

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



NÜKLEER REAKTÖRLERDE KULLANILAN BAZI
ALAŞIMLARIN GAMA VE NÖTRON ZIRHLAMA
KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ

ABUZER YAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hasan OĞUL

SİNOP - 2024

TEZ KABUL

ABUZER YAZ tarafından hazırlanan “**NÜKLEER REAKTÖRLERDE KULLANILAN BAZI ALAŞIMLARIN GAMA VE NÖTRON ZIRHLAMA KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ** ” başlıklı bu çalışma, 19.07.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr., Ferdi AKMAN
Bingöl Üniversitesi/ Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu

İmza

**Üye
(Danışman)**

Doç. Dr., Hasan OĞUL
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi, Hakan US
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Fadime DİRİK

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde 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 çalışmada 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.



Abuzer Yaz

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NÜKLEER REAKTÖRLERDE KULLANILAN BAZI ALAŞIMLARIN GAMA VE NÖTRON ZIRHLAMA KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ

ABUZER YAZ

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. HASAN OĞUL

Bu tez çalışması bazı ticari nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanılan SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4 ve Incolay 800H alaşımlarının gamma ve nötron zırhlama açısından değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda bahsi geçen bütün alaşımlar teorik ve Monte Carlo (MC) simülasyonları kullanılarak gamma ve nötron zırhlama açısından çeşitli enerjilerde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre kullanılan teorik hesaplama programları (WinXCOM ve EpiXS) ile MC simülasyon programları (GEANT4 ve FLUKA) arasında çok iyi bir uyum saptanmıştır. Ek olarak, Sodyum İyodür detektörü yardımıyla SS304 ve Incolay 800H alaşımlarının gamma zırhlama parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bu iki alaşım ayrıca 300, 500, 700 ve 1000 °C sıcaklıklarda ısıtılarak ani soğutma (Quenching) veya kendiliğinden soğuma işlemlerine tabi tutularak her iki metodun gama ışını zırhlaması üzerine etkisi araştırılmış ve mikro sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Spesifik olarak, kendiliğinden soğuma kullanılarak 1000°C'de işleme tabi tutulan SS304 numunesinin kütle azaltma katsayısı değeri, 1173 keV'de işlenmemiş SS304 numunesinin kütle azaltma katsayısı değerinden yaklaşık %17 daha yüksektir. Benzer bir eğilim 1332,5 keV'de de gözlenmektedir. Bu davranış aynı zamanda Incoloy 800H örneklerinde de gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklık etkisi Incoloy 800H ta daha azdır: kendiliğinden soğuma kullanılarak 1000°C'de işlenen Incoloy 800H örneğinin kütle azaltma katsayısı değeri, 1173 keV'de işlenmemiş Incoloy 800H örneğinin kütle azaltma katsayısı değerinden yaklaşık %10 daha yüksektir.

ANAHTAR KELİMELEER: Gama Zırhlama; Nötron Zırhlama; GEANT4; FLUKA; Sodyum İyodür Dedektörü (NaI); XCOM; EpiXS; SS304; 08X18N10T; Zirkaloy-2; Zirkaloy-4; Incoloy 800H

Temmuz 2024, 123 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

DETERMINATION OF THE GAMMA AND NEUTRON SHIELDING CAPABILITIES OF CERTAIN ALLOYS USED IN NUCLEAR REACTORS

ABUZER YAZ

SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS

DEPARTMENT OF NUCLEAR ENERGY ENGINEERING

SUPERVISOR:DOÇ. DR. HASAN OĞUL

This thesis aims to evaluate the gamma and neutron shielding properties of certain alloys used as structural materials in some commercial nuclear reactors, specifically SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4, and Incoloy 800H. Within this scope, all mentioned alloys were assessed for gamma and neutron shielding at various energies using theoretical calculations and Monte Carlo (MC) simulations. The findings revealed a strong agreement between the theoretical calculation programs (WinXCOM and EpiXS) and the MC simulation programs (GEANT4 and FLUKA). Additionally, the gamma shielding parameters of SS304 and Incoloy 800H alloys were experimentally determined using a Sodium Iodide detector. These two alloys were also subjected to heating at 300, 500, 700, and 1000°C followed by quenching or natural cooling to investigate the effects of these methods on gamma radiation shielding and to conduct microhardness tests. Specifically, the mass attenuation coefficient value of the SS304 sample processed at 1000°C using natural cooling is approximately 17% higher at 1173 keV than that of the unprocessed SS304 sample. A similar trend is observed at 1332.5 keV. This behavior is also observed in Incoloy 800H samples, although the temperature effect is less pronounced in Incoloy 800H: the mass attenuation coefficient value of the Incoloy 800H sample processed at 1000°C using natural cooling is approximately 10% higher at 1173 keV than that of the unprocessed Incoloy 800H sample.

KEYWORDS:Gamma Shielding; Neutron Shielding; GEANT4; FLUKA; Sodium Iodide Detector (NaI); XCOM; EpiXS; SS304; 08X18N10T; Zirkaloy-2; Zirkaloy-4; Incoloy 800H

July 2024, 123 Page

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusunu seçmemde yardımcı olan ve çalışmanın gerçekleştirilmesinde destek sağlayan değerli bilgilerini zamanını ve uzmanlığını benimle her daim paylaşan, samimi, güler yüzlü danışmanım Doç. Dr. Hasan OĞUL'a minnettarım ve kendisine teşekkürü bir borç biliyor, şükranlarımı sunuyorum.

Sürekli desteğini esirgemeyen ve bilgilerini benimle paylaşan kıymetli Dr. Fatih BULUT, Dr. Öğr. Üyesi Hakan US, Öğr. Görevlisi Dr Ahmet TIĞLI ve jüride görev almayı kabul ettiği için Prof. Dr. Ferdi AKMAN'a da teşekkürlerimi sunmak isterim.

Ayrıca bu zorlu araştırma yolculuğum süresince ve tüm eğitim hayatım boyunca sürekli desteğini hissettiğim babam Âdem YAZ, annem Fatma YAZ ve bütün aileme maddi manevi bütün desteklerinden dolayı teşekkür eder her birine büyük bir minnet borçluyum.

Son olarak bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, aldığım kararları her zaman destekleyen, benim için her türlü fedakârlıkta bulunan değerli arkadaşlarım, İbrahim ÇETİNKAYA, Eyyüb POLAT, Mustafa YÜKSEKYAYLA, Ahmet Tunahan DİZDAR, Ahmet AY, Âdem AYDOĞDU ve Mehmet Sadık TANDOĞAN'a teşekkür ederim.

Abuzer YAZ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Radyasyon.....	5
2.2. Radyasyon Çeşitleri	5
2.2.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	5
2.2.2. İyonlaştırıcı radyasyon.....	6
2.3. Radyasyondan Korunma Yolları	7
2.4. Radyasyon Zırhlama Malzemeleri.....	7
2.5. Nükleer Reaktörler.....	8
2.5.1. Basınçlı su reaktörü	10
2.5.2. Rus basınçlı su reaktörü.....	11
2.5.3. Kanada döteryum uranyum reaktörü	12
2.5.4. Çok yüksek sıcaklık reaktörü.....	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Kullanılan Alaşımlar.....	15
3.1.1. SS304.....	15
3.1.2. 08X18N10T	16
3.1.3. Zirkaloy-2	17
3.1.4. Zirkaloy-4	18
3.1.5. Incoloy 800H	18
3.2. Kullanılan alaşımların yapısındaki elementler	19
3.3. Radyasyon Zırhlama	21
3.3.1 Nötron radyasyonu zırhlama.....	21
3.3.1.1. Nötron radyasyon zırhlama için GEANT4 kodu	21
3.3.1.2. Nötron radyasyon zırhlama için FLUKA kodu.....	25
3.3.1.3. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti	28

3.3.2. Gama radyasyon zırlama	30
3.3.2.1. Gama radyasyon zırlama için GEANT4 kodu	30
3.3.2.2. Gama radyasyon zırlama için FLUKA kodu	32
3.3.2.3. Gama radyasyon zırlama için XCOM kodu	33
3.3.2.4. Gama radyasyon zırlama için EpiXS kodu	35
3.3.2.5. Gama radyasyonu zırlama için deneysel yöntem	36
3.3.2.6. Gama radyasyonu zırlamada kullanılan parametreler	38
3.4. Isıl İşlem	40
3.5. Hazırlanan Numunelerin Yoğunluklarının Belirlenmesi	44
3.6. Numunenin Sertlik Ölçümü	44
4. BULGULAR	46
4.1. Nötron Radyasyon Zırlama Bulguları	46
4.1.1. Kalınlığa bağlı olarak alaşımların nötron radyasyonu zırh performansı	47
4.1.2. Nötron enerjisine bağlı olarak alaşımların nötron radyasyonu zırlama performansı	52
4.2. Gama Radyasyonu Zırlama Bulguları	58
4.2.1. Kütle azaltma katsayısı sonuçları	58
4.2.2. Lineer azaltma katsayısı sonuçları	65
4.2.3. Yarı değer kalınlığı sonuçları	71
4.2.4. Radyasyon koruma verimliliği sonuçları	77
4.2.5. Termal işlemler ve gama radyasyonu zırlama performansı üzerine etkisi	83
4.3. Nötron Radyasyonunun Alaşımlarla Etkileşimi Sonucu Oluşan İkincil Radyasyon Değerlendirilmesi	89
4.4. Sertlik Deneyi Sonuçları	96
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	99
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	106

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1 SS304 kimyasal bileşimi (URL-5, 2023, Lingadurai, vd., 2012).....	16
Tablo 3.2 08X18N10T kimyasal bileşimi (URL-7, 2023, Gorynin, vd., 2003)	17
Tablo 3.3 Zirkaloy-2 kimyasal bileşimi (Hidetoshi Takiishi, vd., 2012, URL-9, 2023) .	18
Tablo 3.4 Zirkaloy-4 kimyasal bileşimi (Hidetoshi Takiishi, vd., 2012, URL-10, 2023)	18
Tablo 3.5 Incoloy 800H kimyasal bileşimi (URL-12, 2023,).....	19
Tablo 3.6 Elementlerin temel özellikleri (Augustyn, 2023, Brasted, 2023, Britannica, 2023, Gregersen, 2023,).....	20
Tablo 3.7 FLUKA Birim Sistemi	26
Tablo 3.8 Bu çalışmada kullanılan bazı elementlerin yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri	29
Tablo 4.1 GEANT4 simülasyon kodu ile 4,5 MeV enerjisindeki nötronların 10 mm kalınlığındaki alaşımların üzerine gönderilmesiyle elde edilen sonuçlar	46
Tablo 4.2 Bu çalışmada ele alınan alaşımların yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri.....	47
Tablo 4.3 Farklı numune kalınlıklarında SS304'ten geçen nötron sayıları	48
Tablo 4.4 Farklı kalınlıklarda 08X18N10T alaşımından geçen nötron sayısı	48
Tablo 4.5 Farklı numune kalınlıklarında Zirkaloy-2'den geçen nötron sayıları.....	49
Tablo 4.6 Farklı numune kalınlıklarında Zirkaloy-4'ten geçen nötron sayıları	50
Tablo 4.7 Farklı numune kalınlıklarında Incoloy 800H'dan geçen nötron sayıları.....	51
Tablo 4.8 0,1 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	53
Tablo 4.9 0,5 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	53
Tablo 4.10 1 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	54
Tablo 4.11 2 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	54
Tablo 4.12 4,5 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	54
Tablo 4.13 8 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	54
Tablo 4.14 10 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı	55
Tablo 4.15 Farklı enerjilerdeki nötronların alaşımlardan geçen sayısı.....	57
Tablo 4.16 SS304 için kütle azaltma katsayısı (cm ² /g).....	59

Tablo 4.17 08X18N10T için kütle azaltma katsayısı (cm^2/g).....	60
Tablo 4.18 Zirkaloy-2 için kütle azaltma katsayısı (cm^2/g).....	60
Tablo 4.19 Zirkaloy-4 için kütle azaltma katsayısı (cm^2/g).....	61
Tablo 4.20 Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı (cm^2/g).....	62
Tablo 4.21 SS304 için lineer azaltma katsayısı (cm^{-1})	65
Tablo 4.22 08X18N10T için lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}).....	66
Tablo 4.23 Zirkaloy-2 için lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}).....	66
Tablo 4.24 Zirkaloy-4 için lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}).....	67
Tablo 4.25 Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}).....	68
Tablo 4.26 SS304 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)	71
Tablo 4.27 08X18N10T için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)	72
Tablo 4.28 Zirkaloy-2 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)	72
Tablo 4.29 Zirkaloy-4 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)	73
Tablo 4.30 Incoloy 800H için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)	74
Tablo 4.31 SS304 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)	77
Tablo 4.32 08X18N10T için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%).....	78
Tablo 4.33 Zirkaloy-2 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%).....	79
Tablo 4.34 Zirkaloy-4 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%).....	80
Tablo 4.35 Incoloy 800H için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%).....	80
Tablo 4.36 SS304 ve Incoloy 800H alaşımları için ısıt işlemsiz/işlemli yoğunluk sonuçları.....	84
Tablo 4.37 Isıt işlemsiz/işlemli SS304 için kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm^2/g) ..	85
Tablo 4.38 Isıt işlemsiz/işlemli Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm^2/g).....	85
Tablo 4.39 Isıt işlemsiz/işlemli SS304 için lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1})....	85
Tablo 4.40 Isıt işlemsiz/işlemli Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1}).....	86
Tablo 4.41 Nötronların birincil etkileşimi sonucu açığa çıkan ikincil radyasyonlar ve ortalama enerjileri (GEANT4).....	90
Tablo 4.42 10 mm numune kalınlığında her bir alaşım üzerinden geçen nötron sayıları (GEANT4)	91
Tablo 4.43 SS304 için mikro sertlik deney sonuçları.....	97
Tablo 4.44 Incoloy 800H için mikro sertlik deney sonuçları	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (Ocaktan, E. M., 2014)	6
Şekil 2.2 Giricilik bakımından iyonlaştırıcı radyasyonlar (URL-1, 2023).....	7
Şekil 2.3 PWR çalışma prensibi (URL-2, 2023)	11
Şekil 2.4 VVER çalışma prensibi (URL-3, 2019)	12
Şekil 2.5 CANDU reaktörünün şematik görünümü 1) Reaktör binası; 2) Calandria; 3) Türbin binası; 4) Türbin jeneratörü; 5) Hizmet binası; 6) Püskürtme sistemi; 7) Basınçlandırıcı; 8) Isı taşıma pompaları; 9) Buhar jeneratörleri; 10) Isı taşıma sistemi; 11) Yakıt doldurma makinesi 12) Yedek su deposu (Jiang, 2016)....	13
Şekil 2.6 VHTR şematik gösterimi (Pioro, 2016)	14
Şekil 3.1 GEANT4 programına tanımlanan elementler	22
Şekil 3.2 GEANT4 programına tanımlanan ana malzemeler	23
Şekil 3.3 GEANT4 nötron çalıştırma komutları.....	24
Şekil 3.4 GEANT4 nötron simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri.....	24
Şekil 3.5 Simülasyon sonucu elde edilen veriler	25
Şekil 3.6 FLUKA programının Flair arayüzü ile oluşturulan input dosyası	27
Şekil 3.7 Flair arayüzünde tanımlanan element ve alaşımlar için simülasyon başlatma komutu.....	28
Şekil 3.8 Geant4 gama çalıştırma komutları	31
Şekil 3.9 GEANT4 gama simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri	31
Şekil 3.10 FLUKA gama simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri.....	33
Şekil 3.11 XCOM kullanıcı arayüzü sayfası	34
Şekil 3.12 XCOM malzeme içeriği tanımlama arayüzü.....	34
Şekil 3.13 EpiXS kullanıcı arayüzü sayfası.....	36
Şekil 3.14 EpiXS malzeme içeriği tanımlama arayüzü (08X18N10T)	36
Şekil 3.15 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait NaI(Tl) dedektör sistemi.....	37
Şekil 3.16 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait NaI(Tl) dedektör sisteminin bilgisayar bileşeni	37
Şekil 3.17 Deneysel yöntem görseli	38

Şekil 3.18 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait kül fırını ve numunelerin yerleşimi	40
Şekil 3.19 1000 °C'de ısıtılan SS304 ile Incoloy 800H alaşımın kendiliğinden soğumaya bırakılma işlemi.....	41
Şekil 3.20 1000 °C'de ısıtılan SS304 ile Incoloy 800H alaşımın buzlu su ile aniden soğuma işlemi.....	41
Şekil 3.21 1000 °C için ısıtma ve soğutma işlemi tamamlanan Incoloy 800H alaşımı ..	42
Şekil 3.22 1000 °C için ısıtma ve soğutma işlemi tamamlanan SS304 alaşım.....	42
Şekil 3.23 SS304 alaşımın ısıtma-soğutma işlemi sonrası görselleri	43
Şekil 3.24 Incoloy 800H alaşımın ısıtma-soğutma işlemi sonrası görselleri	43
Şekil 3.25 Arşimet yoğunluk kiti.....	44
Şekil 3.26 Sinop Üniversitesi Metkon Forcipol 202 zımpara ve parlatma makinesi	45
Şekil 3.27 Sinop Üniversitesi AFFRI marka DM2D model mikro sertlik cihazı.....	45
Şekil 4.1 SS304 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi	48
Şekil 4.2 08X18N10T alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi	49
Şekil 4.3 Zirkaloy-2 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi	50
Şekil 4.4 Zirkaloy-4 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi	51
Şekil 4.5 Incoloy 800H alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi	52
Şekil 4.6 Farklı kalınlıklarda seçilen alaşım malzemelerinden geçen nötron sayısı (GEANT4).....	52
Şekil 4.7 10 mm numune kalınlığındaki SS304'ten geçen nötron sayısı	55
Şekil 4.8 10 mm numune kalınlığındaki 08X18N10T'ten geçen nötron sayısı	55
Şekil 4.9 10 mm numune kalınlığındaki Zirkaloy-2'den geçen nötron sayısı.....	56
Şekil 4.10 10 mm numune kalınlığındaki Zirkaloy-4'ten geçen nötron sayısı	56
Şekil 4.11 10 mm numune kalınlığındaki Incoloy 800H'dan geçen nötron sayısı.....	56
Şekil 4.12 Seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısının nötron enerjisine göre değişimi (GEANT4)	57
Şekil 4.13 Nötron enerji sınıflarına göre 10 mm kalınlığındaki seçilen alaşım malzemelerinden geçen nötron sayısı.....	58

Şekil 4.14 SS304 için kütle azaltma katsayısı grafiği	63
Şekil 4.15 08X18N10T için kütle azaltma katsayısı grafiği.....	63
Şekil 4.16 Zirkaloy-2 için kütle azaltma katsayısı grafiği.....	63
Şekil 4.17 Zirkaloy-4 için kütle azaltma katsayısı grafiği.....	64
Şekil 4.18 Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı grafiği.....	64
Şekil 4.19 Her bir alaşıma ait kütle azaltma katsayısı grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4).....	64
Şekil 4.20 SS304 için lineer azaltma katsayısı grafiği	69
Şekil 4.21 08X18N10T için lineer azaltma katsayısı grafiği.....	69
Şekil 4.22 Zirkaloy-2 için lineer azaltma katsayısı grafiği.....	69
Şekil 4.23 Zirkaloy-4 için lineer azaltma katsayısı grafiği.....	70
Şekil 4.24 Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı grafiği.....	70
Şekil 4.25 Her bir alaşıma ait lineer azaltma katsayısı grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4).....	70
Şekil 4.26 SS300 için yarı değer kalınlık grafiği.....	75
Şekil 4.27 08X18N10T için yarı değer kalınlık grafiği.....	75
Şekil 4.28 Zirkaloy-2 için yarı değer kalınlık grafiği.....	76
Şekil 4.29 Zirkaloy-4 için yarı değer kalınlık grafiği.....	76
Şekil 4.30 Incoloy 800H için yarı değer kalınlık grafiği.....	76
Şekil 4.31 Her bir alaşıma ait yarı değer kalınlık grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4).....	77
Şekil 4.32 SS304 için radyasyon koruma verimliliği grafiği	81
Şekil 4.33 08X18N10T için radyasyon koruma verimliliği grafiği.....	82
Şekil 4.34 Zirkaloy-2 için radyasyon koruma verimliliği grafiği.....	82
Şekil 4.35 Zirkaloy-4 için radyasyon koruma verimliliği grafiği.....	82
Şekil 4.36 Incoloy 800H için radyasyon koruma verimliliği grafiği.....	83
Şekil 4.37 Her bir alaşıma ait radyasyon koruma verimliliği grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4).....	83
Şekil 4.38 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi.....	87
Şekil 4.39 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1332,5 keV de değişimi.....	87
Şekil 4.40 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi.....	87

Şekil 4.41 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma	
katsayısının 1332,5 keV de değişimi.....	88
Şekil 4.42 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma	
katsayısının 1173 keV de değişimi.....	88
Şekil 4.43 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma	
katsayısının 1332,5 keV de değişimi.....	88
Şekil 4.44 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma	
katsayısının 1173 keV de değişimi.....	89
Şekil 4.45 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma	
katsayısının 1332,5 keV de değişimi.....	89
Şekil 4.46 SS304 için nötron radyasyonu etkileşimleri.....	92
Şekil 4.47 08X18N10T için nötron radyasyonu etkileşimleri.....	93
Şekil 4.48 Zirkaloy-2 için nötron radyasyonu etkileşimleri	94
Şekil 4.49 Zirkaloy-4 için nötron radyasyonu etkileşimleri	95
Şekil 4.50 Incoloy 800H için nötron radyasyonu etkileşimleri	96
Şekil 4.51 SS304 için mikro sertlik grafiği	98
Şekil 4.52 Incoloy 800H için mikro sertlik grafiği.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
C	: Karbon
Cd	: Kadmiyum
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetrekaare
cm³	: Santimetreküüp
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Co	: Kobalt Nb
D	: Döteryum
eV	: Elektron volt
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
He	: Helyum
Hg	: Cıva
kg	: Kilogram
m	: Metre
m²	: Metrekare
Mn	: Mangan
MeV	: Milyon elektron volt
MJ	: Megajoule
N	: Azot
n	: Nötron
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
°C	: Santigrat
°K	: Kelvin
p	: Proton
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
Pu	: Plütonyum
S	: Kükürt
Sn	: Kalay
s	: Saniye
Si	: Silisyum
S-I	: Sülfür-iyodin
Ti	: Titanyum
Th	: Toryum
Zr	: Zirkonyum
α	: Alfa
β	: Beta

Kısaltmalar

I_0	: Malzemeye gönderilen nötron sayısı
Σ_R/ρ	: Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti
τ_E	: Hapis süresi
μ	: Lineer azaltma katsayısı
I	: Malzemedan geçen nötron sayısı
ACR	: Otomatik İçerik Tanıma
AES-92	: Nükleer Elektrik Santrali
AIM	: Aktif Entermüdülasyon
API	: Uygulama Programlama Ara yüzü
ASME	: Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu
B4C	: Bor Karbür
bar	: Basınç
BJ	: Buhar Jeneratörleri
BPE	: Bayt Çifti Kodlama
BWR	: Kaynar Su Reaktörleri
CANDU	: Kanada Döteryum- Uranyum Reaktörleri
CFC	: Karbon fiber kompozit
CO ₂	: Karbondioksit
Dnom	: Nominal Çap
dpa	: Atom başına yer değiştirme
ECCS	: Acil Kor Soğutma Sistemi
ELM	: Kenar Yerelleştirilmiş Modları
EPRI	: Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü
E _a	: Alfa parçacıklar tarafından taşınan enerji
FLUKA	: Dalgalı çağlayanlar-basamaklar (FLUktuierende KAskade)
GEANT4	: Geometri ve İzleme (GEometry AND Tracking)
HHFC	: Yüksek ısı akışı bileşenleri
HLW	: Yüksek Seviyeli Atık
HTS	: Yüksek Geçirgenlikli Tarama
HTTR	: Yüksek Sıcaklık Test Reaktörü
IFBA	: Entegre Yakıt Yanabilir Absorban
IR	: Kızılötesi
LF	: Düşük Sıcaklık Hizmeti
MGV	: Moderasyon/Yakıt Hacim Oranı
MOX	: Karışık Oksit Yakıtı
MPa	: Megapascal
NPP	: Nükleer Güç Santrali
NvNPP	: Yeni nesil nükleer enerji santralleri
OSY	: Ortalama serbest yol
P _{Br}	: Bremsstrahlung kayıpları
P _{trans}	: Çeşitli taşıma süreçleri yoluyla kaybedilen toplam güç
PWR	: Basınçlı Su Reaktörleri
PWSCC	: Birincil Su Gerilim Korozyon Çatlaması
rad	: Absorbe radyasyon dozu
RCCA	: Çubuk Kümeli Kontrol Düzeni
RSG	: Reaktör Güvenliği Grubu
RWST	: Yakıt İkmali Su Depolama Tankı
SEU	: Tek Olay Bozulması

TVL	: Onuncu Değer Katmanı
VHTR	: Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü
VVER	: Rus Basıncılı Su Reaktörü
x	: Malzeme kalınlığı
YDK	: Yarı değer kalınlığı
Z	: Atom numarası



1. GİRİŞ

Enerjinin ısı, ışık, nükleer ve kimyasal gibi birçok formu bulunmaktadır. Günümüzdeki teknolojik gelişmeleri yakalamak ve onların sürdürülebilirliğini sağlamak, enerjinin bir formdan diğerine dönüştürülmesi ve dönüşen enerjinin iş yapmak için kullanması sayesinde mümkün olabilmektedir. Bu kapsamda, nükleer enerji de birçok ülke için gelecek vadetmektedir. Ancak, nükleer enerji teknolojilerde dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi radyasyon olgusudur. Radyasyon olgusu yalnızca çevresindeki canlılar için değil kullanılan teknolojinin malzemesi içinde önem arz etmektedir. Bundan dolayı istenmeyen radyasyona maruz kalma riskini azaltılması gerekmektedir. Azaltırken yapılması gereken bazı uygulamalar bulunmaktadır. Bunların başlıcaları zaman, mesafe ve zırhlama. Bazı durumlarda zaman ve mesafe kısıtlanamaz olacağı için radyasyon zırhlama materyallerinin geliştirilmesi ve uygulamasının doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda çok uzun yıllardır kurşun gibi çok toksik olan bir elementin geleneksel zırhlama malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bundan dolayı uzun bir süredir araştırmacılar toksik olmayan özgün zırhlama malzemeleri geliştirilmek için çeşitli çalışmalar yürütmektedirler.

Nükleer reaktörlerde ise yapı bileşeni olarak çeşitli alaşımlar tercih edilmektedir. Bu kapsamda farklı fisyon reaktör türlerinin farklı alaşımlara odaklandığı da görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4 ve Incoloy 800H alaşımları radyasyon zırhlama açısından değerlendirilmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu alaşımlar sırasıyla basınçlı su reaktörü (PWR), Rus basınçlı su reaktörü (VVER), Kanada döteryum uranyum reaktörü (CANDU), çok yüksek sıcaklık reaktörlerinde (VHTR) kullanılmaktadır. Bu sayede farklı reaktör tiplerinin seçilen yapı malzemesi açısından kıyaslanması da mümkün olmuştur.

Radyasyon zırhlama açısından yalnızca bahsi geçen alaşımlar hakkında değil birçok alaşım hakkında da çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, X ışınlarının ve gama ışınlarının dış tellerinde kullanılan paslanmaz çelik, nitinol, elgiloy ve beta-titanyum alaşımları gibi farklı malzemelerle nasıl etkileşime girdiğinin detayları literatürde bulunmaktadır (Akman, vd., 2024). Goldsmid (1961) yaptığı çalışmada düşük sıcaklıklarda Bi₂Te₃ ve Bi₂Te₃ alaşımlarında yapılan ölçümler, kafes ısı iletkenliğinin Te atomlarının yerine I, Se veya S atomlarının geçmesi durumunda özellikle hassas olduğunu göstermiştir (Goldsmid, 1961). Ayrıca, kafes ısı iletkenliği için anizotropi

oranının, alaşımlar için saf Bi_2Te_3 ile neredeyse aynı olduğu saptanmıştır (Goldsmid, 1961). Biyobozunur magnezyum alaşımlarının muazzam potansiyeline rağmen, Mg bazlı biyomedikal implantların fizyolojik ortamda hızlı bozunma oranları, birçok klinik uygulamada ciddi sınırlamalar getirmektedir (Xin, vd., 2011). Bu nedenle, malzemelerin performansını araştırmak ve ilgili mekanizmaları anlamak için kapsamlı in vitro (laboratuvar ortamında ya da yapay koşullarda) çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, biyomedikal magnezyum alaşımlarının simüle edilmiş fizyolojik ortamda in vitro çalışmalarına dair güncel bir inceleme sunulmaktadır (Xin, vd., 2011). Çok eski bir çalışmada, insanlarda ve evcil hayvanlarda metal ortopedik implantların yerleştirildiği bölgelerdeki kötü huylu tümörlere ilişkin vaka raporları gözden geçirilmiştir; implant edilmiş metal alaşımlarının ve nikel, krom, kobalt ve titanyum tozlarının kemirgenlerdeki kanserojenik biyoanalizlerinin sonuçları özetlenmiştir (F. William Sunderman, 1989). Bu inceleme, magnezyum ve alaşımlarının korozyon mekanizmaları üzerine yapılan araştırmalardaki son gelişmeleri ve devam eden araştırmalar için bir temel sağlamıştır. Bazı alaşımların mikro yapı ve ikincil fazlar gibi metalurjik faktörlerin, ısıtılma işlem ve kaynak gibi işlem faktörlerinin ve sıcaklık, bağıl nem, çözeltinin pH değerleri ve konsantrasyon gibi çevresel faktörlerin korozyon üzerindeki etkisi başka bir çalışmada incelenmiştir (Zeng, vd., 2006). Özellikle, AlMn parçacıklarının neden olduğu çukur korozyonuna ilişkin bir mekanizma önerilmiştir. AZ91D kaynak malzemesinin korozyon özellikleri araştırılmıştır (Zeng, vd., 2006). Diğer bir çalışmada, magnezyum alaşımlarının ince folyo tekniği kullanılarak incelenen Al-Mg-Si alaşımının iletim elektron mikroskobu çalışmaları, sertleştirilmiş ve yaşlandırılmış koşullarda birçok ilginç özelliği ortaya çıkarmıştır (Thomas, 1961).

Literatürde genel amaçlı kullanılan alaşımlara ek olarak reaktörlerde kullanılan alaşımların radyasyon zırhlama açısından değerlendirmeleri de bulunmaktadır. Z. Aygün ve M. Aygün (2022) tarafından hazırlanan bir çalışmada uzay araçları, gaz türbinleri, nükleer reaktörler ve roket motorları gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için ana adaylar olan Inconel-617 ve Incoloy-800HT'nin foton-madde etkileşim parametreleri hesaplanmıştır (Aygün, vd., 2022). Alaşımların radyasyon azaltma kabiliyetlerini belirlemek için Phy-X/PSD ve EpiXS yazılımlarını kullanarak geniş bir enerji aralığında malzemeler incelenmiştir. Inconel-617'nin Incoloy-800HT'den daha yüksek bir zırhlama yeteneğine sahip olduğu raporlanmıştır. Başka bir çalışmada, füzyon reaktörlerinde zırh ve ilk duvarın içindeki W'nin (Tungsten) kompozisyonel

değişimini simüle etmek için 1998 yılında bir inceleme yapılmıştır (Noda, vd., 1998). Fizyon reaktörlerinin yanı sıra füzyon reaktörlerinin de radyasyon zırhlama çalışmalarında kendine yer bulduğu görülmektedir. Sato vd. (2003) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, zırh malzemelerinin füzyon reaktörü blanketindeki (örtüsü) trityum üretim oranı (TÜO) üzerindeki etkisini Monte Carlo nötron taşıma hesaplamalarıyla incelenmesi raporlanmıştır (Sato, vd., 2003). Aygün vd. (2017) gama ve hızlı nötron radyasyon sızıntısını önlemek için yüksek performanslı alaşımlı paslanmaz çelik numunelerini incelemişlerdir (Aygün, vd., 2017). Deneysel olarak nötron ve gama zırhlama performansları üretilen alaşımlar için değerlendirilmiştir. Sadawy, vd., (2019) nükleer reaktörlerde kullanılan bazı alaşımların (AISI 1018, SS 304 ve SS2507) radyasyon zırhlama performansını ve korozyon davranışını incelemişlerdir (Sadawy, vd., 2019). Nötron ve gama zırhlama performansları çeşitli enerjilerde gerçekleştirilirken 25 ile 90 °C arasında potansiyostatik ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Mourad vd. (2021) paslanmaz çeliği modifiye ederek içerisinde kobalt elementi bulunmayan 7 farklı paslanmaz çelik üretmişlerdir (Mourad, vd., 2021). Üretilen alaşımların kullanım amacı nükleer reaktörler olarak belirlemişlerdir. Belirtilen çalışmada üretilen alaşımlar 80 keV–1333 keV gama enerjisi aralığında HPGe dedektörü yardımıyla deneysel olarak gama zırhlama açısından değerlendirilirken nötron zırhlama kabiliyetleri hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanarak incelenmiştir. Al-Shelkamy vd. (2023) nükleer güç santrallerinin yapı bileşenlerinde kullanılmak üzere ürettikleri tungsten tabanlı alaşımların mekanik ve radyasyon zırhlama performanslarını raporlamışlardır (Al-Shelkamy vd., 2023).

Literatüre bakıldığında bu tez kapsamında ele alınan alaşımların bazılarının radyasyon zırhlama açısından hiç incelenmediği görülmektedir. Ayrıca literatürde ani soğutma (quenching) ve kendiliğinden soğuma metodlarının radyasyon zırhlama üzerine etkisi ile ilgili bir çalışma bulunamamıştır. Bu tez çalışması kapsamında literatürdeki bu boşluk doldurulmuştur. Bu doğrultuda, sunulan bu tez çalışması ile farklı ülkeler tarafından geliştirilen fizyon nükleer reaktörlerin de kullanılan alaşım çeşitlerinin radyasyon zırhlama kapasiteleri belirlenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin reaktörlerde ısıtılma maruz kalabileceği göz önünde bulundurularak, tez konusu kapsamında SS304 ve Incoloy 800H alaşımları ısıtılma tabi tutulmuştur ve bu alaşımların radyasyon zırhlama kabiliyetlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu bağlamda, ani soğutma ve kendiliğinden soğumaya bırakılan malzemelerin radyasyon

zırhlama davranışlarının nasıl değiştiği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda alaşımların gamma zırhlama kabiliyetleri deneysel, teorik ve simülasyon metotları kullanılarak değerlendirilmiştir. Nötron zırhlama için ise soğuk nötron, termal nötron, yavaş nötron ve hızlı nötron enerjileri kullanılarak teorik ve simülasyon ile malzemeler değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Ek olarak bütün alaşımlarda gama ve nötron etkileşimlerinden sonra oluşan ikincil radyasyon konusu Monte Carlo simülasyonları kullanarak tez kapsamında tartişılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyasyon

Radyasyon, dalgalar veya parçacıklar olarak tanımlanabilecek bir biçimde bir yerden başka bir yere hareket eden enerjidir. En bilinen radyasyon kaynaklarından bazıları güneş, mutfaklarımızdaki mikrodalga fırınlar ve arabalarımızda dinlediğimiz radyolardır. Bu radyasyonun çoğunun insan sağlığı için risk taşımadığı kabul edilebilir. Ancak risk taşımadığı düşünülen radyasyon türlerinin yanı sıra hayati tehlikelere sebep olacak türleri de mevcuttur.

2.2. Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Bu türlerin detayları aşağıda verilmiştir.

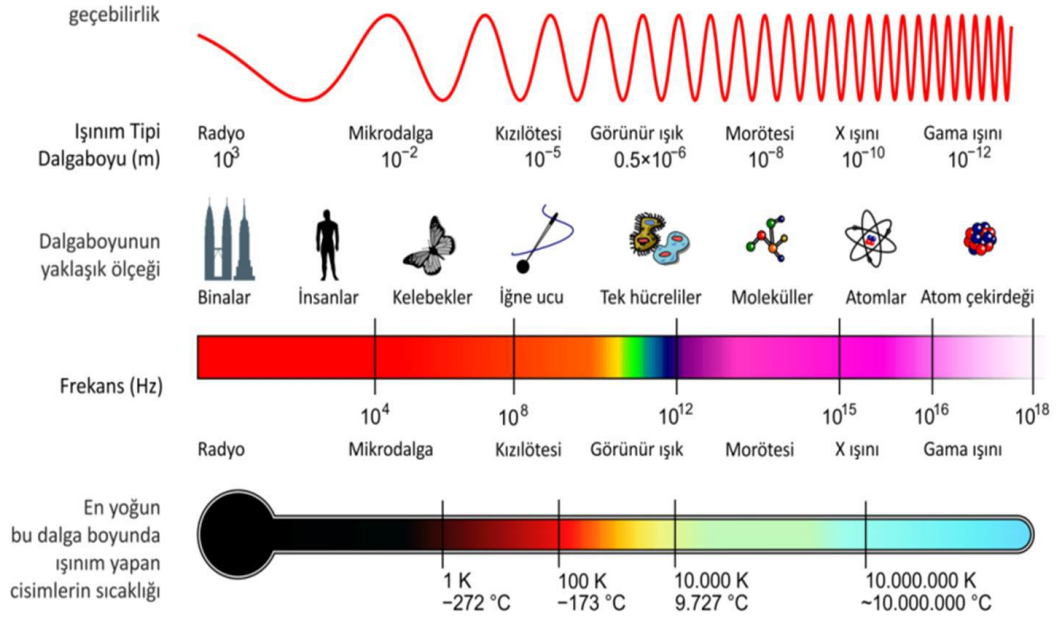
2.2.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, belirli dalga boylarında elektromanyetik dalgalar şeklinde bir kaynak tarafından üretilen bir enerji şeklidir. Böylece, doğal olarak elektromanyetik spektrumun bir parçası olarak ortaya çıkar ve iyonlaştırıcı radyasyondan daha düşük frekansta görünür.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri şunlardır:

- Radyo dalgaları
- Mikrodalgalar
- Görünür ışık
- Ultraviyole (UV) ışınları
- Infrared (IR) ışınları (Yusof, vd., 2000)

Bunlar Şekil 2.1'deki elektromanyetik spektrumda gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (Ocaktan, E. M., 2014)

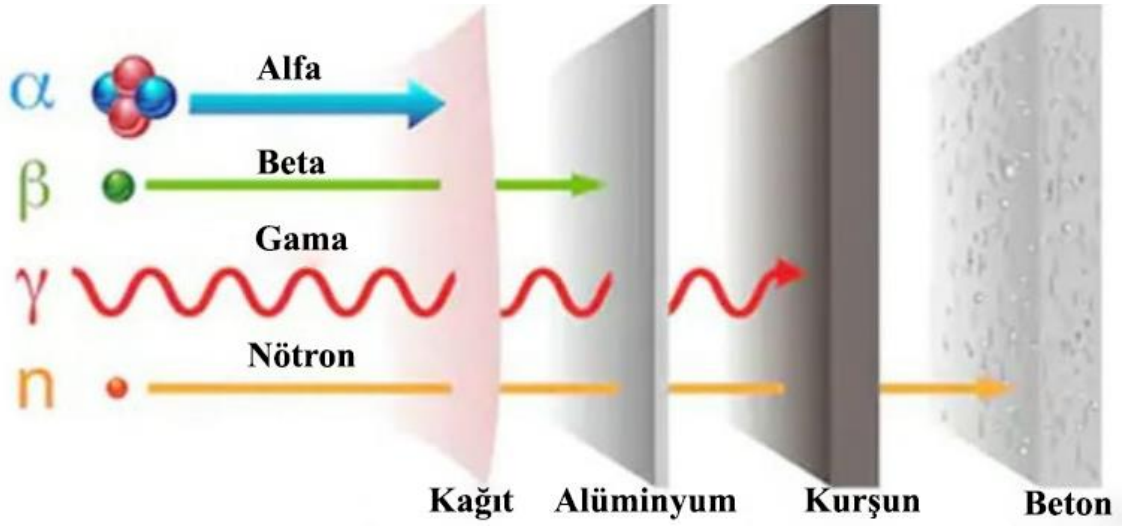
2.2.2. İyonlaştırıcı radyasyon

Enerjisi belirli bir miktarın üzerinde olan radyasyona bir başka ifade ile atomdan en az bir elektron koparabilecek kadar yeterli enerjiye sahip radyasyon türüne "iyonlaştırıcı radyasyon" denir. İyonlaştırıcı radyasyon, yüksek enerjili parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar içeren bir radyasyon türüdür. Bu enerji, molekülleri iyonize edebilir ve hücrelere zarar verebilir.

İyonlaştırıcı radyasyon türleri şunlardır:

- Alfa parçacıkları
- Beta parçacıkları
- Gama ışınları
- X-ışınları
- Nötronlar

Bunlar gericiliklerine göre Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Giricilik bakımından iyonlaştırıcı radyasyonlar (URL-1, 2023)

2.3. Radyasyondan Korunma Yolları

Prensip olarak, harici bir radyasyon kaynağının yakınında kişinin maruz kaldığı doz, kaynaktan olan mesafeyi artırarak, maruz kalma süresini en aza indirerek ve zırh kullanarak azaltılabilir. Mesafe genellikle basit ve etkili bir şekilde kullanılır. Örneğin, ellere ve vücudun geri kalanına verilen dozu en aza indirmek için radyoaktif kaynakları tutmak için maşalar kullanılır. Belirli bir görevi gerçekleştirmek için genellikle belirli bir süre gerektiğinden, maruz kalma süresini önemli ölçüde sınırlamak her zaman mümkün değildir. Ancak bazen, kaynak olmadan önceden yapılan alıştırmalar, gerçek bir iş yapılırken maruz kalma sürelerini azaltabilir. Harici radyasyondan korunmada mesafe ve zaman faktörleri avantajlı bir şekilde kullanılabilirken, zırhlama, doz oranını sınırlandırarak personelin maruziyetini sınırlamanın daha güvenilir bir yolunu sağlar. Prensip olarak, tek başına koruma, doz oranlarını istenen seviyelere indirebilir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmak bir risk taşısa da maruz kalmaktan tamamen kaçınmak mümkün değildir (Turner, 2008).

2.4. Radyasyon Zırhlama Malzemeleri

Nötron zırhlamada, hidrojen gibi hafif elementler içeren malzemeler gerektirirken, Gama/X-ışını zırhlama malzemelerinde yüksek atom numaralı elementlere veya malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

- Sıradan beton
- Ağır beton

- Kurşun
- Çelik
- Polimer
- Cam
- Polietilen veya parafin,
- Toprak
- Ahşap

2.5. Nükleer Reaktörler

Bir nükleer reaktör, bir fisyon nükleer zincir reaksiyonunu veya nükleer füzyon reaksiyonlarını başlatmak ve kontrol etmek için kullanılan bir cihazdır. Nükleer fisyonlardan gelen ısı, sırayla buhar türbinlerinden geçen bir çalışma sıvısına geçirilir ve bu sayede elektrik jeneratörlerinin şaftlarını döndürür. Nükleer olarak üretilen buhar prensip olarak endüstriyel proses ısısı veya bölgesel ısıtma için de kullanılabilir. Bazı reaktörler, tıbbi ve endüstriyel kullanım için izotoplar üretmek veya silah kalitesinde plütonyum üretimi için de kullanılır. 2022 itibarıyla, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), dünya çapında faaliyette olan 422 nükleer güç reaktörü ve 223 nükleer araştırma reaktörü olduğunu bildirmektedir.

Gelişmekte olan ülkelerdeki yaşam standardı ve nüfus artışına yönelik talep, enerji arzında önemli bir artış gerektirmektedir. Nükleer enerji, sera gazı emisyonları olmadan toplu elektrik arzı sağlamanın bir yoludur. Nükleer enerjinin karşı karşıya olduğu zorluklar arasında;

- Mevcut santrallerin en üst düzeyde güvenli çalışmasını sağlamaya devam etmek,
- Yüksek seviyeli atıkların bertarafını gerçekleştirmek,
- Sürdürülebilir kalkınma için nükleer enerjinin sağlam bir temele oturtulması ve kamuoyunun buna ikna edilmesi,
- Gelecekteki nükleer santrallerin özellikle serbestleştirilmiş ve özelleştirilmiş elektrik piyasalarında fosil alternatifleriyle ekonomik olarak rekabet edebilmesini sağlamak için daha fazla teknolojik ilerleme kaydetmek
- Küçük elektrik şebekelerine sahip ülkelere nükleer enerji sağlamak ve ayrıca deniz suyunun tuzdan arındırılması gibi elektrik dışı uygulamalar için ekonomik

ve çoğalmayan küçük ve orta ölçekli reaktörler geliştirmek yer almaktadır. (Oldekop, 1982,)

Nükleer enerji teknolojisi III. nesil reaktör teknolojisinden IV. nesil reaktör teknolojisine geçiş aşamasındadır. 1970 ve 80'lerde kurulan reaktör tasarımlarının yerini III. ve III+ nesil olarak adlandırılan basınçlı su reaktörleri, kaynar su reaktörleri ve Kanada Döteryum Uranyum (CANDU) reaktörleri almaktadır. Bu reaktörler ticari olarak enerji üretiminde kullanılan nükleer teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Buna ek olarak nükleer teknolojiye geliştirilmekte olan daha güvenli, daha ekonomik ve doğaya daha az zarar veren IV. nesil olarak adlandırılan reaktör tasarımları da vardır. IV. nesil reaktörlerin temelini gaz soğutmalı yüksek sıcaklıklı reaktörler oluşturmaktadır (Odası, 2013).

IV. nesil reaktörlerin avantajlarından biri, reaktör kor bölgesi içerisinde kullanılan malzemelerin erime sıcaklıkları yüksek, termal gerilmeye dayanıklı tasarlanmasıdır. IV. nesil reaktörler bu özelliklerinden dolayı yüksek çalışma sıcaklıklarında hizmet verebilecek ve daha verimli hale gelecektir (Altın, 2007).

Nükleer reaktör türleri:

- Basınçlı Su Reaktörü (PWR)
- Kaynar Su Reaktörü (BWR)
- Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)
- Hafif Su Grafit Reaktörü (LWGR)
- Rus Basınçlı Su Reaktörü (VVER)
- Kanada Döteryum Uranyum Reaktörü (CANDU)
- Gaz Soğutmalı Reaktörü (GCR)
- Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR)
- Sıvı Metal Reaktörü (LMR)
- Hızlı Üretken Reaktörü (FBR)
- Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)
- Gaz Soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR)
- Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR)
- Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktörler (SFR)
- Süper Kritik Su Soğutmalı Reaktör (SCWR)

Bu tez çalışmasında kullanılan materyaller genel manada PWR, VVER, CANDU ve VHTR'da kullanılmaktadır. Bundan dolayı alt bölümde haklarında biraz daha kapsamlı bilgi verilmektedir.

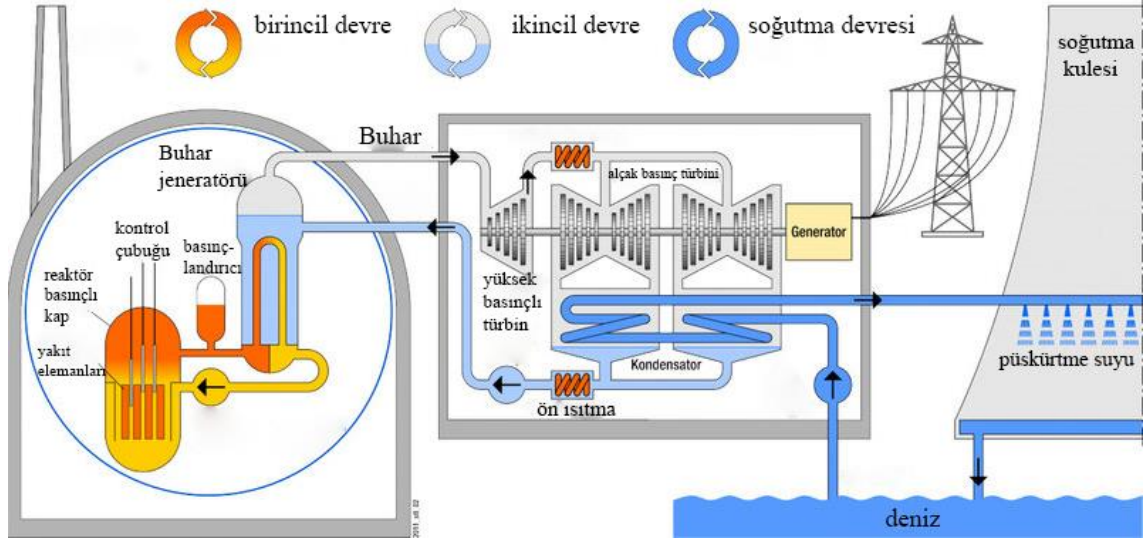
2.5.1. Basınçlı su reaktörü

1950'lerde PWR'ler ABD'de özellikle nükleer denizaltılar için enerji santralleri olarak geliştirilmiştir. PWR konseptinin başarılı bir şekilde uygulanması, daha sonra Rusya ve ABD'de ilk askeri olmayan deneysel nükleer enerji santrallerinin inşasıyla sonuçlanmıştır.

Dünyada ticari elektrik üretmek amacıyla ve araştırma amaçlı kurulan reaktörlerin en başında hafif su reaktörleri gelmektedir. Yavaşlatıcı, yansıtıcı ve soğutucu olarak kullanılan suyun ısı, nötronik ve hidrolik özellikleri nedeniyle bu reaktörlerin yakıtları düşük düzeyde zenginleştirmeye yaklaşık %3-5 arasında ihtiyaç duymaktadır (Kessler, 2012).

Yakıtta üretilen ısıyı endüstriyel ve konut kullanımı için elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan iki ana sistem vardır. Birincil sistem, yakıttan gelen ısıyı ikincil sistemin başladığı buhar jeneratörüne aktarır. Buhar jeneratöründe oluşan buhar, ikincil sistem tarafından elektrige dönüştürüldüğü ana türbin jeneratörüne aktarılır. Düşük basınçlı türbinden geçtikten sonra buhar ana kondansatöre yönlendirilir. Kondansatördeki borulardan akan soğuk su, buhardaki fazla ısıyı uzaklaştırarak buharın yoğunlaşmasını sağlar. Su daha sonra yeniden kullanılmak üzere buhar üreticine geri pompalanır.

Birincil ve ikincil sistemlerin işlevlerini yerine getirebilmesi için yüze yakın destek sistemi bulunmaktadır. Birincil sistem (Reaktör Soğutucu Sistemi) reaktör kabı, buhar üreteçleri, reaktör soğutucu pompaları, bir basınçlandırıcı ve bağlantı borularından oluşur. Bir reaktör soğutma sıvısı döngüsü, bir reaktör soğutma sıvısı pompası, bir buhar üretici ve bu bileşenleri reaktör kabına bağlayan borulardır. Reaktör soğutma sisteminin birincil işlevi, ısıyı yakıttan buhar jeneratörlerine aktarmaktır. İkinci bir işlev, yakıttan kaçan fisyon ürünlerini tutmaktır. Şekil 2.3 çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 2.3 PWR çalışma prensibi (URL-2, 2023)

2.5.2. Rus basınçlı su reaktörü

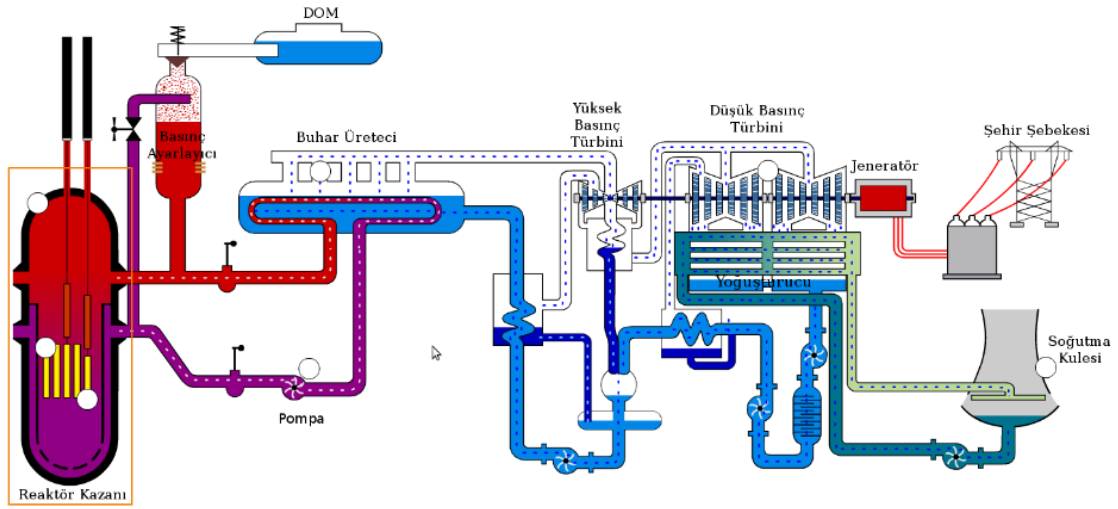
VVER teknolojisi (Andrushechko, vd., 2010), Sovyetler Birliği ve Rusya'da nükleer enerjinin oluşum ve gelişiminin temel aşamalarında kesin bir rol oynamıştır. VVER teknolojisine dayanan tüm ilklere örnek olan güç üniteleri NvNPP tesisinde uzun bir ömre sahip olmuştur. VVER-210 ve VVER-365 reaktörlere sahip güç üniteleri burada devreye alınmıştır. NvNPP, aşağıdaki VVER nesillerinin ilk örneklerine, yani ilk VVER-440 ve VVER-1000'e ev sahipliği yapmıştır. NvNPP'deki ilklere özgü güç ünitelerinin inşası ve işletilmesi, güvenilir ve verimli endüstriyel enerji nükleer yakıt kaynaklarının teknik olarak mümkün olduğunu doğrulamış, VVER teknolojisinin uluslararası reaktör teknolojileri pazarına girişini sağlamıştır (Fortov, vd., 2011, Rodionov, 2010). Çernobil NPP kazası sonrasındaki kritik dönemde, VVER reaktörleri yerli nükleer enerjinin istikrarını sağlamıştır.

NvNPP'deki en son yeni nesil ilk örnek VVER teknolojisine dayanan bir güç ünitesi olarak hizmete alınmıştır. NvNPP II, JSC "Atomenergoproekt" tarafından geliştirilen NPP-206 projesine göre inşa edilen bir yeni nesil nükleer enerji santralidir ve VVER-1200 reaktör tesisi (V-392 MRP tasarımı) kullanmaktadır.

Son 25 yılda geliştirilen gelişmiş hafif su reaktörü projeleri iki yönde aktif olarak geliştirilmiştir:

- Mevcut nükleer enerji santrallerine yeni teknolojik geliştirmeler ve modifikasyonlar eklenerek yapılan, evrimsel projeler olarak adlandırılan projeler;
- Mevcut reaktörlerden büyük ölçüde farklılık gösteren, doğal yerçekimi veya sıkıştırılmış gaz basıncı gibi pasif işletme prensiplerinin hâkim olduğu NPP projeleri.

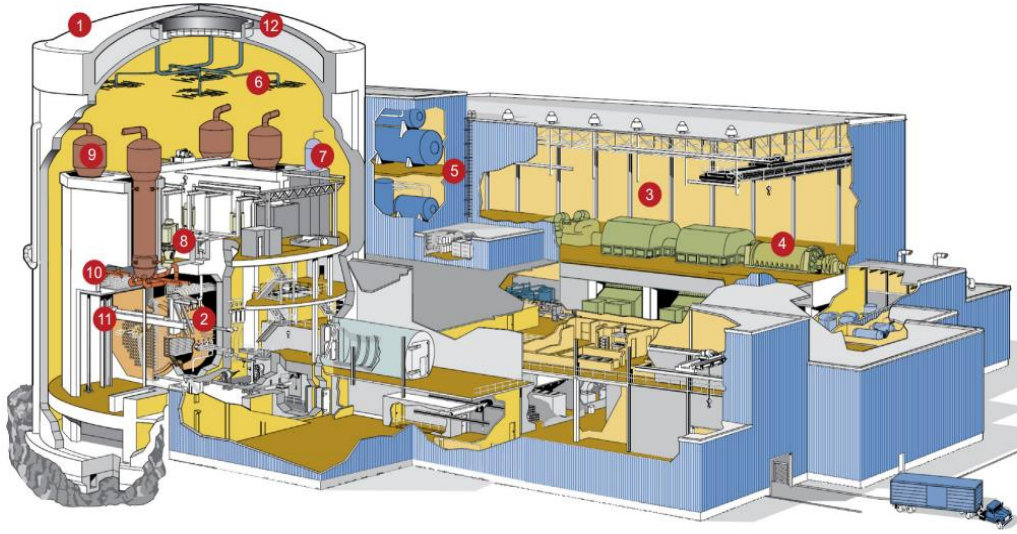
Şekil 2.4'te VVER çalışma prensibini göstermektedir



Şekil 2.4 VVER çalışma prensibi (URL-3, 2019)

2.5.3. Kanada döteryum uranyum reaktörü

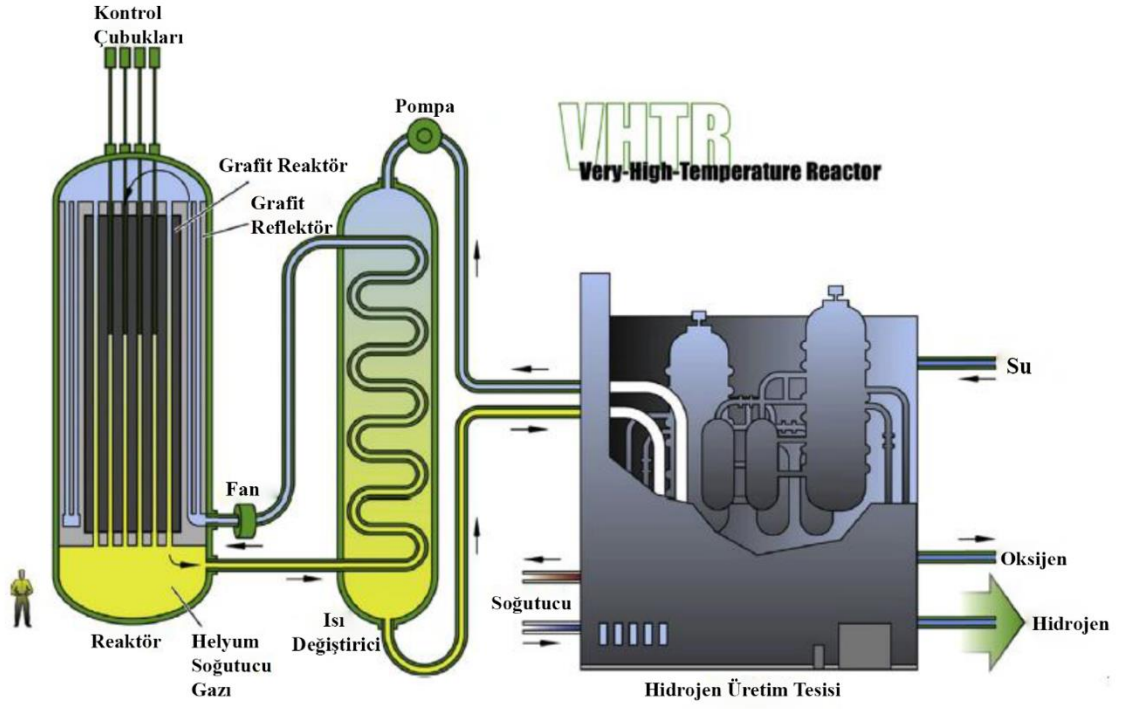
CANDU reaktörü, Kanada'da geliştirilen ve dünya genelinde çeşitli ülkelerde elektrik üretimi için nükleer santrallerde kullanılan bir tür nükleer reaktördür. CANDU, CANada Deuterium Uranium kelimelerinin kısaltmasıdır ve reaktörün benzersiz özelliği olan nötron moderatörü olarak görev yapan döteryumun veya ağır suyun (heavy water) önemli rolünü yansıtır (Jackson, vd., 2009). CANDU reaktörleri, diğer reaktörlerden farklı olarak doğal uranyumu (zenginleştirilmiş uranyum yerine) yakıt olarak kullanacak şekilde tasarlanmıştır. CANDU reaktörleri tam güçte çalışırken yakıt yenileme işlemi yapılabilir. Çoğu nükleer reaktör yakıt yenileme işlemi için kapatılması gereken bir durumdadır. Şekil 2.5'te CANDU reaktörünün şematik görünümü mevcuttur.



Şekil 2.5 CANDU reaktörünün şematik görünümü 1) Reaktör binası; 2) Calandria; 3) Türbin binası; 4) Türbin jeneratörü; 5) Hizmet binası; 6) Püskürtme sistemi; 7) Basınçlandırıcı; 8) Isı taşıma pompaları; 9) Buhar jeneratörleri; 10) Isı taşıma sistemi; 11) Yakıt doldurma makinesi 12) Yedek su deposu (Jiang, 2016)

2.5.4. Çok yüksek sıcaklık reaktörü

VHTR (Şekil 2.6), yüksek sıcaklık reaktörlerinin (HTR) evrimsel gelişiminin bir sonraki adımıdır. VHTR, kor çıkış sıcaklığı 900 °C'den yüksek ve hedeflenen 1000 °C olan bir helyum gazı soğutmalı, grafit moderatörlü, termal nötron spektrumlu bir reaktördür. Bu sıcaklık, termokimyasal işlemlerle hidrojen üretimi gibi yüksek sıcaklık uygulamalarını desteklemek için yeterlidir. Reaktörün referans termal gücü, pasif bozunma ısısının uzaklaştırılabilmesine olanak tanıyan bir seviyede belirlenmiştir ve şu anda yaklaşık 600 MW_{th} olarak tahmin edilmektedir. VHTR için referans tasarım, 950°C çıkış sıcaklığına sahip 600 MW_t bir reaktördür. Reaktör çekirdeği, termal nötronları fisyon süreci için üretmek için bir moderatör olarak grafitten yararlanır.



Şekil 2.6 VHTR şematik gösterimi (Pioro, 2016)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4 ve Incoloy 800H alaşımları çeşitli fizyon reaktörlerinde kullanıldığı için materyal olarak seçilmiştir. İlk aşamada tüm alaşımlar gamma ve nötron zırhlama açısından teorik ve simülasyon teknikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca birincil etkileşimler sonrasında oluşan ikincil radyasyonlarda belirlenmiştir. Daha sonra SS304 ve Incoloy 800H alaşımlarında sıcaklık ve soğutma yöntemlerinin gama radyasyonu zırhlamaya etkisi incelenmiştir. Gama radyasyonu zırhlama deneyleri sodyum iyodür NaI(Tl) dedektörü kullanılarak Sinop Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Alaşımlara belirli sıcaklıklara kadar ısıtılıp ani soğuma (quenching) ve kendiliğinden soğuma yaptırılarak her iki soğutma tipinin radyasyon zırhlama üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca bu numunelerin sertlik deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

3.1. Kullanılan Alaşımlar

Nükleer reaktörlerde yapısal malzemesi olarak kullanılan SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkoloy-4 ve Incoloy 800H reaktörlerin kor bölgesinde kullanılan alaşımlardır.

3.1.1. SS304

SS304 mükemmel bir şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Isıl işlemle ara yumuşatma operasyonu yapmadan derin çekme işlerinde kullanılabilir. Bu özelliği derin çekmenin üretiminde kullanıldığı kaplar, tencereler gibi ürünlerin üretiminde, bu malzemenin tercih edilmesine neden olmaktadır. Kolayca kesilip, endüstriyel, mimari ve taşımacılık alanlarındaki diğer parça çeşitlerine şekillendirilip, kullanılabilir. SS304 ‘ün işlenebilirliği birçok karbon çeliklerinden daha düşüktür. SS304 gibi standart östenitik çelikler, yavaş hızlarda ve ağır beslemeyle, sert ve keskin uçlar ve soğutma sıvısı kullanarak kolayca işlenebilirler.

SS304 lifler ayrıca cam, seramik veya karbon liflerin aksine mekanik gerilimlere, özellikle de kesme gerilimine ve korozyona karşı dayanıklıdır. SS304 lifler, birbirini takip eden tel demetlerinin çekilmesiyle elde edilir. Genellikle 0,75 mm'nin üzerindeki boyutlar için belirtilen tavllanmış tel, 3xx serisinde genellikle 655 ila 860 MPa'lık bir

gerilme mukavemetine ve %35 ila 60'luk bir uzamaya (50 mm'de) sahiptir (Davis, vd., 1993). Östenitik paslanmaz çelik, 193 GPa'lık tipik bir Young modülüne sahiptir (Kuhn, vd., 2000).

Nükleer tesis genelinde paslanmaz çeliğin kullanıldığı bazı örnekler (URL-4, 2023):

- Buhar ve diğer sıvıların güvenli geçişini sağlayan özel paslanmaz çelik boru
- Bacalar
- Tanklar
- Muhafaza Kutuları
- Fisyon depolama.

Tablo 3.1 SS304 kimyasal bileşimi (URL-5, 2023, Lingadurai, vd., 2012)

Element	Yüzdelik Bileşimi
Alüminyum (Al)	0,1
Karbon (C)	0,08
Krom (Cr)	20
Demir (Fe)	66,495 (Denge)
Mangan (Mn)	2
Nikel (Ni)	10,5
Fosfor (P)	0,045
Kükürt (S)	0,03
Silisyum (Si)	0,75
Yoğunluk (g/cm ³)	8

3.1.2. 08X18N10T

08X18N10T malzemesi VVER'da yakıt çubuğu kaplama olarak kullanılmaktadır (Makarov, vd., 2015). 08X18N10T çeliği dikişsiz borular, artan agresiflik ortamlarında (nitrik, asetik asitler, alkali çözeltiler ve tuzlar) çalışan kimyasal ekipman parçaları, ısı eşanjörleri, susturucular, borular, bağlantı parçaları, fırın parçaları, kaynak ve tel kaynağı, otomotiv parçaları, radyoaktif atmosferlerde çalışan ürünlerin üretimi için makine ve ekipmanlar veya agresif ortamlarla temas halinde olan ekipmanlar, kaplama tabakası olarak sıcak haddelenmiş çift katmanlı korozyona dayanıklı levhaların üretimi, deniz suyu koşullarında çalışan gemi inşa parçaları ve bileşenlerinin üretimi gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Genel özellikleri aşağıdaki gibi verilebilir (URL-6, 2023):

- Korozyona ve ısıya dayanıklı
- Östenitik sınıfta stabilize krom nikel çelik

Uzun süre için önerilen maksimum çalışma sıcaklığı +800 °C

Tablo 3.2 08X18N10T kimyasal bileşimi (URL-7, 2023, Gorynin, vd., 2003)

Element	Yüzdelik Bileşimi
Karbon (C)	0,08
Krom (Cr)	19
Bakır (Cu)	0,3
Demir (Fe)	67,265 (Denge)
Mangan (Mn)	1,5
Nikel (Ni)	11
Fosfor (P)	0,035
Kükürt (S)	0,02
Silisyum (Si)	0,8
Yoğunluk (g/cm ³)	7,9

3.1.3. Zirkaloy-2

Zirkaloy-2 Kanada Döteryum Uranyum (CANDU) reaktör tiplerinde kalandria (calandria) borusunda (kabuğunda) kullanılmıştır (URL-8, 2015). Zirkaloy-2, yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli, korozyona dayanıklı bir nikel alaşımıdır. Aşırı sıcaklıklara ve basınca dayanabilen manyetik olmayan bir alaşımdır, eser miktarda diğer elementlerle birlikte nikel, krom, molibden ve titanyum içerir. Kimyasal bileşimi ona yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci özellikleri kazandırmaktadır. Zirkaloy-2, yüksek tokluk, erime noktası, ısıya ve oksidasyona karşı direnç gibi fiziksel özelliklerin mükemmel bir kombinasyonuna sahiptir.

- Gaz türbinleri, jet motorları ve kimyasal işleme tesisleri gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için idealdir.
- Korozyona dayanıklı özellikleri onu deniz suyu ve açık deniz petrol kuleleri için uygun hale getirir.
- Yapışmayı önleyici özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay uygulamaları için popüler bir malzemedir (Vohera, 2023).

Tablo 3.3 Zirkaloy-2 kimyasal bileşimi (Hidetoshi Takiishi, vd., 2012, URL-9, 2023)

Element	Yüzdelik Bileşimi
Krom (Cr)	0,15
Demir (Fe)	0,2
Nikel (Ni)	0,08
Oksijen (O)	0,12
Kalay (Sn)	1,7
Zirkonyum (Zr)	97,75 (Denge)
Yoğunluk (g/cm ³)	6,56

3.1.4. Zirkaloy-4

Zirkaloy-4 Kanada Döteryum Uranyum (CANDU) reaktörlerinde yakıt kaplaması olarak kullanılır (URL-8, 2015). Zirkaloy-4 (UNS R60804), Zirkaloy-2'nin bir varyasyonudur, ancak nikel içermez ve daha yüksek, daha yakından kontrol edilen bir demir içeriğine sahiptir. Mekanik özellikleri saf zirkonyuma benzer, daha güçlü ve daha az sünektir, mükemmel korozyon direncine sahiptir. Bu alaşım nükleer hizmetlerde de kullanılır; su ve buharda korozyona maruz kaldığında Zirkaloy-2'den daha az hidrojen emer.

Tablo 3.4 Zirkaloy-4 kimyasal bileşimi (Hidetoshi Takiishi, vd., 2012, URL-10, 2023)

Element	Yüzdelik Bileşimi
Krom (Cr)	0,13
Demir (Fe)	0,24
Oksijen (O)	0,12
Kalay (Sn)	1,7
Zirkonyum (Zr)	97,81 (Denge)
Yoğunluk (g/cm ³)	6,56

3.1.5. Incoloy 800H

Incoloy 800H VHTR buhar jeneratörü borularında kullanılmıştır (Wright, 2019).

Incoloy 800H, iki ayrı katı çözelti ile güçlendirilmiş, demir-nikel-krom alaşımlarıdır. Tipik olarak, her iki alaşımın kimyasal bileşim gereksinimlerini karşılayan çift sertifikalı tek bir alaşım olarak sunulurlar. Incoloy 800H, daha yüksek sünme ve

gerilme kopması özellikleri ve daha kısıtlayıcı ağırlıkça %C aralığı nedeniyle genellikle temel alaşım 800'den (UNS N08800) üstün olarak kabul edilir. Alaşım 800H, temel alaşım 800'de maksimum %0,1 olan C ağırlık oranını %0,5 ile %0,1 aralığına sınırlar. Alaşım 800HT, C ağırlık oranını %0,5 ile %0,1 ile sınırlandırarak bunu daha da kontrol eder. Ayrıca alaşım 800 H için alaşım 800'de olmayan tane boyutu sınırlamaları da mevcuttur. Alaşım 800H, oksidasyon, karbürizasyon ve diğer yüksek sıcaklık korozyonu türlerine karşı direncin gerekli olduğu yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmayı içeren uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Isıl işlem ve enerji üretimi, 800H alaşımının kullanıldığı iki yaygın endüstridir. Tipik uygulamalar arasında kızdırıcı ve yeniden ısıtıcı boruları, başlıklar, pigtailler, çıkış manifoldları ve ısıtma elemanları için kılıflarda bulunur (URL-11, 2023).

Tablo 3.5 Incoloy 800H kimyasal bileşimi (URL-12, 2023,)

Element	Yüzdelik Bileşimi
Alüminyum (Al)	0,06
Karbon (C)	0,1
Krom (Cr)	23
Demir (Fe)	38,14 (Denge)
Mangan (Mn)	1,5
Nikel (Ni)	35
Fosfor (P)	0,0045
Kükürt (S)	0,015
Silisyum (Si)	1
Titanyum (Ti)	0,6
Yoğunluk (g/cm ³)	7,94

3.2. Kullanılan alaşımların yapısındaki elementler

Bu tez çalışmasında kullanılan alaşımlarda yer alan elementler bu başlık altında ayrı ayrı ele alınıp detaylı bilgileri verilmiştir. En yüksek erime ve kaynama noktasına sahip elementin en çok bulunduğu Incoloy 800H alaşımında olan karbon (C) elementidir.

Tablo 3.6 Elementlerin temel özellikleri (Augustyn, 2023, Brasted, 2023, Britannica, 2023, Gregersen, 2023,)

Özellik Element	Atom Numarası	Atom Ağırlığı	Erime Noktası	Kaynama Noktası	Yoğunluk	Oksidasyon Durumu
Alüminyum	13	26,9815	660 °C	2467 °C	2,7	-2, -1, 0, +1, +2, +3
Karbon	6	12,0096-12,0116	3550 °C	4827 °C	1,9	+2, +3, +4
Krom	24	51,9961	1890 °C	2482 °C	6,3-7,15	+2, +3, +6
Bakır	29	63,546	1083 °C	2567 °C	8,96	+1, +2, +3,
Demir	26	55,847	1538 °C	3000 °C	7,86	+2, +3, +4, +6
Mangan	25	54,938	1246 °C	2062 °C	7,21-7,44	+2, +3, +4, +5, +6, +7
Nikel	28	58,69	1453 °C	2762 °C	8,902	0, +1, +2, +3
Oksijen	8	15,9994	-218,4 °C	-183 °C	1,429-1,141	-1, -2, +2
Fosfor	15	30,9738	44,1 °C	280 °C	20 °C'de 1,82	-3, +3, +5
Kükürt	16	32,064	112,8-119 °C	444,6 °C	2,07	-2, +4, +6
Silisyum	14	28,086	1410 °C	3265 °C	2,33	-4, (+2), +4
Kalay	50	118,69	231,97 °C	2270 °C	5,75	+2, +4
Titanyum	22	47,867	1660 °C	3287 °C	4,5	+2, +3, +4
Zirkonyum	40	91,22	1852 °C	3578 °C	6,49	+4

3.3. Radyasyon Zırhlama

3.3.1 Nötron radyasyonu zırhlama

Kapsamlı bir çalışma olması için üretilen örneklerin nötron zırhlama özellikleri hem MC simülasyonu hem de teorik hesaplama yapılarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, materyallerin teorik olarak değerlendirilmesi için etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanmıştır. Bu tesir kesitin ne kadar büyükse nötron zırhlama yeteneği de o kadar etkilidir. Ele alınan numunelerin nötron zırhlama değerlendirmesi, gama zırhlama için de kullanılan GEANT4 ve FLUKA programları kullanılarak simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerine 4,5 MeV'de 10.000.000 nötron yönlendirilerek her bir numunenin üzerinden geçen nötron sayısı belirlenmiştir. Malzemelerin nötron zırhlama yetenekleri, alaşımların üzerinden geçen nötron sayısına göre karşılaştırılmıştır. Malzemelerden geçen nötron sayısındaki değişim, farklı enerji değerleri (0,1 MeV, 0,5 MeV, 1 MeV, 2 MeV, 4,5 MeV, 8 MeV ve 10 MeV) için simüle edilmiştir. Numune kalınlığının nötron zırhlamaya etkisi diğer bir karşılaştırma parametresi olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda 4,5 MeV enerjide farklı numune kalınlıkları (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm) için simülasyonlar yapılmıştır.

3.3.1.1. Nötron radyasyon zırhlama için GEANT4 kodu

GEANT4 (Geometry and Tracking), parçacıkların madde ile etkileşimlerini modelleyen bir Monte Carlo simülasyon programıdır. Ar-Ge aşaması, ilk üretim sürümünün teslim edilmesiyle Aralık 1998'de tamamlanmış olup günümüzde güncellemeleri ile kullanılmaya devam edilmektedir. GEANT4 programı Monte Carlo metodu aracılığıyla temel parçacıkların madde içerisinden geçişinin simülasyonunu yapmaktadır. Deney düzeneği, geometri ve malzeme ekleme-çıkarma mümkündür. Kullanıcı, elektromanyetik alanların varlığında da maddedeki parçacıkları izleyebilir ve detektörün tepkisini tanımlayabilmektedir. GEANT4, kullanıcılarının simülasyon uygulamalarıyla etkileşime girmesini ve sonuçlarını analiz nesnelerinde saklamasını sağlayan ara yüzler sağlamaktadır (Agostinelli, vd., 2003; Allison, vd., 2006; Guatelli, vd., 2011).

Bu çalışmada GEANT4 simülasyon programı Linux işletim sistemi Ubuntu sürümüne kurulmuştur. Kurulum gerçekleştirildikten sonra simülasyon programına kullanılan

alaşımların tanımlamaları yapılmıştır. Nötronlar için GEANT4 simülasyon programından “hadronic/Hadr03” paketinde çalışılmıştır. Materyal tanımlamaları “hadronic/Hadr03/src” klasöründe bulunan “DetectorConstruction.cc” belgesi içerisinde yapılmıştır. Bu işlem için izlenen yol şu şekildedir;

geant4.10.07.p02-install/share/Geant4-10.7.1/examples/extended/hadronic/Hadr03/src

pico DetectorConstruction.c

“DetectorConstruction.cc” belgesine girildikten sonra bu araştırmada kullanılan malzemelerin içerisinde bulunan tüm elementler tanımlanmıştır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmektedir.

```
//NE213
G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", 1., 1.01*g/mole);
G4Element* C = new G4Element("Carbon", "C", 6., 12.00*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", 8., 15.99*g/mole);
G4Element* Hf = new G4Element("Hafnium", "Hf", 72., 178.486*g/mole);
G4Element* Al = new G4Element("Alüminyum", "Al", 13., 26.9815*g/mole);
G4Element* Si = new G4Element("Silisyum", "Si", 14., 28.0855*g/mole);
G4Element* P = new G4Element("Fosfor", "P", 15., 30.973762*g/mole);
G4Element* S = new G4Element("Sulfur", "S", 16., 32.059*g/mole);
G4Element* Cr = new G4Element("Krom", "Cr", 24., 51.09961*g/mole);
G4Element* Ni = new G4Element("Nikel", "Ni", 28., 58.6934*g/mole);
G4Element* Mn = new G4Element("Manganez", "Mn", 25., 54.938044*g/mole);
G4Element* Fe = new G4Element("Demir", "Fe", 26., 55.845*g/mole);
G4Element* Cu = new G4Element("Bakır", "Cu", 29., 63.546*g/mole);
G4Element* Zr = new G4Element("Zirkonyum", "Zr", 40., 91.224*g/mole);
G4Element* Sn = new G4Element("Kalay", "Sn", 50., 118.71*g/mole);
G4Element* Ti = new G4Element("Titanyum", "Ti", 22., 47.867*g/mole);
```

Şekil 3.1 GEANT4 programına tanımlanan elementler

```

G4Material* celik304 =
new G4Material("celik304", 8*g/cm3, 9);
celik304->AddElement(C, 0.08*perCent);
celik304->AddElement(Mn, 2.00*perCent);
celik304->AddElement(P, 0.045*perCent);
celik304->AddElement(S, 0.03*perCent);
celik304->AddElement(Si, 0.75*perCent);
celik304->AddElement(Cr, 20.00*perCent);
celik304->AddElement(Ni, 10.5*perCent);
celik304->AddElement(Al, 0.1*perCent);
celik304->AddElement(Fe, 66.495*perCent);

G4Material* alloy08X18N10T =
new G4Material("alloy08X18N10T", 7.9*g/cm3, 9);
alloy08X18N10T->AddElement(C, 0.08*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Si, 0.8*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Mn, 1.5*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Cr, 19*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Ni, 11*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Cu, 0.3*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(S, 0.02*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(P, 0.035*perCent);
alloy08X18N10T->AddElement(Fe, 67.265*perCent);

G4Material* Zirkalay2 =
new G4Material("Zirkalay2", 6.56*g/cm3, 6);
Zirkalay2->AddElement(Sn, 1.7*perCent);
Zirkalay2->AddElement(Fe, 0.2*perCent);
Zirkalay2->AddElement(Cr, 0.15*perCent);
Zirkalay2->AddElement(O, 0.12*perCent);
Zirkalay2->AddElement(Ni, 0.08*perCent);
Zirkalay2->AddElement(Zr, 97.75*perCent);

G4Material* Zirkalay4 =
new G4Material("Zirkalay4", 6.56*g/cm3, 5);
Zirkalay4->AddElement(Sn, 1.7*perCent);
Zirkalay4->AddElement(Fe, 0.24*perCent);
Zirkalay4->AddElement(Cr, 0.13*perCent);
Zirkalay4->AddElement(O, 0.12*perCent);
Zirkalay4->AddElement(Zr, 97.81*perCent);

G4Material* H800 =
new G4Material("H800", 7.94*g/cm3, 10);
H800->AddElement(Ni, 35*perCent);
H800->AddElement(Cr, 23*perCent);
H800->AddElement(C, 0.1*perCent);
H800->AddElement(Mn, 1.5*perCent);
H800->AddElement(P, 0.045*perCent);
H800->AddElement(S, 0.015*perCent);
H800->AddElement(Si, 1*perCent);
H800->AddElement(Al, 0.6*perCent);
H800->AddElement(Ti, 0.6*perCent);
H800->AddElement(Fe, 38.14*perCent);

```

Şekil 3.2 GEANT4 programına tanımlanan ana malzemeler

Malzeme tanımlandıktan sonra GEANT4 simülasyon programı çalıştırılmıştır. Programı çalıştırmak için izlenen yol Şekil 3.3’te gösterilmektedir.

```
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4/geant4.10.07.p01-install/bin$ source geant4.sh
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4/geant4.10.07.p01-install/bin$ cd ..
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4/geant4.10.07.p01-install$ cd ..
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4$ cd ..
mazes@mazes-VirtualBox:~$ cd tez/
mazes@mazes-VirtualBox:~/tez$ cmake -DGeant4_DIR=/home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-
install/lib/Geant4-10.7.1 /home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10
.7.1/examples/extended/hadronic/Hadr03
-- Configuring done
-- Generating done
-- Build files have been written to: /home/mazes/tez
mazes@mazes-VirtualBox:~/tez$ make
Consolidate compiler generated dependencies of target Hadr03
[100%] Built target Hadr03
mazes@mazes-VirtualBox:~/tez$ ./Hadr03
```

Şekil 3.3 GEANT4 nötron çalıştırma komutları

GEANT4 simülasyon programına materyaller Hadr03 paketine tanımlanıp çalıştırıldıktan sonra simülasyonu başlatmak için Hadr03 paketinin uygun komutlar ve parametreler girilmiştir. Yaptığımız çalışmaya uygun parametreler “malzeme adı, malzeme kalınlığı, gönderilen parçacığın cinsi, gönderilen parçacığın enerjisi ve gönderilen parçacık sayısı” şeklindedir. Bu çalışmada malzeme kalınlığı 5 cm, gönderilen parçacık nötron, parçacık sayısı 10 000 000 ve parçacığın enerjisi 1 MeV ve malzeme SS304 olarak alınmıştır. Şekil 3.4 de başlatma için gerekli olan parametrelerin örneği gösterilmektedir.

```
Some /vis commands (optionally) take a string to specify colour.
"/vis/list" to see available colours.
PreInit> /run/initialize

The Box is 10 m of Molybdenum98

Material: Molybdenum98 density: 10.280 g/cm3 RadL: 9.731 mm Nucl.Int.Length: 15.6
92 cm
Imean: 424.000 eV temperature: 293.15 K pressure: 1.00 atm

---> Element: Molybdenum98 (Mo98) Z = 42.0 N = 98 A = 97.905 g/mole
---> Isotope: Mo98 Z = 42 N = 98 A = 97.91 g/mole abundance: 100.000 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

/home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6
@@@ G4ParticleHPInelastic instantiated for particle neutron data directory variable is G4NEU
TRONHPDATA pointing to /home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/
G4NDL4.6/Inelastic
@@@ G4ParticleHPInelasticData instantiated for particle neutron data directory variable is G
4NEUTRONHPDATA pointing to /home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/d
ata/G4NDL4.6
NeutronHP: /Capture file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/mazes/g
eant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Capture/CrossSection/6_nat_
Carbon
NeutronHP: /Elastic file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/mazes/g
eant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Elastic/CrossSection/6_nat_
Carbon
NeutronHP: /Inelastic file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/mazes
/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Inelastic/CrossSection/6_
nat_Carbon

### === Deexcitation model UAtomDeexcitation is activated for 1 region:
### === Auger cascade flag: 1
### === Ignore cuts flag: 1
Idle> /testhadr/det/setSize 5 cm
Idle> /testhadr/det/setMat celik304
Idle> /gun/particle neutron
Idle> /gun/energy 1 MeV
Idle> /run/beamOn 10000000
```

Şekil 3.4 GEANT4 nötron simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri

Şekil 3.4'te gerekli parametreler girilerek simülasyon işlemi başlatılmıştır. Simülasyon işlemi bittikten sonra sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma için gerekli olan sonuç, malzemeden geçen nötron sayılarıdır (Transportation). Simülasyon işlemi bittikten sonra çıkan sonuçlar ve bu çalışma için gerekli olan malzemeden geçen nötron sayısı (Transportation) Şekil 3.5 de gösterilmektedir.

```

----- Ranecu engine status -----
Initial seed (index) = 0
Current couple of seeds = 940167152, 1123776946
-----

The run is 10000000 neutron of 1 MeV through 1 cm of celik304 (density: 8 g/cm3 )

Process calls frequency:
Transportation= 7850681 hadElastic= 1683484 nCapture= 2185 neutronInelastic= 463650
Nb of incident particles surviving after 1 cm of celik304 : 7850681

MeanFreePath: 4.7994 mm +- 2.8821 mm massic: 3.8395 g/cm2
CrossSection: 2.0836 cm^-1 massic: 26.045 mm2/g

Verification: crossSections from G4HadronicProcessStore:
Transportation= 0 um2/mg
hadElastic= 2.3506 mm2/g
nCapture= 3.1064 um2/mg
neutronInelastic= 652.15 um2/mg
total= 3.0059 mm2/g

List of nuclear reactions:

```

Şekil 3.5 Simülasyon sonucu elde edilen veriler

İkincil radyasyon hesabı yine bu paket kullanılarak yapılmıştır. GEANT4'ten elde edilen çıktılarda “list of generated particles” başlığı altında üretilen ikincil radyasyonların listesi ortalama enerjileriyle birlikte verilmektedir. Buradan elde edilen bilgiler ışığında nötron radyasyonunun her bir alaşım ile etkileşime girdiğinde üretilen ikincil parçacıklar üzerinden değerlendirilmesi de yapılmıştır. GEANT4 kodu bu kapsamda teze önemli katkılar sunmaktadır.

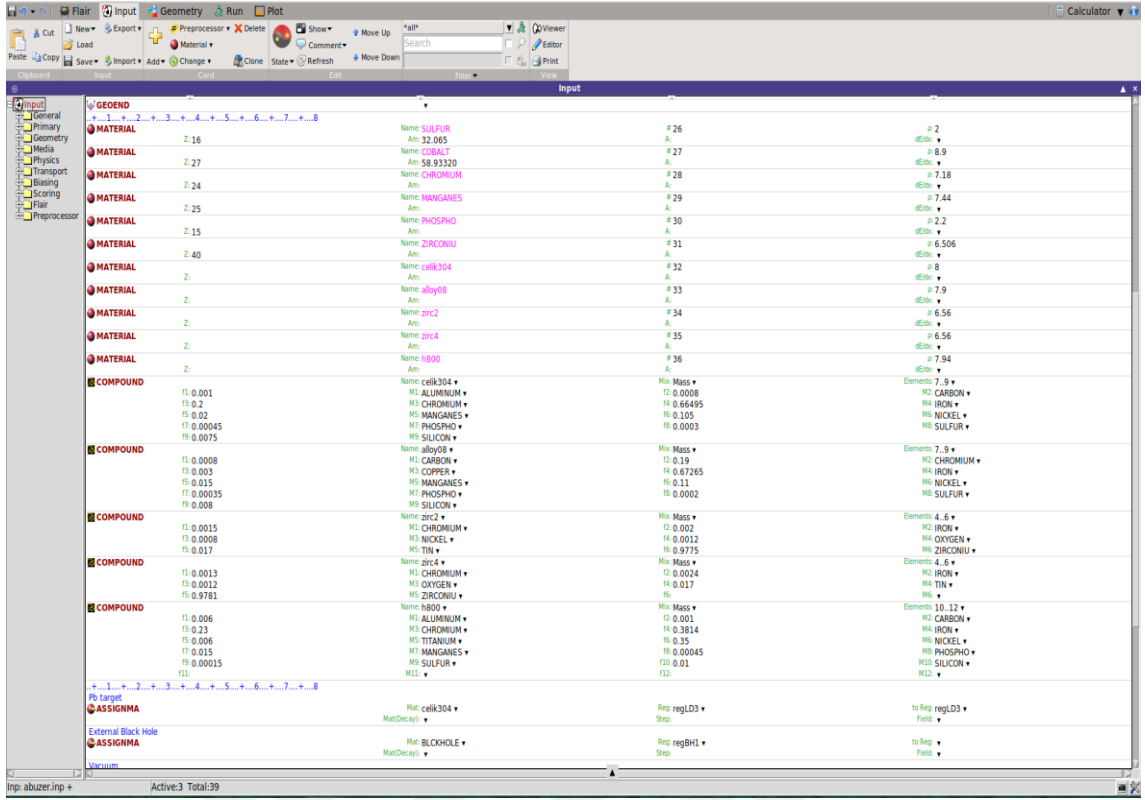
3.3.1.2. Nötron radyasyon zırhlama için FLUKA kodu

FLUKA, proton ve elektron hızlandırıcı korumasından hedef tasarımı, kalorimetri, aktivasyon, dozimetri, dedektör tasarımı, Hızlandırıcı Tahrikli Sistemler, kozmik ışınlar, nötrinoya kadar geniş bir uygulama yelpazesini kapsayan, parçacık taşınması ve madde ile etkileşimlerinin hesaplanmasına yönelik genel amaçlı bir araçtır. Başka bir ifade ile FLUKA, madde ile parçacık etkileşimlerini hesaplamak için Monte Carlo prensibine dayanan bir simülasyon programıdır. Fortran programlama diliyle yazılmış olup Linux işletim sistemi üzerinde kullanılır. İlk nesli 1962 ve 1978 yılları arasında geliştirilmiştir. Tablo 3.7’de FLUKA’nın Monte Carlo simülasyon paketinin birim sistemi gösterilmektedir.

Tablo 3.7 FLUKA Birim Sistemi

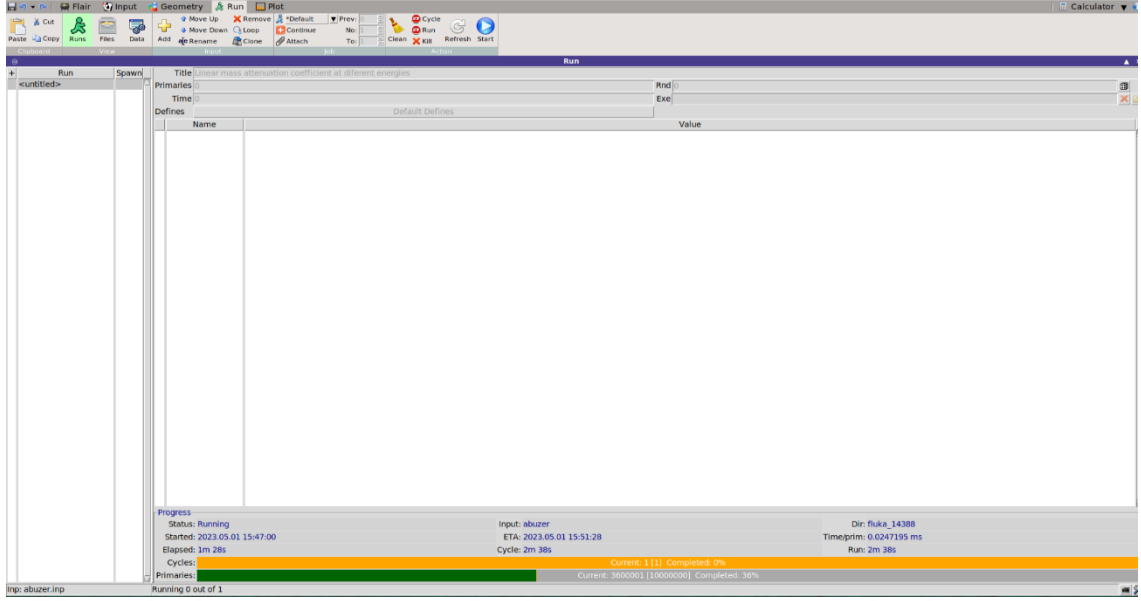
Fiziksel Miktar	Birimi
Uzaklık (Mesafe)	cm
Yüzey Alanı	cm ²
Hacim	cm ³
Enerji	GeV
Momentum	GeV/c
Sıcaklık	K
Katı Açısı	sr
Manyetik Alan	T
Elektrik Alan	kV/cm
Zaman	s
Aktivite	Bq
Lineer Enerji Transferi (LET)	keV / (μmg / cm ³)
Eşdeğer Doz	pSv

FLUKA simülasyon çalışmasında, tanımlanması gereken alaşımlar, FLUKA programındaki Flair arayüzü kullanılarak oluşturulan bir giriş dosyası aracılığıyla yapılandırılmıştır. Flair'de kullanacağımız parçacık türü nötron olarak seçilmiş ve nötronun enerjisi çalışmamıza uygun olarak GeV cinsinden tanımlanmıştır. Toplamda 4,5 MeV enerjiye sahip 10.000.000 nötron modellenen malzeme üzerine yönlendirilmiş ve her bir numuneden geçen nötron sayısı belirlenmiştir. Geçen nötronların sayısına dayanarak, malzemelerin nötron zırhlama etkinliği, seçilen alaşımlar arasında karşılaştırılmıştır.



Şekil.3.6 FLUKA programının Flair arayüzü ile oluşturulan input dosyası

FLUKA simülasyon çalışmasında tanımlanan element ve alaşımlar FLUKA programında kullanılan Flair arayüzü sayesinde Şekil 3.6'daki gibi input dosyası oluşturulmuştur. Flair'de kullanacağımız parçacık cinsi nötron, nötronun enerjisi GeV cinsinden yaptığımız çalışmaya uygun şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan alaşımdaki materyal belirli kalınlıkta seçilerek 10.000.000 nötron gönderilerek input dosyası kaydedilip simülasyonu başlatmak için Şekil 3.7'deki gibi "run" yapılmıştır.



Şekil 3.7 Flair arayüzünde tanımlanan element ve alaşımlar için simülasyon başlatma komutu

Aktarılan nötron sayısına dayanarak, malzemelerin nötron zırhlama etkinliği seçilen alaşımlar ile karşılaştırılmıştır. Enerjiye göre geçen nötron sayısının değişimi, sonuçları 0,1 MeV, 0,5 MeV, 1 MeV, 2 MeV, 4,5 MeV, 8 MeV ve 10 MeV'de simüle ederek belirlenmiştir. Örnek kalınlığının nötron kalkan zırhlamadaki etkisi başka bir karşılaştırma parametresi olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, farklı örnek kalınlıkları (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm) için 4,5 MeV enerjisinde simülasyonlar yapılmıştır.

3.3.1.3. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti

Mikroskobik tesir kesit ile makroskobik tesir kesit arasındaki fark çok önemlidir.

- Mikroskobik tesir kesiti, gelen bir parçacık için tek bir hedef çekirdeğin etkin hedef alanını temsil eder. Birimler barn veya cm^2 cinsinden verilir.
- Makroskobik tesir kesiti, malzemenin birim hacminde bulunan tüm çekirdeklerin etkin hedef alanını temsil ederken, birimler cm^{-1} cinsinden verilir.

Makroskobik tesir kesiti; mikroskobik tesir kesiti ve birim hacimdeki çekirdek sayısından türetilir:

$$\Sigma = \sigma \cdot N \quad (3.1)$$

Burada m^2 birimine sahip olan σ , mikroskobik tesir kesitidir. N (birim hacimdeki çekirdek sayısı) birimi çekirdek/ m^3 olduğundan, makroskobik tesir kesiti Σ m^{-1} birimine

sahiptir. Σ_t (toplam makroskopik tesir kesiti) cinsinden, bir nötron demetinin yoğunluğu için denklem şu şekilde yazılabilir:

$$-dI = N \cdot \sigma \cdot \Sigma_t \cdot dx \quad (3.2)$$

Bu ifadeyi $I(x)$ 'e böldüğünüzde

$$-dI(x)/I(x) = \Sigma_t \cdot dx \quad (3.3)$$

$$P(x) = e^{-\Sigma_t \cdot x} \quad (3.4)$$

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t \cdot x} \quad (3.5)$$

Burada, I_0 , absorbe edici bir malzeme olmadan başlangıç radyasyon yoğunluğunu temsil eder. I , bariyer tarafından zayıflatılmış radyasyon yoğunluğudur ve birimi etkileşimler/cm²s cinsindendir. x ise malzemenin kalınlığıdır. Absorpsiyon sırasında, düşük enerjili veya farklı kesit alanlarına sahip nötronlar üretilebilir.

Hesaplamalar için gerekli olan bazı elementlerin yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8 Bu çalışmada kullanılan bazı elementlerin yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri

Elementler	Yoğunluk (g/cm ³)	Hızlı Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti
Al	2,698	0,0293
C	2,267	0,0502
Cr	7,15	0,0208
Cu	8,933	0,0186
Fe	7,874	0,0214
Mn	7,44	0,0203
Ni	8,912	0,019
O	0,001429	0,0405
P	1,82	0,0283
S	2,067	0,0277
Si	2,3296	0,0295
Sn	7,287	0,0137
Ti	4,54	0,0205
Zr	6,506	0,0156

Tablo 3.8’de üzerinde çalışılan alaşımların içerdiği elementler, elementlerin yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri görülmektedir. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerinin yüksek olması nötron zırlama açısından iyi sonuçlar elde etmek

anlamına gelebilmektedir. Tablo 3.8'e bakıldığında, en yüksek hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti 0,0502 cm²/g değerine sahip karbon ve 0,0405 cm²/g değerine sahip oksijen gelmektedir.

Ayrıca malzemelerin nötron radyasyonu zırlama kapasitelerini incelemek için hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti teorik olarak hesaplanmıştır. Bu tesir kesiti ne kadar büyükse, nötron zırlama yeteneği o kadar etkilidir.

$$\Sigma_R = \Sigma_i \rho_i (\Sigma_{R/\rho})_i \quad (3.6)$$

$$\Sigma_{R/\rho} = \Sigma_i w_i (\Sigma_{R/\rho})_i \quad (3.7)$$

“w_i”, her bir elementin ağırlıkça kesrini temsil ederken, “ρ” yoğunluğu belirtir. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti, bir nötronun bir hedefle etkileşime girerek sistemden uzaklaştırılma olasılığını ölçmek için nükleer fizikte kullanılan bir parametredir. Daha büyük bir tesir kesiti, nötron etkileşimi olasılığının daha yüksek olduğunu ve dolayısıyla daha fazla nötron zırlama etkinliğini gösterir.

3.3.2. Gama radyasyon zırlama

Bütün alaşımlar ilk aşamada XCOM, EpiXS, FLUKA ve GEANT4 kodları kullanılarak çeşitli gama ışını enerjilerinde gama zırlama açısından değerlendirilmiştir. Daha sonra, tedarik edilebilen SS304 ile Incoloy 800H alaşımları radyoaktif nokta kaynağıyla ⁶⁰Co (1173,2 ve 1332,5 keV)) NaI(Tl) (Sodyum İyodür) dedektör sistemi yardımıyla deneysel, teorik (XCOM, EpiXS) ve simülasyon (FLUKA, GEANT4) yöntemleri kullanılarak gama radyasyonu azaltma yeteneklerini belirlemek için test edilmiştir. SS304 ile Incoloy 800H alaşımı Protherm Furnaces marka fırın ile metal ısıl işlemiyle 300, 500, 700 ve 1000 derece ısıtılmıştır ve iki farklı soğutma tekniği ile soğutulduktan sonra gama ışını zırlama deneyine tabi tutulmuştur.

3.3.2.1. Gama radyasyon zırlama için GEANT4 kodu

Çalışmanın bu kısmında GEANT4 MC simülasyon programında ait "electromagnetic/TestEm13" paketi kullanılmıştır. Bu paket, özellikle foton etkileşimlerini simüle etme kapasitesine sahiptir ve malzemeler üzerinden radyasyon geçişini anlamının önemli olduğu derinlemesine bilgiler sağlamaktadır. Malzeme tanımları için, "electromagnetic/TestEm13/src" dizininde bulunan "DetectorConstruction.cc" dosyası kullanılmaktadır. Bu dosya, malzeme bileşimlerini tanımlamak için simülasyon ortamının tanınmasında anahtar bir öneme sahiptir. Bu

dosyaya özel yol, "geant4.10.07.p02-install/share/Geant4-10.7.2/examples/extended/electromagnetic/TestEm13/src/DetectorConstruction.cc" şeklindedir. Malzeme tanımlandıktan sonra GEANT4 simülasyon programı çalıştırılmıştır. Programı çalıştırmak için izlenen yol Şekil 3.8’de gösterilmektedir.

```
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4/geant4.10.07.p01-install/bin$ source geant4.sh
mazes@mazes-VirtualBox:~/geant4/geant4.10.07.p01-install/bin$ cd
mazes@mazes-VirtualBox:~$ cd gama/
mazes@mazes-VirtualBox:~/gama$ cmake -DGeant4_DIR=/home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/lib/Geant4-10.7.1 /home/mazes/geant4/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/examples/extended/electromagnetic/TestEm13
-- Configuring done
-- Generating done
-- Build files have been written to: /home/mazes/gama
mazes@mazes-VirtualBox:~/gama$ make
Consolidate compiler generated dependencies of target TestEm13
[100%] Built target TestEm13
mazes@mazes-VirtualBox:~/gama$ ./TestEm13
```

Şekil 3.8 Geant4 gama çalıştırma komutları

GEANT4 simülasyon programında materyaller TestEm13 paketine tanımlanıp çalıştırıldıktan sonra simülasyonu başlatmak için TestEm13 paketinin uygun komutlar ve parametreler girilmiştir. Yapılan çalışmaya uygun parametreler malzeme adı, malzeme kalınlığı, gönderilen parçacığın cinsi, gönderilen parçacığın enerjisi ve gönderilen parçacık sayısı şeklindedir. Bu çalışmada malzeme kalınlığı 0,02 cm, gönderilen gama fotonu sayısı 10 000 000 ve fotonun enerjisi 0,015 MeV ve malzeme Incoloy 800H olarak alınmıştır. Şekil 3.9’da başlatma için gerekli olan parametrelerin örneği gösterilmektedir.

```
----- Ranecu engine status -----
Initial seed (index) = 0
Current couple of seeds = 1991270458, 1539430614
-----
0 events have been kept for refreshing and/or reviewing.
"/vis/reviewKeptEvents" to review them one by one.
"/vis/enable", then "/vis/viewer/flush" or "/vis/viewer/rebuild" to see them accumulated.
Idle> /run/initialize
Idle> /testem/det/setMat H800
Idle> /testem/det/setSize 0.02 cm
Idle> /gun/particle gamma
Idle> /gun/energy 0.015 MeV
Idle> /run/reinitializeGeometry
Idle> /run/beamOn 10000000
```

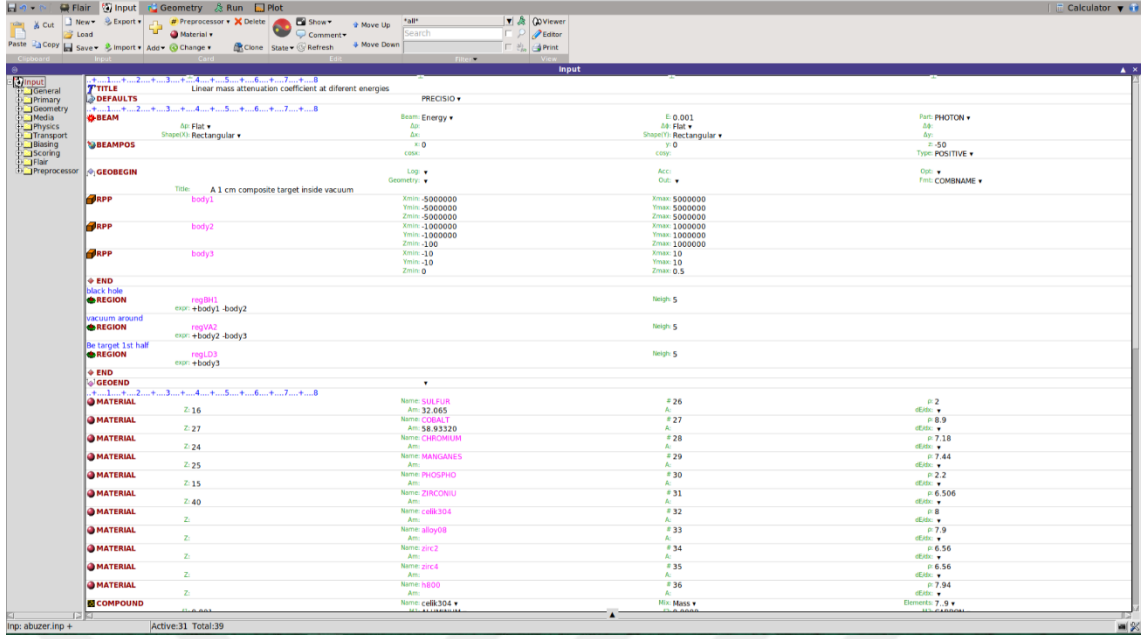
Şekil 3.9 GEANT4 gama simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri

Her bir numune toplam 10 milyon gama fotonu ile bombardıman edilmiştir. GEANT4 platformu kütle zayıflama katsayısı, örnekten geçen gama fotonlarının sayısı ve lineer azaltma katsayısını direkt vermektedir.

3.3.2.2. Gama radyasyon zırlama için FLUKA kodu

Şekil 3.10'da Flair arayüzü ile hazırlanmış bir input dosyasını göstermektedir. Gama ışınlarının FLUKA'da lineer azaltma katsayısını hesaplama süreci aşağıda adım adım açıklanmıştır:

- Yeni Bir Proje Oluşturun: FLUKA'da yeni bir proje başlatılmalıdır. Flair arayüzü ile kolay bir şekilde yapılabilmektedir.
- Geometri ve Malzemeleri Tanımlayın: Simülasyon için geometri ve malzemeler tanımlanır.
- Foton Kaynağını Ayarlayın: Foton (gama) kaynağı tanımlanır.
- Fizik Listelerini Ayarlayın: FLUKA'da uygun fizik listeleri ve modeller seçilir. Elektromanyetik etkileşimlerin gama ışınları için doğru bir şekilde modellenmesini sağlar.
- Çıktıları Ayarlayın: Lineer azaltma katsayısını içeren çıktıların nasıl kaydedileceği ayarlanır. Bu, enerji spektrumu, geçen foton sayısı ve diğer parametreler gibi çeşitli bilgileri içerebilir.
- Simülasyonu Başlatın: Tüm parametreler ayarlandıktan sonra, simülasyon başlatılır. FLUKA, fotonların malzeme ile etkileşimini simüle eder ve sonuçları çıktı dosyalarına yazar. Her bir numune toplam 10 milyon gama fotonu ile bombardıman edilmiştir.
- Sonuçları Analiz Edin: Simülasyon tamamlandığında, çıktı dosyalarını analiz edin ve lineer azaltma katsayısını belirleyin.



Şekil 3.10 FLUKA gama simülasyon programı başlatma komut ve parametreleri

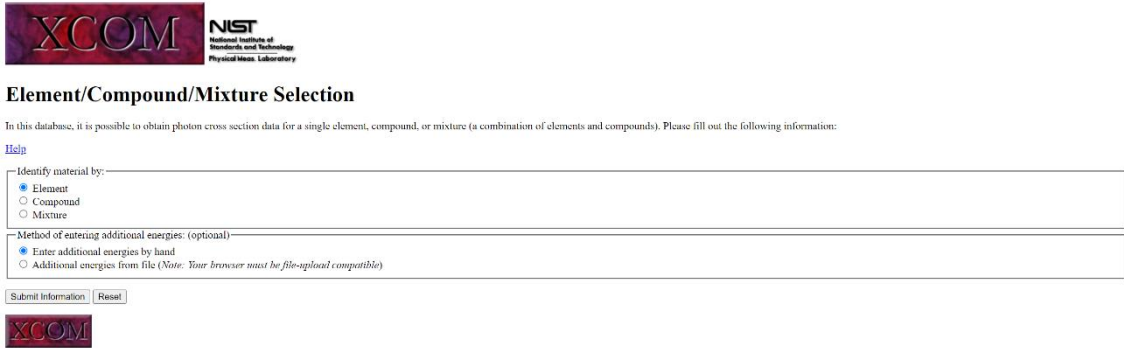
3.3.2.3. Gama radyasyon zırlama için XCOM kodu

XCOM, NIST (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) tarafından geliştirilen ve fotonlar (X-ışınları ve gama ışınları) ile malzemeler arasındaki etkileşimleri modelleyen bir veri tabanıdır. XCOM çeşitli teorik modellere dayanmaktadır. Örneğin, foton saçılma hesaplamaları için Klein-Nishina formülünü, fotoelektrik etki için Scofield'in tesir kesiti hesaplamalarını ve çift üretimi için Bethe-Heitler teorisini kullanır. XCOM bu hesaplamaları yaparken tesir kesiti verilerini ve bazen de karmaşık sayı teorisini kullanır. XCOM ayrıca web tabanlı bir arayüz üzerinden erişilebilen ve programlama dilleriyle entegre edilebilen bir API (Uygulama Programlama Arayüzü) sunmaktadır ve bu uygulaması da XCOM olarak bilinmektedir. “Win” ön eki Windows işletim sistemine sahip bilgisayarlara kurulmasından dolayı gelmektedir. Kütle azaltma katsayısı, bir malzemenin içinden geçen bir foton veya X-ışını demetinin yoğunluğunu nasıl zayıflattığını karakterize eder. XCOM kullanarak kütle azaltma katsayısını hesaplama yöntemi aşağıda açıklanmaktadır:

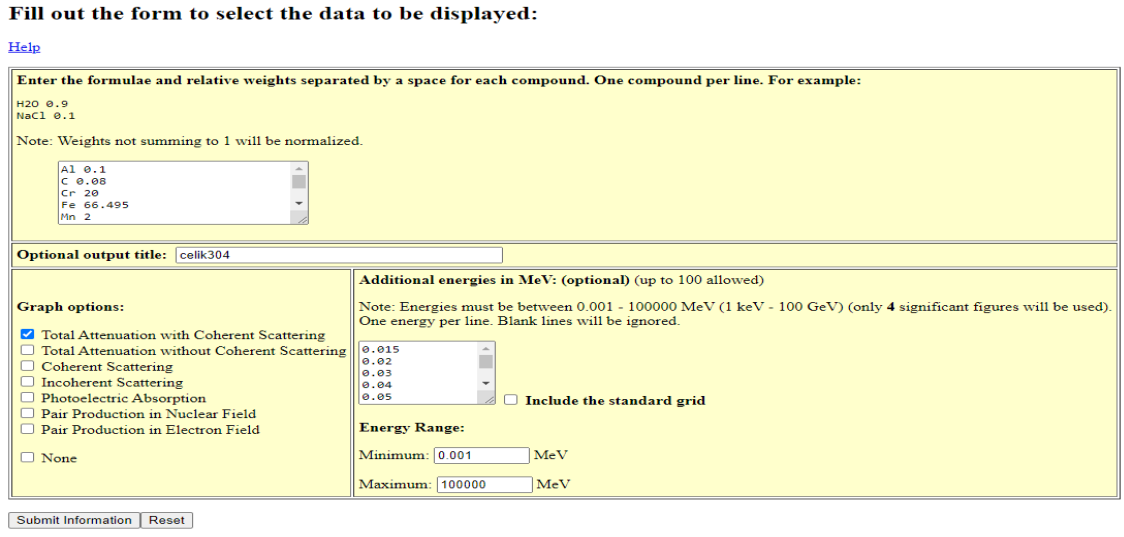
- XCOM Web Sitesine Erişim: XCOM Ulusal Standartlar Enstitüsü ve Teknoloji (NIST) web sitesine hesaplamaları gerçekleştirmek için erişilebilir.
- Malzemenin Seçilmesi: XCOM sayfasına girdikten sonra, kütle azaltma katsayısını hesaplamak istediğiniz malzemeyi bileşik veya karışım olarak tanımlayınız. Elementlerin kütle azaltma katsayıları hazır sunulmuştur.

- Enerji Aralığının Seçilmesi: Kütle azaltma katsayılarını hesaplamak istediğiniz enerji aralığını girin.
- Formun Gönderilmesi: Malzemeyi seçtikten ve enerji aralığını girdikten sonra formu gönderin. XCOM hesaplamaları gerçekleştirir ve kütle azaltma katsayılarını sunar.
- Sonuçların Yorumlanması: Sunulan verileri inceleyin. Kütle zayıflama katsayıları genellikle cm^2/g biriminde verilir. Çıktı verileri genellikle çeşitli formatlarda indirilebilir ve daha fazla analiz için kullanılabilir.

Şekil 3.11 XCOM kullanıcı arayüzü sayfası ve Şekil 3.12 XCOM malzeme içeriği tanımlama arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.11 XCOM kullanıcı arayüzü sayfası



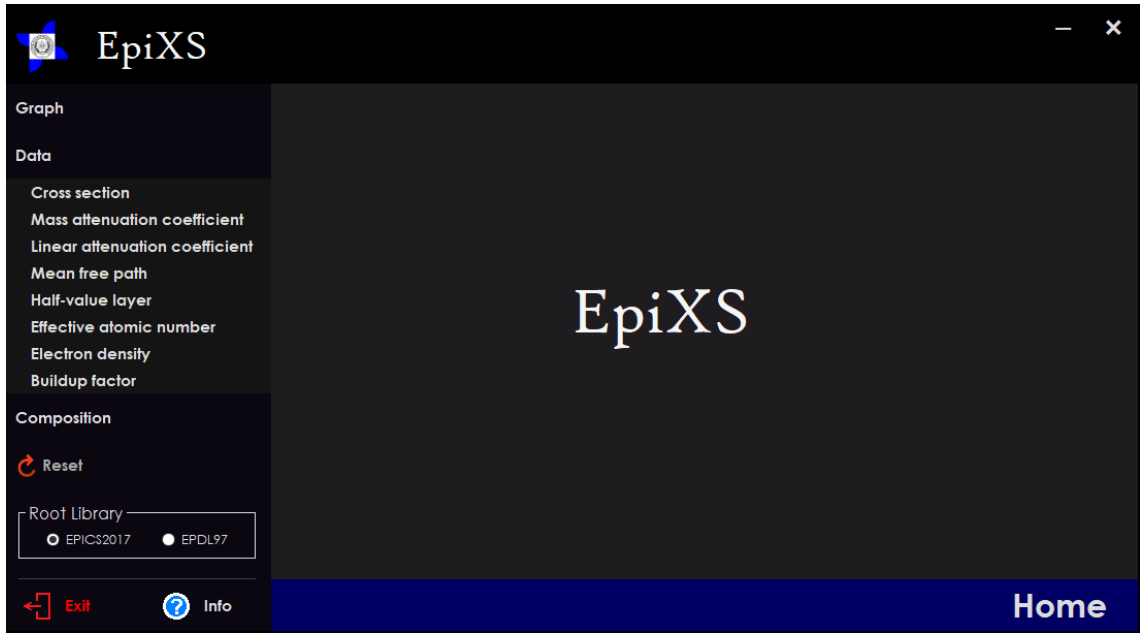
Şekil 3.12 XCOM malzeme içeriği tanımlama arayüzü

3.3.2.4. Gama radyasyon zırlama için EpiXS kodu

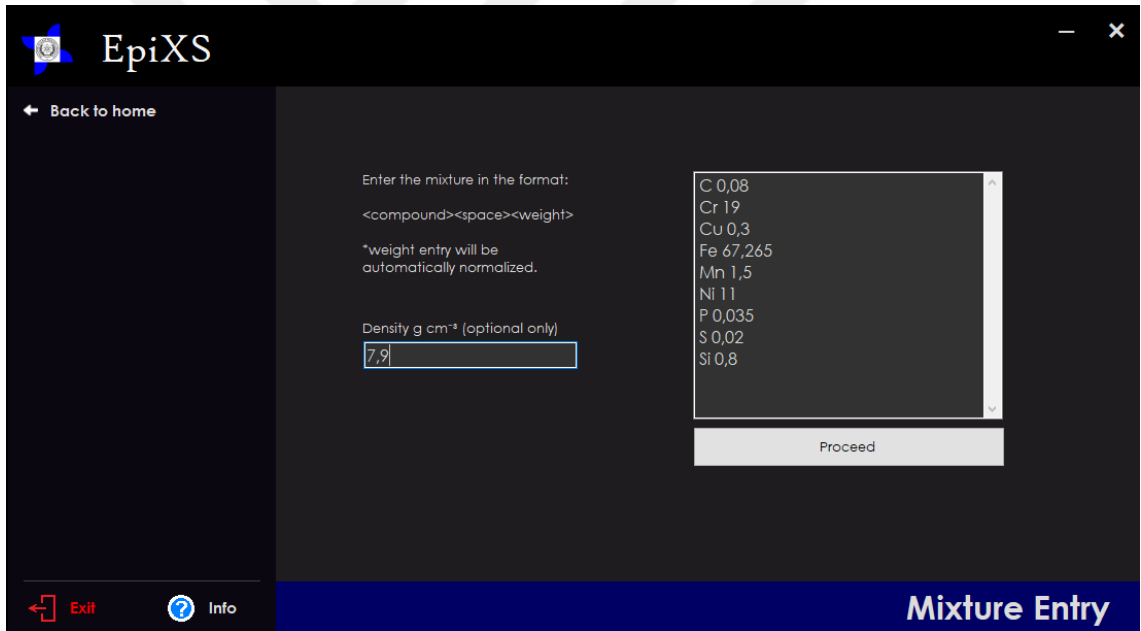
EpiXS, foton azaltma, dozimetre ve gama radyasyon zırlama hesaplamaları için Windows tabanlı bir programdır. Bu özellik, radyasyon koruması, tıbbi görüntüleme ve malzeme analizi gibi uygulamalar için önemlidir. EpiXS de XCOM gibi fotonların maddenin etkileşimleri için kurulmuş tesir kesit verileri kütüphanelerini kullanır. Bu tür bir kütüphane, geniş bir element ve bileşik yelpazesine yönelik foton etkileşim kesitlerini sağlayan EPICS2017 (ENDF/B-VIII) ve EPDL97 (ENDF/B-VI.8) veri tabanlarını içermektedir. Lineer azaltma katsayısı ve kütle azaltma katsayısını hesaplamak için aşağıdaki adımlar izlenir:

- Programı Açma: EpiXS programını açın.
- Malzeme Seçimi: Programın arayüzünde, hesaplama yapmak istediğiniz malzemeyi seçin. Bu, elementler, bileşikler veya karışımlar olabilir.
- Enerji Aralığının Belirlenmesi: Fotonların enerji aralığını girin. Enerji aralığı, farklı enerjilerde azaltma katsayısının hesaplanmasına izin verir.
- Hesaplama Türü Seçimi: Seçeneklerden lineer azaltma katsayısı veya kütle azaltma katsayısını seçin.
- Hesaplamanın Başlatılması: Hesaplamayı başlatmak için ilgili düğmeye tıklayın veya komutu girin. Program, seçilen malzeme ve enerji aralığı için azaltma katsayısını hesaplayacaktır.
- Sonuçların İncelenmesi: Hesaplamalar tamamlandığında, sonuçları gözden geçirin.

08X18N10T için Şekil 3.13'te EpiXS kullanıcı arayüzü sayfası gösterilirken Şekil 3.14'te EpiXS malzeme içeriği tanımlama arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.13 EpiXS kullanıcı arayüzü sayfası

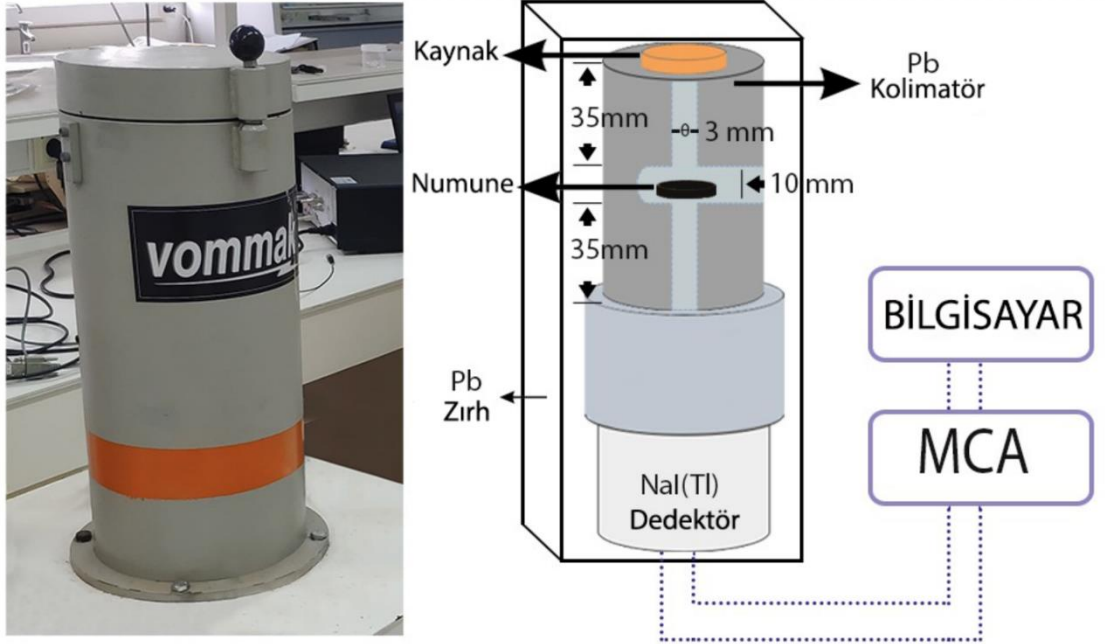


Şekil 3.14 EpiXS malzeme içeriği tanımlama arayüzü (08X18N10T)

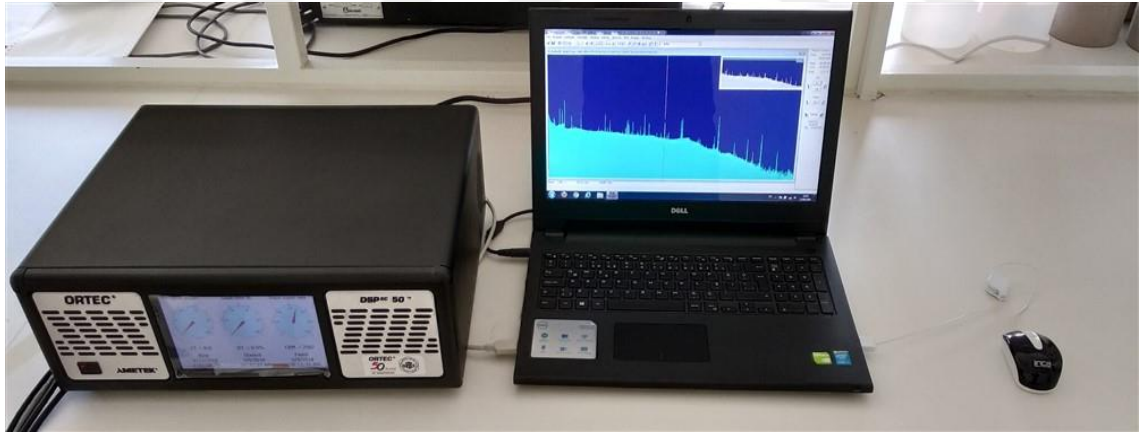
3.3.2.5. Gama radyasyonu zırlama için deneysel yöntem

Sodyum iyodür NaI(Tl) gama radyasyonu analizinde yaygın olarak kullanılan detektörlerden bir tanesidir. Genellikle Sodyum iyodür NaI(Tl) detektörleri kare prizma ve çubuk şeklinde ve dedektörün iç kısmında Tl (talium) ışıltamayı artıran madde bulundurarak tasarlanmıştır. Foto tepe (zirve) tespiti verimliliği için kalibre edilmiş bu detektörler, mutlak gama yayılım (emisyon) oranlarını elde etmek ve nicel analiz

yapmak için kullanılır. Şekil 3.15 ve şekil 3.16’da Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi’ne ait NaI(Tl) detektörü gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi’ne ait NaI(Tl) dedektör sistemi



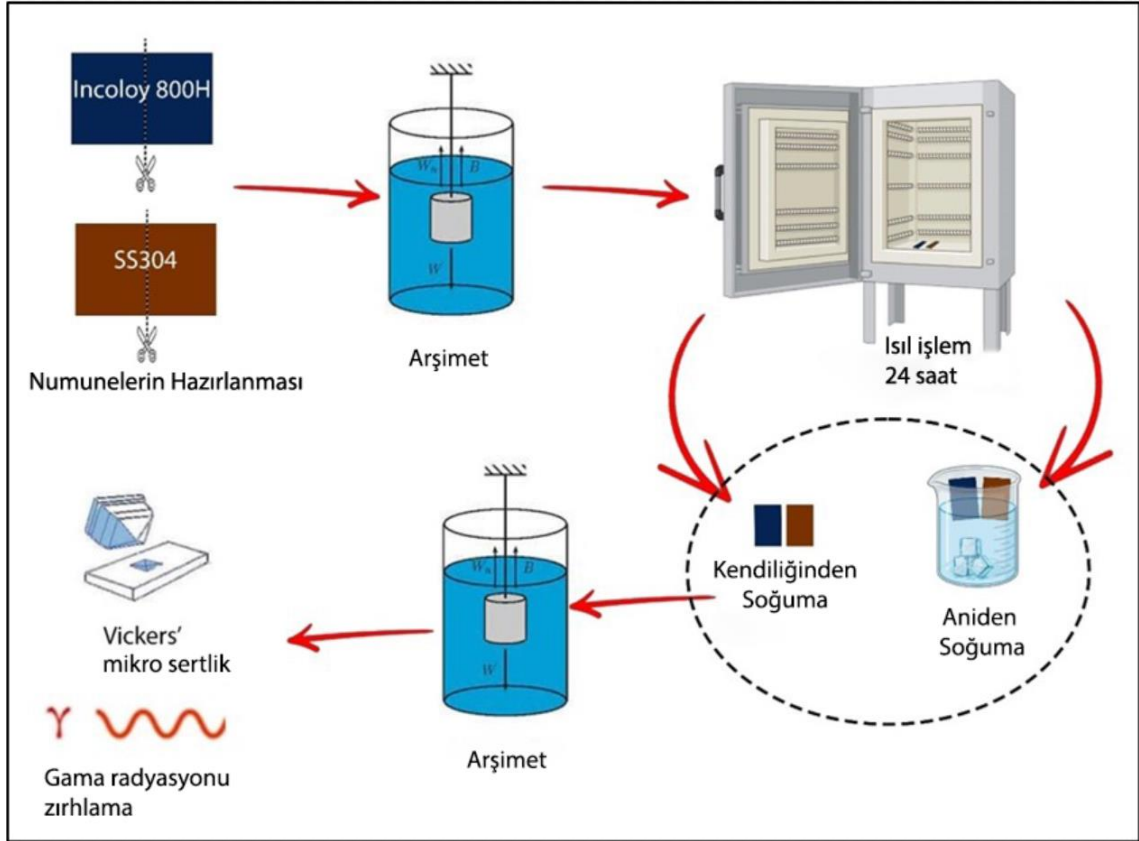
Şekil 3.16 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi’ne ait NaI(Tl) dedektör sisteminin bilgisayar bileşeni

Gama radyasyonu zırhlama özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen ölçüm süreci aşağıda adım adım belirtilmiştir:

- Ölçüm süresi 2700 s olarak seçilmiştir.
- Dedektör voltajı 600 V olarak ayarlanmıştır.
- Çok kanallı analizör 4096 kanal olarak ayarlanmıştır.
- Öncelikle background ölçümü alınmıştır.

- Kanal kalibrasyonu yapılmıştır (ölü zaman %9).
- Sadece kolimatörlü boş ölçüm yapılmıştır.
- Kolimatörlü ^{60}Co ile ölçüm yapılmıştır.
- Radyasyon kaynağı ile dedektör arasına numuneler yerleştirilerek ölçümlere başlanılmıştır.
- Lineer azaltma katsayısı enerji-çıkış eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.17 de numuneler ile yapılan deneyler görselleştirilmiştir.



Şekil 3.17 Deneysel yöntem görseli

3.3.2.6. Gama radyasyonu zırlamada kullanılan parametreler

Lineer azaltma katsayısı (μ), bir malzemenin birim kalınlığı başına tek enerjili bir ışında zayıflatılmış gelen fotonların fraksiyonunu tanımlayan bir sabittir. Koherent saçılma, Compton saçılması ve fotoelektrik etki dâhil olmak üzere tüm olası etkileşimleri içermektedir. Sayısal olarak cm^{-1} birimlerinde ifade edilir. Bu katsayı, artan atom numarası ve soğurucu malzemenin artan fiziksel yoğunluğu ile artar. Artan foton enerjisi ile azalmaktadır (Elektronik tabakaların soğurma kıyıları hariç).

Denklem (3.8) kullanılarak bu katsayı hesaplanabilmektedir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.8)$$

Burada x numune kalınlığı, I zırh malzemesinden sonraki radyasyon şiddeti, I_0 başlangıçtaki radyasyon şiddeti ve μ lineer azaltma katsayısıdır.

Kütle azaltma katsayısı birimi cm^2/g olarak verilmektedir. Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısı (μ) ve malzemenin yoğunluğuna (ρ) bağlıdır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{m/V} \quad (3.9)$$

Burada μ lineer azaltma katsayısıdır (cm^{-1}), m kütle (g), V hacim (cm^3), ρ malzemenin yoğunluğudur (g/cm^3).

Alternatif olarak, lineer azaltma katsayısı (μ) aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{x} \quad (3.10)$$

Burada, I_0 , absorbe edici bir malzeme olmadan başlangıç radyasyon yoğunluğunu temsil eder. I , bariyer tarafından zayıflatılmış radyasyon yoğunluğudur ve birimi etkileşimler/ cm^2s cinsindendir. x ise malzemenin kalınlığıdır. Böylece kütle azaltma katsayısı (μ/ρ) şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho x} \quad (3.11)$$

Lineer azaltma katsayısı kullanılarak YDK (yarı değer kalınlığı) ve OSY (ortalama serbest yol) gibi radyasyon azaltma parametreleri belirlenebilir. Başlangıçtaki radyasyon şiddetini %50'ye indirebilmek için gerekli malzeme kalınlığına yarı değer kalınlığı denir ve Denklem (3.12) kullanılarak elde edilebilir.

$$YDK = 0,693/\mu \quad (3.12)$$

Ortalama serbest yol, bir nükleer parçacığın bir madde içinde çarpışmadan veya etkileşime girmeden önce kat ettiği ortalama mesafeyi ifade eder ve Denklem (3.13) kullanılarak elde edilebilir.

$$OSY = 1/\mu \quad (3.13)$$

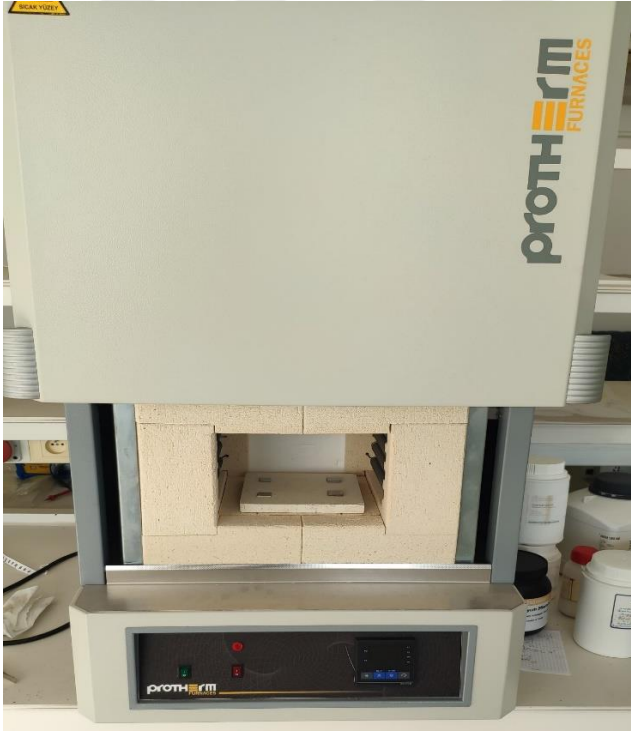
Bir malzemenin YDK ve OSY değerlerinin düşük olması, o malzemenin iyi bir koruyucu malzeme olduğunu göstermektedir (Dilsiz, vd., 2021).

Malzemelerin gama radyasyon zırlama performansı radyasyon koruma verimliliği (RKV) parametresi sayesinde yüzde cinsinden değerlendirilebilmektedir. Denklem (3.14) kullanılarak elde edilebilir.

$$RKV = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) 100 \quad (3.14)$$

3.4. Isıl İşlem

SS304 ve Incoloy 800H alaşımları, sunulan çalışma için seçilen malzemelerdir. Test numuneleri, ATI Materials (Dallas, ABD) firmasından alaşım levhalar olarak satın alınmış ve yaklaşık 2 cm x 2 cm boyutlarında kesilmiştir. Numunelerin kalınlığı yaklaşık 0,15 cm olarak ölçülmüştür. SS304 ve Incoloy 800H alaşımları tez kapsamında temin edilebildiği için bu alaşımlar kullanılarak ek analizler planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada herhangi bir ısıl işlem görmeyen SS304 ve Incoloy 800H alaşımlarının gama radyasyon zırlama parametreleri belirlenmiş ve referans olarak kaydedilmiştir. Aynı zamanda ısıl işlem görmemiş numunelerin deneysel olarak gama radyasyonu zırlama performansı belirlenmiştir. Daha sonra, belirtilen alaşımlar 300, 500, 700 ve 1000 °C sıcaklarına kadar Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait Kül Fırını (Protherm, PLF 110/6-PC442T) kullanılarak dakikada 10 derece artacak şekilde ısıtılmıştır. Hedeflenen sıcaklığa ulaştıktan sonra 24 saat sabit sıcaklıkta numuneler bekletilmiştir. 24 saatlik süre sonunda ısıtılan numunelerden bir tanesi buzlu su ile ani soğuma işlemine tabi tutulurken bir diğeri kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.18'de kül fırını gösterilmiştir.

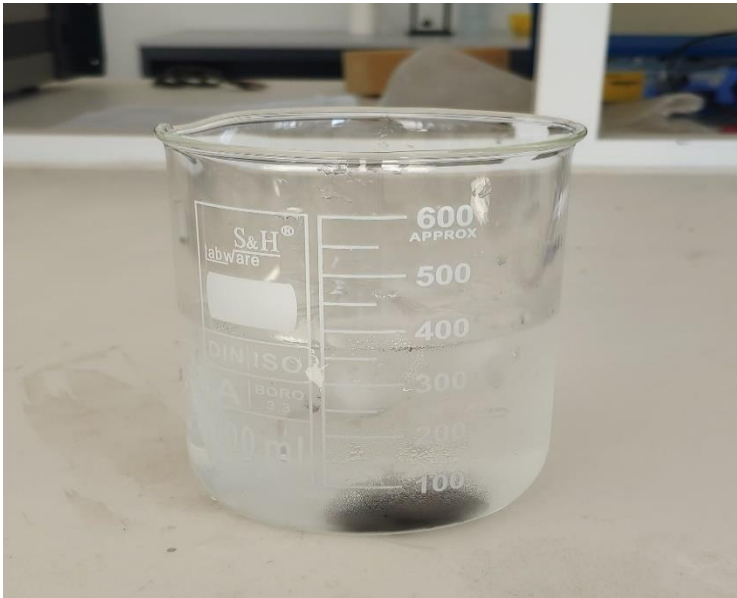


Şekil 3.18 Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait kül fırını ve numunelerin yerleşimi

Isıtılma işlemine alınan alaşımların 1000 °C'de ani ve kendiliğinden soğutma işlemi şekil 3.19 ve 3.20'de gösterilmiştir.

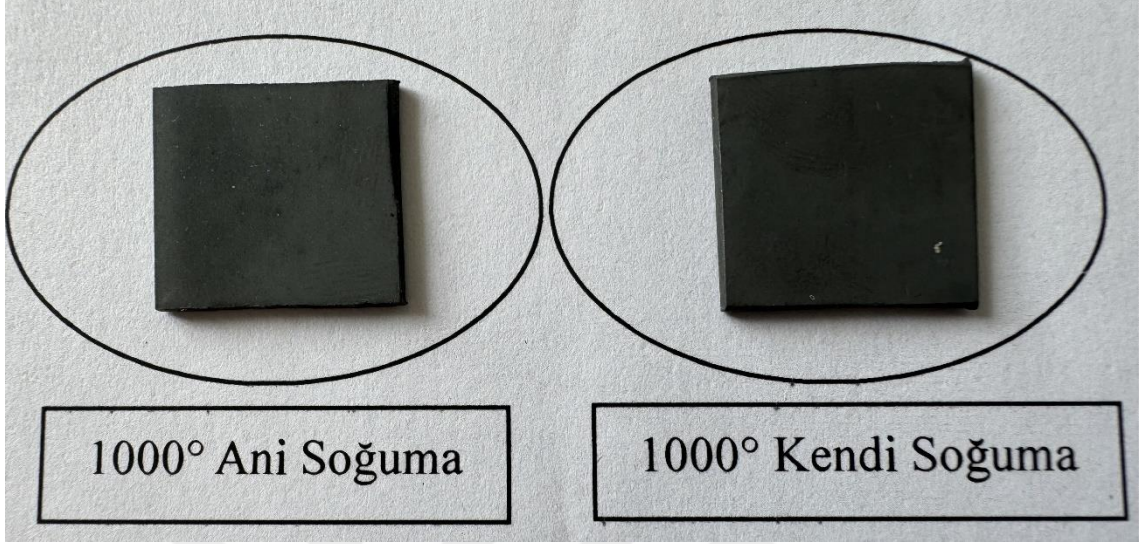


Şekil 3.19 1000 °C'de ısıtılan SS304 ile Incoloy 800H alaşımın kendiliğinden soğumaya bırakılma işlemi

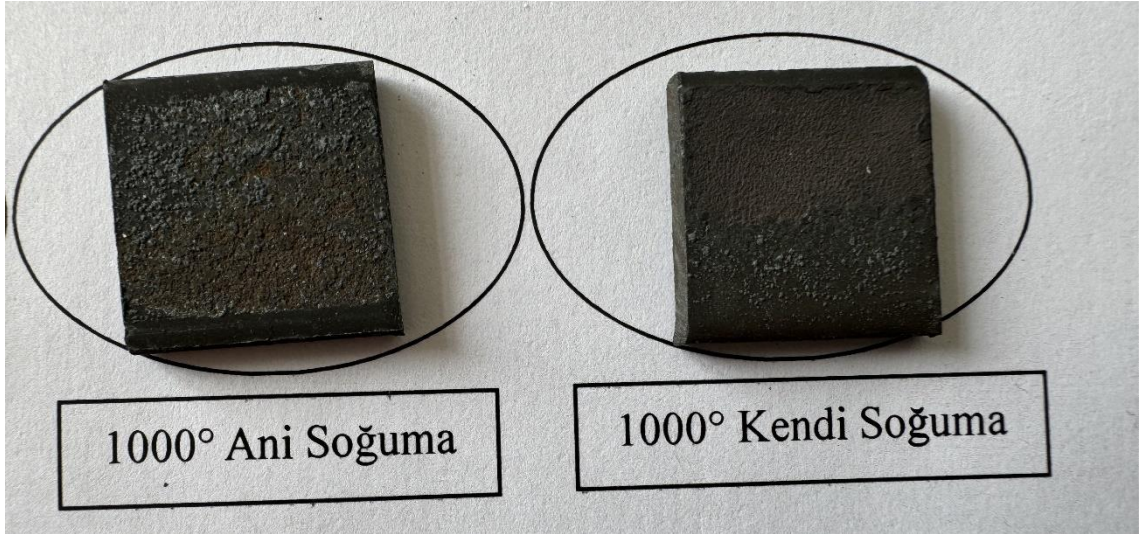


Şekil 3.20 1000 °C'de ısıtılan SS304 ile Incoloy 800H alaşımın buzlu su ile aniden soğuma işlemi

1000 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde gerçekleşen değişim daha iyi gösterebilmek için Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 ilgili numunelere ait görseller sunmaktadır. Şekil 3.21 Incoloy 800H için görselleri sunarken Şekil 3.22’de SS304 numunelerinin görselleri gösterilmektedir.



Şekil 3.21 1000 °C için ısıtma ve soğutma işlemi tamamlanan Incoloy 800H alaşımı

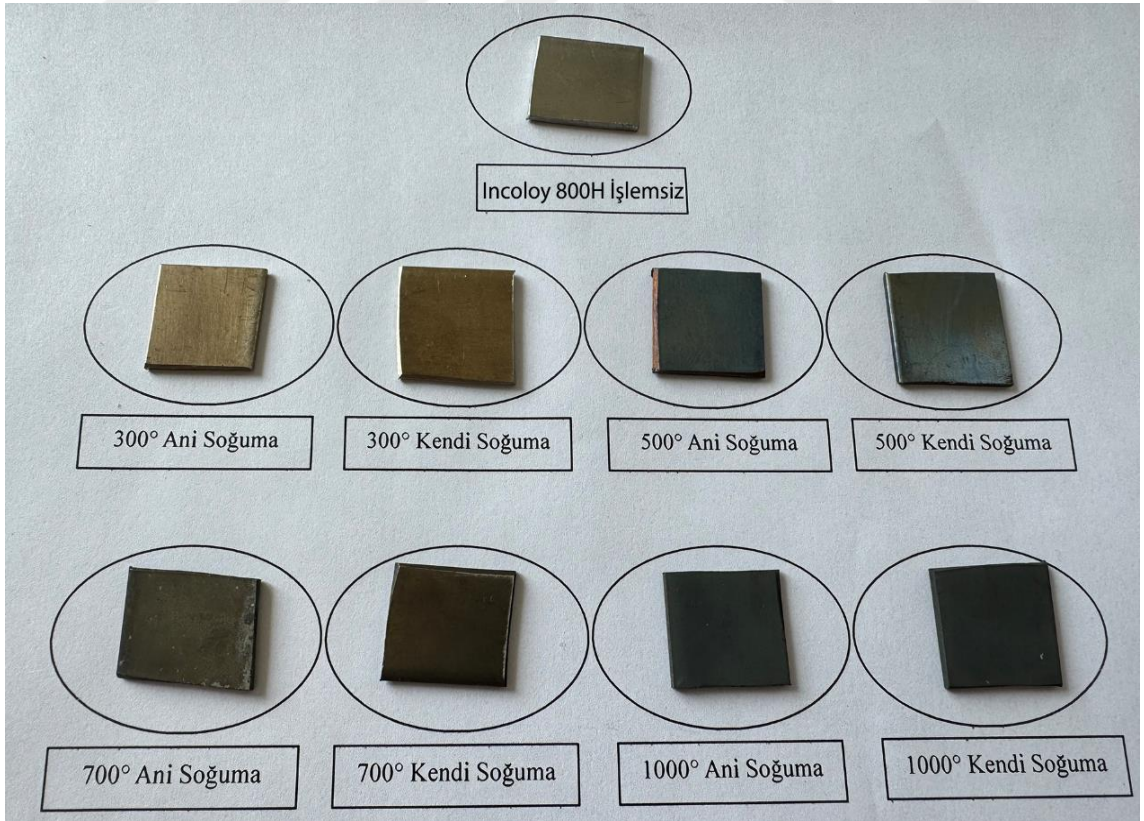


Şekil 3.22 1000 °C için ısıtma ve soğutma işlemi tamamlanan SS304 alaşım

SS304 ile Incoloy 800H alaşımın kül fırını ile ısıtılıp soğutulma işlemi tamamlandıktan sonra NaI(Tl) detektörü ile gama radyasyonu zırlama deneyleri yapılmıştır. Ayrıca elde edilen ısıtma işlem görmüş alaşımların sertlik deneyi de gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24 tez kapsamında ele alınan bütün numuneleri sunmaktadır.



Şekil 3.23 SS304 alaşımın ısıtma-soğutma işlemi sonrası görselleri



Şekil 3.24 Incoloy 800H alaşımın ısıtma-soğutma işlemi sonrası görselleri

3.5. Hazırlanan Numunelerin Yoğunluklarının Belirlenmesi

Elde edilen örneklerin yoğunluğu Arşimet yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemde, önce her bir örnek 0,1 mg çözünürlüğe sahip hassas bir terazi kullanılarak tartılmıştır. Daha sonra saf suya bırakılarak yer değiştiren sıvının miktarı ölçülmüştür. Yer değiştiren sıvının miktarı, örnek hacmini belirlemiş ve bu hacim yoğunluk hesaplaması için kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen yoğunluk verileri istatistiksel analize tabi tutulmuş ve sonuçlar yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik göstermiştir. Şekil 3.25'te Arşimet yoğunluk kiti gösterilmiştir. İlgili örneğin yoğunluğun hesaplanması için kullanılan formül Denklem 3.15'te gösterilmiştir.

$$\rho_{\text{alaşım}} = \frac{m_a}{m_a - m_w} \cdot \rho_w \quad (3.15)$$

ρ_w saf suyun yoğunluğu, m_a örneğin havada olan kütlesi ve m_w örneğin su içinde olan kütlesini simgelemektedir.



Şekil 3.25 Arşimet yoğunluk kiti

3.6. Numunenin Sertlik Ölçümü

Isıl işlemi yapılan alaşımların sertlik deney aşaması şu şekildedir:

- Malzeme yüzeyinin pürüzleri 240 ve 400 kum zımpara metkon Forcipol 202 makinesi kullanılarak giderilmiştir. Şekil 3.26'da gösterilmiştir



Şekil 3.26 Sinop Üniversitesi Metkon Forcipol 202 zımpara ve parlatma makinesi

- Yüzeyi temizlenen numunelere 1 kg'lık yük altında vickers mikro sertlik testine tabi tutulmuştur. 3 adet ölçüm alınarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır.
- AFFRI marka DM2D model mikro sertlik cihazı bu test sırasında kullanılmıştır. Şekil 3.27'de gösterilmiştir.
- Vickers mikrosertlik değerini (Hv) hesaplamak için Denklem 3.16 kullanılmıştır:

$$H_v = 1854.4 \frac{F}{d^2} \quad (3.16)$$

Burada, H_v , F ve d sırasıyla Vickers mikrosertlik değerini, uygulanan yükü (1000 g) ve indentasyonun köşegen uzunluğunun ortalamasını (mm) tanımlamaktadır.



Şekil 3.27 Sinop Üniversitesi AFFRI marka DM2D model mikro sertlik cihazı

4. BULGULAR

4.1. Nötron Radyasyon Zırhlama Bulguları

Nötron radyasyonu zırhlama kabiliyetinin değerlendirilmesi GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları ile yapılmıştır. Ayrıca bu alaşımların zırhlama kabiliyetlerinin belirlenmesi teorik olarak hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. GEANT4 ve FLUKA simülasyon programında 4,5 MeV nötron enerjisi sabit alınıp, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 mm numune kalınlıklarında her bir alaşım üzerine 10 milyon nötron gönderilmiş ve geçen nötron parçacık sayısı belirlenmiştir. Daha sonra, numune kalınlığı 10 mm olarak sabit alınıp, 0,1, 0,5, 1, 2, 4,5, 8 ve 10 MeV nötron enerjilerinde her bir alaşım üzerine 10 milyon nötron gönderilmiştir. Simülasyon işlemleri tamamlandıktan sonra malzemeden geçen nötron sayısı(transportation) sonuçları elde edilmiştir.

Her bir alaşımların nötron radyasyonu zırhlama performansının belirlenmesine ek olarak ikincil radyasyon hesabında GEANT4 simülasyon programı ile değerlendirilmiştir. Tablo 4.1 10 mm kalınlığa sahip alaşımlar üzerine 4,5 MeV enerjisinde 10 milyon adet nötron gönderilmesiyle elde edilen toplam makroskobik tesir kesiti (cm^{-1}), ortalama serbest yol (mm) ve malzeme içinden geçen nötron sayısını (transportation) sunmaktadır.

Tablo 4.1 GEANT4 simülasyon kodu ile 4,5 MeV enerjisindeki nötronların 10 mm kalınlığındaki alaşımların üzerine gönderilmesiyle elde edilen sonuçlar

Malzemeler	Toplam Makroskobik Tesir Kesiti (cm^{-1})	Ortalama Serbest Yol (mm)	Geçen Nötron Sayısı
SS304	2,1174	4,7228	7164133
08X18N10T	2,1141	4,7302	7196135
Zirkaloy-2	2,0546	4,8671	8522149
Zirkaloy-4	2,0535	4,8697	8519432
Incoloy 800H	2,1131	4,7324	7219012

Tablo 4.2 Bu çalışmada ele alınan alaşımların yoğunluk ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm ³)	Hızlı Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti
SS304	8	0,1688
08X18N10T	7,9	0,1666
Zirkaloy-2	6,56	0,1025
Zirkaloy-4	6,56	0,1025
Incoloy 800H	7,94	0,1633

Tablo 4.2’de görüldüğü üzere, SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4, Incoloy 800H alaşımları arasında en yüksek hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerine sahip olan malzeme, 0,1688 cm² /g hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değeri ile SS304 çeliğidir.

Tablo 4.2 de yer alan hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ile tablo 4.1’de bulunan geçen nötron sayısı birbiriyle ilişkilidir. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti büyüdükçe geçen nötron sayısı da azalmaktadır.

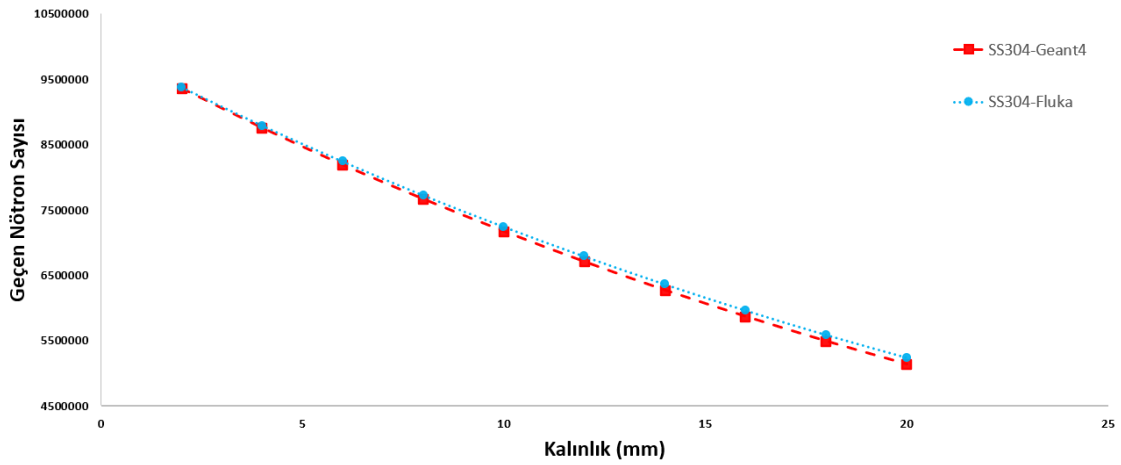
4.1.1. Kalınlığa bağlı olarak alaşımların nötron radyasyonu zırh performansı

2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 mm numune kalınlıklarındaki alaşımlar üzerine 4,5 MeV enerjili 10 milyon nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Alaşımlardan geçen nötron sayılarına göre numuneler değerlendirilmiştir. Genel olarak, ele alınan alaşımların kalınlıkları arttıkça geçen nötron sayısının azaldığı görülmektedir. Çalışma kapsamında seçilen bütün kalınlık değerleri için en iyi nötron zırhlama malzemesi PWR’larda kullanılan SS304 alaşımı olarak belirlenmiştir. Her bir alaşım için sonuçlar ve detaylar aşağıda sunulmuştur.

Basıncılı su reaktörlerinde kullanılan SS304 çeliği üzerinden geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA ile simüle edilmiş ve elde edilen bulgular Tablo 4.3’te sunulmuştur. Şekil 4.1 ise tabloda verilen sonuçların grafiksel gösterimini sunmaktadır. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir. GEANT4 ve FLUKA programlarından elde edilen bulgular arasında çok iyi bir uyuşmanın olduğu da gözlemlenmektedir.

Tablo 4.3 Farklı numune kalınlıklarında SS304'ten geçen nötron sayıları

Numune Kalınlığı (mm)	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
2	9353186	9375017
4	8748416	8786495
6	8181801	8237624
8	7658194	7719864
10	7164133	7238264
12	6698787	6784964
14	6263753	6358194
16	5861628	5958701
18	5483145	5584420
20	5131364	5236806

**Şekil 4.1** SS304 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi

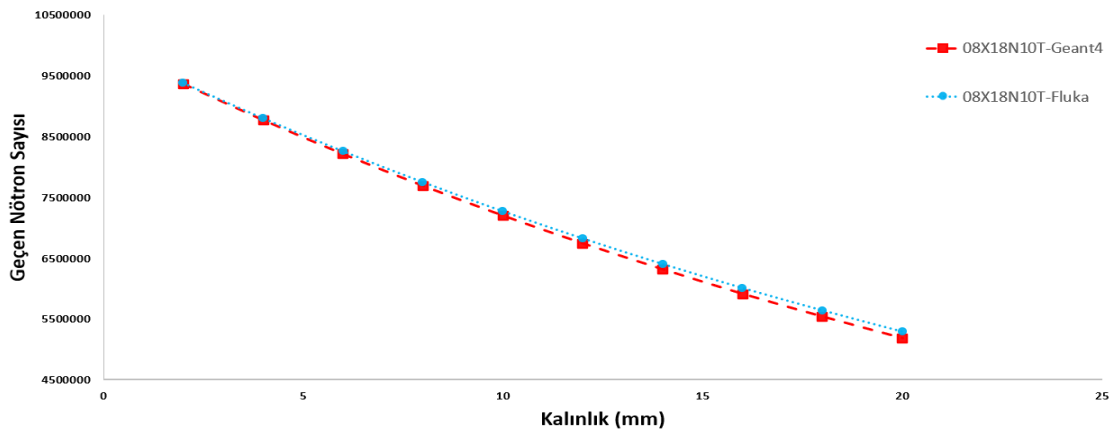
Rus basınçlı su reaktörlerinde kullanılan 08X18N10T alaşımının üzerine 10 milyon adet 4,5 MeV enerjili nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyonları yardımıyla geçen nötron sayıları (transportation) belirlenmiştir. Tablo 4.4'te elde edilen simülasyon sonuçları sunulurken Şekli 4.2 de bu sonuçlar görselleştirilmiştir. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir. GEANT4 ve FLUKA programları arasında çok iyi bir uyumda gözlemlenmektedir.

Tablo 4.4 Farklı kalınlıklarda 08X18N10T alaşımından geçen nötron sayısı

Numune Kalınlığı (mm)	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
2	9362940	9383115
4	8767793	8801230

Tablo 4.4'ün devamı

6	8208695	8258076
8	7686231	7748224
10	7196135	7268092
12	6739249	6820412
14	6313341	6399334
16	5908592	6003282
18	5535280	5634734
20	5180678	5284189

**Şekil 4.2** 08X18N10T alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi

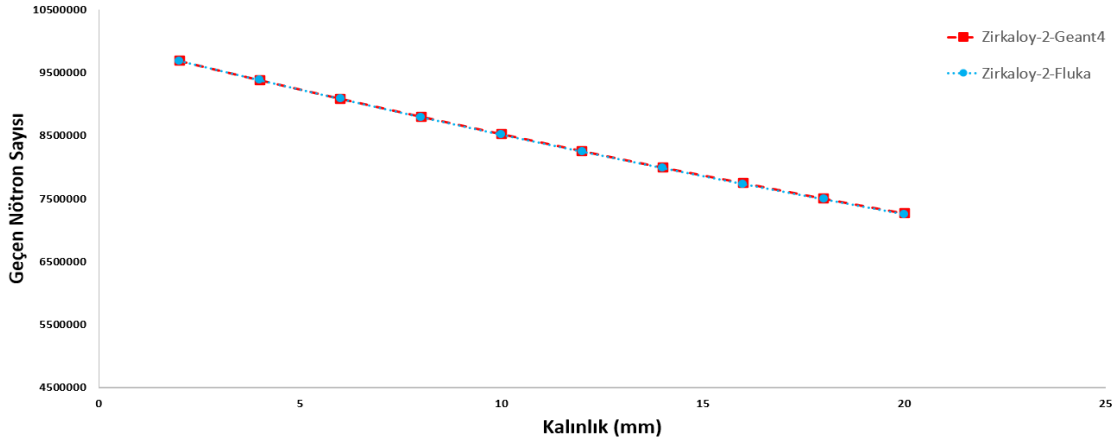
Kanada Döteryum-Uranyum Reaktörlerinde kullanılan Zirkaloy-2 alaşımının üzerine 10 milyon adet 4,5 MeV enerjili nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları yardımıyla geçen nötron sayıları belirlenmiştir. Tablo 4.5'te elde edilen simülasyon sonuçları özetlenirken Şekil 4.3'te bu sonuçlar grafik olarak verilmiştir. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir. GEANT4 ve FLUKA programlarının sonuçları arasında çok iyi bir uyuşmanın da gözlemlendiği belirtilmelidir.

Tablo 4.5 Farklı numune kalınlıklarında Zirkaloy-2'den geçen nötron sayıları

Numune Kalınlığı (mm)	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
2	9686076	9683910
4	9379421	9377626
6	9084326	9079858
8	8799538	8791065
10	8522149	8511720

Tablo 4.5'in devamı

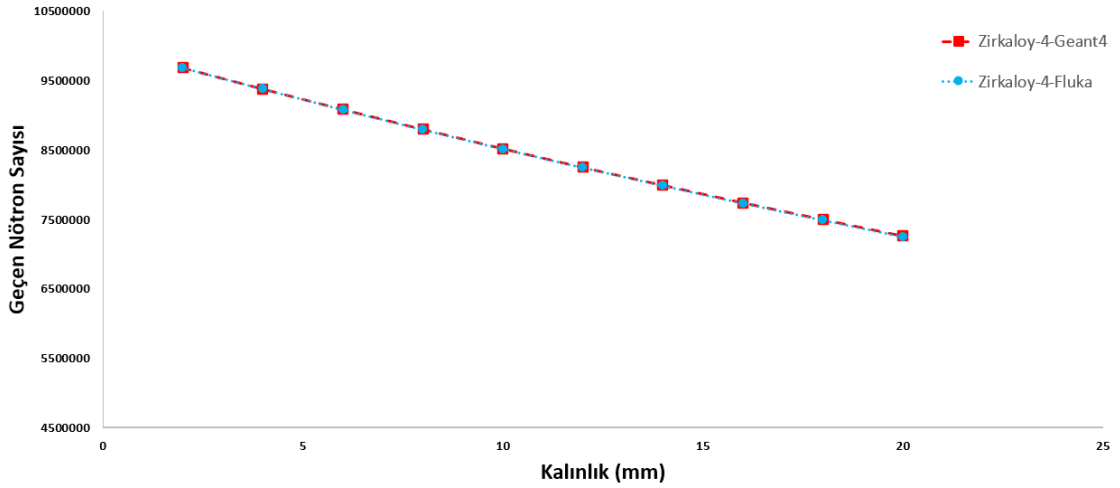
12	8252836	8243675
14	7989438	7983641
16	7743156	7729067
18	7494659	7486935
20	7260636	7249042

**Şekil 4.3** Zirkaloy-2 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi

Kanada Döteryum-Uranyum Reaktörlerinde kullanılan Zirkaloy-4 alaşımının üzerine 10 milyon adet 4,5 MeV enerjili nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodlarıyla geçen nötron sayıları saptanmıştır. Tablo 4.6'da elde edilen simülasyon sonuçları sunulurken Şekil 4.4'te elde edilen bulgular görselleştirilmiştir. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir. GEANT4 ve FLUKA programları arasında çok iyi bir uyumda gözlemlenmektedir.

Tablo 4.6 Farklı numune kalınlıklarında Zirkaloy-4'ten geçen nötron sayıları

Numune Kalınlığı (mm)	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
2	9684983	9683812
4	9380077	9377311
6	9085099	9080104
8	8798776	8791388
10	8519432	8512328
12	8249125	8244640
14	7992258	7983443
16	7739306	7729400
18	7497092	7486411
20	7259899	7246650

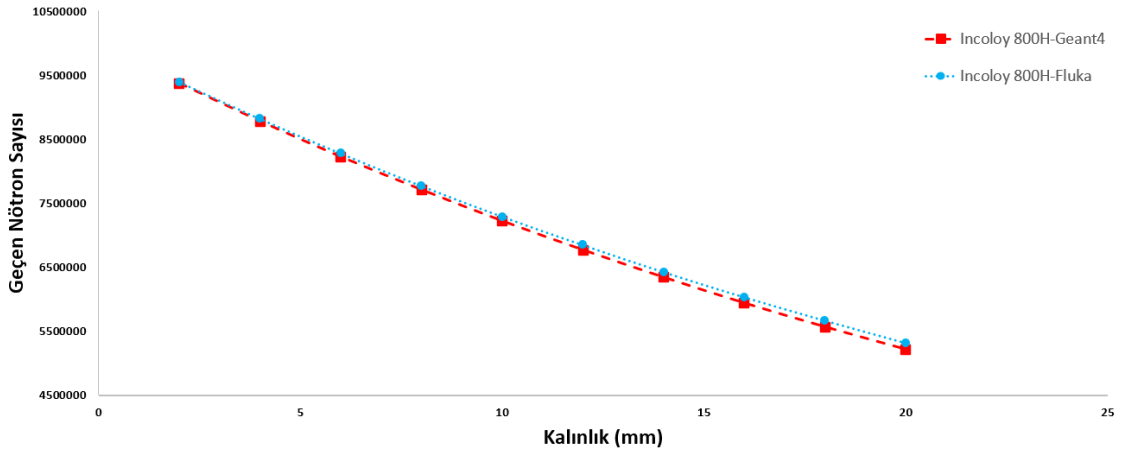


Şekil 4.4 Zirkaloy-4 alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi

Çok yüksek sıcaklık reaktörlerinde kullanılan Incoloy 800H alaşımının üzerine gönderilen 10 milyon adet 4,5 MeV enerjili nötronun malzeme ile etkileşimi GEANT4 ve FLUKA kodlarıyla belirlenmiştir. Tablo 4.7’de elde edilen simülasyon sonuçları özetlenirken Şekil 4.5’te elde edilen bulguların grafiği sunulmuştur. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklediği gibi azaldığı görülmektedir. GEANT4 ve FLUKA sonuçları arasında çok iyi bir uyumda gözlemlenmektedir.

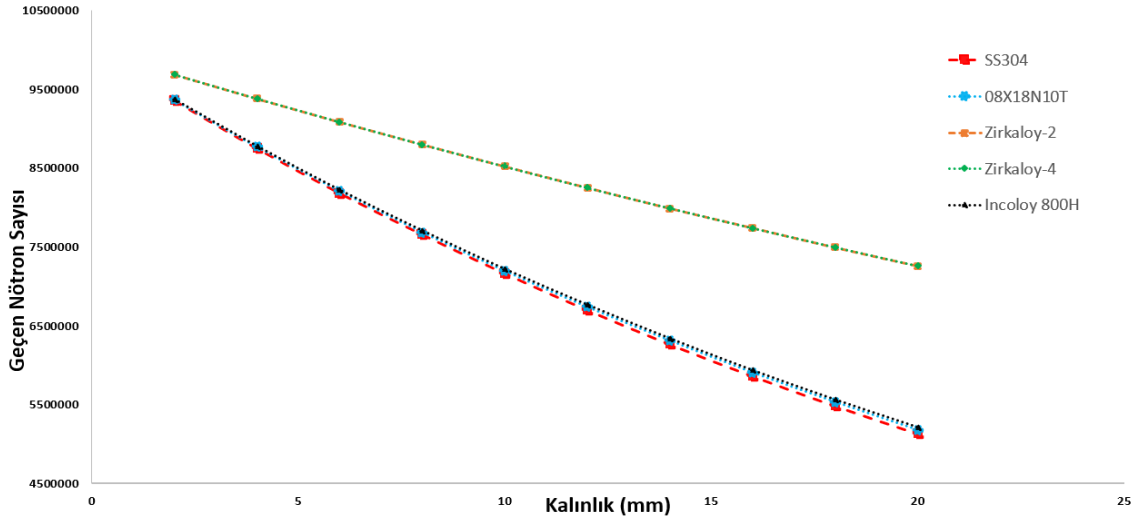
Tablo 4.7 Farklı numune kalınlıklarında Incoloy 800H’den geçen nötron sayıları

Numune Kalınlığı (mm)	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
2	9369863	9388149
4	8777355	8812259
6	8221799	8272260
8	7707206	7764342
10	7219012	7285512
12	6766594	6842742
14	6339007	6420646
16	5936692	6028237
18	5564207	5662422
20	5213742	5313360



Şekil 4.5 Incoloy 800H alaşımından geçen nötron sayısının numune kalınlığına göre değişimi

Şekil 4.6 ise SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H alaşımları için GEANT4 kodu kullanılarak elde edilen “geçen nötron sayılarının” grafiksel kıyaslamasını göstermektedir. Burada dikkat çeken bulgu SS304 ve Incoloy 800H alaşımlarının numune kalınlığı artışına daha fazla reaksiyon göstermesidir. Numune kalınlığı arttıkça nötron zırhlama açısından diğer alaşımlarla aralarındaki performans farkı artmaktadır.



Şekil 4.6 Farklı kalınlıklarda seçilen alaşım malzemelerinden geçen nötron sayısı (GEANT4)

4.1.2. Nötron enerjisine bağlı olarak alaşımların nötron radyasyonu zırhlama performansı

0,1, 0,5, 1, 2, 4,5, 8 ve 10 MeV enerjilerinde 10 milyon nötron 10 mm kalınlığa sahip alaşımlar üzerine gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Numuneler üzerinden geçen nötron sayılarına göre zırhlama kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Tablo 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 ve 4.14 sırasıyla 0,1, 0,5, 1, 2, 4,5, 8 ve 10 MeV nötron enerjilerinde elde edilen sonuçları sunmaktadır. 0,1 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar arasında en iyi nötron zırhlama malzemesi olarak Incoloy 800H görülmektedir. 0,5 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı GEANT4'e göre Zirkaloy-2 bulunurken FLUKA simülasyonuna göre ise Zirkaloy-4 alaşımı saptanmıştır. Bu enerjide, her iki alaşım arasında zırhlama açısından çok büyük fark görülmemektedir. 1 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı Zirkaloy-4 olarak belirlenmiştir. 2 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı Incoloy 800H olarak bulunmuştur. 4,5 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı SS304 olarak görülmektedir. 8 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı SS304 olarak değerlendirilmiştir. 10 MeV nötron enerjisinde en iyi nötron zırhlama alaşımı FLUKA simülasyonuna göre SS304 alaşımı görülmektedir. Bu enerjide alaşımlar arasında kritik farklar gözlemlenmemiştir.

Tablo 4.8 0,1 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4	FLUKA
	Geçen Nötron Sayısı	Geçen Nötron Sayısı
SS304	5275472	5216808
08X18N10T	5403500	5297176
Zirkaloy-2	6666272	6563640
Zirkaloy-4	6673972	6564946
Incoloy 800H	4888862	4752321

Tablo 4.9 0,5 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4	FLUKA
	Geçen Nötron Sayısı	Geçen Nötron Sayısı
SS304	8143490	8042625
08X18N10T	8175201	8070300
Zirkaloy-2	6811264	7124625
Zirkaloy-4	6816194	7124496
Incoloy 800H	7704768	7377062

Tablo 4.10 1 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
SS304	7850681	7811541
08X18N10T	7873152	7838716
Zirkaloy-2	7428942	7561006
Zirkaloy-4	7427792	7560747
Incoloy 800H	7538664	7693688

Tablo 4.11 2 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
SS304	7902183	7699992
08X18N10T	7935422	7730296
Zirkaloy-2	8127331	8166863
Zirkaloy-4	8130524	8165968
Incoloy 800H	7872939	7652660

Tablo 4.12 4,5 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
SS304	7164133	7238264
08X18N10T	7196135	7268092
Zirkaloy-2	8522149	8511720
Zirkaloy-4	8519432	8512328
Incoloy 800H	7219012	7285512

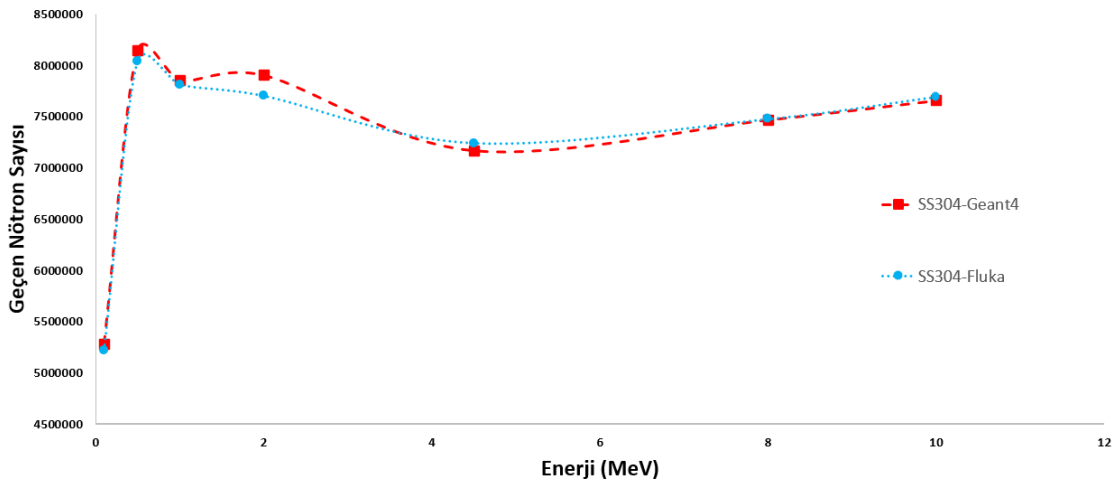
Tablo 4.13 8 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
SS304	7464280	7472564
08X18N10T	7490358	7506522
Zirkaloy-2	8377805	8317005
Zirkaloy-4	8377629	8318424
Incoloy 800H	7469458	7486990

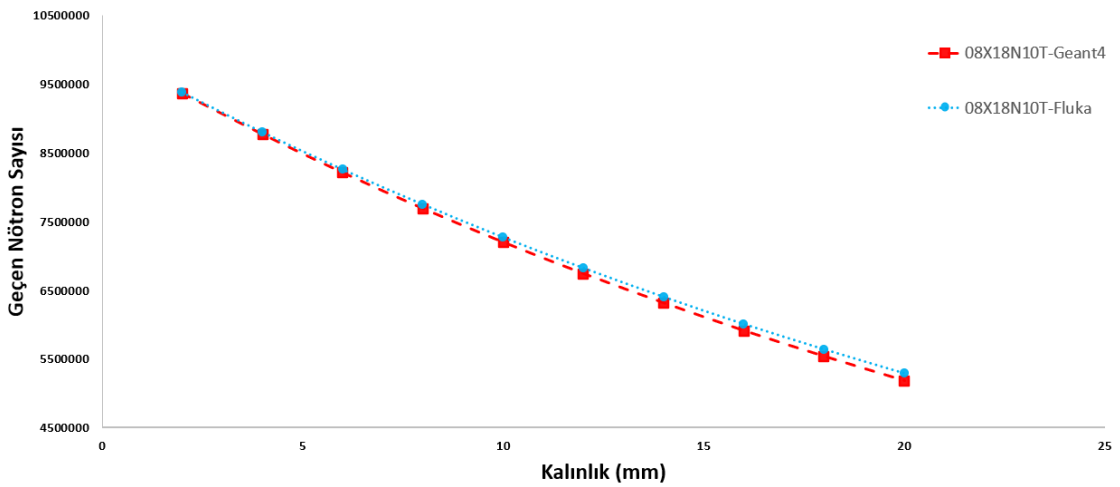
Tablo 4.14 10 MeV nötron enerjisinde seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı	FLUKA Geçen Nötron Sayısı
SS304	7652702	7688378
08X18N10T	7681580	7713870
Zirkaloy-2	8333879	8319084
Zirkaloy-4	8335330	8319110
Incoloy 800H	7650046	7694430

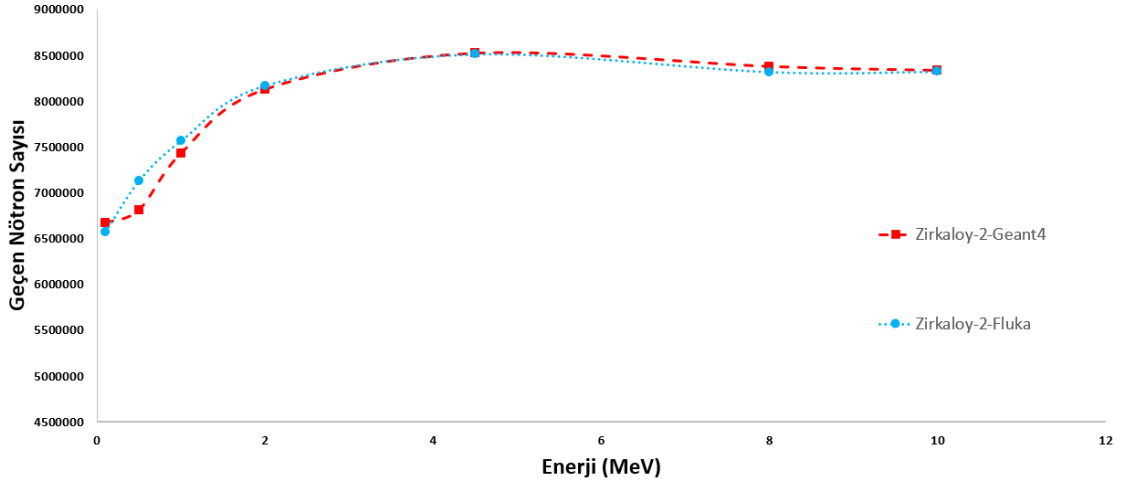
Şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 sırasıyla SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H için yukarıdaki tablolarda sunulan verilerin grafik hallerini sunmaktadır. Alaşımların üzerinden geçen nötron sayılarının nötron enerjisine göre değişimleri hem GEANT4 hem de FLUKA için sunulmaktadır.



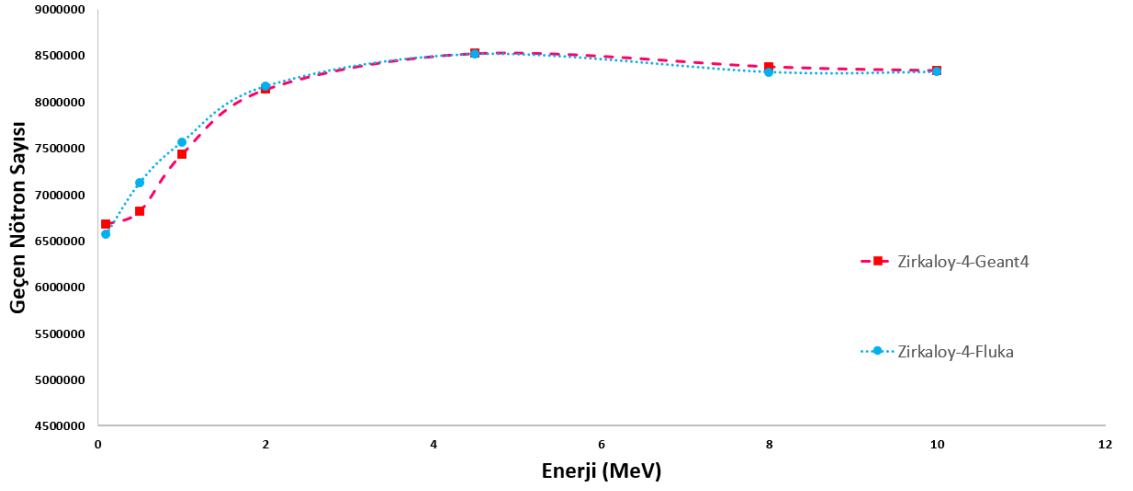
Şekil 4.7 10 mm numune kalınlığındaki SS304'ten geçen nötron sayısı



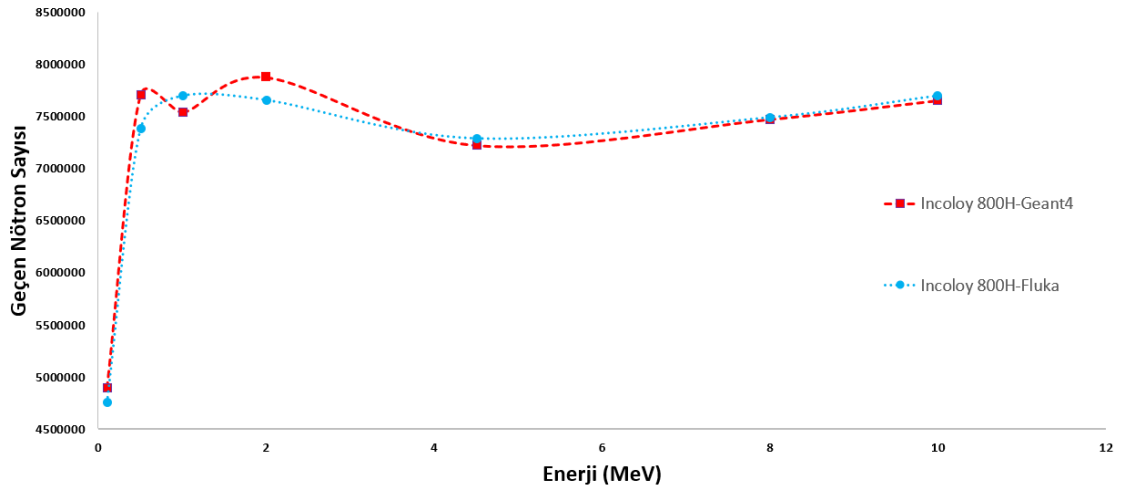
Şekil 4.8 10 mm numune kalınlığındaki 08X18N10T'ten geçen nötron sayısı



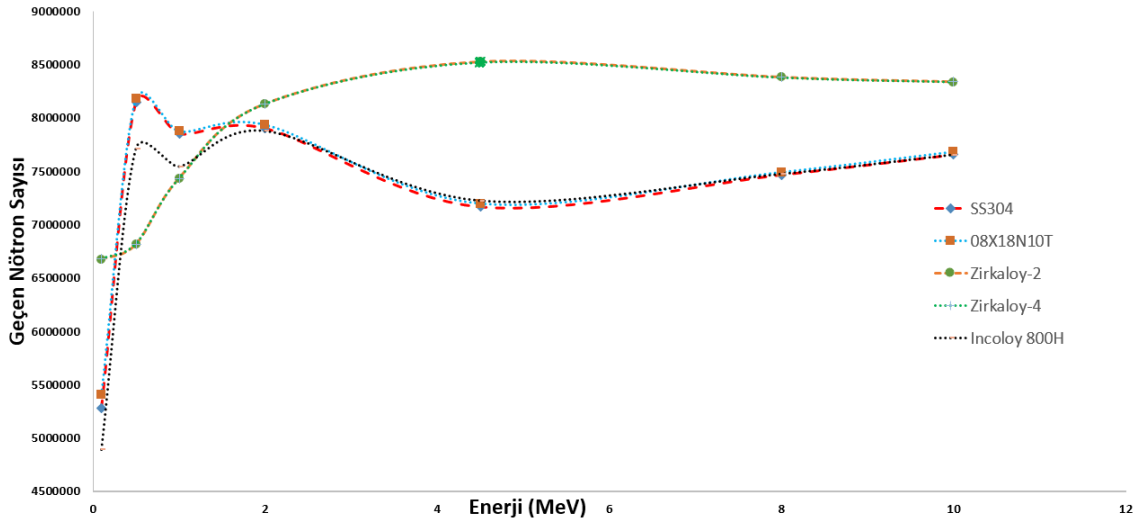
Şekil 4.9 10 mm numune kalınlığındaki Zirkaloy-2’den geçen nötron sayısı



Şekil 4.10 10 mm numune kalınlığındaki Zirkaloy-4’ten geçen nötron sayısı



Şekil 4.11 10 mm numune kalınlığındaki Incoloy 800H’den geçen nötron sayısı



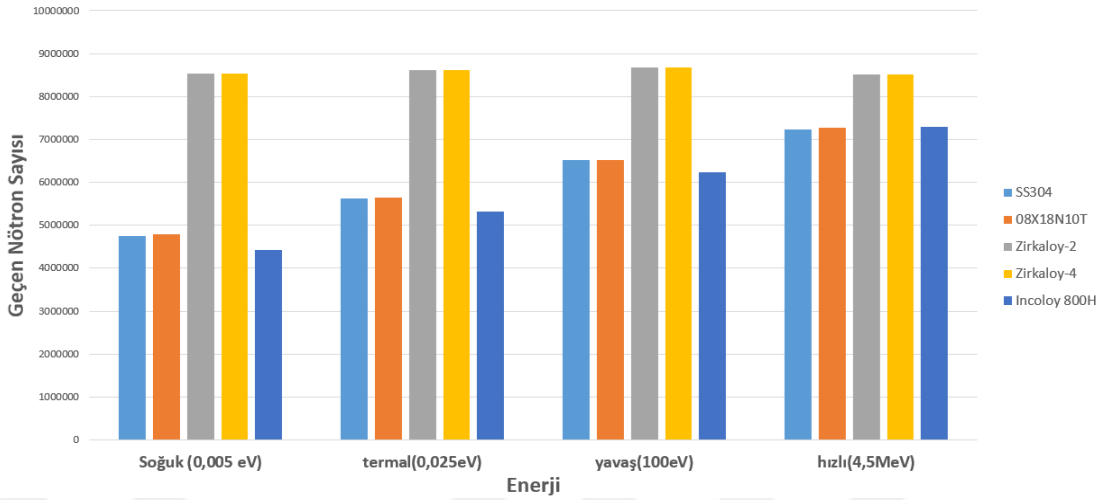
Şekil 4.12 Seçilen alaşımlar üzerinden geçen nötron sayısının nötron enerjisine göre değişimi (GEANT4)

Ayrıca, nötronlar enerjiler göre sınıflandırılabilirler: soğuk nötron (0,005 eV), termal nötron (0,025 eV), yavaş nötron (100 eV), ve hızlı nötron (4,5 MeV). Yukarıda sunulan veriler 4,5 MeV enerjiye sahip hızlı nötronlar içindir. Çalışmanın bütüncül bir tartışmaya olanak sunabilmesi için diğer enerjilerde de simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 4,5 MeV enerjili nötronların simülasyonuna benzer şekilde alaşımlar üzerine her bir nötron enerjisinde 10 milyon adet nötron gönderilmiştir. Tablo 4.15'te elde edilen simülasyon sonuçları sunulmaktadır. GEANT4 ve FLUKA arasındaki iyi uyuşmadan dolayı yalnızca FLUKA sonuçları tabloda gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre soğuk, termal ve yavaş nötron enerjilerinde en iyi zırhlama alaşımı Incoloy 800H olarak saptanırken hızlı nötron enerjide ise SS304 en iyi nötron zırhlama performansı göstermiştir.

Tablo 4.15 Farklı enerjilerdeki nötronların alaşımlardan geçen sayısı

Malzemeler	Soğuk Nötron (0,005 eV)	Termal Nötron (0,025 eV)	Yavaş Nötron (100 eV)	Hızlı Nötron (4,5 MeV)
SS304	4745888	5623847	6512371	7238264
08X18N10T	4783738	5643133	6513564	7268092
Zirkaloy-2	8540224	8613527	8683387	8511720
Zirkaloy-4	8543964	8615763	8685809	8512328
Incoloy 800H	4419889	5320275	6228659	7285512

Şekil 4.13 farklı enejilere sahip her bir nötron kategorisi için geçen nötron sayılarını görselleştirmektedir.



Şekil 4.13 Nötron enerji sınıflarına göre 10 mm kalınlığındaki seçilen alaşım malzemelerinden geçen nötron sayısı

4.2. Gama Radyasyonu Zırhlama Bulguları

Seçilen SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4 ve Incoloy 800H alaşımlarının gama radyasyon zırhlama performansları ilk olarak simülasyon (GEANT4 ve FLUKA) ve teorik (XCOM ve EpiXS) yöntemler aracılığıyla değerlendirilmiştir. XCOM, GEANT4, FLUKA ve EpiXS programları arasında çok iyi bir uyuşmanın olduğunu elde sonuçlar arasındadır. Maksimum uyuşmazlık yaklaşık %7 olarak belirlenmiştir. GEANT4 simülasyon sonuçlarının seçilen diğer 3 programa göre ayrıştığı görülmektedir. FLUKA, XCOM ve EpiXS arasındaki maksimum uyuşmazlık yaklaşık %2 seviyesindedir. FLUKA için çok düşük enerjilerde sonuçlar elde edilememiştir. Buradaki ana sebep FLUKA'nın parçacık transportuna dayalı hesap yapması ve düşük enerjilerde seçilen malzemeler üzerinden geçen hiçbir gama parçacığı olmamasıdır. SS304 ve Incoloy 800H alaşımının deneysel olarak değerlendirilmesi ayrı bir alt başlık daha sonra sunulacaktır. Aşağıda ilk olarak bütün alaşımlar için MC simülasyonları ve teorik hesapla kodlarıyla elde edilen gama radyasyonu zırhlama parametreleri sunulacaktır.

4.2.1. Kütle azaltma katsayısı sonuçları

Seçilen alaşımların kütle azaltma katsayıları (KSK) simülasyon olarak GEANT4 ve FLUKA, teorik olarak da XCOM ve EpiXS programları ile belirlenmiştir. Her bir

alaşıma ait kütle azaltma katsayısı sonuçları Tablo 4.16-4.20 tarafından sunulmaktadır. Kütle azaltma katsayısının yüksek olması, bir malzemenin birim kütlesinin belirli bir dalga boyundaki radyasyonu ne kadar iyi azalttığını ifade etmektedir. Enerjinin artmasıyla kütle azaltma katsayısı değerinin de exponansiyel bir şekilde azaldığı da görülmüştür. Incoloy 800H'ın 0,015, 0,6, 0,8, 1, 2, 3 MeV'de, Zirkaloy-2'nin 0,5, 4 MeV'de, Zirkaloy-4'ün 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,08, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 5, 6, 8, 10 MeV'de en iyi kütle azaltma katsayısına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.16 SS304 için kütle azaltma katsayısı (cm²/g)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	55,6400	54,9440		55,6833
0,02	25,0300	24,2810		25,0671
0,03	7,9660	7,7656		7,9835
0,04	3,5370	3,4115	3,4549	3,5500
0,05	1,9100	1,8664	1,9078	1,9161
0,06	1,1770	1,1769	1,1774	1,1814
0,08	0,5834	0,5667	0,5842	0,5856
0,1	0,3657	0,3563	0,3659	0,3669
0,2	0,1453	0,1440	0,1453	0,1455
0,3	0,1097	0,1065	0,1096	0,1097
0,4	0,0940	0,0917	0,0939	0,0939
0,5	0,0842	0,0829	0,0841	0,0841
0,6	0,0771	0,0764	0,0770	0,0770
0,8	0,0670	0,0669	0,0670	0,0670
1	0,0600	0,0601	0,0599	0,0599
2	0,0427	0,0427	0,0426	0,0426
3	0,0362	0,0362	0,0361	0,0361
4	0,0331	0,0332	0,0330	0,0330
5	0,0314	0,0312	0,0313	0,0313
6	0,0305	0,0303	0,0304	0,0304
8	0,0298	0,0296	0,0297	0,0297
10	0,0297	0,0295	0,0297	0,0297

Tablo 4.17 08X18N10T için kütle azaltma katsayısı (cm²/g)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	55,9400	55,2050		55,9851
0,02	25,1700	24,4420		25,2085
0,03	8,0130	7,8102		8,0302
0,04	3,5580	3,4297	3,5024	3,5709
0,05	1,9210	1,8762	1,9194	1,9271
0,06	1,1830	1,1539	1,1845	1,1879
0,08	0,5862	0,5685	0,5871	0,5884
0,1	0,3672	0,3584	0,3675	0,3684
0,2	0,1456	0,1427	0,1457	0,1457
0,3	0,1098	0,1067	0,1097	0,1098
0,4	0,0940	0,0915	0,0939	0,0940
0,5	0,0842	0,0829	0,0842	0,0842
0,6	0,0771	0,0764	0,0780	0,0771
0,8	0,0671	0,0669	0,0670	0,0670
1	0,0600	0,0600	0,0600	0,0599
2	0,0427	0,0427	0,0426	0,0426
3	0,0362	0,0361	0,0361	0,0362
4	0,0331	0,0331	0,0330	0,0330
5	0,0314	0,0314	0,0313	0,0314
6	0,0305	0,0305	0,0304	0,0304
8	0,0298	0,0296	0,0297	0,0298
10	0, 0298	0,0297	0,0298	0,0298

Tablo 4.18 Zirkaloy-2 için kütle azaltma katsayısı (cm²/g)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	25,1000	24,6300		24,8833
0,02	71,2300	71,3240		71,3297
0,03	25,0300	24,5830		25,0680
0,04	11,4800	11,2760	11,5011	11,5093
0,05	6,2250	6,0899	6,2461	6,2466
0,06	3,7760	3,6838	3,7971	3,7893
0,08	1,7370	1,7043	1,7361	1,7436
0,1	0,9742	0,9676	0,9741	0,9779

Tablo 4.18'in devamı

0,2	0,2250	0,2243	0,2246	0,2255
0,3	0,1322	0,1304	0,1319	0,1323
0,4	0,1020	0,0988	0,1019	0,1020
0,5	0,0870	0,0840	0,0869	0,0870
0,6	0,0776	0,0757	0,0775	0,0775
0,8	0,0657	0,0650	0,0656	0,0656
1	0,0581	0,0578	0,0580	0,0580
2	0,0415	0,0414	0,0413	0,0414
3	0,0365	0,0365	0,0363	0,0364
4	0,0345	0,0343	0,0344	0,0345
5	0,0339	0,0337	0,0337	0,0338
6	0,0338	0,0336	0,0336	0,0337
8	0,0344	0,0344	0,0343	0,0344
10	0,0355	0,0351	0,0354	0,0355

Tablo 4.19 Zirkaloy-4 için kütle azaltma katsayısı (cm²/g)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	25,0700	24,5760		24,8550
0,02	71,2500	71,253		71,3536
0,03	25,0400	24,5910		25,0766
0,04	11,4800	11,2830	11,5091	11,5134
0,05	6,2270	6,1478	6,2462	6,2488
0,06	3,7780	3,6686	3,7971	3,7907
0,08	1,7370	1,6867	1,7373	1,7442
0,1	0,9745	0,9676	0,9743	0,9782
0,2	0,2250	0,2185	0,2247	0,2255
0,3	0,1322	0,1304	0,1320	0,1323
0,4	0,1020	0,0982	0,1021	0,1020
0,5	0,0870	0,0840	0,0869	0,0870
0,6	0,0776	0,0758	0,0775	0,0775
0,8	0,0657	0,0650	0,0656	0,0656
1	0,0581	0,0577	0,0580	0,0580
2	0,0415	0,0416	0,0414	0,0414
3	0,0365	0,0361	0,0364	0,0364

Tablo 4.19'un devamı

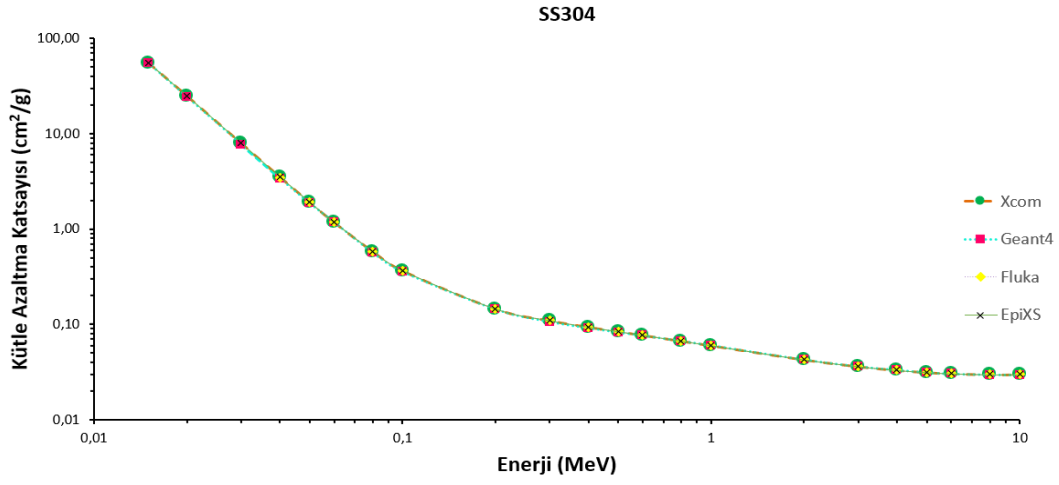
4	0,0345	0,0342	0,0344	0,0345
5	0,0339	0,0339	0,0338	0,0338
6	0,0338	0,0335	0,0337	0,0337
8	0,0344	0,0344	0,0343	0,0344
10	0,0355	0,0351	0,0355	0,0355

Tablo 4.20 Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı (cm²/g)

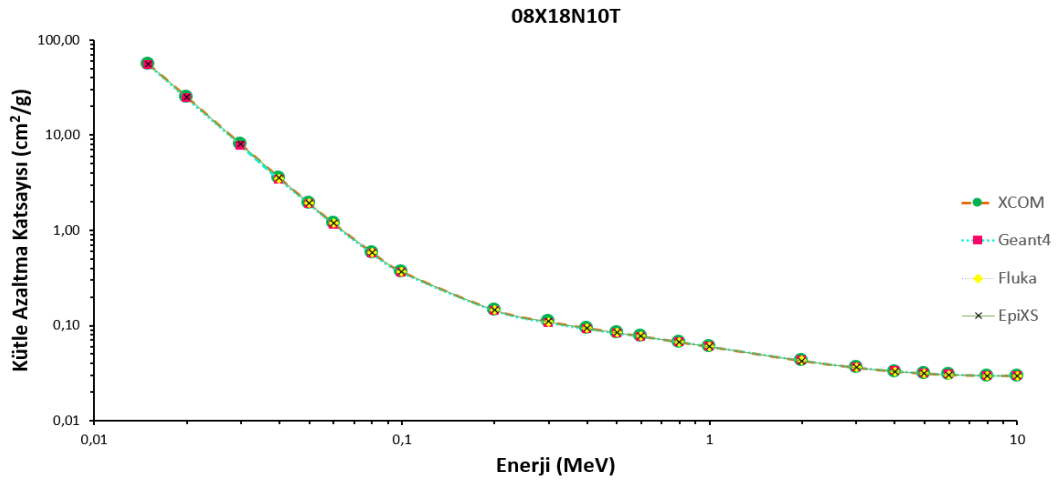
Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	58,2000	57,1910		58,2590
0,02	26,2600	25,5120		26,2962
0,03	8,3780	8,1655		8,3971
0,04	3,7230	3,6378	3,7100	3,7356
0,05	2,0090	1,9600	2,0103	2,0153
0,06	1,2360	1,2031	1,2374	1,2408
0,08	0,6096	0,5958	0,6101	0,6118
0,1	0,3798	0,3710	0,3799	0,3810
0,2	0,1478	0,1444	0,1478	0,1480
0,3	0,1109	0,1087	0,1108	0,1109
0,4	0,0948	0,0923	0,0948	0,0948
0,5	0,0848	0,0835	0,0848	0,0848
0,6	0,0776	0,0770	0,0776	0,0776
0,8	0,0675	0,0674	0,0675	0,0674
1	0,0604	0,0603	0,0604	0,0603
2	0,0430	0,0426	0,0430	0,0429
3	0,0365	0,0362	0,0365	0,0364
4	0,0334	0,0333	0,0334	0,0333
5	0,0317	0,0315	0,0317	0,0316
6	0,0308	0,0305	0,0308	0,0307
8	0,0301	0,0300	0,0301	0,0301
10	0,0301	0,0299	0,0301	0,0301

Şekil 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18 sırasıyla SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısının gama radyasyonu enerjisine göre değişimini sunmaktadır. Elde edilen grafiklerde de XCOM, EpiXS, GEANT4 ve FLUKA sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Şekil 4.19 de ise yalnızca

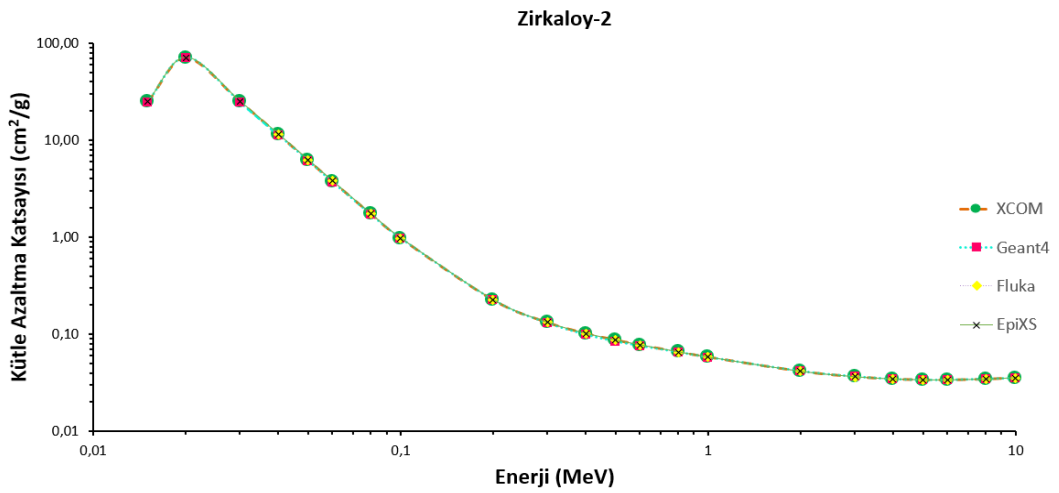
GEANT4 simülasyon sonuçlarına dayanarak alaşımların birbirleriyle kıyaslaması yapılmıştır.



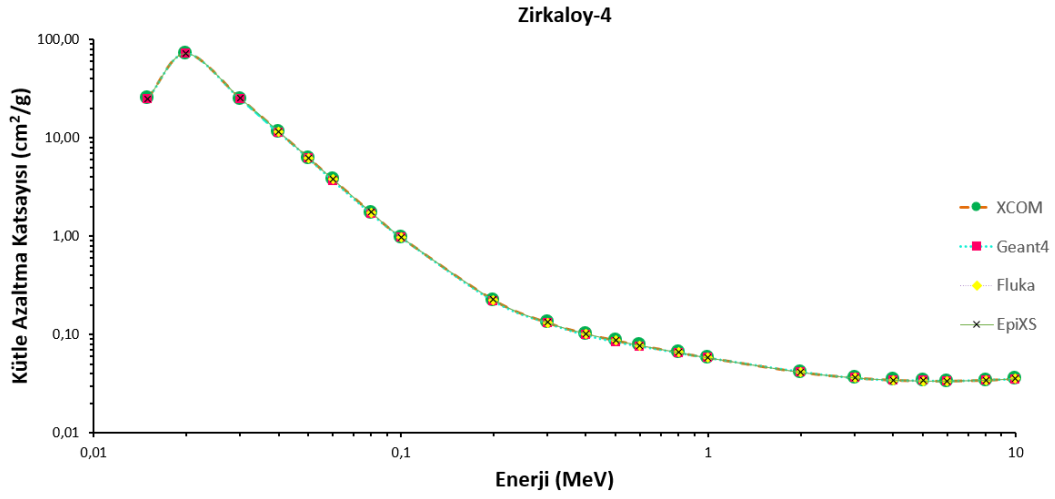
Şekil 4.14 SS304 için kütle azaltma katsayısı grafiği



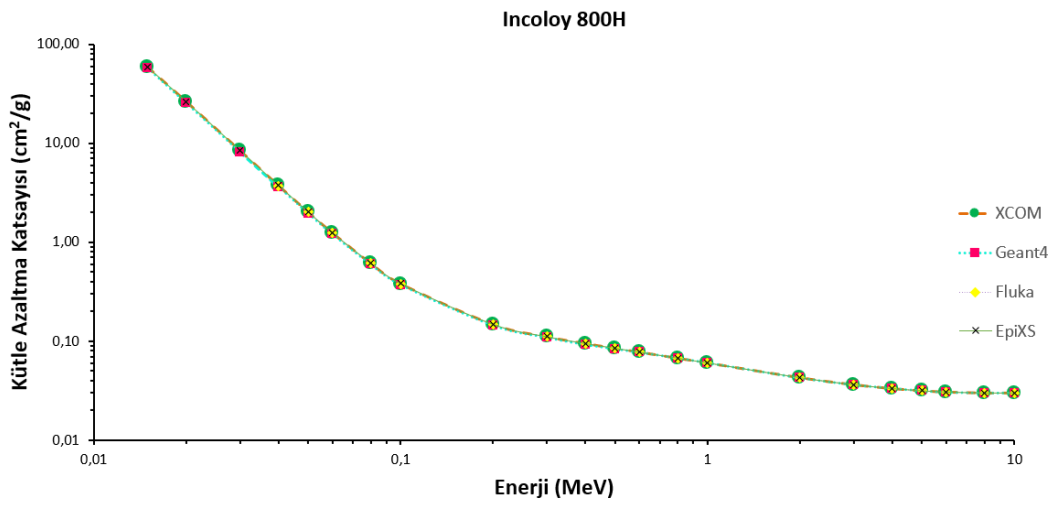
Şekil 4.15 08X18N10T için kütle azaltma katsayısı grafiği



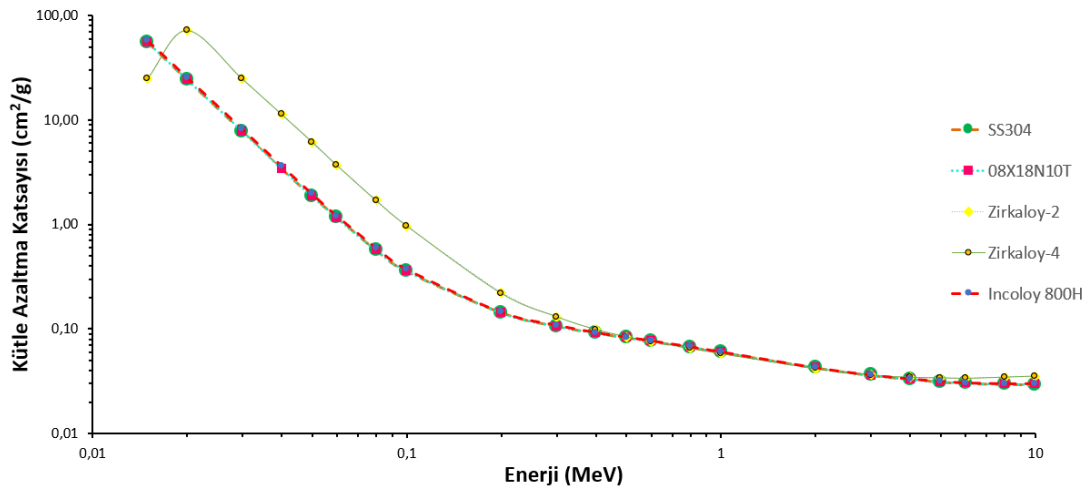
Şekil 4.16 Zirkaloy-2 için kütle azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.17 Zirkaloy-4 için kütle azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.18 Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.19 Her bir alaşıma ait kütle azaltma katsayısı grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4)

4.2.2. Lineer azaltma katsayısı sonuçları

Bu çalışma kapsamında seçilen alaşımların lineer azaltma katsayısı değerleri simülasyon olarak GEANT4 ve FLUKA, teorik olarak da XCOM ve EpiXS programları ile belirlenmiştir. Lineer azaltma katsayısı sonuçları (LAK) Tablo 4.21’den 4.25’e kadar gösterilmektedir. Artan enerji ile eksponansiyel bir şekilde azalmaktadır. Incoloy 800H’nın 0,015, 0,3, 0,4, 0,5, 3, 4, 5, 6, 8, 10 MeV’de, Zirkaloy-4’ün 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,08, 0,1, 0,2 MeV’de, SS304’ün 0,6, 0,8, 1, 2 MeV’de en iyi lineer azaltma katsayısına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.21 SS304 için lineer azaltma katsayısı (cm⁻¹)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	445,1200	439,5520		445,4664
0,02	200,2400	194,2480		200,5368
0,03	63,7280	62,1248		63,8679
0,04	28,2960	27,2920	27,6389	28,4003
0,05	15,2800	14,9312	15,2623	15,3286
0,06	9,4160	9,4152	9,4192	9,4512
0,08	4,6672	4,5334	4,6736	4,6844
0,1	2,9256	2,8504	2,9272	2,9348
0,2	1,1624	1,1519	1,1625	1,1637
0,3	0,8776	0,8522	0,8769	0,8777
0,4	0,7517	0,7339	0,7510	0,7514
0,5	0,6732	0,6629	0,6728	0,6730
0,6	0,6165	0,6114	0,6160	0,6163
0,8	0,5363	0,5353	0,5363	0,5357
1	0,4800	0,4808	0,4794	0,4793
2	0,3413	0,3413	0,3411	0,3407
3	0,2896	0,2895	0,2891	0,2891
4	0,2645	0,2659	0,2642	0,2640
5	0,2511	0,2499	0,2507	0,2506
6	0,2438	0,2426	0,2434	0,2433
8	0,2382	0,2371	0,2379	0,2378
10	0,2382	0,2361	0,2379	0,2378

Tablo 4.22 08X18N10T için lineer azaltma katsayısı (cm⁻¹)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	441,9260	436,1195		442,2823
0,02	198,8430	193,0918		199,1472
0,03	63,3027	61,7005		63,4381
0,04	28,1082	27,0946	27,6689	28,2097
0,05	15,1759	14,8219	15,1633	15,2238
0,06	9,3457	9,1158	9,3572	9,3844
0,08	4,6309	4,4911	4,6383	4,6483
0,1	2,9008	2,8315	2,9033	2,9099
0,2	1,1502	1,1269	1,1507	1,1510
0,3	0,8674	0,8430	0,8666	0,8675
0,4	0,7428	0,7225	0,7421	0,7425
0,5	0,6651	0,6547	0,6650	0,6648
0,6	0,6090	0,6031	0,6160	0,6089
0,8	0,5297	0,5283	0,5290	0,5292
1	0,4740	0,4743	0,4736	0,4735
2	0,3372	0,3373	0,3368	0,3366
3	0,2861	0,2849	0,2854	0,2856
4	0,2614	0,2618	0,2609	0,2608
5	0,2482	0,2479	0,2475	0,2476
6	0,2409	0,2412	0,2405	0,2405
8	0,2354	0,2341	0,2349	0,2351
10	0,2355	0,2346	0,2350	0,2351

Tablo 4.23 Zirkaloy-2 için lineer azaltma katsayısı (cm⁻¹)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	164,6560	161,5728		163,2344
0,02	467,2688	467,8854		467,9228
0,03	164,1968	161,2645		164,4461
0,04	75,3088	73,9705	75,4474	75,5010
0,05	40,8360	39,9497	40,9747	40,9777
0,06	24,7705	24,1657	24,9090	24,8580
0,08	11,3947	11,1802	11,3885	11,4378
0,1	6,3907	6,3471	6,3901	6,4147

Tablo 4.23'ün devamı

0,2	1,4760	1,4715	1,4734	1,4792
0,3	0,8672	0,8552	0,8655	0,8677
0,4	0,6691	0,6479	0,6687	0,6690
0,5	0,5709	0,5509	0,5701	0,5705
0,6	0,5091	0,4967	0,5083	0,5087
0,8	0,4312	0,4264	0,4301	0,4305
1	0,3812	0,3788	0,3803	0,3805
2	0,2720	0,2719	0,2711	0,2714
3	0,2391	0,2393	0,2382	0,2386
4	0,2264	0,2251	0,2257	0,2260
5	0,2220	0,2209	0,2211	0,2216
6	0,2214	0,2205	0,2205	0,2210
8	0,2258	0,2259	0,2249	0,2255
10	0,2332	0,2303	0,2323	0,2329

Tablo 4.24 Zirkaloy-4 için lineer azaltma katsayısı (cm⁻¹)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	164,4592	161,2186		163,0488
0,02	467,4000	467,4197		468,0796
0,03	164,2624	161,3170		164,5025
0,04	75,3088	74,0164	75,4999	75,5279
0,05	40,8491	40,3295	40,9748	40,9921
0,06	24,7836	24,0660	24,9090	24,8667
0,08	11,3947	11,0647	11,3964	11,4416
0,1	6,3927	6,3473	6,3916	6,4167
0,2	1,4760	1,4331	1,4741	1,4794
0,3	0,8672	0,8554	0,8656	0,8677
0,4	0,6691	0,6441	0,6694	0,6691
0,5	0,5709	0,5509	0,5699	0,5705
0,6	0,5091	0,4970	0,5082	0,5086
0,8	0,4312	0,4263	0,4302	0,4305
1	0,3812	0,3786	0,3805	0,3805
2	0,2720	0,2731	0,2714	0,2714
3	0,239112	0,2365	0,2385	0,2386

Tablo 4.24'ün devamı

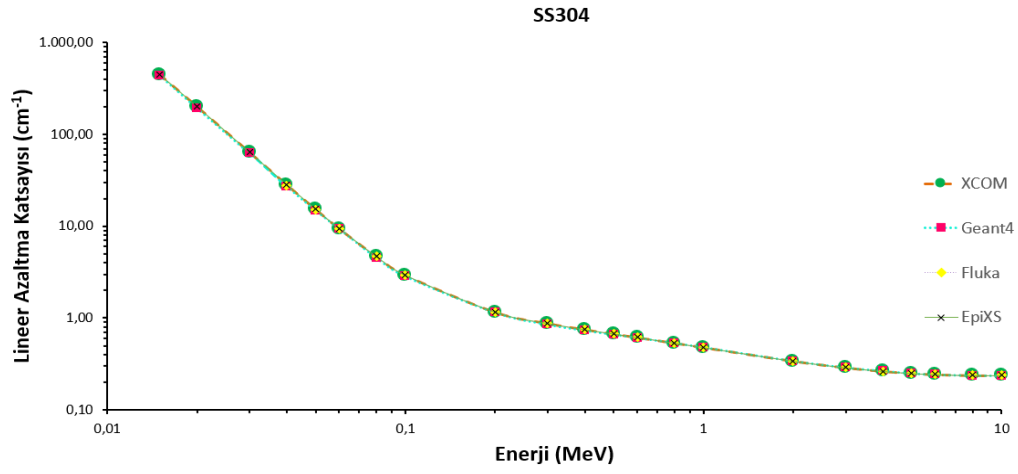
4	0,2264	0,2245	0,2258	0,2260
5	0,2220	0,2225	0,2214	0,2216
6	0,2214	0,2199	0,2208	0,2210
8	0,2258	0,2255	0,2252	0,2255
10	0,2332	0,2307	0,2326	0,2329

Tablo 4.25 Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı (cm⁻¹)

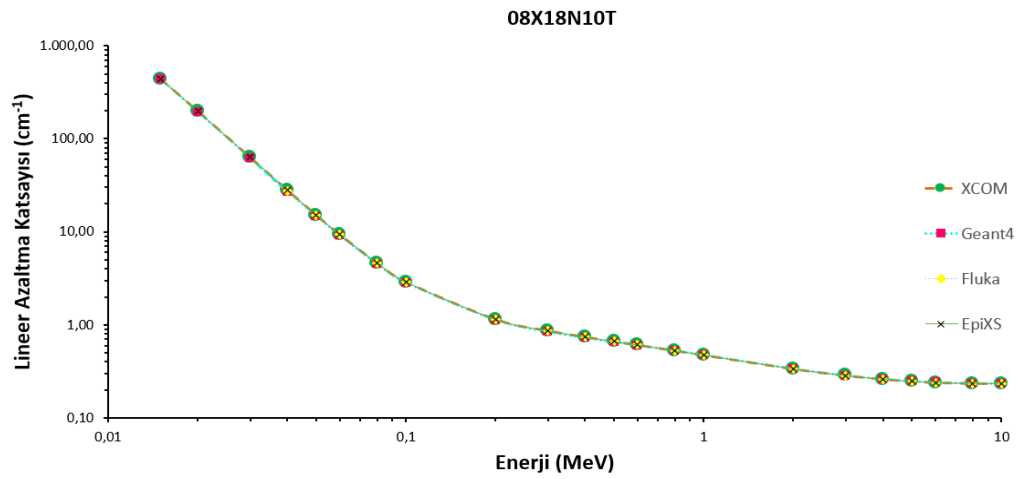
Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	462,1080	454,0965		462,5765
0,02	208,5044	202,5653		208,7918
0,03	66,5213	64,8340		66,6728
0,04	29,5606	28,8841	29,4571	29,6604
0,05	15,9514	15,5624	15,9619	16,0016
0,06	9,8138	9,5526	9,8247	9,8517
0,08	4,8402	4,7309	4,8442	4,8577
0,1	3,0156	2,9459	3,0163	3,0249
0,2	1,1735	1,1467	1,1736	1,1751
0,3	0,8805	0,8630	0,8800	0,8807
0,4	0,7527	0,7330	0,7527	0,7524
0,5	0,6734	0,6627	0,6735	0,6731
0,6	0,6164	0,6117	0,6158	0,6162
0,8	0,5359	0,5349	0,5356	0,5353
1	0,4795	0,4790	0,4792	0,4789
2	0,3411	0,3381	0,3410	0,3405
3	0,2896	0,2875	0,2896	0,2891
4	0,2648	0,2644	0,2648	0,2642
5	0,2516	0,2503	0,2515	0,2510
6	0,2444	0,2422	0,2444	0,2439
8	0,2391	0,2378	0,2391	0,2387
10	0,2393	0,2380	0,2393	0,2389

Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24 sırasıyla SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı sonuçlarının görsellerini sunmaktadır. Şekil 4.25 ise her bir alaşımın lineer azaltma katsayısı cinsinde kıyaslamasını

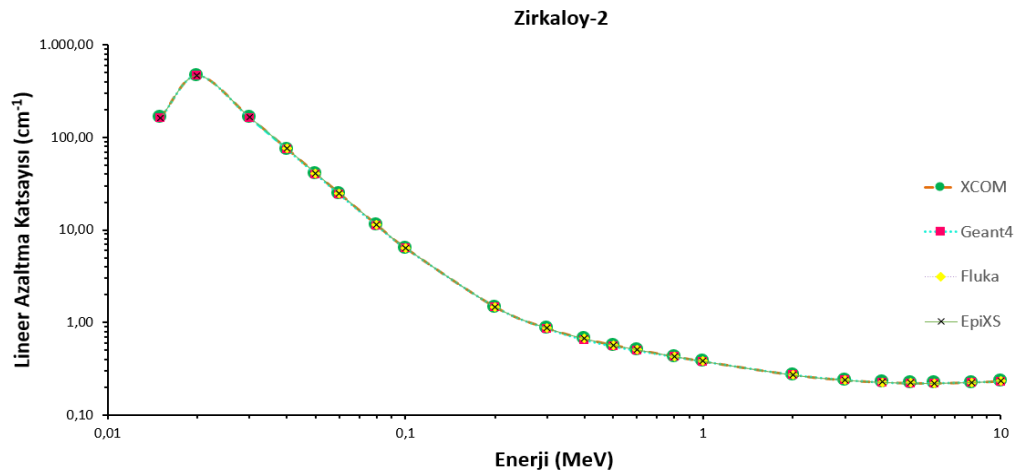
görselleştirmiştir. Bu grafikte kullanılan sonuçlar GEANT4 simülasyon programına aittir.



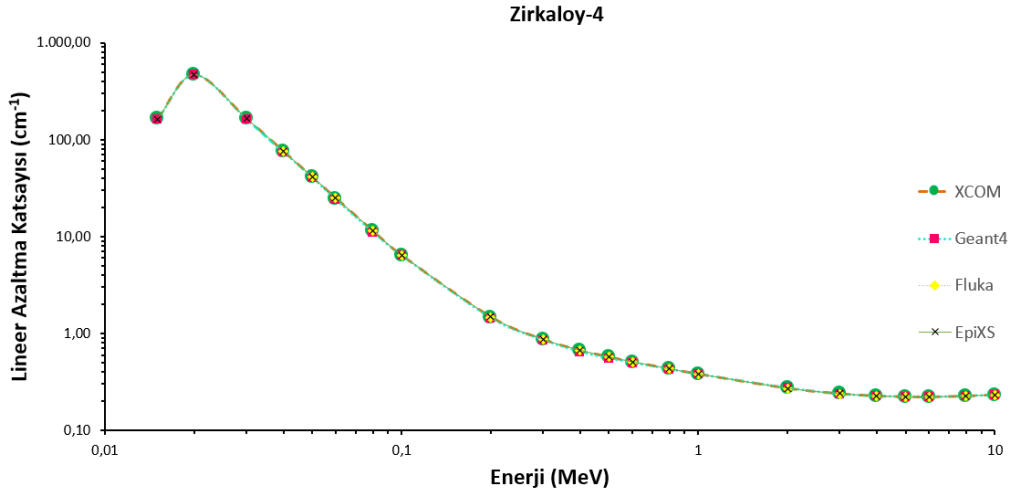
Şekil 4.20 SS304 için lineer azaltma katsayısı grafiği



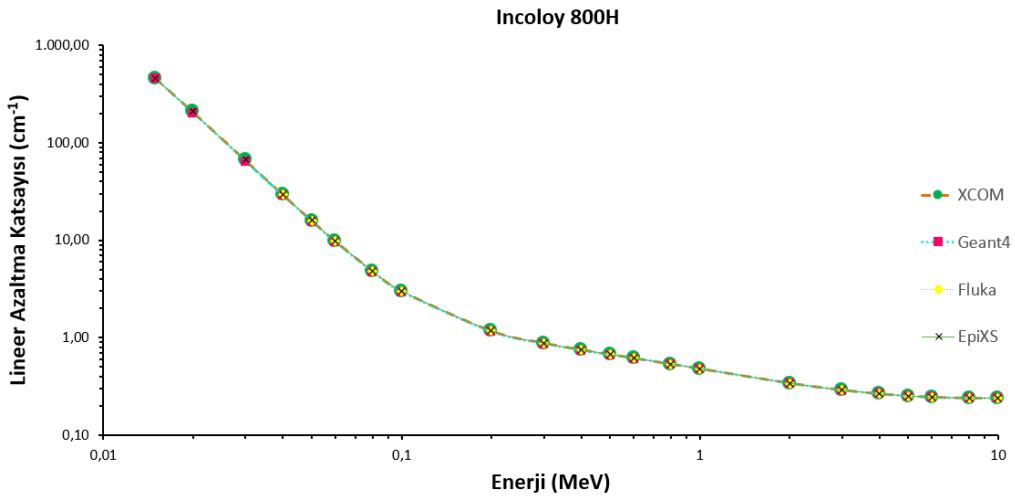
Şekil 4.21 08X18N10T için lineer azaltma katsayısı grafiği



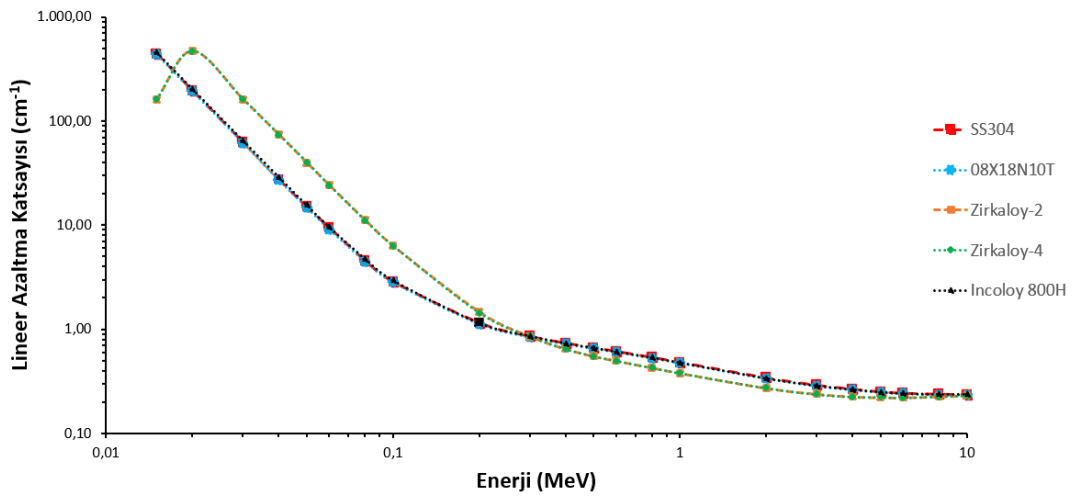
Şekil 4.22 Zirkaloy-2 için lineer azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.23 Zirkaloy-4 için lineer azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.24 Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı grafiği



Şekil 4.25 Her bir alaşıma ait lineer azaltma katsayısı grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4)

4.2.3. Yarı değer kalınlığı sonuçları

Bu çalışma kapsamında seçilen alaşımların yarı değer kalınlıklarının belirlenmesi simülasyon olarak GEANT4 ve FLUKA, teorik olarak da XCOM ve EpiXS programları kullanılarak yapılmıştır. Alaşımlarımıza ait yarı değer kalınlığı sonuçları Tablo 4.26'dan 4.30'a kadar gösterilmektedir. Artan gama radyasyonu enerjisi ile yarı değer kalınlık değeri de artmaktadır. Yarı değer kalınlığının yüksek olması gama radyasyonunu zırlama kabiliyetinin daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Incoloy 800H'nin 0,015, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 3, 4, 5, 6, 8, 10 MeV'de, Zirkaloy-4'ün 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,08, 0,1, 0,2 MeV'de, SS304'ün 0,8, 1, 2 MeV'de en iyi yarı değer kalınlığına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.26 SS304 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	0,0015	0,0015		0,0015
0,02	0,0034	0,0035		0,0034
0,03	0,0108	0,0111		0,0108
0,04	0,0244	0,0253	0,0250	0,0244
0,05	0,0453	0,0464	0,0454	0,04521
0,06	0,0736	0,0736	0,0735	0,0733
0,08	0,1485	0,1528	0,1483	0,1479
0,1	0,2369	0,2431	0,2367	0,2361
0,2	0,5963	0,6017	0,5962	0,5956
0,3	0,7898	0,8133	0,7903	0,7896
0,4	0,9220	0,9444	0,9228	0,9223
0,5	1,0295	1,0455	1,0302	1,0299
0,6	1,1242	1,1336	1,1251	1,1245
0,8	1,2924	1,2947	1,2924	1,2937
1	1,4440	1,4415	1,4458	1,4460
2	2,0305	2,0308	2,0316	2,0339
3	2,3934	2,3939	2,3970	2,3971
4	2,6200	2,6067	2,6227	2,6252
5	2,7602	2,7729	2,7641	2,7658
6	2,8426	2,8564	2,8475	2,8485
8	2,9094	2,9223	2,9125	2,9144
10	2,9094	2,9354	2,9127	2,9140

Tablo 4.27 08X18N10T için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	0,0015	0,0015		0,0015
0,02	0,0034	0,0035		0,0034
0,03	0,0109	0,0112		0,0109
0,04	0,0246	0,0255	0,0250	0,0245
0,05	0,0456	0,0467	0,0457	0,0455
0,06	0,0741	0,0760	0,0740	0,0738
0,08	0,1496	0,1543	0,1494	0,1491
0,1	0,2389	0,2447	0,2387	0,2381
0,2	0,6026	0,6150	0,6023	0,6022
0,3	0,7990	0,8222	0,7998	0,7990
0,4	0,9331	0,9593	0,9340	0,9335
0,5	1,0420	1,0587	1,0423	1,0424
0,6	1,1380	1,1491	1,1251	1,1383
0,8	1,3083	1,3118	1,3102	1,3096
1	1,4620	1,4612	1,4635	1,4638
2	2,0552	2,0545	2,0579	2,0589
3	2,4224	2,4326	2,4279	2,4263
4	2,6515	2,6473	2,6561	2,6567
5	2,7924	2,7956	2,8000	2,7986
6	2,8767	2,8730	2,8820	2,8819
8	2,9433	2,9598	2,9499	2,9480
10	2,9423	2,9538	2,9484	2,9472

Tablo 4.28 Zirkaloy-2 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	0,0042	0,0042		0,0042
0,02	0,0014	0,0014		0,0014
0,03	0,0042	0,0042		0,0042
0,04	0,0092	0,0093	0,0091	0,0091
0,05	0,0169	0,0173	0,0169	0,0169
0,06	0,0279	0,0286	0,0278	0,0278
0,08	0,0608	0,0619	0,0608	0,0606
0,1	0,1084	0,1092	0,1084	0,1080

Tablo 4.28'in devamı

0,2	0,4696	0,4710	0,4704	0,4685
0,3	0,7992	0,8104	0,8007	0,7988
0,4	1,0359	1,0697	1,0364	1,0359
0,5	1,2139	1,2581	1,2157	1,2149
0,6	1,3612	1,3954	1,3635	1,3625
0,8	1,6072	1,6253	1,6112	1,6099
1	1,8183	1,8294	1,8225	1,8212
2	2,5479	2,5492	2,5560	2,5530
3	2,8988	2,8961	2,9095	2,9041
4	3,0609	3,0785	3,0709	3,0664
5	3,1214	3,1371	3,1340	3,1275
6	3,1307	3,1428	3,1431	3,1356
8	3,0689	3,0673	3,0809	3,0733
10	2,9713	3,0094	2,9825	2,9757

Tablo 4.29 Zirkaloy-4 için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	0,0042	0,0042		0,0042
0,02	0,0014	0,0014		0,0014
0,03	0,0042	0,0042		0,0042
0,04	0,0092	0,0093	0,0091	0,0091
0,05	0,0169	0,0171	0,0169	0,0169
0,06	0,0279	0,0288	0,0278	0,0278
0,08	0,0608	0,0626	0,0608	0,0605
0,1	0,1084	0,1092	0,1084	0,1080
0,2	0,4696	0,4836	0,4701	0,4685
0,3	0,7992	0,8102	0,8007	0,7987
0,4	1,0359	1,0759	1,0353	1,0359
0,5	1,2139	1,2581	1,2160	1,2149
0,6	1,3612	1,3944	1,3637	1,3626
0,8	1,6072	1,6257	1,6111	1,6100
1	1,8183	1,8304	1,8212	1,8212
2	2,5479	2,5380	2,5539	2,5531
3	2,8988	2,9306	2,9062	2,9041

Tablo 4.29'un devamı

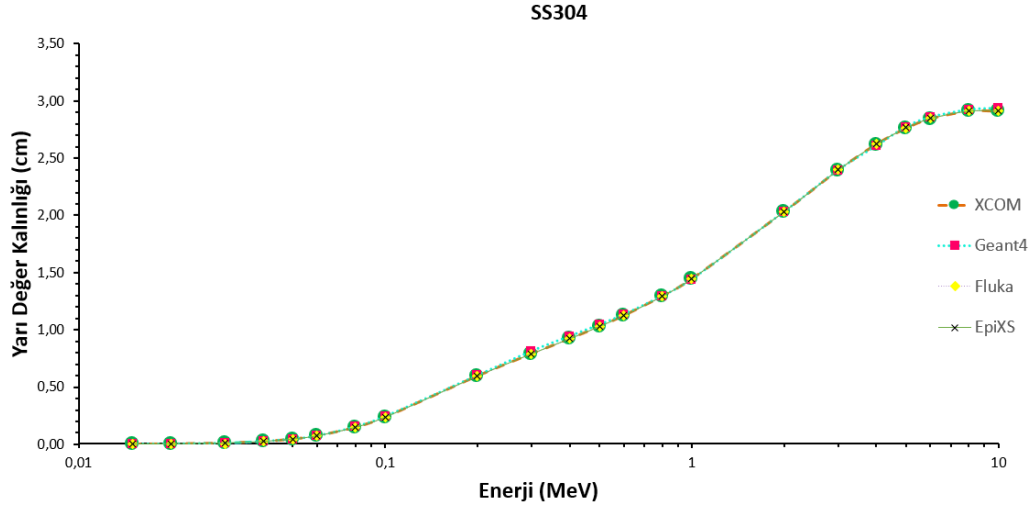
4	3,0609	3,0863	3,0690	3,0664
5	3,1214	3,1150	3,1300	3,1275
6	3,1307	3,1518	3,1391	3,1355
8	3,0689	3,0725	3,0773	3,0732
10	2,9713	3,0034	2,9795	2,9756

Tablo 4.30 Incoloy 800H için yarı değer kalınlık sonuçları (cm)

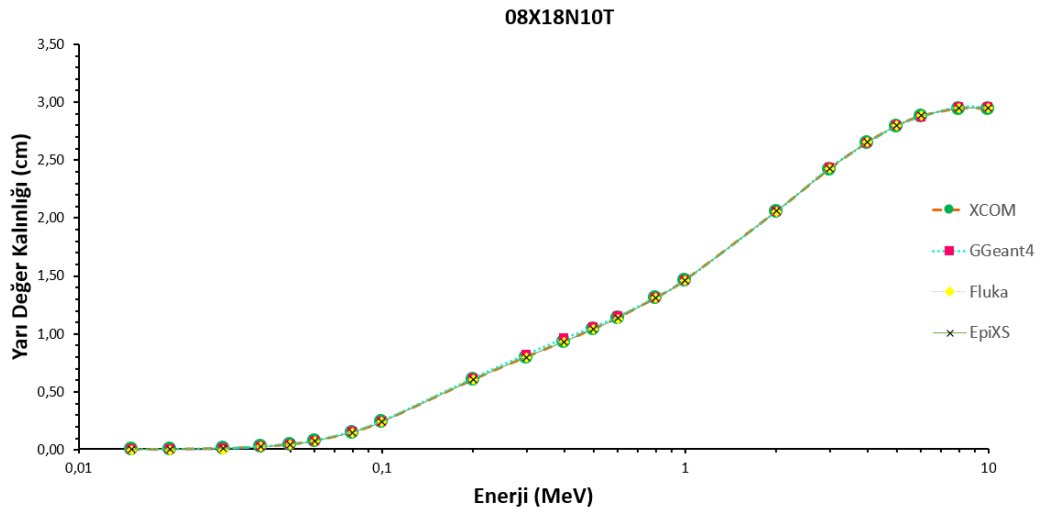
Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	0,0015	0,0015		0,0014
0,02	0,0033	0,0034		0,0033
0,03	0,0104	0,0106		0,0103
0,04	0,0234	0,0239	0,0235	0,0233
0,05	0,0434	0,0445	0,0434	0,0433
0,06	0,0706	0,0725	0,0705	0,0703
0,08	0,1432	0,1465	0,1430	0,1426
0,1	0,2298	0,2352	0,2297	0,2291
0,2	0,5906	0,6044	0,5905	0,5898
0,3	0,7871	0,8031	0,7876	0,7870
0,4	0,9208	0,9456	0,9208	0,9212
0,5	1,0292	1,0458	1,0291	1,0296
0,6	1,1243	1,1330	1,1255	1,1248
0,8	1,2933	1,2957	1,2940	1,2946
1	1,4453	1,4470	1,4461	1,4473
2	2,0320	2,0497	2,0322	2,0355
3	2,3930	2,4108	2,3933	2,3970
4	2,6168	2,6211	2,6171	2,6226
5	2,7547	2,7690	2,7551	2,7608
6	2,8352	2,8612	2,8356	2,8413
8	2,8983	2,9145	2,8987	2,90362
10	2,8954	2,9122	2,8958	2,9005

Şekil 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30 sırasıyla SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H için elde edilen yarı değer kalınlığı değerlerini görselleştirmektedir.

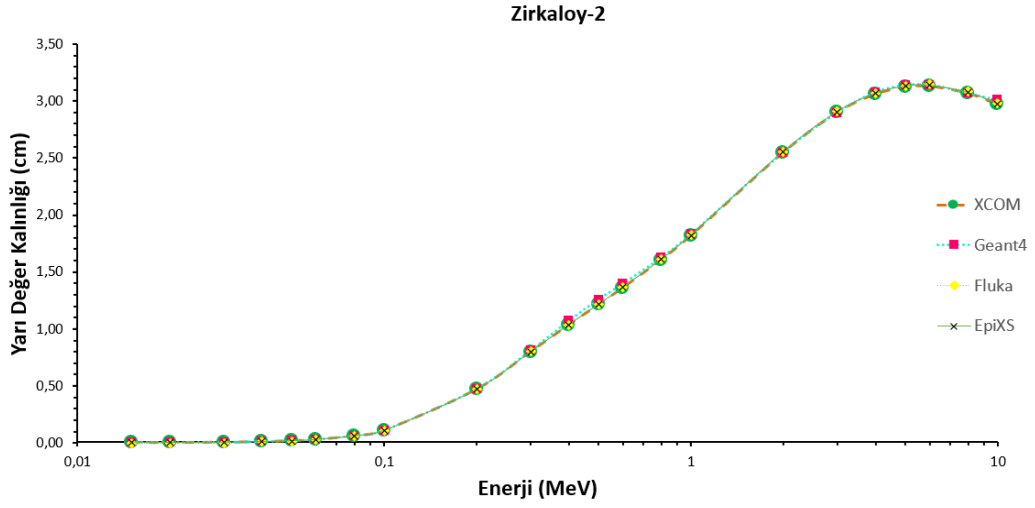
Şekil 4.31 ise çalışmada seçilen bütün alaşımların yarı değer kalınlık açısından birbirleriyle kıyaslamasını sunmaktadır. Bu grafik GEANT4 sonuçları kullanılarak çizilmiştir.



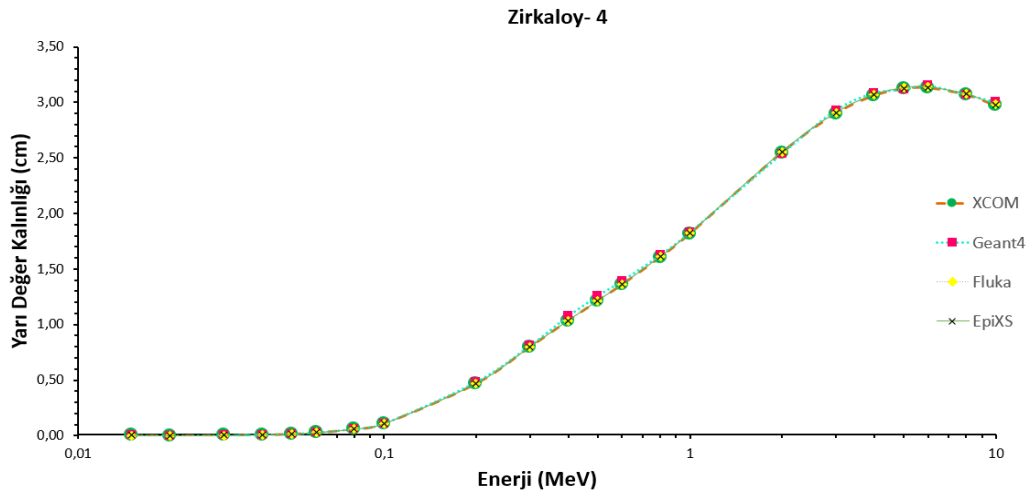
Şekil 4.26 SS300 için yarı değer kalınlık grafiği



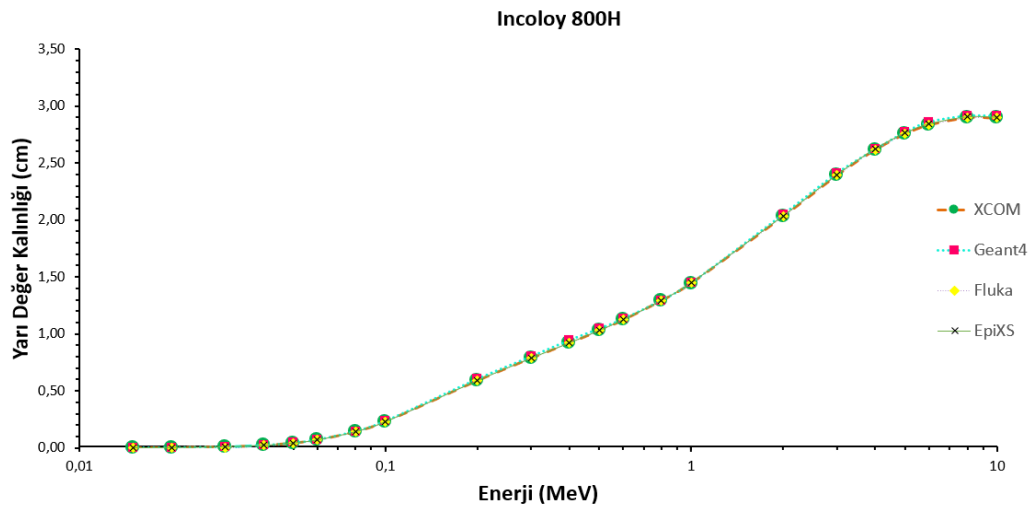
Şekil 4.27 08X18N10T için yarı değer kalınlık grafiği



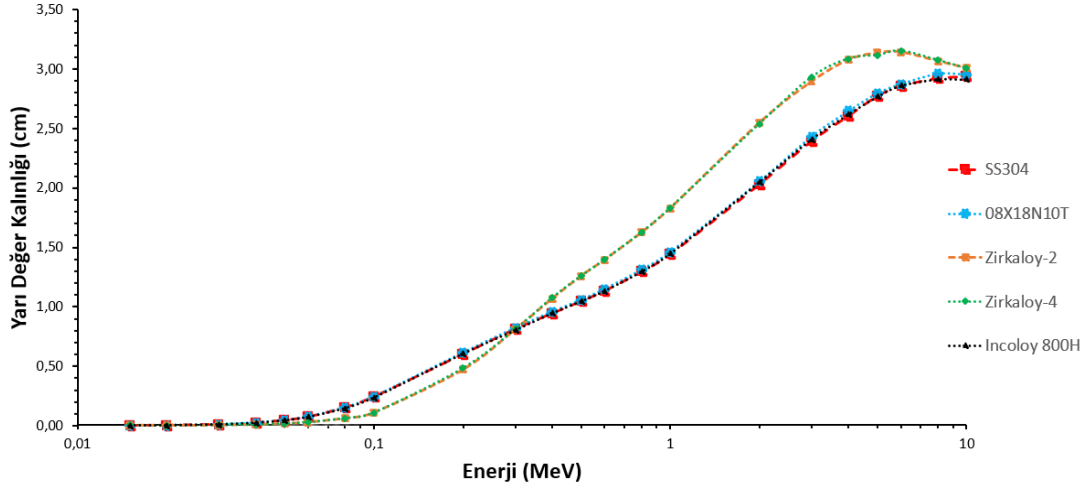
Şekil 4.28 Zirkaloy-2 için yarı değer kalınlık grafiği



Şekil 4.29 Zirkaloy-4 için yarı değer kalınlık grafiği



Şekil 4.30 Incoloy 800H için yarı değer kalınlık grafiği



Şekil 4.31 Her bir alaşıma ait yarı değer kalınlık grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4)

4.2.4. Radyasyon koruma verimliliği sonuçları

Yukarda bahsi geçen gama radyasyonu zırlama parametrelerine ek olarak radyasyon koruma verimliliği (RKV) parametresi de ele alınmıştır. Bu parametre sayesinde seçilen alaşımların yüzde cinsinden radyasyon zırlama kabiliyetleri değerlendirilebilecektir. Radyasyon koruma verimliliği yüksek olan malzemeler, radyasyonu etkili bir şekilde engelleyerek güvenlik sağlayabileceği ifade edilebilir. Tez kapsamında değerlendirilen alaşımlara ait radyasyon koruma verimliliği sonuçları Tablo 4.31'den 4.35'e kadar gösterilmektedir. 0,015, 0,02, 0,03, 0,04 MeV'de bütün alaşımlar %100, 0,05, 0,06 MeV'de ise Zirkaloy-2 ve Zirkaloy-4 %100 radyasyon koruma sağlamıştır. Incoloy 800H'nin 0,3, 0,4, 0,5, 3, 4, 5, 6, 8, 10 MeV'de, Zirkaloy-4'ün 0,08, 0,1, 0,2 MeV'de, SS304'ün 0,6, 0,8, 1, 2 MeV'de en iyi radyasyon koruma verimliliğine sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.31 SS304 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	100	100		100
0,02	100	100		100
0,03	100	100		100
0,04	100	100	100	100
0,05	99,9999	99,9999	99,9999	99,9999
0,06	99,9918	99,9918	99,9918	99,9921

Tablo 4.31'in devamı

0,08	99,0601	98,9256	99,0661	99,0762
0,1	94,6367	94,2183	94,6457	94,6860
0,2	68,7265	68,3970	68,7326	68,7690
0,3	58,4220	57,3541	58,3965	58,4290
0,4	52,8464	51,9980	52,8145	52,8338
0,5	48,9967	48,4659	48,9735	48,9828
0,6	46,0201	45,7431	45,9928	46,0098
0,8	41,5103	41,4546	41,5092	41,4785
1	38,1216	38,1741	38,0849	38,0813
2	28,9197	28,9162	28,9069	28,8794
3	25,1437	25,1395	25,1116	25,1100
4	23,2456	23,3487	23,2241	23,2051
5	22,2071	22,1174	22,1795	22,1673
6	21,6387	21,5464	21,6058	21,5993
8	21,1986	21,1160	21,1788	21,1661
10	21,1986	21,0320	21,1775	21,1687

Tablo 4.32 08X18N10T için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	100	100		100
0,02	100	100		100
0,03	100	100		100
0,04	100	100	100	100
0,05	99,9999	99,9999	99,9999	99,9999
0,06	99,9912	99,9890	99,9913	99,9916
0,08	99,0254	98,8792	99,0326	99,0422
0,1	94,5025	94,1081	94,5161	94,5522
0,2	68,3439	67,5975	68,3598	68,3681
0,3	57,9966	56,9586	57,9639	58,0002
0,4	52,4237	51,4468	52,3895	52,4085
0,5	48,5819	48,0408	48,5733	48,5674
0,6	45,6154	45,2939	45,9928	45,6053
0,8	41,1262	41,0438	41,0824	41,0956
1	37,7541	37,7704	37,7252	37,7182

Tablo 4.32'nin devamı

2	28,6270	28,6360	28,5958	28,5840
3	24,8841	24,7938	24,8356	24,8493
4	23,0035	23,0357	22,9685	22,9640
5	21,9810	21,9588	21,9285	21,9382
6	21,4119	21,4361	21,3769	21,3776
8	20,9823	20,8780	20,9405	20,9522
10	20,9886	20,9161	20,9498	20,9576

Tablo 4.33 Zirkaloy-2 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	100	100		100
0,02	100	100		100
0,03	100	100		100
0,04	100	100	100	100
0,05	100	100	100	100
0,06	100	100	100	100
0,08	99,9988	99,9986	99,9988	99,9989
0,1	99,8323	99,8248	99,8322	99,8362
0,2	77,1449	77,0428	77,0874	77,2181
0,3	57,9887	57,4841	57,9191	58,0085
0,4	48,7840	47,6873	48,7663	48,7824
0,5	43,5029	42,3578	43,4565	43,4761
0,6	39,9016	39,1474	39,8503	39,8723
0,8	35,0306	34,7187	34,9616	34,9833
1	31,6959	31,5371	31,6352	31,6546
2	23,8178	23,8073	23,7517	23,7762
3	21,2673	21,2848	21,1978	21,2329
4	20,2641	20,1605	20,2052	20,2316
5	19,9129	19,8241	19,8416	19,8784
6	19,8603	19,7920	19,7906	19,8327
8	20,2170	20,2265	20,1468	20,1908
10	20,8063	20,5721	20,7370	20,7790

Tablo 4.34 Zirkaloy-4 için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)

Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	100	100		100
0,02	100	100		100
0,03	100	100		100
0,04	100	100	100	100
0,05	100	100	100	100
0,06	100	100	100	100
0,08	99,9988	99,9984	99,9988	99,99893
0,1	99,8326	99,8248	99,8324	99,83661
0,2	77,1449	76,1446	77,1030	77,22402
0,3	57,9887	57,4925	57,9212	58,0113
0,4	48,7840	47,4916	48,8030	48,7830
0,5	43,5029	42,3574	43,4470	43,4760
0,6	39,9016	39,1686	39,8460	39,8717
0,8	35,0306	34,7123	34,9636	34,9824
1	31,6959	31,5237	31,6538	31,6536
2	23,8178	23,8987	23,7692	23,7755
3	21,2673	21,0625	21,2191	21,2326
4	20,2641	20,1149	20,2161	20,2316
5	19,9129	19,9497	19,8642	19,8787
6	19,8603	19,7414	19,8126	19,8332
8	20,2170	20,1956	20,1677	20,1916
10	20,8063	20,6091	20,7557	20,7801

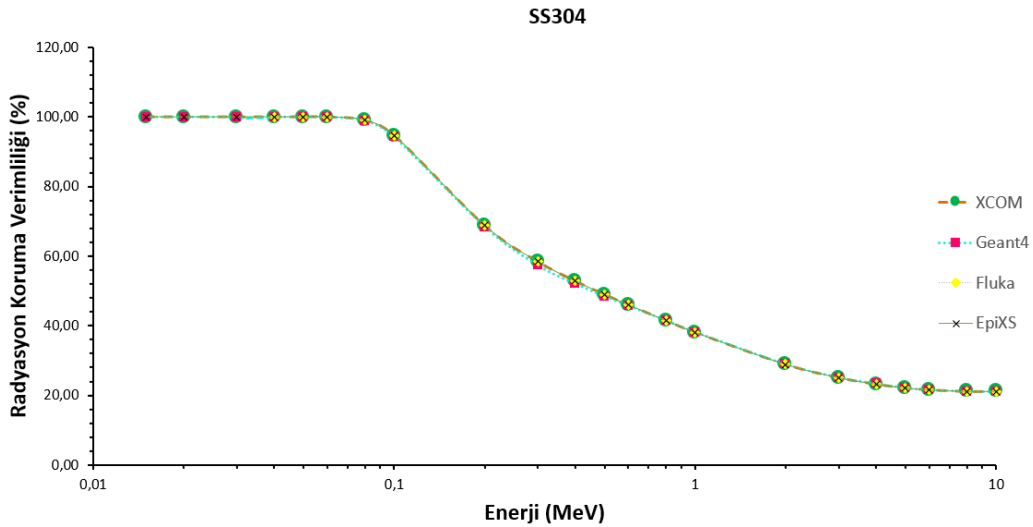
Tablo 4.35 Incoloy 800H için radyasyon koruma verimliliği sonuçları (%)

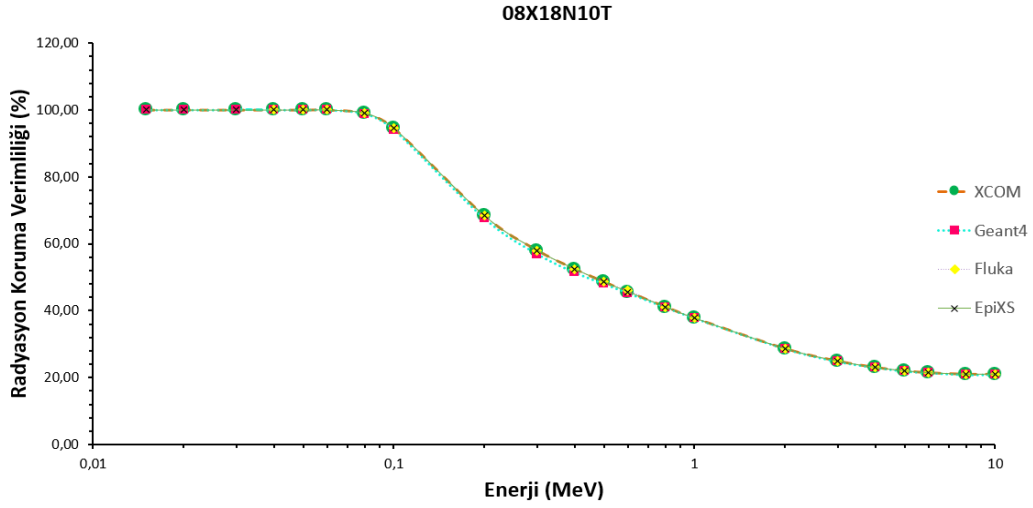
Enerji (MeV)	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
0,015	100	100		100
0,02	100	100		100
0,03	100	100		100
0,04	100	100	100	100
0,05	99,9999	99,9999	99,9999	99,9999
0,06	99,9945	99,9929	99,9945	99,9947
0,08	99,2094	99,1182	99,2126	99,2232
0,1	95,0984	94,7449	95,1020	95,1441

Tablo 4.35'in devamı

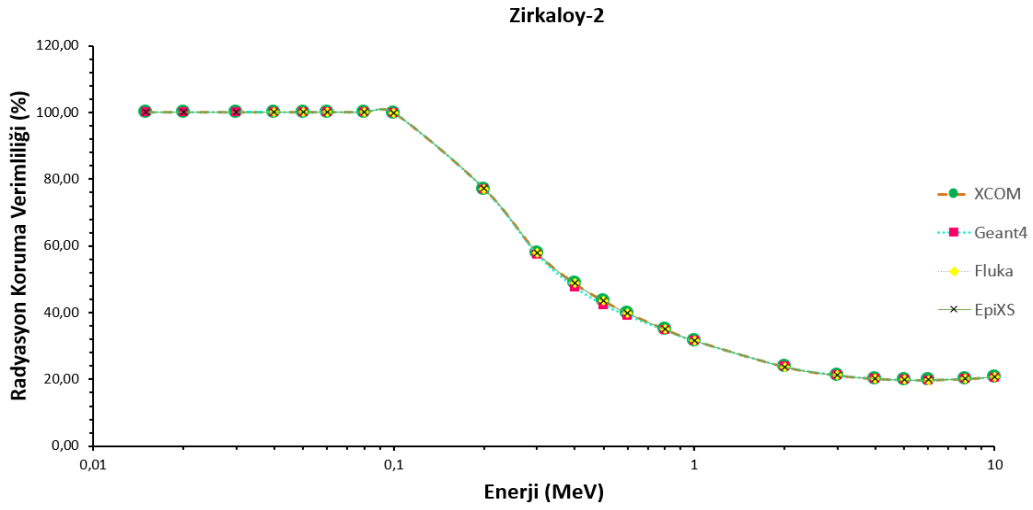
0,2	69,0727	68,2340	69,0773	69,1220
0,3	58,5443	57,8138	58,5240	58,5522
0,4	52,8912	51,9536	52,8915	52,8770
0,5	49,0064	48,4585	49,0092	48,9916
0,6	46,0148	45,7609	45,9804	46,0027
0,8	41,4886	41,4296	41,4718	41,4562
1	38,0954	38,0600	38,0780	38,0537
2	28,9013	28,6916	28,8998	28,8600
3	25,1475	24,9874	25,1451	25,1111
4	23,2700	23,2365	23,2677	23,2249
5	22,2458	22,1445	22,2432	22,2027
6	21,6882	21,5145	21,6856	21,6475
8	21,2705	21,1660	21,2676	21,2362
10	21,2892	21,1804	21,2866	21,2562

Şekil 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36 sırasıyla SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkolay-4 ve Incoloy 800H için elde edilen radyasyon koruma verimliliği sonuçlarını görsel olarak sunmuştur. Şekil 4.37 ise çalışma kapsamında ele alınan alaşımların radyasyon koruma verimliliği açısından birbirleriyle kıyaslanmasını göstermektedir.

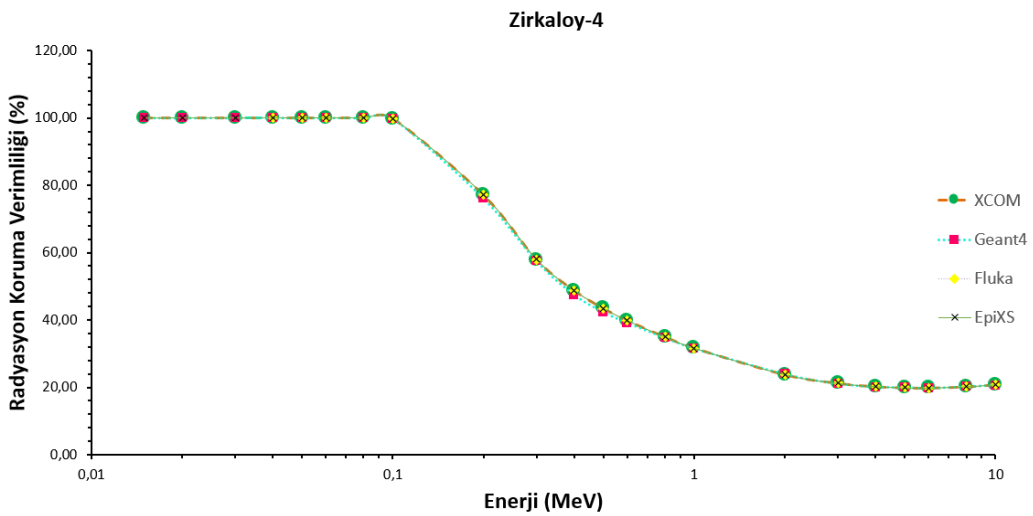
**Şekil 4.32 SS304 için radyasyon koruma verimliliği grafiği**



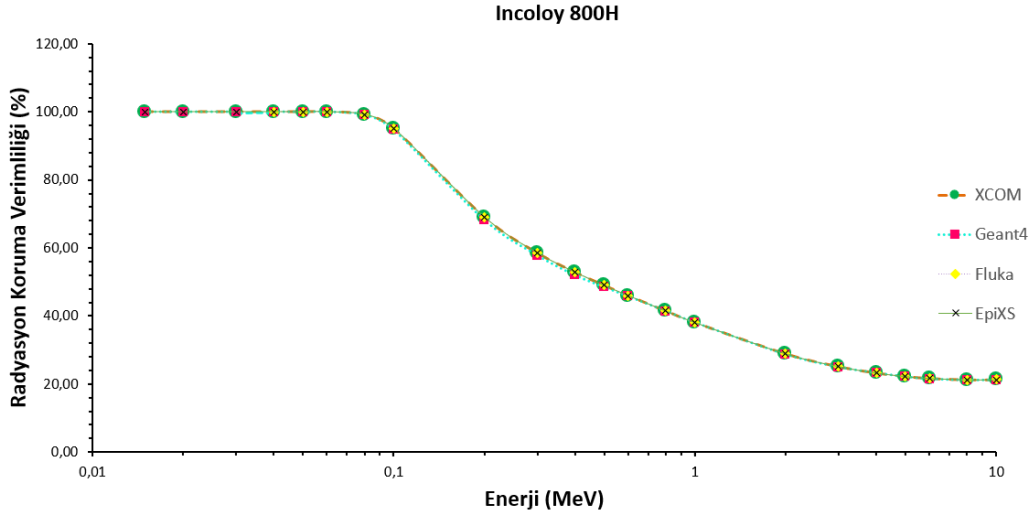
Şekil 4.33 08X18N10T için radyasyon koruma verimliliği grafiği



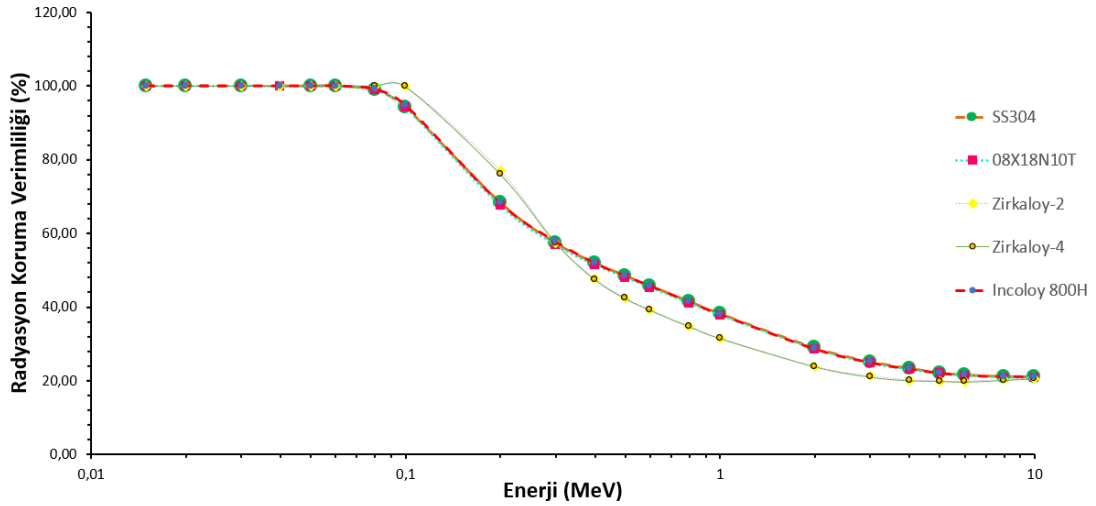
Şekil 4.34 Zirkaloy-2 için radyasyon koruma verimliliği grafiği



Şekil 4.35 Zirkaloy-4 için radyasyon koruma verimliliği grafiği



Şekil 4.36 Incoloy 800H için radyasyon koruma verimliliği grafiği



Şekil 4.37 Her bir alaşıma ait radyasyon koruma verimliliği grafiklerinin birbiriyle kıyaslanması (GEANT4)

4.2.5. Termal işlemler ve gama radyasyonu zırhlama performansı üzerine etkisi

Bu noktada, tez kapsamında yapılan analiz bir adım daha ileri götürülmüştür. Materyaller ve Metotlar bölümünde açıklandığı gibi, SS304 ve Incoloy 800H alaşımları 300°C, 500°C, 700°C ve 1000°C sıcaklıklarına kadar ısıtılmıştır. Soğutma tekniklerinin gama radyasyon zırhlama kabiliyeti üzerindeki etkisini araştırmak için iki farklı yaklaşım kullanılmıştır: ani soğutma ve kendiliğinden soğuma. Daha sonra her bir tekniğin alaşımların gama radyasyonu zırhlama performansı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen alaşımlara ait yoğunluk sonuçları Tablo 4.36’da verilmiştir.

Bu bölümde kullanılan gama ışını enerjileri, deneysel imkanlardan dolayı yalnızca 1173 keV ve 1332,5 keV olarak seçilmiştir. Herhangi bir ısıtma işlemi maruz kalmamış SS304 ve Incoloy 800H'nin kütle azaltma katsayısı değerleri öncelikle teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenerek kıyaslanmıştır. Analiz sonucunda ısıtma işlemi görmemiş alaşımların teorik ve deneysel verileri büyük ölçüde uyumluluk göstermektedir ve en büyük fark yaklaşık %1-2 civarındadır. Bu da kurulan deney düzeneğinin bu çalışma kapsamında kullanılabilirliğinin altını çizmektedir. Tablo 4.37 ve 4.38'de her bir alaşıma ait kütle azaltma katsayısı değerleri sunulurken Tablo 4.39 ve 4.40 lineer azaltma katsayısı sonuçları özetlenmiştir. Kendiliğinden soğuma ve ani soğutma yaklaşımları arasında önemli bir fark olmadığını belirtmek önemlidir. Ancak, uygulanan sıcaklıkla birlikte kütle azaltma katsayısı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bir başka ifade ile, ısıtma işlemi maruz kalmamış alaşımlar ile 1000°C'den ani soğutma veya kendiliğinden soğuma kullanılarak elde edilen alaşımlar arasında önemli bir fark gözlemlenmektedir. Özellikle, kendiliğinden soğuma kullanılarak 1000°C uygulanan SS304 numunesinin kütle soğurma katsayısı değeri, 1173 keV'de ısıtma işlemi uğramamış SS304 numunesinden yaklaşık %17 daha büyüktür. Benzer bir eğilim 1332,5 keV'de de saptanmıştır. SS304 alaşımına kıyasla daha az olmak üzere, bu davranış Incoloy 800H numunelerinde de gözlemlenmektedir: kendiliğinden soğuma kullanılarak 1000°C'de işlenen Incoloy 800H numunesinin kütle soğurma katsayısı değeri, 1173 keV'de ısıtma işlemi görmemiş Incoloy 800H numunesinden yaklaşık %10 daha büyüktür.

Tablo 4.36 SS304 ve Incoloy 800H alaşımları için ısıtma işlemsiz/işlemli yoğunluk sonuçları

	SS304			Incoloy 800H		
	Havada (mg)	Suda (mg)	Yoğunluk (g/m ³)	Havada (mg)	Suda (mg)	Yoğunluk (g/m ³)
İşlemsiz	8,9800	7,8200	7,7413	3,5900	3,1215	7,6627
300 ani	8,8000	7,6800	7,8571	3,700	3,2128	7,5944
300 kendi	9,0400	7,8400	7,5333	3,9700	3,4670	7,8926
500 ani	9,1050	7,9100	7,6192	4,3200	3,7700	7,8545
500 kendi	8,9900	7,8050	7,5864	3,9900	3,4780	7,7929
700 ani	9,2400	8,0100	7,5121	3,5900	3,1290	7,7874
700 kendi	9,0200	7,8200	7,5166	3,4500	3,0130	7,8947
1000 ani	8,8600	7,6950	7,6051	3,3600	2,9250	7,7241
1000 kendi	7,7800	6,7660	7,6725	2,7150	2,3740	7,9618

Tablo 4.37 Isıl işlemsiz/işlemli SS304 için kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm²/g)

SS304		
	1173 (keV) Deney ± İstatistiksel Belirsizlik	1332,5 (keV) Deney ± İstatistiksel Belirsizlik
Teorik	0,0553	0,0517
İşlemsiz	0,0555 ± 0,0140	0,0516 ± 0,0090
300 ani	0,0565 ± 0,0064	0,0524 ± 0,0119
300 kendi	0,0581 ± 0,0092	0,0538 ± 0,0146
500 ani	0,0566 ± 0,0107	0,0525 ± 0,0107
500 kendi	0,0596 ± 0,0109	0,0552 ± 0,0096
700 ani	0,0596 ± 0,0086	0,0552 ± 0,0083
700 kendi	0,0612 ± 0,0114	0,0565 ± 0,0107
1000 ani	0,0651 ± 0,0123	0,0599 ± 0,0146
1000 kendi	0,0653 ± 0,0092	0,0601 ± 0,0062

Tablo 4.38 Isıl işlemsiz/işlemli Incoloy 800H için kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm²/g)

Incoloy 800H		
	1173 (keV) Deney ± İstatistiksel Belirsizlik	1332,5 (keV) Deney ± İstatistiksel Belirsizlik
Teorik	0,0556	0,0520
İşlemsiz	0,0559 ± 0,0104	0,0514 ± 0,0111
300 ani	0,0570 ± 0,0115	0,0508 ± 0,0062
300 kendi	0,0571 ± 0,0060	0,0529 ± 0,0089
500 ani	0,0586 ± 0,0087	0,0540 ± 0,0136
500 kendi	0,0602 ± 0,0081	0,0543 ± 0,0083
700 ani	0,0602 ± 0,0141	0,0566 ± 0,0089
700 kendi	0,0605 ± 0,0104	0,0555 ± 0,0104
1000 ani	0,0617 ± 0,0141	0,0567 ± 0,0119
1000 kendi	0,0617 ± 0,0093	0,0567 ± 0,0105

Tablo 4.39 Isıl işlemsiz/işlemli SS304 için lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm⁻¹)

SS304		
	1173 (keV)	1332,5 (keV)
Teorik	0,4424	0,4136
İşlemsiz	0,4445	0,4127
300 ani	0,4526	0,4199
300 kendi	0,4652	0,4309
500 ani	0,4530	0,4202
500 kendi	0,4775	0,4416

Tablo 4.39'un devamı

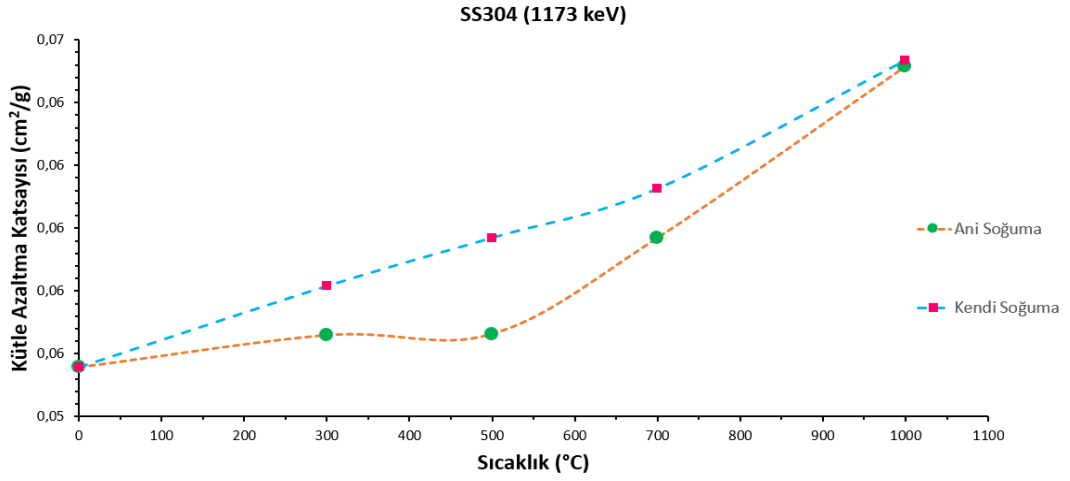
700 ani	0,4775	0,4416
700 kendi	0,4900	0,4525
1000 ani	0,5211	0,4797
1000 kendi	0,5227	0,4810

Tablo 4.40 Isıl işlemsiz/işlemli Incoloy 800H için lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1})

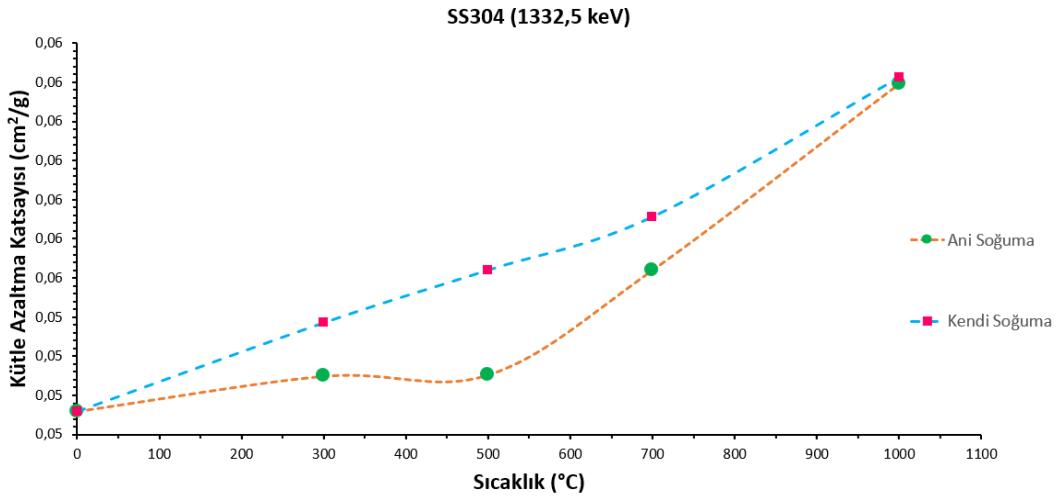
Incoloy 800H		
	1173 (keV)	1332,5 (keV)
Teorik	0,4414	0,4131
İşlemsiz	0,4442	0,4085
300 ani	0,4527	0,4038
300 kendi	0,4539	0,4206
500 ani	0,4659	0,4289
500 kendi	0,4782	0,4317
700 ani	0,4780	0,4495
700 kendi	0,4809	0,4411
1000 ani	0,4903	0,4505
1000 kendi	0,4902	0,4502

Yukarıda bahsi geçen bu fark, metallerin üzerinde oluşan oksit katmanlarının, radyasyon koruma yeteneklerini potansiyel olarak değiştirmesine atfedilebilir. Oksit katmanı, metal yüzeyinin mikro yapısını değiştirebilir ve böylece radyasyonu emme ve zayıflatma yeteneğini artırabilir. Ayrıca, oksit katmanı, radyasyonun geçmesi gereken ekstra bir bariyer olarak işlev görebilir, böylece malzemenin genel zayıflatma kapasitesini artırabilir. Şekil 3.21, 3.22, 3.23 ve 3.24 numunelerin görüntülerini göstermektedir. Uygulanan sıcaklık arttıkça, malzeme yüzeylerinde oksit katmanlarının oluşumu daha belirgin hale gelmektedir. Bu etki, Incoloy 800H numunelerinde daha az belirgindir, bu da Incoloy 800H'nin kütle azaltma katsayısı değerindeki daha küçük değişimleri açıklamaktadır.

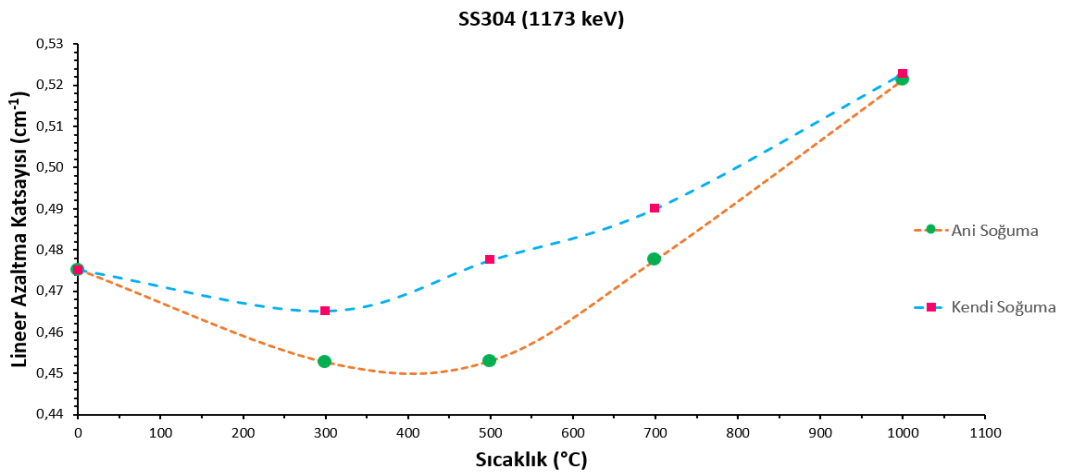
Şekil 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45 SS304 ve Incoloy 800H için farklı gama enerjilerinde kütle azaltma katsayısı değerlerini sunmaktadır. Bu grafikler sayesinde Ani soğutma ve kendiliğinden soğuma seçenekleri arasındaki fark daha net gözlemlenebilmektedir.



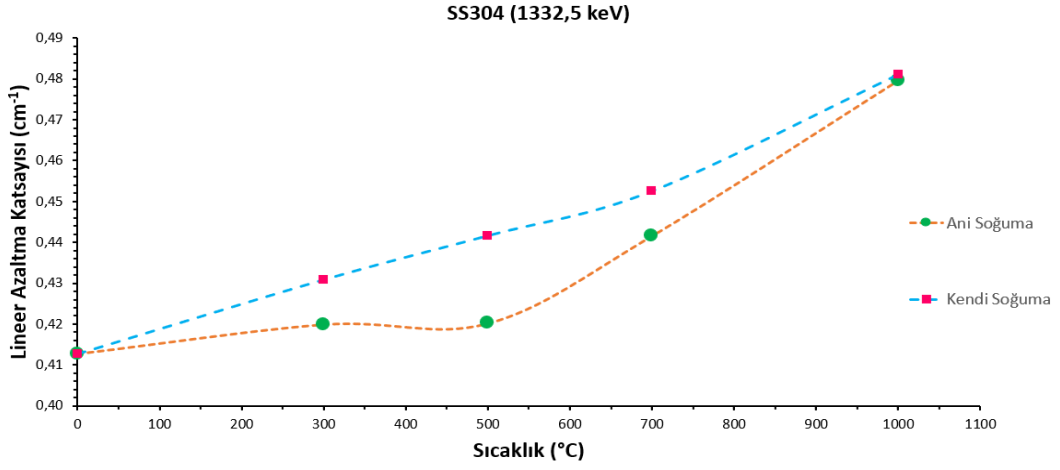
Şekil 4.38 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi



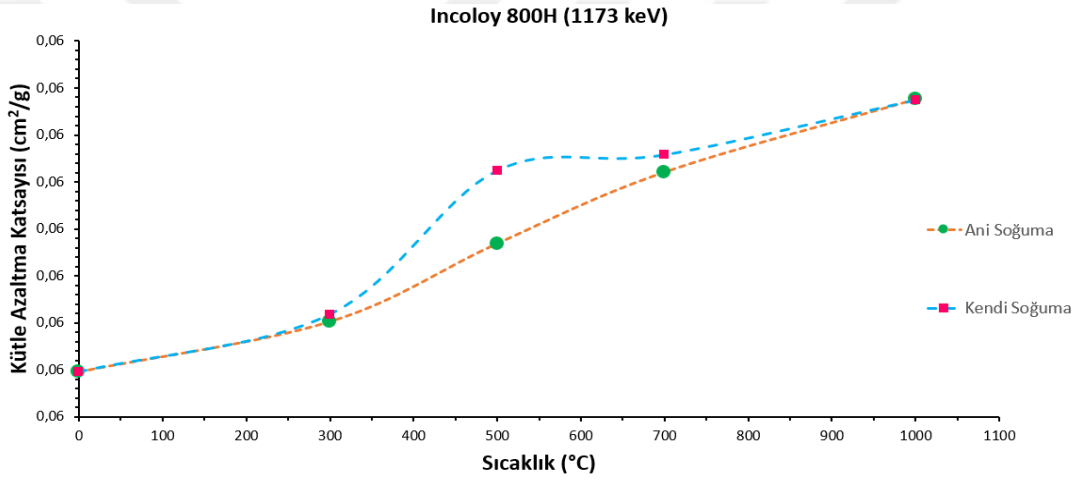
Şekil 4.39 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1332,5 keV de değişimi



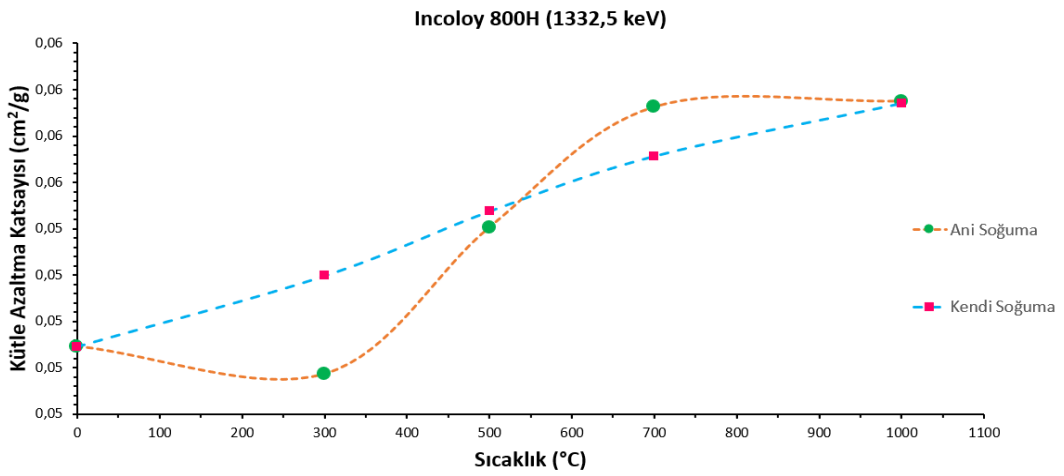
Şekil 4.40 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi



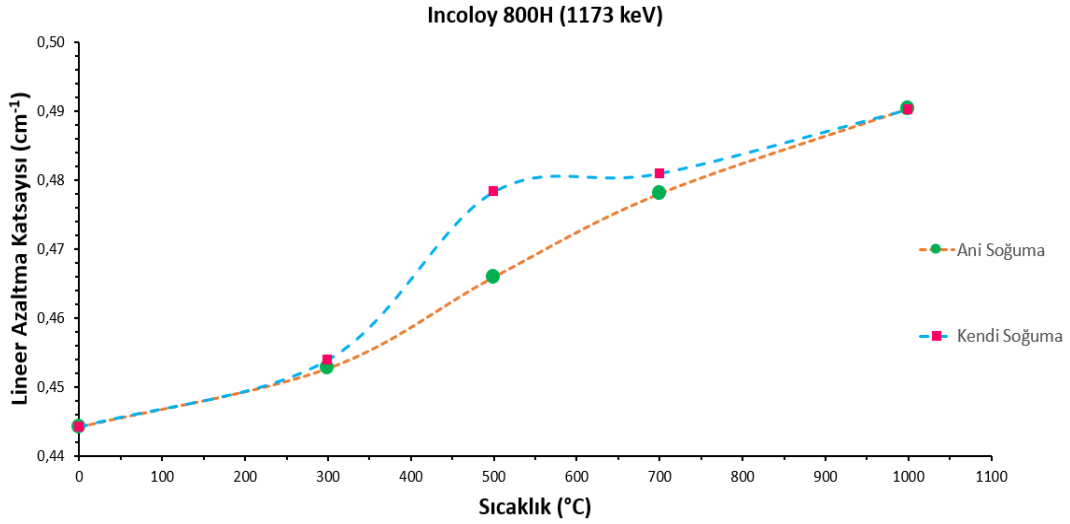
Şekil 4.41 SS304 için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma katsayısının 1332,5 keV de değişimi



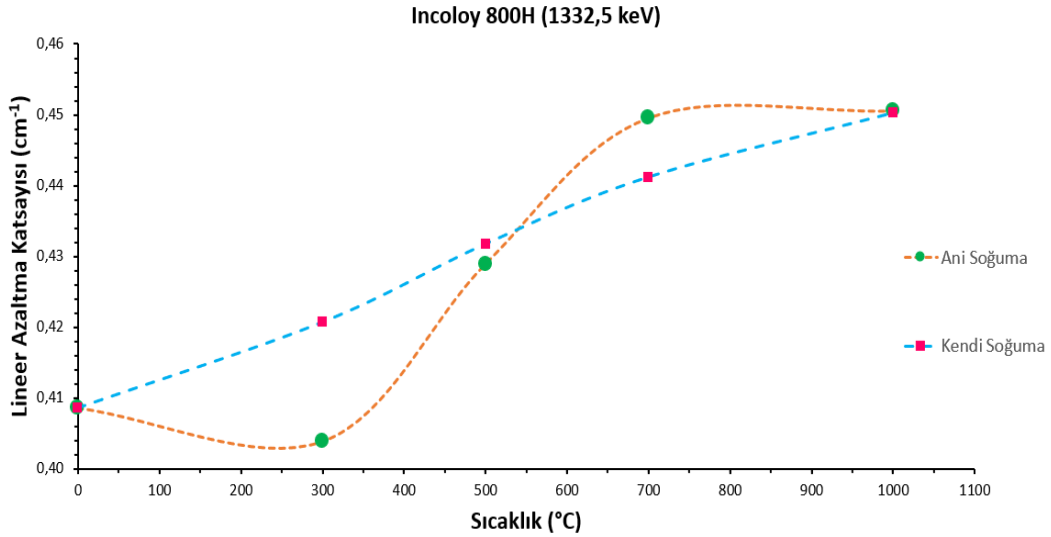
Şekil 4.42 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi



Şekil 4.43 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre kütle azaltma katsayısının 1332,5 keV de değişimi



Şekil 4.44 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma katsayısının 1173 keV de değişimi



Şekil 4.45 Incoloy 800H için numunelere uygulanan sıcaklıklara göre lineer azaltma katsayısının 1332,5 keV de değişimi

4.3. Nötron Radyasyonunun Alaşımlarla Etkileşimi Sonucu Oluşan İkincil Radyasyon Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında nötronun seçilen alaşımlarla birincil etkileşimi sonucu oluşan ikincil radyasyon hesabı da ele alınmıştır. Tablo 4.41'ta her bir alaşım için ikincil radyasyon analizi sonuçları verilirken Tablo 4.42'de 10 mm numune kalınlığında her bir alaşım üzerinden geçen nötron sayıları sunulmuştur.

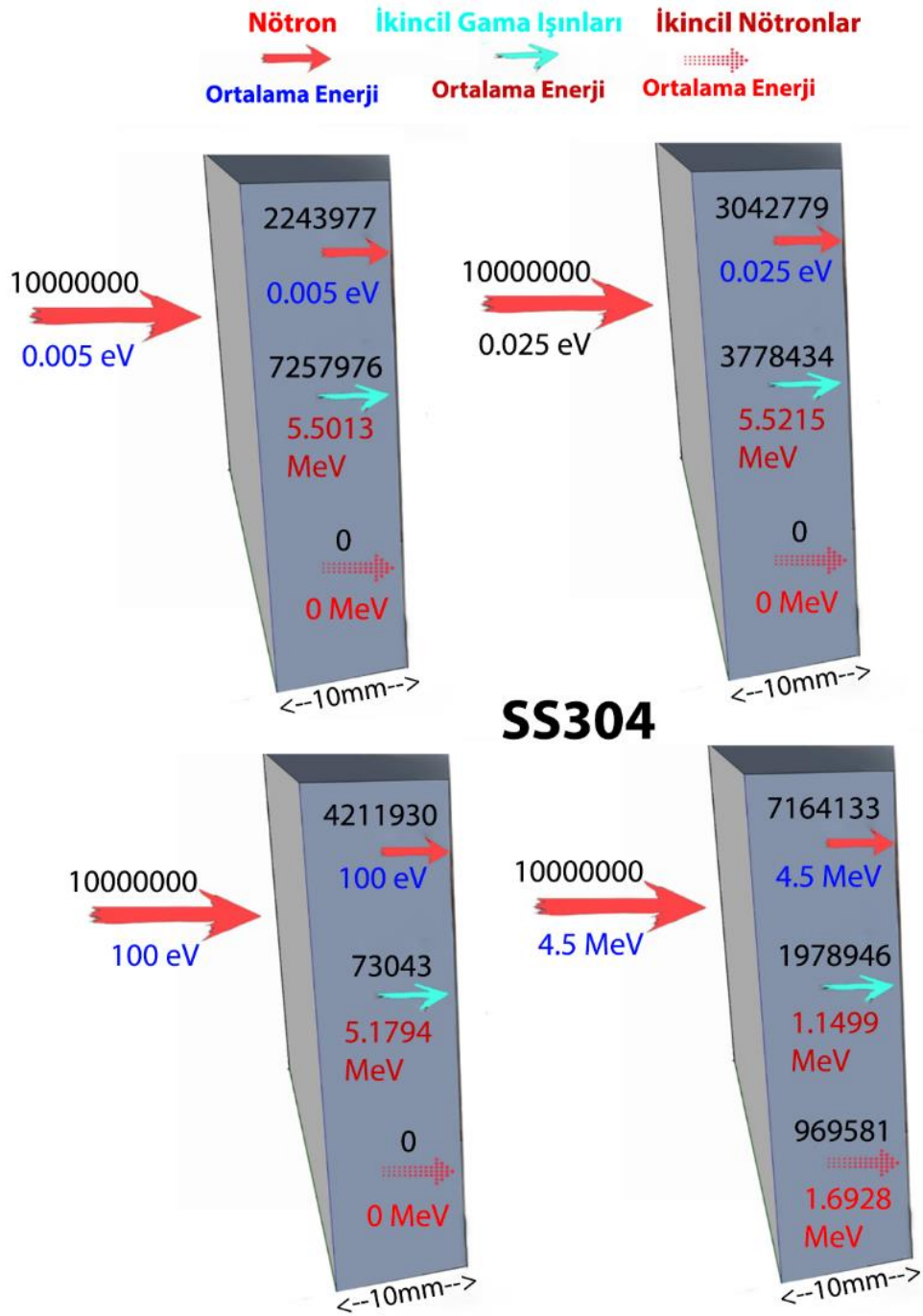
Tablo 4.41 Nötronların birincil etkileşimi sonucu açığa çıkan ikincil radyasyonlar ve ortalama enerjileri (GEANT4)

SS304				
Nötron sınıfı	Gama Sayısı	Gama Ortalama Enerjisi (MeV)	Nötron Sayısı	Nötron Ortalama Enerjisi (MeV)
Soğuk (0,005 eV)	7257976	5,5013	0	-
Termal (0,025 eV)	3778434	5,5215	0	-
Yavaş (100 eV)	73043	5,1794	0	-
Hızlı (4,5 MeV)	1978946	1,1499	969581	1,6928
08X18N10T				
Nötron Sınıfı	Gama Sayısı	Gama Ortalama Enerjisi (MeV)	Nötron Sayısı	Nötron Ortalama Enerjisi (MeV)
Soğuk (0,005 eV)	7129252	5,5917	0	-
Termal (0,025 eV)	3672358	5,6125	0	-
Yavaş (100 eV)	67561	5,3275	0	-
Hızlı (4,5 MeV)	1971374	1,1518	958041	1,6963
Zirkaloy-2				
Nötron Sınıfı	Gama Sayısı	Gama Ortalama Enerjisi (MeV)	Nötron Sayısı	Nötron Ortalama Enerjisi (MeV)
Soğuk (0,005 eV)	657853	3,0850	0	-
Termal (0,025 eV)	297405	3,0822	0	-
Yavaş (100 eV)	4919	3,0743	0	-
Hızlı (4,5 MeV)	1477054	1,5231	685916	1,2764
Zirkaloy-4				
Nötron Sınıfı	Gama Sayısı	Gama Ortalama Enerjisi (MeV)	Nötron Sayısı	Nötron Ortalama Enerjisi (MeV)
Soğuk (0,005 eV)	651144	3,0924	0	-
Termal (0,025 eV)	293018	3,0873	0	-
Yavaş (100 eV)	5107	3,0783	0	-
Hızlı (4,5 MeV)	1477840	1,5227	686381	1,2768
Incoloy 800H				
Nötron Sınıfı	Gama Sayısı	Gama Ortalama Enerjisi (MeV)	Nötron Sayısı	Nötron Ortalama Enerjisi (MeV)
Soğuk (0,005 eV)	7657203	4,6825	0	-
Termal (0,025 eV)	4039626	4,6901	0	-
Yavaş (100 eV)	76212	4,5007	0	-
Hızlı (4,5 MeV)	1962563	1,1093	931843	1,6596

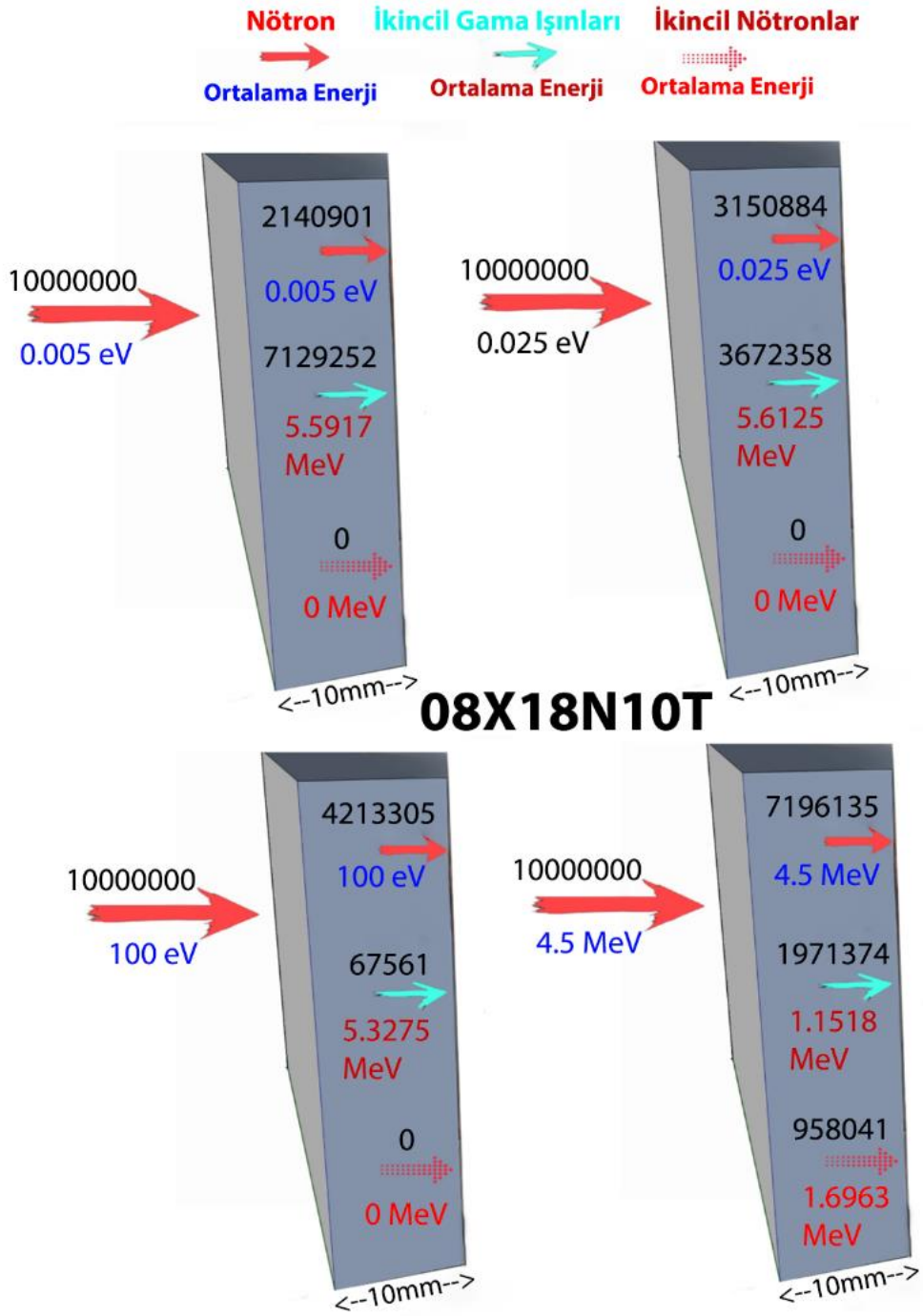
Tablo 4.42 10 mm numune kalınlığında her bir alaşım üzerinden geçen nötron sayıları (GEANT4)

Malzemeler	Soğuk Nötron (0,005 eV)	Termal Nötron (0,025 eV)	Yavaş Nötron (100 eV)	Hızlı Nötron (4,5 MeV)
SS304	2243977	3042779	4211930	7164133
08X18N10T	2140901	3150884	4213305	7196135
Zirkaloy-2	7113987	7422672	7469540	8522149
Zirkaloy-4	7217784	7327983	7477697	8519432
Incoloy 800H	1867913	2819559	3857347	7219012

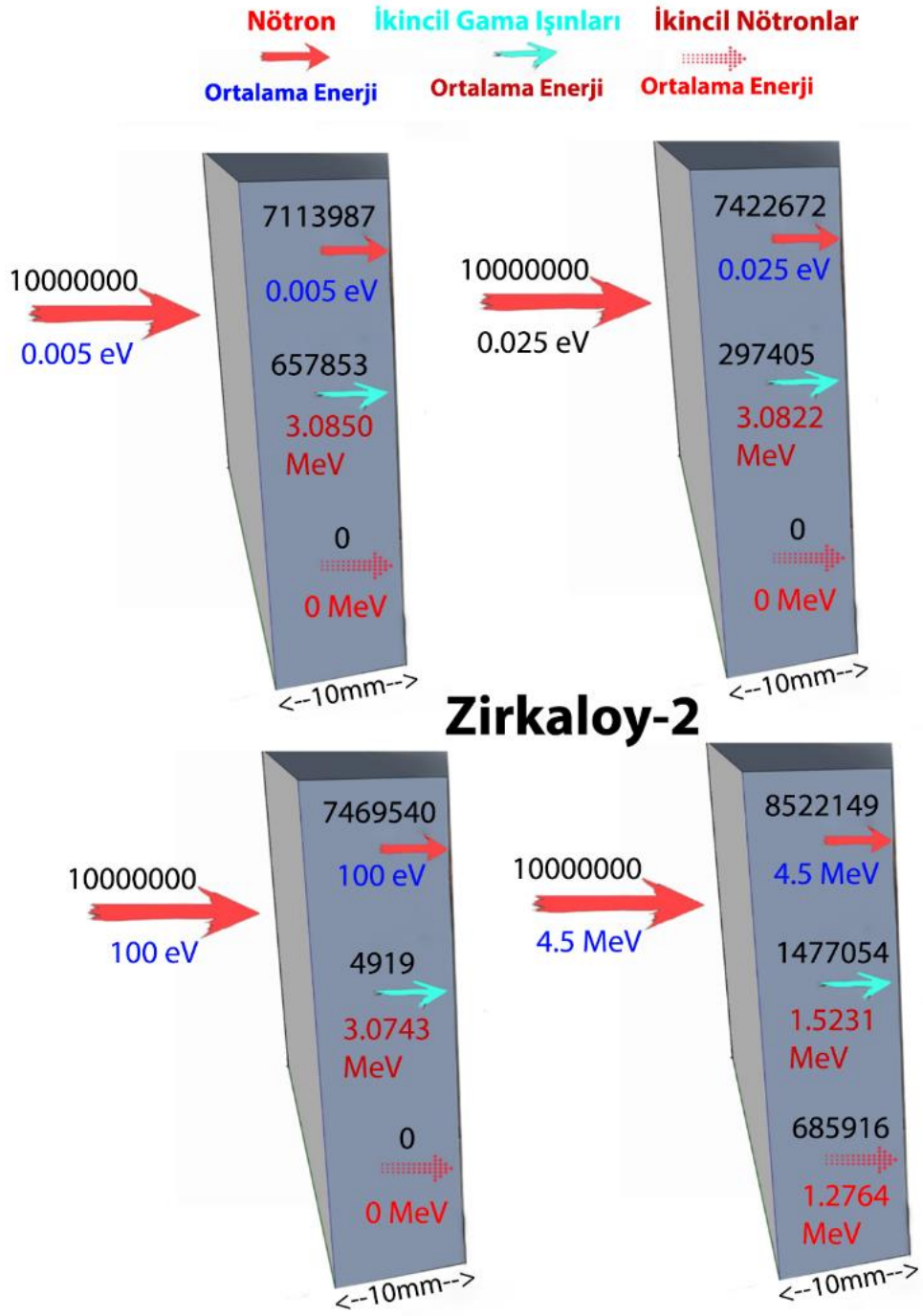
Tablolarda sunulan değerler Şekil 4.46'dan Şekil 4.50'ye kadar görselleştirilmiştir. Nötron radyasyon zırlarken oluşan ikincil radyasyon açısından 0,005 eV ve 0,025 eV enerjilerde Zirkaloy-4'n, 100 eV ve 4,5MeV enerjilerde Zirkaloy-2'nin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.



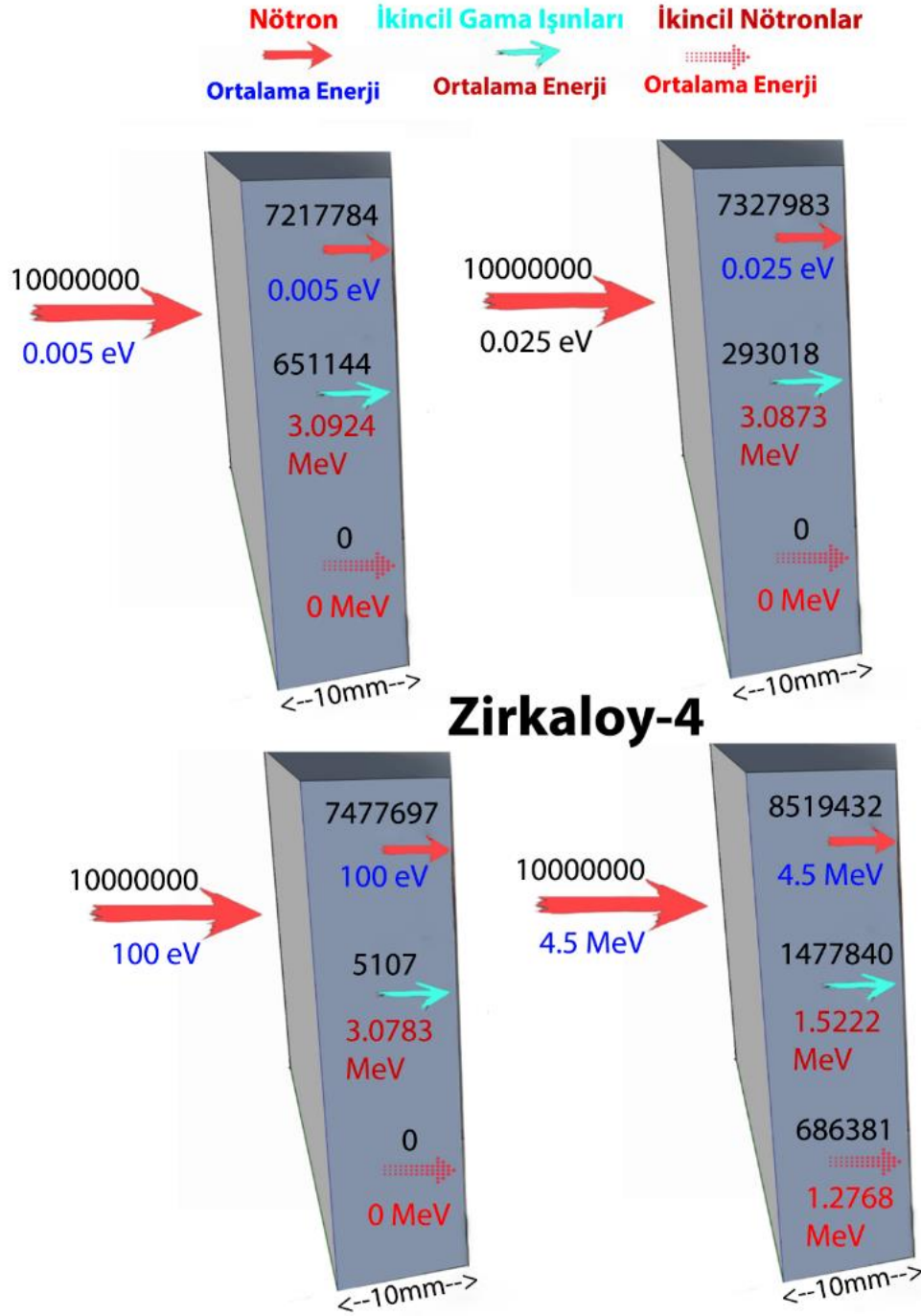
Şekil 4.46 SS304 için nötron radyasyonu etkileşimleri



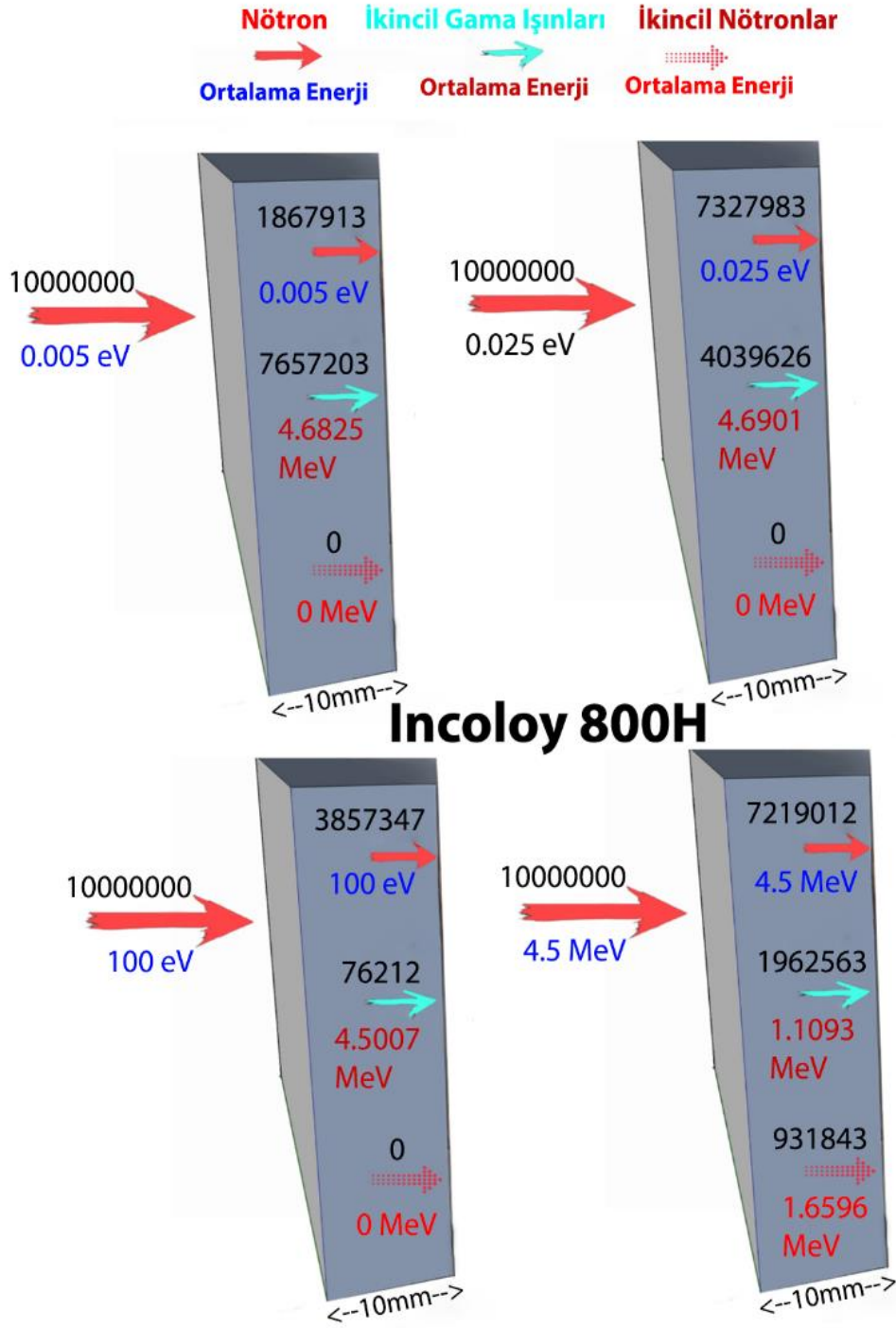
Şekil 4.47 08X18N10T için nötron radyasyonu etkileşimleri



Şekil 4.48 Zirkaloy-2 için nötron radyasyonu etkileşimleri



Şekil 4.49 Zirkaloy-4 için nötron radyasyonu etkileşimleri



Şekil 4.50 Incoloy 800H için nötron radyasyonu etkileşimleri

4.4. Sertlik Deneyi Sonuçları

SS304 ve Incoloy 800H alaşımlarının ısıtılma uğramış ve uğramamış numuneleri için mikrosertlik deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ani soğuma ve kendiliğinden soğuma yöntemlerinin malzemelerin mikro sertlik testlerine etki edip etmediği de

belirlenmiştir. Tablo 4.43 ve Tablo 4.44'te sırasıyla SS304 ve Incoloy 800H alaşımlarının sertlik deney sonuçları gösterilmiştir. Her bir numune için işlem 3 defa tekrarlanarak ortalama değerler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Ortalama mikrosertlik değerleri Şekil 5.67 ve 5.68'de gösterilmiştir. Grafikten açıkça görülmektedir ki, 1000 °C dışında ısıtılma işlemi gören numunelerin sertlik değerlerinde belirgin bir değişiklik yoktur. Hem SS304 hem de Incoloy 800H gruplarındaki numunelerin 1000 °C'de ısıtılma işlemi görmüş olanları diğerlerine göre daha düşük sertlik değerlerine sahiptir. Her iki gruptaki numunelerin sertlik değerleri, söz konusu çalışmalarda (Essoussi, v.d., 2019, URL-13, 2024) tartışılan sönümlenme ve soğutma işlemlerine uygunluk göstermektedir. Bu bulguların dışında, SS304 numunelerinin sertlik değerleri 300, 500 ve 700 °C sıcaklıklarında Incoloy 800H numunelerinden daha büyüktür. Şekil 4.51 ve 4.52 sırasıyla SS304 ve Incoloy 800H mikrosertlik testi sonuçlarının grafiklerini sunmaktadır.

Tablo 4.43 SS304 için mikro sertlik deney sonuçları

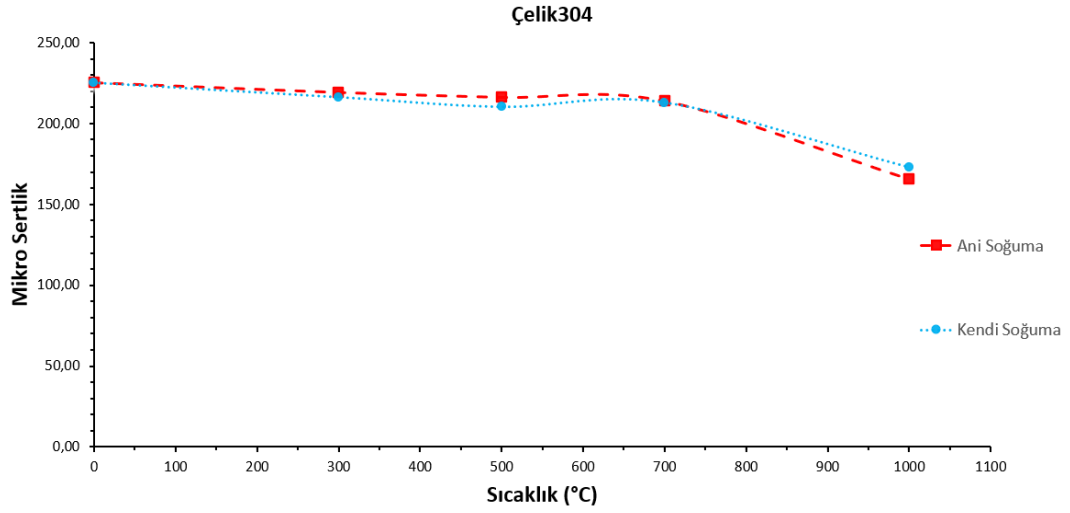
SS304				
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
İşlemsiz	227	224	225	225,3333
300 ani	217	221	220	219,3333
300 kendi	220	216	213	216,3333
500 ani	213,5	215,3	220	216,2667
500 kendi	213	208	210	210,3333
700 ani	210,8	224	207	213,9333
700 kendi	208	222	209	213
1000 ani	162	164	171	165,6667
1000 kendi	176	170	172	172,6667

Tablo 4.44 Incoloy 800H için mikro sertlik deney sonuçları

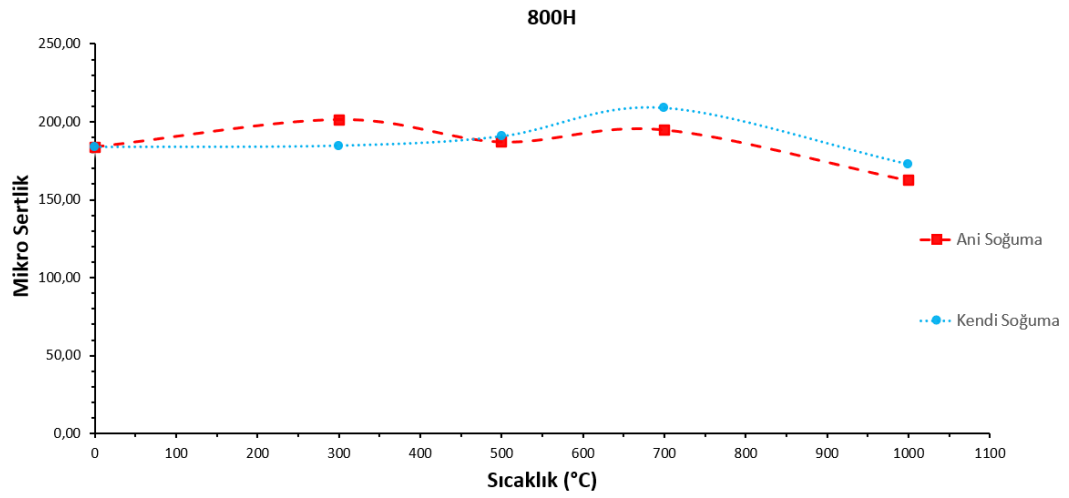
Incoloy 800H				
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
İşlemsiz	184	183	184,5	183,8333
300 ani	198	206	200	201,3333
300 kendi	183	189	182	184,6667
500 ani	184	196	181	187
500 kendi	188	193	191	190,6667

Tablo 4.44'ün devamı

700 ani	197,1	192	195	194,7000
700 kendi	206	212	209	209
1000 ani	164	160	163	162,3333
1000 kendi	168	172	178	172,6667



Şekil 4.51 SS304 için mikro sertlik grafiği



Şekil 4.52 Incoloy 800H için mikro sertlik grafiği

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak SS304, 08X18N10T, Zirkaloy-2, Zirkaloy-4 ve Incoloy 800H'da kullanılan alaşımların nötron ve gama zırlama kabiliyetleri incelenmiştir. Sırasıyla bu alaşımlar PWR, VVER, CANDU ve VHTR tipi reaktörlerde kullanılmaktadır. Deneysel olarak Kobalt-60 (Co-60) kaynağı Sodyum iyodür NaI(Tl) dedektörü kullanılarak 1173 keV ve 1332 keV enerji seviyelerinde SS304 ve Incoloy 800H alaşımların gama sonucu ile teorik sonucu karşılaştırılmıştır. Bununla beraber SS304 ve Incoloy 800H mikrosertlik deneyi yapıp sonuçlar kıyaslanmıştır.

Nötron sınıflarına göre soğuk nötron (0,005 eV), termal nötron (0,025 eV), yavaş nötron (100 eV), hızlı nötron (4,5 MeV) kategorilerinde alaşımlar üzerine 10 milyon nötron gönderilerek simülasyon yöntemleri ile geçen nötron sayıları belirlenmiştir. Hızlı nötronlar için yapılan değerlendirmede seçilen bütün kalınlık değerleri için en iyi nötron zırlama malzemesi PWR'larda kullanılan SS304 olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgulara göre soğuk, termal ve yavaş nötron enerjilerinde en iyi zırlama alaşımı Incoloy 800H olarak belirlenmiştir.

Gama radyasyonu zırlama için elde edilen bulgular XCOM, GEANT4, FLUKA ve EpiXS programları arasında çok iyi bir uyuşmanın olduğunu göstermektedir. 0,015, 0,02, 0,03, 0,04 MeV'de bütün alaşımlar %100, 0,05, 0,06 MeV'de ise Zirkaloy-2 ve Zirkaloy-4 %100 gama radyasyonundan korunma sağlamıştır. Alaşımlar arasında gama zırlama kabiliyetleri açısından büyük farklar gözlemlenmemiştir.

Isıl işlem gören numunelerin kendiliğinden soğuma ve ani soğutma yaklaşımları arasında önemli bir fark olmadığı da saptanmıştır. Ancak, uygulanan sıcaklıkla birlikte kütle azaltma katsayısı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bir başka ifade ile, ısıl işleme maruz kalmamış alaşımlar ile 1000°C'den ani soğutma veya kendiliğinden soğuma kullanılarak elde edilen alaşımlar arasında önemli bir fark yaratmaktadır. SS304 alaşımına kıyasla daha az olmak üzere, bu davranış Incoloy 800H numunelerinde de gözlemlenmektedir. Uygulanan sıcaklık arttıkça, malzeme yüzeylerinde oksit katmanlarının oluşumu daha belirgin hale gelmektedir.

Sonuç olarak, sunulan çalışma, ısıl işlem sürecinin bir parçası olarak ani soğutma işleminin test edilen alaşımların genel radyasyon zırlama özelliklerini etkilediğini ortaya koymaktadır. Ani soğutulmuş numuneler, özellikle 1000°C'de, kendiliğinden

soğutulmuş olanlara kıyasla daha yüksek MAC değerleri sergilemiştir. Isıl işlem nedeniyle numunelerin sertlik değerlerinde, 1000°C hariç, önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Hem SS304 hem de Incoloy 800H grupları için 1000°C'de ısıl işlem görmüş numuneler, diğerlerine kıyasla daha düşük mikrosertlik değerleri göstermektedir. Ayrıca burada vurgulanması gereken bir diğer nokta, mikrosertlik testleri açısından ani soğutma ve kendiliğinden soğuma teknikleri arasında önemli bir fark olmamasıdır. Bu bulgular, nükleer reaktörlerde kullanılan malzemelerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır ve radyasyon zırhlama uygulamalarında güvenliği ve verimliliği artırmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, diğer ısıl işlem tekniklerini ve daha geniş bir malzeme yelpazesine etkilerini araştırarak nükleer teknolojide radyasyon zırhlaması konusundaki anlayışımızı daha da ilerletebilir.

KAYNAKLAR

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytrcek, R., & Cooperman, G. (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)
- Akman, F., Hasan Oğul, Mehmet Fatih Turhan, & Cansu Şeyma Ağrılı. (2024). Interactions between X-/gamma rays and alloys used in dental braces: A study on theory and simulations. *Radiation Physics and Chemistry*, 215, 111376–111376. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111376>
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Dubois, P. A., Asai, M., Barrand, G., Capra, R., Chauvie, S., Chytrcek, R., Cirrone, G. A. P., Cooperman, G., Cosmo, G., Cuttone, G., Daquino, G. G., Donszelmann, M., Dressel, M., Folger, G., Foppiano, F., & Generowicz, J. (2006). Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(1), 270–278. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826>
- Al-Shelkamy, S. A., Hector Rene Vega-Carrillo, Xie, Z., F.M. El-Hossary, Mosa, E. S., Mahdy, A. A., Omayma Elkady, M. Abdel Ghafaar, & A. Abdel-latif M. (2023). Mechanical and radiation shielding characterization of W-based alloys for advanced nuclear unit. *Applied Radiation and Isotopes*, 201, 110995–110995. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110995>
- Altın, V. (2007). 4. nesil nükleer santraller. Bilim Ve Teknik (Yeni Ufuklara Dergisi).
- Andrushechko, S. A., Afrov, A. M., Vasiliev, B. Yu., Generalov, V. N., Kosourov, K. B., Semchenkov, Yu. M., & Ukrainsev, V. F. (2010). Ot Fizicheskikh Osnov Ekapluatatsii do Evolutsii Proekta [NPP with VVER-1000. Starting from Operation Principles to Design Evolution]. *Logos Publ.*, 604.
- Augustyn, A. (2023). Tin | Definition, Properties, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/tin>
- Aygün, B., Korkut, T., & Karabulut, A. (2017). *High Performance Shielding Material to Prevent Radiation Leaks*.
- Aygün, Z., & Aygün, M., (2023). Özellikle nükleer reaktörler için yüksek sıcaklık uygulamalarına aday Ni bazlı alaşımların, Inconel-617 ve Incoloy-800HT, radyasyon zırhlama potansiyellerinin EpiXS ve Phy-X/PSD kodları ile değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 795–801. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1004657>
- Brasted, R. (2023). sulfur | Definition, Properties, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/sulfur>
- Brasted, R. C. (2023). oxygen | Discovery, Symbol, Properties, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/oxygen>
- Britannica, T. (2023). aluminum | chemical element. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/aluminum>

- Britannica, T. (2023). copper | Definition & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/copper>
- Britannica, T. (2023). iron | Element, Occurrence, & Compounds. In *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/iron-chemical-element>
- Britannica, T. (2023). manganese | Uses, Facts, & Compounds. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/manganese>
- Britannica, T. (2023). nickel | Definition, Properties, Symbol, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/nickel-chemical-element>
- Britannica, T. (2023). phosphorus | Definition, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/phosphorus-chemical-element>
- Britannica, T. (2023). silicon | Properties, Uses, Symbol, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/silicon>
- Britannica, T. (2023). titanium | Properties, Uses, & Facts. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/titanium>
- Britannica, T. (2023). zirconium | chemical element | Britannica. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/zirconium>
- Davis, J. R., Mills, K. M., Lampman, S., Zorc, T. B., Lapman, H. F., Crankovic, G. M., Ronke, A. W., Henry, S. D., & Daquila, J. L. (1993). *Metals handbook: Irons, steels, and high-performance alloys*.
- Dilsiz, K., Ogul, H., Akman, F., Agar, O., Kacal, M. R., Polat, H., & Dursun, İ. (2021). Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103865>
- Essoussi, H., Elmouhri, S., Ettiqa, S., & Essadiqi, E. (2019). Heat treatment effect on mechanical properties of AISI 304 austenitic stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 32, 883–888. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.298>
- F. William Sunderman. (1989). Carcinogenicity of Metal Alloys in Orthopedic Prostheses: Clinical and Experimental Studies. *Toxicological Sciences*, 13(2), 205–216. <https://doi.org/10.1093/toxsci/13.2.205>
- Ferrari, A., Sala, P. R., Fasso, A., & Ranft, J. (2005). *FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005)*. <https://doi.org/10.5170/cern-2005-010>
- Fortov, V. G., & Poppel, O. S. (2011). *Energetika v Sovremennom Mire [Nuclear Power Engineering in the Present-Day World]*. Intellect Publ.
- Goldsmid, H. J. (1961). Recent Studies of Bismuth Telluride and Its Alloys. *Journal of Applied Physics*, 32(10), 2198–2202. <https://doi.org/10.1063/1.1777042>
- Gorynin, I., Timofeev, B., & Chernaenko, T. (2003). *Material properties degradation assessment of the first generation WWER-440 RPV after prolonged operation*.
- Gregersen, E. (2023). carbon | Facts, Uses, & Properties. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>

- Gregersen, E. (2023). *chromium | chemical element*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/chromium>
- Guatelli, S., Cutajar, D. L., Oborn, B. M., & Rosenfeld, A. B. (2011). Introduction to the Geant4 Simulation toolkit. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. <https://doi.org/10.1063/1.3576174>
- Hidetoshi Takiishi, J.H. Duvaizen, Sato, I. M., Rossi, J. L., Pereira, L. A. T., & Luís Gallego Martinez. (2012). Recycling of Zircaloy Machining Chips by VAR Remelting and Powder Metallurgy Techniques. *Materials Science Forum*, 727-728, 356–361. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.727-728.356>
- Jackson, D., & Tammemagi, H. (2009). “CANDU, the canadian reactor” in half-lives: A guide to nuclear technology in Canada. *Canada: Oxford University Press*, 75–90.
- Jiang, W. (2016, May 12). *Direct Method of Generating Floor Response Spectra*. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Direct-Method-of-Generating-Floor-Response-Spectra-Jiang/d267a7e25419d2d7639b554eb3d3a4bce0b845b6/figure/0>
- Kessler, G. (2012). *Sustainable and safe nuclear fission energy: technology and safety of fast and thermal nuclear reactors*. Springer.
- Kuhn, H., Medlin, D., & ASM International. Handbook Committee. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International (OH).
- Lingadurai, K., Nagasivamuni, B., Kamatchi, M., & Palavesam, J. (2012). *Selection of Wire Electrical Discharge Machining Process Parameters on Stainless Steel AISI Grade-304 using Design of Experiments Approach*.
- M. Elices, & Llorca, J. (2002). *Fiber Fracture*. Gulf Professional Publishing.
- Makarov, V., Afanasiev, A., Egorov, Y., & Matvienko, I. (2015). *Experimental studies of resistance fretting-wear of fuel rods for VVER-1000 and TVS-KVADRAT fuel assemblies*.
- Mourad, M. M., Saudi, H. A., Eissa, M. M., Hassaan, M. Y., & Abdel-Latif M, A. (2021). Modified austenitic stainless-steel alloys for sheilding nuclear reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 142, 104009. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104009>
- Noda, T., Fujita, M., & Okada, M. (1998). Transmutation and induced radioactivity of W in the armor and first wall of fusion reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 258-263, 934–939. [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(98\)00088-9](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(98)00088-9)
- Odası, E. M. (2013). *Nükleer enerji raporu 2013*. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- Oldekop, W. (2016). “Electricity and Heat from Thermal Nuclear Reactors.” *Primary Energy: Present Status and Future Perspectives*. Springer Berlin Heidelberg.
- Pioro, I. L. (2016). *Handbook of generation IV nuclear reactors*. Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.
- Rodionov, V. G. (2010). *Energetika. Problemy Nastoyashchego I Vozmozhnosti Budushchego [Power Engineering. Today's Challenges and Future Possibilities]*. Enas Publ.

- Sadawy, M. M., & El Shazly, R. M. (2019). Nuclear radiation shielding effectiveness and corrosion behavior of some steel alloys for nuclear reactor systems. *Defence Technology*, 15(4), 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.001>
- Sato, S., & Nishitani, T. (2003). Impact of armor materials on tritium breeding ratio in the fusion reactor blanket. *Journal of Nuclear Materials*, 313-316, 690–695. [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(02\)01587-8](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(02)01587-8)
- Thomas, G. (1961). *The aging characteristics of aluminum alloys electron transmission studies of Al-Mg-Si alloys*.
- Turner, J. E. (2008). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. John Wiley & Sons.
- URL-1. (2023). *Choosing the Right Radiation Shielding: Factors Considered by a Shielding Materials Expert | MarShield Custom Radiation Products*. Marshield.com. <https://marshield.com/choosing-the-right-radiation-shielding-factors-considered-by-a-shielding-materials-expert/>
- URL-2. (2023). *Pressurised water reactor (PWR) | Portal on Nuclear Safety*. Wwv.nuklearesicherheit.de. <https://www.nuklearesicherheit.de/en/science/nuclear-reactors-how-they-work/pressurised-water-reactor-pwr/>
- URL-3. (2019, January 15). *Nükleer Reaktor Teknolojileri*. Nükleer Akademi. <http://nukleerakademi.org/nukleer-enerji/nukleer-reaktor-teknolojileri/>
- URL-4. (2023, November 11). *Specialpipingmaterials.com*. <https://specialpipingmaterials.com/pt/stainless-steel-and-the-nuclear-industry/>
- URL-5. (2023). *Stainless 302, 304, 304L, 305*. <https://www.upmet.com/sites/default/files/datasheets/304-304l.pdf>
- URL-6. (2023). *Steel 08KH18N10T (ЭИ914) / Auremo*. Auremo.biz. <https://auremo.biz/materials/stal-08h18n10t-ei914.html?ysclid=llhucfzbtp330095308>
- URL-7. (2023). *08KH18N10T / 08X18H10T Corrosion-resistant high-temperature steel*. Wwv.splav-Kharkov.com. http://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=330
- URL-8. (2015). *Zirconium Alloys*. https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/zirconium/alloy/Zr_nuke_waste_disposal_v1.pdf
- URL-9. (2023). *Zircaloy-2 Zirconium Alloy*. Wwv.matweb.com. https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=eb1dad5ce1ad4a1f9e92f86d5b44740d
- URL-10. (2012, October 22). *Zircaloy-4(Alloy Zr4) (UNS R60804)*. AZoM.com. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7644>
- URL-11. (2023). *Alloy 800 H/HT®. Corrosion Materials*. <https://corrosionmaterials.com/alloys/alloy-800h/>
- URL-12. (2023). *Alloy 800/800H Heat Resistant Nickel Alloy Plate*. Sandmeyer Steel. <https://www.sandmeyersteel.com/A800-A800H-A800AT.html>

- URL-13. (2024). *High-Temperature Characteristics Of Stainless Steel A Designers' Handbook Series N O 9004*.
https://nickelinstitute.org/media/4657/ni_aisi_9004_hightemperaturecharacteristics.pdf
- Vohera, H. (2023, July 12). *Zircaloy-2 Zirconium Alloy (UNS R60802) – Composition, Properties and Uses*. ThePipingMart Blog.
<https://blog.thepipingmart.com/grades/zircaloy-2-zirconium-alloy-uns-r60802-composition-properties-and-uses/>
- Wright, R. (2019). Structural Alloys for HTGR and VHTR Systems. *NRC HTGR Training*.
- Xin, Y., Hu, T., & Chu, P. K. (2011). In vitro studies of biomedical magnesium alloys in a simulated physiological environment: A review. *Acta Biomaterialia*, 7(4), 1452–1459.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.12.004>
- Zeng, R., Zhang, J., Huang, W., Dietzel, W., Kainer, K. U., Blawert, C., & Ke, W. (2006). Review of studies on corrosion of magnesium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, s763–s771. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(06\)60297-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(06)60297-5)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abuzer YAZ

Eğitim Durumu

Lise : Kâhta GAP Anadolu Lisesi, 2011

Lisans : Sinop Üniversitesi – Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi-
Nükleer Enerji Mühendisliği, 2019

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Afşin Elbistan B Termik Santrali - Stajyer, 2017

İş Yeri : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu - Stajyer, 2018