

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

CoCrFeNiTiAl_x YÜKSEK ENTROPİLİ
ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURETTİN ARPAÇ

DANIŞMAN
PROF. DR. MURAT AYGÜN

MART 2023

BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

CoCrFeNiTiAl_x YÜKSEK ENTROPİLİ
ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURETTİN ARPAÇ
ORCID: 0000-0001-5743-9303

DANIŞMAN
PROF. DR. MURAT AYGÜN

MART 2023

BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim. Hazırlamış olduğum “CoCrFeNiTiAlx Yüksek Entropili Alaşımların Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi” başlıklı tezde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi; tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu; tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi; kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı; bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nurettin ARPAÇ

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ YAZIM KILAVUZU UYGUNLUK BEYANI

“CoCrFeNiTiAl_x Yüksek Entropili Alaşımların Radyasyon Zırlama Parametrelerinin Belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezi Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Nurettin ARPAÇ

Danışman

Prof. Dr. Murat AYGÜN

Fizik Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Yadigar Gülseven SIDİR

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY SAYFASI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı öğrencisi Nurettin ARPAÇ tarafından hazırlanan “CoCrFeNiTiAl_x Yüksek Entropili Alaşımların Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi” adlı Yüksek Lisans ile ilgili tez savunma sınavı, .../.../2023 tarihinde yapılmış ve tezin oy birliği ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

JÜRİ:

İMZA

Danışman: Prof. Dr. Murat AYGÜN

.....

(Bitlis Eren Üniversitesi)

Üye: Prof. Dr. İbrahim HAN

.....

(Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi)

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Zehra Nur KULUÖZTÜRK

.....

(Bitlis Eren Üniversitesi)

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararıyla jüri tarafından kabul edilmiş bu çalışmanın yüksek lisans olarak kabulü onaylanmıştır.

.../.../2023

Doç. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL

Enstitü Müdürü

T.C

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

**CoCrFeNiTiAl_x YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLARIN RADYASYON
ZIRHLAMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Nurettin ARPAÇ

Danışman: Prof. Dr. Murat AYGÜN

Mart 2023

ÖZET

Tez çalışmamızda CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0) yüksek entropili alaşımların kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı, toplam atomik tesir kesiti, etkin elektron yoğunluğu ve etkin atom numarasından oluşan radyasyon zırhlama parametreleri son zamanlarda geliştirilen Phy-X/PSD ve EpiXS yazılımları kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm radyasyon zırhlama parametrelerine ait sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar arasındaki benzerlik ve farklılıklar tartışılmıştır. Bunun sonucunda incelenen alaşımlar içerisinde radyasyon zırhlamada en etkili yüksek entropili alaşım türü gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek Entropili Alaşım, Radyasyon Zırhlama Parametreleri, CoCrFeNiTiAl_x, Phy-X/PSD, EpiXS

Republic of Türkiye
Bitlis Eren University Graduate School
Department of Physics

**DETERMINATION OF RADIATION SHIELDING PARAMETERS OF
CoCrFeNiTiAl_x HIGH ENTROPY ALLOYS**

Master's Thesis

Nurettin ARPAÇ

Supervisor: Prof. Dr. Murat AYGÜN

March 2023

ABSTRACT

In our thesis study, radiation shielding parameters consisting of mass absorption coefficient, linear absorption coefficient, mean free path, half value thickness, total atomic cross section, effective electron density and effective atomic number of CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0) high entropy alloys were calculated by using recently developed Phy-X/PSD and EpiXS software. The results of all radiation shielding parameters obtained were compared with each other and the similarities and differences between the results were discussed. As a result, the most effective high entropy alloy type in radiation shielding was shown among the alloys investigated.

Keywords: High Entropy Alloy, Radiation Shielding Parameters, CoCrFeNiTiAl_x, Phy-X/PSD, EpiXS

TEŞEKKÜR

Bu araştırmayı yapmamda beni yönlendiren, çalışmalarım süresince görüş ve önerilerinden istifade ettiğim değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Murat AYGÜN'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamı hazırlarken her aşamada bana desteğini esirgemeyen değerli eşim Yeşim ARPAÇ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	4
2.1. Radyasyon	4
2.2. İyonlaştırıcı Radyasyon	4
2.2.1. Parçacık Tipi Radyasyonlar	5
2.2.1.1. Alfa Parçacıkları.....	5
2.2.1.2. Beta Parçacıkları	5
2.2.1.3. Nötronlar	6
2.2.2. Dalga Tipi Radyasyonlar	6
2.2.2.1. X-Işınları	6
2.2.2.2. Gama Işınları	7
2.3. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....	8
2.4. Radyasyondan Korunma Yöntemleri.....	8
2.4.1. Mesafe Kuralı.....	9
2.4.2. Zaman Kuralı.....	9
2.4.3. Zırhlama Kuralı.....	9
2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşimleri.....	9
2.5.1. Fotoelektrik Olay	10
2.5.2. Compton Saçılması	11
2.5.3. Çift Oluşum	11

2.6. Radyasyon Soğurma Parametreleri	13
2.6.1. Lineer Soğurma Katsayısı (μ)	13
2.6.2. Kütle Soğurma Katsayısı (μ_m).....	14
2.6.3. Ortalama Serbest Yol (MFP).....	15
2.6.4. Yarı Değer Kalınlığı (HVL).....	15
2.6.5. Toplam Atomik Tesir Kesiti (σ_a).....	16
2.6.6. Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff})	16
2.6.7. Etkin Atom Numarası (Z_{eff}).....	17
2.7. Yüksek Entropili Alaşımlar.....	17
2.8. Phy-X/PSD ve EpiXS Yazılımları	20
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
3.1. Kütle Soğurma Katsayısı.....	22
3.2. Lineer Soğurma Katsayısı	26
3.3. Ortalama Serbest Yol.....	29
3.4. Yarı Değer Kalınlığı.....	32
3.5. Toplam Atomik Tesir Kesiti.....	35
3.6. Etkin Elektron Yoğunluğu	38
3.7. Etkin Atom Numarası.....	41
3.8. Sonuçlarımızın Literatürle Karşılaştırılması.....	44
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Nikel, demir ve kobalt esaslı süper alaşımların sınıflandırılması.....	18
Çizelge 3.1. CoCrFeNiTiAl _x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının kimyasal bileşimi, yoğunluk değerleri ve numune kodları.....	22
Çizelge 3.2. Döküm durumu için MAC değerleri.....	24
Çizelge 3.3. Tavlanmış durumu için MAC değerleri.....	25
Çizelge 3.4. Döküm durumu için LAC değerleri.....	27
Çizelge 3.5. Tavlanmış durumu için LAC değerleri.....	28
Çizelge 3.6. Döküm durumu için MFP değerleri.....	30
Çizelge 3.7. Tavlanmış durumu için MFP değerleri.....	31
Çizelge 3.8. Döküm durumu için HVL değerleri.....	33
Çizelge 3.9. Tavlanmış durumu için HVL değerleri.....	34
Çizelge 3.10. Döküm durumu için ACS değerleri x 10 ⁻²⁴	36
Çizelge 3.11. Tavlanmış durumu için ACS değerleri x 10 ⁻²⁴	37
Çizelge 3.12. Döküm durumu için N _{eff} değerleri x 10 ²³	39
Çizelge 3.13. Tavlanmış durumu için N _{eff} değerleri x 10 ²³	40
Çizelge 3.14. Döküm durumu için Z _{eff} değerleri.....	42
Çizelge 3.15. Tavlanmış durumu için Z _{eff} değerleri.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri	4
Şekil 2.2. Alfa bozunumun temsili bir gösterimi	5
Şekil 2.3. Radyum çekirdeğinin beta bozunumunun temsili bir gösterimi	6
Şekil 2.4. X-ışını oluşumunun temsili bir gösterimi	7
Şekil 2.5. Plütonyum çekirdeğinin gama ışımasının temsili bir gösterimi	8
Şekil 2.6. Elektromanyetik dalga spektrumu	8
Şekil 2.7. Farklı türde radyasyonlar için zırhlama malzemelerinin temsili bir gösterimi.....	9
Şekil 2.8. Fotoelektrik, Compton ve Çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler.....	10
Şekil 2.9. Fotoelektrik olayın temsili bir gösterimi	11
Şekil 2.10. Compton saçılmasının temsili bir gösterimi	12
Şekil 2.11. Çift oluşumun temsili bir gösterimi	13
Şekil 2.12. Yüksek entropili alaşımların kullanılabileceği farklı potansiyel alanlar	19
Şekil 2.13. Phy-X/PSD programının bir görüntüsü	20
Şekil 2.14. EpiXS programının bir görüntüsü.....	21
Şekil 3.1. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MAC değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	26
Şekil 3.2. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan LAC değerlerinin değişimleri.....	29
Şekil 3.3. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MFP değerlerinin değişimleri.....	32
Şekil 3.4. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan HVL değerlerinin değişimleri.....	35

Şekil 3.5. Döküm ve tavllanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan ACS değerlerinin değişimleri	38
Şekil 3.6. Döküm ve tavllanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan N_{eff} değerlerinin değişimleri	41
Şekil 3.7. Döküm ve tavllanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan Z_{eff} değerlerinin değişimleri	44
Şekil 3.8. Döküm ve tavllanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MAC değerlerinin literatürdeki beton (OC), steel-scrap, ilmenite-imonite (Bashter, 1997) ve yüksek entropili $Ti_2VNbMoZr$ alaşımı (Aygün, 2023) değerleriyle karşılaştırılması	45
Şekil 3.9. Döküm ve tavllanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan HVL değerlerinin literatürdeki beton (OC) (Bashter, 1997), mermer tozu (MD) (Aygün, 2021), borojipsin (Aygün ve Aygün, 2023) ve yüksek entropili $Ti_2VNbMoZr$ alaşımı (Aygün, 2023) değerleriyle karşılaştırılması.....	.46

KISALTMALAR DİZİNİ

MFP	: Ortalama Serbest Yol
HVL	: Yarı Değer Kalınlığı
μ_m	: Kütle Soğurma Katsayısı
μ	: Lineer Soğurma Katsayısı
σ_a	: Atomik Tesir Kesiti
σ_e	: Elektron Başına Düşen Etkin Tesir Kesiti
keV	: Kilo Elektron Volt
MeV	: Mega Elektron Volt
N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu
N_A	: Avagadro Sayısı
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası
α	: Alfa Parçacığı
β	: Beta Parçacığı
γ	: Gama Işını

1. GİRİŞ

Radyasyon ya da ışıınım, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar biçimindeki enerji yayımı ya da aktarımıdır. Radyasyon maruz kalınan süreye, şiddetine ve ışıının türüne göre değişiklikler gösterebilmektedir. Radyasyon kullanımı günümüzde hızla artış göstermiş ve hayatımızın dikkat edilmesi gereken bir parçası haline gelmiştir. Radyasyonun tarım, teknoloji, sanayi, tıbbi görüntüleme ve ışıın tedavisi gibi uygulama alanlarının artması tüm canlıların radyasyonun zararlarından korunması gerektiğini gözler önüne sermektedir.

Radyasyonunun zararlı etkileri nesilden nesile aktarılmakta, insanın genetik yapısını bozmakta ve mutasyonla beraber çocukların sakat doğmalarına hatta engelli olarak dünyaya gelmelerine neden olmaktadır. Bu açıdan gerek insanların gerekse doğada bulunan tüm canlıların radyasyonun bu tür zararlı etkilerinden korunması gerekmektedir.

Radyasyondan korunma yöntemlerinden biri radyasyonun etkisini yok edecek ya da azaltacak koruyucu malzemelerin üretilmesidir. Çünkü radyasyon içeren elementlerin çekirdeklerinin kendiliğinden bozunmaya uğraması ile etrafa çok yüksek düzeyde enerji yayınlamakta, ortaya çıkan bu durum insanın anatomik yapısına oldukça zarar vermektedir. Bu durumun çözülmesi elbette yüksek düzeyde radyasyon zırhlama ile pekâlâ mümkündür. Bu açıdan radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için radyasyonun etkisini ya yok edecek ya da azaltacak çeşitli zırhlama malzemeleri bulunmuş, güzel neticelerde alınmış olmasına rağmen halen daha etkili zırhlama malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Koruyucu malzemelerin radyasyon zırhlayıcı özelliklerinin olmasının yanında bazı diğer özelliklere de sahip olmaları gerekmektedir. Örneğin iyi termal kararlılık, yüksek sertlik, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci gibi farklı özellikler aranmaktadır. Bu konu fiziğin önemli ve güncel konularından birisidir.

Yüksek entropili alaşımlar (YEA), Yeh vd. [1] ve Cantor vd. [2] tarafından bağımsız olarak yeni bir alaşım türü olarak önerilmiştir. Bu alaşımlar en az 5 ya da daha fazla elementin bir araya gelerek oluşturdukları alaşımlardır. Yüksek entropili alaşımların diğer alaşımlara göre iyi termal kararlılık, yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci gibi avantajları vardır [2-7]. Bu nedenle yüksek entropili alaşımlar, son yıllarda çok fazla ilgi gören alanlardan biridir.

Yüksek entropili alaşımlar, çok kapsamlı tekniklere ya da araçlara gerek olmadan var olan donanım ve teknoloji ile seri olarak üretilebilirler. Pratik uygulamalarda yaklaşık olarak 30 alaşım türü kullanılmaktadır. Bu kapsamda alüminyum (Al) içeren alaşımlar düşük yoğunluğa ve düşük çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Titanyum (Ti) içeren alaşımlar ortalama yoğunluğa ve yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Nikel (Ni) temelli süper alaşımlar da yüksek yoğunluğa ve yüksek çalışma sıcaklığına sahiptirler. Yüksek entropili alaşımlar, kullanım amacına göre ayarlanabilir ve farklı özelliklere sahip tek bir alaşım elde edilebilir [8,9]. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları şöyledir:

CoCrFeNiTiAl_x yüksek entropili alaşımlar (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) ark ergitme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Döküm sonrası 1000C’de 2 saat tavlama yapıldıktan sonra incelemiştir [10].

CoCrFeNiCuMnSix alaşımı için (x=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1) farklı oranlardaki silisyumun etkisi araştırılmıştır [11].

Lee vd. [12], AlCoCrFeNi yüksek entropili alaşımının mikroyapı gelişimi üzerine yüksek sıcaklık tavlama ve deformasyonun etkisi incelenmiştir.

Xiao vd. [13], AlCoCuFeNi alaşımının mikroyapı, mekanik ve korozyon davranışlarını incelemiştir.

Küçükelyas [14], FeNiCoCu yüksek entropili alaşım nanopartiküllerinin ultrasonik sprey piroliz tekniği ile üretimi ve karakterizasyonunu çalışmıştır.

Mekanik alaşımlama ve spark plazma sinterleme yöntemi kullanılarak elde edilen yüksek entropili AlCuNiFeCr alaşımın yapısal ve mekaniksel özellikleri çalışılmıştır [15].

Anand vd. [16], toz metalurjisi yöntemiyle elde edilen Ti-Al-Ni-Co-Fe tabanlı yüksek entropili alaşımların mikroyapısı ve mekanik özelliklerini çalışmışlardır.

Sarioğlu [17], mekanik alaşımlama ile CoCrFeMnNi ve AgCoCrFeNi yüksek entropi alaşım tozlarının sentezlenmesi ve karakterizasyonunu çalışmıştır.

Radyasyon zayıflatma parametreleri malzemelerin radyasyondan koruma potansiyelleri hakkında önemli bilgiler sağlamakta olup nükleer fiziğin en güncel konularındandır. Literatürde bazı radyasyondan koruyucu malzemelerin radyasyon zayıflatma parametrelerinin belirlenmediği bilinmektedir. Bu kapsamda son zamanlarda

yoğun bir ilgi gören CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0) yüksek entropili alaşımların radyasyon zayıflatma parametrelerinin belirlenmesi önemli olacaktır.

Tezin ana hatları aşağıda verilmiştir:

Bölüm 1'de, yüksek entropili alaşımlar ve bu alaşımların radyasyon zırhlamada kullanımları üzerine yapılmış çalışmalar hakkında kısa bilgiler ve tezin amaçları verilmiştir.

Bölüm 2'de, öncelikle radyasyonun çeşitleri ve radyasyonun madde ile etkileşimleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra radyasyon zırhlamada değerlendirilen parametreler ve bu parametreleri hesaplamada kullanılan programlar açıklanmıştır.

Bölüm 3'de, CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0) yüksek entropili alaşımların, Al elementinin yüzdesine göre döküm (as-cast) ve tavlanmış (as-annealed) olarak kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı, toplam atomik tesir kesiti, etkin elektron yoğunluğu ve etkin atom numarasından oluşan radyasyon zırhlama parametreleri son zamanlarda geliştirilen Phy-X/PSD ve EpiXS yazılımları kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm radyasyon zırhlama parametrelerine ait sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki benzerlik ve farklılıklar tartışılmıştır. Bunun sonucunda radyasyon zırhlamada en etkili yüksek entropili alaşım türü gösterilmiştir.

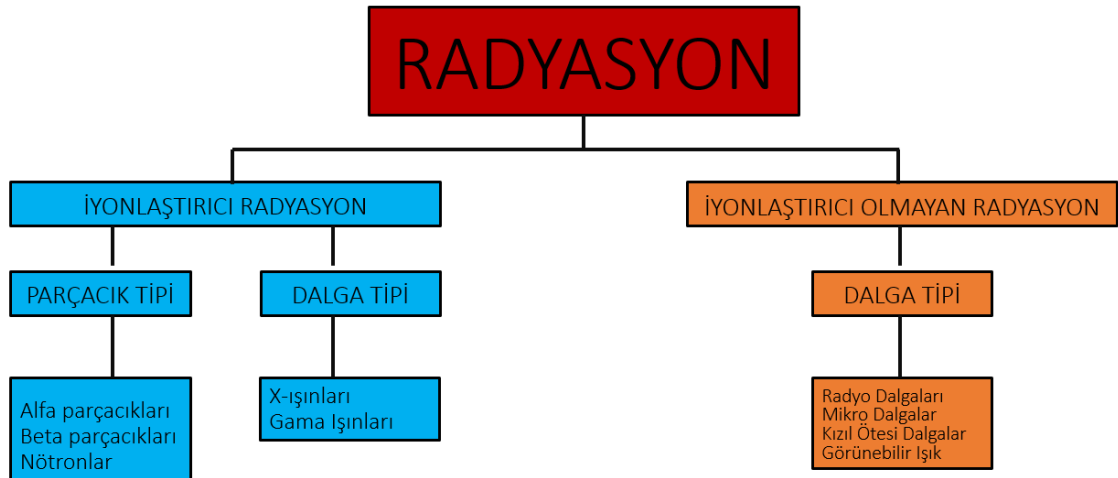
Bölüm 4'de teorik sonuçların genel bir değerlendirmesi yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Radyasyon

Radyasyon, radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale gelebilmek için dışarıya saldıkları elektromanyetik dalga veya parçacık biçimindeki fazla enerjidir. Atom çekirdeğinin kararlı hale geçebilmek için saldığı enerji foton olabileceği gibi kütlesi olan alfa ve beta parçacıkları da olabilir.

Kararlılık vadisinde yerleşen çekirdeklerden hafif çekirdekler için nötron/proton oranı 1 veya 1'e yakın olmaktadır. Ağır çekirdeklere gidildikçe bu oran 1,5 değerine yaklaşmaktadır. Bununla birlikte kendi bulunduğu kararlılık alanı dışında bulunan çekirdeklerin kararsızlığı artacak ve nötron/proton dengesini sağlamak yani daha kararlı hale geçebilmek için yapısına uygun olarak bozunma gerçekleştirecektir. Bu bağlamda açığa çıkan enerji radyasyon olarak adlandırılabilir. Radyasyon, temel olarak Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iyonlaştıracı olan ve iyonlaştıracı olmayan radyasyon olarak iki gruba ayrılabilir.



Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri

2.2. İyonlaştıracı Radyasyon

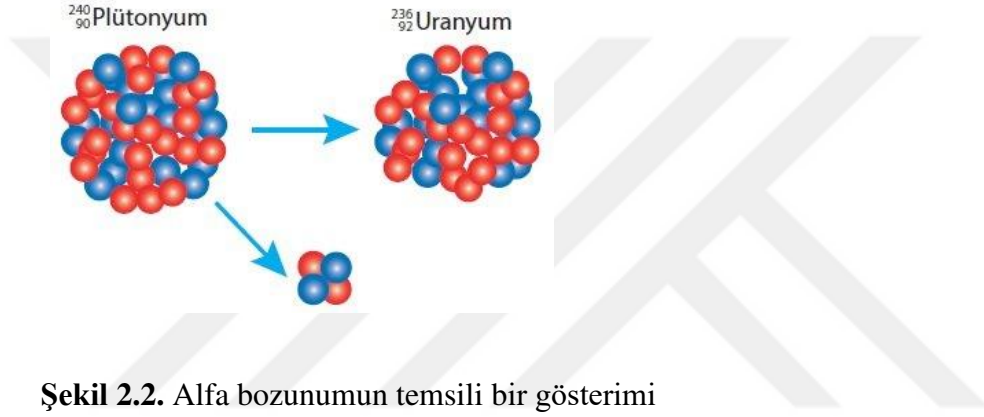
İyonlaştıracı radyasyon nüfus ettiği ortamı iyonlara ayrıştırabilen radyasyona denir. İyonlaştıracı radyasyon, parçacık ve dalga tipi radyasyon olmak üzere ikiye ayrılabilir.

2.2.1. Parçacık Tipi Radyasyonlar

Parçacık özelliğine sahip olan radyasyon türü olup temel olarak alfa (α) parçacıkları, beta (β) parçacıkları ve nötronlar (n) tarafından oluşturulan radyasyondur.

2.2.1.1. Alfa Parçacıkları

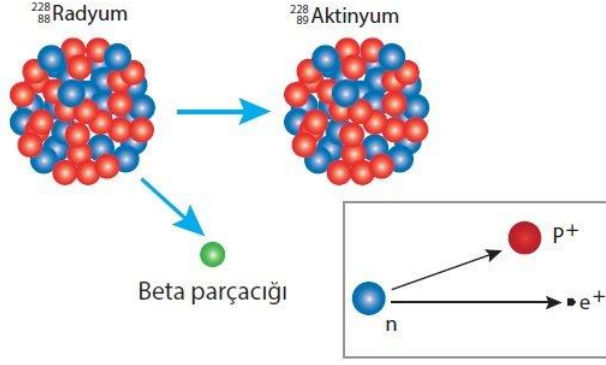
Alfa parçacıkları iki kere iyonlaşmış Helyum atomuna denir. Alfa bozunumu gerçekleştiren bir çekirdeğin kütle numarası 4 atom numarası 2 değer kadar azalmaktadır. Enerjileri 4-8 MeV arasında değişmektedir. İyonlaştırıcı özellikleri oldukça yüksektir. Buna karşın giricilikleri azdır. Öyle ki bir kâğıt yaprağı ya da bir el ile de durdurulabilirler.



Şekil 2.2. Alfa bozunumun temsili bir gösterimi
(<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>)

2.2.1.2. Beta Parçacıkları

Kararsız bir yapıya sahip bir çekirdeğin bu kararsızlığı sahip olduğu proton ya da nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa kararsız çekirdeğin kararlı hale geçerken yaptığı bozunum çeşididir. Işık hızına yakın hızla hareket ederler. İyonlaştırıcı özellikleri alfa parçacıklarına göre düşük ama gama ışınına göre yüksektir. Giricilikleri ise alfa parçacıklarına kıyasla fazla gama ışınlarına göre düşüktür. Öyle ki ince bir alüminyum plaka ile durdurulabilirler.



Şekil 2.3. Radium çekirdeğinin beta bozunumunun temsili bir gösterimi (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>)

2.2.1.3. Nötronlar

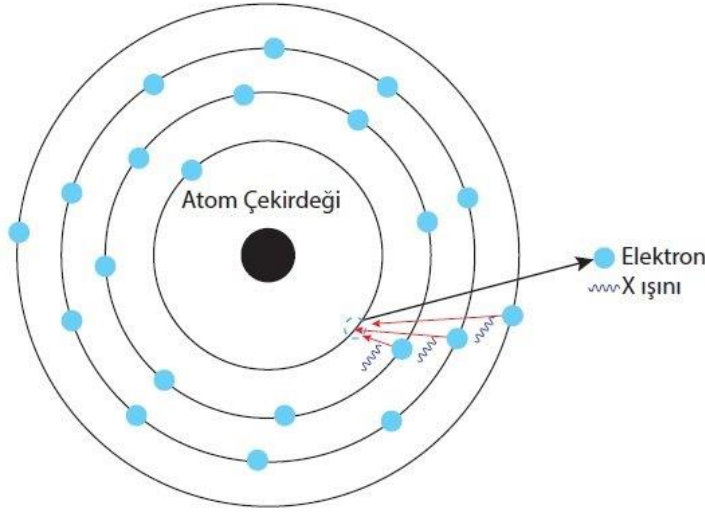
Nötronlar kütleleri yaklaşık olarak bir protonun kütlesine eşit ve elektrik yükleri olmayan parçacıklardır. Yüksüz olmalarından dolayı madde ile etkileşimlerinde Coulomb etkisine maruz kalmazlar ve nüfus etme özellikleri oldukça yüksektir. İyonlaştırıcı özellikleri yok denecek kadar azdır. Nükleer reaksiyonlar ve nükleer reaktörler gibi farklı yöntemlerle elde edilebilirler.

2.2.2. Dalga Tipi Radyasyonlar

Dalga tipi radyasyonlar X-ışınları ve gama ışınlarından oluşan radyasyonlardır. Bu radyasyon türleri yüksek frekanslı ve çok küçük dalga boylarına sahip giricilikleri ve enerjileri yüksektir.

2.2.2.1. X-Işınları

X-ışınları, yüksek enerjiye sahip parçacıkların yavaşlatılması ya da atomun yörüngelerindeki elektron geçişlerinden meydana gelirler. Örneğin, bir atomun çekirdeğine yakın enerji seviyelerinden elektron koparılması ya da çekirdeğin yakınındaki enerji seviyesinden bir elektron yakalaması sonucu oluşan elektron boşluğu diğer enerji düzeylerindeki elektronlar tarafından doldurulur. Bunun sonucunda X-ışınları ortaya çıkar (<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>). 10^{-5} - 10^{-8} m dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalardır. X-ışınları, canlılar üzerinde zarar verici etkiye sahip ışınlardır.



Şekil 2.4. X-ışını oluşumunun temsili bir gösterimi
(<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>)

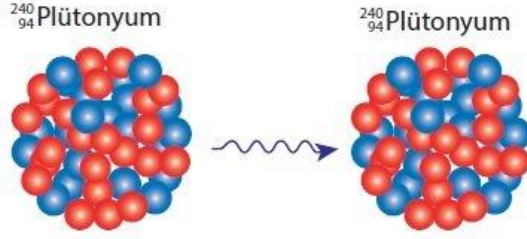
2.2.2.2. Gama Işınları

Bir radyoaktif bozunma (alfa veya beta) sonucu açığa çıkan ürün çekirdek çoğunlukla uyarılmış bir enerji seviyesinde kalır. Uyarılmış enerji seviyesindeki bu çekirdek ikinci bir bozunum yaparak daha düşük bir enerji seviyesine nihayetinde taban enerji seviyesine düşer. Bu süreçte çekirdek tarafından yayınlanan fotona gama (γ) ışıınımı adı verilir ve özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Kütleleri yoktur
- Yüksüzdürler ve elektrik ve manyetik alanlarda sapmazlar
- Yüksek enerjilidirler
- Yüksek giriciliğe sahiptirler
- Etkileştikleri madde içerisinde uzun yol alabilir
- İyonlaştırıcı özellikleri yüksektir.

Gama ışınlarını sağlayan işlemler ise;

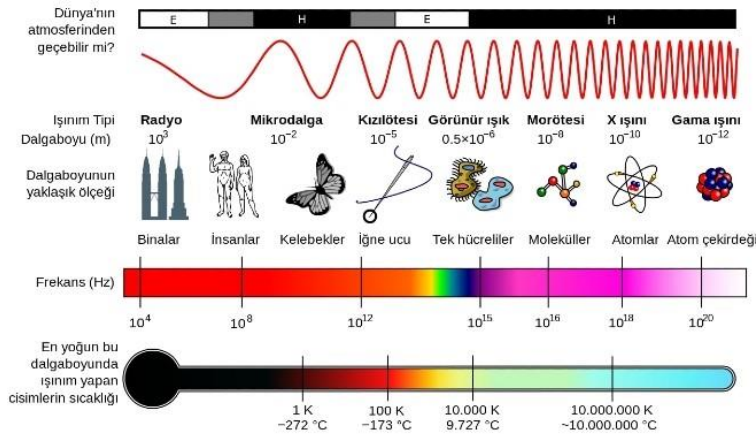
- Bir parçacığın (yüksek enerjili) başka bir parçacıkla çarpışması,
- Bir parçacık ve onun anti parçacığı ile çarpıştırılarak birbirini yok etmesi,
- Radyoaktif bozunma,
- Yüklü parçacıkların ivmelendirilmesi olarak verilebilir [18].



Şekil 2.5. Plütönyum çekirdeğinin gama ışımmasının temsili bir gösterimi
(<https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>)

2.3. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyonun aksine madde ile etkileştiklerinde iyonlaşma sağlamayan böylece etkileştiği atomdan elektron koparabilecek düzeyde enerjiye sahip olmayan radyasyon çeşidine iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir. Radyo dalgaları, mikrodalgalar, mobil ve cep telefonları, radyo FM ve TV vericileri, radarlar bu gruba girmektedir.



Şekil 2.6. Elektromanyetik dalga spektrumu (<https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum>)

2.4. Radyasyondan Korunma Yöntemleri

Radyasyondan korunmada bilinen üç temel unsur; radyasyon kaynağına olan mesafe, radyasyon alanında geçirilen zaman ve radyasyon kaynağının ve bireyin zırhlı olmasıdır.

2.4.1. Mesafe Kuralı

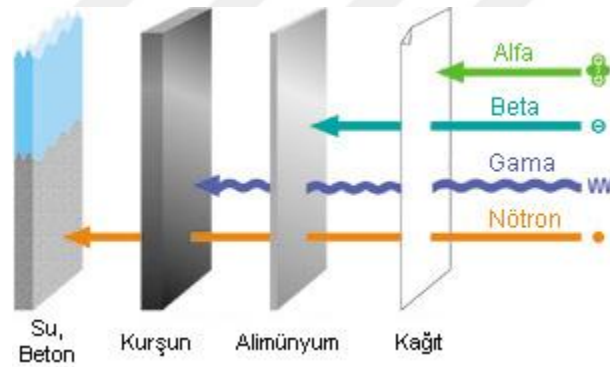
Mesafe kuralı radyasyondan korunma yöntemlerindendir. Bir radyasyon kaynağına göre uzaklık ile maruz kalınan radyasyon miktarı bağlantılıdır. Buna göre radyasyon kaynağından uzaklaştıkça radyasyonun şiddeti azalır ve bu radyasyon kaynağından olan uzaklığın karesiyle ters orantılıdır.

2.4.2. Zaman Kuralı

Radyasyondan korunma yöntemlerinden bir diğeri de radyasyona maruz kalınan sürenin kısa tutulmasıdır. Bu kapsamda radyasyona maruz kalma süresi ne kadar uzarsa alınan radyasyon miktarı da o kadar artacak ve ne kadar kısa olursa o kadar da azalacaktır.

2.4.3. Zırhlama Kuralı

Radyasyondan korunma yöntemlerinden sonuncusu ise gerek radyasyon kaynağının gerek radyasyona maruz kalan kişinin zırhlanmasıdır. Bu kapsamda zırhlama, radyasyon kaynağı ile radyasyona maruz kalan kişilerin kurşun, alaşım, beton, duvar gibi malzemelerle radyasyondan tamamen veya kısmen korunması olayına denir. Bu amaçla kullanılan malzemelere de zırhlama malzemesi denir [19].



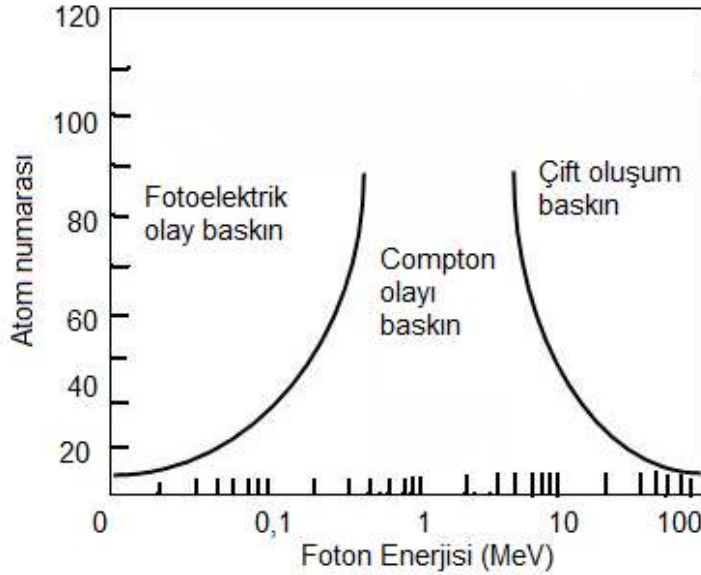
Şekil 2.7. Farklı türde radyasyonlar için zırhlama malzemelerinin temsili bir gösterimi [20]

2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşimleri

Radyasyonun madde ile etkileşiminde gözlenen en temel olaylar:

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşum

olarak sıralanabilir. Fotoelektrik, Compton ve çift oluşum olaylarının enerjiye göre baskın oldukları bölgeler Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Fotoelektrik, Compton ve Çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler [21]

2.5.1. Fotoelektrik Olay

Yeterli enerjiye sahip bir fotonun içerisindeki atomun yörüngesinden bir elektron koparması olayına denir. Böylece foton bütün enerjisini kaybederek elektronu pozitif yüklü çekirdeğin etkisinden kurtarır. Fotoelektrik olay sonucunda koparılan bu elektrona fotoelektron denir. Fotoelektrik olay özellikle 0,5 MeV’den daha az enerjiye sahip fotonların ağır elementler tarafından soğurulmasında önemli bir hale gelmektedir. Fotoelektrik absorpsiyon aynı zamanda içerisinde geçtikleri maddenin atom numarasıyla orantılı olarak değişir ve

$$\frac{Z^5}{E\gamma^2} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilebilir. Fotoelektrik olay esnasında fotona ait enerjinin bir kısmı elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır. Geri kalan enerji ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Bu durumu temsil eden eşitlik

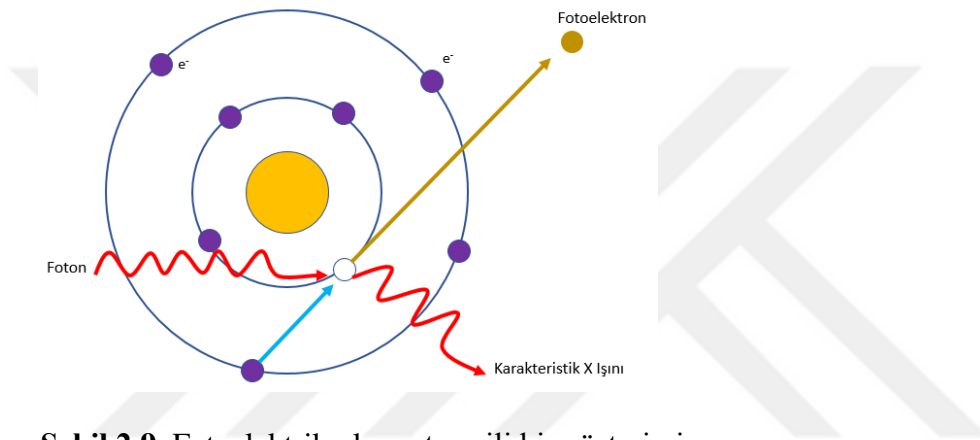
$$h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

olarak verilebilir. Burada;

$h\nu$: gelen fotonun enerjisi,

$h\nu_0$: elektronun koparılması için gerekli olan enerji (iş fonksiyonu),

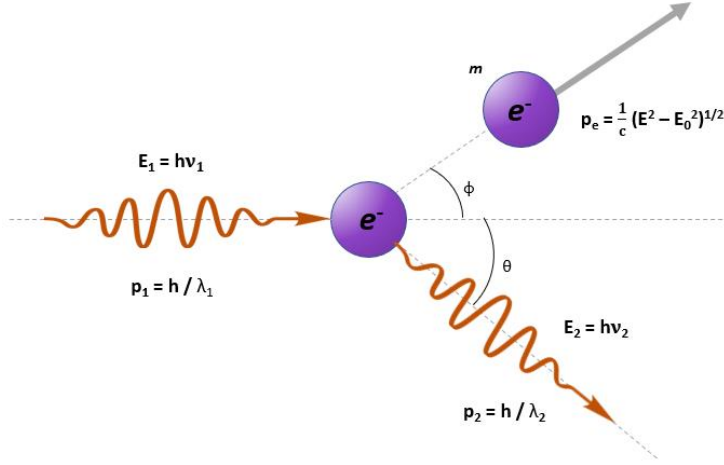
$\frac{1}{2}mv^2$: kopan elektronun kinetik enerjisidir.



Şekil 2.9. Fotoelektrik olayın temsili bir gösterimi

2.5.2. Compton Saçılması

Başlangıç enerjisi E olan foton madde ile etkileştiğinde başlangıçta durgun kabul edilen atomik elektron ile çarpışır. Bunun sonucunda gelen foton başlangıç enerjisinden daha düşük bir E' enerjisine sahip olur ve geliş doğrultusundan farklı bir yönde saçılır. Bu olay sonucunda aynı zamanda bir elektron meydana gelir. Bu olay Compton saçılması olarak adlandırılır. Compton olayında gelen foton enerjisindeki azalma elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Compton olayı 0,5-1 MeV aralığında enerjiye sahip gama ışınlarında oldukça baskındır [22].



Şekil 2.10. Compton saçılmasının temsili bir gösterimi

Compton olayında saçılan fotonun enerjisi, enerji ve momentumun korunumu ilkesinden hareketle

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir [23]. Burada;

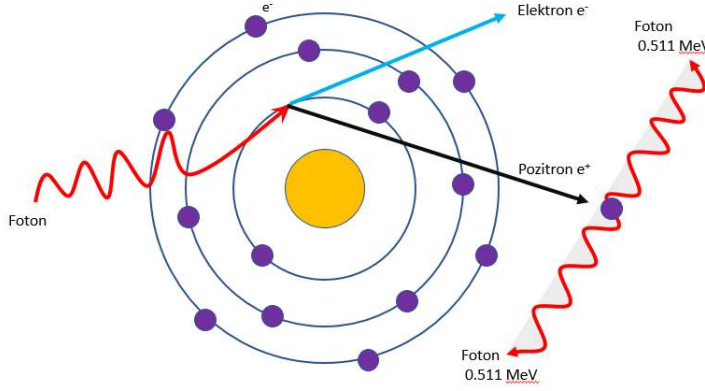
E' : saçılan fotonun enerjisi,

θ : saçılma açısı,

$m_0 c^2$: elektronun durgun kütle enerjisidir.

2.5.3. Çift Oluşum

Belirli bir enerjiye sahip olan foton, çekirdeğin elektromanyetik alanına girdiğinde çekirdekle etkileşip tamamen soğurularak elektron ve pozitrona dönüşüp sahip olduğu enerjisini kütleye dönüştürür. Bu olaya çift oluşum denir. Bu olay gelen gama enerjisi 1,022 MeV'den daha büyük ise gerçekleşmektedir. Bu enerji değerinden büyük enerjilerde 1,022 MeV'den geriye kalan enerji parçacıklara kinetik enerji olarak aktarılır. Benzer şekilde pozitronda atom içerisindeki serbest elektronlarla etkileşip tüm enerjisini kaybedip ters işaretli iki foton yayınlar. Böylece kütle enerjisiye dönüşmüştür.



Şekil 2.11. Çift oluşumun temsili bir gösterimi

2.6. Radyasyon Soğurma Parametreleri

Radyasyondan korunma yöntemlerinden biri radyasyonu iyi soğuran malzemelerin kullanılmasıdır. Bu nedenle yeni üretilen veya üretilecek malzemelerin radyasyon soğurma etkisini belirleyen parametrelerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Tez çalışmamızda radyasyon zırlama parametrelerinden en önemlileri arasında yer alan lineer soğurma katsayısı, kütle soğurma katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı, toplam atomik tesir kesiti, etkin elektron yoğunluğu ve etkin atom numarası incelenecektir.

2.6.1. Lineer Soğurma Katsayısı (μ)

Lineer soğurma katsayısı, herhangi bir türden radyasyona maruz kalan malzemenin birim yüzeyde birim kalınlık başına soğrulan ışıınım miktarına denir. Lineer soğurma katsayısı aynı zamanda kütle soğurma katsayısının hesaplamasında da oldukça önemlidir. Lineer soğurma katsayısı, soğurucu özellik gösteren maddenin atom numarası (Z)'ye ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Lineer soğurma katsayısı aynı zamanda zırlamada değerlendirilen materyalin yoğunluğuna da bağlıdır. Birimi cm^{-1} 'dir.

Gelen fotonun şiddeti dI olmak üzere madde içerisinden geçtiğinde şiddetteki değişim

$$dI = -\mu I dt \quad (2.4)$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dt \quad (2.5)$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^t \mu dt \quad (2.6)$$

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Bu denklem Lambert Beer Yasası olarak bilinir. Buradan lineer soğurma katsayısı çekilirse

$$\mu = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.8)$$

ifadesi elde edilir.

2.6.2. Kütle Soğurma Katsayısı (μ_m)

Kütle soğurma katsayısı, soğurucu materyalin bir foton ile birim kütle başına düşen azalmayı gösteren katsayıdır. Kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısının materyalin yoğunluğuna oranı olarak ifade edilir. Kütle soğurma katsayısı gelen fotonun enerjisine ve soğurucu materyalin yapısına bağlı olmaktadır. Kütle soğurma katsayısı,

$$\mu_m = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho x} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{t_m} \quad (2.9)$$

şeklinde verilebilir. Eşitlikte,

I : etkileşim sonucu çıkan fotonların yoğunluğu

I_0 : etkileşim giren fotonların yoğunluğu

ρ : soğurucu materyalin yoğunluğunu

x : materyalin kalınlığını

$t_m = \frac{m}{A}$: Soğurucu materyalin birim alan başına kütle miktarını ya da materyalin

kütle kalınlığını göstermektedir. Buna ek olarak iki ya da daha fazla elementten oluşan bir kompozit materyal için kütle soğurma katsayısı

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2.10)$$

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i} \quad (2.11)$$

şeklinde verilebilir. Burada;

w_i : materyaldeki i . elementin ağırlıkça kesri

$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$: gelen foton enerjisi için kütle soğurma katsayısı

a_i : materyaldeki i . elementin mol kesri

A_i : materyaldeki i . elementin atomik kütlesidir.

2.6.3. Ortalama Serbest Yol (MFP)

Ortalama serbest yol, foton-madde etkileşimi esnasında madde içerisinde ilerleyen fotonların art arda meydana gelen iki etkileşim arası ortalama mesafe olarak tarif edilir. Ortalama serbest yol,

$$MFP = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (2.12)$$

olarak yazılabilir.

2.6.4. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)

Yarı değer kalınlığı, materyal ile etkileşen fotonun başlangıçta sahip olduğu yoğunluğu yarıya indirmek için gerekli olan materyal kalınlığına denir. Radyasyonun uygulamalarında materyale ait zırlama özelliğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Bu kapsamda gelen bir foton ile etkileşen materyal için yarı değer kalınlığını veren ifade

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.13)$$

şeklindedir. Burada μ materyalin gelen foton için lineer soğurma katsayısıdır.

2.6.5. Toplam Atomik Tesir Kesiti (σ_a)

Radyasyon zırlama parametrelerinden toplam atomik tesir kesiti, bir materyalin toplam kütle soğurma katsayısının, materyalin bir gramındaki toplam atom sayısına oranından belirlenebilmektedir. Toplam atomik tesir kesiti σ_a ile gösterilir ve birimi cm^2/atom 'dur [24]. Toplam atomik tesir kesiti,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_m}{\sum n_i} \quad (2.14)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada σ_m ile gösterilen toplam moleküler tesir kesitidir.

2.6.6. Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff})

Etkin elektron yoğunluğu, birim kütle başına düşen elektron sayısı olarak ifade edilebilir [25]. Etkin elektron yoğunluğu, etkin atom numarası ile bağlantılı olup

$$N_{eff} = \frac{N_A}{M_T (\sum_i n_i A_i)} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

σ_e : toplam elektronik tesir kesiti

N_A : avagadro sayısını

M_T : atomik kütleyi

A_i : alaşımı oluşturan i . elementinin atomik kütlesini

n_i : i . elementin ağırlıkça yüzdesini göstermektedir.

2.6.7. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Etkin atom numarası, gelen radyasyonun materyal ile etkileşimini gösteren bir radyasyon zırhlama parametresi olup soğurulan doz hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu kapsamda, bir materyal birden fazla elementten oluşuyorsa bu materyal etkin atom numarası ile temsil edilmekte olup Z_{eff} ile gösterilir. Büyük etkin atom numarasına sahip maddeler genellikle inorganik bileşikler olup metallere karşılık gelirken, küçük etkin atom numarasına sahip maddeler organik içerikli maddelere karşılık gelmektedir [26]. Etkin atom numarası, medikal fizikte, medikal onkolojide, radyografi ve radyasyon dozimetri hesaplamalarında gereksinim duyulan önemli bir parametredir. Etkin atom numarası,

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (2.16)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir.

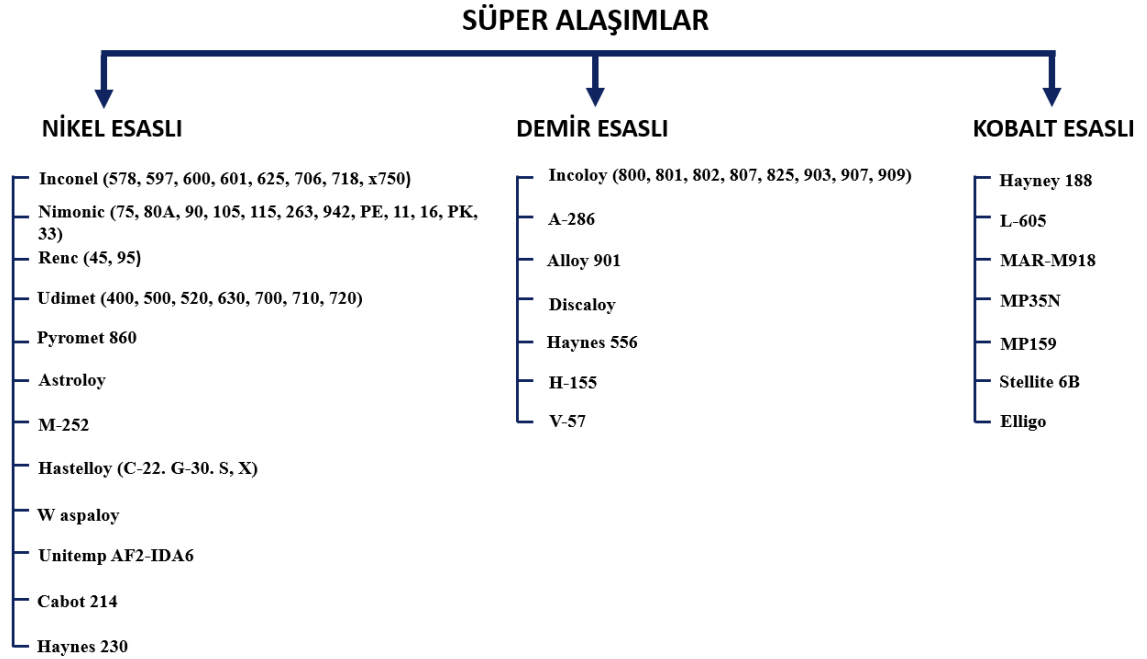
2.7. Yüksek Entropili Alaşımlar

Bir nükleer reaktör ortamında radyasyondan korunma amacıyla kullanılan malzemeler, yüksek radyasyon absorpsiyon kapasitesine, mukavemet ve metalürjik stabilitenin bir birleşimine sahip olmalı ve sıcaklığa, kimyasal korozyona vb. karşı yüksek dirence sahip olmalıdır. Süper alaşımlar gibi daha güçlü yapıya sahip malzemeler bu etkilere dayanabilir ve daha iyi zırhlama, mekanik ve kimyasal performanslar sunabilirler.

Süper alaşımlar ilk kez 1940'lerde dövme yöntemi ile üretilmiş, ileriki zamanlarda ise eş eksenli döküm ile üretilmeye başlanmıştır [27]. İlk üretilen süper alaşım Nimonic 80'dir. Daha sonra bu alaşım geliştirilerek yerini Nimonic 80A almış ve %20 kobalt (Co) ilavesiyle 50°C daha avantajlı durum olan Nimonic 90 üretilmiştir [28]. Nikel bazlı süper alaşımlar teknolojiye en fazla kullanılan alaşımlardandır [29]. Aynı zamanda demir ve kobalt esaslı süper alaşımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Süper alaşımlar, demir, kobalt ya da nikel bazlı ve yüksek oranda krom, düşük oranda da tungsten, molibden, alüminyum ve titanium içeren alaşımlar olarak isimlendirilir [29].

Süper alaşımlar genel olarak, nükleer reaktörlerde, roket motorlarında, jet motorlarında, endüstriyel gaz türbinlerinde, uzay araçlarında, deniz altılarda, cam sanayinde ve ısıya dayanıklı uygulamalarda değerlendirilmektedirler [29]. Süper alaşımların radyasyon zırhlama, mekanik, yapısal ve kimyasal özellikleri son zamanlarda yaygın bir şekilde araştırılmaktadır [30-35].

Çizelge 2.1. Nikel, demir ve kobalt esaslı süper alaşımların sınıflandırılması [36]



Elde edilen süper alaşımlarla birlikte halen yeni malzemelerin önerilmesi ve bunların hem radyasyon zırlama hem de yapısal ve manyetik özelliklerinin kapsamlı olarak incelenmesi önemli beklentiler arasındadır. Böylece var olan süper alaşımlara alternatif ve destekleyici yeni malzemeler dahil edilmesi radyasyon zırlama açısından önemli olacaktır.

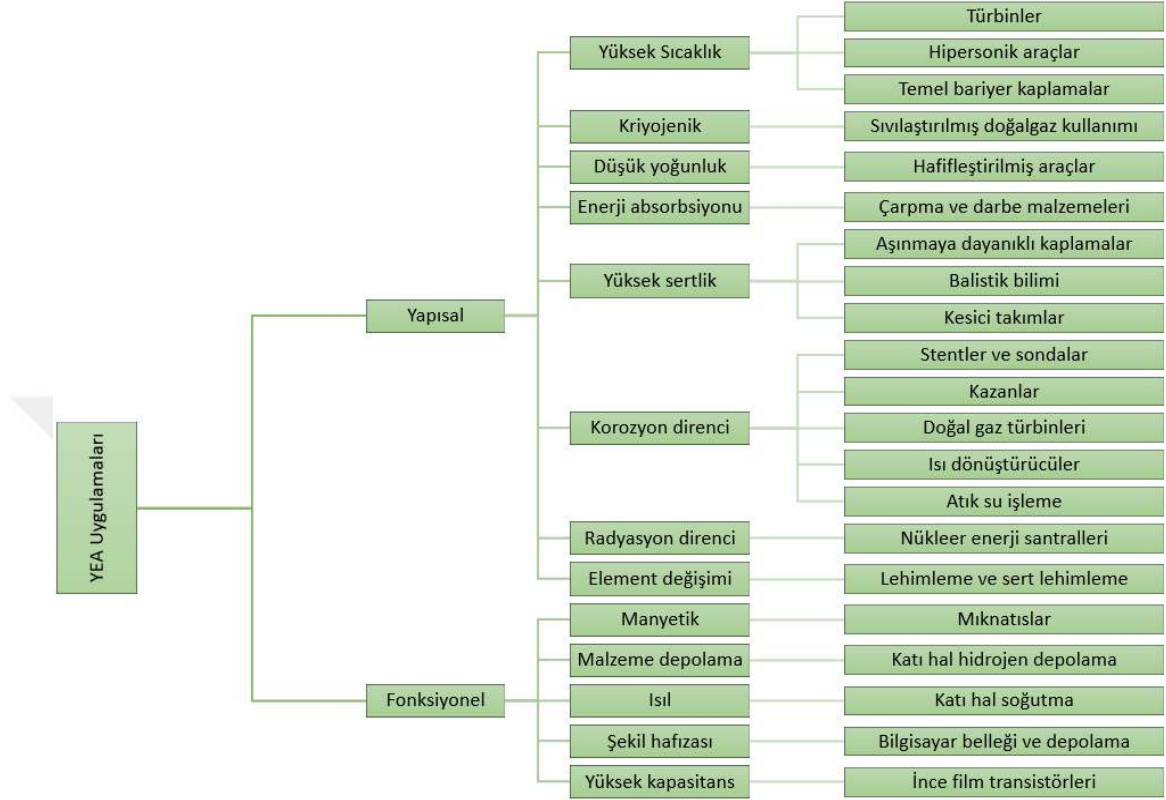
Yüksek entropili alaşım yeni bir alaşımdır ve Yeh vd. [1] ve Cantor vd. [2] tarafından bağımsız olarak gösterilmiştir. Yüksek entropili alaşımlar, 5 veya daha fazla ana element içeren alaşımlar olabilir. Yüksek entropili alaşımların diğer alaşımlara göre iyi termal kararlılık, yüksek sertlik, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci vb. bazı avantajları vardır [2-7]. Yüksek entropili alaşımlar, son yıllarda çok fazla ilgi gören alanlardan biridir.

Çok bileşenli yapıya sahip alaşımlar bir ana elemente dayandırılırlar. Bu kapsamda Al, Fe, Cu, Ni ve Ti bazlı ana elementlerin adını alırlar. Yüksek entropili alaşımları oluşturan her bir element, %5 ila %35 atomik orana sahip olabilmektedir. Aynı zamanda yüksek entropili alaşımlar minör elementler (% 5 den az) içerebilmektedir [37].

Günümüzde literatürde, iki farklı tip ana yüksek entropili alaşımlar bulunabilir. Bunlar:

- i) 3d geçiş elementlerine (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni), Al ilavesi ile üretilen alaşımlar,

ii) Refrakter metallere (Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, V, W ve Zr) üretilen yüksek entropili alaşımlardır. Günümüzde, 600 civarında yüksek entropili alaşımlar tanımlanmıştır [38,39].



Şekil 2.12. Yüksek entropili alaşımların kullanılabileceği farklı potansiyel alanlar [40,41]

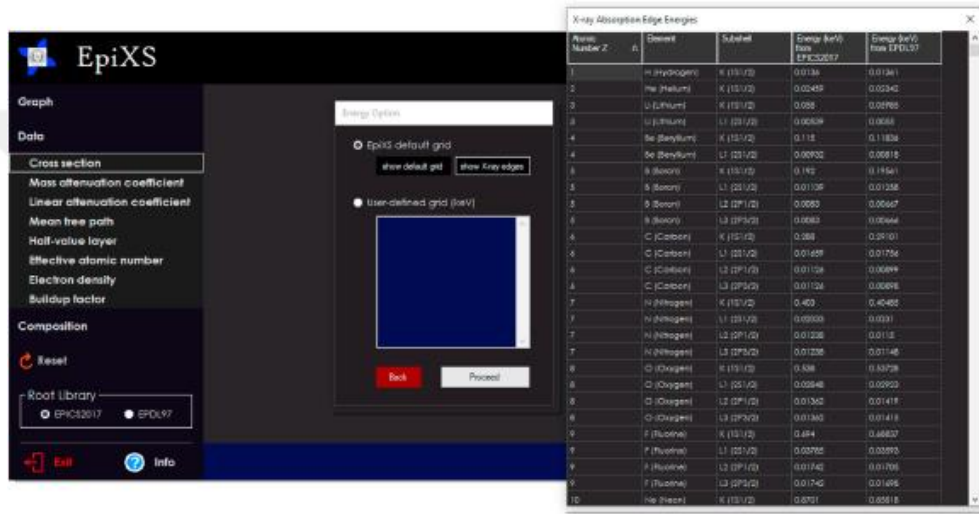
Son zamanlarda CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) yüksek entropili alaşımlar farklı şekillerde değerlendirilmiştir. Zhang vd. [42], alüminyum ilavesinin CoCrFeNiTiAl_x yüksek entropili alaşımların yapıları ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Böylece Al elementinin ilavesi sonucu alaşımların sergiledikleri davranışları bildirmişlerdir. Daha sonra Al içeriğinin döküm ve tavlanmış alaşımların fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etki gösterdiği kaydedilmiştir [10,43]. Ancak, literatürü incelediğimizde CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) alaşımlarının radyasyon koruma parametrelerinin araştırılmadığı fark edilmiştir. Bu nedenle literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi önemli olacaktır.

2.8. Phy-X/PSD ve EpiXS Yazılımları

Parametrelerin elde edilmesinde kullanılacak Phy-X/PSD programı son zamanlarda çok tercih edilen bir çevrimiçi koddur. Malzemelerin kompozisyonlarının ve yoğunluk değerlerinin sisteme girilmesiyle istenilen değerler elde edilebilmektedir [44]. Zırhlama ve dozimetri ile ilgili parametrelerin hesaplanması için <https://phy-x.net/PSD> adresinde bulunan çevrimiçi yazılım kullanılabilir. Yazılım, lineer soğurma katsayısı (LAC), kütle soğurma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onuncu değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Zeff), elektron yoğunluğu (Neff), etkin iletkenlik (Ceff), enerji soğurma yığılma faktörü (EABF), maruz kalma yığılma faktörü (EBF) ile hızlı nötron uzaklaştırma kesiti (FNRCs) hesaplanmasını sağlar. Yazılım, sürekli enerji bölgesinde (1 keV - 100 GeV) ve ayrıca bazı iyi bilinen radyoaktif kaynakların (^{22}Na , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am) enerjileri ve bazı karakteristik (K-kabuğu) X-ışını enerjileri için zırhlama parametreleri hakkında veri üretebilir.

Şekil 2.13. Phy-X/PSD programının bir görüntüsü

EpiXS, Windows tabanlı bir uygulama olup foton zayıflaması, dozimetri ve zırhlama için oluşturulmuştur [45]. EpiXS, ENDF/B-VIII ve ENDF/B-VI.8'in EPDL97'sinin EPICS2017'ye dayanmaktadır. Yazılım, keV ile GeV arasında veri kitaplığı interpolasyonu gerçekleştirir ve kısmi veya toplam tesir kesitleri, kütle soğurma katsayılarını, lineer soğurma katsayılarını, ortalama serbest yolu, yarı değer kalınlığı, etkin atom numarası ve elektron yoğunluk parametrelerini hesaplamaktadır. Kullanıcı dostu bir tasarıma sahiptir ve hızlı etkileşimli grafikler ve veri tabloları gerçekleştirir. EpiXS, iyonlaştırıcı foton radyasyon dozimetrisi ve korumayı içeren anlık hesaplamalar için yeni bir araç olarak tanıtılmıştır.



Şekil 2.14. EpiXS programının bir görüntüsü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmamızda incelenen CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) çok bileşenli alaşımları, Al elementinin yüzdesine göre döküm (as-cast) olarak C1, C2, C3, C4 ve C5 ve tavlanmış (as-annealed) A1, A2, A3, A4 ve A5 olarak kodlanmıştır. Bu kapsamda CoCrFeNiTiAl_x yüksek entropili alaşımların kimyasal bileşimi, yoğunluğu ve numune kodları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının radyasyon zayıflatma parametreleri karşılaştırmalı bir çalışma yapmak için Phy-X/PSD ve EpiXS yazılımları kullanılarak hesaplanmıştır. Phy-X/PSD yazılımı 1 keV - 100 GeV enerji aralığındaki parametreleri hesaplayabilirken, EpiXS kodu 1 keV - 1 GeV enerji aralığındaki parametreleri sağlayabilmektedir. Bundan dolayı tez çalışmamız Phy-X/PSD ve EpiXS hesaplamaları sonucunda elde edilen ortak enerji değerleri için gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının kimyasal bileşimi, yoğunluk değerleri ve numune kodları [43]

Alaşım	Döküm		Tavlanmış	
	Yoğunluk (g/cm ³)	Numune kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Numune kodu
CoCrFeNiTiAl ₀	7.52	C1	7.55	A1
CoCrFeNiTiAl _{0.5}	6.67	C2	6.67	A2
CoCrFeNiTiAl _{1.0}	6.69	C3	6.71	A3
CoCrFeNiTiAl _{1.5}	6.37	C4	6.41	A4
CoCrFeNiTiAl _{2.0}	6.12	C5	6.18	A5

3.1. Kütle Soğurma Katsayısı

Çalışmamızda 1 keV - 1 GeV foton enerji aralığında CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının hem döküm hem de tavlanmış durumları için Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak MAC değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen MAC değerleri döküm durumu için Çizelge 3.2'de ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.3'de verilmiştir. Aynı zamanda tüm durumları içeren MAC değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

MAC değerlerinin davranışlarının birbirlerine benzer olduğu Şekil 3.1'den görülmektedir. MAC değerlerinin hem birincil foton enerjileri hem de alaşımlara ait kimyasal bileşimlerle değiştiği görülmektedir. İncelenen CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) yüksek entropili alaşımlarının MAC değerlerinin düşük enerji bölgesinde en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. En yüksek MAC değerleri ise CoCrFeNiTi

alaşımı için hesaplanmıştır. Öte yandan, en düşük MAC değerleri ise CoCrFeNiTiAl_{2.0} alaşımı için gözlenmiştir. Bu sonuçların kapsamında CoCrFeNiTi alaşımına Al elementinin eklenmesiyle MAC değerlerinin düştüğünü söyleyebiliriz. Böylece, Al içermeyen CoCrFeNiTi alaşımının Al içeren CoCrFeNiTiAl_x malzemelerine göre daha iyi soğurma kapasitesine sahip olduğu sonucuna varabiliriz.

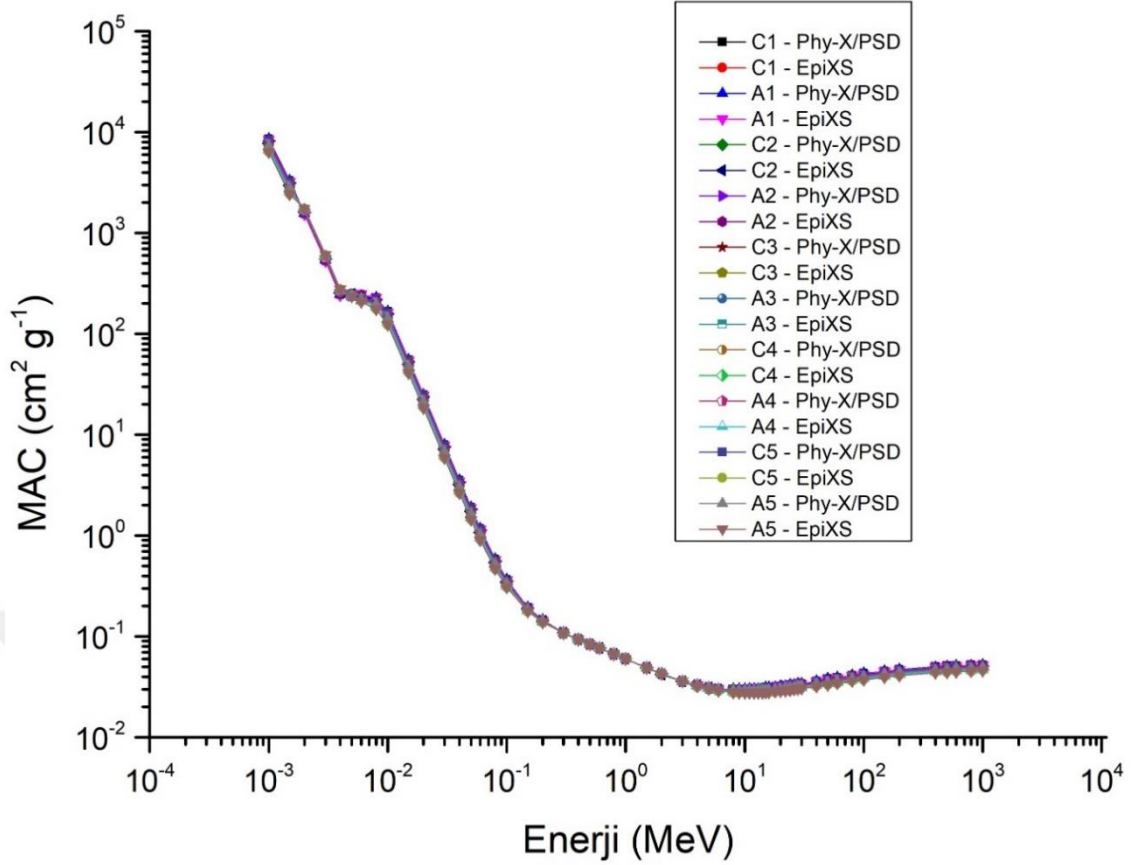


Çizelge 3.2. Döküm durumu için MAC değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy-X/PSD	EpiXS
0,001	8401,877	8419,150	7745,041	7761,460	7196,218	7213,390	6734,470	6749,630	6337,552	6351,610
0,0015	3224,253	3225,290	2967,411	2968,530	2752,818	2754,570	2572,251	2573,530	2417,041	2418,140
0,002	1543,599	1543,440	1608,823	1608,400	1662,806	1662,540	1709,064	1708,340	1748,622	1747,660
0,003	529,238	529,021	552,716	552,620	572,154	572,287	588,800	588,928	603,038	603,210
0,004	243,692	243,381	254,283	254,056	263,050	262,952	270,560	270,479	276,983	276,940
0,005	253,046	251,863	247,598	246,556	243,007	242,133	239,209	238,391	235,929	235,179
0,006	247,207	247,075	235,192	235,097	225,132	225,116	216,701	216,670	209,446	209,421
0,008	226,729	226,474	210,671	210,466	197,126	197,126	185,964	185,838	176,261	176,150
0,01	162,645	162,365	150,227	149,992	139,850	139,681	131,121	130,957	123,617	123,469
0,015	54,299	54,3676	50,081	50,149	46,556	46,6336	43,591	43,6590	41,042	41,1060
0,02	24,429	24,4666	22,519	22,556	20,923	20,9631	19,580	19,6156	18,426	18,4592
0,03	7,777	7,795	7,172	7,189	6,666	6,684	6,241	6,257	5,875	5,890
0,04	3,456	3,467	3,193	3,203	2,973	2,984	2,788	2,798	2,630	2,639
0,05	1,868	1,874	1,732	1,737	1,617	1,623	1,521	1,527	1,439	1,444
0,06	1,152	1,156	1,072	1,076	1,006	1,010	0,950	0,954	0,902	0,905
0,08	0,573	0,574	0,539	0,541	0,511	0,512	0,487	0,489	0,466	0,468
0,1	0,360	0,361	0,343	0,344	0,328	0,329	0,316	0,317	0,306	0,307
0,15	0,193	0,193	0,188	0,188	0,183	0,184	0,180	0,180	0,177	0,177
0,2	0,144	0,144	0,142	0,142	0,140	0,141	0,139	0,139	0,138	0,138
0,3	0,109	0,109	0,109	0,109	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108
0,4	0,094	0,094	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093
0,5	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
0,6	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
0,8	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
1	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
1,5	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
2	0,042	0,042	0,043	0,042	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
3	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
4	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032
5	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030
6	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029
8	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
9	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
10	0,030	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
11	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
12	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
13	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
14	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
15	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
16	0,031	0,031	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028
18	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028
20	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029
22	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029
24	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,029
26	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
28	0,034	0,034	0,032	0,032	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030
30	0,034	0,034	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,031	0,031
40	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034	0,033	0,033	0,032	0,032
50	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034	0,033	0,033
60	0,039	0,039	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034
80	0,041	0,041	0,039	0,039	0,038	0,038	0,037	0,037	0,036	0,036
100	0,042	0,042	0,041	0,041	0,039	0,039	0,038	0,038	0,037	0,037
150	0,045	0,045	0,043	0,043	0,042	0,042	0,041	0,041	0,040	0,040
200	0,046	0,046	0,045	0,045	0,043	0,043	0,042	0,042	0,041	0,041
400	0,048	0,050	0,047	0,048	0,045	0,046	0,044	0,045	0,043	0,044
500	0,050	0,050	0,048	0,048	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,044
600	0,050	0,051	0,048	0,049	0,047	0,047	0,045	0,046	0,044	0,045
800	0,051	0,052	0,049	0,050	0,047	0,047	0,046	0,047	0,045	0,045
1000	0,052	0,052	0,050	0,050	0,048	0,048	0,047	0,047	0,045	0,046

Çizelge 3.3. Tavlanmış durumu için MAC değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	8401,877	8419,150	7745,041	7761,460	7196,218	7213,390	6734,470	6749,63	6337,552	6351,610
0,0015	3224,253	3225,290	2967,411	2968,530	2752,818	2754,570	2572,251	2573,53	2417,041	2418,140
0,002	1543,599	1543,440	1608,823	1608,400	1662,806	1662,540	1709,064	1708,34	1748,622	1747,660
0,003	529,238	529,021	552,716	552,620	572,154	572,287	588,800	588,928	603,038	603,210
0,004	243,692	243,381	254,283	254,056	263,050	262,952	270,560	270,479	276,983	276,940
0,005	253,046	251,863	247,598	246,556	243,007	242,133	239,209	238,391	235,929	235,179
0,006	247,207	247,075	235,192	235,097	225,132	225,116	216,701	216,670	209,446	209,421
0,008	226,729	226,474	210,671	210,466	197,249	197,126	185,964	185,838	176,261	176,150
0,01	162,645	162,365	150,227	149,992	139,850	139,681	131,121	130,957	123,617	123,469
0,015	54,299	54,368	50,081	50,149	46,556	46,634	43,591	43,659	41,042	41,106
0,02	24,429	24,467	22,519	22,556	20,923	20,963	19,580	19,616	18,426	18,459
0,03	7,777	7,795	7,172	7,189	6,666	6,684	6,241	6,257	5,875	5,890
0,04	3,456	3,467	3,193	3,203	2,973	2,984	2,788	2,798	2,630	2,639
0,05	1,868	1,874	1,732	1,737	1,617	1,623	1,521	1,527	1,439	1,444
0,06	1,152	1,156	1,072	1,076	1,006	1,010	0,950	0,954	0,902	0,905
0,08	0,573	0,574	0,539	0,541	0,511	0,512	0,487	0,489	0,466	0,468
0,1	0,360	0,361	0,343	0,344	0,328	0,329	0,316	0,317	0,306	0,307
0,15	0,193	0,193	0,188	0,188	0,183	0,184	0,180	0,180	0,177	0,177
0,2	0,144	0,144	0,142	0,142	0,140	0,141	0,139	0,139	0,138	0,138
0,3	0,109	0,109	0,109	0,109	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108
0,4	0,094	0,094	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093
0,5	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
0,6	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
0,8	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
1	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
1,5	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
2	0,042	0,042	0,043	0,042	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
3	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
4	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032
5	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030
6	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029
8	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
9	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
10	0,030	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
11	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
12	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
13	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
14	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
15	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028
16	0,031	0,031	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028
18	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028
20	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029
22	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029	0,029
24	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,029
26	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
28	0,034	0,034	0,032	0,032	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030
30	0,034	0,034	0,033	0,033	0,032	0,032	0,031	0,031	0,031	0,031
40	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034	0,033	0,033	0,032	0,032
50	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034	0,033	0,033
60	0,039	0,039	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035	0,035	0,034	0,034
80	0,041	0,041	0,039	0,039	0,038	0,038	0,037	0,037	0,036	0,036
100	0,042	0,042	0,041	0,041	0,039	0,039	0,038	0,038	0,037	0,037
150	0,045	0,045	0,043	0,043	0,042	0,042	0,041	0,041	0,040	0,040
200	0,046	0,046	0,045	0,045	0,043	0,043	0,042	0,042	0,041	0,041
400	0,048	0,050	0,047	0,048	0,045	0,046	0,044	0,045	0,043	0,044
500	0,050	0,050	0,048	0,048	0,046	0,047	0,045	0,045	0,044	0,044
600	0,050	0,051	0,048	0,049	0,047	0,047	0,045	0,046	0,044	0,045
800	0,051	0,052	0,049	0,050	0,047	0,048	0,046	0,047	0,045	0,045
1000	0,052	0,052	0,050	0,050	0,048	0,048	0,047	0,047	0,045	0,046



Şekil 3.1. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MAC değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi

3.2. Lineer Soğurma Katsayısı

CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının hem döküm hem de tavlanmış durumları için 1 keV - 1 GeV foton enerji aralığında Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak hesaplanan LAC değerleri döküm durumu için Çizelge 3.4’de ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.5’de verilmiştir. Aynı zamanda tüm durumları içeren LAC değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

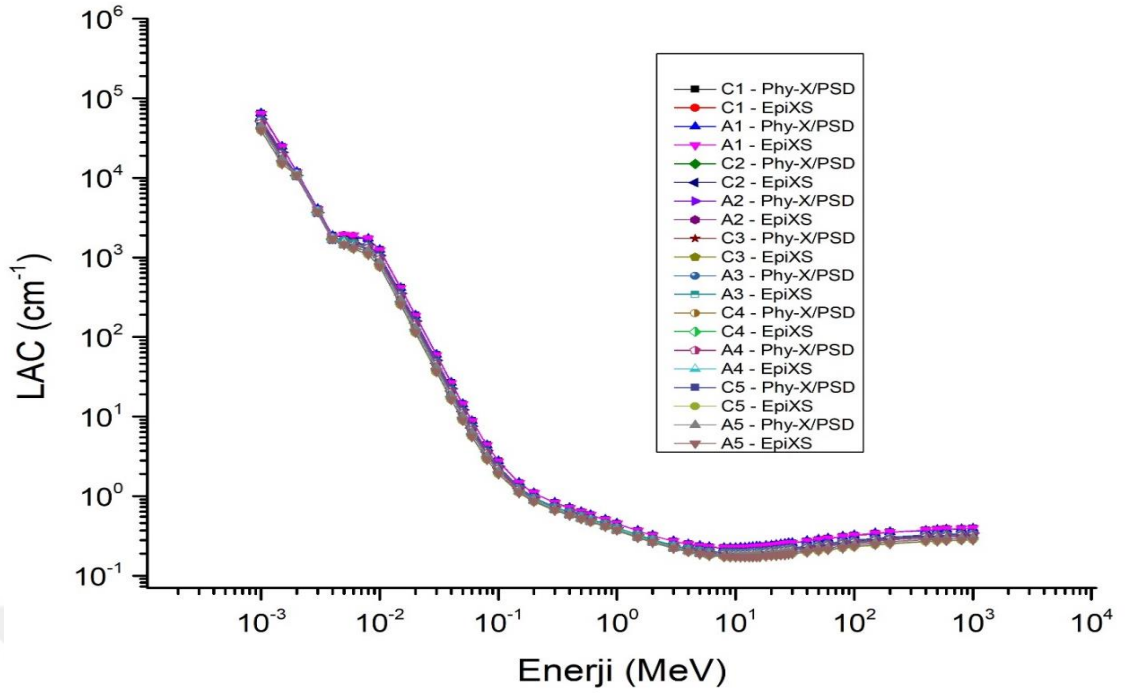
Bilindiği üzere LAC değerleri MAC değerlerinin yoğunluk ile çarpılmasıyla belirlenmektedir. Bu nedenle, Şekil 3.2’den görüleceği üzere LAC değerlerinin enerji ile değişimi, MAC değerlerinin enerji ile değişimine benzerdir. Ayrıca, CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının MAC değerlerinde gözlemlenen davranışa benzer olarak Al elementinin dahil edilmesinin LAC değerlerini düşürdüğünü söyleyebiliriz.

Çizelge 3.4. Döküm durumu için LAC değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	63182	63312	51659	51769	48142	48257	42898	42995	38785	38871
0,0015	24246	24254	19792	19800	18416	18428	16385	16393	14792	14799
0,002	11607	11606	10730	10728	11124	11122	10886	10882	10701	10695
0,003	3979	3978	3686	3685	3827	3828	3750	3751	3690	3691
0,004	1832	1830	1696	1694	1759	1759	1723	1722	1695	1694
0,005	1902	1894	1651	1644	1625	1619	1523	1518	1443	1439
0,006	1858	1858	1568	1568	1506	1506	1380	1380	1281	1281
0,008	1705	1703	1405	1403	1319	1318	1184	1183	1078	1078
0,01	1223	1221	1002	1000	935	934	835	834	756	755
0,015	408	408	334	334	311	312	277	278	251	251
0,02	183	183	150	150	139	140	124	124	112	112
0,03	58,5	58,6	47,8	47,0	44,6	44,7	39,8	39,9	36,0	36,1
0,04	26,0	26,1	21,3	21,0	19,9	20,0	17,8	17,8	16,1	16,2
0,05	14,1	14,1	11,6	11,6	10,8	10,9	9,69	9,72	8,81	8,84
0,06	8,66	8,70	7,15	7,18	6,73	6,76	6,05	6,08	5,52	5,54
0,08	4,31	4,32	3,59	3,61	3,42	3,43	3,10	3,11	2,86	2,86
0,1	2,71	2,72	2,29	2,29	2,20	2,20	2,01	2,02	1,87	1,88
0,15	1,45	1,45	1,25	1,25	1,23	1,23	1,15	1,15	1,08	1,09
0,2	1,08	1,09	0,948	0,950	0,940	0,941	0,886	0,887	0,844	0,845
0,3	0,821	0,821	0,725	0,725	0,724	0,725	0,688	0,688	0,659	0,659
0,4	0,703	0,703	0,623	0,623	0,625	0,625	0,595	0,594	0,571	0,571
0,5	0,630	0,630	0,559	0,559	0,561	0,561	0,535	0,535	0,514	0,514
0,6	0,577	0,577	0,513	0,513	0,515	0,515	0,491	0,491	0,472	0,472
0,8	0,502	0,502	0,446	0,446	0,448	0,448	0,428	0,427	0,411	0,411
1	0,449	0,449	0,400	0,399	0,402	0,401	0,383	0,383	0,369	0,368
1,5	0,366	0,366	0,326	0,325	0,327	0,327	0,312	0,312	0,300	0,300
2	0,320	0,319	0,284	0,283	0,285	0,285	0,272	0,271	0,261	0,261
3	0,271	0,271	0,240	0,240	0,240	0,240	0,229	0,228	0,219	0,219
4	0,247	0,247	0,218	0,218	0,218	0,218	0,207	0,206	0,198	0,198
5	0,235	0,234	0,206	0,206	0,205	0,205	0,195	0,194	0,186	0,186
6	0,228	0,227	0,200	0,199	0,198	0,198	0,187	0,187	0,179	0,178
8	0,222	0,222	0,194	0,194	0,192	0,192	0,181	0,180	0,172	0,171
9	0,222	0,221	0,193	0,193	0,191	0,190	0,179	0,179	0,170	0,170
10	0,222	0,222	0,193	0,193	0,190	0,190	0,179	0,178	0,170	0,169
11	0,223	0,223	0,194	0,193	0,191	0,190	0,179	0,178	0,169	0,169
12	0,224	0,224	0,194	0,194	0,191	0,191	0,179	0,179	0,170	0,169
13	0,225	0,225	0,195	0,195	0,192	0,192	0,180	0,179	0,170	0,170
14	0,227	0,227	0,196	0,196	0,193	0,193	0,180	0,180	0,171	0,170
15	0,229	0,228	0,198	0,197	0,194	0,194	0,181	0,181	0,171	0,171
16	0,231	0,230	0,199	0,199	0,195	0,195	0,182	0,182	0,172	0,172
18	0,234	0,234	0,202	0,202	0,198	0,198	0,185	0,184	0,174	0,174
20	0,238	0,238	0,205	0,205	0,201	0,200	0,187	0,187	0,176	0,176
22	0,242	0,241	0,208	0,208	0,203	0,203	0,189	0,189	0,178	0,178
24	0,245	0,245	0,211	0,211	0,206	0,206	0,192	0,192	0,181	0,180
26	0,249	0,249	0,214	0,214	0,209	0,209	0,194	0,194	0,183	0,183
28	0,252	0,252	0,217	0,217	0,211	0,211	0,197	0,196	0,185	0,185
30	0,256	0,255	0,219	0,219	0,214	0,214	0,199	0,199	0,187	0,187
40	0,270	0,270	0,231	0,231	0,225	0,225	0,209	0,209	0,196	0,196
50	0,282	0,282	0,241	0,241	0,235	0,234	0,217	0,217	0,204	0,204
60	0,292	0,291	0,249	0,249	0,242	0,242	0,225	0,224	0,211	0,211
80	0,307	0,307	0,262	0,262	0,255	0,255	0,236	0,236	0,221	0,221
100	0,318	0,318	0,272	0,272	0,264	0,264	0,244	0,244	0,229	0,229
150	0,338	0,337	0,288	0,288	0,280	0,280	0,259	0,259	0,242	0,242
200	0,350	0,349	0,298	0,298	0,289	0,289	0,268	0,268	0,251	0,251
400	0,364	0,372	0,311	0,318	0,301	0,308	0,279	0,285	0,261	0,267
500	0,373	0,378	0,318	0,323	0,308	0,313	0,285	0,289	0,267	0,271
600	0,378	0,382	0,323	0,326	0,313	0,316	0,289	0,293	0,271	0,274
800	0,382	0,388	0,326	0,331	0,316	0,321	0,293	0,297	0,274	0,278
1000	0,388	0,391	0,331	0,334	0,321	0,324	0,297	0,300	0,278	0,281

Çizelge 3.5. Tavlanmış durumu için LAC değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	63434	63564	51659	51769	48286	48401	43167	43265	39166	39253
0,0015	24343	24350	19792	19800	18471	18483	16488	16496	14937	14944
0,002	11654	11653	10730	10728	11157	11155	10955	10950	10806	10800
0,003	3995	3994	3686	3685	3839	3840	3774	3775	3726	3727
0,004	1839	1837	1696	1694	1765	1764	1734	1733	1711	1711
0,005	1910	1901	1651	1644	1630	1624	1533	1528	1458	1453
0,006	1866	1865	1568	1568	1510	1510	1389	1388	1294	1294
0,008	1711	1709	1405	1403	1323	1322	1192	1191	1089	1088
0,01	1227	1225	1002	1000	938	937	840	839	763	763
0,015	410	410	334	334	312	312	279	279	253	254
0,02	184	184	150	150	140	140	125	125	113	114
0,03	58,7	58,9	47,8	48,0	44,7	44,9	40,0	40,1	36,3	36,4
0,04	26,1	26,2	21,3	21,4	20,0	20,0	17,9	18,0	16,3	16,3
0,05	14,1	14,2	11,6	11,6	10,9	10,9	9,75	9,79	8,89	8,92
0,06	8,70	8,73	7,15	7,18	6,75	6,78	6,09	6,11	5,57	5,59
0,08	4,32	4,34	3,59	3,61	3,43	3,44	3,12	3,13	2,88	2,89
0,1	2,72	2,73	2,29	2,29	2,20	2,21	2,03	2,03	1,89	1,89
0,15	1,45	1,46	1,25	1,25	1,23	1,23	1,15	1,16	1,09	1,10
0,2	1,09	1,09	0,948	0,950	0,943	0,944	0,892	0,893	0,852	0,853
0,3	0,824	0,824	0,725	0,725	0,726	0,727	0,692	0,692	0,666	0,666
0,4	0,706	0,706	0,623	0,623	0,627	0,627	0,598	0,598	0,577	0,576
0,5	0,633	0,632	0,559	0,559	0,563	0,563	0,538	0,538	0,519	0,519
0,6	0,580	0,579	0,513	0,513	0,516	0,516	0,494	0,494	0,476	0,476
0,8	0,504	0,504	0,446	0,446	0,450	0,449	0,430	0,430	0,415	0,415
1	0,451	0,451	0,400	0,399	0,403	0,402	0,385	0,385	0,372	0,372
1,5	0,368	0,367	0,326	0,325	0,328	0,328	0,314	0,314	0,303	0,303
2	0,321	0,320	0,284	0,283	0,286	0,285	0,273	0,273	0,264	0,263
3	0,272	0,272	0,240	0,240	0,241	0,241	0,230	0,230	0,222	0,221
4	0,248	0,248	0,218	0,218	0,219	0,218	0,208	0,208	0,200	0,200
5	0,236	0,235	0,206	0,206	0,206	0,206	0,196	0,195	0,188	0,187
6	0,229	0,228	0,200	0,199	0,199	0,199	0,188	0,188	0,180	0,180
8	0,223	0,223	0,194	0,194	0,192	0,192	0,182	0,181	0,173	0,173
9	0,223	0,222	0,193	0,193	0,191	0,191	0,180	0,180	0,172	0,172
10	0,223	0,223	0,193	0,193	0,191	0,191	0,180	0,180	0,171	0,171
11	0,224	0,223	0,194	0,193	0,191	0,191	0,180	0,180	0,171	0,171
12	0,225	0,225	0,194	0,194	0,192	0,191	0,180	0,180	0,171	0,171
13	0,226	0,226	0,195	0,195	0,192	0,192	0,181	0,180	0,172	0,171
14	0,228	0,228	0,196	0,196	0,193	0,193	0,181	0,181	0,172	0,172
15	0,230	0,229	0,198	0,197	0,195	0,194	0,182	0,182	0,173	0,173
16	0,231	0,231	0,199	0,199	0,196	0,196	0,183	0,183	0,174	0,174
18	0,235	0,235	0,202	0,202	0,198	0,198	0,186	0,186	0,176	0,176
20	0,239	0,239	0,205	0,205	0,201	0,201	0,188	0,188	0,178	0,178
22	0,243	0,242	0,208	0,208	0,204	0,204	0,191	0,190	0,180	0,180
24	0,246	0,246	0,211	0,211	0,207	0,207	0,193	0,193	0,182	0,182
26	0,250	0,250	0,214	0,214	0,209	0,209	0,195	0,195	0,185	0,184
28	0,253	0,253	0,217	0,217	0,212	0,212	0,198	0,198	0,187	0,187
30	0,257	0,256	0,219	0,219	0,215	0,214	0,200	0,200	0,189	0,189
40	0,271	0,271	0,231	0,231	0,226	0,226	0,210	0,210	0,198	0,198
50	0,283	0,283	0,241	0,241	0,235	0,235	0,219	0,219	0,206	0,206
60	0,293	0,293	0,249	0,249	0,243	0,243	0,226	0,226	0,213	0,213
80	0,308	0,308	0,262	0,262	0,255	0,255	0,237	0,237	0,223	0,223
100	0,320	0,320	0,272	0,272	0,265	0,265	0,246	0,246	0,231	0,231
150	0,339	0,339	0,288	0,288	0,280	0,280	0,260	0,260	0,245	0,245
200	0,351	0,351	0,298	0,298	0,290	0,290	0,269	0,269	0,253	0,253
400	0,365	0,374	0,311	0,318	0,302	0,309	0,280	0,287	0,263	0,270
500	0,374	0,380	0,318	0,323	0,309	0,314	0,287	0,291	0,270	0,274
600	0,380	0,384	0,323	0,326	0,314	0,317	0,291	0,294	0,274	0,277
800	0,384	0,389	0,326	0,331	0,317	0,322	0,294	0,299	0,277	0,281
1000	0,389	0,393	0,331	0,334	0,322	0,325	0,299	0,302	0,281	0,283



Şekil 3.2. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan LAC değerlerinin değişimleri

3.3. Ortalama Serbest Yol

Tez çalışmamızda 1 keV - 1 GeV arasındaki foton enerji aralığında CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının hem döküm hem de tavlanmış durumları için Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak MFP değerleri hesaplanmış, döküm durumu için Çizelge 3.6'da ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.7'de verilmiştir. Bununla birlikte tüm durumlara ait MFP değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

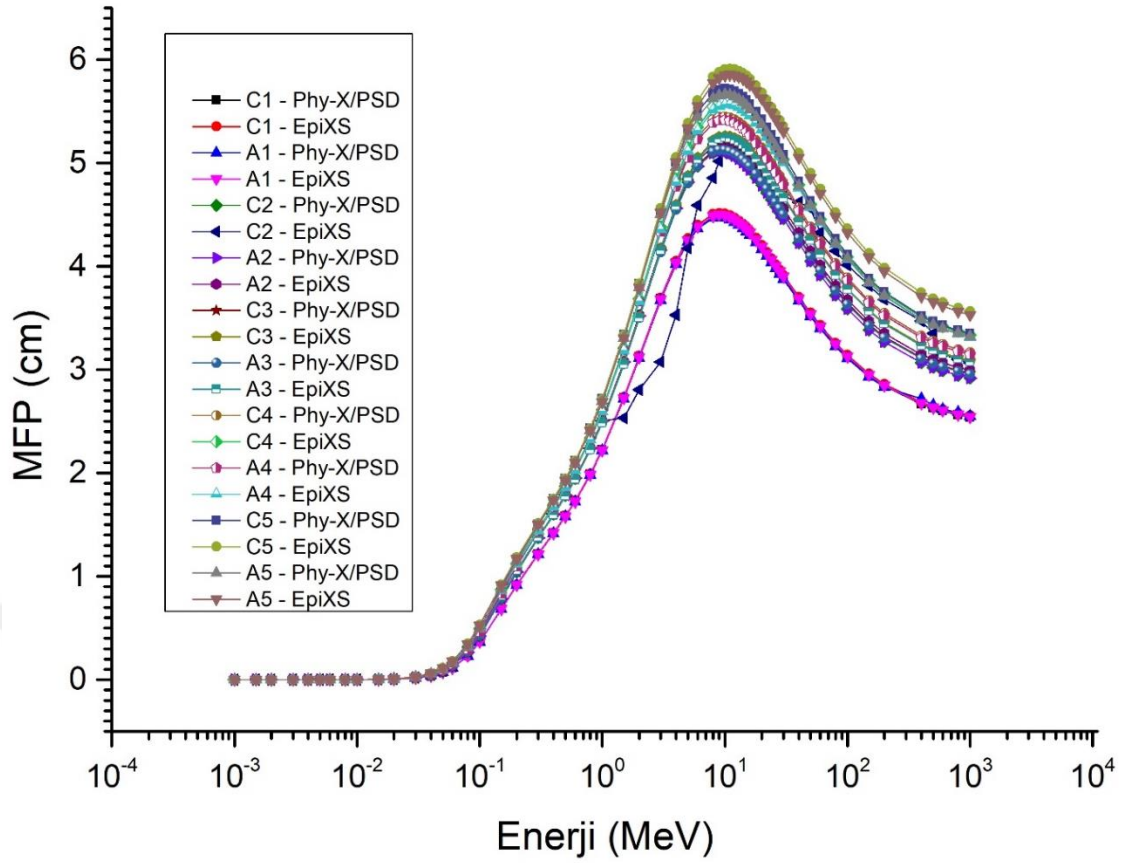
MFP parametreleri, radyasyonların malzemelere nüfuz etme kabiliyeti hakkında bilgi sağlayabilir. Orta enerji bölgesinde Compton saçılması baskındır ve absorpsiyon olasılıkları daha düşüktür. Bu nedenle, daha uzun MFP değerleri için daha kalın malzemelere ihtiyaç vardır. Düşük enerji bölgesinde MFP değerlerinin sıfıra yakın olduğu görülmüştür. Daha sonra MFP değerleri orta enerji bölgesinde ani bir artış göstermiştir. CoCrFeNiTi alaşımına Al elementinin eklenmesiyle MFP değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla CoCrFeNiTi'nin incelenen alaşımlar arasında en iyi zırhlama potansiyeline sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 3.6. Döküm durumu için MFP değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,015	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
0,02	0,005	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009
0,03	0,017	0,017	0,021	0,021	0,022	0,022	0,025	0,025	0,028	0,028
0,04	0,038	0,038	0,047	0,047	0,050	0,050	0,056	0,056	0,062	0,062
0,05	0,071	0,071	0,087	0,086	0,092	0,092	0,103	0,103	0,114	0,113
0,06	0,115	0,115	0,140	0,139	0,149	0,148	0,165	0,165	0,181	0,180
0,08	0,232	0,231	0,278	0,277	0,293	0,292	0,322	0,321	0,350	0,349
0,1	0,370	0,368	0,438	0,436	0,455	0,454	0,497	0,495	0,535	0,533
0,15	0,690	0,689	0,799	0,798	0,815	0,813	0,872	0,871	0,924	0,922
0,2	0,922	0,921	1,054	1,053	1,064	1,062	1,129	1,127	1,185	1,184
0,3	1,219	1,219	1,380	1,380	1,381	1,380	1,454	1,454	1,517	1,517
0,4	1,422	1,422	1,604	1,605	1,601	1,601	1,682	1,682	1,751	1,752
0,5	1,587	1,588	1,788	1,789	1,782	1,782	1,871	1,871	1,946	1,946
0,6	1,732	1,733	1,950	1,951	1,943	1,943	2,038	2,038	2,119	2,120
0,8	1,991	1,993	2,241	2,242	2,230	2,232	2,339	2,340	2,431	2,432
1	2,225	2,228	2,502	2,505	2,490	2,492	2,610	2,613	2,713	2,715
1,5	2,732	2,735	3,072	2,533	3,057	3,060	3,205	3,208	3,330	3,334
2	3,129	3,135	3,523	2,806	3,509	3,513	3,680	3,685	3,827	3,832
3	3,690	3,697	4,167	3,076	4,162	4,168	4,375	4,382	4,558	4,565
4	4,043	4,051	4,582	3,528	4,589	4,596	4,836	4,845	5,050	5,058
5	4,262	4,271	4,846	4,175	4,867	4,875	5,141	5,151	5,378	5,389
6	4,393	4,402	5,009	4,591	5,043	5,051	5,339	5,348	5,596	5,606
8	4,500	4,508	5,156	4,856	5,213	5,220	5,538	5,547	5,823	5,832
9	4,509	4,517	5,177	5,019	5,242	5,250	5,578	5,586	5,872	5,881
10	4,504	4,511	5,179	5,165	5,252	5,259	5,596	5,604	5,898	5,906
11	4,486	4,494	5,167	5,186	5,247	5,255	5,596	5,605	5,904	5,914
12	4,464	4,470	5,148	5,187	5,233	5,239	5,587	5,594	5,900	5,907
13	4,436	4,442	5,122	5,176	5,212	5,218	5,570	5,576	5,886	5,893
14	4,404	4,411	5,091	5,155	5,185	5,192	5,545	5,553	5,864	5,872
15	4,372	4,378	5,058	5,129	5,156	5,161	5,517	5,524	5,838	5,845
16	4,338	4,343	5,022	5,098	5,123	5,128	5,486	5,492	5,809	5,815
18	4,269	4,274	4,949	5,064	5,055	5,059	5,419	5,425	5,743	5,749
20	4,201	4,206	4,877	5,028	4,986	4,991	5,350	5,356	5,675	5,681
22	4,136	4,141	4,806	4,955	4,918	4,922	5,281	5,286	5,605	5,611
24	4,074	4,079	4,738	4,882	4,852	4,856	5,214	5,218	5,537	5,542
26	4,017	4,021	4,674	4,811	4,790	4,793	5,149	5,154	5,472	5,476
28	3,962	3,967	4,614	4,743	4,731	4,734	5,088	5,093	5,409	5,414
30	3,912	3,916	4,558	4,679	4,675	4,678	5,031	5,035	5,350	5,354
40	3,704	3,707	4,323	4,619	4,441	4,443	4,786	4,789	5,096	5,099
50	3,549	3,552	4,146	4,562	4,264	4,266	4,599	4,601	4,900	4,903
60	3,430	3,432	4,010	4,326	4,126	4,128	4,453	4,455	4,747	4,749
80	3,258	3,260	3,812	4,149	3,926	3,927	4,239	4,241	4,522	4,524
100	3,141	3,142	3,677	4,012	3,788	3,788	4,092	4,093	4,366	4,368
150	2,962	2,963	3,470	3,814	3,576	3,576	3,865	3,866	4,126	4,127
200	2,860	2,862	3,351	3,679	3,455	3,455	3,735	3,735	3,988	3,988
400	2,684	2,685	3,146	3,471	3,244	3,244	3,507	3,508	3,746	3,746
500	2,644	2,645	3,098	3,352	3,195	3,195	3,455	3,455	3,689	3,690
600	2,615	2,616	3,065	3,147	3,161	3,161	3,418	3,418	3,650	3,650
800	2,578	2,578	3,021	3,099	3,116	3,115	3,369	3,369	3,598	3,598
1000	2,554	2,555	2,993	3,066	3,087	3,086	3,338	3,337	3,565	3,564

Çizelge 3.7. Tavlanmış durumu için MFP değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,015	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
0,02	0,005	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009
0,03	0,017	0,017	0,021	0,021	0,022	0,022	0,025	0,025	0,028	0,028
0,04	0,038	0,038	0,047	0,047	0,050	0,050	0,056	0,056	0,062	0,061
0,05	0,071	0,071	0,087	0,086	0,092	0,092	0,103	0,102	0,112	0,112
0,06	0,115	0,115	0,140	0,139	0,148	0,148	0,164	0,164	0,179	0,179
0,08	0,231	0,231	0,278	0,277	0,292	0,291	0,320	0,319	0,347	0,346
0,1	0,368	0,367	0,438	0,436	0,454	0,453	0,494	0,492	0,529	0,528
0,15	0,688	0,686	0,799	0,798	0,812	0,811	0,867	0,865	0,915	0,913
0,2	0,918	0,918	1,054	1,053	1,061	1,059	1,121	1,120	1,173	1,172
0,3	1,214	1,214	1,380	1,380	1,377	1,376	1,445	1,445	1,503	1,502
0,4	1,416	1,417	1,604	1,605	1,596	1,596	1,671	1,672	1,734	1,735
0,5	1,581	1,581	1,788	1,789	1,777	1,777	1,859	1,859	1,927	1,928
0,6	1,726	1,726	1,950	1,951	1,937	1,937	2,025	2,026	2,099	2,099
0,8	1,984	1,986	2,241	2,243	2,224	2,225	2,324	2,325	2,407	2,409
1	2,216	2,219	2,502	2,505	2,483	2,485	2,594	2,597	2,687	2,689
1,5	2,721	2,724	3,072	3,076	3,048	3,051	3,185	3,188	3,298	3,301
2	3,117	3,122	3,523	3,528	3,498	3,503	3,657	3,662	3,790	3,795
3	3,676	3,682	4,167	4,175	4,149	4,155	4,348	4,354	4,514	4,521
4	4,027	4,035	4,582	4,591	4,575	4,583	4,806	4,814	5,001	5,009
5	4,245	4,254	4,846	4,856	4,852	4,861	5,109	5,118	5,326	5,336
6	4,376	4,384	5,009	5,019	5,028	5,036	5,306	5,315	5,542	5,551
8	4,482	4,490	5,156	5,165	5,197	5,204	5,504	5,512	5,766	5,775
9	4,491	4,499	5,177	5,186	5,227	5,234	5,543	5,552	5,815	5,824
10	4,486	4,493	5,179	5,187	5,237	5,244	5,561	5,569	5,840	5,849
11	4,469	4,477	5,167	5,176	5,231	5,239	5,561	5,570	5,847	5,856
12	4,446	4,453	5,148	5,155	5,218	5,224	5,552	5,559	5,842	5,850
13	4,419	4,425	5,122	5,129	5,197	5,202	5,535	5,541	5,829	5,836
14	4,387	4,394	5,091	5,098	5,170	5,176	5,510	5,518	5,807	5,815
15	4,354	4,361	5,058	5,064	5,140	5,146	5,483	5,489	5,782	5,789
16	4,320	4,326	5,022	5,028	5,108	5,113	5,452	5,458	5,752	5,759
18	4,252	4,257	4,949	4,955	5,040	5,044	5,385	5,391	5,688	5,693
20	4,185	4,190	4,877	4,882	4,971	4,976	5,317	5,322	5,620	5,626
22	4,119	4,125	4,806	4,811	4,903	4,908	5,248	5,253	5,551	5,557
24	4,058	4,062	4,738	4,743	4,838	4,841	5,181	5,186	5,483	5,488
26	4,001	4,005	4,674	4,679	4,775	4,779	5,117	5,121	5,418	5,423
28	3,947	3,951	4,614	4,619	4,717	4,720	5,057	5,061	5,357	5,361
30	3,896	3,900	4,558	4,562	4,661	4,664	4,756	5,003	5,298	5,302
40	3,689	3,692	4,323	4,326	4,428	4,430	4,570	4,759	5,046	5,050
50	3,535	3,537	4,146	4,149	4,251	4,253	4,425	4,573	4,853	4,856
60	3,416	3,418	4,010	4,012	4,114	4,115	4,213	4,427	4,701	4,703
80	3,245	3,247	3,812	3,814	3,914	3,915	4,066	4,214	4,478	4,480
100	3,128	3,130	3,677	3,679	3,777	3,777	3,841	4,067	4,324	4,325
150	2,950	2,951	3,470	3,471	3,565	3,566	3,711	3,842	4,086	4,087
200	2,849	2,850	3,351	3,352	3,445	3,445	3,566	3,712	3,949	3,950
400	2,674	2,674	3,146	3,147	3,234	3,234	3,485	3,486	3,709	3,710
500	2,633	2,634	3,098	3,099	3,186	3,185	3,433	3,433	3,654	3,654
600	2,605	2,606	3,065	3,066	3,151	3,151	3,396	3,396	3,614	3,615
800	2,567	2,568	3,021	3,022	3,106	3,106	3,348	3,348	3,563	3,563
1000	2,544	2,544	2,993	2,994	3,078	3,077	3,317	3,317	3,530	3,530



Şekil 3.3. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MFP değerlerinin değişimleri

3.4. Yarı Değer Kalınlığı

CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının döküm ve tavlanmış durumları için 1 keV - 1 GeV foton enerji aralığında Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak hesaplanan HVL değerleri döküm durumu için Çizelge 3.8’de ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.9’da verilmiştir. Dahası tüm durumları içeren HVL değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

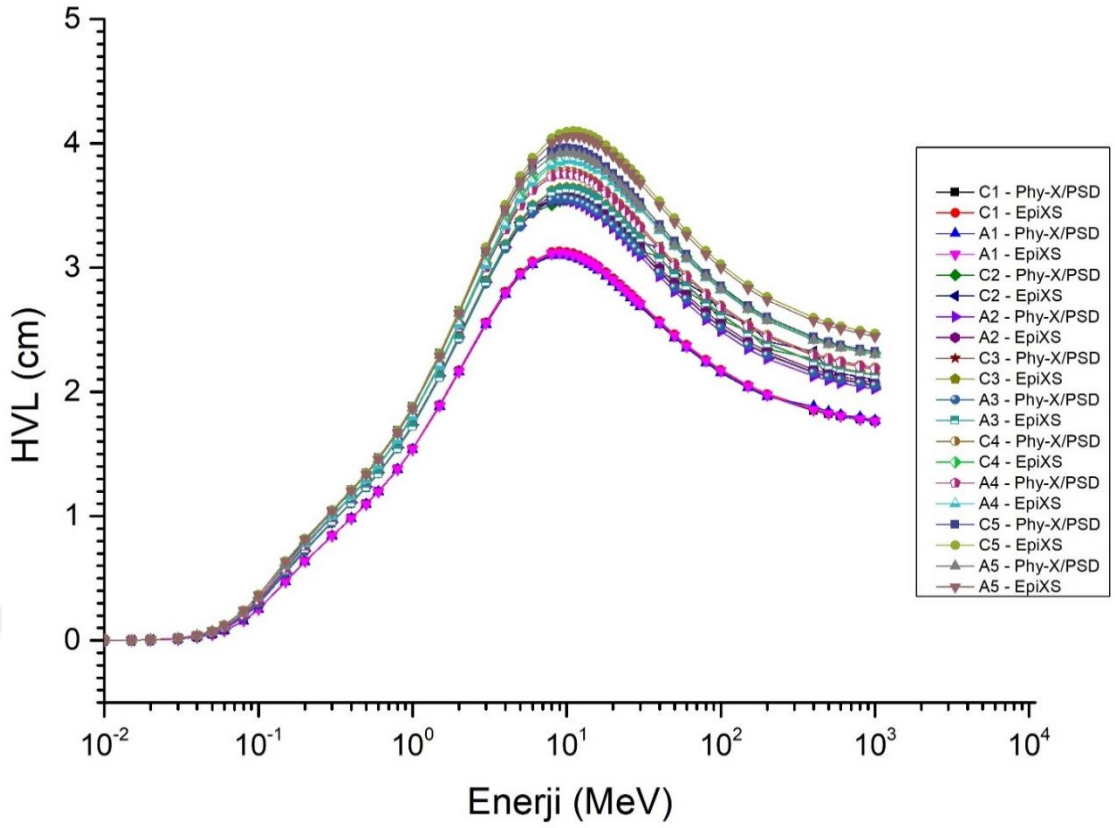
HVL parametreleri, MFP değerleri gibi radyasyonların malzemelere nüfuz etme kabiliyeti hakkında bilgi sağlayabilir. Orta enerji bölgesinde Compton saçılması baskındır ve absorpsiyon olasılıkları daha düşüktür. Düşük enerji bölgesinde HVL değerlerinin sıfıra yakın olduğu görülmüştür. Daha sonra HVL değerleri orta enerji bölgesinde ani bir artış göstermiştir. CoCrFeNiTi alaşımına Al elementinin eklenmesiyle HVL değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla CoCrFeNiTi’nin incelenen alaşımlar arasında en iyi zırhlama potansiyeline sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 3.8. Döküm durumu için HVL değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,015	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
0,02	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006
0,03	0,012	0,012	0,014	0,014	0,016	0,016	0,017	0,017	0,019	0,019
0,04	0,027	0,027	0,033	0,032	0,035	0,035	0,039	0,039	0,043	0,043
0,05	0,049	0,049	0,060	0,060	0,064	0,064	0,072	0,071	0,079	0,078
0,06	0,080	0,080	0,097	0,097	0,103	0,103	0,115	0,114	0,126	0,125
0,08	0,161	0,160	0,193	0,192	0,203	0,202	0,224	0,223	0,243	0,242
0,1	0,256	0,255	0,303	0,302	0,316	0,315	0,344	0,343	0,371	0,369
0,15	0,478	0,478	0,554	0,553	0,565	0,564	0,605	0,604	0,640	0,639
0,2	0,639	0,638	0,731	0,730	0,737	0,736	0,782	0,781	0,821	0,820
0,3	0,845	0,845	0,956	0,956	0,957	0,957	1,008	1,008	1,052	1,051
0,4	0,985	0,986	1,112	1,112	1,110	1,110	1,166	1,166	1,214	1,214
0,5	1,100	1,100	1,239	1,240	1,235	1,235	1,297	1,297	1,349	1,349
0,6	1,201	1,201	1,352	1,352	1,347	1,347	1,413	1,413	1,469	1,469
0,8	1,380	1,382	1,553	1,554	1,546	1,547	1,621	1,622	1,685	1,686
1	1,542	1,544	1,735	1,737	1,726	1,728	1,809	1,811	1,880	1,882
1,5	1,893	1,896	2,129	2,132	2,119	2,121	2,221	2,224	2,308	2,311
2	2,169	2,173	2,442	2,446	2,432	2,435	2,551	2,555	2,653	2,656
3	2,558	2,562	2,889	2,894	2,885	2,889	3,033	3,037	3,160	3,164
4	2,802	2,808	3,176	3,182	3,181	3,186	3,352	3,358	3,500	3,506
5	2,954	2,961	3,359	3,366	3,373	3,379	3,563	3,570	3,728	3,735
6	3,045	3,051	3,472	3,479	3,496	3,501	3,701	3,707	3,879	3,885
8	3,119	3,125	3,574	3,546	3,613	3,618	3,839	3,845	4,036	4,042
9	3,126	3,131	3,588	3,580	3,634	3,639	3,866	3,872	4,070	4,077
10	3,122	3,127	3,590	3,594	3,641	3,645	3,879	3,884	4,088	4,094
11	3,110	3,115	3,582	3,596	3,637	3,642	3,879	3,885	4,092	4,099
12	3,094	3,099	3,568	3,588	3,627	3,632	3,873	3,878	4,089	4,095
13	3,075	3,079	3,550	3,573	3,613	3,617	3,861	3,865	4,080	4,085
14	3,053	3,058	3,529	3,555	3,594	3,599	3,844	3,849	4,065	4,070
15	3,030	3,035	3,506	3,534	3,574	3,577	3,824	3,829	4,047	4,052
16	3,007	3,011	3,481	3,510	3,551	3,555	3,803	3,807	4,026	4,031
18	2,959	2,962	3,431	3,485	3,504	3,507	3,756	3,760	3,981	3,985
20	2,912	2,916	3,380	3,434	3,456	3,459	3,708	3,712	3,933	3,938
22	2,867	2,870	3,331	3,384	3,409	3,412	3,660	3,664	3,885	3,889
24	2,824	2,827	3,284	3,335	3,363	3,366	3,614	3,617	3,838	3,841
26	2,784	2,787	3,240	3,287	3,320	3,322	3,569	3,572	3,793	3,796
28	2,747	2,750	3,198	3,243	3,279	3,281	3,527	3,530	3,749	3,753
30	2,712	2,714	3,159	3,201	3,240	3,243	3,487	3,490	3,708	3,711
40	2,567	2,569	2,996	3,162	3,078	3,080	3,317	3,319	3,532	3,535
50	2,460	2,462	2,874	2,999	2,956	2,957	3,188	3,189	3,397	3,399
60	2,377	2,379	2,779	2,876	2,860	2,861	3,086	3,088	3,290	3,292
80	2,258	2,260	2,643	2,781	2,721	2,722	2,938	2,939	3,135	3,136
100	2,177	2,178	2,549	2,644	2,626	2,626	2,836	2,837	3,027	3,027
150	2,053	2,054	2,405	2,550	2,479	2,479	2,679	2,679	2,860	2,861
200	1,983	1,983	2,323	2,406	2,395	2,395	2,589	2,589	2,764	2,765
400	1,861	1,861	2,181	2,324	2,249	2,248	2,431	2,431	2,596	2,597
500	1,833	1,833	2,148	2,181	2,215	2,215	2,395	2,395	2,557	2,558
600	1,813	1,813	2,125	2,148	2,191	2,191	2,369	2,369	2,530	2,530
800	1,787	1,787	2,094	2,125	2,160	2,159	2,335	2,335	2,494	2,494
1000	1,770	1,771	2,075	2,095	2,140	2,139	2,313	2,313	2,471	2,471

Çizelge 3.9. Tavlanmış durumu için HVL değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiA10.5		CoCrFeNiTiA11.0		CoCrFeNiTiA11.5		CoCrFeNiTiA12.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,015	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
0,02	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006
0,03	0,012	0,012	0,014	0,014	0,015	0,015	0,017	0,017	0,019	0,019
0,04	0,027	0,026	0,033	0,032	0,035	0,035	0,039	0,039	0,043	0,043
0,05	0,049	0,049	0,060	0,060	0,064	0,064	0,071	0,071	0,078	0,078
0,06	0,080	0,079	0,097	0,097	0,103	0,102	0,114	0,113	0,124	0,124
0,08	0,160	0,160	0,193	0,192	0,202	0,202	0,222	0,221	0,240	0,240
0,1	0,255	0,254	0,303	0,302	0,315	0,314	0,342	0,341	0,367	0,366
0,15	0,477	0,476	0,554	0,553	0,563	0,562	0,601	0,600	0,634	0,633
0,2	0,637	0,636	0,731	0,730	0,735	0,734	0,777	0,776	0,813	0,812
0,3	0,841	0,841	0,956	0,956	0,954	0,954	1,002	1,001	1,042	1,041
0,4	0,981	0,982	1,112	1,112	1,106	1,106	1,159	1,159	1,202	1,202
0,5	1,096	1,096	1,239	1,240	1,232	1,232	1,288	1,289	1,336	1,336
0,6	1,196	1,196	1,352	1,352	1,343	1,343	1,404	1,404	1,455	1,455
0,8	1,375	1,376	1,553	1,554	1,541	1,542	1,611	1,612	1,669	1,670
1	1,536	1,538	1,735	1,737	1,721	1,722	1,798	1,800	1,862	1,864
1,5	1,886	1,888	2,129	2,132	2,113	2,115	2,207	2,210	2,286	2,288
2	2,160	2,164	2,442	2,446	2,425	2,428	2,535	2,539	2,627	2,631
3	2,548	2,552	2,889	2,894	2,876	2,880	3,014	3,018	3,129	3,134
4	2,791	2,797	3,176	3,182	3,171	3,176	3,331	3,337	3,466	3,472
5	2,942	2,949	3,359	3,366	3,363	3,369	3,541	3,548	3,692	3,699
6	3,033	3,039	3,472	3,479	3,485	3,491	3,678	3,684	3,841	3,848
8	3,107	3,112	3,574	3,580	3,602	3,607	3,815	3,821	3,997	4,003
9	3,113	3,119	3,588	3,594	3,623	3,628	3,842	3,848	4,031	4,037
10	3,109	3,114	3,590	3,596	3,630	3,635	3,854	3,860	4,048	4,054
11	3,097	3,103	3,582	3,588	3,626	3,631	3,855	3,861	4,053	4,059
12	3,082	3,086	3,568	3,573	3,617	3,621	3,849	3,853	4,050	4,055
13	3,063	3,067	3,550	3,555	3,602	3,606	3,837	3,841	4,040	4,045
14	3,041	3,046	3,529	3,534	3,583	3,588	3,820	3,825	4,025	4,031
15	3,018	3,023	3,506	3,510	3,563	3,567	3,800	3,805	4,007	4,012
16	2,995	2,999	3,481	3,485	3,540	3,544	3,779	3,783	3,987	3,992
18	2,947	2,951	3,431	3,434	3,493	3,497	3,733	3,737	3,942	3,946
20	2,900	2,904	3,380	3,384	3,446	3,449	3,685	3,689	3,895	3,899
22	2,855	2,859	3,331	3,335	3,399	3,402	3,637	3,641	3,847	3,852
24	2,813	2,816	3,284	3,287	3,353	3,356	3,591	3,594	3,801	3,804
26	2,773	2,776	3,240	3,243	3,310	3,312	3,547	3,550	3,756	3,759
28	2,736	2,739	3,198	3,201	3,269	3,272	3,505	3,508	3,713	3,716
30	2,701	2,704	3,159	3,162	3,231	3,233	3,465	3,468	3,672	3,675
40	2,557	2,559	2,996	2,999	3,069	3,071	3,297	3,299	3,498	3,500
50	2,450	2,452	2,874	2,876	2,947	2,948	3,168	3,170	3,364	3,366
60	2,368	2,369	2,779	2,781	2,852	2,852	3,067	3,068	3,258	3,260
80	2,249	2,251	2,643	2,644	2,713	2,714	2,920	2,921	3,104	3,105
100	2,168	2,169	2,549	2,550	2,618	2,618	2,819	2,819	2,997	2,998
150	2,045	2,046	2,405	2,406	2,471	2,472	2,662	2,663	2,832	2,833
200	1,975	1,976	2,323	2,324	2,388	2,388	2,573	2,573	2,737	2,738
400	1,853	1,854	2,181	2,181	2,242	2,242	2,416	2,416	2,571	2,571
500	1,825	1,826	2,148	2,148	2,208	2,208	2,380	2,380	2,532	2,533
600	1,805	1,806	2,125	2,125	2,184	2,184	2,354	2,354	2,505	2,506
800	1,780	1,780	2,094	2,095	2,153	2,153	2,320	2,321	2,470	2,470
1000	1,763	1,764	2,075	2,075	2,133	2,133	2,299	2,299	2,447	2,447



Şekil 3.4. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan HVL değerlerinin değişimleri

3.5. Toplam Atomik Tesir Kesiti

1 keV - 1 GeV arasındaki foton enerji aralığında CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının hem döküm hem de tavlanmış durumları için Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak ACS değerleri hesaplanmıştır. Döküm durumu için elde edilen değerler Çizelge 3.10'da ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.11'de verilmiştir. Aynı zamanda tüm durumlara ait ACS değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

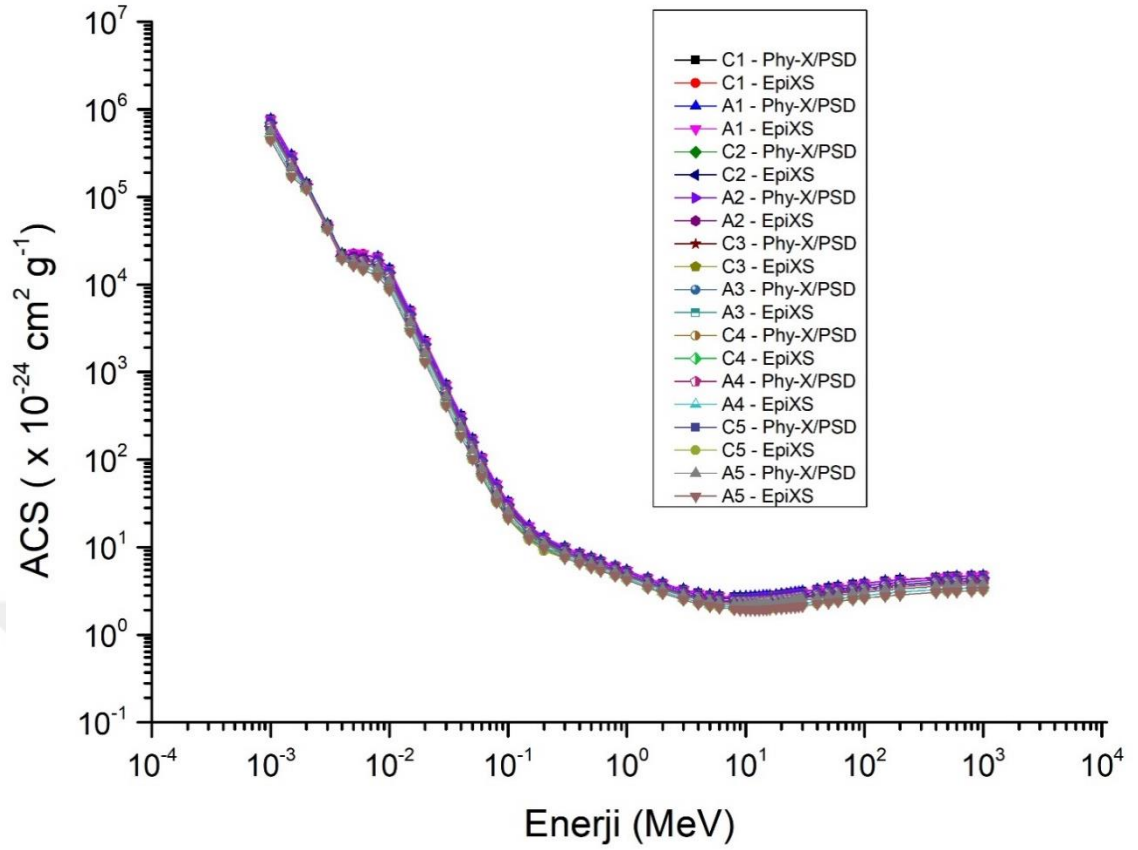
ACS değerleri, herhangi bir numunenin birim hacmindeki atom başına etkileşim olasılığı hakkında bilgi vermektedir. Bu bağlamda ACS değeri yüksek olan numunenin radyasyon zırlama için daha iyi bir malzeme olduğu varsayılmaktadır. Tez çalışmamızda hesaplanan ACS değerlerinin, incelenen materyalin kimyasal bileşimi ile bağlantılı olduğu görülmüştür. CoCrFeNiTi alaşımına Al elementinin eklenmesiyle ACS değerlerinin düştüğü fark edilmiştir. Bunların sonucunda CoCrFeNiTi numunesinin incelenen alaşımlar arasında en iyi zırlama potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.10. Döküm durumu için ACS değerleri x 10⁻²⁴

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	758000	759501	640000	641103	556000	556696	493000	493479	443000	444301
0,0015	291000	290957	245000	245203	213000	212585	188000	188155	169000	169151
0,002	139000	139235	133000	132855	128000	128307	125000	124900	122000	122250
0,003	47700	47723	45700	45646	44200	44166	43100	43057	42200	42195
0,004	22000	21955	21000	20985	20300	20293	19800	19775	19400	19372
0,005	22800	22720	20500	20365	18800	18686	17500	17429	16500	16451
0,006	22300	22288	19400	19419	17400	17373	15800	15841	14700	14649
0,008	20500	20430	17400	17384	15200	15213	13600	13587	12300	12321
0,01	14700	14647	12400	12389	10800	10780	9590	9574	8650	8636
0,015	4900	4904	4140	4142	3590	3598	3190	3191	2870	2875
0,02	2200	2207	1860	1863	1620	1617	1430	1434	1290	1291
0,03	702	703	592	593	515	515	456	457	411	412
0,04	312	312	264	264	230	230	204	204	184	184
0,05	169	169	143	143	125	125	111	111	101	100
0,06	104	104	88	88	77	77	69	69	63	63
0,08	51	51	44	44	39	39	3,5	3,5	32	32
0,1	32	32	28	28	25	25	23	23	21	21
0,15	17	17	15	15	14	14	13	13	12	12
0,2	13	13	11	11	10	10	10	10	9	9
0,3	9,84	9,84	8,98	8,98	8,36	8,36	7,90	7,90	7,54	7,54
0,4	8,44	8,43	7,72	7,72	7,21	7,21	6,83	6,82	6,53	6,53
0,5	7,56	7,56	6,93	6,92	6,48	6,47	6,14	6,14	5,87	5,87
0,6	6,92	6,92	6,35	6,35	5,94	5,94	5,63	5,63	5,39	5,39
0,8	6,02	6,02	5,53	5,52	5,17	5,17	4,91	4,91	4,70	4,70
1	5,39	5,38	4,95	4,94	4,63	4,63	4,40	4,39	4,21	4,21
1,5	4,39	4,39	4,03	4,03	3,77	3,77	3,58	3,58	3,43	3,43
2	3,83	3,83	3,52	3,51	3,29	3,28	3,12	3,11	2,99	2,98
3	3,25	3,24	2,97	2,97	2,77	2,77	2,62	2,62	2,51	2,50
4	2,97	2,96	2,70	2,70	2,51	2,51	2,37	2,37	2,26	2,26
5	2,81	2,81	2,56	2,55	2,37	2,37	2,23	2,23	2,13	2,12
6	2,73	2,73	2,47	2,47	2,29	2,28	2,15	2,15	2,04	2,04
8	2,67	2,66	2,40	2,40	2,21	2,21	2,07	2,07	1,96	1,96
9	2,66	2,66	2,39	2,39	2,20	2,20	2,06	2,05	1,95	1,94
10	2,66	2,66	2,39	2,39	2,20	2,19	2,05	2,05	1,94	1,94
11	2,67	2,67	2,40	2,39	2,20	2,20	2,05	2,05	1,94	1,93
12	2,69	2,68	2,41	2,40	2,21	2,20	2,05	2,05	1,94	1,93
13	2,70	2,70	2,42	2,41	2,21	2,21	2,06	2,06	1,94	1,94
14	2,72	2,72	2,43	2,43	2,23	2,22	2,07	2,07	1,95	1,95
15	2,74	2,74	2,45	2,45	2,24	2,24	2,08	2,08	1,96	1,96
16	2,77	2,76	2,47	2,46	2,25	2,25	2,09	2,09	1,97	1,97
18	2,81	2,81	2,50	2,50	2,28	2,28	2,12	2,12	1,99	1,99
20	2,86	2,85	2,54	2,54	2,31	2,31	2,15	2,14	2,01	2,01
22	2,90	2,90	2,58	2,57	2,35	2,34	2,17	2,17	2,04	2,04
24	2,94	2,94	2,61	2,61	2,38	2,38	2,20	2,20	2,06	2,06
26	2,99	2,98	2,65	2,65	2,41	2,41	2,23	2,23	2,09	2,09
28	3,03	3,02	2,68	2,68	2,44	2,44	2,26	2,25	2,11	2,11
30	3,07	3,06	2,72	2,71	2,47	2,47	2,28	2,28	2,14	2,13
40	3,24	3,24	2,87	2,86	2,60	2,60	2,40	2,40	2,24	2,24
50	3,38	3,38	2,99	2,98	2,71	2,70	2,50	2,49	2,33	2,33
60	3,50	3,50	3,09	3,09	2,80	2,79	2,58	2,58	2,41	2,41
80	3,68	3,68	3,25	3,25	2,94	2,94	2,71	2,71	2,53	2,53
100	3,82	3,82	3,37	3,37	3,05	3,05	2,81	2,80	2,62	2,62
150	4,05	4,05	3,57	3,57	3,23	3,23	2,97	2,97	2,77	2,77
200	4,19	4,19	3,70	3,69	3,34	3,34	3,07	3,07	2,87	2,87
400	4,47	4,47	3,94	3,94	3,56	3,56	3,27	3,27	3,05	3,05
500	4,54	4,54	4,00	4,00	3,61	3,61	3,32	3,32	3,10	3,10
600	4,59	4,59	4,04	4,04	3,65	3,65	3,36	3,36	3,13	3,13
800	4,65	4,65	4,10	4,10	3,70	3,70	3,41	3,41	3,18	3,18
1000	4,70	4,70	4,14	4,14	3,74	3,74	3,44	3,44	3,21	3,21

Çizelge 3.11. Tavlanmış durumu için ACS değerleri $\times 10^{-24}$

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	758000	759501	640000	641103	556000	556696	493000	493479	443000	444301
0,0015	291000	290957	245000	245203	213000	212585	188000	188155	169000	169151
0,002	139000	139235	133000	132855	128000	128307	125000	124900	122000	122250
0,003	47700	47723	45700	45646	44200	44166	43100	43057	42200	42195
0,004	22000	21955	21000	20985	20300	20293	19800	19775	19400	19372
0,005	22800	22720	20500	20365	18800	18686	17500	17429	16500	16451
0,006	22300	22288	19400	19419	17400	17373	15800	15841	14700	14649
0,008	20500	20430	17400	17384	15200	15213	13600	13587	12300	12321
0,01	14700	14647	12400	12389	10800	10780	9590	9574	8650	8636
0,015	4900	4904	4140	4142	3590	3598	3190	3192	2870	2875
0,02	2200	2207	1860	1863	1620	1617	1430	1434	1290	1291
0,03	702	703	592	593	515	515	456	457	411	412
0,04	312	312	264	264	230	230	204	204	184	184
0,05	169	169	143	143	125	125	111	111	101	101
0,06	104	104	88	88	77	77	69	69	63	63
0,08	51	51	44	44	39	39	35	35	32	32
0,1	32	32	28	28	25	25	23	23	21	21
0,15	17	17	15	15	14	14	13	13	12	12
0,2	13	13	11	11	10	10	10	10	9,65	9,66
0,3	9,84	9,84	8,98	8,98	8,36	8,36	7,90	7,90	7,54	7,54
0,4	8,44	8,43	7,72	7,72	7,21	7,21	6,83	6,82	6,53	6,53
0,5	7,56	7,56	6,93	6,92	6,48	6,47	6,14	6,14	5,87	5,87
0,6	6,92	6,92	6,35	6,35	5,94	5,94	5,63	5,63	5,39	5,39
0,8	6,02	6,02	5,53	5,52	5,17	5,17	4,91	4,91	4,70	4,70
1	5,39	5,38	4,95	4,94	4,63	4,63	4,40	4,39	4,21	4,21
1,5	4,39	4,39	4,03	4,03	3,77	3,77	3,58	3,58	3,43	3,43
2	3,83	3,83	3,52	3,51	3,29	3,28	3,12	3,11	2,99	2,98
3	3,25	3,24	2,97	2,97	2,77	2,77	2,62	2,62	2,51	2,50
4	2,97	2,96	2,70	2,70	2,51	2,51	2,37	2,37	2,26	2,26
5	2,81	2,81	2,56	2,55	2,37	2,37	2,23	2,23	2,13	2,12
6	2,73	2,73	2,47	2,47	2,29	2,28	2,15	2,15	2,04	2,04
8	2,67	2,66	2,40	2,40	2,21	2,21	2,07	2,07	1,96	1,96
9	2,66	2,66	2,39	2,39	2,20	2,20	2,06	2,05	1,95	1,94
10	2,66	2,66	2,39	2,39	2,20	2,19	2,05	2,05	1,94	1,94
11	2,67	2,67	2,40	2,39	2,20	2,20	2,05	2,05	1,94	1,93
12	2,69	2,68	2,41	2,40	2,21	2,20	2,05	2,05	1,94	1,93
13	2,70	2,70	2,42	2,41	2,21	2,21	2,06	2,06	1,94	1,94
14	2,72	2,72	2,43	2,43	2,23	2,22	2,07	2,07	1,95	1,95
15	2,74	2,74	2,45	2,45	2,24	2,24	2,08	2,08	1,96	1,96
16	2,77	2,76	2,47	2,46	2,25	2,25	2,09	2,09	1,97	1,97
18	2,81	2,81	2,50	2,50	2,28	2,28	2,12	2,12	1,99	1,99
20	2,86	2,85	2,54	2,54	2,31	2,31	2,15	2,14	2,01	2,01
22	2,90	2,90	2,58	2,57	2,35	2,34	2,17	2,17	2,04	2,04
24	2,94	2,94	2,61	2,61	2,38	2,38	2,20	2,20	2,06	2,06
26	2,99	2,98	2,65	2,65	2,41	2,41	2,23	2,23	2,09	2,09
28	3,03	3,02	2,68	2,68	2,44	2,44	2,26	2,25	2,11	2,11
30	3,07	3,06	2,72	2,71	2,47	2,47	2,28	2,28	2,14	2,13
40	3,24	3,24	2,87	2,86	2,60	2,60	2,40	2,40	2,24	2,24
50	3,38	3,38	2,99	2,98	2,71	2,70	2,50	2,49	2,33	2,33
60	3,50	3,50	3,09	3,09	2,80	2,79	2,58	2,58	2,41	2,41
80	3,68	3,68	3,25	3,25	2,94	2,94	2,71	2,71	2,53	2,53
100	3,82	3,82	3,37	3,37	3,05	3,05	2,81	2,80	2,62	2,62
150	4,05	4,05	3,57	3,57	3,23	3,23	2,97	2,97	2,77	2,77
200	4,19	4,19	3,70	3,69	3,34	3,34	3,07	3,07	2,87	2,87
400	4,47	4,47	3,94	3,94	3,56	3,56	3,27	3,27	3,05	3,05
500	4,54	4,54	4,00	4,00	3,61	3,61	3,32	3,32	3,10	3,10
600	4,59	4,59	4,04	4,04	3,65	3,65	3,36	3,36	3,13	3,13
800	4,65	4,65	4,10	4,10	3,70	3,70	3,41	3,41	3,18	3,18
1000	4,70	4,70	4,14	4,14	3,74	3,74	3,44	3,44	3,21	3,21



Şekil 3.5. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan ACS değerlerinin değişimleri

3.6. Etkin Elektron Yoğunluğu

1 keV - 1 GeV arasındaki foton enerji aralığında CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının döküm ve tavlanmış durumları için Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak N_{eff} değerleri hesaplanmış, döküm durumu için Çizelge 3.12’de ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.13’de verilmiştir. Bununla birlikte tüm durumlara ait N_{eff} değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

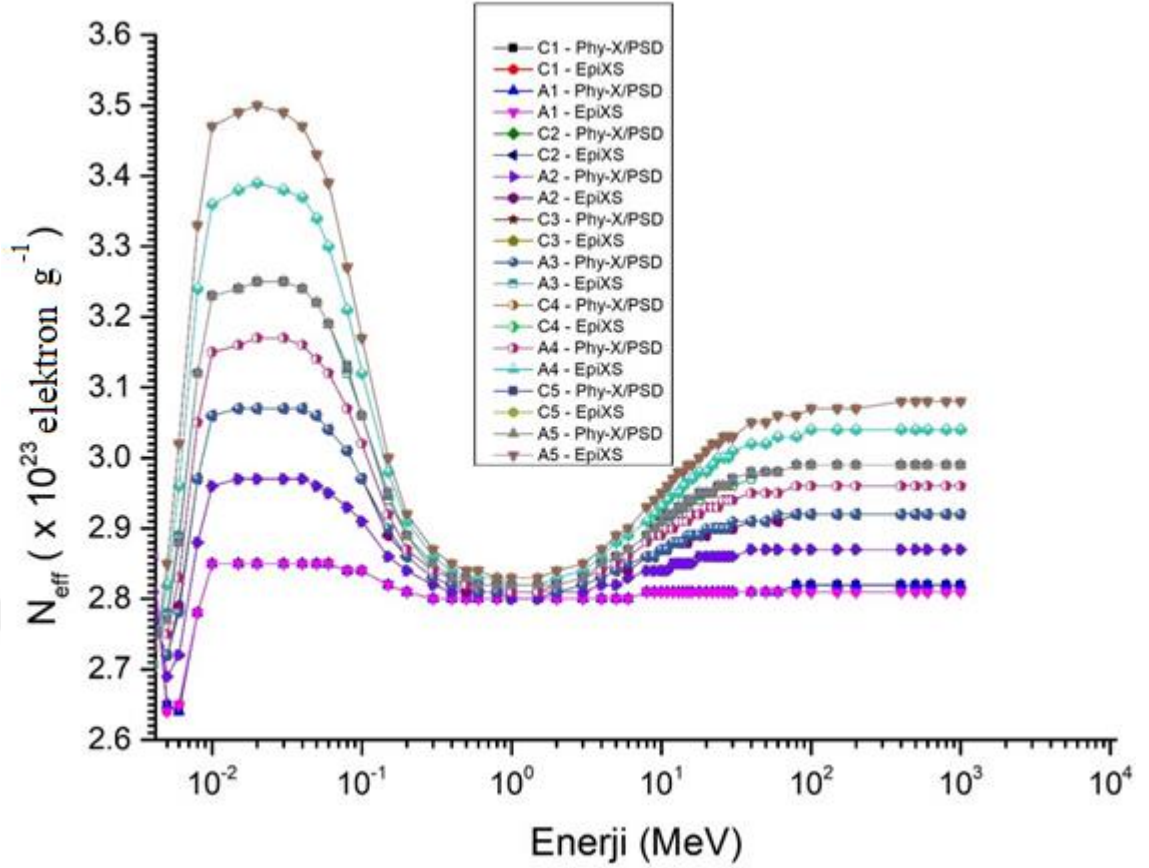
Uyarıcı foton enerjisine bağlı olarak bileşiğin etkin elektron yoğunluğunu açıklayan N_{eff} değerleri radyasyon zırlamanın belirlenmesinde önemli parametrelerden bir diğeridir. Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak elde edilen N_{eff} değerleri iyi bir uyum içindedir. Aynı zamanda Şekil 3.6’dan da görülebileceği gibi, gelen foton enerjileri üzerindeki N_{eff} değerlerinin değişimi, Z_{eff} değerlerinin değişimine benzerdir.

Çizelge 3.12. Döküm durumu için N_{eff} değerleri $\times 10^{23}$

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	2,84	2,84	3,06	3,06	3,23	3,23	3,37	3,37	3,48	3,48
0,0015	2,85	2,85	3,08	3,08	3,26	3,26	3,40	3,40	3,51	3,52
0,002	2,85	2,85	2,77	2,77	2,73	2,73	2,71	2,71	2,70	2,70
0,003	2,86	2,86	2,77	2,77	2,72	2,72	2,70	2,70	2,69	2,70
0,004	2,86	2,86	2,77	2,77	2,73	2,73	2,71	2,71	2,70	2,70
0,005	2,64	2,64	2,72	2,72	2,78	2,78	2,82	2,82	2,85	2,85
0,006	2,65	2,65	2,79	2,79	2,89	2,89	2,96	2,96	3,01	3,02
0,008	2,78	2,78	2,97	2,97	3,12	3,12	3,24	3,24	3,33	3,33
0,01	2,85	2,85	3,06	3,06	3,23	3,23	3,36	3,36	3,47	3,47
0,015	2,85	2,85	3,07	3,07	3,24	3,24	3,38	3,38	3,49	3,49
0,02	2,85	2,85	3,07	3,07	3,25	3,25	3,38	3,39	3,50	3,50
0,03	2,86	2,85	3,07	3,07	3,25	3,25	3,38	3,38	3,49	3,49
0,04	2,85	2,85	3,07	3,07	3,23	3,24	3,37	3,37	3,47	3,47
0,05	2,85	2,85	3,06	3,06	3,21	3,22	3,34	3,34	3,43	3,43
0,06	2,85	2,85	3,04	3,04	3,19	3,19	3,30	3,30	3,38	3,39
0,08	2,84	2,84	3,01	3,01	3,12	3,12	3,21	3,21	3,27	3,27
0,1	2,84	2,84	2,97	2,97	3,06	3,06	3,12	3,12	3,17	3,17
0,15	2,82	2,82	2,89	2,89	2,94	2,94	2,97	2,98	3,00	3,00
0,2	2,81	2,81	2,86	2,86	2,89	2,89	2,91	2,91	2,92	2,92
0,3	2,80	2,80	2,83	2,83	2,84	2,84	2,86	2,86	2,86	2,87
0,4	2,80	2,80	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84	2,85	2,85
0,5	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84
0,6	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84
0,8	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,83	2,83
1	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,82	2,82	2,83	2,83
1,5	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,82	2,82	2,83	2,83
2	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,83	2,84
3	2,80	2,80	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84	2,85	2,85
4	2,80	2,80	2,83	2,83	2,85	2,85	2,86	2,86	2,87	2,87
5	2,80	2,80	2,84	2,84	2,86	2,86	2,87	2,88	2,89	2,89
6	2,80	2,80	2,84	2,84	2,87	2,87	2,89	2,89	2,90	2,90
8	2,81	2,81	2,86	2,86	2,89	2,89	2,91	2,91	2,93	2,93
9	2,81	2,81	2,86	2,86	2,90	2,90	2,92	2,92	2,94	2,94
10	2,81	2,81	2,87	2,87	2,91	2,91	2,93	2,93	2,95	2,95
11	2,81	2,81	2,87	2,87	2,91	2,91	2,94	2,94	2,96	2,96
12	2,81	2,81	2,88	2,88	2,92	2,92	2,95	2,95	2,97	2,97
13	2,81	2,81	2,88	2,88	2,92	2,92	2,95	2,95	2,97	2,98
14	2,81	2,81	2,88	2,88	2,93	2,93	2,96	2,96	2,98	2,98
15	2,81	2,81	2,88	2,88	2,93	2,93	2,96	2,97	2,99	2,99
16	2,81	2,81	2,89	2,89	2,94	2,94	2,97	2,97	2,99	2,99
18	2,81	2,81	2,89	2,89	2,94	2,94	2,98	2,98	3,00	3,00
20	2,81	2,81	2,89	2,89	2,95	2,95	2,98	2,98	3,01	3,01
22	2,81	2,81	2,90	2,90	2,95	2,95	2,99	2,99	3,02	3,02
24	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	2,99	3,00	3,02	3,02
26	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,00	3,00	3,03	3,03
28	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,00	3,00	3,03	3,03
30	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,01	3,01	3,03	3,03
40	2,81	2,81	2,91	2,91	2,97	2,97	3,02	3,02	3,05	3,05
50	2,81	2,81	2,91	2,91	2,98	2,98	3,02	3,02	3,05	3,05
60	2,81	2,81	2,91	2,91	2,98	2,98	3,03	3,03	3,06	3,06
80	2,81	2,81	2,92	2,92	2,98	2,99	3,03	3,03	3,06	3,06
100	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,03	3,04	3,07	3,07
150	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,07
200	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,07
400	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
500	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
600	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
800	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
1000	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08

Çizelge 3.13. Tavlanmış durumu için N_{eff} değerleri $\times 10^{23}$

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	2,84	2,84	3,06	3,06	3,23	3,23	3,37	3,37	3,48	3,48
0,0015	2,85	2,85	3,08	3,08	3,26	3,26	3,40	3,40	3,51	3,52
0,002	2,85	2,85	2,77	2,77	2,73	2,73	2,71	2,71	2,70	2,70
0,003	2,86	2,86	2,77	2,77	2,72	2,72	2,70	2,70	2,69	2,70
0,004	2,86	2,86	2,77	2,77	2,73	2,73	2,71	2,71	2,70	2,70
0,005	2,64	2,64	2,72	2,72	2,78	2,78	2,82	2,82	2,85	2,85
0,006	2,65	2,65	2,79	2,79	2,89	2,89	2,96	2,96	3,01	3,02
0,008	2,78	2,78	2,97	2,97	3,12	3,12	3,24	3,24	3,33	3,33
0,01	2,85	2,85	3,06	3,06	3,23	3,23	3,36	3,36	3,47	3,47
0,015	2,85	2,85	3,07	3,07	3,24	3,24	3,38	3,38	3,49	3,49
0,02	2,85	2,85	3,07	3,07	3,25	3,25	3,38	3,39	3,50	3,50
0,03	2,86	2,85	3,07	3,07	3,25	3,25	3,38	3,38	3,49	3,49
0,04	2,85	2,85	3,07	3,07	3,23	3,24	3,37	3,37	3,47	3,47
0,05	2,85	2,85	3,06	3,06	3,21	3,22	3,34	3,34	3,43	3,43
0,06	2,85	2,85	3,04	3,04	3,19	3,19	3,30	3,30	3,38	3,39
0,08	2,84	2,84	3,01	3,01	3,12	3,12	3,21	3,21	3,27	3,27
0,1	2,84	2,84	2,97	2,97	3,06	3,06	3,12	3,12	3,17	3,17
0,15	2,82	2,82	2,89	2,89	2,94	2,94	2,97	2,98	3,00	3,00
0,2	2,81	2,81	2,86	2,86	2,89	2,89	2,91	2,91	2,92	2,92
0,3	2,80	2,80	2,83	2,83	2,84	2,84	2,86	2,86	2,86	2,87
0,4	2,80	2,80	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84	2,85	2,85
0,5	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84
0,6	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84
0,8	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,83	2,83
1	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,82	2,82	2,83	2,83
1,5	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,82	2,82	2,83	2,83
2	2,80	2,80	2,81	2,81	2,82	2,82	2,83	2,83	2,83	2,84
3	2,80	2,80	2,82	2,82	2,83	2,83	2,84	2,84	2,85	2,85
4	2,80	2,80	2,83	2,83	2,85	2,85	2,86	2,86	2,87	2,87
5	2,80	2,80	2,84	2,84	2,86	2,86	2,87	2,88	2,89	2,89
6	2,80	2,80	2,84	2,84	2,87	2,87	2,89	2,89	2,90	2,90
8	2,81	2,81	2,86	2,86	2,89	2,89	2,91	2,91	2,93	2,93
9	2,81	2,81	2,86	2,86	2,90	2,90	2,92	2,92	2,94	2,94
10	2,81	2,81	2,87	2,87	2,91	2,91	2,93	2,93	2,95	2,95
11	2,81	2,81	2,87	2,87	2,91	2,91	2,94	2,94	2,96	2,96
12	2,81	2,81	2,88	2,88	2,92	2,92	2,95	2,95	2,97	2,97
13	2,81	2,81	2,88	2,88	2,92	2,92	2,95	2,95	2,97	2,98
14	2,81	2,81	2,88	2,88	2,93	2,93	2,96	2,96	2,98	2,98
15	2,81	2,81	2,88	2,88	2,93	2,93	2,96	2,97	2,99	2,99
16	2,81	2,81	2,89	2,89	2,94	2,94	2,97	2,97	2,99	2,99
18	2,81	2,81	2,89	2,89	2,94	2,94	2,98	2,98	3,00	3,00
20	2,81	2,81	2,89	2,89	2,95	2,95	2,98	2,98	3,01	3,01
22	2,81	2,81	2,90	2,90	2,95	2,95	2,99	2,99	3,02	3,02
24	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	2,99	3,00	3,02	3,02
26	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,00	3,00	3,03	3,03
28	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,00	3,00	3,03	3,03
30	2,81	2,81	2,90	2,90	2,96	2,96	3,01	3,01	3,03	3,03
40	2,81	2,81	2,91	2,91	2,97	2,97	3,02	3,02	3,05	3,05
50	2,81	2,81	2,91	2,91	2,98	2,98	3,02	3,02	3,05	3,05
60	2,81	2,81	2,91	2,91	2,98	2,98	3,03	3,03	3,06	3,06
80	2,81	2,81	2,92	2,92	2,98	2,99	3,03	3,03	3,06	3,06
100	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,03	3,04	3,07	3,07
150	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,07
200	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,07
400	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
500	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
600	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
800	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08
1000	2,81	2,81	2,92	2,92	2,99	2,99	3,04	3,04	3,07	3,08



Şekil 3.6. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan N_{eff} değerlerinin değişimleri

3.7. Etkin Atom Numarası

Tez çalışmamızda son olarak hesaplanan radyasyon zırlama parametresi CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının döküm ve tavlanmış durumları için 1 keV - 1 GeV enerji aralığında Phy-X/PSD ve EpiXS kodları kullanılarak hesaplanan Z_{eff} değerleridir. Bu kapsamda döküm durumu için elde edilen değerler Çizelge 3.14’de ve tavlanmış durumu için Çizelge 3.15’de verilmiştir. Dahası tüm durumları içeren Z_{eff} değerlerinin enerji ile değişimleri ise Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

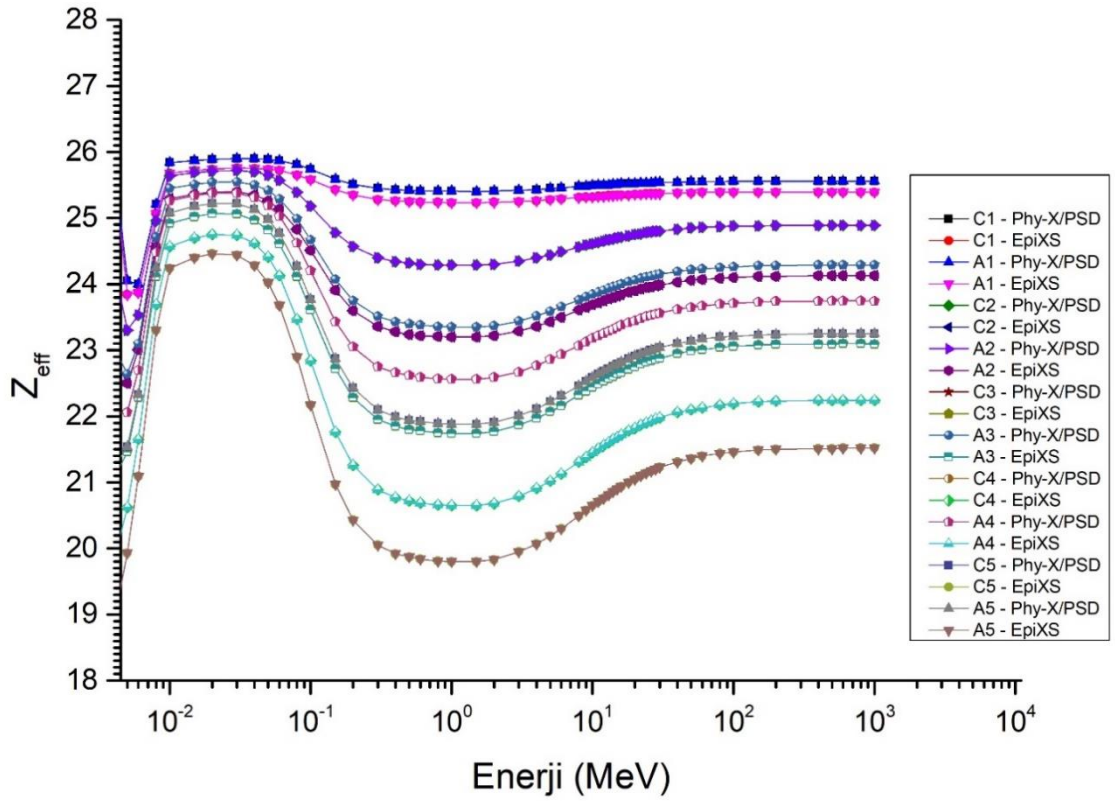
Düşük enerjide fotoelektrik etki nedeniyle maksimum Z_{eff} değerleri elde edilir. Daha büyük Z_{eff} değerleri, fotonların daha fazla serbest elektronla etkileşime girmesine neden olur (Wang ve ark. 2021). Şekil 3.7’den görüleceği üzere artan enerji ile Z_{eff} değerleri keskin bir şekilde azalır sonra kademeli olarak artar ve yüksek enerjiler için sabit kalır. Ayrıca CoCrFeNiTi alaşımına Al elementinin dahil edilmesiyle Z_{eff} değerlerinin düştüğü görülmüştür.

Çizelge 3.14. Döküm durumu için Z_{eff} değerleri

Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	25,62	25,62	25,28	25,28	24,96	24,96	24,65	24,65	24,36	24,36
0,0015	25,73	25,73	25,43	25,43	25,14	25,14	24,86	24,86	24,59	24,59
0,002	25,75	25,75	22,88	22,89	21,07	21,07	19,82	19,82	18,90	18,91
0,003	25,77	25,77	22,86	22,86	21,03	21,03	19,77	19,77	18,86	18,85
0,004	25,78	25,79	22,88	22,88	21,06	21,05	19,80	19,79	18,88	18,87
0,005	23,84	23,84	22,50	22,50	21,46	21,46	20,63	20,62	19,94	19,93
0,006	23,87	23,87	23,01	23,01	22,28	22,28	21,65	21,65	21,09	21,09
0,008	25,07	25,07	24,57	24,57	24,12	24,11	23,69	23,69	23,30	23,30
0,01	25,69	25,68	25,29	25,29	24,93	24,92	24,58	24,57	24,25	24,24
0,015	25,72	25,72	25,36	25,36	25,02	25,02	24,70	24,70	24,40	24,40
0,02	25,74	25,74	25,39	25,39	25,07	25,07	24,75	24,75	24,46	24,46
0,03	25,76	25,76	25,40	25,40	25,06	25,06	24,74	24,74	24,44	24,44
0,04	25,76	25,75	25,35	25,35	24,97	24,97	24,62	24,62	24,28	24,28
0,05	25,74	25,74	25,26	25,26	24,82	24,82	24,41	24,41	24,02	24,02
0,06	25,72	25,72	25,14	25,14	24,61	24,61	24,13	24,13	23,68	23,68
0,08	25,65	25,65	24,83	24,83	24,11	24,11	23,47	23,47	22,90	22,90
0,1	25,58	25,58	24,51	24,51	23,60	23,61	22,83	22,84	22,16	22,17
0,15	25,43	25,43	23,90	23,91	22,71	22,72	21,75	21,76	20,97	20,97
0,2	25,35	25,35	23,59	23,60	22,28	22,28	21,25	21,26	20,43	20,43
0,3	25,28	25,28	23,36	23,36	21,95	21,95	20,89	20,89	20,04	20,05
0,4	25,26	25,26	23,28	23,28	21,85	21,85	20,77	20,77	19,92	19,92
0,5	25,25	25,25	23,24	23,24	21,80	21,80	20,72	20,72	19,87	19,87
0,6	25,24	25,24	23,22	23,22	21,78	21,78	20,69	20,69	19,84	19,84
0,8	25,24	25,24	23,21	23,21	21,75	21,75	20,66	20,66	19,81	19,81
1	25,23	25,23	23,20	23,20	21,74	21,74	20,65	20,65	19,80	19,80
1,5	25,23	25,23	23,20	23,20	21,74	21,74	20,65	20,65	19,80	19,80
2	25,24	25,24	23,22	23,22	21,77	21,77	20,68	20,68	19,84	19,83
3	25,25	25,25	23,29	23,29	21,87	21,87	20,79	20,79	19,95	19,95
4	25,26	25,26	23,36	23,36	21,97	21,97	20,91	20,91	20,07	20,07
5	25,28	25,28	23,43	23,43	22,07	22,07	21,02	21,02	20,19	20,19
6	25,29	25,29	23,50	23,50	22,16	22,16	21,13	21,13	20,30	20,30
8	25,31	25,31	23,61	23,61	22,32	22,32	21,31	21,31	20,49	20,49
9	25,32	25,32	23,65	23,65	22,38	22,38	21,38	21,38	20,57	20,58
10	25,32	25,32	23,69	23,69	22,44	22,44	21,45	21,45	20,64	20,65
11	25,33	25,33	23,72	23,72	22,49	22,49	21,51	21,51	20,71	20,71
12	25,33	25,33	23,75	23,75	22,53	22,53	21,56	21,56	20,76	20,76
13	25,34	25,34	23,78	23,78	22,57	22,57	21,60	21,60	20,81	20,81
14	25,34	25,34	23,80	23,80	22,60	22,60	21,64	21,65	20,86	20,86
15	25,35	25,35	23,82	23,82	22,63	22,64	21,68	21,68	20,90	20,90
16	25,35	25,35	23,84	23,84	22,66	22,66	21,72	21,72	20,94	20,94
18	25,35	25,35	23,88	23,88	22,71	22,71	21,77	21,78	21,00	21,00
20	25,36	25,36	23,90	23,90	22,75	22,75	21,82	21,82	21,05	21,05
22	25,36	25,36	23,93	23,93	22,79	22,79	21,86	21,87	21,10	21,10
24	25,37	25,37	23,94	23,95	22,82	22,82	21,90	21,90	21,14	21,14
26	25,37	25,37	23,96	23,96	22,84	22,84	21,93	21,93	21,17	21,17
28	25,37	25,37	23,98	23,98	22,86	22,86	21,95	21,96	21,20	21,20
30	25,37	25,37	23,99	23,99	22,88	22,88	21,98	21,98	21,22	21,23
40	25,38	25,38	24,03	24,03	22,95	22,95	22,05	22,06	21,31	21,31
50	25,38	25,38	24,06	24,06	22,98	22,99	22,10	22,10	21,36	21,36
60	25,39	25,39	24,07	24,07	23,01	23,01	22,13	22,13	21,40	21,40
80	25,39	25,39	24,09	24,09	23,04	23,04	22,17	22,17	21,44	21,44
100	25,39	25,39	24,10	24,10	23,06	23,06	22,19	22,19	21,46	21,46
150	25,39	25,39	24,12	24,12	23,08	23,08	22,22	22,22	21,49	21,49
200	25,39	25,39	24,12	24,12	23,09	23,09	22,23	22,23	21,50	21,50
400	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,51
500	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,51
600	25,39	25,39	24,13	24,13	23,10	23,10	22,24	22,24	21,52	21,52
800	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,10	22,24	22,24	21,52	21,52
1000	25,39	25,39	24,12	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,52

Çizelge 3.15. Tavlanmış durumu için Z_{eff} değerleri

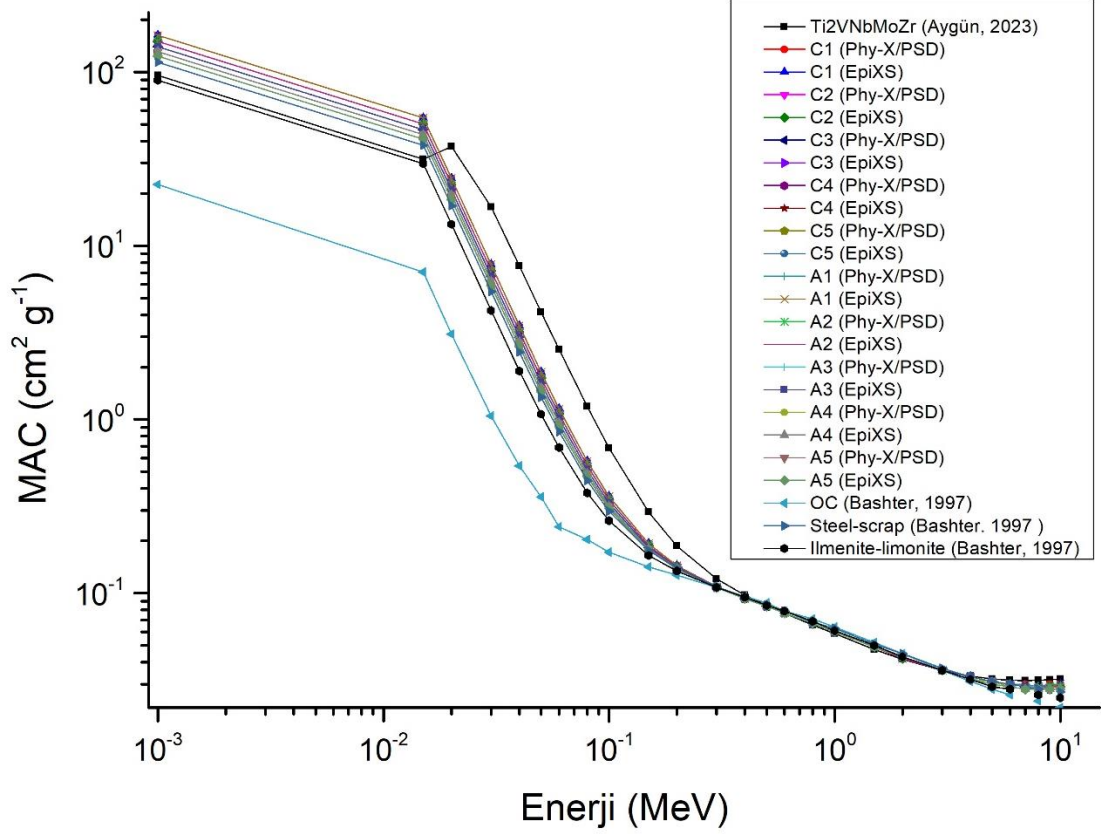
Enerji (MeV)	CoCrFeNiTi		CoCrFeNiTiAl0.5		CoCrFeNiTiAl1.0		CoCrFeNiTiAl1.5		CoCrFeNiTiAl2.0	
	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS	Phy- X/PSD	EpiXS
0,001	25,62	25,62	25,28	25,28	24,96	24,96	24,65	24,65	24,36	24,36
0,0015	25,73	25,73	25,43	25,43	25,14	25,14	24,86	24,86	24,59	24,59
0,002	25,75	25,75	22,88	22,89	21,07	21,07	19,82	19,82	18,90	18,91
0,003	25,77	25,77	22,86	22,86	21,03	21,03	19,77	19,77	18,86	18,85
0,004	25,78	25,79	22,88	22,88	21,06	21,05	19,80	19,79	18,88	18,87
0,005	23,84	23,84	22,50	22,50	21,46	21,46	20,63	20,62	19,94	19,93
0,006	23,87	23,87	23,01	23,01	22,28	22,28	21,65	21,65	21,09	21,09
0,008	25,07	25,07	24,57	24,57	24,12	24,11	23,69	23,69	23,30	23,30
0,01	25,69	25,68	25,29	25,29	24,93	24,92	24,58	24,57	24,25	24,24
0,015	25,72	25,72	25,36	25,36	25,02	25,02	24,70	24,70	24,40	24,40
0,02	25,74	25,74	25,39	25,39	25,07	25,07	24,75	24,75	24,46	24,46
0,03	25,76	25,76	25,40	25,40	25,06	25,06	24,74	24,74	24,44	24,44
0,04	25,76	25,75	25,35	25,35	24,97	24,97	24,62	24,62	24,28	24,28
0,05	25,74	25,74	25,26	25,26	24,82	24,82	24,41	24,41	24,02	24,02
0,06	25,72	25,72	25,14	25,14	24,61	24,61	24,13	24,13	23,68	23,68
0,08	25,65	25,65	24,83	24,83	24,11	24,11	23,47	23,47	22,90	22,90
0,1	25,58	25,58	24,51	24,51	23,60	23,61	22,83	22,84	22,16	22,17
0,15	25,43	25,43	23,90	23,91	22,71	22,72	21,75	21,76	20,97	20,97
0,2	25,35	25,35	23,59	23,60	22,28	22,28	21,25	21,26	20,43	20,43
0,3	25,28	25,28	23,36	23,36	21,95	21,95	20,89	20,89	20,04	20,05
0,4	25,26	25,26	23,28	23,28	21,85	21,85	20,77	20,77	19,92	19,92
0,5	25,25	25,25	23,24	23,24	21,80	21,80	20,72	20,72	19,87	19,87
0,6	25,24	25,24	23,22	23,22	21,78	21,78	20,69	20,69	19,84	19,84
0,8	25,24	25,24	23,21	23,21	21,75	21,75	20,66	20,66	19,81	19,81
1	25,23	25,23	23,20	23,20	21,74	21,74	20,65	20,65	19,80	19,80
1,5	25,23	25,23	23,20	23,20	21,74	21,74	20,65	20,65	19,80	19,80
2	25,24	25,24	23,22	23,22	21,77	21,77	20,68	20,68	19,84	19,83
3	25,25	25,25	23,29	23,29	21,87	21,87	20,79	20,79	19,95	19,95
4	25,26	25,26	23,36	23,36	21,97	21,97	20,91	20,91	20,07	20,07
5	25,28	25,28	23,43	23,43	22,07	22,07	21,02	21,02	20,19	20,19
6	25,29	25,29	23,50	23,50	22,16	22,16	21,13	21,13	20,30	20,30
8	25,31	25,31	23,61	23,61	22,32	22,32	21,31	21,31	20,49	20,49
9	25,32	25,32	23,65	23,65	22,38	22,38	21,38	21,38	20,57	20,58
10	25,32	25,32	23,69	23,69	22,44	22,44	21,45	21,45	20,64	20,65
11	25,33	25,33	23,72	23,72	22,49	22,49	21,51	21,51	20,71	20,71
12	25,33	25,33	23,75	23,75	22,53	22,53	21,56	21,56	20,76	20,76
13	25,34	25,34	23,78	23,78	22,57	22,57	21,60	21,60	20,81	20,81
14	25,34	25,34	23,80	23,80	22,60	22,60	21,64	21,65	20,86	20,86
15	25,35	25,35	23,82	23,82	22,63	22,64	21,68	21,68	20,90	20,90
16	25,35	25,35	23,84	23,84	22,66	22,66	21,72	21,72	20,94	20,94
18	25,35	25,35	23,88	23,88	22,71	22,71	21,77	21,78	21,00	21,00
20	25,36	25,36	23,90	23,90	22,75	22,75	21,82	21,82	21,05	21,05
22	25,36	25,36	23,93	23,93	22,79	22,79	21,86	21,87	21,10	21,10
24	25,37	25,37	23,94	23,95	22,82	22,82	21,90	21,90	21,14	21,14
26	25,37	25,37	23,96	23,96	22,84	22,84	21,93	21,93	21,17	21,17
28	25,37	25,37	23,98	23,98	22,86	22,86	21,95	21,96	21,20	21,20
30	25,37	25,37	23,99	23,99	22,88	22,88	21,98	21,98	21,22	21,23
40	25,38	25,38	24,03	24,03	22,95	22,95	22,05	22,06	21,31	21,31
50	25,38	25,38	24,06	24,06	22,98	22,99	22,10	22,10	21,36	21,36
60	25,39	25,39	24,07	24,07	23,01	23,01	22,13	22,13	21,40	21,40
80	25,39	25,39	24,09	24,09	23,04	23,04	22,17	22,17	21,44	21,44
100	25,39	25,39	24,10	24,10	23,06	23,06	22,19	22,19	21,46	21,46
150	25,39	25,39	24,12	24,12	23,08	23,08	22,22	22,22	21,49	21,49
200	25,39	25,39	24,12	24,12	23,09	23,09	22,23	22,23	21,50	21,50
400	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,51
500	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,51
600	25,39	25,39	24,13	24,13	23,10	23,10	22,24	22,24	21,52	21,52
800	25,39	25,39	24,13	24,13	23,09	23,10	22,24	22,24	21,52	21,52
1000	25,39	25,39	24,12	24,13	23,09	23,09	22,24	22,24	21,51	21,52



Şekil 3.7. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan Z_{eff} değerlerinin değişimleri

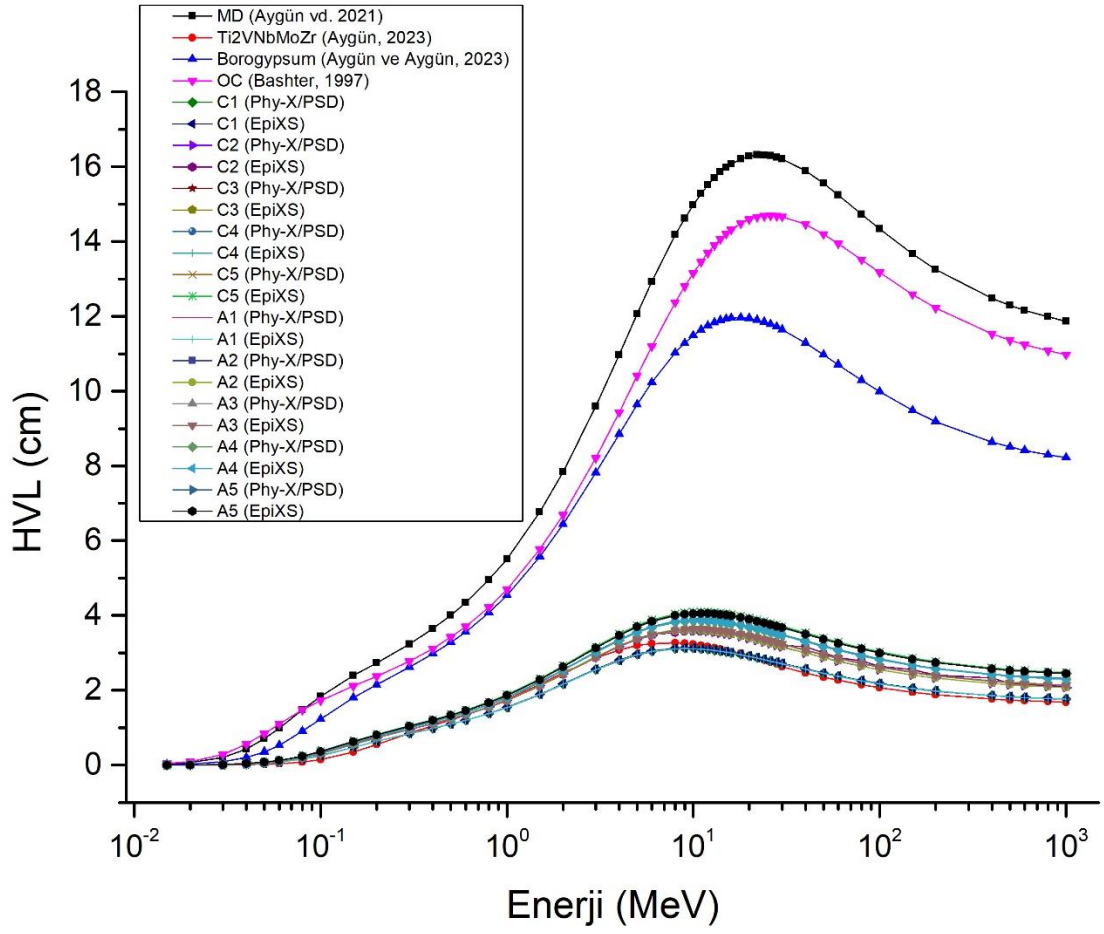
3.8. Sonuçlarımızın Literatürle Karşılaştırılması

Bu bölümde tez çalışmamızda analiz edilen CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) alaşımları için elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak bu çalışmada hesapladığımız MAC değerleri daha önce çalışılmış ve yaygın şekilde zırhlama malzemesi olarak kullanılan beton (OC), steel-scrap, ilmenite-imonite [46] ve yüksek entropili $\text{Ti}_2\text{VNbMoZr}$ alaşımı [47] sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bu durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Buna göre, çalışılan CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) yüksek entropili alaşımlarımızın MAC değerlerinin yaygın şekilde zırhlama malzemesi olarak kullanılan beton, steel-scrap ve ilmenite-imonite ait MAC değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan MAC değerlerimizin, $\text{Ti}_2\text{VNbMoZr}$ [47] yüksek entropili alaşımın MAC değerlerinden düşük ve yüksek enerjilerde daha iyi olduğu görülürken orta enerjili bölgede nispeten biraz daha düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan MAC değerlerinin literatürdeki beton (OC), steel-scrap, ilmenite-limonite [46] ve yüksek entropili Ti2VNbMoZr alaşımı [47] değerleriyle karşılaştırılması

Benzer olarak daha anlamlı bir sonuç vermek için, çalışmamızda CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) yüksek entropili alaşımları için hesaplanan HVL değerleri literatürdeki beton (OC) (Bashter, 1997), mermer tozu (MD) [48], borojipsin [49] ve yüksek entropili Ti2VNbMoZr alaşımı [47] için elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu kapsamda, CoCrFeNiTiAl_x (x=0; 0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımlarının HVL değerlerinin beton, mermer tozu ve borojipsin HVL değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan Ti2VNbMoZr refrakter yüksek entropili alaşımın HVL değerlerinin ise C1 ve A1 alaşımlarının HVL değerlerinden orta enerjilerde daha yüksek iken düşük ve yüksek enerjilerde çok yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, genel anlamda çalışmamızda incelenen CoCrFeNiTiAl_x (x=0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0) alaşımları iyi bir radyasyon korunma özelliği gösterirken, C1 ve A1 (CoCrFeNiTiAl₀) alaşımlarının diğerlerine oranla daha iyi bir zırhlama özelliği gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.9. Döküm ve tavlanmış durumlar için Phy-X/PSD ve EpiXS kullanılarak hesaplanan HVL değerlerinin literatürdeki beton (OC) [46], mermer tozu (MD) [48], borojipsin [49] ve yüksek entropili Ti2VNbMoZr alaşımı [47] değerleriyle karşılaştırılması

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Radyasyonun tarım, teknoloji, sanayi, tıbbi görüntüleme ve ışın tedavisi gibi uygulama alanlarının artmasıyla tüm canlıların radyasyonun zararlarından korunması daha önemli hale gelmektedir. Radyasyondan korunmada çeşitli yöntemler arasında radyasyon kaynağına belirli bir mesafede bulunulması ya da radyasyon alanında geçirilen zamanın azaltılması söylenebilir. Bununla birlikte radyasyondan korunmada en bilinen ve tercih edilen yöntemlerinden biri de radyasyondan yeteri derecede koruyan malzemelerin üretilmesidir. Bu açıdan radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için radyasyonun etkisini ya yok edecek ya da azaltacak çeşitli zırhlama yöntemleri bulunmuş, iyi sonuçlar alınmış olmasına rağmen halen daha etkili zırhlama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) çok bileşenli alaşımların radyasyon koruma potansiyeli radyasyon zayıflama parametreleri incelendi. Bu amaçla, son zamanlarda önerilen ve yoğun bir şekilde kullanılan Phy-X/PSD ve EpiXS adlı iki yazılım kullanılarak radyasyon zayıflama parametreleri hesaplandı. Bu kapsamda, CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) alaşımlarının MAC, LAC, MFP, HVL, ACS, Neff ve Zeff değişimleri 1 keV - 1 GeV enerji aralığında hesaplanarak tablolar halinde verildi. Buna ek olarak bu değerlerin enerjiyle değişimlerini gösteren durumları şekiller halinde verildi.

Teorik sonuçlardan, Phy-X/PSD ve EpiXS yazılımlarının radyasyon koruma sonuçlarının döküm ve tavlama durumlarına göre farklılık gösterebildiği gözlemlendi. Değerlendirilen CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) alaşımları için Al elementi arttıkça soğurma kapasitesinin düştüğü görüldü. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte, CoCrFeNiTi numunesinin incelenen alaşımlar arasında en iyi radyasyon koruma potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışması sonucu elde edilen veriler nükleer teknoloji, radyasyon teknolojisi ve radyasyondan koruma gibi farklı alanlarında kullanılmak üzere CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$) yüksek entropili alaşımlar için literatüre veri sağlaması bakımından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J.-W. Yeh et al., “Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 6, no. 5, pp. 299–303, 2004, doi: 10.1002/adem.200300567.
- [2] B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, and A. J. B. Vincent, “Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys,” *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater.*, vol. 375–377, pp. 213–218, 2004, doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257
- [3] C.-C. Yen et al., “Corrosion mechanism of annealed equiatomic AlCoCrFeNi tri-phase high-entropy alloy in 0.5 M H₂SO₄ aerated aqueous solution,” *Corros. Sci.*, vol. 157, pp. 462–471, 2019, doi: 10.1016/j.corsci.2019.06.024.
- [4] Y. J. Zhou, Y. Zhang, Y. L. Wang, and G. L. Chen, “Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 18, p. 181904, 2007, doi: 10.1063/1.2734517.
- [5] H. Qiu, H. Zhu, J. Zhang, and Z. Xie, “Effect of Fe content upon the microstructures and mechanical properties of Fe_xCoNiCu high entropy alloys,” *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater.*, vol. 769, no. 138514, p. 138514, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2019.138514
- [6] S. Varalakshmi, M. Kamaraj, and B. S. Murty, “Synthesis and characterization of nanocrystalline AlFeTiCrZnCu high entropy solid solution by mechanical alloying,” *J. Alloys Compd.*, vol. 460, no. 1–2, pp. 253–257, 2008, doi: 10.1016/j.jallcom.2007.05.104.
- [7] Y. P. Wang, B. S. Li, M. X. Ren, C. Yang, and H. Z. Fu, “Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy,” *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater.*, vol. 491, no. 1–2, pp. 154–158, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2008.01.064.
- [8] D. Miracle, J. Miller, O. Senkov, C. Woodward, M. Uchic, and J. Tiley, “Exploration and development of high entropy alloys for structural applications,” *Entropy (Basel)*, vol. 16, no. 1, pp. 494–525, 2014, doi: 10.3390/e16010494.
- [9] A. Erdogan and S. Zeytin, “Yüksek entropili alaşımlar: prensipler ve alaşım tasarımı,” *Ömer Halisdemir Üniv. Mühendis. Bilim. Derg.*, vol. 8, no. 2, pp. 1160–1178, 2019, doi: 10.28948/ngumuh.517876.

- [10] K. B. Zhang, Z. Y. Fu, J. Y. Zhang, W. M. Wang, S. W. Lee, and K. Niihara, "Annealing effects on structure and mechanical properties of CoCrFeNiTiAlxhigh-entropy alloys," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 20, p. 012009, 2011, doi: 10.1088/1757-899X/20/1/012009.
- [11] L. S. Zhang, "Preparation of CoCrFeNiCuMnSix high entropy alloys and their microstructure and properties," *Adv. Mat. Res.*, vol. 750–752, pp. 615–618, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.750-752.615.
- [12] K. S. Lee, B. Bae, J.-H. Kang, K. R. Lim, and Y. S. Na, "Multi-phase refining of an AlCoCrFeNi high entropy alloy by hot compression," *Mater. Lett.*, vol. 198, pp. 81–84, 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2017.03.181.
- [13] D. H. Xiao et al., "Microstructure, mechanical and corrosion behaviors of AlCoCuFeNi-(Cr,Ti) high entropy alloys," *Mater. Des.*, vol. 116, pp. 438–447, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.036.
- [14] B. Küçükelyas, "FeNiCoCu yüksek entropili alaşım nanopartiküllerinin ultrasonik sprey piroliz tekniği ile üretimi ve karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2018.
- [15] A. I. Yurkova, V. V. Cherniavsky, V. Bolbut, M. Krüger, and I. Bogomol, "Structure formation and mechanical properties of the high-entropy AlCuNiFeCr alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering," *J. Alloys Compd.*, vol. 786, pp. 139–148, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.01.341.
- [16] R. Anand Sekhar, S. Samal, N. Nayan, and S. R. Bakshi, "Microstructure and mechanical properties of Ti-Al-Ni-Co-Fe based high entropy alloys prepared by powder metallurgy route," *J. Alloys Compd.*, vol. 787, pp. 123–132, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.02.083.
- [17] E. Sarioğlu, "Mekanik Alaşımlama ile CoCrFeMnNi ve AgCoCrFeNi esaslı Yüksek Entropi alaşım tozlarının sentezlenmesi karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2021.
- [18] M. Kurudirek, "Bazı çoklu element yapıdaki maddelerin foton etkileşimi, foton enerji soğurması, foton kuvvetlendirme faktörü ve hızlı nötron azaltma tesir kesitleri açısından incelenmesi," Doktora tezi, Fen Bil. Ens., Atatürk Üniv., Erzurum, Türkiye, 2011.

- [19] H. Çetin, “Tıbbi amaçlı X- ışını uygulamalarında radyasyondan korunmak amacıyla kullanılan kurşunlu önlük malzemelerine alternatif olarak üretilen kurşunsuz örneklerin soğurma özelliklerini incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Dokuz Eylül Üniv., İzmir, Türkiye, 2011.
- [20] M. Z. Tüysüz, “Co-60 Teleterapi kaynağı için Monte Carlo yöntemiyle uygun zırh tasarımı,” Bitirme Ödevi, Harran Üniversitesi, 2004.
- [21] K. S. Krane, *Nükleer Fizik 1*, (Çeviri Editörü: Başar Şarer), Palme Yayıncılık, 2001.
- [22] B. Aygün, “Değişik yağ oranlarına sahip parafin waxlarda hızlı nötronların makroskobik soğrulma tesir kesitlerinin belirlenmesi ve değişen yağ oranlarının zırhlama üzerindeki etkisinin araştırılması,” Doktora tezi, Fen Bil. Ens., Atatürk Üniv., Erzurum, Türkiye, 2010.
- [23] İ. Aral, “Alumina ve Zirkonya esaslı seramiklerin nükleer zırhlama kabiliyetlerinin Mcnp-X kodu ile araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Ağrı İbrahim Çeçen Üniv., Ağrı, Türkiye, 2019.
- [24] M. P. Singh, B. S. Sandhu, and B. Singh, “Measurement of effective atomic number of composite materials using scattering of γ -rays,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 580, no. 1, pp. 50–53, 2007, doi: 10.1016/j.nima.2007.05.037
- [25] S. Bilgiç, “Farklı foton enerjilerinde bazı MoCu alaşımlarının radyasyon Soğurma parametrelerinin belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Binali Yıldırım Üniv., Erzincan, Türkiye, 2020.
- [26] S. R. Manohara, S. M. Hanagodimath, K. S. Thind, and L. Gerward, “On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1keV,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 266, no. 18, pp. 3906–3912, 2008, doi: 10.1016/j.nimb.2008.06.034.
- [27] K. Balcı, “TMS-238 Süper alaşımının dökülebilirliğinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Osman Gazi Üniv., Eskişehir, Türkiye, 2020.
- [28] C. T. Sim, and W. C. Hagel, “Nickel base alloys”, *The Superalloys*, 25-32, 1972.
- [29] U. Karakaş, “Hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen Ni-10Si-10Fe alaşımlarının mikroyapı ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Çankırı Üniv., Çankırı, Türkiye, 2020.

- [30] Z. Aygun and M. Aygun, “Radiation shielding potentials of Rene alloys by phy-X/PSD code,” *Acta Phys. Pol. A.*, vol. 141, no. 5, pp. 507–515, 2022, doi: 10.12693/APhysPolA.141.507.
- [31] Z. Aygun and M. Aygün, “Evaluation of radiation shielding potentials of Ni-based alloys, Inconel-617 and Incoloy-800HT, candidates for high temperature applications especially for nuclear reactors, by EpiXS and Phy-X/PSD codes,” *J. Polytech.*, 2022, doi: 10.2339/politeknik.1004657.
- [32] M. I. Sayyed et al., “Evaluation of radiation shielding features of co and Ni-based superalloys using MCNP-5 code: Potential use in nuclear safety,” *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 10, no. 21, p. 7680, 2020, doi: 10.3390/app10217680.
- [33] B. Aygün, “Neutron and gamma radiation shielding Ni based new type super alloys development and production by Monte Carlo Simulation technique,” *Radiat. Phys. Chem. Oxf. Engl.* 1993, vol. 188, no. 109630, p. 109630, 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109630.
- [34] N. Ekinçi et al., “Synthesis, physical properties, and gamma-ray shielding capacity of different Ni-based super alloys,” *Radiat. Phys. Chem. Oxf. Engl.* 1993, vol. 186, no. 109483, p. 109483, 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109483.
- [35] K. Sriwongsa et al., “Radiation and fast neutron shielding properties of nickel-based superalloys: Inconel 600, 718 and 725 superalloys,” *Integr. Ferroelectr.*, vol. 224, no. 1, pp. 120–133, 2022, doi: 10.1080/10584587.2022.2035602.
- [36] I. A. Choudhury and M. A. El-Baradie, “Machinability of nickel-base super alloys: a general review,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 77, no. 1–3, pp. 278–284, 1998, doi: 10.1016/S0924-0136(97)00429-9.
- [37] B. Yalman, “Yüksek entropili alaşım matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Eskişehir Teknik Üniv., Eskişehir, Türkiye, 2019.
- [38] J.-P. Couzinié and G. Dirras, “Body-centered cubic high-entropy alloys: From processing to underlying deformation mechanisms,” *Mater. Charact.*, vol. 147, pp. 533–544, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2018.07.015.
- [39] M. Yetiş, “Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık yanma sentezi ile üretilen AlCoxCrFeNi yüksek entropili alaşım sistemindeki kobalt oranı değişiminin

incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2019.

- [40] J. Bishop-Moser and D. Miracle, “Manufacturing high entropy alloys: Pathway to industrial competitiveness,” 2018, <https://hdl.handle.net/2027.42/146747>.
- [41] İ. Ürgen, “Yüksek Entropili AlCoCrFeNiTi esaslı alaşımların PTA yöntemi ile kaplanması ve özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bil. Ens., Osman Gazi Üniv., Eskişehir, Türkiye, 2019.
- [42] K. B. Zhang et al., Fu, Z. Y., Zhang, J. Y., Wang, W. M., Wang, H., Wang, Y. C., Zhang, Q. J., Shi, J., “Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiTiAl high-entropy alloys,” *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater.*, vol. 508, no. 1–2, pp. 214–219, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2008.12.053.
- [43] K. Zhang and Z. Fu, “Effects of annealing treatment on properties of CoCrFeNiTiAl_x multi-component alloys,” *Intermetallics (Barking)*, vol. 28, pp. 34–39, 2012, doi: 10.1016/j.intermet.2012.03.059.
- [44] E. Şakar, Ö. F. Özpolat, B. Alım, M. I. Sayyed, and M. Kurudirek, “Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry,” *Radiat. Phys. Chem. Oxf. Engl.* 1993, vol. 166, no. 108496, p. 108496, 2020, doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108496.
- [45] F. C. Hila et al., “EpiXS: A Windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8),” *Radiat. Phys. Chem. Oxf. Engl.* 1993, vol. 182, no. 109331, p. 109331, 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.109331.
- [46] I. I. Bashter, “Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 24, no. 17, pp. 1389–1401, 1997, doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0.
- [47] Z. Aygun, “Study on radiation shielding characteristics of refractory high entropy alloys by EpiXS code,” *Acta Phys. Pol. A.*, vol. 143, no. 1, pp. 66–74, 2023, doi: 10.12693/APhysPolA.143.66.
- [48] Z. Aygun, M. Aygün, and N. Yarbaşı, “A study on radiation shielding potentials of green and red clayey soils in Turkey reinforced with marble dust and waste

tire,” *Journal of New Results in Science*, vol. 10, no. 3, pp. 46–59, 2021, doi: 10.54187/jnrs.986038.

- [49] M. Aygün and Z. Aygun, “Comprehensive analysis on radiation shielding characteristics of borogypsum (boron waste) by Phy-X/PSD code,” *Rev. Mex. Fis.*, in press, 2023.

