yapısını tek başına kurşundan çok pahalı hale getirdiği durumlarda kullanılır. Bu gibi durumlarda, çelik dış katman, kurşun iç astar olarak kullanılır.

Tungsten: Diğer refrakter metallerle karşılaştırıldığında, çok yüksek yoğunluk, mükemmel mekanik mukavemet ve işleme özelliklerine sahip olan tungsten ve alaşımları X-ışını ve gama ışını radyasyonlarının soğrulması açısından da oldukça etkindir. Yüksek vakumda son derece düşük gaz emisyonlarına sahiptir ve çevreye olumsuz etkisi olan kurşun malzemelere alternatif olarak kabul edilmiştir. Tungstenin kurşuna eşdeğer zırhlama performansı, kalınlığın % 60'ı ile elde edilebilir. Kurşuna kıyasla üstün koruma faktörlerine sahiptir ve beraberindeki toksisite tehlikesini ve karışık atık işleme maliyetlerini ortadan kaldırır. Bununla birlikte, tungsten kurşundan otuz kat daha pahalıdır. Bu nedenle idareli kullanılır ve neredeyse hiçbir zaman büyük kalkanlar için kullanılmaz.

Tungsten ve alaşımları karmaşık şekillerde işlenebildiğinden, çeşitli radyasyon kalkanı ekipmanını sertliğinden veya koruma özelliklerinin etkinliğinden ödün vermeden daha kompakt hale getirmek için ideal bir malzemelerdir. Tungsten ve alaşımları bu benzersiz özellikleri sayesinde nükleer enerji santrallerinde koruyucu duvar, nükleer denizaltılar için savunma, izotop üretim nakliyesi ve muhafazası, tıbbi ekipmanın içinde gama ışını kolimatörü gibi radyasyondan zırhlama uygulamalarında oldukça uygun bir zırh malzemesi olarak kullanılabilir.

Beton: Beton, hem gama ışınlarını, hem X- ışınların hem de nötronları bir arada korumaları nedeniyle ucuz ve etkili bir kalkan olarak kullanılır**.** Mekânın kısıtlayıcı olmadığı ve yapısal dayanımın gerekli olduğu durumlarda beton, daha az etkili bir koruyucu malzeme olmasına rağmen kullanılır. Beton, düşük maliyeti nedeniyle genellikle büyük hacimli kalkanların yapımında kullanılır. En yaygın olarak bir kalkanın dış bileşeni olarak kullanılır ve iç etkinlik çelik, kurşun veya daha düşük etkinliğe sahip diğer koruyucu malzemeyle sağlanır. Herhangi bir koruyucu malzemenin etkinliği kütlesine bağlı olduğundan, yeterince kalınsa hemen hemen her malzeme kullanılabilir. Beton, bu alandaki diğer ürünlere göre bariz bir şekilde avantajlara sahiptir. Makul kalınlıklarda düşük bir maliyetle mükemmel koruma kalitesi sağlar. Aynı zamanda tüm normal yapısal gereksinimleri karşılar. Bununla birlikte beton, büyük boyutları, belirli alanlarda sınırlı erişilebilirlikleri, geçmiş ve gelecekteki yüklerin stokastik doğası, dayanımdaki rastgelelik, yaşlanmaya bağlı malzeme değişikliklerinde belirsizlik ve muhtemelen bozulma ve bazı tahribatsızların niteliksel doğası nedeniyle zamanla istenmeyen değişikliklere maruz kalabilir.

Cam: Farklı içeriklerde üretilmiş camlar iyi bir radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır. ZnO-PbO-B_2O_3, CaO-SrO-B_2O_3, PbO- B_2O_3, Bi_2O3-PbO- B_2O_3, PbO-BaO-B_2O_3 bu cam çeşitlerinden bazılarıdır. Bu camların radyasyon zırhlama kabiliyetleri bazı standart betonlarla karşılaştırıldığında daha üstün olduğu görülmüştür.

Nötron zırhlama malzemeleri

Gama ve X-ışını zırhlamalarına kıyasla nötron zırhlamada farklı ilkeler geçerlidir. Foton kesitleri, atom numarası ve enerjiye göre düzenli bir şekilde değişirken, nötron kesitleri elementten elemente düzensiz olarak değişebilir ve enerjinin fonksiyonları olarak karmaşık rezonans yapılarına sahip olabilir. Su, parafin mumu, polietilen ve berilyum gibi yüksek hidrojen içerikli ve düşük atom numaralı malzemeler yüksek hızlı nötronları yavaşlatmak için kullanılır. Termal nötronlar için ise bor ve kadmiyum içerikli malzemeler kullanılır.

Berilyum: Berilyum, az yer kapladığı ve düşük soğurma kesitine sahip olduğu için nötron radyasyonu için en iyi ılımlı madde olarak kabul edilir. Berilyum, mükemmel kimyasal ve korozyon direncine ve yüksek radyasyon kararlılığına sahiptir. Kırılgan olmasına rağmen yüksek sıcaklığa dayanabilir ve yüksek sıcaklıkta hem suya hem de havaya duyarlı hale gelir.

Grafit: Grafit ucuzdur ve kolaylıkla her şekle dönüştürülebilir. Berilyumun aksine toksik değildir. Diğer malzemelerle reaksiyona girmez ve sıcaklıkla mekanik dayanımı arttığı için yüksek sıcaklıkta kullanılabilir. Avantajlarının yanı sıra kolayca kırılması ve yüksek sıcaklıkta hava ve oksijen ile etkileşime girmesi gibi dezavantajları da vardır.

Polietilen: Saf polietilen, yüksek hızlı nötronların termal nötron enerji düzeyine yavaşlatılmasının istendiği durumlarda nötron moderatörü olarak sıklıkla kullanılır. Saf polietilen herhangi bir büyük çekirdek içermez ve büyük çekirdeklerin olmaması, koruyucu malzemenin bir radyasyon iyonuyla çarpışmadan parçalanma riskini önemli ölçüde azaltır. Hidrojende nötron yakalaması, 2,224 MeV'lik bir gama ışını salar, yani nötron radyasyon koruması, hem yüksek hem de düşük atom numaralı elementleri içerdiğinde en etkili olur. Düşük atom numaralı malzeme nötronları elastik saçılma yoluyla dağıtabilirken, yüksek atom numaralı malzemeler sonraki gama ışınlarını elastik olmayan saçılma ile bloke eder. Etkili bir zırhlama malzemesi üretmek için polietilene bor, lityum veya kurşun eklenebilir.

Su: Hidrojen atomlarında moderatör çekirdekleri oluşturan protonlu sıradan su, nükleer enerji reaktörlerinde nükleer yakıtlardan salınan nötron partiküllerinin en iyi moderatörü olarak kabul edilir. Bu nedenle, bu yakıtlar, ısı ve radyasyon seviyelerinin düşmesine izin vermek için reaktörde su dolu bir havuza boşaltılır ve burada birkaç yıldan on yıllara kadar değişen sürelerle tutulur. Su, nötron moderatörü, soğutma ajanı ve radyasyon kalkanı görevi görür. Doğrudan reaktör çekirdeğinin üzerindeki su tabakası, nötron radyasyonunu tamamen korur, böylece operatörler reaktörün üzerinde güvenli bir şekilde çalışabilir. Bu su doldurma havuzu tasarımının iki önemli avantajı vardır; reaktöre kolayca erişilebilir ve tüm birincil soğutma sistemi normal basınç altında tutulur. Bu, nükleer santrallerin yüksek sıcaklıklarını ve büyük basınçlarını önler.

Boron: ^{10}B izotopu, termal nötronların soğrulması için yüksek bir tesir kesitine sahiptir. Termal nötronları yakalamadaki bu özellik, hem radyasyon korumasında hem de bor nötron yakalama tedavisinde kullanılır. Boron basınçlı su reaktörlerinde, borosilikat çubuklar veya borik asit şeklinde işlev görebilir. Reaktörde dolaşan reaktör soğutucusuna daha fazla borik asit eklenerek, bir nötronun fisyona neden olma olasılığı azaltılır. Ayrıca bor kullanılmış uranyum çubuklar içeren kullanılmış yakıt havuzlarında da çözülür. İkincil radyasyondan kaynaklanan yüksek enerjili spallasyon nötronları, hafif elementler bakımından zengin malzemelerle

hafifletilebilir. Termal nötron soğuran hafif elementler arasında ^{10}B, bu bağlamda çifte görev yapabilen potansiyel uzay aracı yapısal malzemeleri olarak görünmektedir.

Bor genellikle bor karbür veya bor yüklü çözeltiler şeklinde kullanılır. Boral kompozitler, kullanılmış yakıt havuzu depolama raflarının, çift amaçlı bidonların, fıçıların tasarımında ve imalatında kullanılır. Boral kompozit, her iki dış yüzeyde 1100 serisi alüminyum kaplama ile karışık alüminyum ve bor karbür partiküllerinden oluşan bir çekirdekten oluşan hassas bir sıcak haddelenmiş kompozit plaka malzemesini tanımlar.

Mevcut nötron-gama radyasyonu zırhlama malzemeleri

Nötron-gama radyasyonu zırhlaması için geleneksel koruyucu malzemeler arasında, günümüzde kullanılan en önemli malzemeler su, beton, kurşun ve demirdir. Nükleer reaktör gibi bir kurulum için hem nötron hem de gama radyasyonu dikkate alınmalıdır. Bu nedenle bunlardan birkaçının kombinasyonun oluşturulması yeterli koruma için gereklidir.

Teorik ve deneysel olarak, gama ışınlarını ve nötronları soğururken görünürlük sağlama görevini yerine getiren ve böylece gözlemciyi koruyan özel camlar geliştirilmiştir. Bor ve kadmiyum açısından zengin camlar, yavaş nötronları soğurmak için kullanılır. Endüstride, çeşitli nötron-gama koruyucu malzemeler geliştirilmiş ve endüstri tarafından tedarik edilmiştir. Örneğin; borlanmış kauçuk, kurşun-kauçuk ve plastik kompozit.

Bazı uygulamalarda, ek ağırlık azaltma ihtiyacı ve pratik hususlar göz önüne alındığında, iyi radyasyon kalkanı yeteneği sağlarken yapısal veya diğer rolleri yerine getirebilecek çok işlevli malzemelere ihtiyaç vardır.

Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

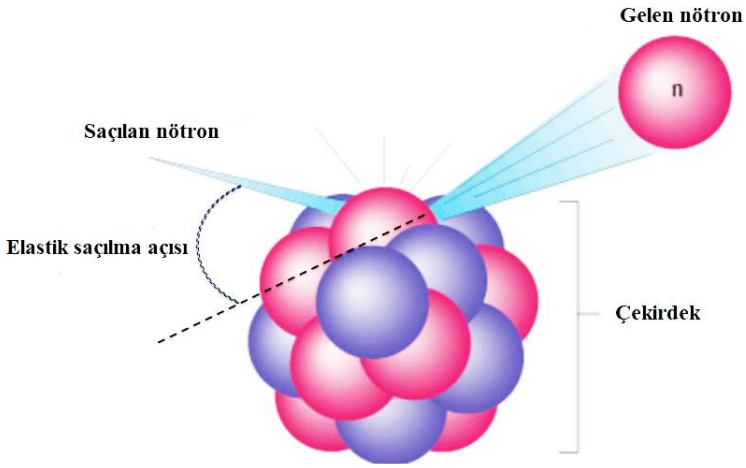
Nötronların madde ile etkileşimi

Yüksüz olan nötronlar soğurucu bir ortamdan geçtiklerinde ortamın atomlarına ait elektronlarla veya çekirdeklerle Coulomb etkileşimine girmezler. Nötronlar, sahip oldukları enerjiye bağlı olarak herhangi bir malzeme içinden geçerken, atomdaki çekirdekler ile iki tip etkileşme yapabilirler:

1- Saçılma (Elastik ve inelastik)
2- Soğurma.

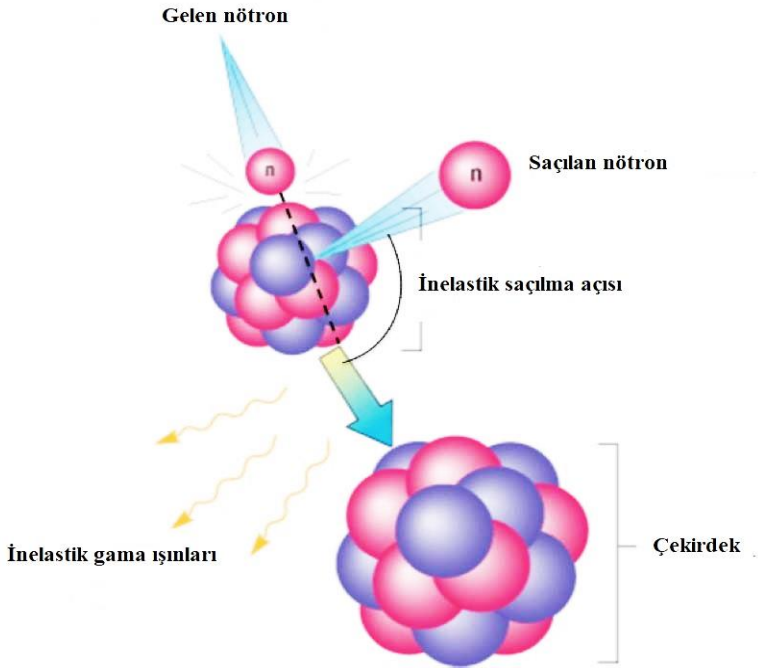
Nötron bir hedefe çarptığında elastik saçılma meydan gelirse, nötron kinetik enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe verir, geliş doğrultusundan sapar ve çekirdekten uzaklaşır. Bu tür saçılmada kinetik enerji ve momentum korunur, çekirdeğin yapısında bir değişiklik meydana gelmez. Nötronun sahip olduğu tüm enerjilerde elastik saçılma meydana gelebilir. Elastik

saçılmada çekirdek ile nötron etkileşiminden sonra ayrılan nötron genellikle aynıdır. Etkileşim (n,n) sembolü ile de gösterilebilir.



Şekil 31. Nötronun elastik saçılması

İnelastik saçılmada, nötron hedef çekirdekle etkileştiğinde kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe vererek onu uyarılmış hale getirir. Nötronun çekirdeği terk etmesinden sonra çekirdek gama ışınları yayınlayarak temel enerji seviyesine döner. İnelastik saçılma enerji açısından yalnız hızlı nötronlar ile mümkündür. İnelastik saçılma ve ardışık ikincil γ-ışınları yüksek enerjili nötronların zırhlanmasında önemli bir rol oynar ama bu inelastik saçılma, elastik saçılmalara dayanan çoğu hızlı nötron dedektörünün cevabında istenmeyen bir etkidir.



Şekil 32. Nötronun inelastik saçılması

Soğurma reaksiyonlarında genellikle nötronlar kaybolur. Radyoaktif yakalamada (n,γ) çekirdek bir nötronu soğurur ve uyarılmış enerji seviyesine çıkar. Uyarılmış seviyede oluşan izotop gama ışını yayınlar ve temel enerji seviyesine döner. Bu olay tüm nötron enerjilerinde

oluşmaktadır. Nötronun hedef çekirdekle etkileşmesi sonucu, gama ışını, nötron ve yeni parçacıkların salındığı (n^0, γ), (n^0, p^+), (n^0, α),(n^0, $2n^0$) gibi reaksiyonlar meydana gelmektedir.

Hızlı nötronlar için etkin zayıflatma tesir kesiti

Nötron madde etkileşim ihtimaliyeti tesir kesiti kavramı ile ifade edilir. Mikroskobik tesir kesiti (σ) bir nötron ile bir atomun reaksiyon yapma ihtimalidir ve birimi barn'dır (1 barn=10^{-24} cm^2). Makroskobik tesir kesiti (Σ) ise bir nötronun N adet atomla reaksiyon yapma ihtimali olup birimi 1/cm'dir.

$$\sum = N\sigma \tag{2.10}$$

$\sum$, σ mikroskobik tesir kesitiyle tanımlanan özel bir işlem için birim yol uzunluğu başına ihtimaliyetin fiziksel yorumudur. Termal nötronların tesir kesitleri hızlı nötronların sahip olduğu tesir kesitlerinden daha büyüktür. Nötronlarla gerçekleşen reaksiyonların olasılığı artan nötron enerjisi ile hızlı bir şekilde azalır. Toplam makroskobik tesir kesiti her bir olayın makroskobik tesir kesitlerinin toplamıdır:

$$\sum_{\text{Top}} = \sum_{\text{Saçılma}} + \sum_{\text{Işımalı yakalama}} + \ldots \tag{2.11}$$

γ-ışınları için lineer azaltma katsayılarının önemi neyse nötronlar için de bu niceliğin önemi odur. Dar bir şua soğurma deneyi yapılacak olursa sonuçlar aynı olacaktır. Dedektörde sayılan nötronların sayısı soğurucu kalınlığıyla üstel olarak azalır. Bu durumda azaltma bağıntısı;

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sum_{toplam} t} \tag{2.12}$$

olarak yazılır. γ-ışınları durumuna benzeterek nötron ortalama serbest yolu, λ ile verilir. Katı maddelerde yavaş nötronlar için λ bir santimetre veya daha küçük mertebede olabilir. Hâlbuki hızlı nötronlar için bu değer normal olarak daha büyüktür.

Madde ile etkileşime giren nötronun zayıflatılmasının teorik hesaplamaları nötron transport teorisine dayanır. Nötron tesir kesitleri, foton tesir kesitleri ile karşılaştırıldığında daha zor ve karmaşık özellikte olduğundan dolayı nötron hesaplamaları için farklı metodlar geliştirilmiştir. Bu metodlardan en önemlileri Multigrup Difüzyon Metodu, Moments ve Monte Carlo metodudur. Bir elementin A atom kütlesi veya Z atom numarası ile Σ_R azaltma tesir kesiti arasında Wood tarafından aşağıdaki ampirik ifadeler öne sürülmüştür (Wood 1982).

$$\Sigma_R/\ \rho = 0{,}21A^{-0{,}56}\ cm^2g^{-1}$$

$$\Sigma_R/\ \rho = 0{,}00662A^{-1/3} + 0{,}33A^{-2/3} - 0{,}211A^{-1}\ cm^2g^{-1}\ (A>12) \tag{2.13}$$

$$\Sigma_R/\rho = 0{,}190Z^{-0{,}743}\ cm^2g^{-1}\ (Z \leq 8)$$

$$\Sigma_R/\rho = 0{,}125Z^{-0{,}565}\ cm^2g^{-1}\ (Z > 8)$$

Nötron zırhlama hesaplamalarında foton zırhlamasında olduğu gibi zayıflama exponansiyel olarak gerçekleşir. 'Makroskobik etkin hızlı nötron zayıflatma tesir kesiti' veya basitçe 'zayıflatma tesir kesiti' (Σ_R), hızlı veya fisyon-enerjili nötronun madde içine nüfuz eden nötron demetinden koparılacak bir çarpışmayı gerçekleştirme ihtimalidir. Zayıflatma tesir kesiti kavramının kullanılmasıyla hızlı nötronların soğurulma hesaplamaları için yaklaşık bir metot geliştirilmiştir. Toplam nötron tesir kesiti (T) soğurma ve saçılma nötron etkileşim tesir kesitlerinin toplamı olur. Meydana gelen tüm etkileşimler, nötron soğurulması ile sonuçlanmadığı için genellikle R < T olmaktadır. Bu metod hidrojenle çarpışmayı soğurmaya eşit kabul eder ve bu durumda R = T olarak ele alınır (El-Sayed Abdo 2002) ve 2 ile 12 MeV enerji aralığındaki nötronlar için etkin azaltma tesir kesitinin yaklaşık olarak sabit olduğu düşünülmektedir (Kaplan 1989).

Bileşikler ve homojen karışımlar için etkin zayıflatma tesir kesiti R (cm^{-1}) Kaplan ve Wood tarafından (Kaplan 1989; Wood 1982) verilen elementler için R veya R (cm^2/g) değerinden hesaplanabilir.

$$\left(\frac{\Sigma_R}{\rho}\right) = \sum_i (F_w)_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho}\right)_i \quad \text{veya} \quad \Sigma_R = \sum_i \rho_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho}\right)_i \tag{2.14}$$

Burada ρ_i, $\left(\frac{\Sigma_R}{\rho}\right)_i$ ve $(F_W)_i$; sırasıyla kısmi yoğunluk (karışımda ortaya çıkan yoğunluk), i. elementin soğurma tesir kesiti ve bileşikteki i. elementin ağırlık kesridir. Bu denklemlerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen değerler ile yaklaşık %10 oranında doğruluğa sahiptir.

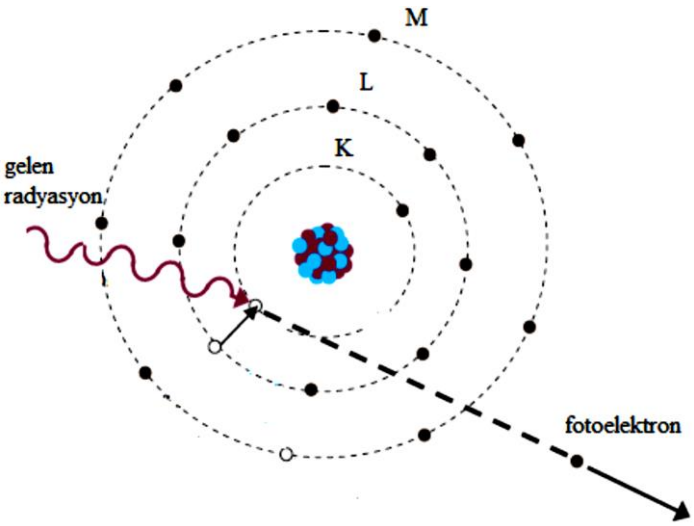
$$(F_W)_i = \frac{a_i M_i}{\sum_j a_j M_j} \tag{2.15}$$

burada a_i ve M_i sırasıyla i nci elementin formül birimlerinin sayısı ve atomik ağırlığıdır.

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi

Fotoelektrik olay

hv enerjili bir foton atomun iç yörünge elektronlarından biri ile etkileştiğinde fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden büyükse enerjisinin tamamını elektrona aktararak onu yörüngesinden söker. Sökülen bu elektrona fotoelektron, bu olaya da fotoelektrik olay denir.



Şekil 33. Fotoelektrik olay

Fotonun elektronu koparması için gerekli olan enerjinin minimum değeri eşik değeridir. Fotonun sahip olduğu enerji eşik enerji değerinin altındaysa atomdan herhangi bir elektron yayılması olmaz. Bu konunun anlaşılması için, Albert Einstein ışık demetinin dalga özelliği göstermediği düşüncesini ileri sürmüştür. Bu ışık demetlerinin her birisinin hν enerjili ayrı dalga paketleri olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca Einstein, Planck'ın daha önceden keşfettiği enerji ve frekans arasındaki bağıntının, Planck varsayımıyla açıklanabildiğini göstermiştir. Heinrich Hertz, 1887 yılında fotoelektrik etkiyi ilk kez elektromanyetik dalgalar üzerinde yaptığı deneylerde gözlemlemiştir. Albert Einstein, 1905 senesinde ışığı enerji paketlerinden oluşan bir yapı olarak değerlendirerek fotoelektrik etki konusundaki yapılan deney sonuçlarını açıklayan bir makale yazmıştır. 1905 senesinde fotoelektronların sahip olduğu enerjinin gelen ışığın frekansı ile artış gösterdiği ve fotoelektronların enerjisinin ışığın şiddetinden bağımsız olduğu bilinmektedir. Ancak artış miktarı 1914 senesine kadar deneysel çalışmalarla açıklanamamıştır. Daha sonraları deneysel fizikçi Robert Millikan yaptığı deneysel çalışmalarla Einstein'ın varsayımlarını doğrulamıştır.

Fotoelektrik olayda, foton enerjisinin bir kısmını elektronu atomdan koparmak için harcar, bir kısmını kopan elektrona kinetik enerji olarak aktarır ve küçük bir kısmını da atoma geri tepme enerjisi olarak aktarır. Foton tarafından sökülen elektronun oluşturduğu boşluk üst yörüngelerdeki bir elektron tarafından doldurulur ve bu geçişte atomun karakteristik X-ışınlarından birisi yayımlanır. Serbest hale geçen fotoelektronun kazandığı kinetik enerji;

$$K_e = h\upsilon - E_b \tag{2.16}$$

ile verilir. $h\upsilon$ gelen fotonun enerjisi, E_b ise elektronun yörüngeye bağlanma enerjisidir. Serbest bir elektron fotoelektrik olaya sebep olmaz çünkü bu durumda momentum korunmaz, elektron başlangıçta atoma bağlı ise enerjinin tümünün soğurulması mümkün olur. Bağlı elektronlarda

atom geri teper ve böylece momentum korunur. Serbest elektron fotonun enerjisini tam olarak soğuramaz. Fotoelektrik olayın gerçeklemesi için gelen fotonun enerjisinin elektron bağlanma enerjisine eşit ya da daha büyük olması gerekir. Gelen fotonun enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisi birbirine ne kadar yakın ise fotonun soğurulma ihtimali o kadar fazla olur ve aradaki fark arttıkça fotoelektrik olayın meydana gelme ihtimali azalır. Fotoelektrik etkileşme daha çok K tabakasında olmakta ve L, M, N,... tabakaları için gittikçe azalmaktadır. Fotoelektrik soğurma katsayısı, soğurucu malzemenin atom numarasına ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır.

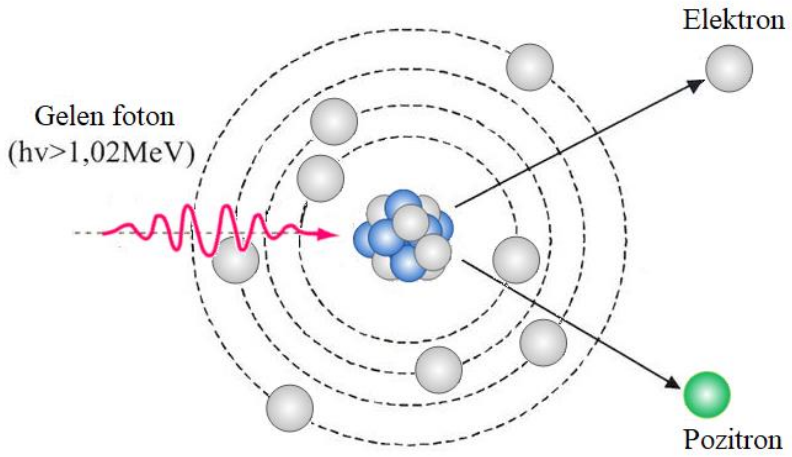
Çift Oluşum

Enerjisi yeterince büyük olan fotonlar ağır bir atom çekirdeğinin çok yakınından geçtiğinde soğurulur ve zıt elektrik yüklü parçacıklar olan elektron ve pozitrona dönüşürler. Bu olayda toplam yük, çizgisel momentum ve toplam enerji korunur. Çift oluşumu, bir çekirdeğin veya yüklü bir parçacığın etrafında meydana gelebilir.

Çift oluşum olayında Einstein'nın kütle ve enerji eşitliği ($E = m_0 c^2$) prensibine göre enerji kütleye dönüşür. Çift oluşumun meydana gelmesi için harcanan foton enerjisinden kalan enerji elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Çift oluşumu ile ortaya çıkan elektronlar serbest elektron gibi davranış gösterirler ve iyonlaşmalara neden olurlar. Pozitron ise madde içinden geçerken elektronun yaptığı iyonlaşma, uyarma ve Bremsstrahlung gibi etkileşimler yaparak enerjisini kaybeder. Pozitron serbest bir elektron karşılaştığında birbirlerini yok ederler ve zıt yönlü enerjileri 0,51 MeV olan iki γ ışını yayınlanır. Çift oluşum olayında foton çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşimde bulunduğu için bu olayın olma olasılığı, Z atom numarası ile hızla artar.

$$h\upsilon = M_{e^+}c^2 + M_{e^-}c^2 + K_{e^+} + K_{e^-} \tag{2.17}$$

Burada M_{e^+} ve M_{e^-} , sırasıyla pozitron ve elektronun durgun kütleleri K_{e^+} ve K_{e^-}, yine sırasıyla pozitron ve elektronun kinetik enerjileridir. Çift oluşumunun meydana gelebilmesi için gelen fotonun enerjisi, elektronun ve pozitronun durgun kütle enerjileri toplamı olan $2m_0c^2$ =2×0,511 = 1,022 MeV'e eşit veya büyük olması gerekir.



Şekil 34. Çift oluşumu

Koherent saçılma

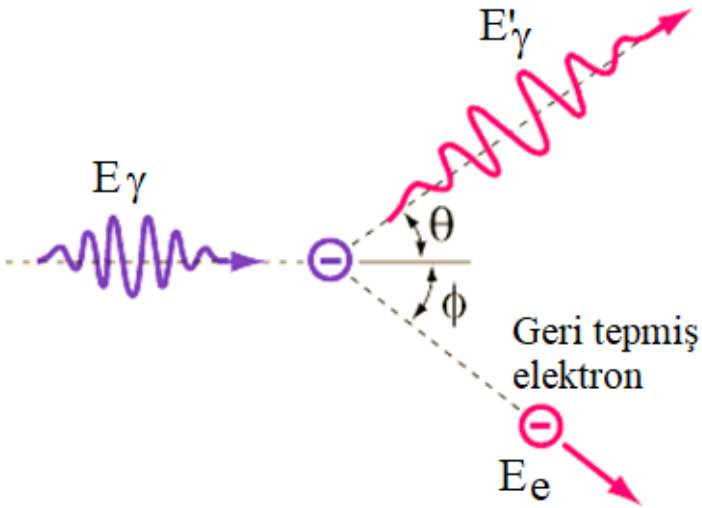
Atom üzerine gönderilen foton, atoma sıkı bağlı elektronu koparmaya yetecek enerjiye sahip değilse koherent saçılma meydana gelir. Bu saçılma elastik veya Rayleigh saçılması olarak da adlandırılır. Bu tip saçılmalarda, saçılmadan sonra gelen fotonun enerji ve fazında bir değişiklik oluşmaz. Koherent saçılmada, gelen fotonla saçılan fotonun dalga boyları aynıdır. Bu saçılma olayının meydana gelme ihtimaliyeti düşük foton enerjilerinde ve büyük atom numaralı elementlerde daha fazladır. Koherent saçılma 0,1-0,5 MeV enerji aralığında baskındır. Koherent saçılma sonucunda saçılmaya uğrayan elektronlar ve hedefteki atomda herhangi bir değişim olmaz, enerji transferi ve iyonizasyon gerçekleşmez, sadece fotonun yönü değişir. Koherent saçılmada, gelen ve saçılan radyasyonun toplam şiddeti, her bir elektron tarafından saçılan radyasyonun genliklerinin toplamına eşittir. Koherent saçılmanın en sık görülen şekli olan Rayleigh saçılmanın tesir kesiti Z^2 ile orantılıdır.

İnkohorent Saçılma (Compton Olayı)

Atoma sıkı bağlı olmayan bir dış yörünge elektronun, enerjisi kendisine göre çok büyük olan bir fotonla çarpışmasıyla fotonun enerji kaybederek saçılması olayına inkohorent saçılma denir. Elektron belli bir kütleye sahiptir ve momentumun korunumu gereği fotonun bütün enerjisini soğuramaz. Bu nedenle fotonun enerjisinin sadece bir kısmını elektrona kinetik enerji olarak verir ve elektron Φ açısıyla saçılır (Şekil 35). Foton kalan enerjisi ile gidiş yönünden θ açısı ile saçılır. Bu tip saçılmalarda gelen fotonun enerjisindeki kayıp nedeniyle saçılan fotonların dalga boyları gelen fotonların dalga boyundan daha uzun olur. İnkoherent saçılmada fazlar arasında bir bağlantı olmadığı için saçılan dalgalar arasında bir girişim gözlenemez ve saçılan ışının toplam şiddeti, atomun her bir elektronu tarafından saçılma şiddetleri toplanarak elde edilir. En çok gözlemlenen inkoherent saçılma şekli Compton saçılmasıdır. Bu nedenle

inkoherent saçılma çoğu kez Compton saçılması diye anılır. Bu olay genellikle 0,1-10 MeV enerji aralığındaki gama ışınları için baskın olur.

Compton olayının gerçekleşebilmesi için gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden çok büyük olmalıdır. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden hafifçe büyük veya eşit ise fotoelektrik olayın oluşma olasılığı daha fazladır. Bu nedenle fotonun enerjisi K yörüngesi bağlanma enerjisinden çok fazla artarken Compton olayı daha çok önem kazanır.



Şekil 35. Compton olayı

Gelen foton, saçılan foton ve elektron bir düzlemdedir ve enerji ile momentum korunur. Enerji ve momentumun korunum yasası gereği;

$$E_{\gamma}^{'} = \frac{E_{\gamma}}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \tag{2.18}$$

ifadesi yazılır. E'_{γ} saçılan fotonun enerjisi; E_{γ} gelen fotonun enerjisi ve $\alpha = E_{\gamma} / m_0 c^2$ dir. Burada m_0 elektronun durgun kütlesi ve $m_0 c^2$ de elektronun durgun kütle enerjisidir. Geri tepen elektronun enerjisi E_e, gelen fotonun enerjisiyle saçılan fotonun enerjisi arasındaki farktır. Yüksek enerjili fotonlar enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar Compton saçılımına uğrarlar ve daha sonra da fotoelektrik olayla absorblanırlar. Çünkü sadece Compton saçılımı ile fotonlar tamamen soğrulamazlar.

İnkoherent olarak saçılan dalganın dalga boyundaki artış sadece saçılma açısına bağlıdır. λ gelen fotonun, λ' ise saçılan fotonun dalga boyu olmak üzere gelen fotonun dalga boyunda değişim,

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c(1-\cos\theta)} \tag{2.19}$$

ile verilir. Burada m_0 elektronun durgun kütlesi, θ fotonun saçılma açısı, c ışık hızı, h ise Planck sabitidir. Compton saçılması özellikle atomun valans elektronları ile gerçekleşir. Bu özellik sayesinde Compton saçılması fiziksel ve kimyasal sistemler hakkında bilgi elde etmede kullanılır.

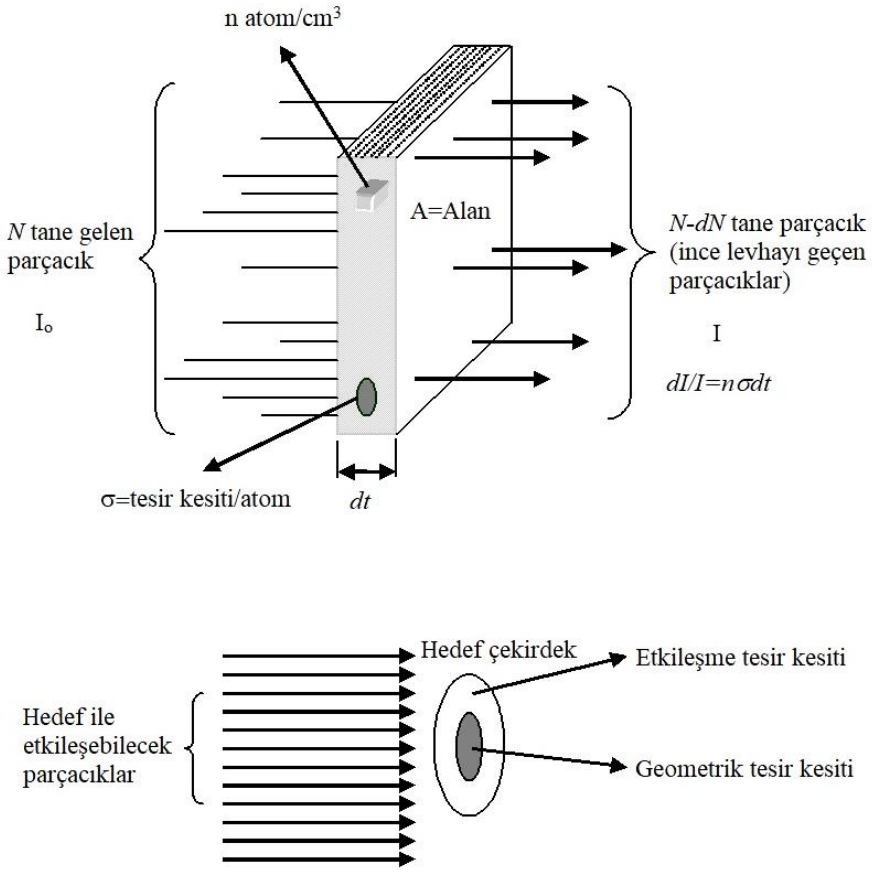
Compton saçılma olayından iki sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar şöyledir: Parçacığa dalga boyu $\lambda = h/p$ olan bir dalga eşlik eder ve elektromanyetik dalgalar da parçacık özelliği gösterir.

Tesir kesiti

Tesir kesiti, bir işlemin gerçekleşme ihtimalini tanımlayan kavramdır. Bu kavram, bir olayın deneysel verileri ile teorik hesaplanan değerlerinin karşılaştırılabilmesine imkân tanır ve bu sayede atomik işlevlerin ayrıntılı olarak incelenebilmesini sağlar. Tesir kesiti etkileşim türüne göre isimlendirilir. Örneğin soğurma meydana gelmişse soğurma tesir kesiti, saçılma durumunda ise saçılma tesir kesiti ifadeleri kullanılır.

Tesir kesitinin tam olarak bilinmesi, reaktör zırhlama, tıbbi fizik, enerji taşıma ve depolamada, radyasyon azaltma katsayılarının hesaplanmasında, atomların yapısı, yaş tayini, ilaç sanayi gibi fiziksel ve kimyasal birçok alanda kullanılmaktadır (Hubbell 1989). Tesir kesiti radyoizotopların standardizasyonunda, radyasyon sayımının planında, sayaçların kalibre edilmesinde ve birçok uygulamalı mühendislik alanlarında bilinmesi önemli olan bir parametredir. Karakteristik X- ışını tesir kesiti, her element için ayrı uyarıcı radyasyon tipi ve enerjisinde ayırt edici bir özelliktir. Farklı moleküller farklı enerjilere sahiptir ve bunların enerjileri ligandların ve merkez atomlarının arasındaki bağ mesafeleri hakkında bilgi verir.

Şekil 36'daki gibi A yüzey alanına ve dt kalınlığına sahip ince bir levha üzerine I şiddetli bir foton demeti gelsin. Bu foton demeti levhadan geçerken atomlardan birine çok yaklaşırsa, foton atom tarafından ya soğrulur ya da saçılır. Eğer gelen foton bir atomu kuşatan etkin alana (σ) düşerse foton bu alanla etkileşme yapar. Levhanın birim hacmi başına n tane hedef atomu olsun. Levha o kadar ince olsun ki, hiçbir atom öteki atom üzerine binmesin ve böylece her atomun gelen fotonla aynı ölçüde etkileşme ihtimali olsun. Eğer maddenin birim hacminde n tane atom varsa Adt hacminde $nAdt$ tane atom bulunur. Birim yüzeye düşen atom sayısı ise ndt olur. Bir atomun işlem gördüğü etkin alan σ ise ndt sayıda atomun işlem gördüğü etkin alan $n\sigma dt$ olur. Buna göre toplam etkin alan $nA\sigma dt$ dir.



Şekil 36. Tesir kesiti ile gelen demetin şiddeti arasındaki ilişki ve tesir kesitinin geometrik yorumu

Toplam etkin alan, madde üzerine gelen fotonun maddeyle etkileşmesi sonucu herhangi bir olayın meydana geldiği alandır. Toplam etkin alanın toplam yüzey alanına oranına etkin alan kesri denir. Etkin alan kesri *F* ile gösterilirse;

$$F = \frac{\text{Toplam etkin alan}}{\text{Toplam yüzey alanı}} = \frac{nA\sigma dt}{A} \tag{2.20}$$

$$F = n\sigma dt \tag{2.21}$$

olur. Bu nicelik *I* şiddetindeki şuanın ince levhadan geçerken şiddetinde meydana gelen değişiklik kesrini temsil eder. Buna göre şiddetteki *dI* değişimi;

$$dI = -(n\sigma dt)I \tag{2.22}$$

ifadesi ile verilir. İfadedeki (-) işareti *t* kalınlığı arttıkça *I* şiddetinin azalacağını gösterir. Bu ifadeden hareketle;

$$I = I_0 e^{-n\sigma t} \tag{2.23}$$

elde edilir. Gelen şuanın başlangıçtaki şiddeti I_0, şuanın t kalınlığındaki malzemeyi geçtikten sonraki şiddeti ise I dır. Şuadaki parçacık sayısı şuanın şiddeti ile orantılı olduğundan (2.23) ifadesi parçacıkların sayısı cinsinden;

$$N = N_0 e^{-n\sigma t} \tag{2.24}$$

şeklinde yazılabilir. Burada N_0 ince levhaya gelen parçacıkların sayısını N ise t kalınlığındaki levhayı geçen parçacıkların sayısını göstermektedir. Eğer $n\sigma t \ll 1$ ise bu durum hem levhanın geometrik olarak çok ince olmasını hem de σ'nın çok küçük olmasını ifade eder. Buna göre;

$e^{-n\sigma t} \ll 1$ ise $e^{-n\sigma t} = (1 - n\sigma t)$ yazılabilir ve (2.24) ifadesi;

$$N = N_0 (1 - n\sigma t) \tag{2.25}$$

şeklini alır. Böylece t kalınlığını geçerken herhangi bir işleme uğrayan (ilgilenilen etkileşime giren) parçacıkların sayısı N_s için;

$$N_s = N_0 - N = N_0 - N_0 (1 - n\sigma t)$$

$$N_s = N_0 n\sigma t \tag{2.26}$$

yazılabilir. Buradan da σ için,

$$\sigma = \frac{N_s}{N_0 n\sigma t} \tag{2.27}$$

ifadesi elde edilir. Tesir kesiti diye adlandırılan ve ilgilenilen olayın meydana gelme ihtimaliyetinin bir ölçüsü olan σ'nın birimi barn'dır (1 barn = 10^{-24} cm^2). σ alan boyutundadır ve ilgilenilen olayın tabiatına göre hedefin birim yüzey alanından küçük veya büyük olabilir.

Tesir kesiti, ışığın madde ile etkileşmesine göre sınıflandırılır. Bunlar, saçılma tesir kesiti, soğurma tesir kesiti, çift oluşum tesir kesitidir. Foton numune üzerine geldiğinde ışık numuneden saçılır, yansır, soğurulur, çift oluşumu veya fotoelektrik olay meydana gelir. Bu olayların toplamına toplam tesir kesiti denir (Hubbell 1989). Toplam tesir kesiti başlıca foton etkileşmelerinden gelen katkıların toplamı olarak ifade edilir.

$$\sigma_{top} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{phn} \tag{2.28}$$

Denklem (2.28)'de sırasıyla σ_{pe} atomik fotoelektrik tesir kesiti σ_{incoh} ve σ_{coh} inkoherent (Compton) ve koherent (Rayleigh) tesir kesitleri, σ_{pair} çift oluşum tesir kesiti, σ_{trip} triplet oluşumu tesir kesiti ve σ_{phn} fotonükleer soğurma tesir kesitidir.

Toplam moleküler tesir kesiti:

Toplam moleküler tesir kesiti bir bileşikte molekül başına düşen foton ile bileşiğin etkileşme ihtimaliyetini ifade eden bir terimdir. Kütle azaltma katsayısına bağlı bir değerdir. Birimi cm^2 /molekül'dür.

$$\sigma_{tm} = \frac{1}{N_A}\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c \sum_i n_i A_i \tag{2.29}$$

Denklem (2.29)'da yer alan A_i bir bileşikteki atoma ait atom ağırlığı, n_i bileşiği oluşturan atomlarının sayısı, N_A Avogadro sayısı, $(\mu/\rho)_c$ bileşiğin kütle azaltma katsayısını ifade eder.

Toplam atomik tesir kesiti:

Toplam atomik tesir kesiti, moleküler tesir kesitinin toplam atom sayısına bölünmesiyle elde edilir ve malzeme içindeki bir atomun gelen foton ile etkileşme ihtimaliyetini gösterir. Birimi cm^2/atom'dur.

$$\sigma_{ta} = \frac{\sigma_{tm}}{\sum n_i} \tag{2.30}$$

Denklem (2.30)'da yer alan σ_{ta} toplam atomik tesir kesiti, σ_{tm} toplam moleküler tesir kesiti, n_i bileşikteki toplam atom sayısını ifade eder.

Toplam elektronik tesir kesiti:

Elektron başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesitine toplam elektronik tesir kesiti denir. Malzemedeki bir elektron ile yüksek enerjili fotonun etkileşme ihtimali olarak da yorumlanabilir. Toplam elektronik tesir kesitinin birimi cm^2/elektron'dur.

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A}\sum \frac{f_i N_i}{Z_i}(\mu_m)_i = \frac{\sigma_t}{Z_e} \tag{2.31}$$

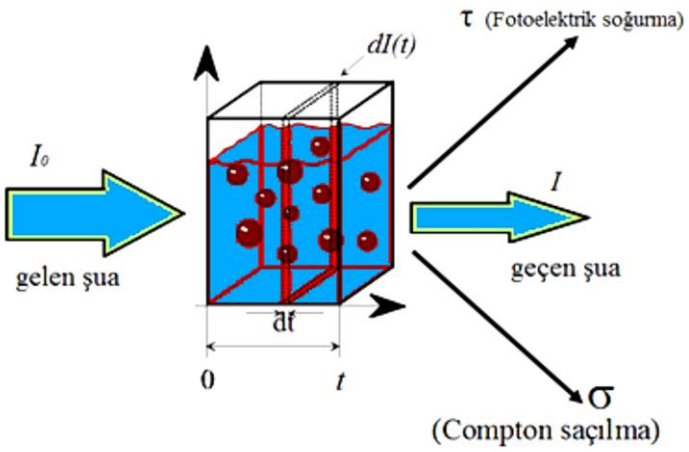
Denklem (2.31)'de yer alan A_i bileşiği oluşturan i elementinin atom ağırlığı, Z_i i e.lementinin atom numarası, f_i i. elementinin bolluk kesridir. $(\mu_m)_i$ i. elementinin kütle azaltma katsayısıdır.

Elektromanyetik radyasyonun soğrulması:

Elektromanyetik radyasyonun soğrulmasının temel özelliği, belli bir kalınlıktaki maddeden geçerken radyasyon şiddetinde görülen azalmadır. Bir ortama giren X- veya γ radyasyonunun madde ile etkileşmesi, ortamın lineer azaltma katsayısına bağlıdır. Bu katsayı,

gelen fotonun enerjisine, soğurucunun atom numarasına ve yoğunluğuna bağlıdır ve fotonun madde içindeki giriciliğini ve davranışını karakterize eder.

Birim yüzeyde birim kalınlık başına düşen enerji azaltma kesri olan lineer azaltma katsayısı yüzeye gelen enerjinin birim kalınlıkta azaltılma kesri olarak da tanımlanabilir. Belirli bir enerjiye sahip olan fotonun, t kalınlığına sahip bir maddeden geçerken soğrulma veya saçılmaya uğrama olasılığını ifade eder. Lineer azaltma katsayısı birimi (cm^{-1}) olarak ifade edilir. Lineer azaltma katsayısı, maddenin ayırt edici özelliği olan yoğunluğa (g/cm^3) bağlıdır.



Şekil 37. X-ışınlarının bir madde ile etkileşmesi sırasında meydana gelebilecek temel olaylar

Radyasyonun şiddetinde meydana gelen azalma Beer-Lambert yasasına göre soğurucu malzemenin *t* kalınlığı ile orantılıdır. Başlangıçtaki şiddeti I_0 olan elektromanyetik radyasyonun bir soğurucu tabakasından geçtikten sonraki *I* şiddeti,

$$dI = -\mu I dt \rightarrow I = I_0 e^{-\mu t} \tag{2.32}$$

olur (Şekil 37). Bu ifade başlangıçtaki şiddeti I_0 olan bir X-ışını şuasının *t* kalınlıklı bir maddeyi geçtikten sonraki şiddetini verir. (2.32) ifadesinden μ için;

$$\mu = -\frac{\ln(I / I_0)}{t} \tag{2.33}$$

yazılabilir. Lineer azaltma katsayısı μ'nün soğurucu maddenin yoğunluğuna oranı birim zamanda birim kütle başına azaltma olarak tanımlanır ve kütle azaltma katsayısı olarak adlandırılır.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln(I / I_0)}{t\rho} \tag{2.34}$$

Kütle azaltma katsayısı, malzemenin fiziksel özelliklerden bağımsızdır ve doğrudan malzemenin tabiatını yansıtır. Bu nedenle lineer azaltma katsayısından çok daha önemlidir.

Kütle azaltma katsayısı, enerji ve atom numarasına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Elementler ve bileşikler için ayırt edici bir özellik olan kütle azaltma katsayısı, temel fizikte, ziraat, endüstri, eczacılık, radyasyon dozimetrisi, biyoloji, nükleer ve radyasyon fiziğinde oldukça önemli olan bir parametredir.

Kütle azaltma katsayısı radyasyon zırhlama malzemelerinin soğurma özelliklerini açıklayan en önemli parametrelerden biridir. Bir bileşik veya bir karışım için bu katsayı hesaplanabilir. Foton şiddetindeki toplam azaltma katsayıları hesaplanırken sadece foton soğurulmasından değil fotonun incelenen malzemeyi geçerken saçılmasından ve çift oluşumundan dolayı şiddetlerindeki azalmalarda dikkate alınmalıdır.

$$\mu_m = (\tau/\rho) + (\sigma/\rho) + (\pi/\rho) \tag{2.35}$$

2.35 eşitliğinde μ_m kütle azaltma katsayısını, τ/ρ fotoelektrik tesir kesitini, σ/ρ saçılma tesir kesitini, π/ρ çift oluşumu tesir kesitini ifade etmektedir. Kütle azaltma katsayısı herhangi bir dalga boyunda her madde ve her dalga boyu için farklıdır. Verilen bir dalga boyunda, (μ/ρ) kütle azaltma katsayısında, element ne kadar büyük olursa azaltma gücü o oranda büyüyeceği için Z ile orantılı olarak artacaktır. Bir element için, (μ_m) kütle azaltma katsayısında, dalga boyu büyüdükçe X-ışını enerjisi ve giriciliği azalacaktır (Polat and İçelli 2010).

Çok elementli kompozit bir materyal için toplam kütle azaltma katsayısı her bir elementin kütle azaltma katsayılarının karışım kuralına göre toplamıdır.

$$\mu_m = \sum_i \omega_i (\mu_m)_i \tag{2.36}$$

Burada ω_i *i.* elementin ağırlık kesri, $(\mu_m)_i$ ise *i.* elementin kütle azaltma katsayısıdır. Çok elementli bir materyal için ağırlık kesri;

$$\omega_i = \frac{n_i A_i}{\sum n_j A_j} \tag{2.37}$$

ifadesi ile verilebilir. Burada A_i *i.* elementin atom numarası ve n_i materyaldeki i. elementin atom sayısıdır.

Etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunun ölçülmesi

Birden fazla elementten oluşan bir maddenin etkin atom numarası tek bir numara ile temsil edilemez. Etkin atom numarası (Z_{etk}) fiziksel bir anlama sahiptir ve birden fazla

elementten oluşan maddenin kendine özgü özellikleri hakkında temel bilgiler verir. Etkin atom numarası radyasyonun madde ile etkileşimini gösteren bir özellik olması nedeniyle radyasyon zırhlama tasarımı ve soğurulan doz hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bir maddenin kimyasal yapısı hakkında ilk bilgileri elde etmek için de etkin atom numarası kullanılabilir. Büyük etkin atom numarasına sahip maddeler genellikle inorganik bileşikler olup metallere karşılık gelirken, küçük etkin atom numarasına sahip maddeler organik içerikli maddelere karşılık gelmektedir (Manohara *et al.* 2008). İncelenen numune bir karışım, bileşik ya da alaşım formunda ise etkin atom numarasının hesaplanması bazı kullanım alanlarında zorunlu ve gereklidir. Etkin atom numarası, materyallerin X- ya da gama ışını azaltma kesirlerinin anlamını ortaya çıkarmak için ölçülmesi gereken bir parametredir (Murty and Cooper 1999).

Foton etkileşim tesir kesiti, foton enerjisinin ve atom numarası Z'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Etkin atom numarası ile değişen oranlarda farklı element ve malzemeden oluşan bir kompozit malzemenin gama ışını etkileşim özelliklerini temsil etmek için genellikle uygun bulunmuştur. Z_{etk}, maddeyi oluşturan elementlerin atom sayısına bağlıdır. Foton atom etkileşimine aktif olarak katılan malzemenin elektron sayısını ifade eden Z_{etk}, radyasyon dozimetri, kütle enerji azaltma katsayıları ve Kerma hesaplamalarında sıklıkla kullanılır (Manjunathaguru and Umesh 2009).

Molekülün gerçek atomlarının her biri Z_{etk} kadar elektron içeren aynı sayıda özdeş atomlardan oluşan bir yapıda olduğu düşünülmektedir. Birim kütle başına düşen elektron sayısı etkin elektron yoğunluğu olarak adlandırılır ve bu parametre etkin atom numarasıyla yakından ilişkilidir. Elde edilen tesir kesitleri, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu parametreleri foton enerji soğurma parametrelerini temsil eder. Bileşik içindeki element sayısının artmasıyla etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu artmaktadır. Artan enerji ile de etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu azalmaktadır.

Kompozit bir materyal için etkin atom numarası (Z_{etk}), 2.29 denkleminde verilen toplam moleküler tesir kesiti (σ_{tm})'nin 2.31 denklemiyle verilen elektronik tesir kesitine (σ_e) oranı ile bulunur.

$$Z_{etk} = \frac{\sigma_{tm}}{\sigma_e} \tag{2.38}$$

Buradan hareketle etkin elektron sayısı veya elektron yoğunluğu N_e için;

$$N_e = \frac{N_A}{N} Z_{etk} \sum n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \tag{2.39}$$

ifadesi yazılabilir.

Foton buildup faktörü

Foton buildup faktörü üç aşamalı bir yöntemle aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

a) Eşdeğer atom numarasının hesaplanması
b) Geometrik-dizi (G-P) fit parametrelerinin hesaplanması
c) Enerji soğurma ve maruziyet buildup faktörünün hesaplanması

Eşdeğer atom numarası, elementlerin atom numaralarına benzer bir parametredir. Buildup faktörü çoklu saçılmanın doğrudan bir sonucu olduğu için, bu parametrenin hesaplanmasında büyük ölçüde Compton saçılmasının katkısından elde edilen etkin atom numarası kullanılmaktadır. Verilen çoklu yapıdaki bir madde için, eşdeğer atom numarası $Z_{eş}$ maddenin etkileşim katsayılarının oranının (μ_{comp}/μ_{tot}) aynı enerjide bu orana karşılık gelen etkileşim katsayıları oranına sahip elementin belirlenmesiyle bulunur. Bu oranın, art arda gelen iki elementin arasında olduğu durumlarda, $Z_{eş}$ aşağıdaki interpolasyon formülü yardımıyla bulunabilir (Harima 1983).

$$Z_{eş} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R) + Z_2(\log R - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \tag{2.40}$$

Burada Z_1 ve Z_2 sırasıyla R_1 ve R_2 (μ_{comp}/μ_{tot}) oranlarına karşılık gelen elementlerin atom numaralarıdır. R (μ_{comp}/μ_{tot}) ise verilen madde için aynı enerjideki oranı temsil etmekle birlikte R_1 ve R_2 arasında değerler almaktadır ($R_1 < R < R_2$). Hem enerji soğurma hem de maruziyet buildup faktörü için geometrik-dizi (G-P) fit parametreleri benzer interpolasyon prosedürü kullanılarak hesaplanabilir. G-P fit buildup faktörü katsayıları aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$C = \frac{C_1(\log Z_2 - \log Z_{etk}) + C_2(\log Z_{etk} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \tag{2.41}$$

Burada C_1 ve C_2, sırasıyla Z_1 ve Z_2 atom numaralarına karşılık gelen katsayı değerleri ve Z_{etk} ise verilen numunenin etkin atom numarasıdır. Daha sonra bu parametreler verilen maddelerde enerji soğurma ve maruziyet buildup faktörlerini hesaplamak için aşağıdaki formüllerde kullanılır (Harima *et al.* 1986):

$$B(E,x) = 1 + \frac{b-1}{K-1}(K^x - 1) \quad K \neq 1$$

$$B(E,x) = 1 + (b-1)x \quad K = 1$$

$$K(e,x) = cx^{a} + d\,\frac{\tan\left(\frac{x}{x_k} - 2\right) - \tan(-2)}{1 - \tan(-2)} \quad x \le 40\ mfp \tag{2.42}$$

Burada E foton enerjisi, x birimi ortalama serbest yol (MFP) olmak üzere nüfuz derinliği, a, b, c, d ve X_k ise G-P fit parametreleridir. b parametresinin değeri 1 MFP deki buildup faktörünün değerine karşılık gelmektedir. Ortalama serbest yol, fotonun iki etkileşim arasında almış olduğu yoldur. K parametresinin nüfuz derinliği ile değişimi foton doz çarpımı ve spektrumun şeklindeki değişimi temsil etmektedir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Ultra Ge Dedektörü

Ge yarı iletkeninin kullanıldığı dedektörlerde dedektör kristali, ultra saf Ge kristalden veya Li sürüklenmiş Ge kristalden olmaktadır. Normal Ge kristallerindeki safsızlık oranı 10^{10} atom/cm^3 iken yüksek saflıktaki Ge kristallerinde bu oran 10^{13} atom/cm^3 değerindedir. Böylece Li katkısı ile daha az safsızlıkta elde edilen Ge(Li) yarı iletken dedektörlerinde, Li katkısı yapılmadan daha yüksek saflıkta germanyum kristalleri oluşturulur. Bu durumda yüksek saflıkta Ge kristallerinden yapılan yarı iletken dedektörlerin tüketim bölgesinde daha büyük artışlar elde edilir. Ayrıca Li katkısının kalkmasıyla da bu yarı iletken dedektörleri sürekli soğutmaya gerek kalmaz, sadece kullanıldıkları süre içerisinde soğuk tutulmaları yeterli olur. Saf Ge kristalinden yapılmış dedektörlere, yüksek saflıktaki dedektörler adı verilmektedir. Yüksek saflıktaki Ge dedektörlerinin en önemli özelliği, diğer dedektörlere göre daha iyi enerji çözünürlüğüne sahip olmalarıdır. Ayrıca bir germanyumda bir elektron-boşluk çifti oluşturabilmek için verilmesi gereken eşik voltajı, diğer yarıiletken dedektörlere göre oldukça düşüktür. Bu durum daha düşük enerjili gama ışınlarının ölçülmesinin yanında, sayım kapasitesinin artmasını da sağlamaktadır.

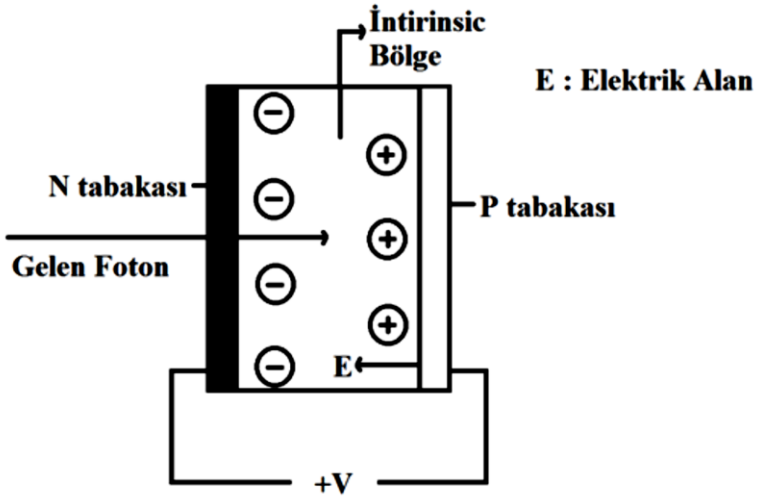
Üç tip germanyum dedektörü vardır: Coaxial (eş eksenli), planar (düzlemsel), well type (kuyu tipi). Bu dedektörlerin gama ve X-ışınları için dedektör verimi, enerji aralığı ve enerji rezolüsyonu farklıdır. Gama ışınları için kullanılan p-tipi coaxial dedektörlerin enerji aralığı 100 keV-10 MeV'dir. Düşük enerjili gama ve X- ışını dedekte etmede bu tip dedektörler kullanılmaz. X- ışınları için n-tipi ve planar dedektörler kullanılır. Bu tip dedektörlerde ince berilyum pencere kullanılır. Dedektör verimi, düşük enerjilerde kesit alanı ve pencere kalınlığına, yüksek enerjilerde ise dedektörün aktif hacmine bağlıdır. Planar geometrili germanyum diskin, iki düz yüzünde elektriksel kontak sağlanır ve kontaklar ya lityum buharlaştırılmasıyla ya da sürüklemesiyle oluşturulur.

Ultra Ge dedektörler genellikle tam deplasyon bölgeli dedektörlerdir. Ultra Ge dedektöre gönderilen fotonlar, altın elektrot ile ölü tabakayı geçerek deplasyon bölgesine ulaşır. Buradaki Ge atomlarını uyaran fotonlar pozitif ve negatif yüklü iyon çiftleri oluştururlar. Foton enerjisinin büyük bir kısmını alan fotoelektronlar enerjileri bitinceye kadar yolları üzerinde elektron-hole çiftleri oluştururlar. Ters beslemde çalışan dedektör, uygulanan negatif gerilim (-1500V) ile elektrik alan oluşturur ve bu alan elektron-hole çiftlerini toplar. Negatif gerilim

uygulanmasıyla elektronlar n-tipi, holler ise p-tipi bölgeye hareket ederler ve sonuçta dedektöre gelen foton enerjisi ile orantılı sayıda elektron-hole çifti oluşur. Sayaç maddesi seçilirken elektron-hole çifti verimi dikkate alınır ve bu verimin büyük olması tercih edilir. Fotonun oluşturduğu pozitif ve negatif yükler bazı etkileşimlerden sonra tekrar birleşebilirler. Bu olay rekombinasyon olarak adlandırılır.

Ultra Ge dedektörüne gelen foton, dedektörün hassas hacminde soğurulur ve fotonun enerjisi ile orantılı olarak elektrik sinyali üretilir. Bu elektrik sinyali sırasıyla, ön yükseltici, yükseltici ve çok kanallı analizöre iletilir. Analizöre gelen sinyal, elektronik gürültü, yük taşıyıcılarda istatistiksel dalgalanma ve tamamlanmamış yük toplanmasından dolayı genişletilmiş çizgi spektrumunu oluşturur. Enerji rezolüsyonu, pik/Compton oranı, dedeksiyon verimi, pencere kalınlığı, temel sayma seviyesi ve dedektör-kaynak mesafesi elde edilen spektrumu etkiler. Çizgi spektrumunun altında kalan temel sayma bölgesi, çoğunlukla fotonların Compton saçılmasından, bazen de dedektör çevresindeki malzemeden kaynaklanır. Radyoaktif kaynak içerisindeki radyasyon kirliliği de spektrumu olumsuz yönde etkiler. Ultra Ge dedektörlerin kalınlığı arttıkça soğurma verimliliği de artar, geometrik verimi ise dedektör alanı arttıkça artar. Fakat bu durumda rezolüsyon azalır.

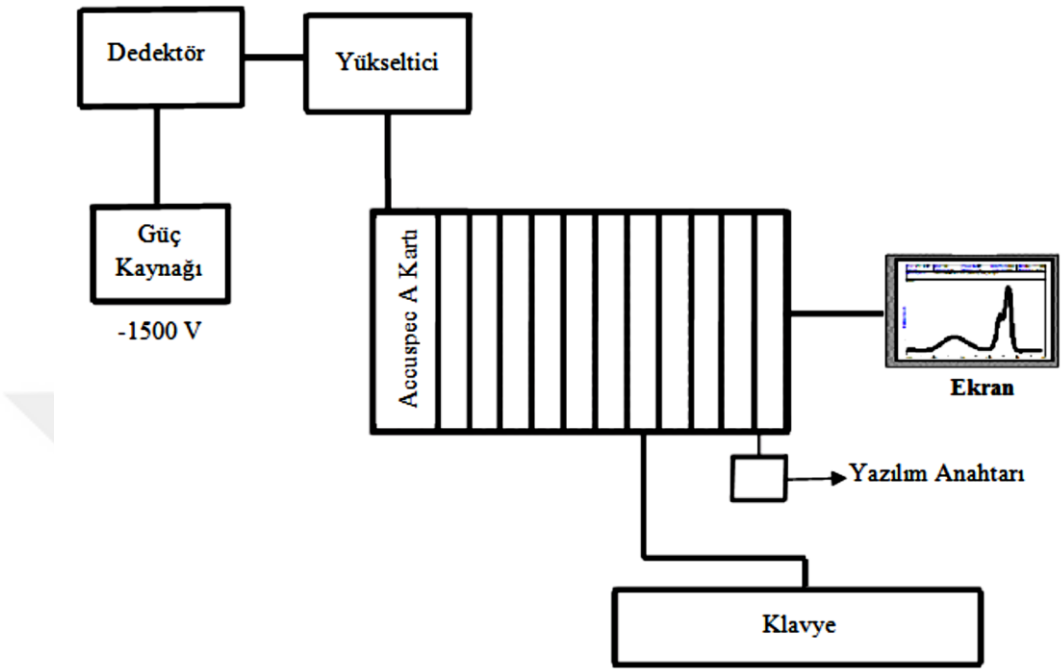
Katıhal sayaçlarında alçak gürültü ve yüksek kazançlı ön amplifikatörler kullanılır ve genelde alan etkili transistör (FET) tercih edilir. FET toplanan yükü akım pulslarına dönüştürür. Dedektör elementi ve dedektör kapasitansındaki sızıntı akımı sistemin gürültüsünün artmasına ve rezolüsyonun düşmesine neden olur. Bu istenmeyen durum dedektör sıvı azot sıcaklığında (-196°C) tutularak giderilir. Sıvı azot sıcaklığında çalışılması elektriksel gürültüyü de minimuma indirir. Yarıiletken dedektörlerin bütün yük taşıyıcılarını durdurmak için sıvı azot sıcaklığında tutulmasına ek olarak, kristalinin de vakuma alınması gerekir.



Şekil 38. Ultra Ge dedektör kristali ile foton etkileşimi

Sayma sistemi

Sayma sistemini oluşturan elemanlar genelde dedektör, ön yükseltici, yükseltici, analog sayısal dönüştürücü, puls yükseklik analizörü, osiloskop ve bir yüksek voltaj kaynağından ibarettir.



Şekil 39. Sayma sisteminin şematik gösterimi

Yüksek voltaj kaynağı

Dedektöre gelen fotonların oluşturduğu yükleri toplamak için dedektöre yüksek bir voltaj uygulanmalıdır. Bu yüklerin yeniden birleşmesini engellemek için ise bu voltaj negatif olmalıdır.

Ön yükseltici

Ön yükselticilerin; sinyal genişletme, puls şekillendirme ve potansiyel puls üretimi olmak üzere yük dönüşümünde üç temel görevi vardır. Ön yükselticide puls yükselme ve yük toplama zamanı birkaç mikrosaniyeden birkaç nanosaniyeye kadar değişir. Ön yükseltici dedektörden gelen yük pulsunu voltaj pulsuna dönüştürür. Çoğu ön yükselticide puls çıkış gerilimi giriş yükü ile doğru orantılıdır. Ön yükselticilerin yüke hassas olması için düşük gürültülü ve yüksek kazanca sahip olması (rezolüsyon %0,15) gerekir. Gürültüyü düşük tutmak için ön yükselticinin girişi azot kaynama sıcaklığında olmalıdır. Ön yükselticinin çalışmasını iyileştirmek için FET'in sıcaklığı oda sıcaklığında olan dedektörün dış muhafazasından iç kısma ısı sızdırılarak dedektörden daha sıcak tutulabilir. Ayrıca ön yükselticinin geniş band aralığına ve geniş dinamik aralığa sahip olması gerekir.

Yükseltici

Yükseltici, ön yükselticinin çıkış puls genliklerini ayırt eder ve sayılma için uygun voltaj seviyelerine yükseltir. Puls genliği, pulslar ve X-ışını fotonu arasındaki orantılı ilişkiyi tamamen sağlayarak işlemi uygun bir forma sokar. Yükselticilerin önemli karakteristikleri; lineerlik, çıkış puls biçimi, kazanç (gain), kararlılık (stability) ve gürültü seviyesidir. Çoğu yükselticiler hem unipolar çıkış hem de bipolar çıkış sağlarlar. En iyi sinyal/gürültü oranını elde etmek için yükselticinin unipolar çıkışı seçilir. Puls genişliğini belirleyen shaping time sabitini doğru seçmek gerekir. Oluşturulacak spektrumun iyi bir rezolüsyonda olması için uzun zaman sabiti tercih edilir.

Analog Sayısal Dönüştürücü (ADC)

Analog dijital dönüştürücü, yükselticinin genişlettiği analog pulsu, sayısal bir veriye dönüştürür. ADC'den alınan puls yükseklik bilgisinin, her bir kanalda gözlenen sayımların birikmiş sayısını veren bir düzende saklanmış olması gerekir. Sayılmış olan her bir puls yüksekliği kadar sayı analizörün hafızasında toplanır ve sonuçta bu bilgi bir enerji spektrumu olarak ekrana aktarılır. ADC, puls yükseklik spektrumuna ek olarak, sayma süresini de saklar. Sayma süresinin sonunda hafızadaki veriler, bir manyetik bant gibi saklama ortamlarına bilgi olarak gönderilebilir.

Çok kanallı analizör (MCA)

Çok kanallı analizör, analog dijital dönüştürücü (ADC), bellek ve görüntüleme birimlerinden oluşur. MCA, ADC ile sayısal veriye dönüştürülmüş pulsu kanallara yerleştirir ve bilgisayar hafızasına kaydeder. Görüntüleme birimi hafızadaki pulsları okur ve her pulsu şiddeti ile orantılı olarak bir kanala yerleştirir. Her bir kanala yerleştirilen puls sayısı enerjiye eş değerdir ve enerji spektrumu elde edilir.

Puls yükseklik analizi ve sayma tekniği

Puls yükseklik analizi gürültü seviyesinden (background) ayarlanabilir. Dedeksiyon sistemi sinyal çıkışı, tek kanallı (SCA) veya çok kanallı (MCA) analizörden alınabilir. Analizörlerde alt kademe ayıracı (lower level discriminator (LLD)) ve üst kademe ayı-racı (upper level discriminator (ULD)) bulunur.

Nötron Dedektörleri

Madde ile nötron etkileştiğinde doğrudan bir iyonlaşma oluşmaz. Bu nedenle nötronları saymak için nükleer reaksiyonların meydana getirdiği ikincil olayları incelemek gerekir. Nötron

yakaladıktan sonra radyoaktif hale gelen ve belli enerjiler için nötron yakalama tesir kesitleri bilinen bir maddeyi nötronla bombardıman ederek de nötron şiddetleri ölçülebilir.

Hızlı nötronları ölçmek için nötron ile H, ^{2}H, ^{3}He, ^{4}He vb. gibi hafif hedefler arasındaki elastik çarpışmayı izleyen geri tepme olayı incelenebilir. Hızlı nötronlar, yavaşlatıcı bir malzemeyle yavaşlatarak dedekte edilebilir.

Dört tip nötron dedektörü vardır:

1) BF_3 orantılı sayaçları
2) Helyum orantılı sayaçları
3) Gaz çarpışma orantılı sayaçları
4) Kabarcık dedektörler

BF_3 orantılı sayaçları

BF_3 orantılı sayaçları, ^{10}B izotopu ile zenginleştirilmiş, iyon odası BF_3 gazı ile dolu, iç yüzeyi bor metali veya bileşenleri ile kaplı bir orantılı sayaçtır. Bu tip dedektörlerde aşağıdaki olaylar meydana gelir:

- ^{10}B ile etkileşim sonucu alfa parçacıklarının oluşması
- ^{3}He ile etkileşim sonucu proton oluşması
- H çekirdeği ile yapılan elastik saçılma.

İlk iki reaksiyon 0,5 eV'luk enerjiye sahip nötronlar tarafından meydana getirilen reaksiyonlardır. Bu nötronlar orta enerjili nötron bölgesinin en altında ve termal bölgede (0,025 eV) olan nötronlardır. Elastik saçılmalar hızlı nötronların dedekte edilmesinde kullanılırlar. BF_3 gazlı dedektörler orta ve yüksek enerjili nötronların dedekte edilmesinde de kullanılabilir.

Bir nötron, dedektör içerisine girdiği zaman aşağıdaki temel reaksiyon meydana gelir.

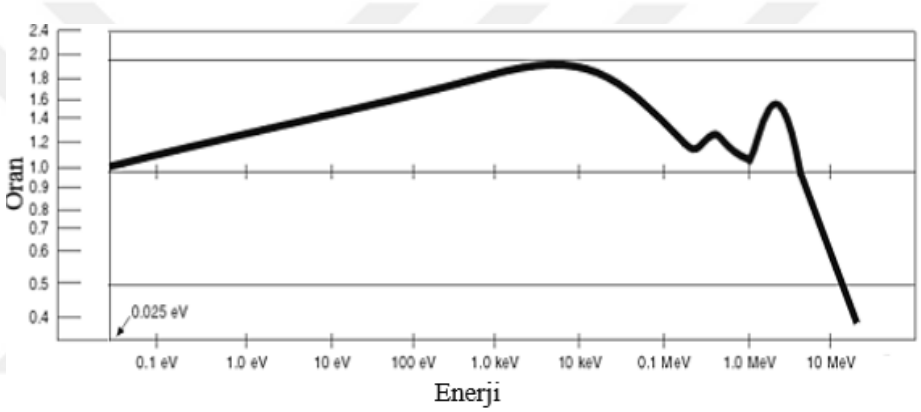
$$^{10}B + n \rightarrow {}^{7}Li + \alpha({}^{4}_{2}He) \tag{3.1}$$

^{7}Li' yi uyarılmış duruma getiren reaksiyonun Q değeri 2,31 MeV' dir. Kinetik enerjisi bu değerden az olan nötronlar için momentum korunumu kanununa göre enerji α'nın kinetik enerjisi 1,47 MeV olacak şekilde ^{7}Li ve α arasında paylaşılır.

Lityum çekirdeği ve alfa parçacığının sahip oldukları yüksek enerji, gaz dolu ortamda ikincil iyonizasyona neden olmaktadır ve bu ikincil iyonizasyonlar dedekte edilebilirler. Bu istenmeyen bir durumdur ve bunu ortadan kaldırmak için bir ayırt edici devre kullanılır.



Şekil 40. BF_3 nötron dedektörü



Şekil 41. BF_3 nötron dedektörü verim eğrisi

^{241}Am-Be Nötron kaynağı

Düşük atom numaralı ve son nötronunun bağlanma enerjisi düşük olan berilyum gibi hedef malzemeler, radyoaktif çekirdeklerin yayınladığı alfa parçacıkları ile bombardıman edildiğinde; tipik ve en muhtemel olarak

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow ({}^{13}_{6}C)^{*} \rightarrow {}^{12}C + {}^{1}_{0}n \qquad (3.2) $$

reaksiyonu oluşur. Bu reaksiyonda ^{13}C* çekirdeği çok kısa süreli (10^{-12} s) oluşan bileşik çekirdektir. Bu kaynakların yapımında, alfa yayınlayan ^{241}Am izotopu yaygın olarak kullanılır. Kaynaktan çıkan nötron parçacıklarının etkin enerjileri 4,5 MeV' dir. Bu kaynakta alfa parçacıkları, ^{241}Am izotopundan sağlanır. Bu radyoaktif çekirdekten yayınlanan alfa parçacıkları ile nötron bağlanma enerjisi düşük olan berilyum hedef bombardıman edilir ve nötron parçacıkları elde edilir. Bu işlem sonucunda nötron parçacıklarının yanı sıra gama ışınları da açığa çıkar. 0-11 MeV enerji aralığında nötron yayınlayan ^{241}Am-Be kaynağının etkin enerjisi 4,5 MeV'dir.

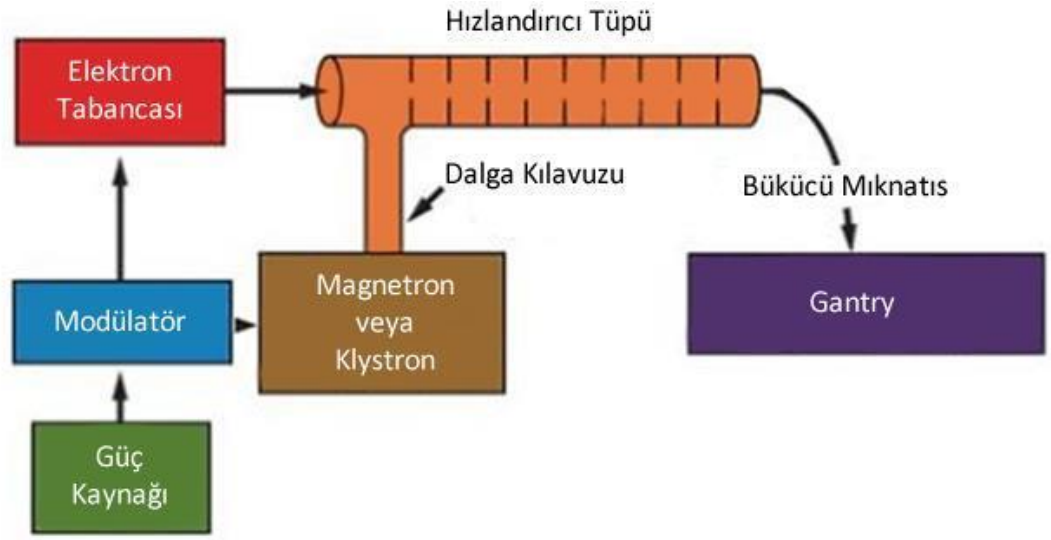


Şekil 42. Nötron kaynağı

Lineer Hızlandırıcı (LINAC)

Lineer hızlandırıcılar, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları kullanarak elektronları doğrusal tüp boyunca hızlandıran cihazlardır. Hızlandırılmış yüksek enerjili elektronlar genellikle yüzeysel tümör tedavilerinde kullanıldığı gibi, elektronların tungsten gibi yüksek atom numaralı bir hedefe çarptırılmalarıyla elde edilen bremsstrahlung X- ışınları da derine yerleşmiş tümör tedavilerinde kullanılır (Khan 2003). Hetorojen yapıdaki X- ışınları enerjisi, X- ışını tüpünde oluşturulan voltaj ile üretilmiş olması nedeniyle megavolt (MV) olarak belirtilir. Lineer hızlandırıcılar yüksek enerjili olmaları nedeniyle saçılan ışınlar azdır. Lineer hızlandırıcılarda ışın eksenine dik bir düzlemde, merkezi ışından uzaklaştıkça özellikle alan kenarlarına yakın kısımlarda, yarı gölge şeklinde penumbra olarak tanımlanan doz azalması meydana gelir.

Lineer hızlandırıcı elektron hızlandırıcısı, elektron saptırıcı kısmı ve kolimatör (kafa) kısmı olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 43. Lineer hızlandırıcının bileşenleri

Elektron hızlandırıcısı: Elektronları hızlandırmak amacıyla uygun elektriksel alan oluşturmak için tasarlanmış mikro dalga odacıklarının doğrusal dizilimi ile meydana gelen elektron hızlandırıcı lineer hızlandırıcının en önemli parçasıdır. İçerisinde 10^{-6} mbar'lık bir vakum bulunan ve 3000 MHz'lik frekansta titreşim oluşan, silindir şeklinde, çapı yaklaşık 10 cm olan 2,6 cm aralıklarda metalik disk veya diyagramdan oluşan seri silindirik odacıklardan ibarettir.

Lineer hızlandırıcının bu bölümünde yer alan magnetron veya klaystron mikro dalga üreteçleri yer alır. Magnetron ve klaystronlar arasında bazı teknik farklılıklar olmasına rağmen her ikisi de aynı amaçla kullanılabilir. Magnetron tüpleri daha küçük hacimli, daha ucuz, montajı daha kolay ve ömürleri klaystronlara nazaran daha azdır. Klaystronlar yüksek güçte mikrodalga ürettiğinden daha çok haberleşmede kullanılmaktadırlar. Magnetronun etrafını saran ve sabit bir manyetik alan oluşturan kısma daimi magnet denir. Bu kısım elektromanyetik alanının kontrol altına alınmasını sağlar. Magnetrondan üretilen mikro dalgaların güç enerji kontrolü radyo frekans güç monitörü ile yapılır. Hızlandırıcı tüp içerisi vakumlu olduğu için hızlandırıcı tüp ile güç monitörü arasına izolasyonu sağlamak amacı ile gaz konulmuştur. Bu gazın vakumdan dolayı hızlandırıcı tüpe kaçmaması için araya bir pencere konulmuştur. Elektron demeti, hızlandırıcı tüp içerisinden geçerken demet içtimasına uymayıp da disk aralarına kaçan veya disklere çarpan elektronlar RF absorblayıcı tüp tarafından yakalanır. Bu kısım, bazı cihazlarda yükü absorbe edip nötürler, bazı cihazlar ise yakaladığı bu yükleri dalga kılavuzunun giriş kısmına atarak sisteme kazandırır. Böylesi durumda magnetrona yardımcı olur ki magnetronun ömrünü uzatır. İyon pompaları ise hızlandırıcı tüpün vakumunu ayarlamada görev alır (sabit vakum oluşturulur).

Elektron tabancasından elde edilen ve enerjileri yaklaşık 50 keV olan elektronlar hızlandırıcı tüp içerisine gönderilir. Bu elektronlara yüksek enerji kazandırmak için tüp içerisindeki elektromanyetik dalgaların tepesine bindirilir. Elektromanyetik dalgaların hızı, elektronların hızından fazla olduğu için bu hız tüp içerisindeki dairesel diskler tarafından azaltılır. Bu disklerin boyutları ve aralarındaki mesafeler dalga hızına göre tayin edilir. Elektromanyetik dalgaların tepelerine bindirilerek hız kazandırılan elektronların hızları yaklaşık 0,4c hızından 0,97c hızına kadar çıkar ve enerjileri birkaç MV'a ulaşır. Elektron tabancasından hızlandırıcı tüp içerisine dağınık halde gelen elektronları ince bir demet haline getirip hedefe çarptırmak gerekir. Bunun için de odak bobinleri diye adlandırılan ve hızlandırıcı tüpün etrafında, tüp boyunca manyetik alan oluşturarak elektronları ince bir demet haline getiren manyetik odaklayıcılar bulunmaktadır. Böylece tüpün sonuna gelen elektronlar maksimum hız ve enerjiye ulaşmış ince bir demet halini almış olarak gelirler.

Elektron saptırıcıları: Enerjileri maksimum olan elektronlar, saptırıcı (bending) magnetler tarafından saptırılarak hedef üzerine düşürülür veya doğrudan doğruya tüpün dışına gönderilir. Bu işlem yine manyetik alanla yapılmaktadır. Saptırıcılar 900, 2700 ve selalom bending system olmak üzere üç çeşittir. Her saptırıcının demet kontrolü manyetik alanla sağlanmaktadır. Selalomlarda elektron demeti, her bir kıvrımda 440 ve üçüncü kıvrımda toplam 3×440 = 1320 saptırılmış olur, geri kalan 420 ise gantrynin açısına gider.

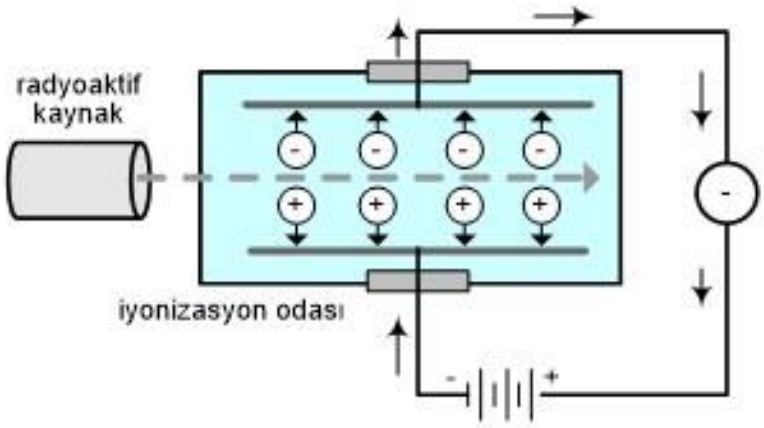
Kolimatör kısmı: Kolimatör kısmı her biri ayrı bir görev üstelenen birçok parçadan yapılmıştır. Konik halde gelen fokusun hemen altında bulunan ve iki kısımdan oluşan parçanın görevi elektron veya X-ışını tedavisi moduna geçmeyi ayarlayan kısımdır. Eğer elektron tedavisi ve 18 MV'ye kadar X-ışını üretmek istendiğinde bu parça şekle göre sağa doğru hareket ederek kısmen açık olan tarafını fokusun önüne getirir. 18 MV'den yüksek X- ışını üretmek için ise sola doğru hareket ederek hedef olarak kullanılan genellikle yüksek atom numaralı ve erime sıcaklığı yüksek olan tungsten kısmını odak önüne getirir. Hızlandırılmış bu elektronlar tungsten üzerine düşürülerek bir kısmı X- ışınına dönüşürken bir kısmı da hedef tarafından emilir ve ısı enerjisine dönüşür. Oluşan bu ısıdan dolayı hedef ergime sıcaklığı yüksek olan malzemeden seçilir ve ayrıca soğutma sistemine ihtiyaç duyulur.

İyon Odası

İyon odası, radyasyon enerjisini elektrik sinyaline dönüştüren sayaçtır. İyon odaları kalibre edilerek elektrik sinyali, radyasyon enerjisine çevrilir. İyon odası 10^2-10^3 V değerleri arasında çalışan iki elektrot ve elektrotları izole eden gaz kısımlarından oluşur. İyon odasındaki gaz kısmının hacmi 10^{-2} –10^4 cm^3 arasında değişmektedir. Bu kısımlar plastik ve karbon gibi atom numarası suya yakın maddelerden yapılan ve duvar olarak adlandırılan yapıyla

kaplanmaktadır. İyon odasında bulunan gaz, gelen foton demeti, yüklü parçacıklar ve iyon ürünleri ile iyonize olur. İyonlaşan gaz iletkenlik özelliği kazanarak elektrik akım meydana getirir. 10^{-14}–10^{-7} A değerleri arasında oluşan bu akım uygulanan voltajdan bağımsızdır. Puls üreten iyon odasında, elektrotlar katot ve anota bağlanır. Elektronlar anotta, pozitif iyonlar ise katotta toplanırlar. Toplanan yükler devreden bir puls şeklinde geçer. Bu pulsun genliği oluşan iyon sayısı ile orantılıdır. İyon odasında oluşan her pulsun sayılabilmesi için yükseltilmeleri gereklidir. Voltaj yaklaşık 1000 V kadar artırılarak bu yükseltme yapılır. Artırılan voltaj sonucunda daha büyük bir elektrik alan oluşur ve daha hızlı elektronlar elde edilir. Elektronlar gaz atomlarıyla yaptığı elastik çarpışmanın yanı sıra kazandıkları enerjiyle elastik olmayan çarpışmalar da yaparlar ve yeni iyonlar oluştururlar. Bu iyonlar uygulanan voltajla ivmelenip daha fazla iyon üretirler. Sonuç olarak birincil iyonlardan daha fazla miktarda bir negatif iyon çığı oluşur ve bu çığa Townsend çığı denir.

Elektronlar, pulslar şeklinde üretildiğinden iyon odasında toplama verimi sorunu oluşur. İyon odası için iyon toplama verimi ve doyum şartları önemlidir. İyon odası voltaj ayarı ve iyon tekrar birleşme faktörü nedeniyle oluşan iyon kaybının % 1'den az olacak şekilde düzenlenmesi gerekir (Khan 2003). İyon odasının sızıntı kontrolü yapılmalıdır. Sızıntı % 0,1'den az olmalıdır. İyon odasının duyarlılığı periyodik olarak ölçülmelidir. Duyarlılığındaki değişim % 1'den büyük olmamalıdır.



Şekil 44. İyon odası

Metal Köpüklere Doldurulan Katkı Maddeleri

Bor Oksit (B_2O_3):

Bor oksit, hem kristal yapıda hem de amorf camsı yapıda bulunan bir bileşiktir. Amorf camsı yapıdaki bor oksit bileşiği renksiz, kokusuz, sert bir katıdır ve genellikle borik asidin dehidrasyonu yöntemiyle üretilmektedir. Kristal hallerinden biri olan hegzagonal bor oksit, normal şartlarda kararlı yapıdadır. Diğer kristal hali ise daha az rastlanılan monoklinik bor

oksit, normal şartlar altında termodinamik olarak kararlı değildir. Bu kristaller; sert, beyaz ve kokusuzdur. Bor oksit bileşiği cam üretiminde ısıl genleşme katsayısını arttırıcı ve ergime derecesini düşürücü olarak kullanılır. Camın çizilme ve aside dayanıklılık direncini geliştirerek renk ve parlaklık özelliklerini arttırır. Seramik ve emaye sırların üretiminde de kullanılır. Metalurji sektöründe metal oksitler için iyi bir çözücü olmasından dolayı flaks olarak kullanılır. Ayrıca Ga-As yarı iletkenlerin yapımında kullanılır.

Seryum Oksit (CeO_2):

Seryum oksit bileşiği, ultraviyole ışınımı soğurma kabiliyeti, katalizör özelliği ve gaz algılama gibi önemli fizikokimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle birçok çalışma alanında kullanılan nadir toprak metal oksitlerden biridir. 3,2 eV'luk geniş bant aralığına sahip bir yarı iletkendir. Oda sıcaklığından ergime noktasına (2400 °C) kadar olan tüm sıcaklık değerlerinde yüzey merkezli kübik yapıya sahiptir. Nano boyutlardaki CeO_2 üstün fiziksel özellikleri nedeniyle güneş pilleri, nanolazerler ve daha birçok işlevsel cihaz dâhil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. (Yılmaz 2019). Ayıca önemli iyonik ve elektronik iletimi özelliği nedeniyle yakıt hücresi araştırma ve geliştirmesinde kullanılmaktadır.

Tellür dioksit (TeO_2):

Tellüryumun en önemli oksidi olan tellür dioksit TeO_2 doğada ortofobik tellürit ve tetragonal paratellurit olmak üzere iki modifikasyonda bulunur. Elementel tellürün hava ile yanmasıyla oluşur. Güçlü asitlerde ve alkali metal hidroksitlerde çözünür, suda ise az çözünür. İçinde bulunduğu çözeltiye göre asit ya da baz özelliği gösterir. Şartlı bir cam oluşturucusudur. TeO_2 den cam elde etmek için yapıya tellür oksitin ağ yapısını bozacak bir alkali oksit, ağır metal oksit veya halojenür eklenir. TeO_2 gözlükleri yüksek kırılma indislidir ve optik dalga kılavuzları için ilgi çekicidirler. Tellürit camlar Raman'ın fiber optik amplifikasyonda faydalı olandan 30 kat daha fazla kazanç sağlar. Tellür oksitin gerek kristalin gerekse cam formdaki kararlı yapısı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. TeO_2'nin kristal yapısı hakkında ilk çalışma 1946 yılında, Stehlik ve Balak tarafından gerçekleştirilmiştir.

Kalsiyum oksit (CaO):

Sönmemiş kireç olarak da bilinen kalsiyum oksit geniş bir kullanım alanı bulunan bir bileşiktir. Beyaz renkli, aşındırıcı ve alkalik bir katıdır. Kireç taşlarının yüksek sıcaklıklarda eritilerek karbondioksidin uzaklaştırılmasıyla elde edilir. Suyla reaksiyona girdiğinde oksitlenir ve kalsiyum hidroksidi oluşturur. Bazik özellikli bir bileşiktir. Erime noktası 2572 ˚C olan kristal bir katıdır. Başlıca mercan, deniz kabukları veya tebeşirde bulunur. Ayrıca kireç taşının ($CaCO_3$) ısıtılmasıyla da üretilir.

Kirecin eski kullanım alanlarından biri karbon dioksit ile tepkimesinden kalsiyum karbonat oluşur. Kireç, su ve kum ile karıştırılarak, hazırlanan harç inşaatta tuğla, taş ve blokların sağlamlaştırılmasında kullanılır. Harç tuğlalar arasına sıvanır ve kademeli olarak sertleşerek tuğlaları sağlamlaştırır. Oda sıcaklığında, karbon dioksit ile kireç tepkimesi çok yavaş gerçekleşir. Su ile kireç karıştırılarak tepkime hızlandırılır. Sönmüş kireç denilen kireç, su ile karıştırılarak, kalsiyum hidroksiti oluşturur. Ticari bir ürün olarak kireç magnezyum oksit, silikon oksit ve küçük miktarda alüminyum oksit ve demir oksit içerir. Yüksek erime noktası oluşturması nedeniyle fırın astarları için refrakter malzemesi olarak kullanılır. Kalsiyum karbür ağartmasında, soda tozu ve cam üretiminde, sert suların yumuşamasında, deri tabaklamada, kâğıt üretiminde, asidik toprak için gübre olarak kullanılır (Toprak 2010).

Tungsten Trioksit (WO_3):

Tungsten trioksit tungsten minerallerinden geri kazanılmasında bir ara madde olarak elde edilir. Tungsten cevherleri, WO_3 üretmek için alkalilerle muamele edilir. Tungsten trioksit günlük hayatta birçok amaç için kullanılır. Endüstride fosforlu, yanmaz kumaşlar ve gaz sensörleri için tungstatlar üretmede kullanılır. Zengin sarı rengi nedeniyle seramik ve boyalarda pigment olarak kullanılır. Son yıllarda, tungsten trioksit elektronik pencerelerin veya akıllı pencerelerin üretiminde kullanılmaya başlamıştır. Bu pencereler, uygulanan voltajla ışık iletim özelliklerini değiştiren camlardır. Pencere içinden geçen ısı veya ışık miktarının değişmesiyle pencerelerin renklendirilmesi sağlanır.

WO_3 oldukça geniş bant aralığına sahip (2,6–3,0 eV) n-tipi metal oksit yarıiletkendir. Yoğunluğu 7,16 g/cm^3 erime noktası 1473°C, kaynama noktası 1700°C'dir. Suda çözünmeyen, alkali solüsyonlarda çözünen, asitlerde ise az bir miktar çözünen bir metal oksittir. WO_3 gaz ve ısı algılayıcılar, katalizörler, elektrokromik camlar gibi çeşitli uygulamalarda sıkça kullanılan gazkromik, elektrokromik, fotokromik, termokromik gibi ilgi çekici fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bir yarıiletken materyaldir (Usta 2012).

Bizmut oksit (Bi_2O_3):

Bizmut (III) oksit, endüstriyel olarak en önemli bizmut bileşiğidir. Bizmut kimyası için ortak bir başlangıç noktasıdır. Genellikle bakır ve kurşun cevherlerinin eritilmesinin bir yan ürünü olarak elde edilir. Bizmut trioksit kırmızı havanın yerine havai fişeklerde " ejderhanın yumurtaları " etkisini üretmek için yaygın olarak kullanılır Bizmut oksit, bazen diş materyallerinde, etraftaki diş yapısına göre X- ışınlarına daha opak hale getirmek için kullanılır. Bi_2O_3 kristal yapıda ve sarımsı bir tozdur. Zayıf bazik özellik gösteren bu bileşik asitlerde iyi çözünür. Bileşiğin erime noktası 825ºC ve yoğunluğu 8,9 g/cm^3'tür.

Krom oksit (Cr_2O_3):

Krom (III) oksit inorganik bir bileşiktir. Kromun ana oksitlerinden biridir ve pigment olarak kullanılır. Doğada, nadir mineral eskolait olarak ortaya çıkar. Önemli stabilitesi nedeniyle, kromya yaygın olarak kullanılan bir pigmenttir. Boyalar, mürekkepler ve gözlüklerde kullanılır. Krom yeşili renklendiricidir. Su ve solventlerde çözünmez, asit ve bazlardan etkilenmez, oksitlenmeye karşı da dayanıklıdır. Isı stabilitesi ve ışık dayanımı mükemmeldir. Gıda ambalajı, oyuncak ve kozmetik sektörlerinde kullanıma uygundur.

Titanyum dioksit (TiO_2):

Titanyum dioksitin en önemli kullanım alanı güneş pilleridir. Nano teknolojik boyalar özelliğini titanyum dioksitten almaktadır. UVA ve UVB ışınlarını önler. Ayrıca değerli bir madendir. TiO_2, suyun dezenfeksiyonu, havanın temizlenmesi ve zararlı atıkların giderilmesi gibi çevresel uygulamalar için en uygun yarı iletkenlerden biridir. TiO_2, yüksek fotokatalitik aktiviteye, yüksek fiziksel ve kimyasal kararlılığa sahip olup, aynı zamanda düşük maliyetli ve toksik değildir. En önemli uygulama alanları boya ve verniklerin yanı sıra dünya titanyum dioksit tüketiminin yaklaşık %80'ini oluşturan kağıt ve plastiklerdir. Baskı mürekkepleri, lifler, kauçuk, kozmetik ürünler ve gıda gibi diğer pigment uygulamaları %8 oranındadır. Seramik sırlarda, titanyum dioksit bir opaklaştırıcı ve tohum kristal oluşumu olarak işlev görür. Dövme pigmenti olarak ve kanamalı kalemlerde kullanılır. Titanyum dioksit, değişen partikül boyutlarında, yağ ve suda dağılabilir şekilde ve kozmetik endüstrisi için belirli sınıflarda üretilir.

Baryum oksit (BaO):

Baryum oksit beyaz renkli yanmaz bir bileşiktir. Kübik bir yapıya sahiptir ve katot ışın tüplerinde, taç camında ve katalizörlerde kullanılır. Cilde zarar verir ve fazla miktarda yutulduğunda tahrişe neden olur. Aşırı miktarda baryum oksite maruz kalınma ölümle sonuçlanabilir. Baryum karbonatın kok, karbon siyahı veya katran ile ısıtılması veya baryum nitratın termal ayrışması ile hazırlanır. Özgül ağırlığı 5,72 g/cm^3, erime noktası 1923 °C, kaynama noktası yaklaşık 2000 °C dir. Suda erir ve çok fazla ısı üretir. Solventlerden suyun uzaklaştırılmasında ve petrol sanayisinde kullanılır.

Paslanmaz Çelik:

Paslanmaz çelik, en az yaklaşık %11 krom içeren demir bazlı alaşımlardan oluşan bir ailedir. Paslanmaz çelik korozlanma yapmaz ve üzerinde su lekeleri bırakmaz. Ancak tamamen leke geçirmez değildir, düşük oksijenli ve zayıf sirkülasyonlu ortamlar ile yüksek tuzluluk paslanmaz çeliği etkiler. Çeliğin korozyon ve pasa direnci içerisindeki krom oranıyla alakalıdır.

Çeliğe nikel eklenmesi demirin östenitik mikroyapısı istikrarlı hale getirerek çeliği manyetik olmayan, düşük sıcaklıklarda daha az kırılgan yapar. İçeriğindeki karbon miktarının artırılmasıyla sertlik ve mukavemeti artar. Paslanmaz çelik ısıl işlemlerden geçirilerek bıçak, jilet gibi kesici uçlu ürünlerde kullanılır. Paslanmaz çeliğin temel özellikleri şunlardır: Korozyona dayanıklılık, estetik çekicilik, ısıya dayanıklılık, düşük yaşam döngüsü maliyeti, tamamen geri dönüşümlü, biyolojik olarak nötr, üretim ve temizlik kolaylığı, ağırlık/dayanıklılık oranı. Paslanmaz çelik toplamda 150 farklı şekilde üretimi vardır. Paslanmaz çelikler yassı ürün, borular, tel, çubuk plaka ve uzun şekillerde üretilebilirler. Gıda, inşaat, tıp, otomotiv, beyaz eşya, yapı elemanları, mücevher imalatı gibi kullanım alanları mevcuttur.

Epoksi ($C_{21}H_{25}ClO_5$):

Epoksi, yapıştırma gücü ve kimyasal direnci yüksek olan bir reçinedir. Mekanik özellikleri diğer reçine türlerinden daha iyidir. Epoksinin cam ile kombinasyonu çok iyi bir mekanik dayanıklılık gösterir. Bu özelliği sayesinde uzay ve havacılık ile denizcilik alanlarında kullanımı fazladır. Suya, aside ve alkaliye karşı gösterdiği direnç yüksektir. En yaygın kullanım alanlarından biri de inşaattır. İnşaat alanındaki kullanım yerleri, çatlakların doldurulması ve betonun içine eklenecek çelik donatıların yerleştirilmesidir. Diğer kullanım alanları şunlardır: Endüstriyel kaplamalar, fiber takviyeli plastikler, kaymaz kaplamalar, sert köpükler, genel amaçlı yapıştırıcılar, elektrik izolatörleri, elektronik ve elektrikli bileşenler, müzik aletleri üretimi, uzay ve havacılık sanayisi, otomotiv sanayisi.

Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, Goodfellow ürünü alüminyum köpükler kullanılmıştır. Bu köpükler açık hücreli köpükler olup, % 99 saflıkta Al-6101 alaşımından üretilmiştir. Alüminyum köpüğünün kimyasal kompozisyonu, Tablo 2'de gösterildiği gibi Al-6101 dökme alaşımınkinden farklıdır. Ayrıca köpüğün mikroyapısı da dökme alaşımınkinden farklıdır.

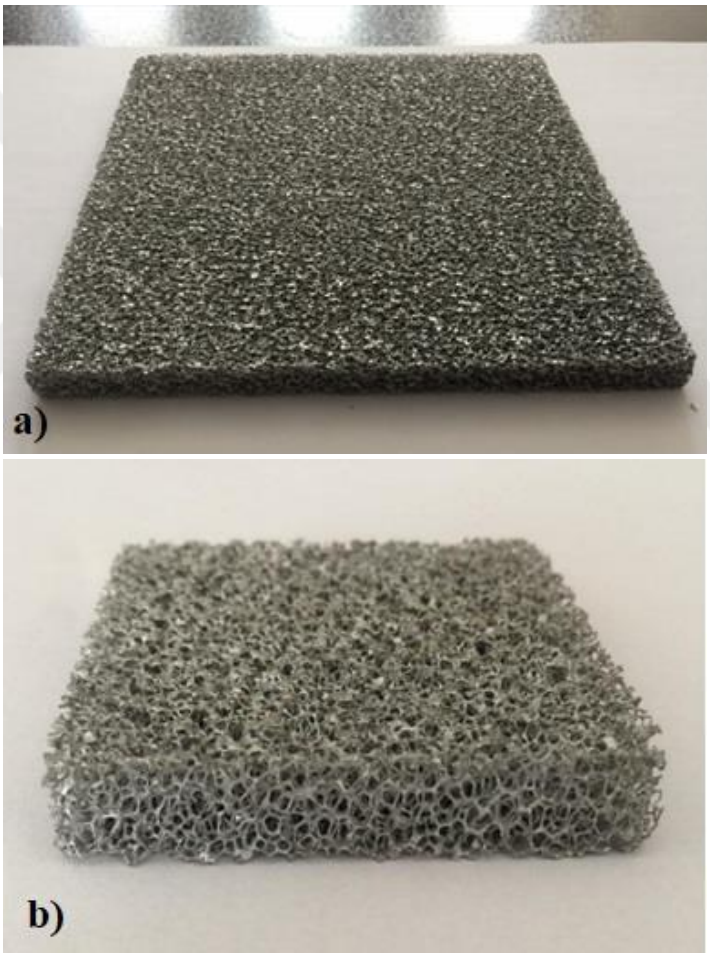
Tablo 2. Al-6101 dökme alaşım ve bu alaşımdan üretilen köpüğün kimyasal bileşimindeki element konsantrasyonları (%)

Örnekler	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	B	Cr	Al
Dökme alaşım	0,04	0,47	0,02	0,29	0,18	0,01	0,04	0,10	Denge
Köpük	<0,1	0,35-0,8	<0,03	0,3-0,7	<0,5	<0,1	<0,06	<0,03	Denge

Tablo 3. Bu çalışmada kullanılan alüminyum köpüğün fiziksel özellikleri

Kalınlık	10 mm ve 30 mm
Bulk yoğunluğu	0,2 g.cm
Gözeneklilik	% 93
Gözenek sayısı	16 pores/cm ve 2 pores/cm
Saflık	% 98,5

Satın alınan 10x10 cm yüzey alanına sahip Al-6101 açık hücreli köpükler, lazer kesim ile 5x5 cm yüzey alanına sahip olacak şekilde kesilmiştir. 20 adet 2 pores/cm gözenek boyutuna sahip 30 mm kalınlıkta ve 20 adet 16 pores/cm gözenek boyutuna sahip 10 mm kalınlıkta olmak üzere toplam 40 adet köpük numunesi kullanılmıştır.



Şekil 45. a) Lazer kesimi yapılmadan önce b) Lazer kesimi yapldıktan sonra Al-6101 metal köpük

Açık hücreli alüminyum köpük numuneleri, epoksi reçine ($C_{21}H_{25}ClO_5$), epoksi sertleştiricisi ve çeşitli bileşikler (B_2O_3, CaO, CeO_2, TeO_2, BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2, 316L paslanmaz çelik) kullanılarak doldurulmuştur. Köpüklerin katkı maddesiyle doldurulmasında, öncelikle epoksi ve epoksi sertleştirici karışımı hazırlanmıştır. Darası alınmış kaba önce sertleştirici konup sonra sertleştirici miktarının iki katı kadar epoksi eklenerek

homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Bu karışıma her seride kullanılacak olan bileşikler belirlenen oranlarda eklenerek homojen bir karışım oluncaya kadar karıştırılmıştır. Elde edilen epoksi+bileşik karışımı, çevresi parafilm ile kaplanmış köpüklerin üzerine homojen dağılacak şekilde dökülerek 24 saat donması beklenmiştir. 30 mm kalınlıktaki köpükler için 50 g, 10 mm kalınlıktaki köpükler için ise 30 g karışım hazırlanmıştır. Köpük içindeki karışım donduktan sonra etrafındaki parafilm çıkartılıp numuneler ölçümler için hazır hale getirilmiştir.

Ağırlıkça bileşik eklenme oranları %0, %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere 5 er numuneden oluşan bir seri halinde katkı maddeli köpük numuneleri hazırlanmıştır. Başka bir seride ise %5 oranında 5 farklı bileşik (BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2) eklenmiştir. 30 mm kalınlıkta, 2 pores/cm gözenek boyutuna sahip numuneler için dört ve 10 mm kalınlıkta, 16 pores/cm gözenek boyutuna sahip numuneler için de dört olmak üzere toplam sekiz seri hazırlanmıştır. Sonuç olarak 40 tane katkı maddesiyle doldurulmuş alüminyum köpük elde edilmiştir.

Tablo 4. 1. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CaO (%)	CeO_2 (%)
1	60	20	20	0
2	60	20	15	5
3	60	20	10	10
4	60	20	5	15
5	60	20	0	20

Tablo 5. 2. Serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CeO_2 (%)	TeO_2 (%)
6	60	20	20	0
7	60	20	15	5
8	60	20	10	10
9	60	20	5	15
10	60	20	0	20

Tablo 6. 3. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CeO_2 (%)	BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2 (%)
11	60	20	15	5
12	60	20	15	5
13	60	20	15	5
14	60	20	15	5
15	60	20	15	5

Tablo 7. 4. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CaO (%)	CeO_2 (%)
16	60	20	20	0
17	60	20	15	5
18	60	20	10	10
19	60	20	5	15
20	60	20	0	20

Tablo 8. 5. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CeO_2 (%)	TeO_2 (%)
21	60	20	20	0
22	60	20	15	5
23	60	20	10	10
24	60	20	5	15
25	60	20	0	20

Tablo 9. 6. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CeO_2 (%)	BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2 (%)
26	60	20	15	5
27	60	20	15	5
28	60	20	15	5
29	60	20	15	5
30	60	20	15	5

Tablo 10. 7. serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CaO (%)	Paslanmaz çelik (%)
31	60	20	20	0
32	60	20	15	5
33	60	20	10	10
34	60	20	5	15
35	60	20	0	20

Tablo 11. 8. Serideki dolgu maddesine eklenen bileşik yüzdeleri

Numune no.	Epoksi (%)	B_2O_3 (%)	CaO (%)	Paslanmaz çelik (%)
36	60	20	20	0
37	60	20	15	5
38	60	20	10	10
39	60	20	5	15
40	60	20	0	20

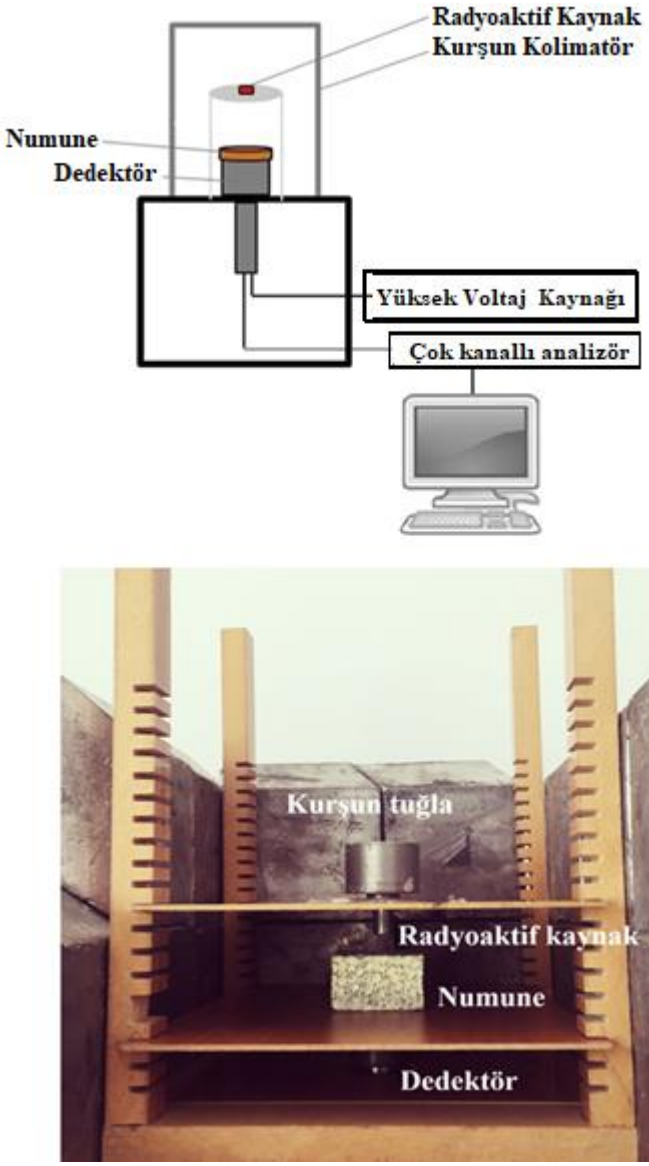


Şekil 46. Numune hazırlama basamakları

Deney Geometrisi

Gama-ışını ölçümleri için deney geometrisi

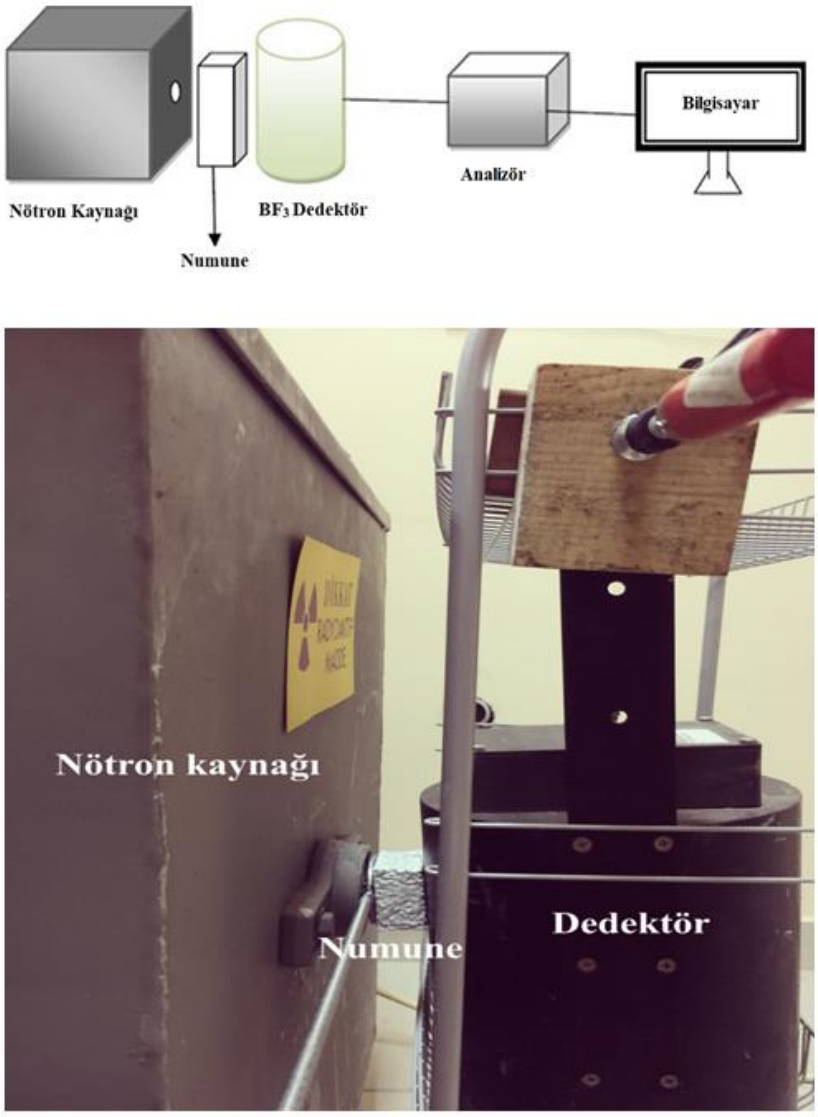
Gama ölçümleri için Ultra Ge dedektörü kullanılmıştır. Katkı maddeleriyle doldurulmuş alüminyum köpük numuneler ^{241}Am, ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarıyla 30, 59, 75, 81, 276, 303, 356, 384 ve 662 keV foton enerjileri kullanılarak uyarılmıştır. Numuneler 1 saatlik sürelerle bomdardıman edilmiştir.



Şekil 47. Gama-ışını ölçümleri için deney geometrisi.

Nötron ölçümleri için deney geometrisi

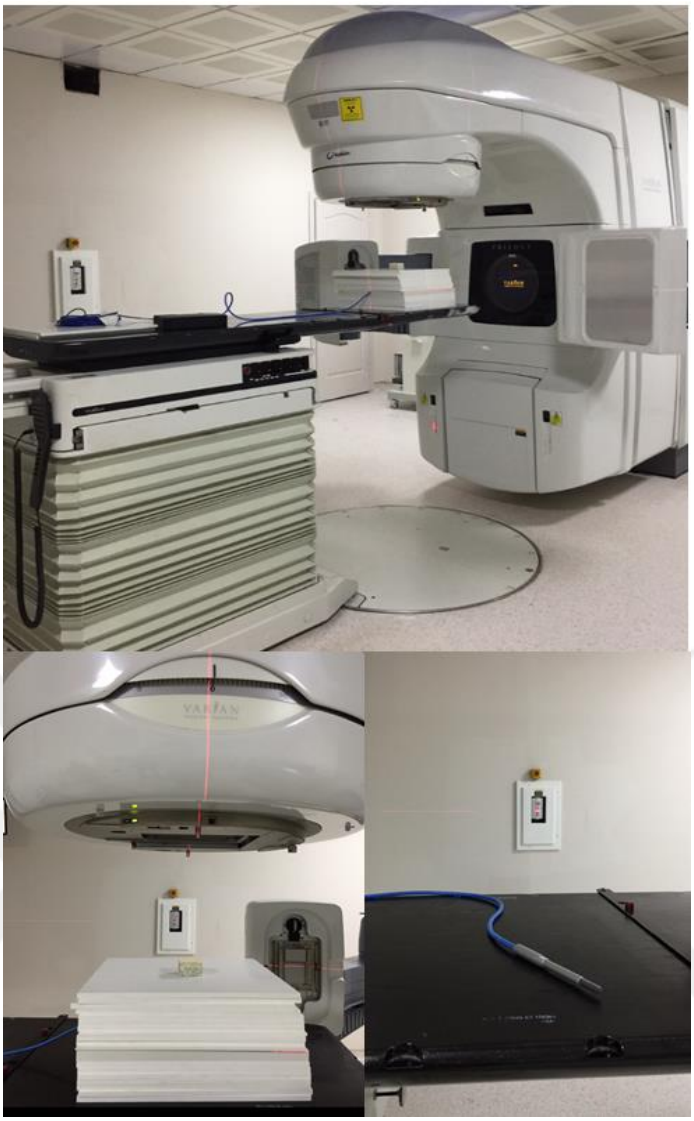
Canberra markalı NP serisi BF_3 gazlı nötron dedektörü kullanılmış ve ^{241}Am-Be nötron kaynağından yayınlanan nötron parçacıkları ile numuneler bombardıman edilmiştir. Köpük numuneleri, numune tutucu kullanılarak zırhlanmış kaynağın karşısına yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. 5 dakikalık sürelerle her bir numune için sayım yapılmıştır.



Şekil 48. Nötron ölçümleri için deney geometrisi

X-ışını ölçümleri için deney geometrisi

X-ışını ölçümleri için lineer hızlandırıcı kullanılarak 6 MV (~2 MeV) lik X-ışını foton enerjisi için ölçümler yapılmıştır. Bu enerjiye sahip X-ışınlarını dedekte etmek için iyon odası kullanılmıştır. Numunenin soğurduğu radyasyon miktarını belirlemek için kaynaktan gelen radyasyon ile numuneden soğrulmadan geçen radyasyon miktarının bilinmesi gerekir. Bu nedenle ölçümler öncelikle kaynak ile dedektör arasına numune konulmadan daha sonra numune konularak yapılmıştır.



Şekil 49. X-ışını ölçümleri için deney geometrisi

ARAŞTIRMA BULGULARI

Katkı maddeleriyle doldurulmuş köpük numuneleri ^{241}Am, ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarıyla bombardıman edilerek 30, 59, 75, 81, 276, 303, 356, 384 ve 662 keV enerjileri için gama ışını azaltma ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen verilerle $I = I_0 e^{-\mu t}$ eşitliği kullanılarak öncelikle lineer azaltma katsayısı (μ), daha sonra numune yoğunlukları (ρ) bulunarak katkı maddeleriyle doldurulmuş 40 adet alüminyum köpük numunesi ve 2 adet boş köpük numunesi için kütle azaltma katsayısı (μ_m) değerleri hesaplanmıştır. μ_m değerlerinin teorik hesaplamaları ise WinXCOM programıyla yapılmıştır. Deneysel ve teorik değerler karşılaştırılmalı olarak Tablo 12-19'da verilmiştir. Ayrıca hesaplanan μ değerleri kullanılarak numunelerin yarı değer kalınlığı $HVL = 0{,}693/\mu$ eşitliğiyle bulunmuştur. Numunelerin Z_{etk} ve N_e değerleri 2.40 ve 2.41 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. 8 seri metal köpük numunesinin μ_m, HVL, Z_{etk} ve N_e değerlerinin seçilen foton enerji aralığı olan 0,030-0,662 MeV'e karşılık değişimi Şekil 50-73'te verilmiştir. Geometrik ilerleme uydurma yaklaşımı (Geometrik Progression -Fitting) kullanılarak 0,015 MeV-15 MeV enerji aralığında 40 adet numune için Enerji Soğurma (EABF) ve Maruziyet (EBF) Buildup Faktörleri 1-40 MFP (ortalama serbest yol, mean free path) nüfuz etme derinliği için elde edilmiştir. Buildup faktör hesaplamaları yapılırken, çeşitli kolaylıklar sağlayan EXABCAL (Olarinoye *et al.* 2019) ve Py-MLBUF (Mann and Mann 2021) programlarından yararlanılmıştır. Veri karmaşasını minimize etmek için en iyi sonuçları elde ettiğimiz 10 mm kalınlıklı 16 pores/cm gözenek boyutuna sahip numuneler için EABF ve EBF değerlerinin 1-40 MFP aralığında foton enerjisine karşı değişimi Şekil 74-77 ve 79-82 aralığında verilmiştir. Ayrıca 4, 5, 6, 8. seri numuneler için EABF ve EBF değerlerinin seçilen özel enerji değerlerinde (0,015, 0,15 ve 1,5 MeV) nüfuz etme derinliğine karşı değişimi de Şekil 78 ve 83'te değerlendirilmiştir.

Tablo 12. 1. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	1. Numune		2. Numune		3. Numune		4. Numune		5. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	0,912±0,023	0,911	1,135±0,028	1,134	1,334±0,033	1,335	1,549±0,039	1,548	1,746±0,043	1,745
59	0,270±0,007	0,269	0,536±0,013	0,537	0,816±0,020	0,815	1,090±0,027	1,090	1,341±0,033	1,340
75	0,211±0,005	0,212	0,351±0,009	0,351	0,505±0,012	0,504	0,653±0,016	0,652	0,785±0,019	0,786
81	0,199±0,004	0,199	0,304±0,007	0,304	0,435±0,010	0,436	0,556±0,013	0,555	0,665±0,016	0,664
276	0,112±0,003	0,112	0,124±0,003	0,124	0,120±0,003	0,119	0,123±0,003	0,124	0,127±0,003	0,126
303	0,108±0,003	0,109	0,121±0,003	0,120	0,114±0,003	0,114	0,117±0,003	0,116	0,118±0,003	0,119
356	0,102±0,002	0,101	0,094±0,002	0,095	0,105±0,002	0,106	0,106±0,002	0,107	0,108±0,002	0,108
384	0,099±0,002	0,098	0,109±0,002	0,110	0,101±0,002	0,102	0,103±0,002	0,102	0,104±0,002	0,103
662	0,078±0,001	0,078	0,071±0,001	0,072	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,078	0,079±0,001	0,078

Tablo 13. 2. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	6. Numune		7. Numune		8. Numune		9. Numune		10. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	1,775±0,044	1,774	1,675±0,042	1,674	1,576±0,039	1,577	1,474±0,036	1,473	1,378±0,034	1,379
59	1,383±0,034	1,384	1,302±0,032	1,301	1,226±0,030	1,225	1,134±0,028	1,133	1,061±0,026	1,060
75	0,809±0,020	0,810	0,763±0,019	0,764	0,723±0,018	0,722	0,670±0,016	0,671	0,631±0,015	0,630
81	0,684±0,017	0,683	0,647±0,016	0,646	0,611±0,015	0,612	0,571±0,014	0,570	0,537±0,013	0,537
276	0,128±0,003	0,127	0,125±0,003	0,126	0,125±0,003	0,124	0,123±0,003	0,122	0,122±0,003	0,121
303	0,119±0,003	0,120	0,119±0,003	0,118	0,118±0,003	0,117	0,116±0,003	0,116	0,116±0,003	0,115
356	0,108±0,002	0,109	0,107±0,002	0,108	0,107±0,002	0,107	0,107±0,002	0,106	0,105±0,002	0,105
384	0,105±0,002	0,104	0,103±0,002	0,104	0,103±0,002	0,102	0,103±0,002	0,102	0,102±0,002	0,101
662	0,079±0,001	0,078	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,078	0,077±0,001	0,078	0,078±0,001	0,078

Tablo 14. 3. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	11. Numune		12. Numune		13. Numune		14. Numune		15. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	1,760±0,044	1,760	1,603±0,040	1,603	2,087±0,052	2,086	2,435±0,060	2,435	1,560±0,039	1,559
59	1,374±0,034	1,374	1,104±0,027	1,104	1,199±0,029	1,199	1,260±0,031	1,259	1,103±0,027	1,103
75	0,804±0,020	0,803	0,659±0,016	0,659	0,925±0,023	0,924	0,744±0,018	0,744	0,659±0,016	0,658
81	0,678±0,016	0,678	0,561±0,014	0,561	0,778±0,019	0,778	0,630±0,015	0,631	0,561±0,014	0,561
276	0,127±0,003	0,127	0,123±0,003	0,123	0,132±0,003	0,131	0,136±0,003	0,136	0,123±0,003	0,123
303	0,119±0,003	0,119	0,116±0,003	0,116	0,122±0,003	0,123	0,127±0,003	0,127	0,117±0,003	0,116
356	0,108±0,002	0,108	0,106±0,002	0,106	0,111±0,002	0,110	0,113±0,002	0,113	0,106±0,002	0,106
384	0,104±0,002	0,103	0,102±0,002	0,102	0,106±0,002	0,106	0,108±0,002	0,108	0,102±0,002	0,102
662	0,078±0,001	0,078	0,078±0,001	0,078	0,079±0,002	0,079	0,079±0,002	0,079	0,078±0,001	0,078

Tablo 15. 4. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	16. Numune		17. Numune		18. Numune		19. Numune		20. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	0,890±0,022	0,891	1,134±0,028	1,133	1,375±0,034	1,376	1,619±0,040	1,618	1,860±0,046	1,859
59	0,268±0,006	0,269	0,580±0,014	0,579	0,893±0,022	0,892	1,205±0,030	1,204	1,515±0,037	1,514
75	0,212±0,005	0,211	0,379±0,009	0,378	0,547±0,013	0,546	0,714±0,017	0,713	0,881±0,022	0,880
81	0,198±0,004	0,199	0,335±0,008	0,334	0,470±0,011	0,471	0,607±0,015	0,606	0,740±0,018	0,741
276	0,113±0,003	0,114	0,117±0,003	0,117	0,121±0,003	0,122	0,125±0,003	0,126	0,130±0,003	0,129
303	0,109±0,003	0,110	0,113±0,003	0,112	0,116±0,003	0,115	0,119±0,003	0,118	0,121±0,003	0,122
356	0,102±0,002	0,103	0,105±0,002	0,104	0,107±0,002	0,106	0,109±0,002	0,108	0,111±0,002	0,110
384	0,098±0,002	0,099	0,101±0,002	0,101	0,103±0,002	0,102	0,104±0,002	0,104	0,105±0,002	0,106
662	0,079±0,001	0,078	0,079±0,001	0,079	0,078±0,001	0,079	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,079

Tablo 16. 5. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	21. Numune		22. Numune		23. Numune		24. Numune		25. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	1,858±0,046	1,857	1,740±0,043	1,741	1,642±0,041	1,641	1,526±0,038	1,527	1,419±0,035	1,418
59	1,512±0,037	1,510	1,412±0,035	1,411	1,339±0,033	1,338	1,243±0,031	1,242	1,156±0,028	1,155
75	0,877±0,021	0,878	0,824±0,020	0,823	0,783±0,019	0,782	0,729±0,018	0,730	0,682±0,017	0,681
81	0,740±0,018	0,739	0,693±0,017	0,694	0,662±0,016	0,661	0,618±0,015	0,617	0,577±0,014	0,578
276	0,130±0,003	0,129	0,128±0,003	0,127	0,126±0,003	0,127	0,125±0,003	0,124	0,124±0,003	0,123
303	0,122±0,003	0,121	0,121±0,003	0,120	0,119±0,003	0,120	0,118±0,003	0,117	0,117±0,003	0,116
356	0,109±0,002	0,110	0,110±0,002	0,109	0,109±0,002	0,108	0,108±0,002	0,107	0,106±0,002	0,107
384	0,105±0,002	0,105	0,104±0,002	0,105	0,104±0,002	0,103	0,104±0,002	0,103	0,103±0,002	0,102
662	0,079±0,001	0,079	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,078	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,078

Tablo 17. 6. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	26. Numune		27. Numune		28. Numune		29. Numune		30. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	1,672±0,042	1,673	1,675±0,042	1,674	2,193±0,054	2,194	2,591±0,065	2,591	1,616±0,040	1,616
59	1,331±0,033	1,331	1,209±0,030	1,209	1,295±0,032	1,294	1,369±0,034	1,368	1,195±0,029	1,194
75	0,781±0,019	0,781	0,716±0,017	0,716	0,998±0,025	0,998	0,803±0,021	0,803	0,708±0,017	0,708
81	0,660±0,016	0,661	0,607±0,015	0,607	0,838±0,021	0,838	0,679±0,017	0,679	0,601±0,015	0,601
276	0,127±0,003	0,127	0,125±0,003	0,125	0,133±0,003	0,134	0,139±0,003	0,139	0,125±0,003	0,125
303	0,119±0,003	0,119	0,118±0,003	0,118	0,125±0,003	0,125	0,129±0,003	0,129	0,118±0,003	0,118
356	0,109±0,002	0,108	0,108±0,002	0,108	0,112±0,002	0,112	0,115±0,002	0,115	0,108±0,002	0,107
384	0,104±0,002	0,104	0,103±0,002	0,103	0,107±0,002	0,107	0,109±0,002	0,109	0,103±0,002	0,103
662	0,079±0,001	0,079	0,079±0,001	0,079	0,079±0,001	0,079	0,080±0,001	0,080	0,078±0,001	0,078

Tablo 18. 7. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	31. Numune		32. Numune		33. Numune		34. Numune		35. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	0,909±0,022	0,910	1,099±0,027	1,098	1,289±0,032	1,288	1,477±0,036	1,476	1,670±0,041	1,669
59	0,270±0,006	0,269	0,298±0,007	0,297	0,327±0,008	0,326	0,355±0,008	0,354	0,383±0,009	0,382
75	0,213±0,005	0,212	0,226±0,005	0,227	0,240±0,006	0,241	0,254±0,006	0,255	0,269±0,006	0,268
81	0,200±0,005	0,199	0,211±0,005	0,210	0,222±0,005	0,221	0,233±0,005	0,232	0,244±0,006	0,245
276	0,112±0,003	0,113	0,113±0,003	0,112	0,113±0,003	0,112	0,112±0,003	0,113	0,112±0,003	0,113
303	0,109±0,003	0,108	0,109±0,003	0,108	0,109±0,003	0,108	0,109±0,003	0,108	0,109±0,003	0,108
356	0,102±0,002	0,102	0,101±0,002	0,102	0,101±0,002	0,102	0,102±0,002	0,101	0,102±0,002	0,101
384	0,099±0,002	0,098	0,099±0,002	0,098	0,099±0,002	0,098	0,098±0,002	0,099	0,098±0,002	0,099
662	0,079±0,001	0,078	0,078±0,001	0,078	0,077±0,001	0,078	0,078±0,001	0,077	0,078±0,001	0,077

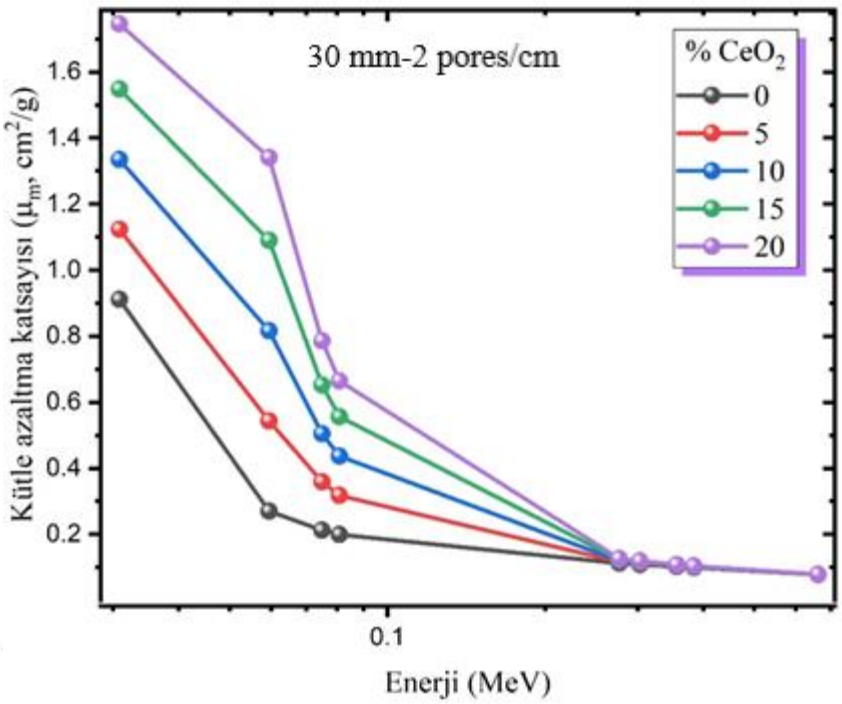
Tablo 19. 8. serideki numunelerin deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı değerleri

Enerji (keV)	36. Numune		37. Numune		38. Numune		39. Numune		40. Numune	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
30	0,894±0,022	0,893	1,105±0,027	1,104	1,314±0,032	1,313	1,522±0,038	1,523	1,739±0,043	1,740
59	0,269±0,006	0,268	0,299±0,007	0,300	0,331±0,008	0,330	0,363±0,009	0,362	0,393±0,009	0,394
75	0,211±0,005	0,212	0,227±0,005	0,228	0,242±0,006	0,243	0,258±0,006	0,259	0,276±0,007	0,275
81	0,200±0,005	0,199	0,212±0,005	0,211	0,225±0,005	0,224	0,237±0,005	0,236	0,250±0,006	0,249
276	0,113±0,003	0,113	0,114±0,003	0,113	0,114±0,003	0,113	0,114±0,003	0,113	0,113±0,003	0,114
303	0,109±0,003	0,110	0,109±0,003	0,109	0,109±0,003	0,109	0,110±0,003	0,109	0,109±0,003	0,109
356	0,103±0,002	0,102	0,102±0,002	0,103	0,103±0,002	0,102	0,102±0,002	0,102	0,103±0,002	0,102
384	0,100±0,002	0,099	0,100±0,002	0,099	0,099±0,002	0,099	0,099±0,002	0,099	0,098±0,002	0,099
662	0,079±0,001	0,078	0,078±0,001	0,079	0,079±0,001	0,078	0,079±0,001	0,078	0,078±0,001	0,078

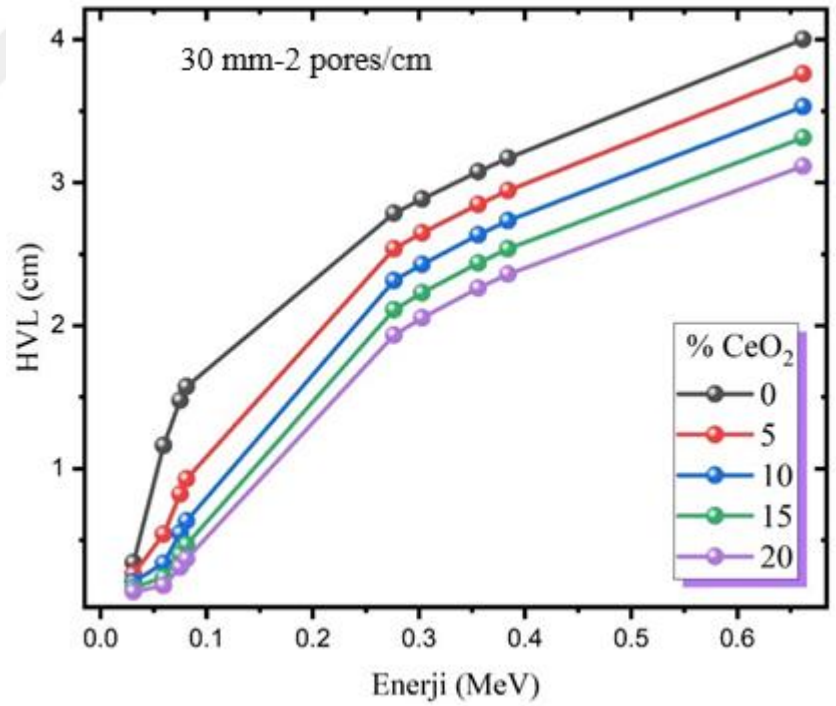
Bu çalışmada, ayrıca üretilen 8 seri metal köpük numunesinin lineer ve kütle azaltma katsayıları 6 MV ve 18 MV'lik bremsstrahlung radyasyonu için deneysel olarak incelenmiştir. Üretilen köpük numuneler 18 MV'lik X- ışınları için dikkate değer bir zırhlama etkisi göstermediği için yalnızca 6 MV'lik X- ışınları için elde edilen sonuçlar Tablo 20'de sunulmuştur.

Tablo 20. Numunelerin X-ışınları için lineer (μ) ve kütle azaltma katsayısı (μ_m) değerleri

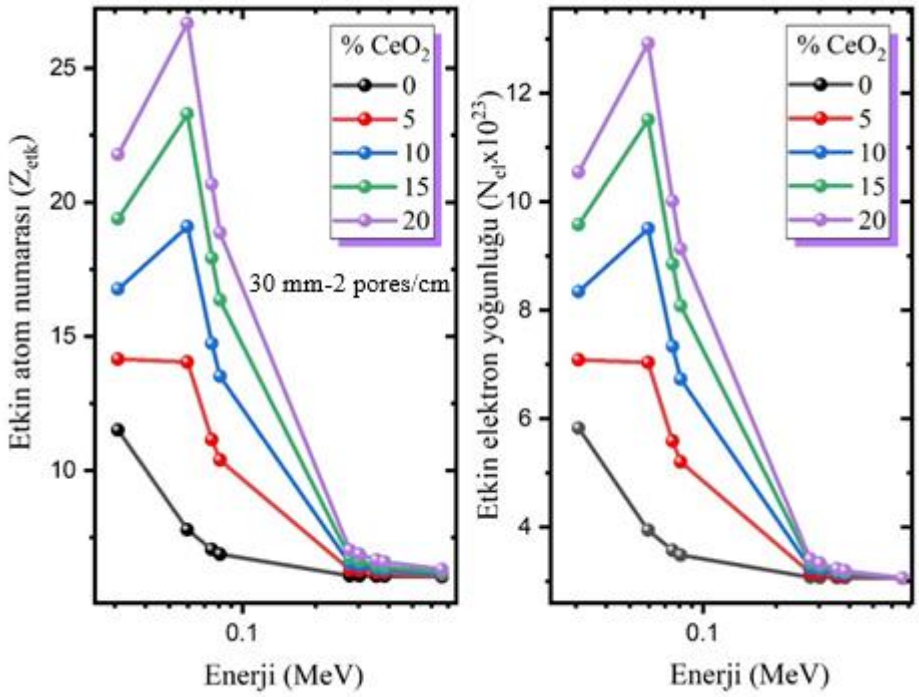
Numune no.	**Lineer azaltma katsayısı (μ)**	**Kütle azaltma katsayısı (μ_m)**	**Numune no.**	**Lineer azaltma katsayısı (μ)**	**Kütle azaltma katsayısı (μ_m)**
1	0,033	0,015	21	0,033	0,012
2	0,035	0,015	22	0,140	0,050
3	0,036	0,014	23	0,044	0,016
4	0,037	0,014	24	0,056	0,020
5	0,038	0,013	25	0,067	0,024
6	0,022	0,008	26	0,044	0,016
7	0,030	0,010	27	0,056	0,020
8	0,034	0,012	28	0,044	0,014
9	0,034	0,012	29	0,033	0,011
10	0,035	0,013	30	0,067	0,025
11	0,034	0,012	31	0,026	0,012
12	0,030	0,011	32	0,030	0,012
13	0,034	0,010	33	0,030	0,011
14	0,030	0,010	34	0,034	0,012
15	0,038	0,014	35	0,038	0,012
16	0,033	0,016	36	0,044	0,021
17	0,044	0,019	37	0,056	0,023
18	0,055	0,023	38	0,056	0,021
19	0,067	0,025	39	0,067	0,023
20	0,079	0,028	40	0,079	0,025



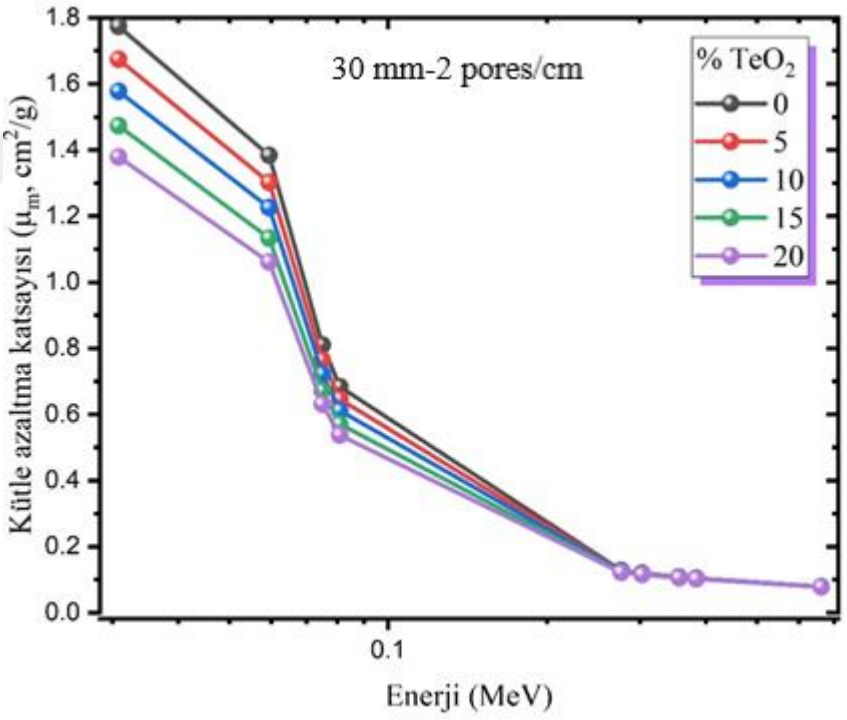
Şekil 50. 1. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



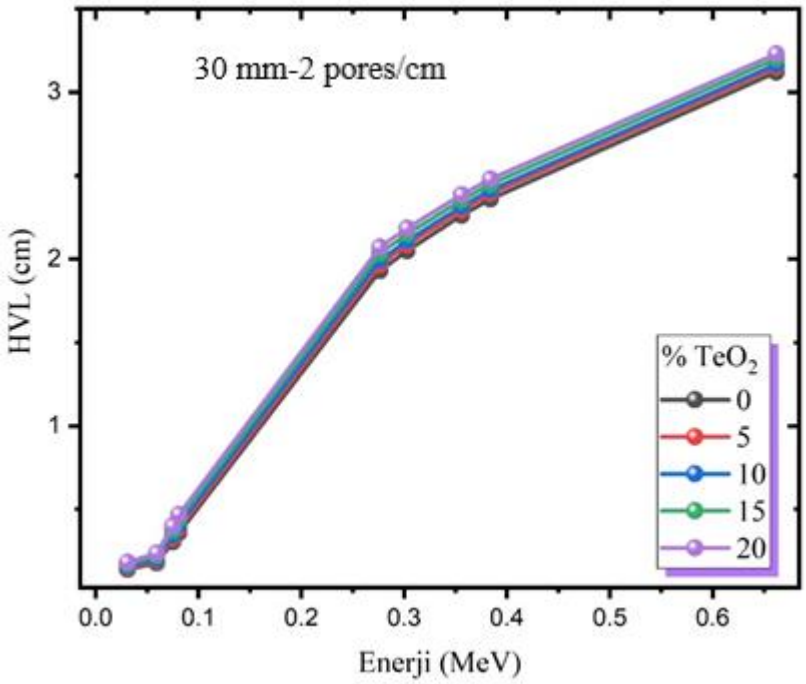
Şekil 51. 1. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



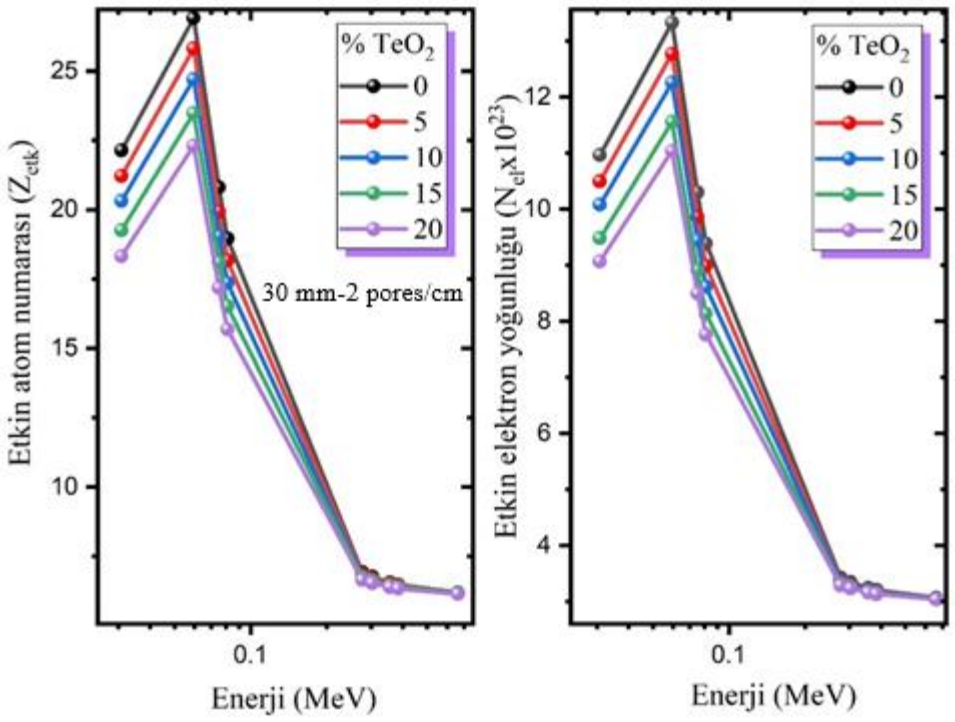
Şekil 52. 1. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



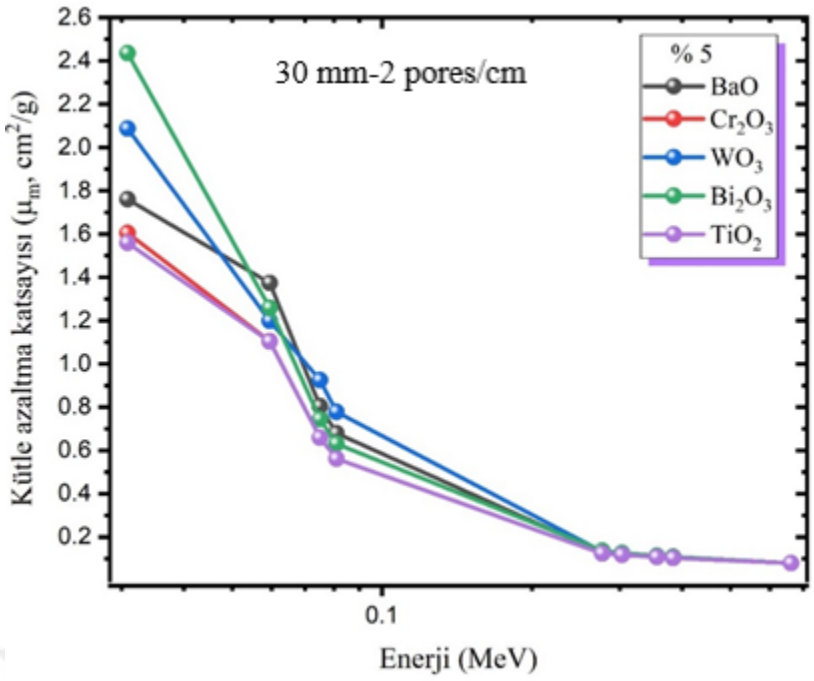
Şekil 53. 2. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



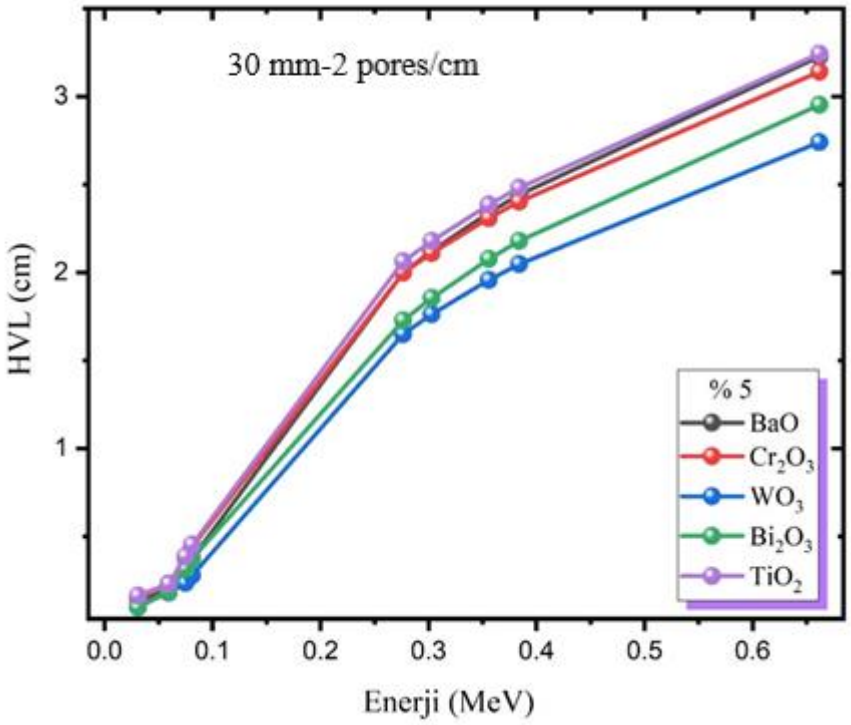
Şekil 54. 2. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



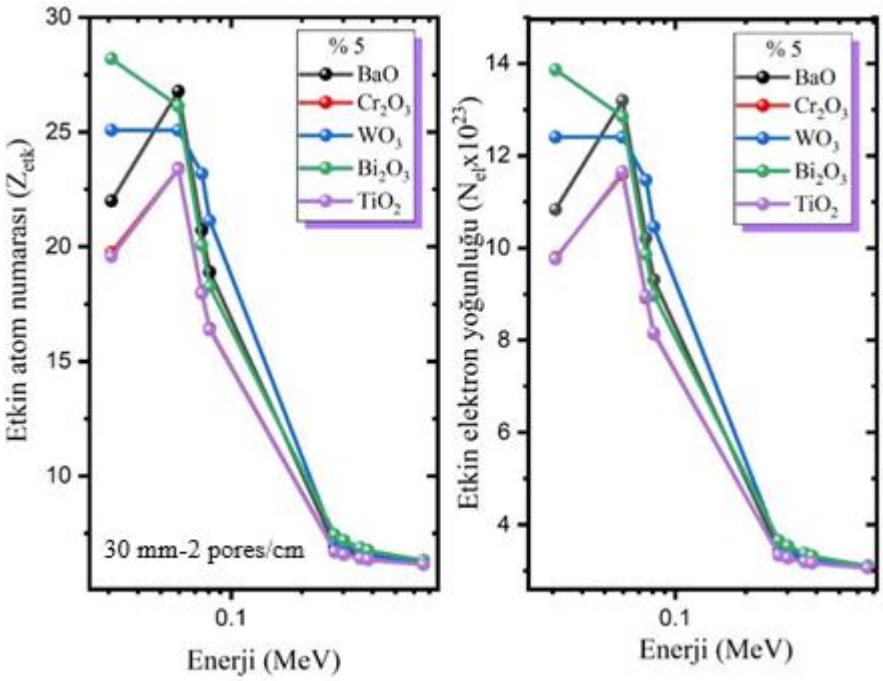
Şekil 55. 2. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



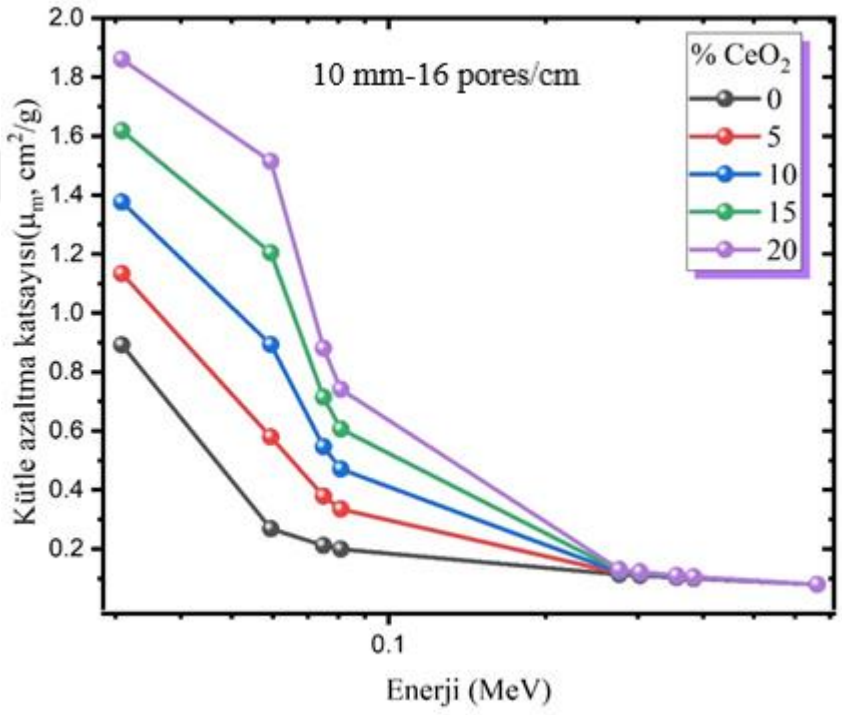
Şekil 56. 3. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



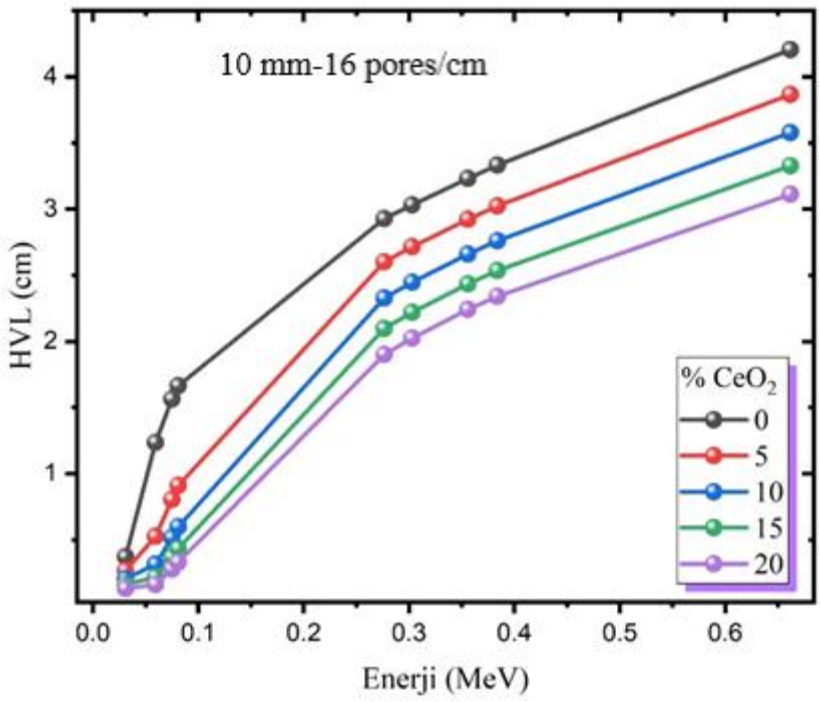
Şekil 57. 3. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



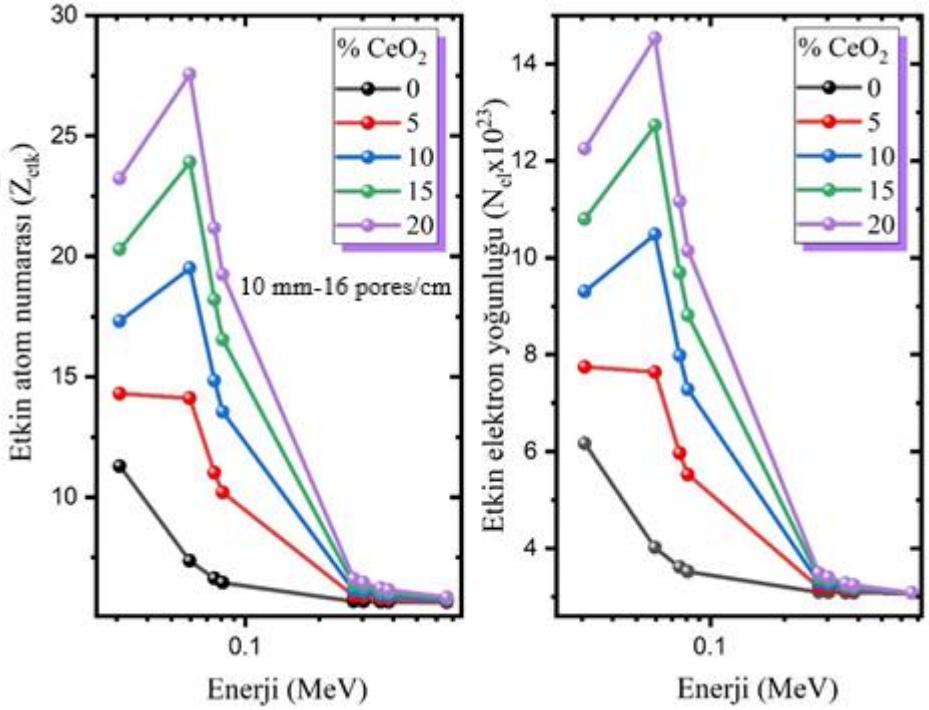
Şekil 58. 3. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



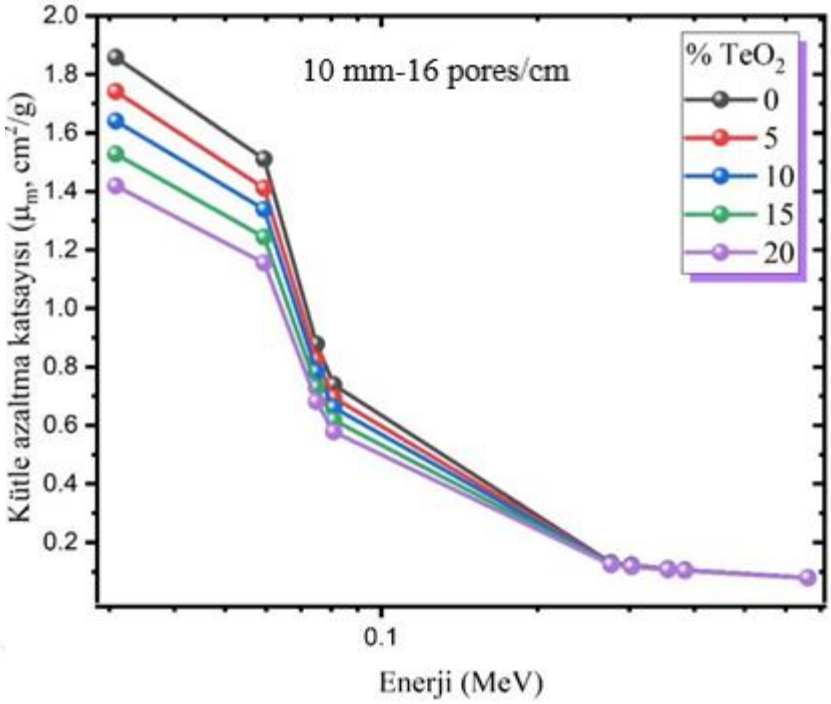
Şekil 59. 4. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



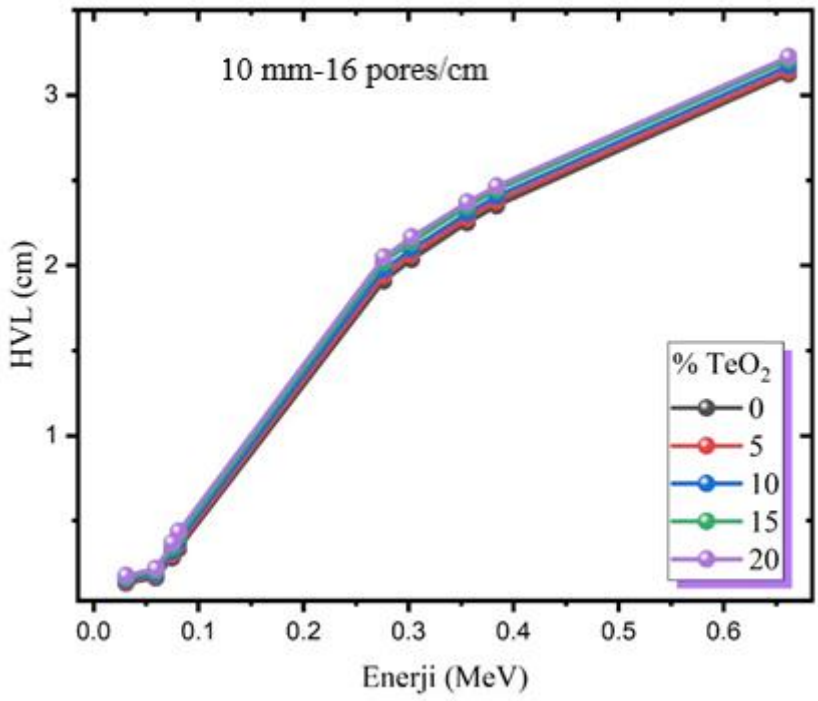
Şekil 60. 4. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



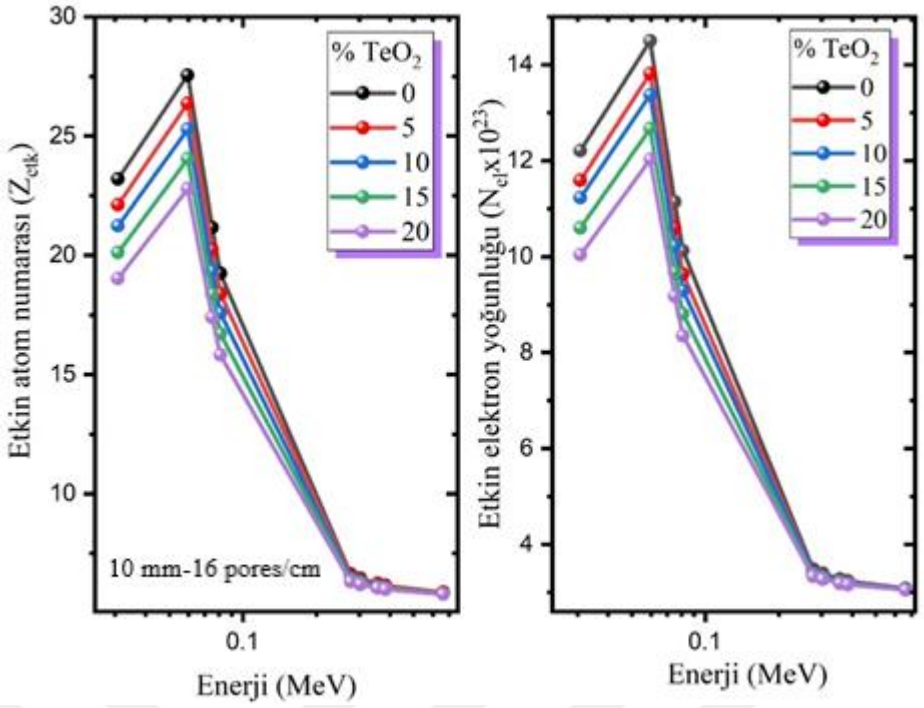
Şekil 61. 4. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



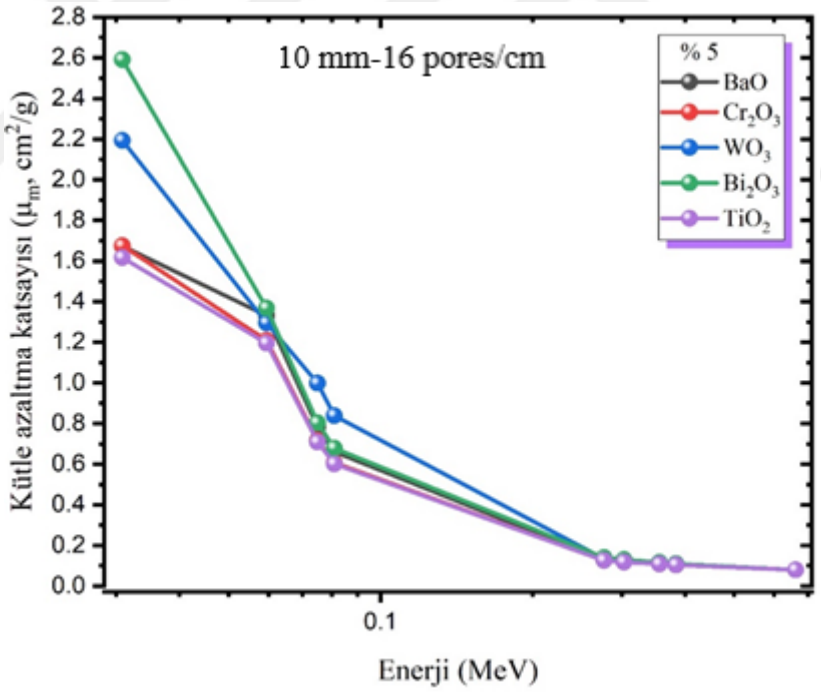
Şekil 62. 5. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



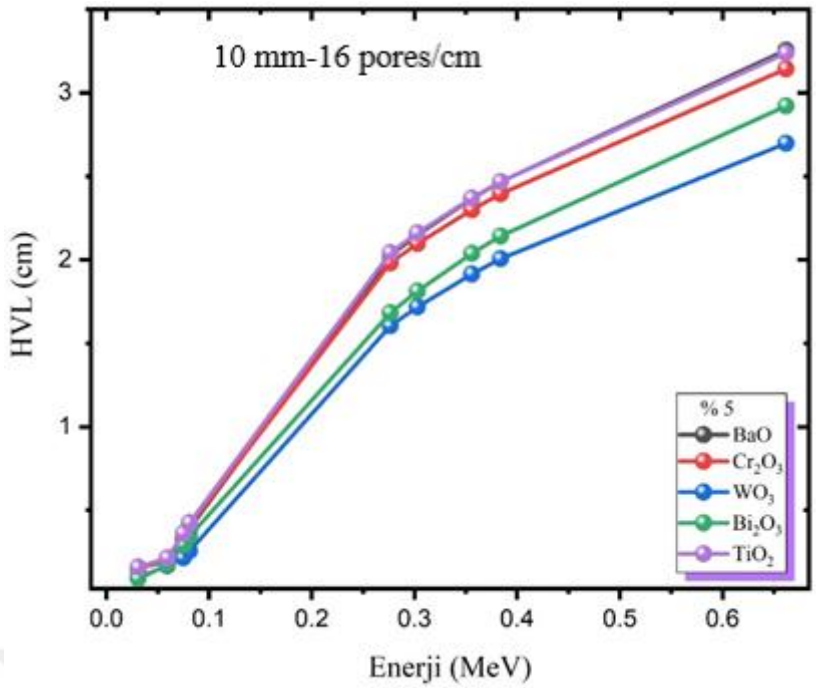
Şekil 63. 5. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



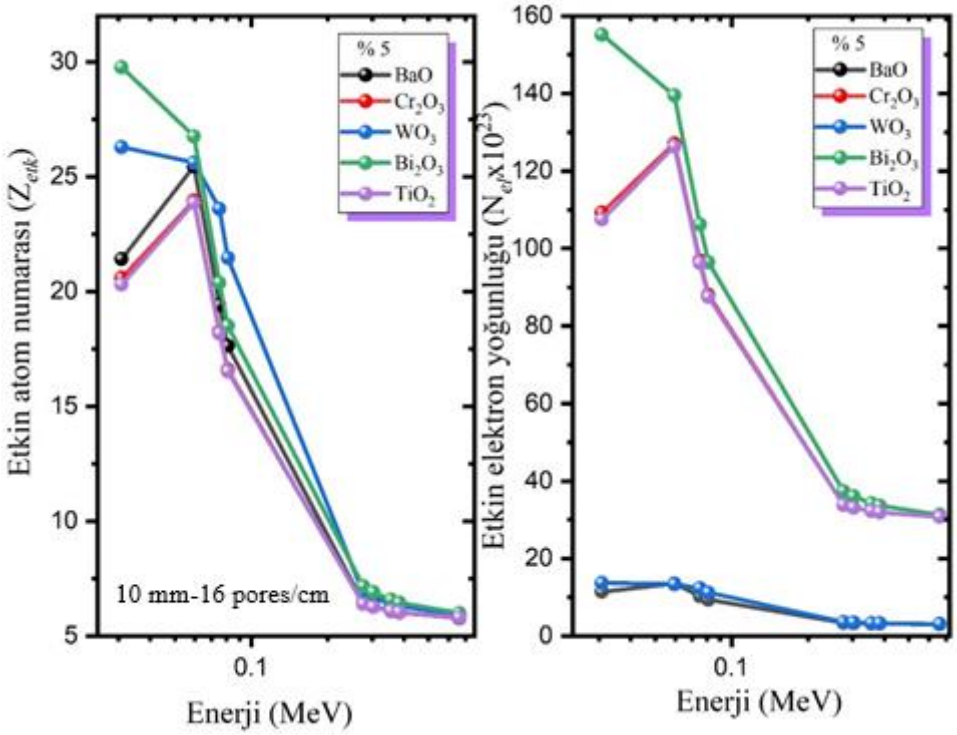
Şekil 64. 5. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



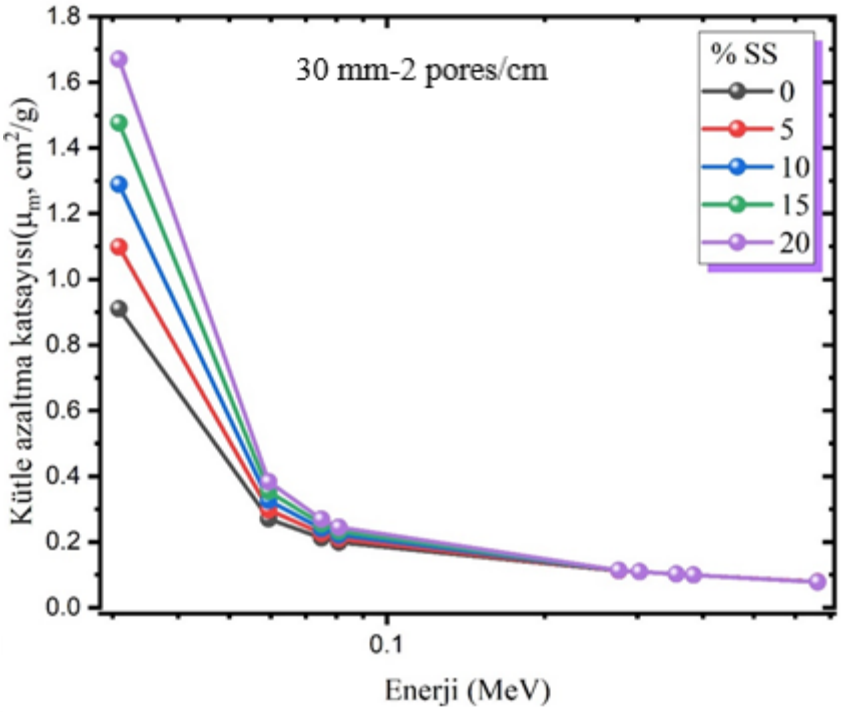
Şekil 65. 6. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



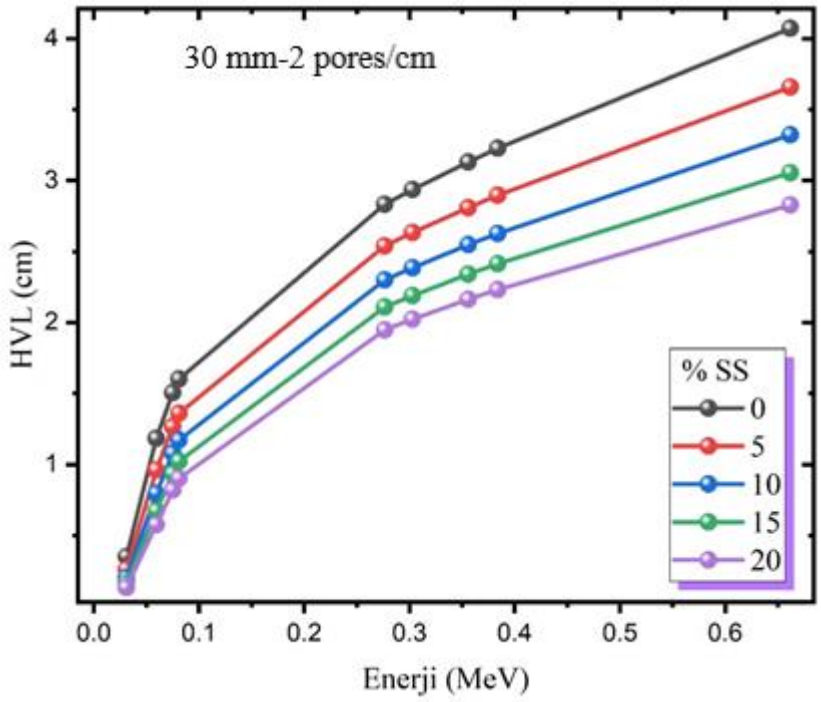
Şekil 66. 6. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



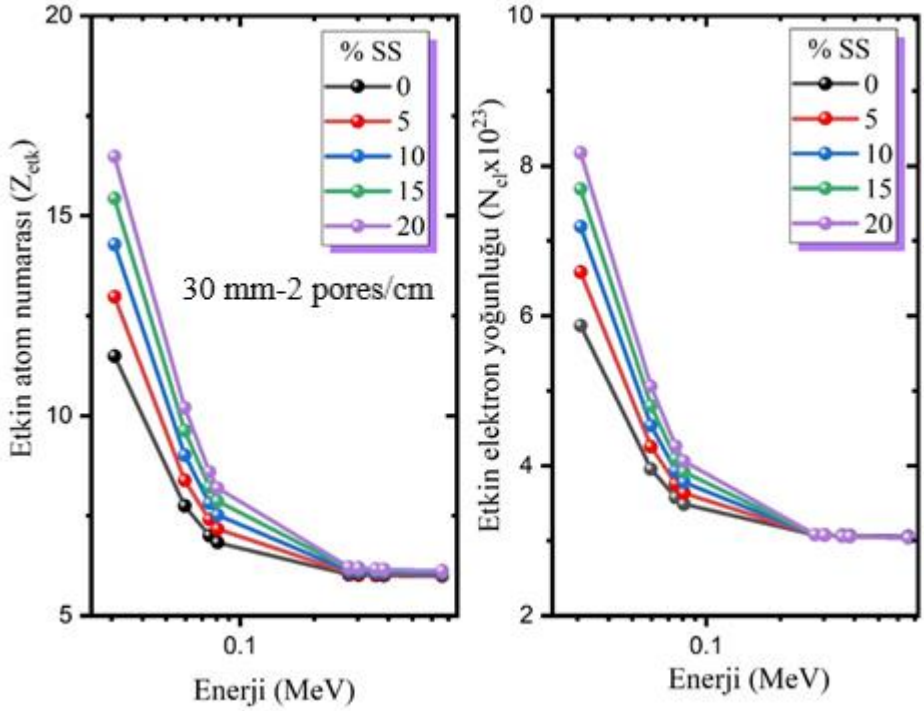
Şekil 67. 6. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



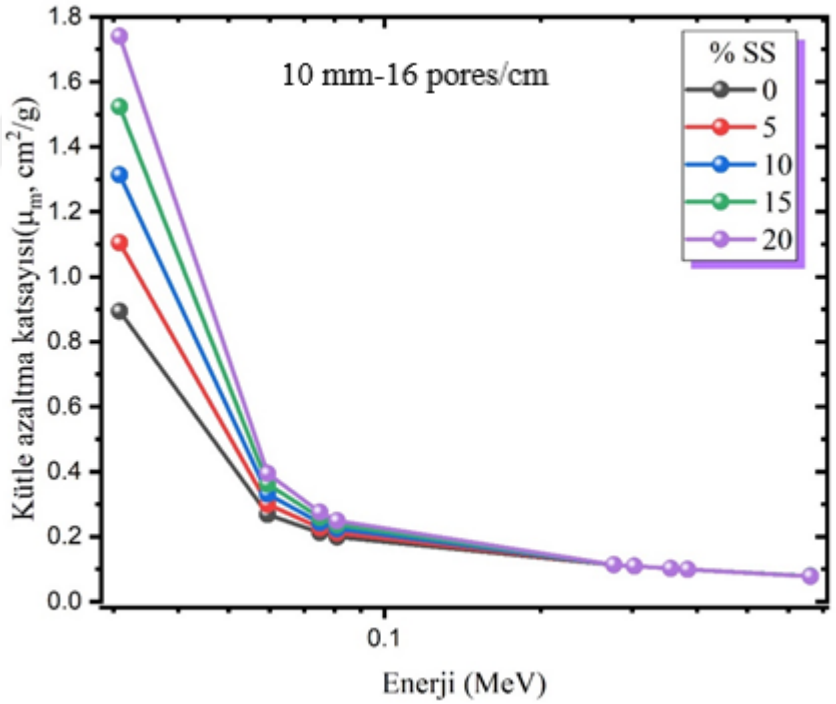
Şekil 68. 7. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



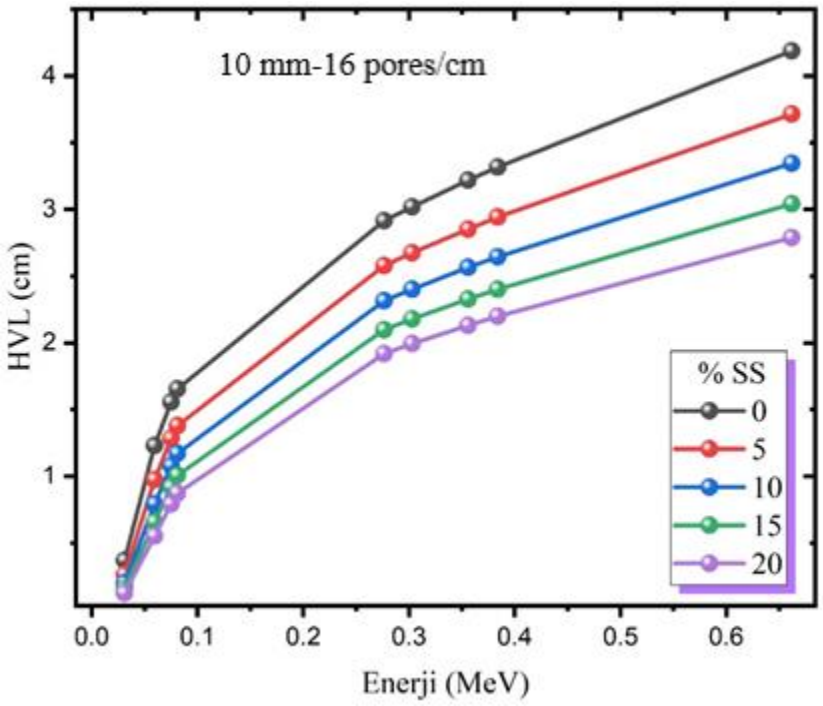
Şekil 69. 7. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



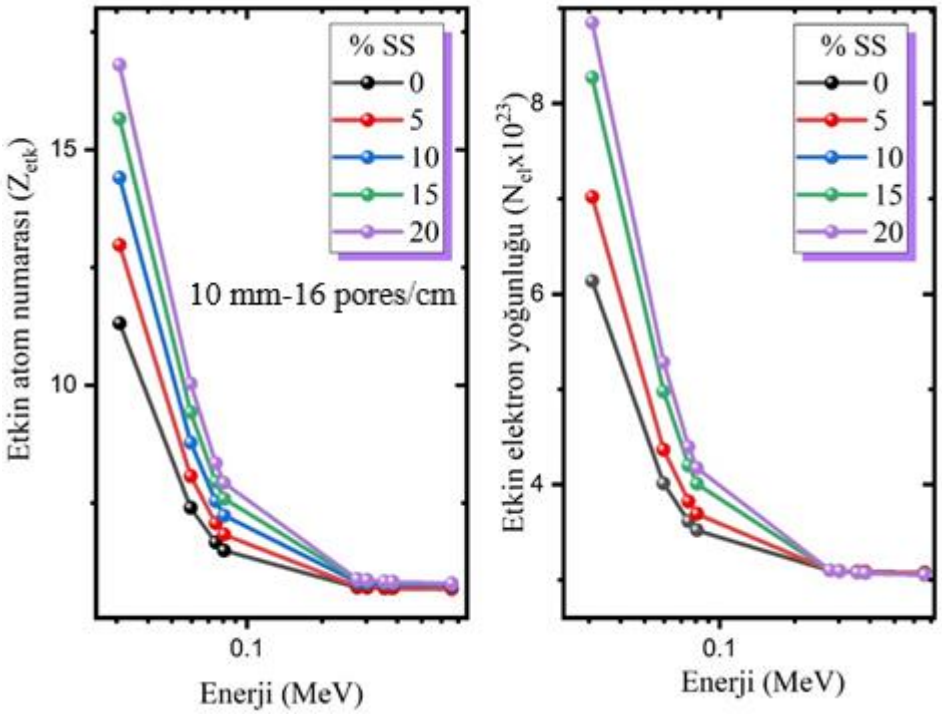
Şekil 70. 7. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



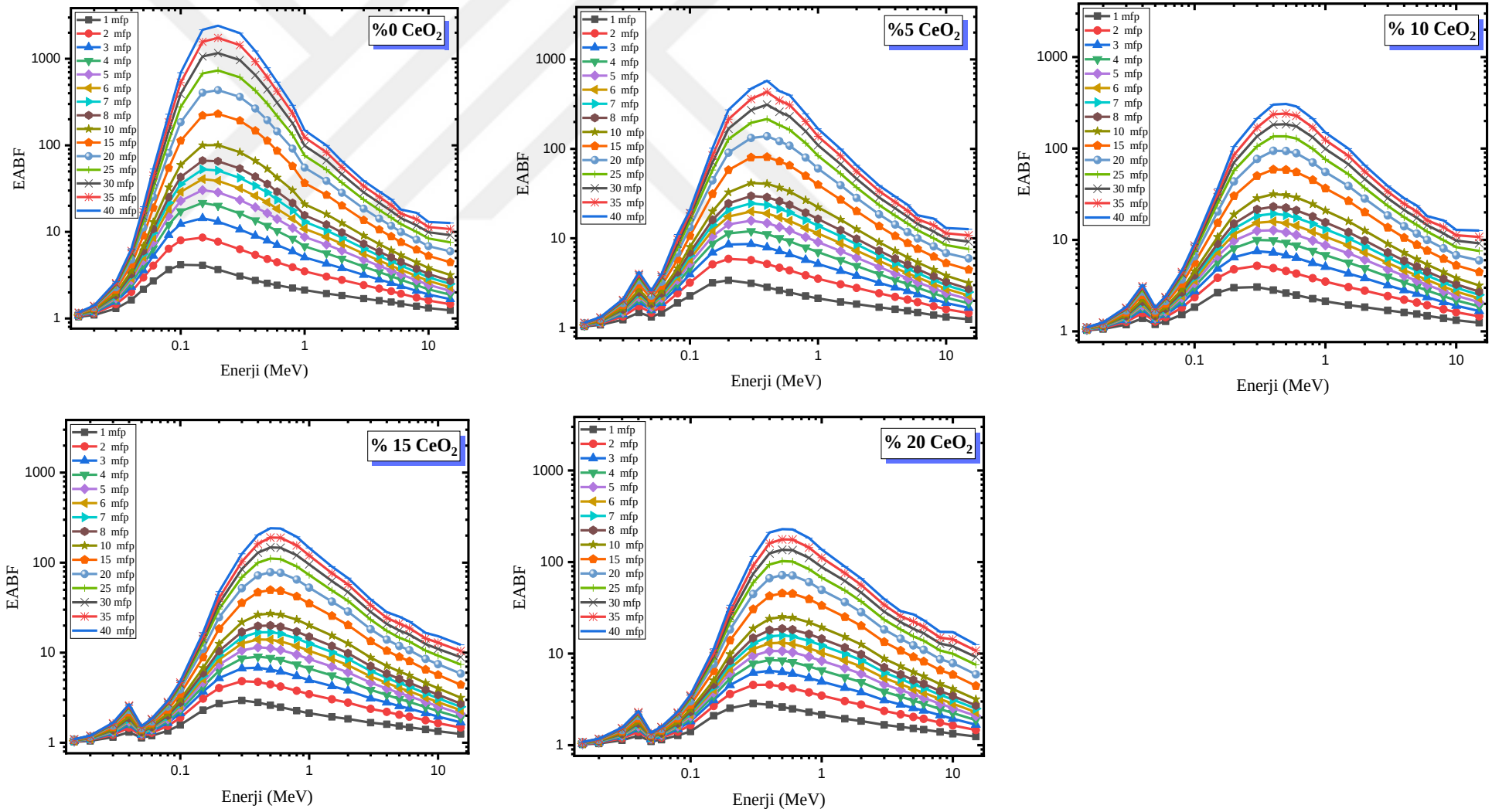
Şekil 71. 8. serideki numunelerin kütle azaltma katsayı değerlerinin enerji ile değişimi



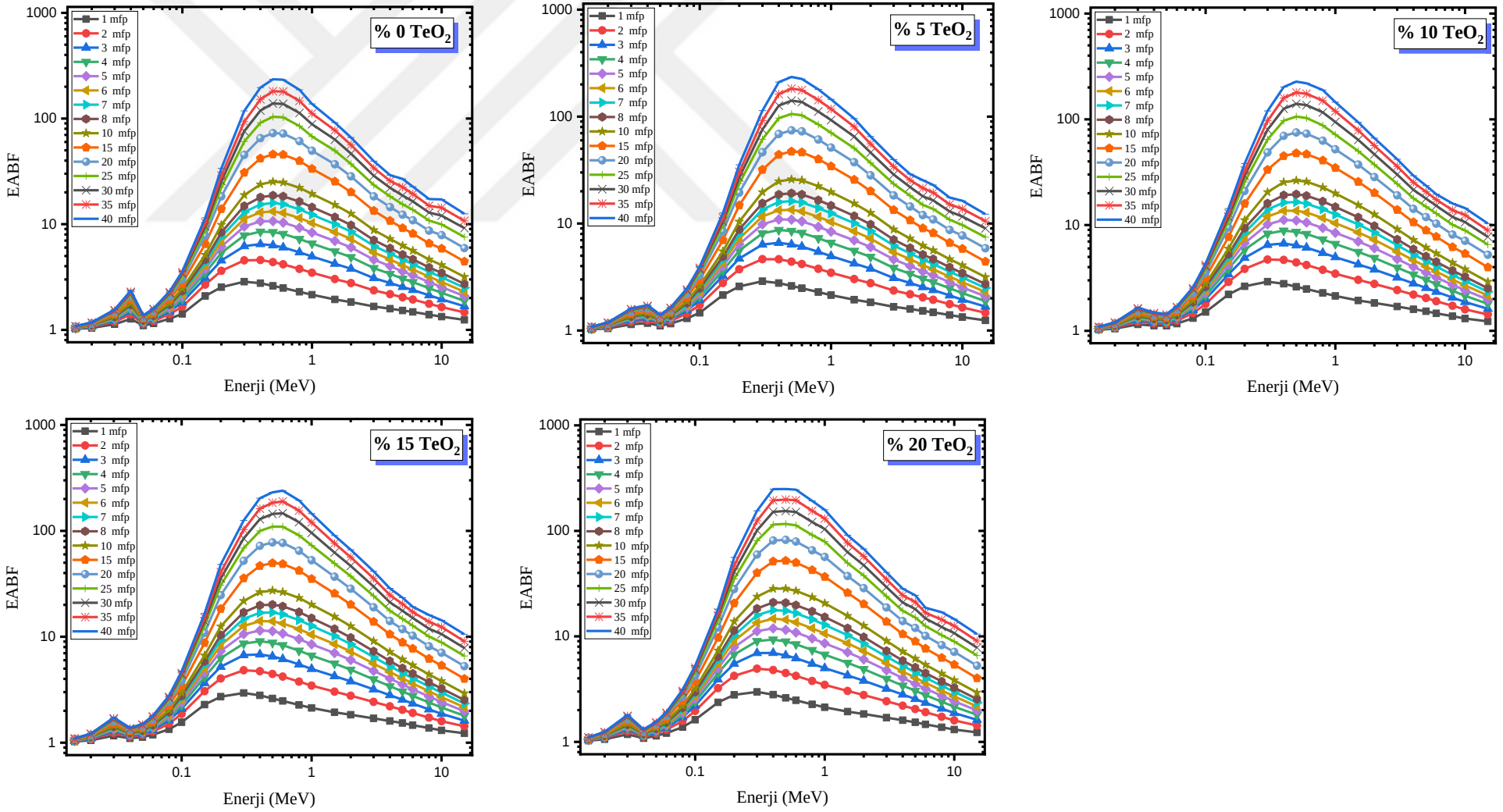
Şekil 72. 8. serideki numunelerin HVL değerlerinin enerji ile değişimi



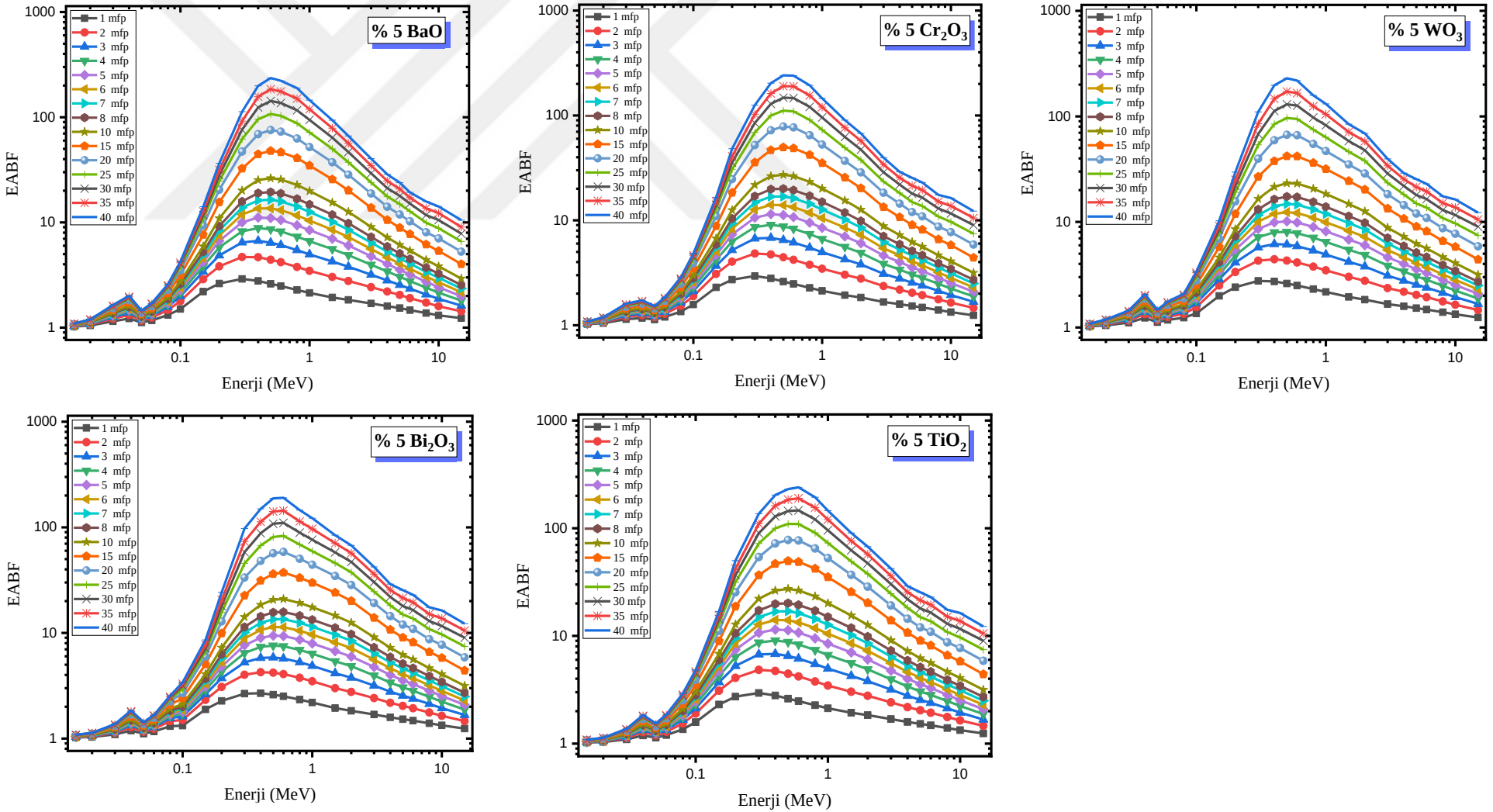
Şekil 73. 8. serideki numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin enerji ile değişimi



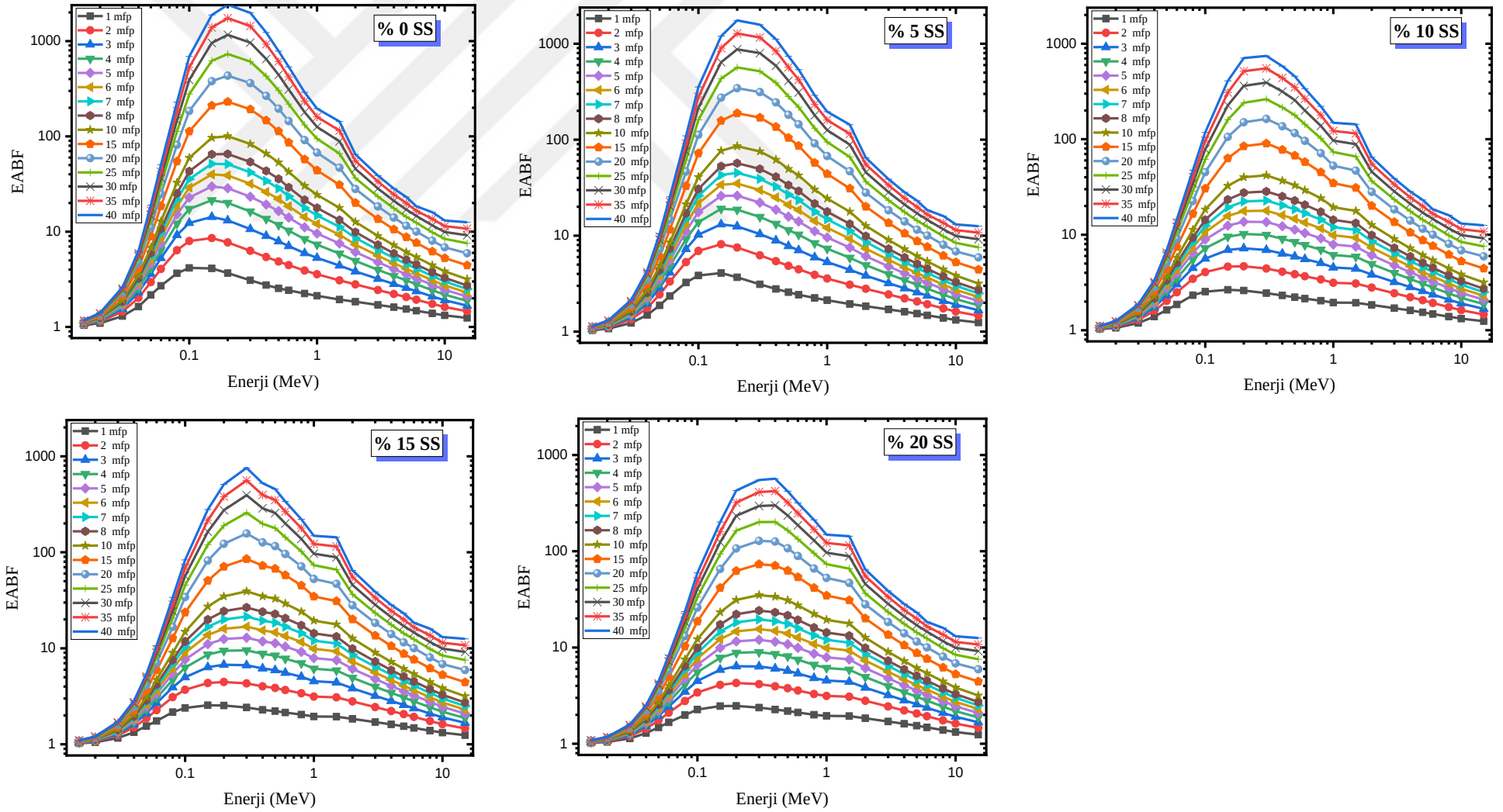
Şekil 74. 4. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



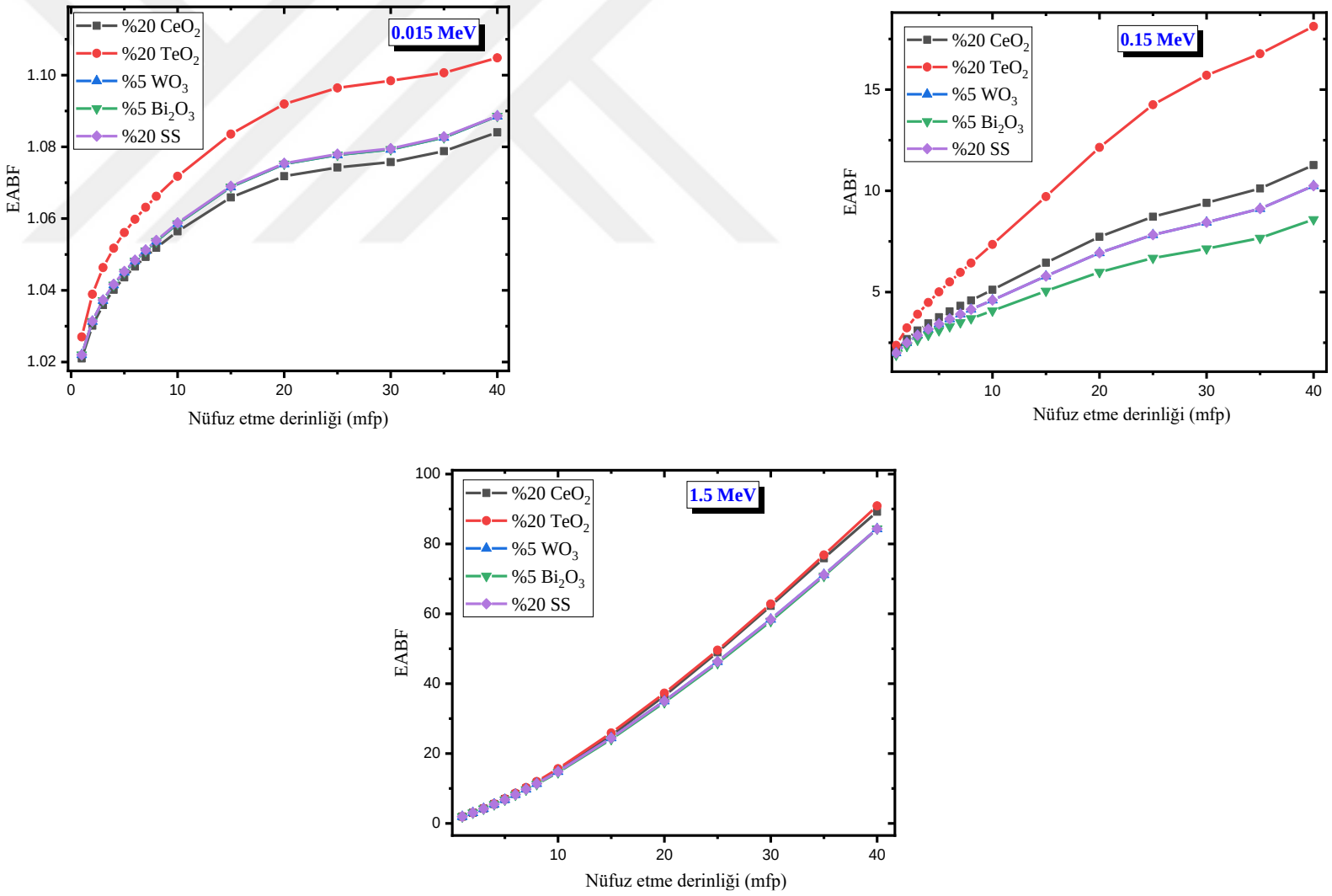
Şekil 75. 5. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



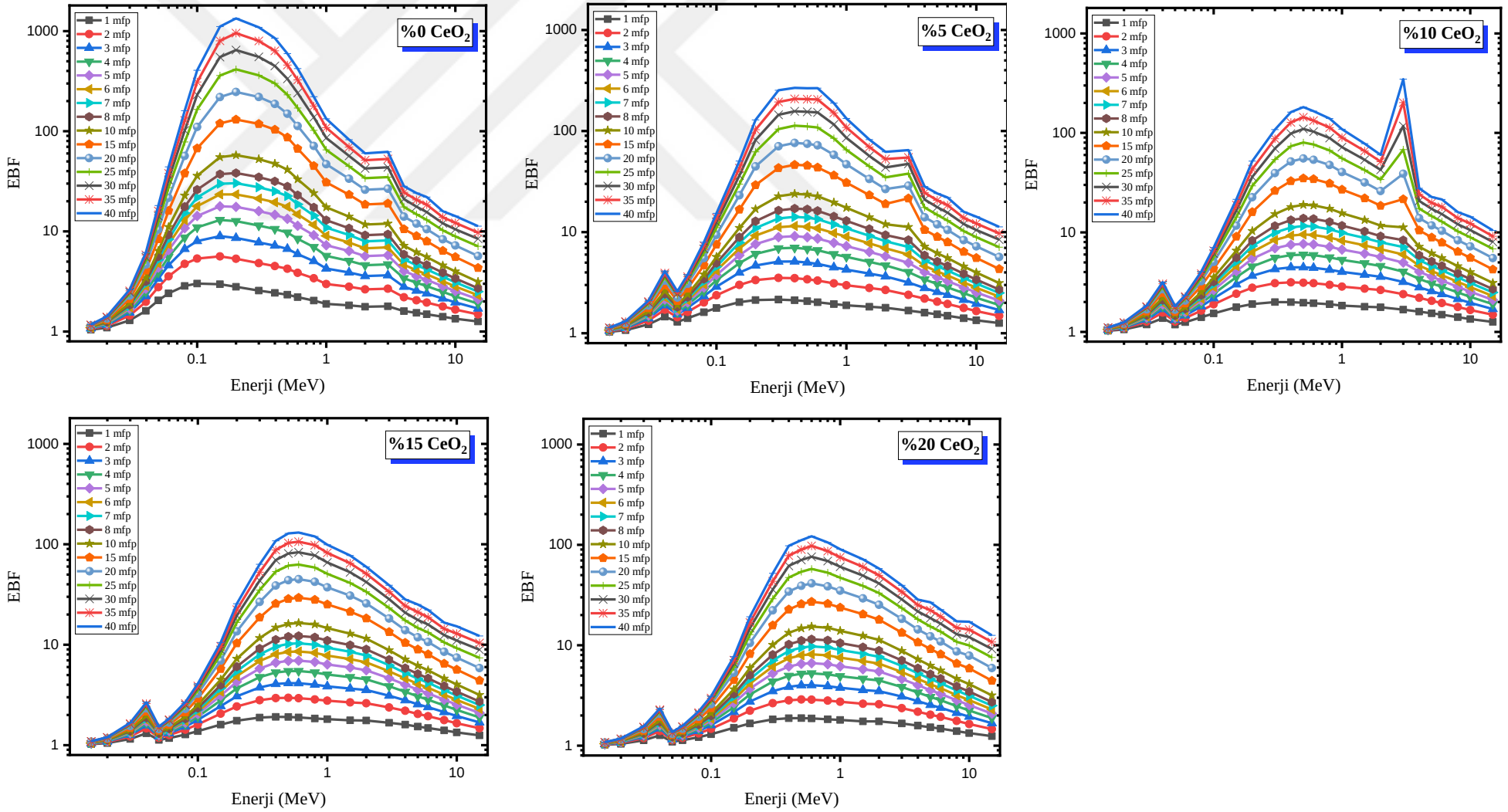
Şekil 76. 6. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



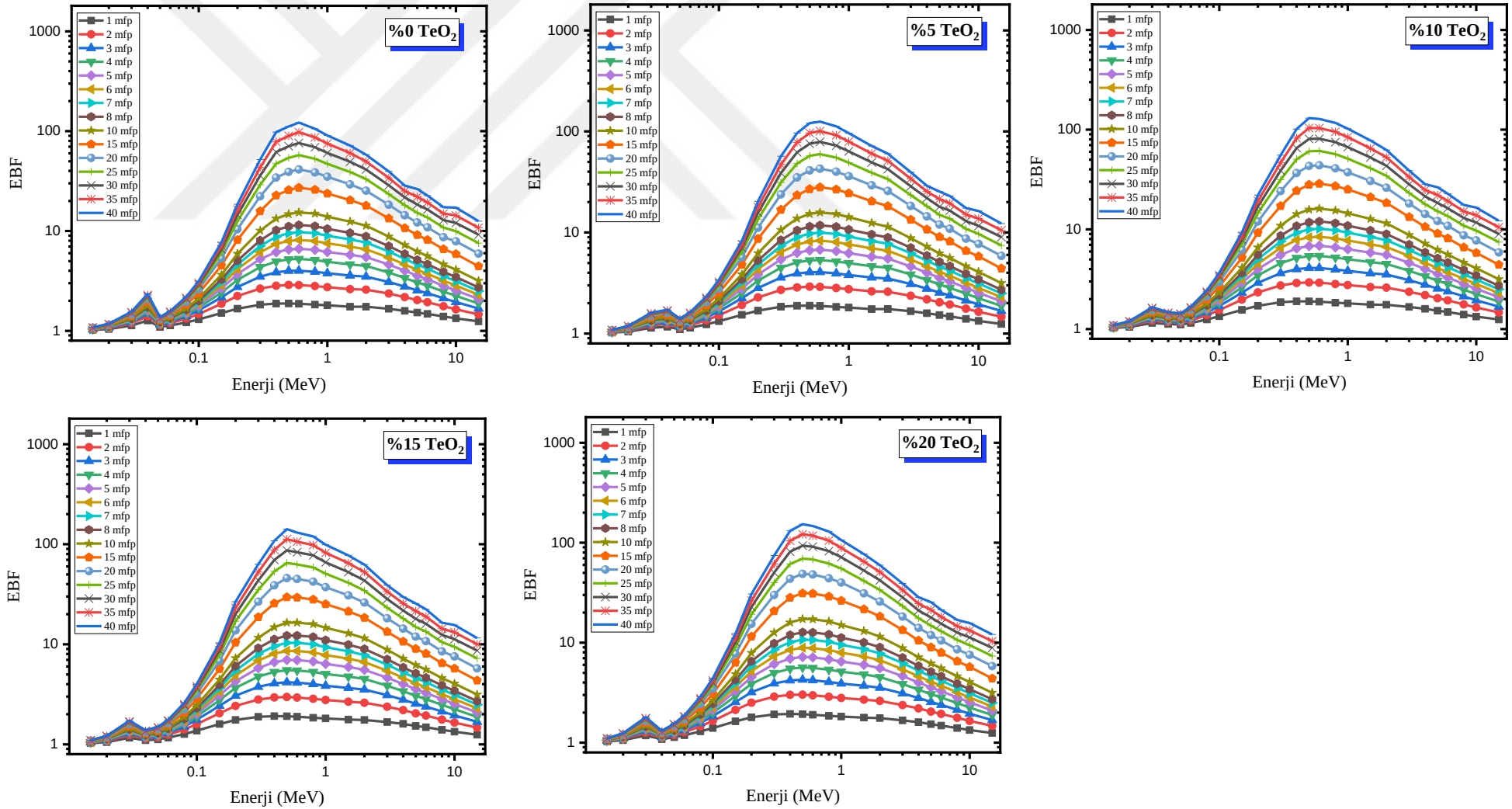
Şekil 77. 8. serideki numuneler için EABF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



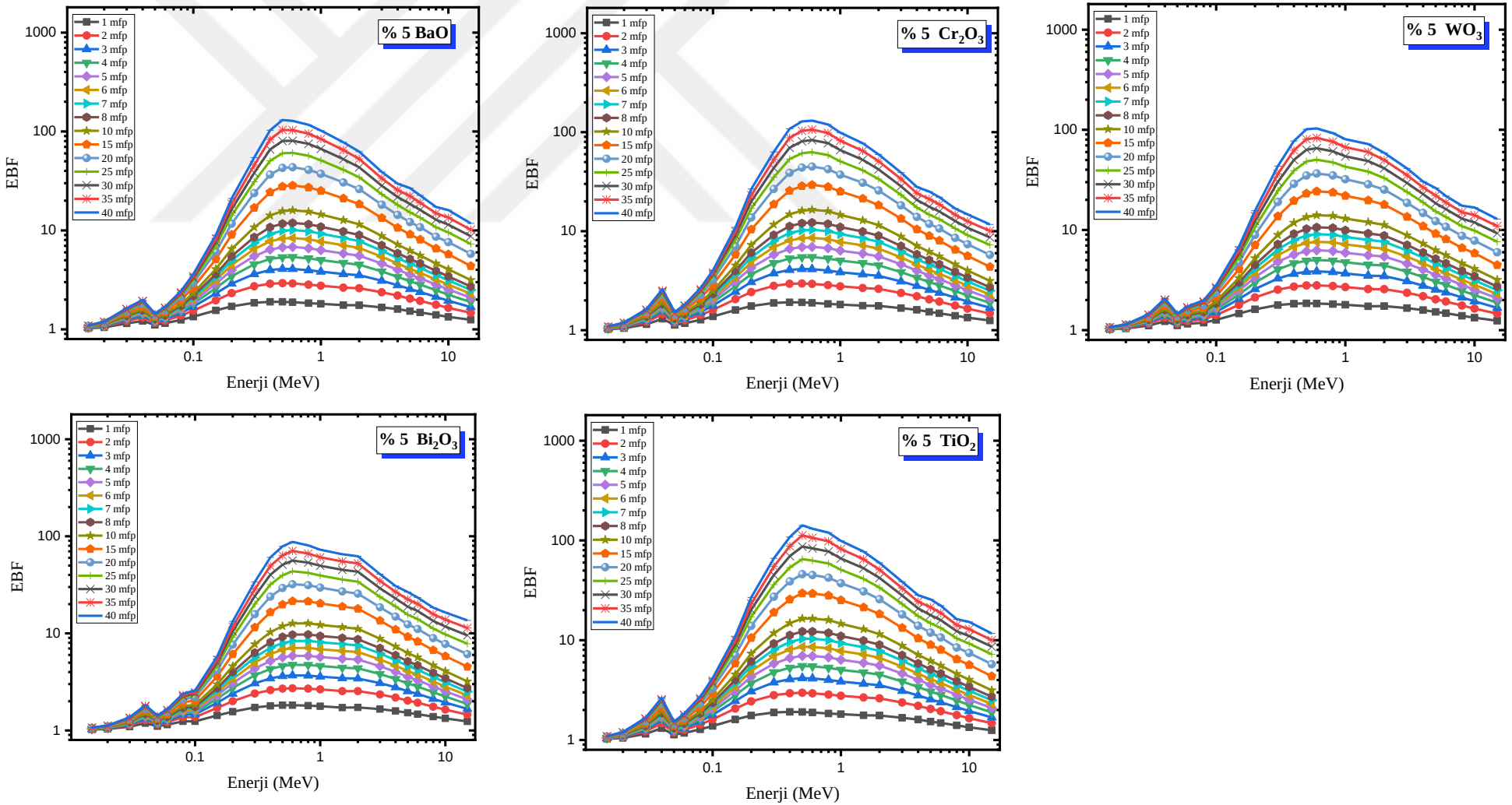
Şekil 78. Seçilen bazı metal köpük numuneler için EABF değerlerinin nüfuz etme derinliğine karşı değişimi (0,015, 0,15, 1,5 MeV için)



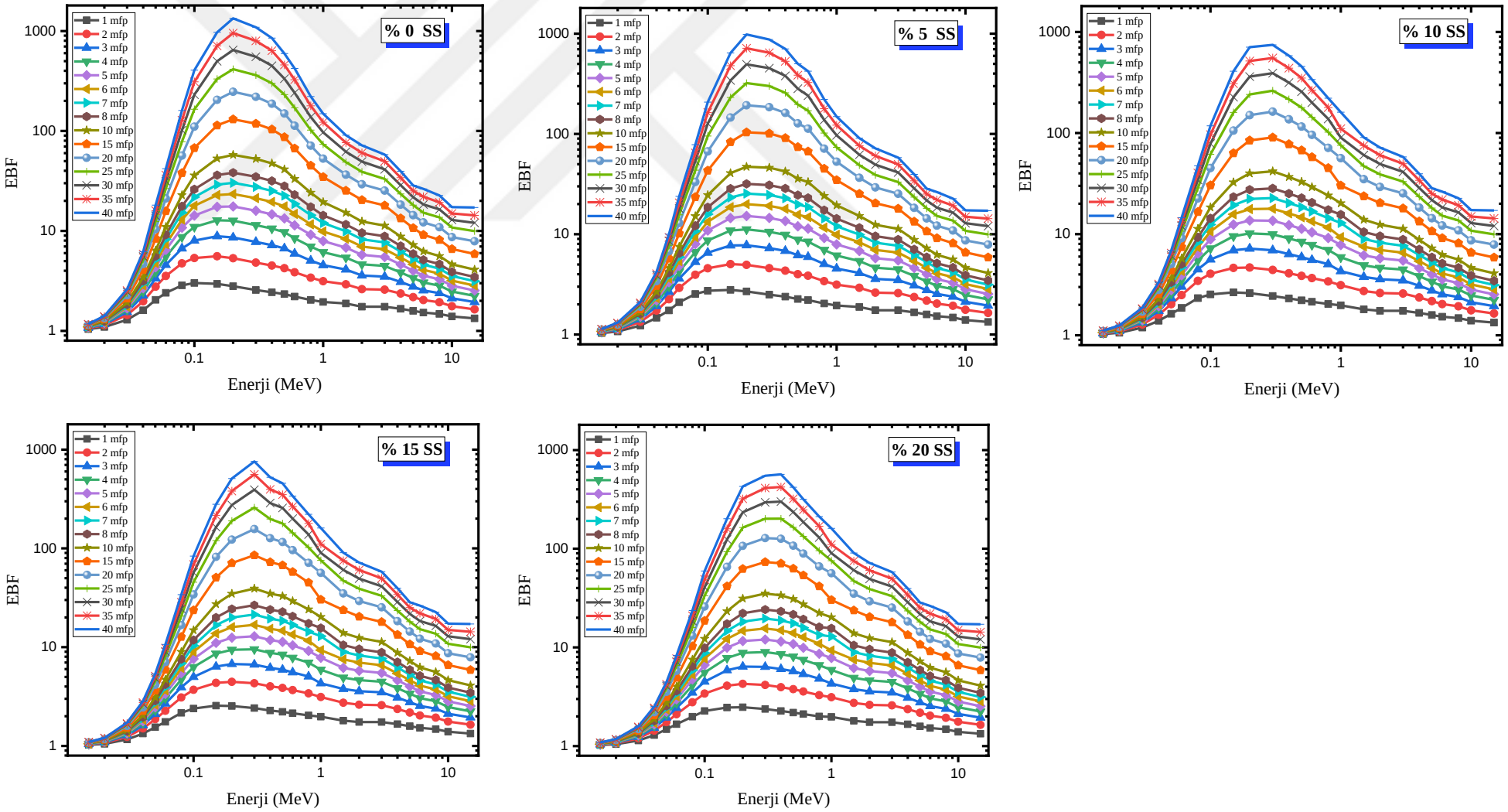
Şekil 79. 4. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



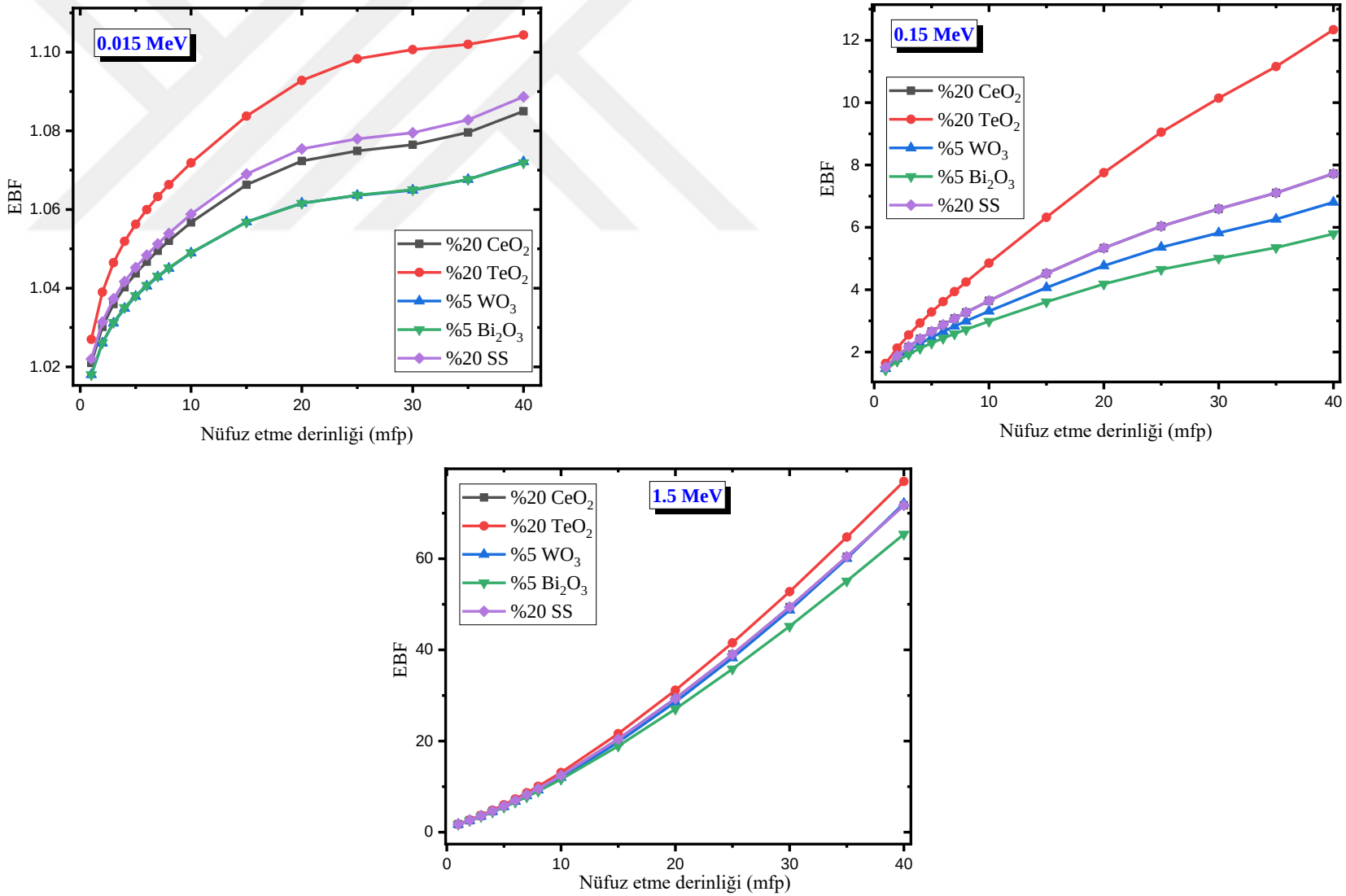
Şekil 80. 5. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



Şekil 81. 6. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi



Şekil 82. 8. serideki numuneler için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV aralığında foton enerjisine karşı değişimi

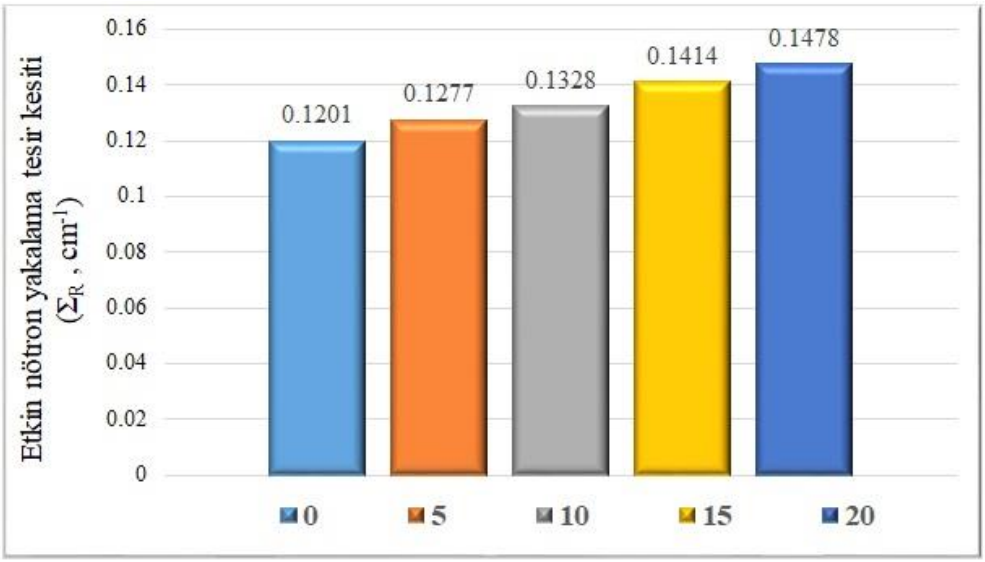


Şekil 83. Seçilen bazı metal köpük numuneler için EBF değerlerinin nüfuz etme derinliğine karşı değişimi (0,015, 0,15, 1,5 MeV için).

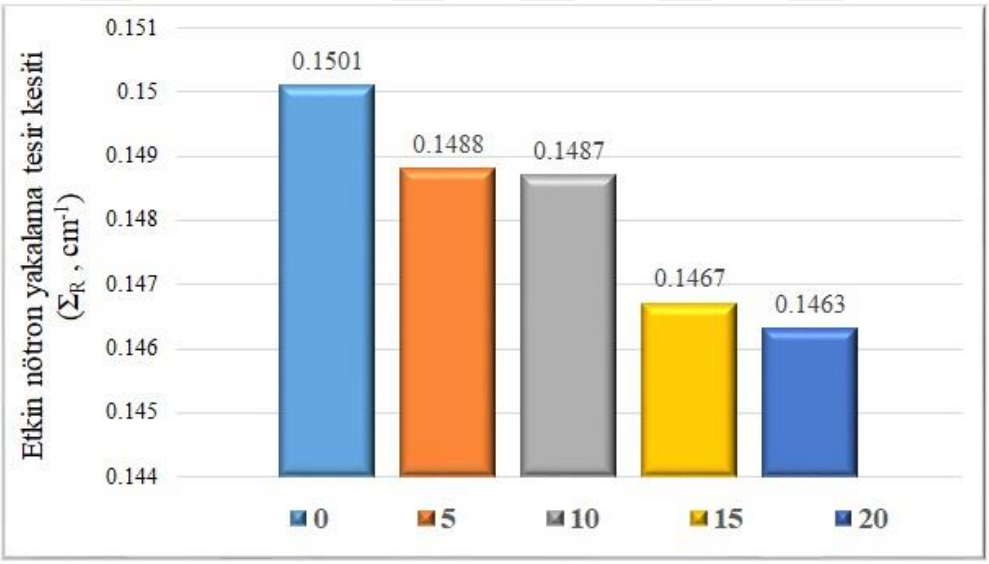
Nötron transmisyon ölçümlerinden elde edilen verilerle numunelerinin nötron soğurma yeteneklerini belirlemek için öncelikle eşdeğer soğurma doz (EAD) oranları $D - D_0 = D_a$ bağıntısı kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 21'de soğrulan doz yüzdeleri ile birlikte verilmiştir. Ayrıca numunelerin etkin hızlı nötron yakalama tesir kesit ($\sum_R$) değerleri teorik olarak elde edilmiştir. $\sum_R$ değerlerinin her serideki numuneler için ayrı ayrı eklenilen katkı maddeleri içerisindeki bileşik yüzdelerine bağlı değişimleri Şekil 84-91 aralığında verilmiştir.

Tablo 21. Hızlı nötronlar için numunelerin soğurduğu eşdeğer doz yüzdeleri

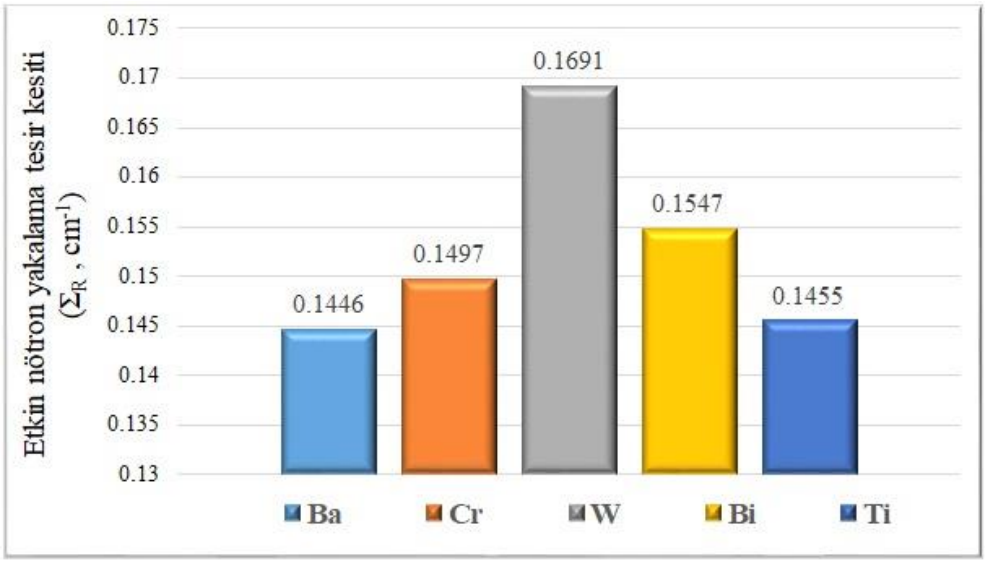
Numune no.	**Soğrulan eşdeğer doz**	**Soğrulan doz yüzdesi**	**Numune no.**	**Soğrulan eşdeğer doz**	**Soğrulan doz yüzdesi**
1	0,414	37	21	0,301	27
2	0,547	49	22	0,300	27
3	0,365	33	23	0,360	32
4	0,440	39	24	0,317	28
5	0,305	27	25	0,494	44
6	0,439	39	26	0,512	46
7	0,338	30	27	0,257	23
8	0,237	21	28	0,294	26
9	0,276	25	29	0,260	23
10	0,290	26	30	0,510	46
11	0,281	25	31	0,351	31
12	0,293	26	32	0,675	60
13	0,388	35	33	0,389	35
14	0,299	27	34	0,505	45
15	0,403	36	35	0,268	24
16	0,397	35	36	0,388	35
17	0,492	44	37	0,463	41
18	0,499	44	38	0,268	24
19	0,260	23	39	0,562	50
20	0,460	41	40	0,584	52



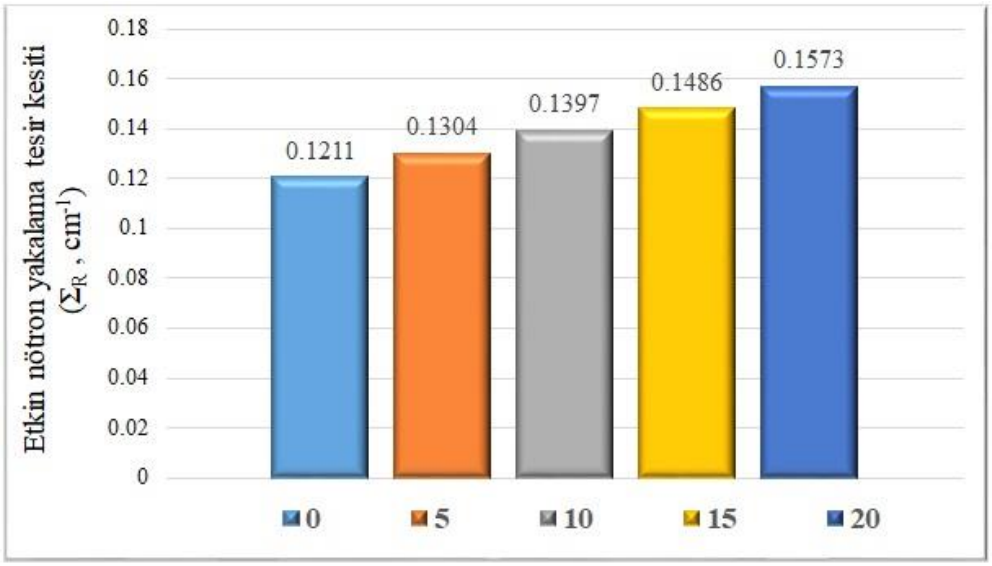
Şekil 84. 1. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



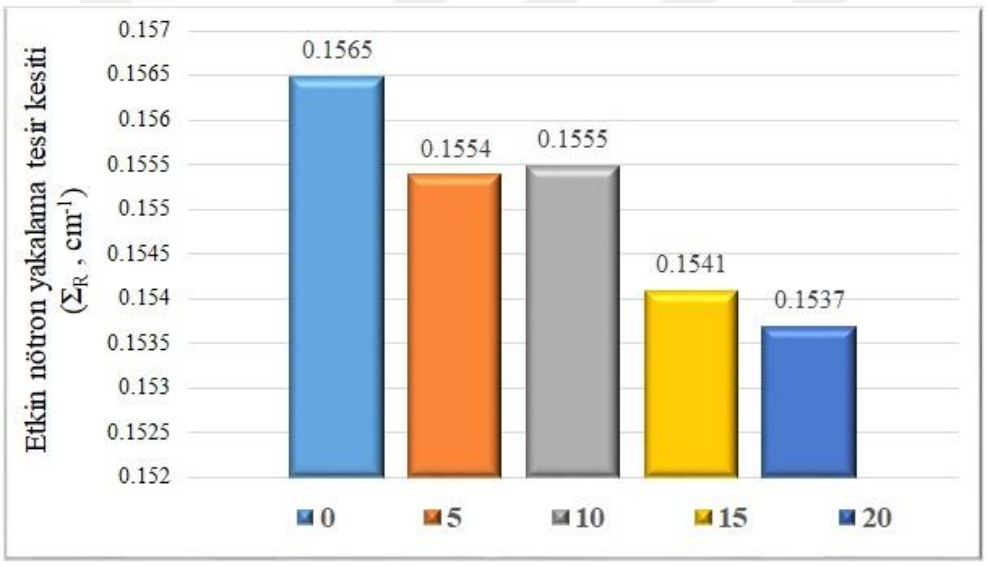
Şekil 85. 2. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



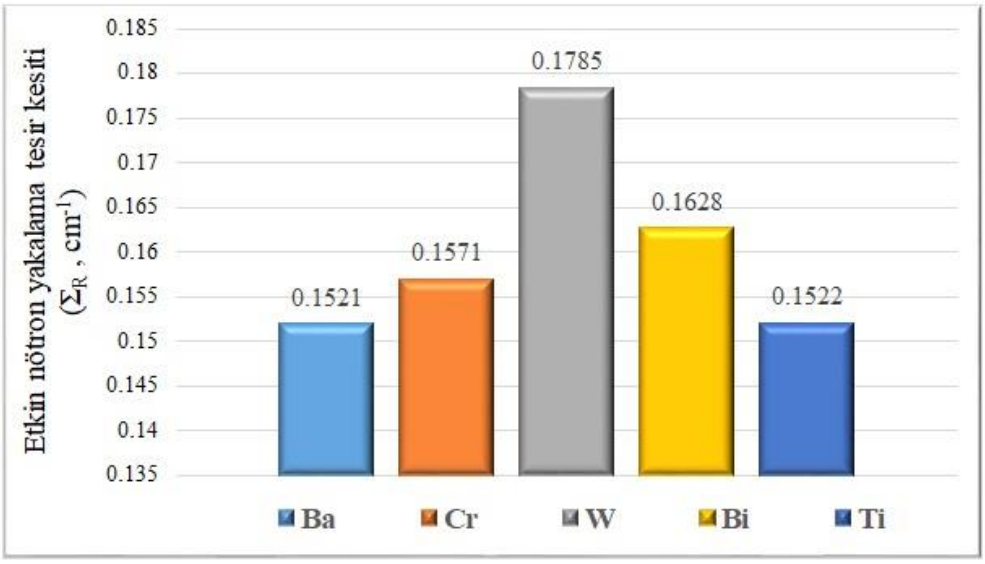
Şekil 86. 3. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



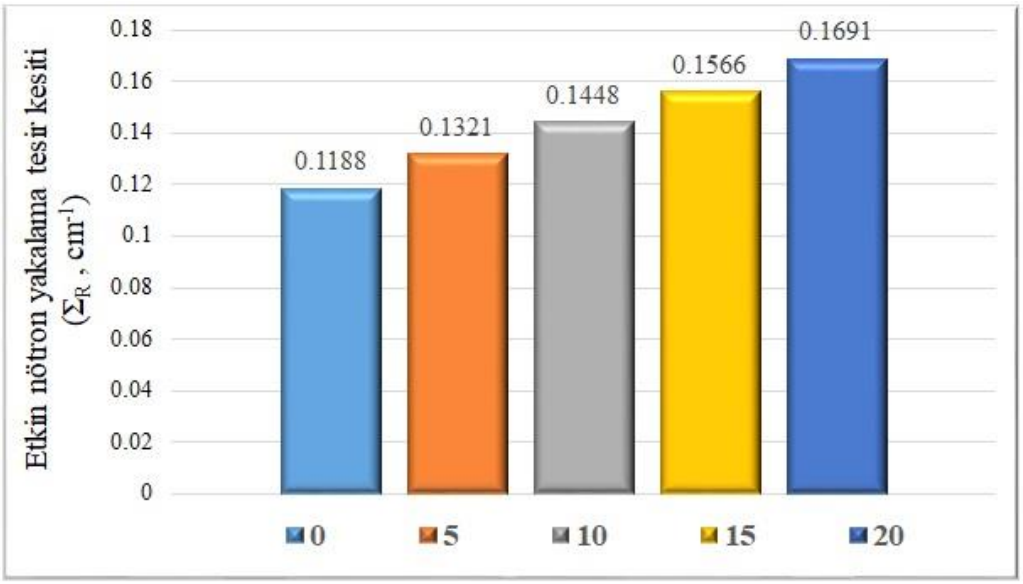
Şekil 87. 4. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



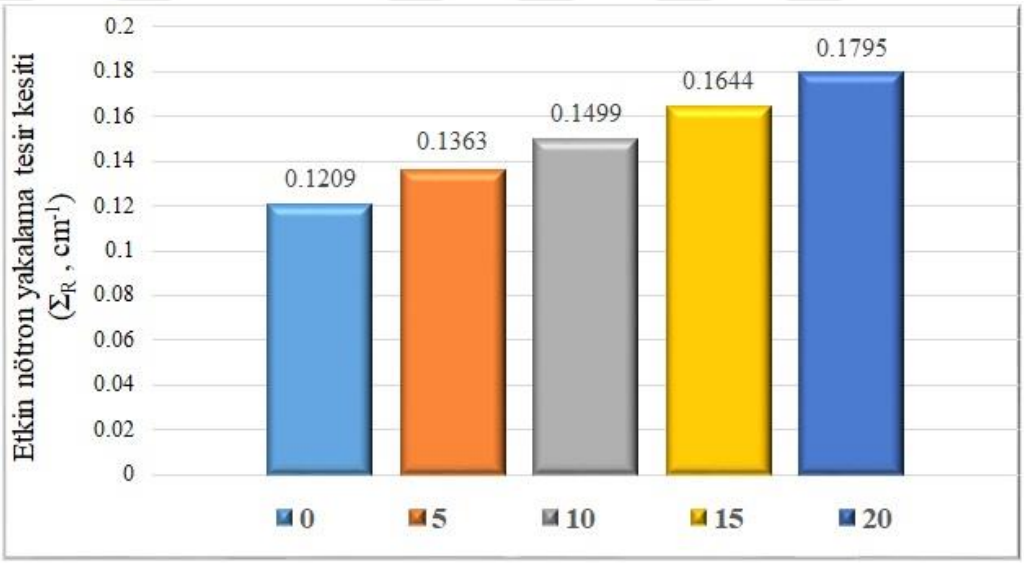
Şekil 88. 5. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



Şekil 89. 6. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



Şekil 90. 7. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri



Şekil 91. 8. Serideki numunelerin etkin nötron yakalama tesir kesiti değerleri

TARTIŞMA VE SONUÇ

Farklı içerik ve yüzdelerdeki katkı maddeleriyle doldurulmuş, 30 mm ve 10 mm kalınlıkta 2 pores/cm ve 16 pores/cm gözenek boyutlu toplam 40 adet alüminyum köpük numunesinin gama, X- ışını ve hızlı nötron azaltma kabiliyetleri üç farklı deney geometrisiyle incelenmiştir. Gama ölçümlerinden elde edilen verilerle numunelerin kütle azaltma katsayıları (μ_m) deneysel olarak Lambert-Beer kanunu kullanılarak hesaplanmıştır ve WinXCOM programından elde edilen teorik sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tablo 12-19'da verilen değerlere bakıldığında deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı (μ_m) değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

1. seri'de 30 mm kalınlığında 2 pores/cm gözenek boyutlu alüminyum metal köpükler Epoksi$_{(60)}$ -$B_2O_{3(20)}$-$CaO_{(20-x)}$-$CeO_{2(x);}$ x; 0, 5, 10, 15 ve 20 kimyasal bileşime sahip epoksi karışımı ile doldurulmuştur. Tablo 12 ve Şekil 50, 1. serideki numunelerin μ_m değerlerinin 0,030-0,662 MeV foton enerjisi aralığında değişimini göstermektedir. Düşük enerji bölgesinde μ_m değerlerinin en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. 0,1 MeV'e kadar μ_m değerlerinin hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu hızlı azalma düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olması ile açıklanır. Bu bölgede fotonların malzeme ile etkileşim tesir kesiti $Z^{4-5}/E^{3,5}$'ye bağlı olarak değişmektedir ve bu bölgede fotonlar ya tamamen soğrulur ya da enerjisini büyük oranda kaybeder. Ayrıca bu bölgede μ_m değerleri numunenin kimyasal kompozisyonundan da önemli ölçüde etkilenir. % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında CeO_2 katkılanan metal köpüklerde μ_m değerlerinin artan CeO_2 katkılama konsantrasyonu ile arttığı görülmektedir. Buna ek olarak yüksek atom numaralı Ce elementinin K tabakası soğuırma kıyısı (40,44 keV) civarında şiddeti artan CeO_2 konsantrasyonuna bağlı artan küçük ani artışlar olduğu görülmektedir. 0,1 MeV'den sonra μ_m değerlerinin artan foton enerjisine karşı azalmasının daha yavaş olduğu görülmektedir. Bu durum, orta enerjilerde Compton saçılmasının baskın olması ve compton tesir kesitinin bu bölgede Z/E ile değişimiyle açıklanmaktadır. 0,276 MeV-0,662 MeV aralığında 1. Seri metal köpüklerin μ_m değerleri neredeyse birbirine yakındır. 1. Seri metal köpüklerde CeO_2 katkısı numunelerin foton soğurma kabiliyetini artırmıştır. 4. seri metal köpükler ise 10 mm kalınlığında 16 pores/cm gözenek boyutlu olup 1. Seride kullanılan epoksi karışımı ile doldurulmuştur. Tablo 15 ve Şekil. 59'da 4. seri numunelerin μ_m değerlerinin foton enerjisi ile değişimini sunmaktadır. 4. serinin 1. seri

numunelerden tek farkı kullanılan metal köpüğün farklılığıdır. 4. Seri metal köpükler daha ince ve cm başına gözenek sayısı daha fazladır. Tablo 12 ve 15'deki μ_m değerleri karşılaştırıldığında 1. seri ve 4. seri numunelerin μ_m değerlerinin birbirine yakın olduğu ve 4. seri metal köpüklerin μ_m değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Örneğin; 0,030 MeV'de artan CeO_2 katkısıyla μ_m değerleri 1. seri için 0,912-1,745 cm^2/g ve 4. Seri için 0,891-1,859 cm^2/g aralığında değişmektedir. %20 CeO_2 katkılı 5. ve 20. Numunelerin 0,030-0,662 MeV foton enerjileri için μ_m değerlerinin sırasıyla 1,745-0,078 cm^2/g ve 1,859-0,079 cm^2/g olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre 4. Seri numunelerin hem ince hem de azaltma katsayısının büyük olması sebebiyle radyasyon azaltma noktasında daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir.

Şekil 51, 1. serideki numunelerin yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerinin 0,030-0,662 MeV enerji aralığında değişimini göstermektedir. Düşük enerjilerde numune kalınlığı en azdır. Foton enerjisinin artmasıyla HVL degerlerinin özellikle orta enerjilerde hızla arttığı görülmektedir. Bunun nedeni orta enerjilerde Compton saçılması sebebiyle ikincil fotonların sayısının artmasıdır. Bu nedenle orta enerjilerde daha büyük kalınlığa sahip numunelere ihtiyaç duyulmaktadır. Metal köpüklere CeO_2 ikamesinin artmasıyla HVL değerlerinin düştüğü görülmektedir. İyi bir zırh malzemesi için düşük HVL değerinin olması istenen bir durumdur. Seçilen enerji aralığında %20 CeO_2 katkılanmış 5. numune için HVL değerleri 0,140 cm-3,114 cm aralığında değişmektedir. Şekil 60 4. seri metal köpükler için HVL değerlerinin değişimini göstermektedir. 1. seri ile benzer bir değişim olup az da olsa 1. seriye nazaran 4. Serinin HVL değerlerinin daha küçük olması dikkat çekicidir. %20 CeO_2 katkılanmış 20. numune için HVL değerleri 0,132 cm-3,111cm aralığındadır.

Kompozit malzemelerin atom numarasını tek bir sayı ile ifade etmek için etkin atom numarası (Z_{etk}) kavramına ihtiyaç duyulmaktadır. Etkin atom numarası, materyallerin X- ya da gama ışını soğurma kesirlerinin anlamını ortaya çıkarmak için ölçülmesi gereken bir parametredir. Foton etkileşim tesir kesiti, foton enerjisinin ve atom numarası Z'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Kütle azaltma katsayı değerleri kullanılarak elde edilen toplam atomik ve elektronik tesir kesitleriyle numunelerin Z_{etk} değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca birim kütle başına elektron sayısı olarak ifade edilen etkin elektron yoğunluğu (N_e) ise Z_{etk}'den faydalanılarak hesaplanmıştır. 1. ve 4. seri numuneler için Z_{etk} ve N_e değerleri şekil 52 ve 61'de verilmiştir. Her iki şekilde de Z_{etk} değerleri düşük enerjilerde, 0,03 MeV-0,20 MeV, en büyük değerlerini almaktadır. Fotoelektrik etkileşim tesir kesitinin Z^{4-5} ile orantılı olması düşük

enerjilerde daha yüksek Z_{etk} değerlerine sebep olmaktadır. 0,04 MeV civarında Ce'nin K tabakası soğurma kıyısı sebebiyle Z_{etk} değerlerinde ufak tepeler olduğu görülmektedir. 0,3 MeV'e gelindiğinde Z_{etk} değerlerinin hızlıca düştüğü görülmektedir. Compton saçılmasının baskın olduğu orta enerjilerde tüm numuneler için Z_{etk} değerleri birbirine çok yakındır. Z_{etk} değerlerinin artan CeO_2 içeriği ile arttığı görülmektedir. 20. ve 5. numuneler için Z_{etk} değerleri sırasıyla 27,56-5,85 ve 26,67-6,31 aralığında değişmektedir. N_e değerlerinin foton enerjisi ile değişimi Z_{etk} ile benzerdir. Epoksi karışımına eklenen CeO_2 içeriğinin artışı her iki metal köpüğün X- ve gama ışını soğurma yeteneğini artırmıştır.

2. seri'de 30 mm kalınlığında 2 pores/cm gözenek boyutlu ve 5. Seride 10 mm kalınlığında 16 pores/cm gözenek boyutlu alüminyum metal köpükler Epoksi$_{(60)}$ -$B_2O_{3(20)}$-$CeO_{2\ (20-x)}$-$TeO_{2(x);}$ x; 0, 5, 10, 15 ve 20 kimyasal bileşime sahip epoksi karışımı ile doldurulmuştur. Tablo 13 ve 16 2. ve 5. seri için deneysel ve teorik olarak elde edilen μ_m değerlerini göstermektedir. Ayrıca Şekil 53 ve 62 sırasıyla 2. ve 5. seri numunelerin μ_m değerlerinin foton enerjisine bağlı değişimini görselleştirmiştir. Tablo ve şekillerden artan TeO_2 içeriğine bağlı olarak μ_m değerlerinin 2. ve 5. seri numuneler için sırasıyla 1,774 cm^2/g -0,078 cm^2/g ve 1,857 cm^2/g-0,078 cm^2/g aralığında değişmektedir. 1. ve 4. Seride olduğu gibi bu iki seri için de 10 mm kalınlığında 16 pores/cm gözenek boyutlu alüminyum metal köpüklerin daha büyük μ_m değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Epoksi karışımında CeO_2'nin TeO_2 ile yer değiştirmesi μ_m değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Şekil 53 ve 62'den görüldüğü üzere 0,1 MeV'e kadar μ_m değerleri hızla düşmektedir. 0,031 ve 0,040 MeV aralığında μ_m değerlerinde Te ve Ce'nin X- ışını soğurma kıyılarından (Te: 31,81 keV, Ce: 40,44 keV) dolayı küçük sıçramalar görülmektedir.

Şekil 54 ve 63, 2. ve 5. seri numunelerin HVL değerlerinin foton enerjisine karşılık değişimini göstermektedir. Tüm numuneler için HVL değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. CeO_2'nin TeO_2 ile yerdeğiştirmesi Ce ve Te elementlerinin atom numaralarının yakın olması sebebiyle numunelerin μ_m ve HVL değerlerinde ciddi bir değişikliğe sebep olmamıştır. 2. ve 5. seri için artan foton enerjisi ile (0,030 MeV- 0,662 MeV) 10. ve 25. numuneler için HVL değerleri 0,182 cm-3,230 cm ve 0,178 cm-3,224 cm aralığında değişmektedir. 1. ve 4. seri için bulunan HVL değerleri 2. ve 5. seriye göre daha incedir.

Şekil 55 ve 64, 2 ve 5. serilerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin değişimini vermektedir. 2. seride seçilen enerji aralığı için Z_{etk} değerleri 6. ve 10. numune için 22,14-6,19 ve 18,32-6,14

aralığında, 5. seride ise 21. ve 25. numune için 23,20-5,86 ve 19,02-5,78 aralığındadır. Şekillerden düşük enerjilerde en yüksek değerleri alan Z_{etk} değerlerinin artan TeO_2 ikamesiyle ile azaldığını söyleyebiliriz. Ayrıca N_e değerlerinin foton enerjisin karşı Z_{etk} değerleri ile aynı davranışta olduğu ve artan TeO_2 içeriği ile numunenin ortalama atom numarası azaldığı için azaldığı görülmektedir.

3. seri'de 30 mm kalınlığında 2 pores/cm gözenek boyutlu ve 6. Seride 10 mm kalınlığında 16 pores/cm gözenek boyutlu alüminyum metal köpükler $Epoksi_{(60)}$ -$B_2O_{3(20)}$-$CeO_{2(15)}$-[BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2]$_{(5)}$ kimyasal bileşime sahip epoksi karışımı ile doldurulmuştur. Tablo 8 ve 11, μ_m değerlerinin 0,030-0,662 MeV enerji aralığı için deneysel ve teorik sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 56 ve 65'ten ve tablolardan görüldüğü gibi %5 oranında BaO, Cr_2O_3, WO_3, Bi_2O_3, TiO_2 oksitleri ikame edilmiş 0,030 MeV enerjide μ_m 3. seri numuneler için sırasıyla 1,760, 1,603, 2,086, 2,435, 1,559 cm^2/g değerlerini alırken, 6. seri numuneler için 1,673, 1,674, 2,194, 2,591, 1,616 cm^2/g değerlerini almıştır. Epoksi karışıma ikame edilen oksite bağlı olarak μ_m değerlerinin etkilendiğini görmekteyiz. Bi_2O_3 ve WO_3 içeren numuneler en yüksek μ_m değerlerini alırken TiO_2 ilave edilmiş 15. ve 30. numune en düşük μ_m değerlerine sahiptir. Diğer serilerde olduğu gibi ince ve daha çok gözenekli 6.seri metal köpüklerin daha büyük μ_m değerlerine sahip olduğu açıktır. 0,3 MeV'e kadar fotoelektrik etkinin baskın olması sebebiyle μ_m değerlerinde hızlı bir düşüş olduğu görülmektedir. Cr_2O_3 ve TiO_2 katkılı numunelerin μ_m değerleri birbirine çok yakın olup ilgili serilerde en küçük μ_m değerlerini almıştır.

Şekil 57 ve 66, 3. ve 6. seri metal köpüklerin HVL değerlerinin foton enerjisiyle değişimini göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan Bi_2O_3 ve WO_3 katkılı numunelerin daha ince HVL değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Diğer üç numunenin HVL değerleri hemen hemen aynıdır. Bi_2O_3 katkılı 30 mm ve 10 mm kalınlığındaki iki farklı metal köpük numunesi için elde edilen HVL değerleri sırasıyla 0,096cm- 2,962 cm ve 0,090 cm- 2,921 cm olarak bulunmuştur. Yine diğer serilerde gözlemlendiği gibi bu seride de 10 mm kalınlığındaki metal köpüklerle radyasyonu azaltma noktasında daha başarılı olunmuştur. Bu iki seride epoksi karışımının kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak radyasyon zırhlama kapasitesinin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir.

3. ve 6. serinin Z_{etk} ve N_e değerlerinin çalışılan foton enerji aralığı için elde edilen değişimi Şekil 58 ve 67'de sunulmuştur. 0,1 MeV'e kadar Z_{etk} değerlerinin numunelerin kimyasal kompozisyonuna bağlı değişimi fotoelektrik etkileşim tesir kesitinin Z^{4-5} ile doğrusal

değişimi nedeniyle oldukça kuvvetlidir. Bi_2O_3 katkılı numuneler en büyük Z_{etk} değerlerini alırken, Cr_2O_3 ve TiO_2 katkılı numuneler için en küçük değerlere sahip olduğu görülür. 0,3 MeV'e kadar hızlı bir düşüş gösteren Z_{etk} değerleri, Compton saçılma tesir kesitinin Z/E ile değişimi nedeniyle 0,3- 0,6 MeV aralığında foton enerjisine karşılık çok yavaş bir şekilde azaldı ve numnenin elemental kompozisyonuna bağımlılığı da azalmıştır. N_e değerlerinin foton enerjisi ile değişim eğiliminin Z_{etk} ile benzer olduğu not edildi.

7. ve 8. seri numunelerde paslanmaz çelik (SS) katkılı metal köpükler, $Epoksi_{(60)}$ - $B_2O_{3(20)}$-$CaO_{(20-x)}$-$SS_{(x);}$ x; 0, 5, 10, 15 ve 20 kimyasal bileşime sahip epoksi karışımı ile doldurulmuştur. Tablo 12 ve 13 sırasıyla 30 mm ve 10 mm kalınlıklı paslanmaz çelik katkılı metal köpüklerin μ_m değerlerini vermektedir. Her iki seride de eklenen paslanmaz çelik (SS) yüzdesi arttıkça μ_m değerleri artmıştır. En az SS katkılı 31. ve 36. numuneler için 0,030-0,662 MeV foton enerji aralığında μ_m değerleri 0,910 cm^2/g-0,077 cm^2/g ve 0,893 cm^2/g-0,078 cm^2/g aralığında iken %20 SS katkılı 35. ve 40. numuneler için 1,669 cm^2/g-0,077 cm^2/g ve 1,740 cm^2/g-0,078 cm^2/g aralığında değişmektedir. Ayrıca Şekil 68 ve 71'de μ_m değerlerinin foton enerjisine karşı değişimi görselleştirilmiştir. Tablolar ve grafikten elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, SS içeriğinin artışı μ_m değerlerini artırmıştır. 10 mm kalınlıklı metal köpüklerle elde edilen numunelerde μ_m değerlerinin daha büyük oluşu dikkat çekmektedir.

Şekil 69 ve 72 SS katkısının 7. ve 8. seri numunelerin HVL değerlerini azalttığını göstermektedir. Örneğin 0,030 MeV için, 31-35 numuneleri için HVL değerleri 0,350 cm-0,131 cm ve 36-40 numuneleri için 0,369 cm-0,125 cm aralığında değişmektedir. Buradan SS ilavesinin artışı ile numunelerin gelen radyasyonun şiddetini yarısına azaltmak için gerekli malzeme kalınlığının azaldığı net bir şekilde söylenebilir.

Şekil 70 ve 73'den SS katkılı metal köpüklerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin artan SS içeriği ile yükseldiği görülmektedir. Düşük enerji bölgesinde SS içeriğine bağlı olarak Z_{etk} ve N_e değerlerinde belirgin bir farklılaşma olduğu görülmektedir. Compton bölgesinde ise tüm numunelerin Z_{etk} ve N_e değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Ayrıca lineer hızlandırıcı kullanılarak 6 MV (~2 MeV) bremsstrahlung X-ışınları için elde edilen μ ve μ_m değerleri Tablo 20'de sunulmuştur. 20. (10 mm, %20 CeO_2) , 30. (10 mm, %20 TiO_2) ve 40. (10 mm, %20 SS) numunelerin en yüksek μ_m değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Burada elde edilen sonuçlar da daha ince ve gözenek sayısı fazla olan metal köpüklerin X-ışını radyasyonunu azaltmada daha başarılı olduğunu göstermektedir. Boş köpük

numunelerinin de kütle soğurma katsayısı değerleri hesaplanmış ve X- ışınlarını hemen hemen hiç soğurmadığı görülmüştür.

10 mm kalınlıkta 16 pores/cm gözenek boyutuna sahip numuneler için enerji soğurma (EABF) ve Maruziyet (EBF) buildup faktörleri 0,015-15 MeV enerji aralığında ve 1-40 MFP için hesaplanmıştır. Şekil 74-77 ve 79-82'den düşük enerji bölgesinde tüm numuneler için EABF ve EBF değerlerinin en küçük değeri aldığı görülmektedir. Bunun nedeni fotoelektrik etkinin hüküm sürdüğü düşük enerjilerde fotonların ya tamamen yok olması ya da enerjilerinin çoğunu kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede çoğu foton numune içinde soğrulur ve bu EABF ve EBF değerlerinin küçük olmasına neden olur. Şekiller incelendiğinde ağır element içeriğine sahip numunelerde 4. seride Ce'nin, 5. seride Te'nin, 6. seride Ce, Ba, W ve Bi elementlerinin K- X ışını soğurma kıyıları nedeniyle ufak ani artışlar olduğu görülmektedir. Bu artışların şiddetinin ilgili oksidin numune içindeki konsantrasyonunun artmasıyla arttığı dikkat çekmektedir. 0,1 MeV'den sonra Compton saçılmasının baskın olması nedeniyle ikincil saçılmalar artmaya başlar. Fotonlar enerjisini çok az kaybeder ya da ikincil saçılmalardan dolayı numune içinden kuvvetlenerek çıkar. Bu durum EABF ve EBF değerlerinin tüm serilerde en yüksek değerleri almasına sebep olur. 1 MeV'in ötesinde EABF ve EBF değerlerinin yeniden azalmaya başladığı görülür. Bunun sebebi yüksek enerji aralığında çift oluşum sürecinin etkili olmasıdır. Tıpkı fotoelektrik etkide olduğu gibi bu süreçte de fotonlar enerjilerini büyük oranda kaybederler veya yok olurlar. Zaman zaman numune içeriğine bağlı olarak ikincil saçılmalar meydana gelerek fotonlar kuvvetlendirilebilir. Bazı numunelerde 1 MeV civarındaki artışlar ikincil saçılmalara atfedilebilir. Genel olarak tüm numunelerde yüksek enerji bölgesinde EABF ve EBF değerlerinin azaldığı fark edilmektedir. Ayrıca nüfuz etme derinliği arttıkça EABF ve EBF değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü malzeme kalınlığı arttıkça fotonların birbirini kuvvetlendirmesi kaçınılmaz olacaktır. Her bir seri incelendiğinde Şekil 74 ve 79'da %20 CeO_2 katkılı numunenin, Şekil 75 ve 80'de %20 TeO_2 katkılı numunenin, Şekil 76 ve 81'de %5 Bi_2O_3 ve WO_3 katkılı numunelerin ve son olarak Şekil 77 ve 82'de %20 paslanmaz çelik (SS) katkılı numunenin en düşük EABF ve EBF değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Ayrıca Şekil 78 ve 83'te EABF ve EBF değerlerinin 1-40 MFP nüfuz etme derinliğine bağlı olarak seçilen özel enerjiler için değişimi verilmiştir. Tüm serilerde en düşük EABF ve EBF değerlerine sahip numunelerin kıyaslaması yapıldığında, 0,015 MeV'de %20 TeO_2 katkılı numunenin en yüksek EABF ve EBF değerlerine sahip olduğu ve %20 CeO_2 katkılı numunenin EABF ve EBF değerlerinin en az olduğu görülmektedir. EABF ve EBF değerlerinin 10 MFP'ye kadar lineere yakın artış gösterdiği ve 10-40 MFP aralığında neredeyse sabit olduğu fark

edilmiştir. Bu enerji için EABF ve EBF değerlerinin numunenin kimyasal kompozisyonuna yüksek oranda bağlı olduğu dikkat çekmektedir. 0,15 MeV'de EABF ve EBF değerleri 0,015 MeV'e göre artış gösterirken, artan nüfuz etme derinliği ile lineere yakın artış davranışına sahip olmaktadır. Bu enerjide %5 Bi_2O_3 katkılı numune en düşük EABF ve EBF değerlerini alırken, 0,015 MeV'de olduğu gibi %20 TeO_2 numune en büyük EABF ve EBF değerlerine sahiptir. Zırhlama çalışmalarında EABF ve EBF değerlerinin düşük olması istenen bir durumdur. 1,5 MeV'de Compton saçılması baskın olduğundan EABF ve EBF değerleri nüfuz etme derinliğinin artışıyla hızlı bir atış gösterir. Bu enerjide Compton saçılma tesir kesitinin Z ile değişmesi nedeniyle EABF ve EBF değerlerinin numunenin kimyasal kompozisyonuna bağlılığı azalmıştır. Bi_2O_3 ve WO_3 ve %20 paslanmaz çelik (SS) katkılı numunelerin en düşük EABF ve EBF değerlerini aldığı görülmektedir.

Hızlı nötronlar atom çekirdeği ile etkileşime girerek iyonlaşmalara neden olur. Maddeye nüfuz etme yetenekleri de yüksektir. Hızlı nötronlara karşı mükemmel koruma sağlayan malzemeler için büyük makroskopik tesir kesitleri arzu edilir. Üretilen numunelerin BF_3 nötron dedektörü kullanılarak elde edilen eşdeğer soğurma doz (EAD) oranları eşdeğer doz yüzdeleri ile birlikte Tablo 21'de sunulmuştur. Tablo 21 incelendiğinde numunelerin eşdeğer doz soğurma yüzdelerinin % 60-% 21 aralığında değiştiği görülmektedir. En yüksek soğrulan doz yüzdesi 32 numaralı %5 SS katkılı numuneye ait iken, en düşük hızlı nötron soğurma yüzdesi %10 TeO_2 katkılı 8. numunenindir. Farklı kalınlıklarda metal köpük kullanımının eşdeğer doz soğrulma oranında önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmekle beraber 10 mm kalınlığa sahip numunelerin hızlı nötronları daha iyi soğurduğu söylenebilir. Köpük numunelerinin nötron azaltma kabiliyetlerini belirlemek için etkin nötron yakalama tesir kesitleri ($\sum_R$) hesaplanmıştır ve sütun grafiği olarak Şekil 84-91 aralığında verilmiştir. 1. ve 4. serilerde CeO_2 yüzdesi arttıkça $\sum_R$ değerleri artmıştır ve 1. seri için 0,1201 cm^{-1}-0,1478 cm^{-1} ve 4. seri için 0,1211 cm^{-1}-0,1573 cm^{-1}. Bu artışın sebebi CeO_2 katkısıyla numune yoğunluğunun artmasıdır. 2. ve 5. serilerde numunelerdeki TeO_2 yüzdesi arttıkça sırasıyla $\sum_R$ değerleri 0,1501 cm^{-1}-0,1463 cm^{-1} ve 0,1565 cm^{-1}-0,1537 cm^{-1} olarak bulunmuştur. Bu seride CeO_2 yerine TeO_2 kullanılması numune yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur ve Te'nin makroskopik tesir kesitinin daha küçük olması sebebiyle $\sum_R$ değerleri azalmıştır. 3. ve 6. serilerde WO_3 katkılı numunelerde $\sum_R$ değeri en büyük (0,1691 cm^{-1} ve 0,1785 cm^{-1}), BaO katkılı numunelerde ise en küçük değerini almıştır. 7. ve 8. serilerde paslanmaz çelik yüzdesi arttıkça $\sum_R$ değeri artmıştır. Sonuç olarak geleneksel olarak kullanılan su ve parafin gibi nötron zırh malzemelerinin $\sum_R$ değerleri 0,101 civarında olup bu çalışmadaki numuneler için hesaplanan $\sum_R$ değerlerinden çok daha küçüktür. Metal köpük numunelere eklenen katkı maddelerinde B_2O_3 olması sebebiyle elastik saçılmalara neden olan hafif B elementinin varlığı ve numunelere eklenen ağır oksitli bileşiklerin numune

yoğunluğunu artırması sayesinde çalışmadaki tüm köpük numuneleri iyi birer nötron zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir.

Katkı maddeleri ile doldurulmuş açık hücreli köpükler hem hafif ve yüksek spesifik yüzey alanı sergiler hem de mükemmel radyasyon kalkanı verimliliğine ve iyi işlenebilirliğe sahip olurlar. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında da boş köpük numunelerine katkı maddeleri eklenerek hazırlanan yeni kompozit malzemenin, boş olanlara göre daha iyi gama, X-ışını ve nötron soğurma özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Köpüklerin kalınlık ve gözenek boyutlarına bağlı olarak farklı radyasyon soğurma kabiliyeti sergiledikleri görülmüştür. Kalınlığı ve gözenek boyutu küçük olanların radyasyon soğurma kabiliyetlerinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Çeşitli alanlarda farklı amaçlarla kullanılan metal köpüklerin, bu çalışmada olduğu gibi her radyasyon türü için farklı katkı maddeleriyle doldurulmasıyla elde edilen yeni formuyla radyasyon zırhlama alanında da kullanım imkânı artacaktır. Bu tür malzemelerin, radyasyon zırhlamada sıklıkla kullanılan kurşun, beton gibi malzemelere göre daha ekonomik, daha mukavemetli, daha hafif ve çevre dostu olması sebebiyle radyasyon zırhlamada kullanımı daha çok tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

Akıllı, V., 2019. Bizmut Oksit-Kurşun Klorür-Tellür Oksit Sisteminin Isıl, Optik ve Yapısal Açıdan İncelenerek Camlaşma Davranışlarının Belirlenmesi ve Camların Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Akiyama, S., Ueno, H., Imagawa, K., Kitahara, A., Nagata, S., Morimoto, K., Nishikawa, T. and Itoh, M., 1987. Foamed Metal and Method of Producing Same. United States Patent, 20.

Akman, F., Kaçal, M.R., Sayyed, M.I., and Karataş, H.A., 2019. Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys. Journal of Alloys and Compounds, 782, 315-322.

Evans, A.G., Hutchinson, J.W., Ashby, M.F., 1999. Multifunctionality of cellular metal systems. Progress in Materials Science, 43, 171-221.

Aygün, B., 2020. High alloyed new stainless steel shielding material for gamma and fast neutron radiation. Nuclear Engineering and Technology, 52, 647-653.

Belgin, E., Aycik, G.A., Kalemtaş, A., Pelit, A., Dilek, D.A., and Kavak, M.T., 2015. Preparation and characterization of a novel ionizing electromagnetic radiation shielding material:Hematite filled polyester based composites. Radiation Physics and Chemistry, 115, 43-48.

Binici, H., Küçükönder, A., Sevinç, A.H., Eken, M., ve Kara, M., 2013. Hafif ve ağır malzemelerin ısı, ses ve radyasyon yalıtım özelliklerinin araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendisik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 113-123.

Büyük, B., 2013. Tungsten, Titanyum, Bor İçeren Bazı Malzemelerin Gama ve Nötron Radyasyonu Karşısındaki Davranışının İncelenmesi, XCom Bilgisayar Programı ile İrdelenmesi ve Yeni Bir Radyasyon Zırh Malzeme Önerisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X., and Zhang W., 2015. Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ-rays radiation shielding. Nuclear Instruments and Methdos in PhysicsResearch B, 356-357, 88-93.

Chen, S., Bourham, M., and Rabiei, A., 2014. Novel light-weight materials for shielding gamma ray. Radiation Physics and Chemistry, 96, 27-37.

Chen, S., Bourham, M., and Rabiei, A., 2015. Neutrons attenuation on composite metal foams and hybrid open-cell Al foam. Radiation Physics and Chemistry, 107, 27-39.

Chen, S., Bourham, M., and Rabiei, A., 2015. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. Radiation Physics and Chemistry, 117, 12-22.

Çevikbaş, G., 2014. Alüminyum Titanat/Spinel'in Radyasyon Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Çağlar, S.İ., 2009. Alüminyum Esaslı Kompozit KöpükÜretimi Ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Çinici, H., 2004. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çinici, H., 2012. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al Esaslı Parçacık Takviyeli Sandviç Metalik Köpük Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Degischer, H.P., and Krizszt, B., 2002. Handbook of Cellular Metals; Production, Processing, Applications. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 3-527-60055-8, 315-319.

Demir, F., 2009. Bor ve Barit Agregalı Ağır Betonların Nötron Parçacıkları, X- ve γ Işınları için Radyasyon Soğurganlıklarının Belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

El-Sayed Abdo, A., 2002. Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields. Annals of Nuclear Energy, 29, 1977–1988.

Eren Belgin, E., Aycik, G.A., Kalemtas, A., Pelit, A., Dilek, D.A., and Kavak, M.T., 2015. Preparation and characterization of a novel ionizing electromagnetic radiation shielding material: Hematite filled polyester based composites. Radiation Physics and Chemistry, 115, 43-48.

García-Moreno, F., 2016. Commercial applications of metal foams: Their properties and production. Materials, 9 (2), 20–24.

Gedik, S., and Baytaş, A.F., 2015. Shielding of gamma radiation by using porous materials. Acta Physıca Polonıca A, 128.

Gergely, V., and Clyne, B., 2000. The FORMGRIP process: Foaming of reinforced metals by gas release in precursors. Advanced Engineering Materials, 2 (4): 175–178.

Harima, Y., 1983. An approximation of gamma ray buildup factors by modified geometrical progression. Nucl. Sci. Eng., 83, 299-309.

Harima, Y., Sakamoto, Y., Tanaka, S., Kawai, and M., 1986. Validity of the geometric progression formula in approximating gamma-ray buildup factors. Nuclear Science and Engineering, 94, 24-35.

Hubbell, J.H., 1989. Document No.NISTIR-4144. National Institute of Standards and Technology Center for Radiation Research.

Ipbüker, C., Nulk, H., Gulik, V., Biland, A., and Tkaczyk, A.H., 2015. Radiation shielding properties of a novel cement–basalt mixture for nuclear energy applications. Nuclear Engineering and Design, 284, 27–37.

Jin, I., Kenney, L. D. and Sang, H., 1990. Method of Producing Lightweight Foamed Metal. United States Patent.

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

Kavaz, E., 2016. 3d ve Bazı 4d Geçiş Metallerinin K X-Işını Şiddet Oranlarının ve XRF Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kavaz, E., 2019. An experimental study on gamma ray shielding features of lithium borate glasses doped with dolomite, hematite and goethite minerals. Radiation Physics and Chemistry, 160, 112-123.

Kaya, D., 2019. Normal Beton ve Özel Amaçlı Betonların Gama Radyasyonunu Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Knoll, G.F., 2002. Radiation Detection and Measurement. University of Michigan, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Krane, K., S., 2002. Nükleer Fizik-II. Palme Yayıncılık, No: 195, 460s. Ankara.

Korkut, T., 2010. Deneysel ve Cern Fluka Monte Carlo Simülasyon Kodu Yöntemleri Kullanılarak 4,5 MeV Enerjili Hızlı Nötronların Borlu Bileşik ve Cevherler Tarafından Yavaşlatılmasına İlişkin Parametrelerin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Levet, A., Kavaz, E., and Özdemir, Y., 2020. An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. Journal of Alloys and Compounds, 819.

Manjunathaguru, V., and Umesh, T.K., 2009. Simple parameterization of photon mass energy absorption coefficients of H-, C-, N- and O- based samples of biological interest in energy range 200-1500 keV. Pramana J. Phys., 72 (2), 375-387.

Manjunatha, H.C., Seenappa, l., B.M, C., Sridhar, K.N., and Hanumantharayappa, C., 2018. Gamma, X-ray and neutron shielding parameters for the Al-based glassy alloys. Aplied Radiation and Isotopes, 139, 187-194.

Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., and Gerward, L., 2008. On the effective atomic number: a comprehensive set of formulas for all types of materials. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B at press.

Mann, K.S., and Mann, S.S., 2021. Py-MLBUF: Development of an online-platform for gamma-ray shielding calculations and investigations. Annals of Nuclear Energy, 150.

Murty, M.V.R., and Cooper, B.H., 1999. Instability in molecular beam epitaxy due to fast edge diffusion and corner diffusion barriers. Phys. Rev. Lett,. 83, 352.

Olarinoye, I.O., Odiaga, R.I., and Paul, S., 2019. EXABCal: A program for calculating photon exposure and energy absorption buildup factors. Heliyon, 5.

Onuklu, E., 2015. Seramik Katkılı Alüminyum Esaslı Köpük Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Oto, B., and Gür, A., 2012. Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. International Journal of Physical Sciences, 8(8), 310-314.

Oto, B., Yıldız, N., Akdemir, F., and Kavaz, E., 2015. Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores. Progress in Nuclear Energy, 85, 391-403.

Özge, Ö., 2019. Kurşun Alaşımının Kütle Azaltma Katsayısının Co-60 Radyoaktif Kaynağı ve Geant4 Simülasyon Programı ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Polat, R., İçelli, O., 2010. Measurement of the effective atomic numbers of compounds with cerium near to the absorption edge. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 615 (2), 201-210.

Rabiei, A., and Garcia-Avila, M., 2013. Effect of various parameters on properties of composite steel foams under variety of loading rates. Materials Science & Engineering A, 564, 539–547.

Sayyed, M.I., Qashou, S.I., and Khattari, Z.Y., 2017. Radiation shielding competence of newly developed TeO_2-WO_3 glasses. Journal of Alloys and Compounds, 696, 632–638.

Shin, J.W., Lee, J.W., Yu, S., Baek, B.K., Hong, J.P., Seo, Y., Kim, W.N., Hong, S.M., and Koo, C.M., 2014. Polyethylene/boron-containing composites for radiations hielding. Thermochimica Acta, 585, 5–9.

Singh, S., Kumar, A., Singh, D., Thind, K., and Mudahar, G.S., 2008. Barium–borate–flyashglasses: As radiation shielding materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 266, 140–146.

Singh, V.P., Badiger, N.M., and Kaewkhao, J., 2014. Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: Comparative study. Journal of Non-Crystalline Solids, 404, 167–173.

Sunar, T., 2019. Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Üretimi ve Özelliklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Tekerek, S., 2019. K, Ca, Br, I ve Sm Bileşiklerinin Toplam Atomik Tesir Kesiti, Toplam Moleküler Tesir Kesiti, Toplam Elektronik Tesir Kesiti, Etkin Atom Numarası ve Etkin Elektron Yoğunluğunun Belirlenmesi. Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Tekin, H.O., Sayyed, M.I., and Issa, A.M., 2018. Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO_3 and Bi_2O_3 micro and nano particles using MCNPX code**.** Radiation Physics and Chemistry, 150, 95–100.

Tiryaki, M., 2016. Köpük Metal Üretimi ve Mekaniksel Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Toprak, G., 2010. Kalsiyum Oksit Partikülleri Üzerine Sulu Çözeltilerde Asit ve Bazların Adsorpsiyonunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Kahramanmaraş.

Türker, M., 2009. Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Köpük Üretimi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

Usta, S., 2012. Nano Titanyum Di Oksit Bor Oksit Doplanması Yapısının ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Uzun, A., Gökmen, U., Çinici, H., Kurnaz, A., and Çetiner, M., 2016. Shielding property of closed-cell AlSi7 foams and AlSi7 bulk materials against gamma rays. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 035701, 722-726.

Vendra, L. J., and Rabiei, A., 2007. A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting. Materials Science and Engineering A, 465, 59–67.

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

Xu, S., Bourham, M., and Rabiei, A., 2010. A novel ultra-light structure for radiation shielding. Materials and Design, 31, 2140–2146.

Xu, Z., and Hao, H., 2014. Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. Journal of Alloys and Compounds, 617, 207–213.

Yaltay, N., Ekinci, C.E., Çakır, T., and Oto, B., 2015. Photon attenuation properties of concrete produced with pumice aggregate and colemanite addition in different rates and the effect of curing age to these propertise. Progress in Nuclear Energy, 78, 25-35.

Yasaka, P., Pattanaboonmee, N., Kim, H.J., Limkitjaroenpron, P., and Kaewkhao, J., 2014. Gamma radiation shielding and optical properties measurements of zinc bismuth borate glasses. Annals of Nuclear Energy, 68, 4–9.

Yıldırım, S., 2011. Farklı Alüminyum Alaşımlarının Cs-137 Gama Radyoizotop Kaynağı Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Yılmaz, A.M., 2019. Az31 Magnezyum Alaşımı Üzerine CeO_2 İlaveli PeO Kaplamaların Korozyon Davranışının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Zaman, E., 2011. Açık Hücreli Alüminyum Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Aslı ARAZ
Doğum tarihi:	25.04.1986
Doğum Yeri:	Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Aliravi Cad. Büyükbahçe Sok. Enis Apt. Kat:2 No:4
Tel:	05313762036
E-mail:	asliaraz25@gmail.com
Eğitim	
Lise:	Nenehatun Kız Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Kazım Karabekir Fakültesi Fizik Öğretmenliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta Üstü (B2)