T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

DEMİR BOR ALAŞIMLARINDA BOR ELEMENTİNİN RADYASYON ZIRHLAMASINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE FOTON ETKİLEŞİM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Proje No: **6013**

Temel Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Aytaç Levet
İspir Hamza Polat Meslek Yüksekokulu / Elektrik Enerji Bölümü

Yüksel Özdemir, Neslihan Ekinci, Esra Cinan, Esra Kavaz, Melik Gül
Fen Fakültesi /Fizik Bölümü

Aralık 2019

ERZURUM

ATATÜRK
ÜNİVERSİTESİ

Önsöz

Amacımız radyasyonu etkili bir şekilde soğurabilecek alaşımlar elde etmektir. Demir-Çelik-Bor alaşımlarında bor elementinin radyasyon soğurma etkisini belirlendi. Deneysel ve teorik sonuçlar değerlendirilerek farklı enerjiler için radyasyon parametreleri belirlendi. Özellikle nükleer santrallerde ve günlük hayatımızda da pek çok alanda kullanılan farklı radyasyon kaynakları canlı organizmalar için tehlike arz ettiği için projede elde edilen sonuçların bu radyasyonu bertaraf etmek için kullanılabileceği kanaatindeyiz. Bu proje Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından, FBA-2017-6013 proje koduyla desteklenmektedir.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

Özet 5
Abstract 6
1. Giriş 7
2. Materyal ve Yöntem 9
2.1. Deney Geometrisi ve Ölçüm Şartları 9
2.2. Nötron Dozu Ölçümleri 11
2.3. Saçtırma (Sputterıng) Kristal Büyütme Yöntemi 12
2.4. Teorik Hesaplamalar 14
3. Bulgular 16
3.1. Alaşımlar 16
3.2. Bileşikler 21
3.3. Çelikler 23
4. Tartışma ve Sonuç 26

Şekil 1. Deney geometrisinin şematik gösterimi. 10
Şekil 2. Nötron ölçüm sistemi deney geometrisinin şematik gösterimi. 11
Şekil 3. Sıçratma ile kaplama sisteminin şematik gösterimi. 13
Şekil 4. Çelik yüzeylere saçtırma yöntemi kullanılarak Borlu bileşiklerle kaplanması 14

Tablo 1. Farklı enerjiler için alaşımların deneysel ve teorik efektif atom numaraları (Zeff) 16
Tablo 2. WinXCOM ve deneysel ölçümler kullanılarak alaşım numunelerinin hesaplanmış kütle soğurma katsayıları (μ_ρ) 17
Tablo 3. Bileşiklerin etkin atom numaraları 21
Tablo 4. Bileşiklerin etkin elektron yoğunlukları 22
Tablo 5. Çeliklerin etkin elektron yoğunlukları 24

Grafik 1.Fe-B alaşımlarının foton enerjisine karşı kütle zayıflama katsayısı. 17
Grafik 2.Fe-B alaşımlarının HVL ve MFP değerleri 18
Grafik 3. Alaşımlarda etkili atom sayılarının bor miktarı yüzdesi ile değişimi 18
Grafik 4. Fe-B alaşımlarının etkili elektron yoğunluklarının foton enerjisi ile değişimi. 19
Grafik 5. 0.015e15 MeV enerji Aralığında 40 mfp'ye kadar Fe-B alaşımlarının EABF ve EBF değerleri. 19
Grafik 6. Fe-B alaşımlarının EABF ve EBF değerleri ile belirli enerjilerdeki nüfuz etme derinliği 20
Grafik 7. Deneysel olarak elde edilen eşdeğer nötron doz oranının alaşımdaki bor yüzdesi ile değişimi 20
Grafik 8. Bileşiklerin farklı enerjilerdeki etkin atom numarası değerleri. 22
Grafik 9. Çeliklerin foton enerjisine karşı kütle soğurma katsayısı. 24
Grafik 10. Çeliklerin farklı enerjilerdeki teorik ve deneysel etkin atom numarası değerleri. 25

Özet

Projede ilk olarak Ferro-Bor (Demir- Bor) alaşımlarına bor elementini farklı yüzdelerde ilave ederek oluşan yeni alaşımların radyasyon etkilerinin nasıl değiştiği araştırıldı. İkincil olarak Borlu bileşikler için Am(241), Ba(133), Eu(152) ve Cs(137) radyoaktif kaynaklar kullanılarak Edxrf sisteminde radyasyon ölçümleri alındı. Ayrıca yüksek sıcaklıklara dirençli olan 316L, 310, 304 ve 430 gibi paslanmaz çelikleri önce yalın halde sonra borlu bileşiklerle (B4C-BN) kaplayarak radyasyon absorbe kabiliyetlerinin nasıl değiştiğine bakıldı. Çeliklerin yüzeyleri, temiz odada saçtırma (sputter) metodu kullanılarak kaplama işlemi yapıldı. Çelikler ve Demir–Bor alaşımları için CanberraNP100B BF3 nötron sayım sistemi kullanılarak nötron doz ölçümleri yapıldı. Projede kullanılan tüm bileşikler, çelikler ve diğer alaşımların için ortalama serbest yol (MFP), yarı değer katmanı (HVL), etkili atom numarası (Zeff), etkili elektron yoğunluğu (Nel), Buildup faktörleri gibi gama foton etkileşim parametreleri bulunmuştur.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Abstract

In the project, firstly, the radiation effects of new alloys formed by adding boron element to Ferro-Boron (Iron-Boron) alloys in different percentages were investigated. Secondly, radiation measurements were taken in the Edxrf system using Am (241), Ba (133), Eu (152) and Cs (137) radioactive sources for Boron compounds. In addition, it was examined how the radiation absorbing ability of stainless steels such as 316L, 310, 304 and 430, which are resistant to high temperatures, was first lean and then coated with boron compounds (B4C-BN). The surfaces of the steels were plated using the sputter method in the clean room. Neutron dose measurements were carried out using CanberraNP100B BF3 neutron counting system for Steels and Iron-Boron alloys. Gamma photon interaction parameters such as mean free path (MFP), half value layer (HVL), effective atomic number (Z_{eff}), effective electron density (Nel), Buildup factors were found for all compounds, steels and other alloys used in the project.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

1. Giriş

Günümüzde nükleer radyasyon bilim ve teknolojinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bu nedenle radyasyondan korunma, canlı organizmalara verdiği zarar nedeniyle büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir. Özellikle, yüksek enerjili X ve gama ışınlarına ve yüksek nüfuz eden nötronlara uzun süre maruz kalmak ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu tehlikeleri ortadan kaldırmak için sürekli olarak yeni malzemeler üretilmekte ve çok sayıda çalışma yürütülmektedir [1] [2] [3] [4] [5]. Kurşun, çelik ve beton gibi yüksek atom sayısına (Z) sahip malzemeler genellikle nükleer santraller gibi yüksek radyasyon ortamlarında radyasyonu absorbe etmek için kullanılırlar [6]. Özellikle nükleer reaktörlerde, X ve gama ışınlarına ek olarak nötron emisyonu meydana gelir. Yüksek atom numarası elementleri içeren betonlar [7], alaşımlar [8] [9] ve camlar [10] [11] X ve gama ışınlarını durdurmak için tercih edilirken nötronları emmek için hafif elementler içeren malzemeler seçilir [12] [13].

Monokromatik paralel bir X-ışını demeti bir maddeden geçirildiğinde çıkan demetin şiddetinde bir azalma olur. Io şiddetinde bir X-ışını demeti, t kalınlığındaki bir maddeyi geçtikten sonra şiddetindeki azalma, $I(E)=Io(E).e^{-\mu t}$ olarak ifade edilir. Bu Lambert kanunu olarak bilinir. Burada μ lineer soğurma katsayısıdır. Lineer soğurma katsayısı birim kalınlık başına düşen soğurulma olarak tanımlanır. Madde içine giren elektromanyetik radyasyon, madde atomuna bağlı elektronlar, serbest elektronlar ve çekirdekle etkileşir. Yoğunluktan bağımsız bir nicelik olan kütle azaltma katsayısı radyasyonun madde içinde azalmasını belirleyen elverişli bir parametre olup, maddenin birim alan başına düşen birim kütlesiyle gelen fotonlar arasında etkileşme meydana gelme ihtimaliyetini ifade eder. Öte yandan, kütle enerji soğurma katsayısı ise bu etkileşimlerin sonucu olarak, gelen foton enerjisinin maddenin atomlarındaki yüklü parçacıklara kinetik enerji olarak transfer edilen miktarını temsil eden bir niceliktir. Dolayısıyla, kütle enerji azaltma katsayısı medikal ve sağlık fiziğinde soğurulan doz miktarını belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Ayrıca, bazı durumlarda örneğin fotonla etkileşen numunenin kalınlığı çok fazla olduğunda ya da gelen radyasyon demetinin ıraksaması ile madde içerisinde meydana gelen çoklu saçılma olayından dolayı ikincil fotonlar meydana gelebilir. Bu da madde ile etkileştikten sonraki toplam foton sayısında bir artışa sebep olacaktır. Bu artan toplam foton miktarı herhangi bir etkileşime uğramadan geçen fotonların yanında saçılan fotonların da dâhil olduğu miktarı temsil eder. Genel olarak yukarıda ifade edilen Lambert - Beer yasasında, bir ortamdan geçen Io şiddetindeki foton şuasının ortamı terk ederken, I şiddeti ifadesi exponansiyel olarak değişmektedir. Ancak farklı açılardan gelen saçılmalar nedeniyle bu eşitliğe, deneysel ölçümlerle uyuşması için bir foton çoğalma düzeltme faktörü gerektirir. Böylece eşitlik $I(E)=BIo(E).e^{-\mu t}$ halini alır. Burada B Foton çoğalma faktörüdür ve her zaman $B \geq 1$ değerindedir.

X-ışını veya gamma radyasyonunun emilimi ve saçılması elementlerin yoğunluğu ve atom numaraları ile ilgilidir. Kompozit malzemelerde ise etkin atom numarası (Zeff) ve etkin elektron yoğunluğu (Neff) ile ilgilidir. Atom numarası elementler için ayırt edici bir özelliktir. Farklı atom numaralarına sahip elementlerden oluşan bileşikler için Efektif atom numarası terimi kullanılır. Efektif atom numarası ve efektif elektron yoğunluğu teknolojik ve mühendislik alanında geniş bir kullanıma sahip olup özellikle radyoterapide radyasyon dozunun doğru olarak belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir.

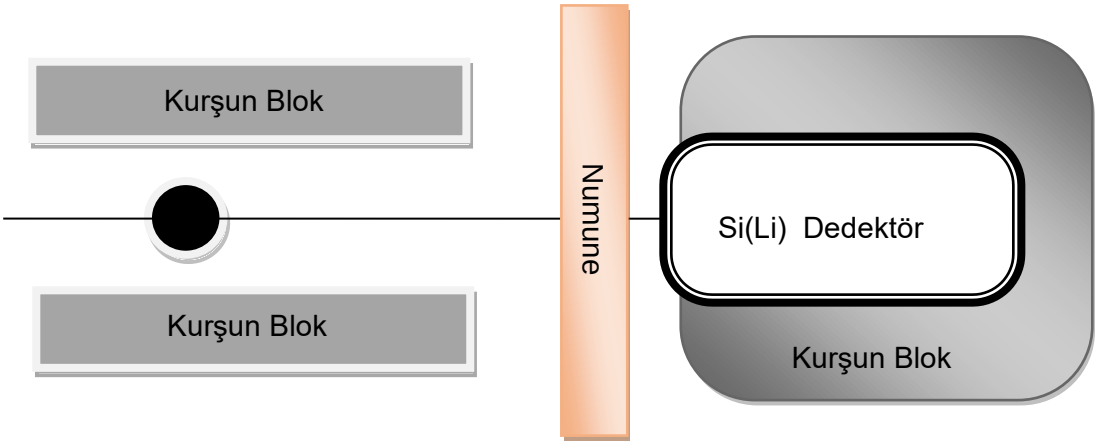
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Deney Geometrisi ve Ölçüm Şartları

EDXRF sisteminde alınan ölçümlerin bir kısmı dedektörün aktif çapı 3 mm, aktif alanı 12 mm^2 ve 5,9 keV'de Mn-Kα çizgisi için FWHM=160 eV olan bir Si(Li) dedektör ve diğer kısımlar için Germanyum dedektör kullanılmıştır. Dedektör, dış ortamdan gelebilecek yüzey kirlenmelerini önlemek için 25 µm kalınlığında berilyum pencere korumalıdır. Dedektörün bulunduğu ölçüm laboratuarı kurşun kaplıdır. Dedektörün bu laboratuar içindeki konumu mümkün olduğunca az saçılmış X-ışını alacak şekilde belirlenmiştir. Ölçü alma süresince çevresel şartların değiştirilmemesine dikkat edilmiştir. Birinci deney geometrisinde ^{137}Ba ve ^{241}Am radyasyon kaynakları kullanılmıştır. İkinci deney geometrisinde ise Cs ve Eu radyoaktif kaynaklar kullanılmıştır. Ölçümler için kullanılan deney geometrisi Şekil 1'de verilmiştir.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ





Şekil 1. Deney geometrisinin şematik gösterimi.

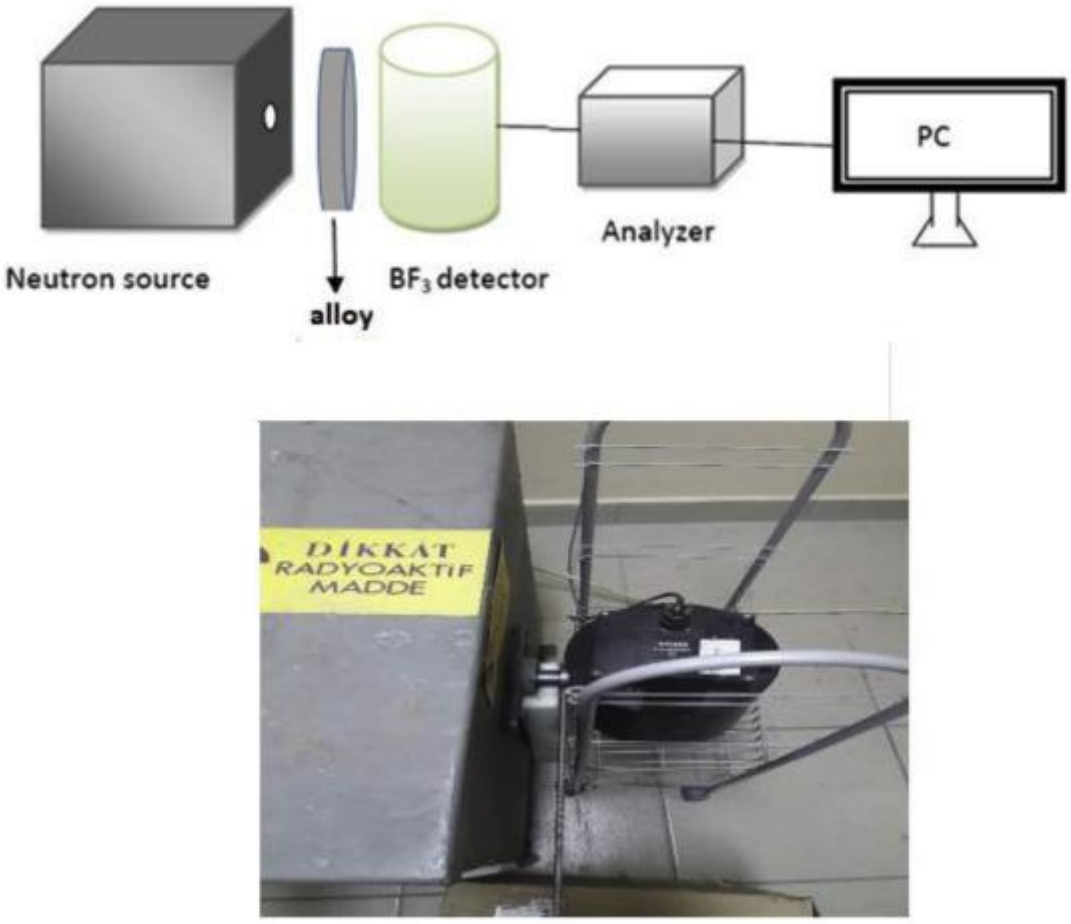
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

2.2. Nötron Dozu Ölçümleri

Hızlı nötronlar bir koruyucu malzemeden geçtiğinde, etkili soğurma tesir kesiti (ΣR, cm^{-1}) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$N = N_0 e^{-\Sigma x}$$

burada N_0, başlangıç doz eşdeğeri oranını belirtir, N, alaşımdan geçen nötronların doz eşdeğeri oranını belirtir ve x, numunenin kalınlığıdır. Bu araştırmada kullanılan numuneler, nötron enerjisi ~ 4.5 MeV olan 241Am-Be kaynağı tarafından ışınlanmıştır. Nötron doz eşdeğeri oranının (µSv / s) değerlerini belirlemek için bir Canberra NP100B BF3 oransal sayacı kullanıldı ve sonuçlar, ADM-606M model taşınabilir oran ölçer kullanılarak tahmin edildi. Şekil-2, nötron iletim ölçümlerinin deneysel kurulumunu göstermektedir.



Şekil 2. Nötron ölçüm sistemi deney geometrisinin şematik gösterimi.

2.3. Saçtırma (Sputterıng) Kristal Büyütme Yöntemi

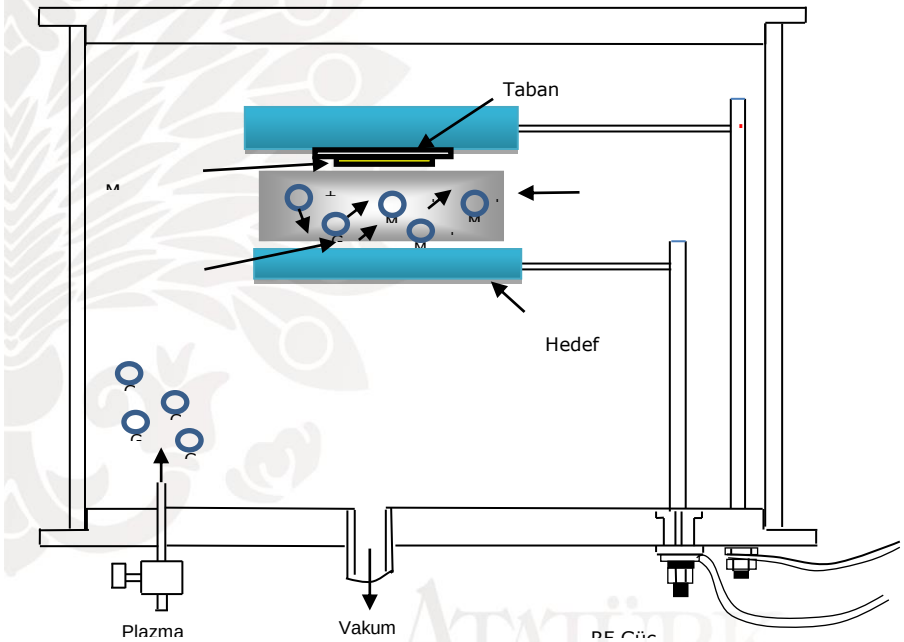
Sıçratma tekniği, hedef atomların plazma iyon bombardımanı yardımıyla koparılarak taban yüzeyine biriktirme yöntemi olarak tanımlanabilir. Bombardıman işlemi, ince bir film gibi bir taban üzerine yoğunlaşabilen hedef atomların saçılmasına neden olur. İkincil elektronlar da iyon bombardımanın bir sonucu olarak hedef yüzeyinden yayılır. Bu metot da genellikle argon (Ar) gazı kullanılır. Bu gaz iyonize edilmiş ve hedef malzemeye doğru hızlandırılmış olduğundan hedef atomlara çarparak enerji ve momentum aktarımı sonucu hedefteki atomları kopartarak iyonizasyon gerçekleştirilir.

- Rf (Rf Manyetik Alan) Sıçratma Yöntemi:

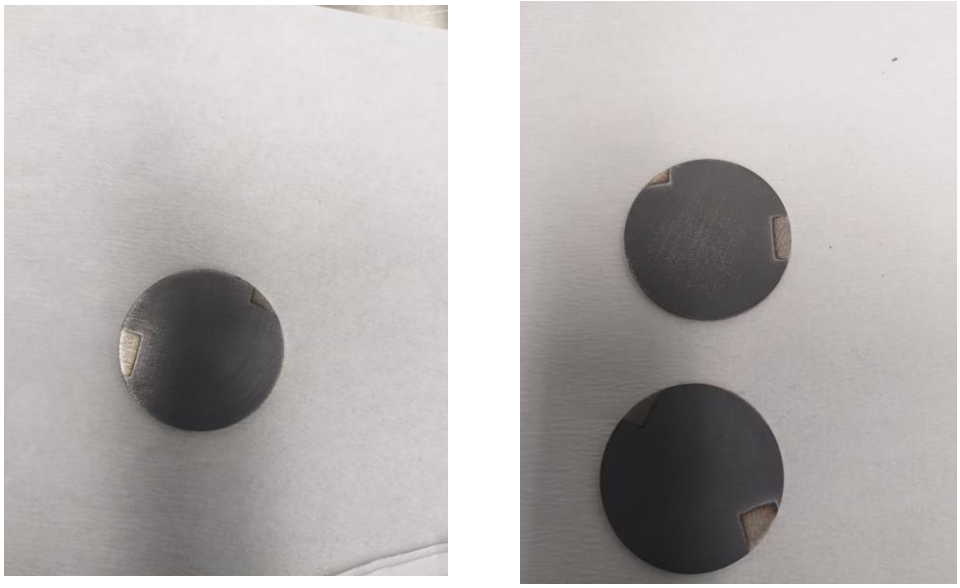
RF Sıçratma yönteminde, iyonlaşmış argon atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektrik alana dik doğrultuda bir RF manyetik alan uygulanır ve bu manyetik alan ile hedef üzerinde iyon konsantrasyonu artırılmış olur. Manyetik alan etkisi, hedeften kopan elektronların yüzey etrafında dolanmasına neden olur. Dolanan bu elektronlar, yüzey üzerinde yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak RF sıçratma sürecini başlatır.

Başka bir ifadeyle RF sıçratma yöntemi ile kaplama, her şeyden önce bir vakum-kaplama prosesidir. Bu yöntemde parıltılı bir boşalma için düşük basınçlara kadar inilir. Plazma içerisindeki iyonlar yardımıyla, kaplama malzemesi olan hedeften, atom ya da moleküller sökülür. Plazma oluşturulurken, hedef (katot) ve taban malzeme (anot) elektrotları arasına RF gerilim uygulanır. Hedef ile taban malzemenin her ikisi de elektriksel olarak iletken ise RF güç kaynağı kullanılırken, hedef iletken ya da yalıtkan ve taban malzeme yalıtkan (polimer ya da seramik) ise RF güç kaynağı kullanılır. Elektrotlar arasında parıltılı bir boşalma plazmasının oluşabilmesi için vakum ortamına Ar gibi inert gaz gönderilir. Sıçratma terimi, hedef yüzeyinden atomik seviyede parçacık çıkarma prosesini tamamlar. Hedef, plaka şeklinde olabileceği gibi, taban malzeme de hedefe paralel şekilde konumlandırılmış plaka şeklinde olabilir. Hedef ile taban malzeme boyutları hemen hemen birbirine eşittir ve kaplanacak malzeme için soğutma düzeneği de mevcuttur. Plazma bölgesi, hedeften çıkan birincil elektronlar, bu elektronlar sayesinde gazın iyonizasyonu sonucu sökülen atom ve moleküller ve taban malzemeye çarpması sonucunda ortaya çıkan ikincil elektronlar, yeniden sıçratılmış iyonlar, saçılan atomlar ve fotonlardan meydana gelir. Hedef ile taban malzeme arasına verilen RF gerilim neticesinde, hedeften çıkan elektronlar argon gazını iyonize edecek, iyonize olan bu (+) yüklü parçacıklar de (-) yüklü hedefe çarpıp oradan atom ya da molekül sökecek, sıçratma işlemi başlamış olacaktır. Sökülen bu atomlar taban malzemeye doğru yönlenecek ve taşıdıkları kinetik enerjiye göre taban malzeme üzerine birikmeye başlayacaktır. Böylece kaplama olayı

yavaş yavaş gerçekleşmeye başlayacaktır. Bu esnada (+) yüklü iyonlar, hedeften atom ya da molekül çıkarmanın yanı sıra, elektron da sökerler. Hedeften çıkan bu elektronlar, daha önce oluşturulmuş plazmanın sürekliliği açısından oldukça önemlidir, fakat bu elektronlar taban malzemeye ulaşıp yüzeyden elektron sökebilecek derecede bir enerjiye sahip olurlarsa, taban malzemede ikincil elektronların yayılmasına neden olabilirler. Bu ise filmin büyümesini yavaşlatır ya da tamamen durdurabilir. Ayrıca (+) yüklü iyonların çok fazla enerjiye sahip olması durumunda, taban malzemeye ulaşıp atom mobilitesini artırarak yeniden sıçratma olayına yol açması da söz konusudur. Bu olay; kaplamanın yeniden sökülmesi olayıdır ki, bu kesinlikle istenmeyen bir durumudur. Bu nedenle, kaplama hızı mümkün oldukça yeniden sıçratmaya yol açmayacak şekilde düşük seviyede tutulur. Öyle ki, sıçratma proseslerinde dakikada yaklaşık olarak birkaç °A'luk bir kaplama yapılırken, buharlaştırma proseslerinde bu oran daha da büyük tutulabilir.



Şekil 3. Sıçratma ile kaplama sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 4. Çelik yüzeylere saçtırma yöntemi kullanılarak Borlu bileşiklerle kaplanması

2.4. Teorik Hesaplamalar

Bileşikler ya da alaşımlar için, toplam kütle zayıflama katsayısı (μ_ρ, cm2/g) aşağıdaki ilişki ile belirlenir;

$$\mu_\rho = \sum_i w_i \left(\mu_\rho\right)_i$$

burada w_i ve μ_ϱ, kurucu eleman i'in sırasıyla ağırlık fraksiyonu ve kütle zayıflatma katsayısıdır. Teorik olarak numunenin kütle zayıflama katsayısını hesaplamak için WinXCOM kullanılmıştır [14].

X-ışını veya gamma radyasyonunun emilimi ve saçılması elementlerin yoğunluğu ve atom numaraları ile ilgilidir. Kompozit malzemelerde ise etkin atom numarası (Zeff) ve etkin elektron yoğunluğu (Neff) ile ilgilidir. Atom numarası elementler için ayırt edici bir özelliktir. Farklı atom numaralarına sahip elementlerden oluşan bileşikler için Efektif atom numarası terimi kullanılır. Efektif atom numarası ve efektif elektron yoğunluğu teknolojik ve mühendislik alanında geniş bir kullanıma sahip olup özellikle radyoterapide radyasyon dozunun doğru olarak belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Bileşiklerin teorik ve deneysel Efektif atom numaraları aşağıdaki formülü yardımıyla hesaplandı.

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_\rho)_i}{\sum_j f_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_\rho)_j}$$

Etkili elektron yoğunluğu (Nel) birim kütle başına elektron sayısını ifade eder ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplandı.

$$N_{el} = N_A \frac{Z_{eff}}{\langle A \rangle} (\text{electrons/g})$$

Burada N_A Avogadro numarası, Ai, elementin atom ağırlığıdır, fi, i. elementinin, materyaldeki tüm elementlerle ilişkili toplam atom sayısına göre atom sayısıdır, Zi, i elementin atom numarasıdır.

Yarı değerli katman (HVL), foton yoğunluğunu yarıya düşüren kalınlık olan herhangi bir foton zayıflatma malzemesinin tasarımında ve seçiminde kullanılan bir parametredir [15];

HVL = 0.693 / μ

burada μ doğrusal zayıflama katsayısını belirtir.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

3. Bulgular

3.1. Alaşımlar

Projenin ilk kısmında demir- bor alaşımları için pelletler hazırlandı. Bu alaşımlardaki bor miktarı %1 den %20 e kadar değiştirildi. Alaşımlar için radyasyon ve nötron ölçümleri alındı. Alınan ölçümler teorik ve deneysel olarak hesaplanıp karşılaştırıldı. Bu ölçüm sonuçları tablolar ve grafikler halinde aşağıda sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı enerjiler için alaşımların deneysel ve teorik efektif atom numaraları (Zeff)

	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
Energy (MeV)	**FeB1**	**FeB1**	**FeB2**	**FeB2**	**FeB4**	**FeB4**	**FeB6**	**FeB6**	**FeB8**	**FeB8**	**FeB10**	**FeB10**
5,32E-02	25,695	25,596	25,051	25,274	24,547	24,654	24,221	24,092	23,655	23,592	23,312	23,092
5,95E-02	25,415	25,602	25,100	25,276	24,503	24,666	24,225	24,086	23,768	23,561	23,296	23,055
7,96E-02	25,755	25,620	25,877	25,270	24,960	24,605	23,901	23,981	23,309	23,404	22,774	22,845
8,10E-02	25,414	25,622	25,165	25,269	24,187	24,606	23,846	23,982	23,302	23,384	22,916	22,826
1,22E-01	25,613	25,667	25,094	25,229	24,200	24,404	23,193	23,606	22,336	22,872	22,053	22,147
2,76E-01	25,484	25,835	25,104	25,077	23,326	23,656	22,270	22,361	21,030	21,101	19,960	20,054
3,03E-01	25,329	25,851	25,128	25,061	23,259	23,591	22,060	22,256	21,076	21,108	19,594	19,871
3,44E-01	25,351	25,872	25,092	25,042	23,318	23,579	22,070	22,133	20,683	20,824	19,551	19,727
3,56E-01	25,613	25,877	25,018	25,038	23,107	23,492	22,092	22,105	20,708	20,852	19,474	19,729
3,84E-01	25,450	25,887	25,263	25,030	23,435	23,454	22,002	22,049	20,353	20,793	19,228	19,638
7,79E-01	25,606	25,938	24,700	24,991	23,536	23,288	21,700	21,793	20,364	20,459	19,120	19,294
9,64E-01	25,678	25,945	24,147	24,993	23,288	23,269	21,171	21,766	20,378	20,425	19,120	19,257

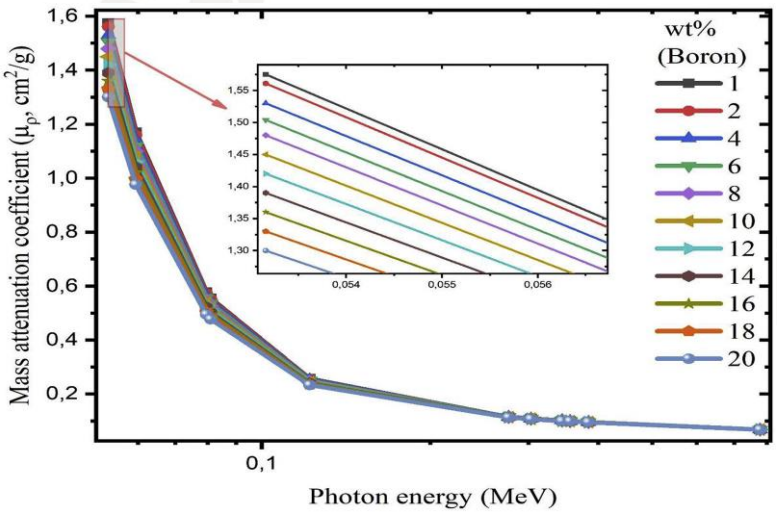
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
Energy (MeV)	**FeB12**	**FeB12**	**FeB14**	**FeB14**	**FeB16**	**FeB16**	**FeB18**	**FeB18**	**FeB20**	**FeB20**
5,32E-02	22,721	22,620	22,481	22,165	21,995	21,732	21,464	21,317	20,703	20,914
5,95E-02	22,906	22,581	22,313	22,125	21,989	21,692	21,493	21,251	20,819	20,848
7,96E-02	22,243	22,314	21,773	21,819	21,176	21,334	20,750	20,865	20,356	20,426
8,10E-02	22,209	22,298	21,840	21,794	21,374	21,313	20,840	20,834	20,236	20,385
1,22E-01	21,299	21,489	20,722	20,816	20,194	20,212	19,689	19,586	19,207	19,024
2,76E-01	18,967	19,093	18,080	18,211	17,018	17,261	16,260	16,530	15,185	15,851
3,03E-01	18,290	18,893	18,015	18,008	17,136	17,179	16,270	16,427	15,189	15,605
3,44E-01	18,556	18,732	17,336	17,830	16,416	16,982	15,675	16,243	14,990	15,409
3,56E-01	18,173	18,686	17,237	17,756	16,215	16,909	15,443	16,123	15,010	15,428
3,84E-01	18,064	18,606	17,447	17,671	16,616	16,825	15,825	16,040	14,984	15,335
7,79E-01	18,038	18,259	17,050	17,318	16,141	16,440	15,294	15,667	14,476	14,960
9,64E-01	18,005	18,214	17,013	17,283	16,019	16,418	15,131	15,615	14,432	14,919

Tablo 2. WinXCOM ve deneysel ölçümler kullanılarak alaşım numunelerinin hesaplanmış kütle soğurma katsayıları (μ_ϱ)

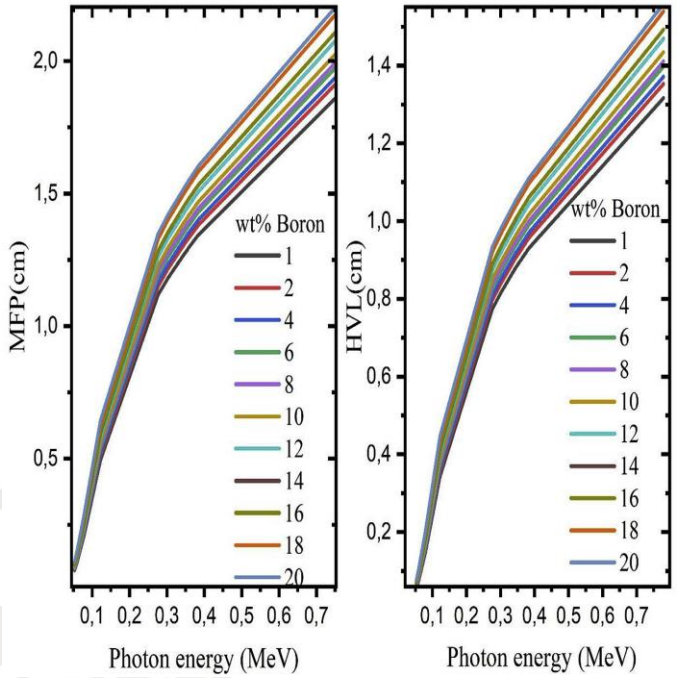
Table 2
Calculated mass attenuation coefficients (μ_ρ) of the alloy samples using WinXCOM and experimental measurements.

Energy (MeV)	FeB1			FeB2			FeB4			FeB6			FeB8		
	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	%error
5.32E-02	1.5983	1.5752	0.0551	1.5103	1.5609	0.0546	1.5052	1.5300	0.0536	1.5335	1.5040	0.0526	1.4951	1.4800	0.0518
5.95E-02	1.1384	1.1697	0.0409	1.1304	1.1595	0.0406	1.1124	1.1400	0.0399	1.1423	1.1188	0.0392	1.1357	1.1000	0.0385
7.96E-02	0.5873	0.5770	0.0202	0.6203	0.5727	0.0200	0.5914	0.5640	0.0197	0.5493	0.5554	0.0194	0.5400	0.5470	0.0191
8.10E-02	0.5404	0.5552	0.0194	0.5436	0.5511	0.0193	0.5134	0.5430	0.0190	0.5250	0.5347	0.0187	0.5202	0.5260	0.0184
1.22E-01	0.2551	0.2565	0.0090	0.2518	0.2552	0.0089	0.2479	0.2530	0.0089	0.2402	0.2502	0.0088	0.2351	0.2480	0.0087
2.76E-01	0.1133	0.1154	0.0040	0.1154	0.1153	0.0040	0.1130	0.1150	0.0040	0.1142	0.1147	0.0040	0.1136	0.1140	0.0040
3.03E-01	0.1065	0.1093	0.0038	0.1096	0.1092	0.0038	0.1071	0.1090	0.0038	0.1077	0.1088	0.0038	0.1088	0.1090	0.0038
3.44E-01	0.0994	0.1019	0.0036	0.1021	0.1018	0.0036	0.1007	0.1020	0.0036	0.1012	0.1015	0.0036	0.1002	0.1010	0.0035
3.56E-01	0.0989	0.1001	0.0035	0.0999	0.1000	0.0035	0.0980	0.0999	0.0035	0.0997	0.0998	0.0035	0.0988	0.0996	0.0035
3.84E-01	0.0944	0.0963	0.0034	0.0973	0.0962	0.0034	0.0960	0.0961	0.0034	0.0958	0.0960	0.0034	0.0937	0.0959	0.0034
7.79E-01	0.0673	0.0683	0.0024	0.0674	0.0682	0.0024	0.0689	0.0682	0.0024	0.0679	0.0682	0.0024	0.0678	0.0681	0.0024

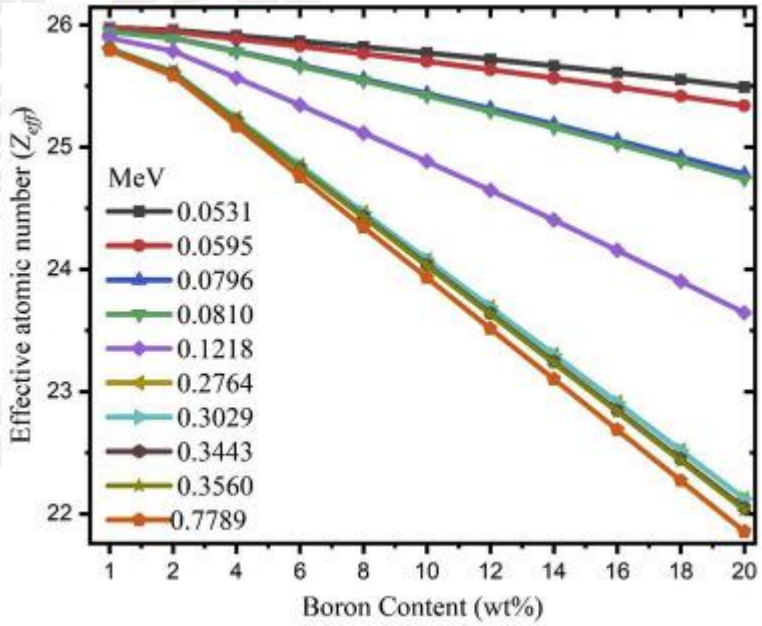
Energy (MeV)	FeB10			FeB12			FeB14			FeB16			FeB18			FeB20	
	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	Theo.	Expt.	%error	Theo.	Expt.	Theo.	Expt.
5.32E-02	1.5021	1.4500	0.0508	1.4440	1.4200	0.0497	1.4643	1.3900	0.0487	1.4221	1.3600	0.0476	1.3638	1.3300	0.0466	1.2527	1.3000	0.0455
5.95E-02	1.1210	1.0800	0.0378	1.1162	1.0600	0.0371	1.0716	1.0400	0.0364	1.0707	1.0200	0.0357	1.0362	0.9960	0.0349	0.9712	0.9760	0.0342
7.96E-02	0.5327	0.5380	0.0188	0.5239	0.5290	0.0185	0.5176	0.5210	0.0182	0.5007	0.5120	0.0179	0.4949	0.5030	0.0176	0.4901	0.4950	0.0173
8.10E-02	0.5245	0.5180	0.0181	0.5038	0.5100	0.0179	0.5052	0.5020	0.0176	0.4982	0.4940	0.0173	0.4854	0.4850	0.0170	0.4672	0.4770	0.0167
1.22E-01	0.2427	0.2450	0.0086	0.2385	0.2430	0.0085	0.2378	0.2400	0.0084	0.2376	0.2380	0.0083	0.2374	0.2350	0.0082	0.2372	0.2330	0.0082
2.76E-01	0.1134	0.1140	0.0040	0.1132	0.1140	0.0040	0.1131	0.1140	0.0040	0.1113	0.1130	0.0040	0.1110	0.1130	0.0040	0.1079	0.1130	0.0040
3.03E-01	0.1063	0.1080	0.0038	0.1041	0.1080	0.0038	0.1080	0.1080	0.0038	0.1077	0.1080	0.0038	0.1069	0.1080	0.0038	0.1039	0.1070	0.0037
3.44E-01	0.1000	0.1010	0.0035	0.1000	0.1010	0.0035	0.0981	0.1010	0.0035	0.0973	0.1010	0.0035	0.0973	0.1010	0.0035	0.0972	0.1000	0.0035
3.56E-01	0.0981	0.0995	0.0035	0.0964	0.0993	0.0035	0.0960	0.0992	0.0035	0.0948	0.0990	0.0035	0.0948	0.0989	0.0035	0.0960	0.0988	0.0035
3.84E-01	0.0936	0.0957	0.0033	0.0927	0.0956	0.0033	0.0942	0.0955	0.0033	0.0942	0.0954	0.0033	0.0940	0.0953	0.0033	0.0930	0.0952	0.0033
7.79E-01	0.0675	0.0681	0.0024	0.0673	0.0681	0.0024	0.0671	0.0681	0.0024	0.0668	0.0680	0.0024	0.0664	0.0680	0.0024	0.0657	0.0680	0.0024



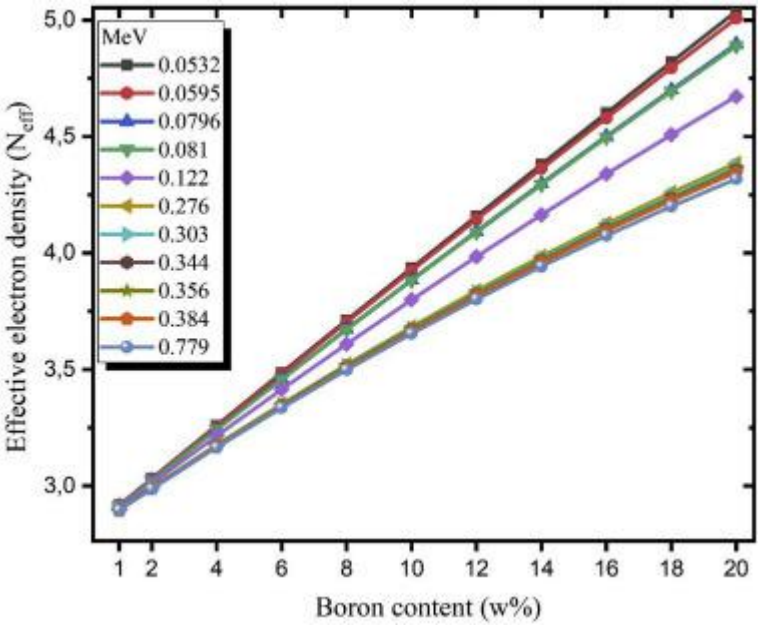
Grafik 1.Fe-B alaşımlarının foton enerjisine karşı kütle zayıflama katsayısı.



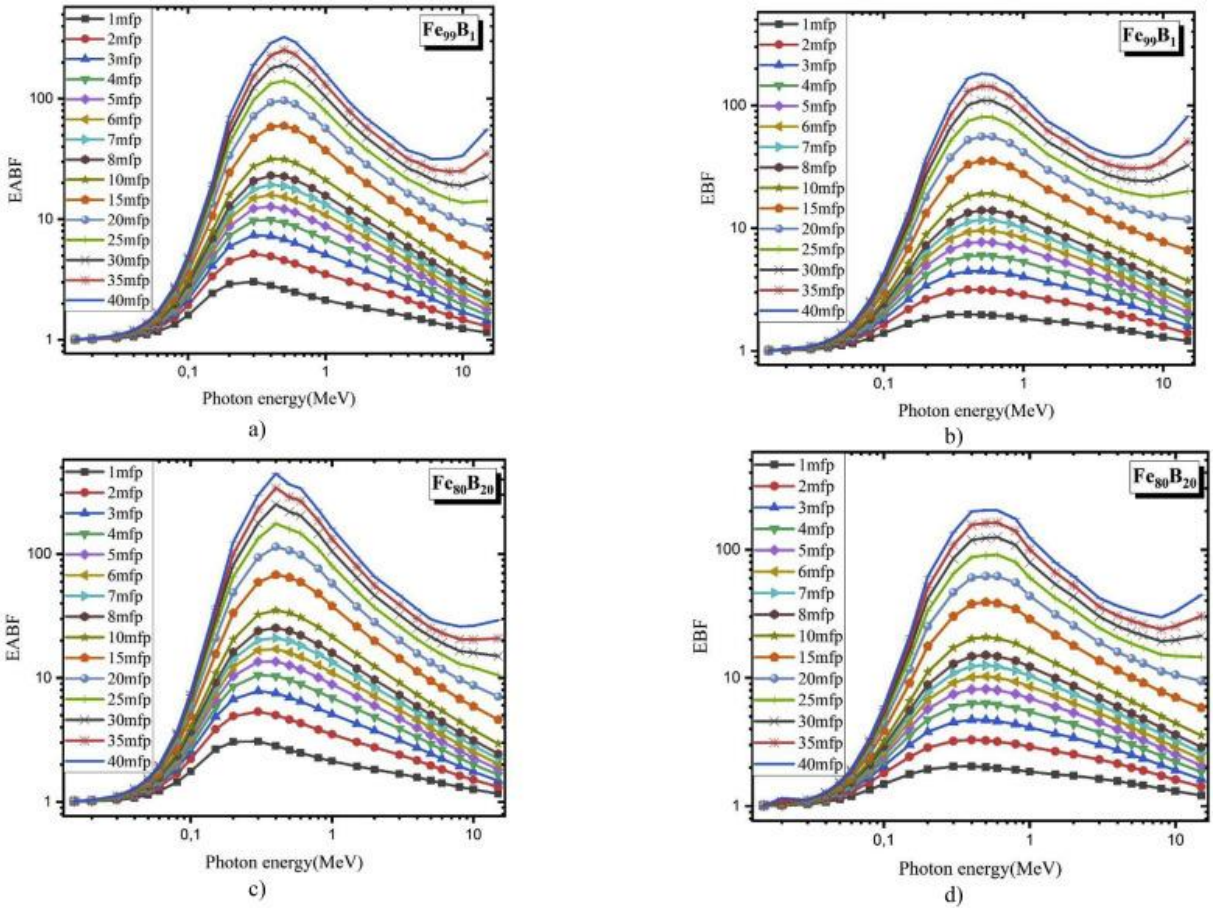
Grafik 2.Fe-B alaşımlarının HVL ve MFP değerleri



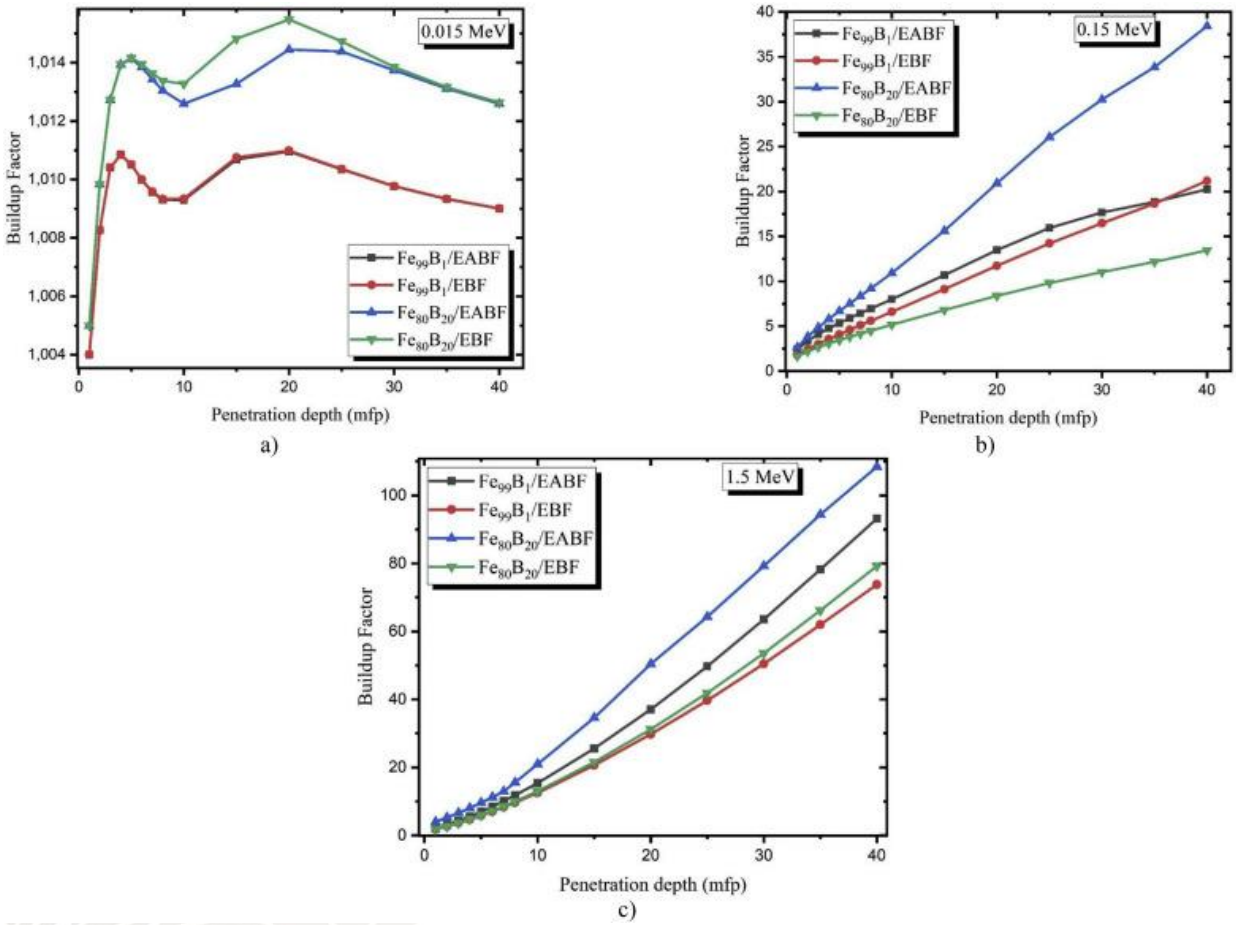
Grafik 3. Alaşımlarda etkili atom sayılarının bor miktarı yüzdesi ile değişimi



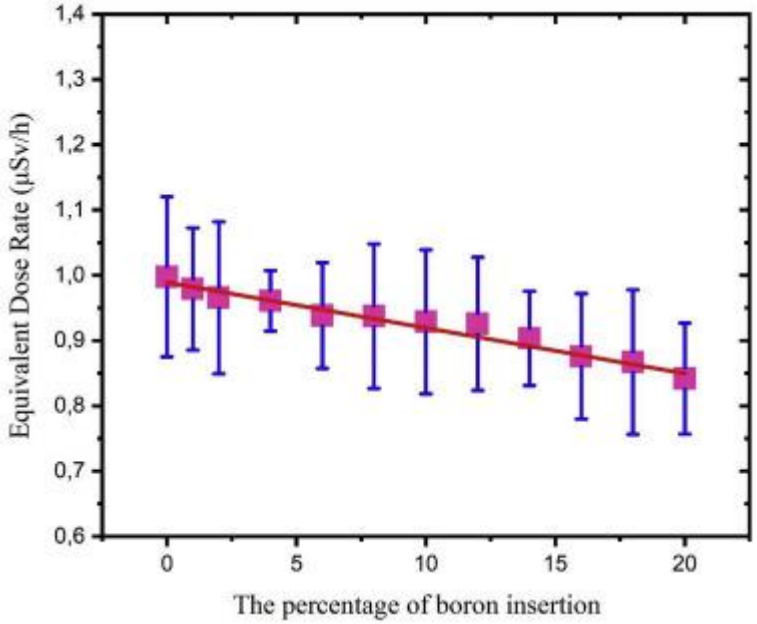
Grafik 4. Fe-B alaşımlarının etkili elektron yoğunluklarının foton enerjisi ile değişimi.



Grafik 5. 0.015e15 MeV enerji Aralığında 40 mfp'ye kadar Fe-B alaşımlarının EABF ve EBF değerleri.



Grafik 6. Fe-B alaşımlarının EABF ve EBF değerleri ile belirli enerjilerdeki nüfuz etme derinliği



Grafik 7. Deneysel olarak elde edilen eşdeğer nötron doz oranının alaşımdaki bor yüzdesi ile değişimi

3.2. Bileşikler

Projenin ikinci kısmında Bor Karbür(B4C), Bor Nitrür (BN), Borik Asit (H3BO3), ferrobor (Fe2B), Lantanyum Boride (BLaO3), Sodyum Borohydride (NaBH4), Borax, Titanyum Boride (TiB2), Zirkonyum Boride(ZrB2) gibi bileşiklerin teorik ve deneysel foton parametreleri farklı enerjiler için elde edildi. Bu sonuçlar aşağıda tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

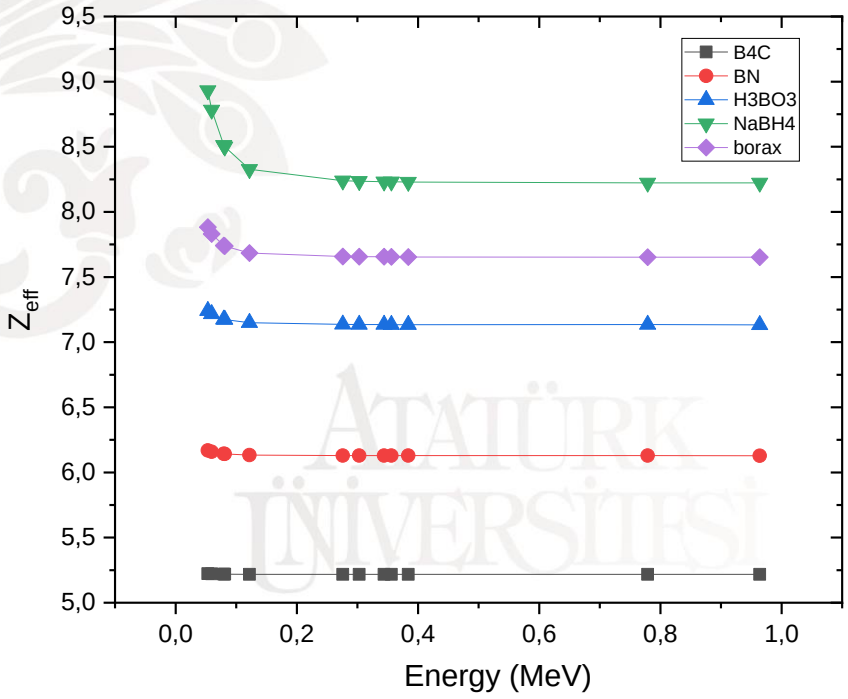
Tablo 3. Bileşiklerin etkin atom numaraları

	Zeff Direct method								
Energy (MeV)	**B4C**	**BN**	**H3BO3**	**Fe2B**	**BLaO3**	**NaBH4**	**borax**	**TiB2**	**ZrB2**
5,32E-02	5,223164	6,168488	7,241015	25,79976	56,72316	8,931802	7,883228	20,87313	39,75464
5,95E-02	5,221696	6,158646	7,216525	25,73957	56,64972	8,783162	7,830567	20,58087	39,67712
7,96E-02	5,219508	6,143275	7,175312	25,51067	56,33173	8,51185	7,740905	19,63517	39,34762
8,10E-02	5,219423	6,142668	7,173548	25,49353	56,30486	8,500241	7,737212	19,57318	39,32028
1,22E-01	5,21813	6,133881	7,149669	25,01896	55,26285	8,327824	7,684282	18,21022	38,34845
2,76E-01	5,217599	6,129731	7,136258	24,34181	49,79423	8,238792	7,657316	16,97648	35,20789
3,03E-01	5,217561	6,129556	7,135316	24,30772	49,03236	8,235617	7,656194	16,93156	34,93398
3,44E-01	5,217493	6,1293	7,135983	24,27079	47,99728	8,232055	7,655572	16,87798	34,59938
3,56E-01	5,217476	6,129234	7,134553	24,26241	47,75497	8,231275	7,65486	16,86788	34,52447
3,84E-01	5,217446	6,129092	7,133726	24,24599	47,21241	8,229724	7,65418	16,84564	34,36756
7,79E-01	5,217421	6,128829	7,135047	24,17469	43,93926	8,222848	7,652958	16,7492	33,60831
9,64E-01	5,217323	6,128318	7,132533	24,16677	43,52327	8,222576	7,651978	16,73766	33,51926

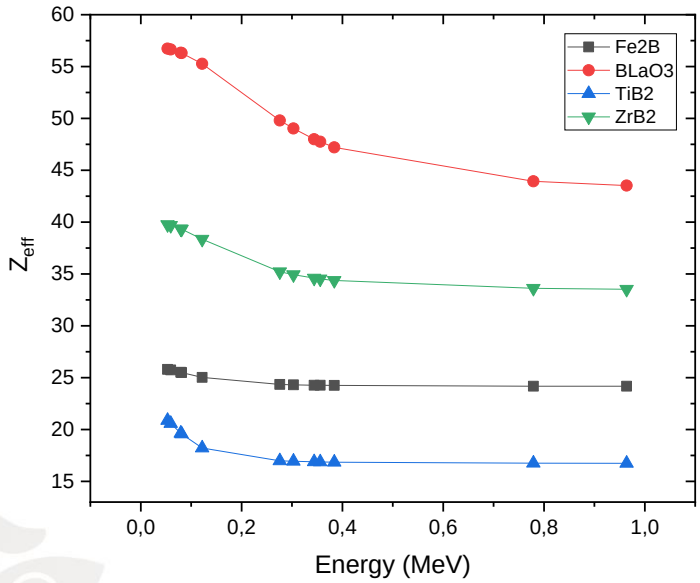
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Tablo 4. Bileşiklerin etkin elektron yoğunlukları

	Neff Direct method (electrons/g*10^{23}).								
Energy (MeV)	**B4C**	**BN**	**H3BO3**	**Fe2B**	**BLaO3**	**NaBH4**	**borax**	**TiB2**	**ZrB2**
5,32E-02	2,845304	2,993374	4,934845	3,803467	8,635509	8,527495	5,350817	5,423855	6,362377
5,95E-02	2,844504	2,988598	4,918155	3,794594	8,624329	8,385583	5,315073	5,347912	6,34997
7,96E-02	2,843312	2,981138	4,890067	3,760849	8,575918	8,126552	5,254214	5,102173	6,297237
8,10E-02	2,843265	2,980844	4,888866	3,758322	8,571828	8,115469	5,251707	5,086064	6,292862
1,22E-01	2,842561	2,97658	4,872591	3,688359	8,413193	7,950856	5,21578	4,731901	6,137329
2,76E-01	2,842272	2,974566	4,863451	3,588532	7,580652	7,865855	5,197477	4,411316	5,63471
3,03E-01	2,842251	2,974481	4,86281	3,583506	7,464665	7,862824	5,196715	4,399643	5,590873
3,44E-01	2,842214	2,974357	4,863265	3,578062	7,307085	7,859422	5,196293	4,385721	5,537323
3,56E-01	2,842205	2,974325	4,86229	3,576827	7,270195	7,858678	5,19581	4,383094	5,525335
3,84E-01	2,842189	2,974256	4,861726	3,574406	7,187597	7,857197	5,195348	4,377318	5,500222
7,79E-01	2,842175	2,974129	4,862627	3,563894	6,689294	7,850633	5,194519	4,352258	5,378712
9,64E-01	2,842121	2,973881	4,860913	3,562727	6,625964	7,850372	5,193854	4,349259	5,364461



Grafik 8. Bileşiklerin farklı enerjilerdeki etkin atom numarası değerleri.



Grafik 9. Bileşiklerin farklı enerjilerdeki etkin atom numarası değerleri.

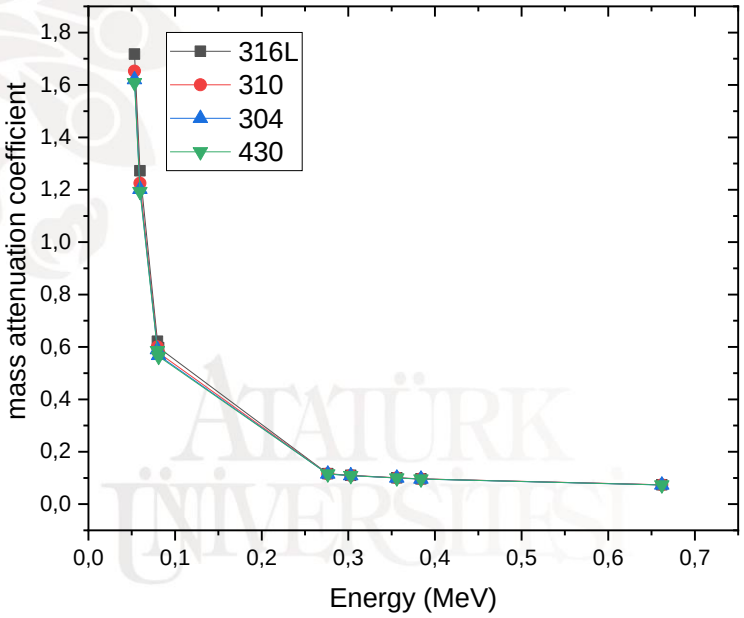
3.3. Çelikler

Projenin son kısmında 316L, 310, 304, 430 paslanmaz çelikler için yalın halde radyasyon ölçümleri alındı daha sonra her bir çelik saçtırma metodu (sputter) kullanılarak üzeri bor karbür ve bor nitrür ile kaplanarak yeniden ölçümler alındı. Alınan öcüm sonuçları ve değerlendirmeleri sonucu elde edilen veriler aşağıda verilmiştir.

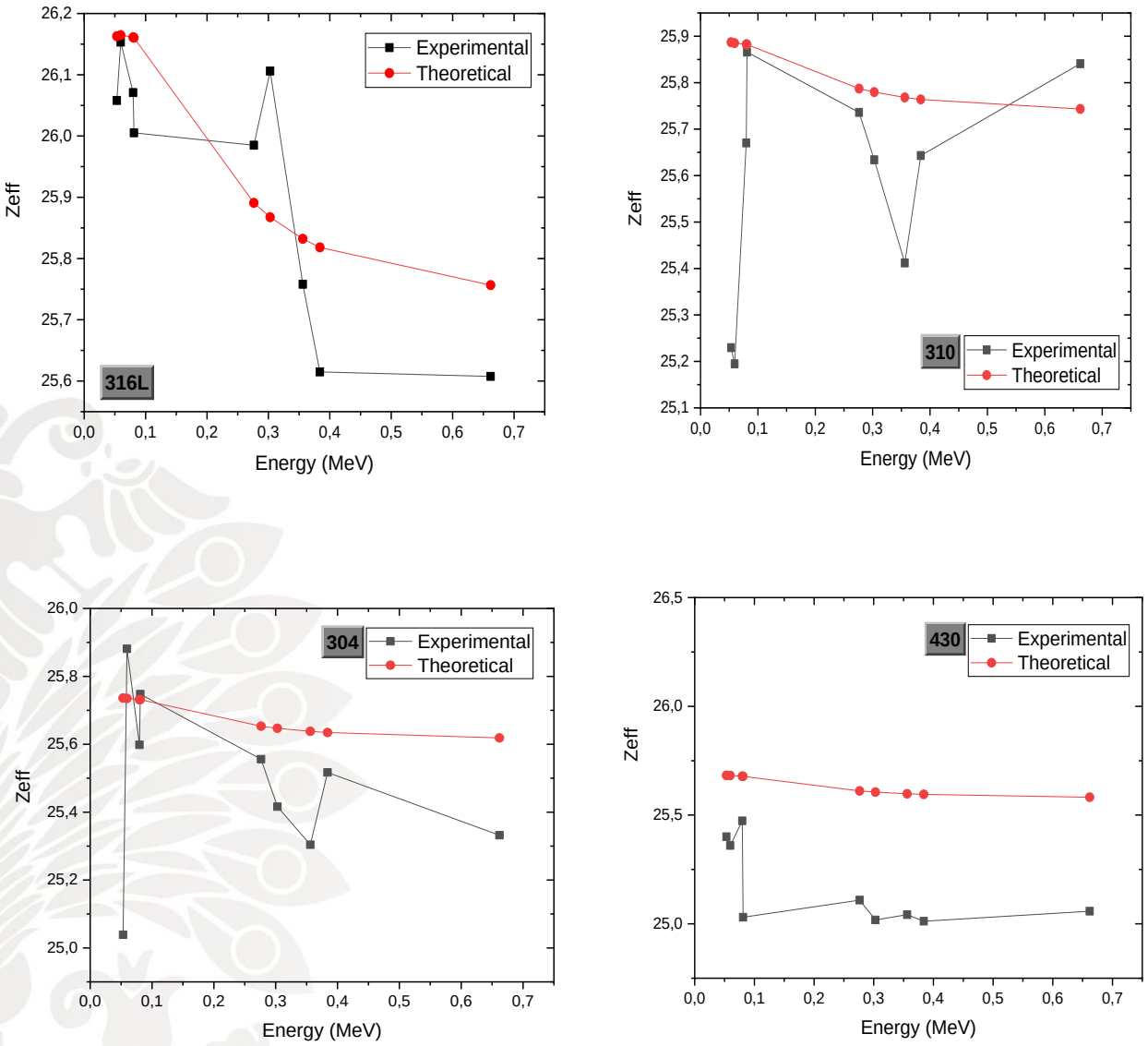
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Tablo 5. Çeliklerin etkin elektron yoğunlukları

Neff Direct method (electrons/g*10^{23}).								
	316L		**310**		**304**		**430**	
Energy (MeV)	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical
5,32E-02	2,802	2,813	2,745	2,816	2,732	2,808	2,772	2,803
5,95E-02	2,812	2,814	2,741	2,816	2,824	2,808	2,767	2,803
7,96E-02	2,804	2,813	2,793	2,816	2,793	2,808	2,780	2,802
8,10E-02	2,829	2,813	2,814	2,816	2,809	2,808	2,731	2,802
2,76E-01	2,794	2,784	2,800	2,805	2,789	2,799	2,740	2,795
3,03E-01	2,807	2,782	2,789	2,805	2,773	2,799	2,730	2,794
3,56E-01	2,770	2,778	2,765	2,803	2,761	2,798	2,798	2,793
3,84E-01	2,754	2,776	2,790	2,803	2,784	2,797	2,729	2,793
6,62E-01	2,754	2,770	2,811	2,801	2,764	2,795	2,734	2,792



Grafik 9. Çeliklerin foton enerjisine karşı kütle soğurma katsayısı.



Grafik 10. Çeliklerin farklı enerjilerdeki teorik ve deneysel etkin atom numarası değerleri.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

4. Tartışma ve Sonuç

İncelenen alaşımların kütle zayıflama katsayıları (μρ) 0.0532-0.7789 MeV aralığındaki foton enerjilerine bağlı olarak Grafik 1'de gösterilmektedir. Grafik 1'de foton enerjisi arttıkça, ρ değerlerinin çarpıcı bir şekilde 0.2 MeV'ye düştüğü açıktır. Bunun nedeni, kesiti Z^{4-5} / $E^{3.5}$ ile orantılı olan fotoelektrik etkinin düşük enerjilerde ana etkileşim mekanizması olmasıdır. Bu bölgede, Fe80B20 en yüksek μρ değerlerine sahipken, en düşük μρ değerleri Fe99B1 alaşımına aittir. Alaşımdaki bor miktarı arttıkça, alaşımın μρ değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bor elementi demirden daha küçük bir atom numarasına sahip olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. 0.1-0.7 MeV aralığındaki μρ değerleri, Z ile Compton saçılma kesitinin doğrusal varyasyonu nedeniyle tüm alaşımlar için neredeyse aynıdır ve sıfıra yakındır.

Hazırlanan alaşımların yarı değer katmanı (HVL) ve Ortalama Serbest Yol (MFP) değerleri gama enerjisine karşı Grafik 2'de gösterilmiştir. Grafik 2'den, HVL ve MFP değerlerinin artan foton enerjisi ile arttırıldığı açıktır. Radyasyon kalkanı parametrelerini incelerken, HVL ve MFP değerlerinin küçük olması istenir. HVL ve MFP değerlerinin alaşım içeriğindeki artan Bor yerleştirme miktarı ile arttığı görülmektedir. Fe99B1, gama foton yoğunluğunu azaltan başarılı bir alaşımdır.

Etkili atom numarası (Zeff) için elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Teorik ve deneysel Zeff verileri arasında küçük sapmalar olmasına rağmen, bunlar genellikle birbiriyle uyumludur. Bu sapmaların nedeninin deneysel ölçüm hatalarından ve pik alanların analizinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafik 3'te alaşımların Zeff değerleri alaşımlara bor ekleme miktarına bağlı olarak verilmektedir. Alaşımdaki bor yüzdesi arttıkça Zeff'in azaldığı açıktır. Aynı zamanda etkili atom numarasının foton enerjisine bağlı olduğu da görülmektedir. Daha küçük enerjilerde, Zeff değişimi bor içeriğine göre küçükken, daha yüksek

enerjilerde (0,276- 0,964 MeV) bu değişiklik keskin bir azalmaya sahiptir Daha küçük enerjilerde, Zeff değerleri artan bor içeriği ile geniş bir aralıkta değişmez. Daha yüksek enerjilerde (0.276 - 0.964 MeV) bu değişiklik neredeyse doğrusaldır. Zeff, fotoelektrik etkinin baskın olduğu düşük enerjilerde en yüksek değerlerini alır. Ferro bor alaşımları için bor katkısının arttırılmasının gama ışını emilimini olumsuz etkilediği sonucuna varabiliriz.

Bileşikler veya alaşımlar için etkili elektron yoğunluğu, elektronların bir atom veya molekülün etrafındaki belirli bir bölgede bulunma olasılığının bir ölçüsüdür. Grafik-4, farklı bor muhtevasına sahip alaşımların etkili elektron yoğunluklarını (Neff) temsil etmektedir. Neff değerleri, Zeff'deki gibi enerjiye bağlı olarak değişir. Etkili elektron yoğunluğunun artan enerji değeri ile azaldığı ve bu azalmanın bor içeriği yüksek alaşımlarda daha önemli olduğu görülmektedir. Zeff değerleri, artan bor miktarı ile doğrusal bir düşüş gösterirken, Neff değerleri arttı. Büyük etkili atom ağırlığı olan alaşımlar daha küçük Neff değerlerine sahiptir.

Grafik-5 (a-d), 0.015-15 MeV aralığında ve 1-40 mfp'de en yüksek ve en düşük bor içeriğine sahip alaşımların Enerji Emilimi (EABF) ve Pozlama (EBF) Artış Faktörü değerlerinin varyasyonunu sunar. Grafik-5 incelendiğinde, üç foton etkileşim mekanizmasının varlığı görülmektedir. EABF ve EBF, düşük ve yüksek enerji bölgesindeki en küçük değerleri gösterir. Çünkü fotoelektrik etki ve çift oluşum süreçlerinin gerçekleştiği enerji bölgelerinde, fotonlar ya tamamen kaybolur ya da enerjileri önemli ölçüde azalır. Compton saçılımı ılımlı enerjilerde etkili bir işlem olduğundan, ikincil saçılma artar ve alaşımların EABF-EBF değerleri o bölgede maksimum değerleri alır. Grafik-5b ve d'den Fe80B20 ve Fe99B1 alaşımlarının benzer EBF değerlerine sahip olduğu, Fe80B20 ise daha yüksek EABF değerlerine sahip olduğu fark edilmektedir. Bor yüzdesi daha yüksek olan Fe80B20 fotonları daha fazla toplar.

Grafik 6 (a-c), belirli enerjilerde (0.015, 0.15 ve 1.5 MeV) EABF-EBF ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişkiyi verir. 0.015 MeV'de EABF ve EBF yaklaşık 1'dir ve 5mfp'den sonra sabit bir eğilim gösterir. Fe99B1 alaşımı, EABF ve EBF'nin minimum değerlerine sahiptir. 0.15 MeV ve 1.5 MeV'de, penetrasyon derinliğine bağlı olarak EABF ve EBF'nin değişimi neredeyse doğrusaldır. 0.15 MeV ila 1.5 MeV arasında, birikme faktörü değerlerinin alaşımların elementel bileşimine bağımlılığı azalır. Seçilen iki alaşımın EABF değerleri arasındaki fark EBF değerlerinden daha yüksektir.

Gama foton etkileşim parametrelerine ek olarak, üretilen alaşımların nötron radyasyonunu azaltma yeteneğini araştırmak için nötron doz oranı ölçümü deneysel olarak gerçekleştirildi ve etkili çıkarma enine kesit değerleri teorik olarak hesaplandı. Grafik 7'den görülebileceği gibi, eşdeğer nötron doz oranı, alaşımdaki artan bor içeriği ile belirgin şekilde azaltılmıştır.

Bunlarla birlikte çalışmanın ikinci kısmı olan borlu bileşikler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bileşiklerin teorik etkin atom numaraları tablo 3 te verilmiştir. Deneysel Zeff değerleri ise grafik 8-9 da enerjiye bağlı değişimleri gösterilmiştir. Buradan Etkin atom numarasının gelen fotonun enerjisine ve bileşikte bulunan elementin atom numarasına bağlı olarak değiştiğini görebiliriz. Teorik ve deneysel veriler arasında küçük sapmalar olmakla beraber, birbirleriyle uyum içindedirler.

316L, 310, 304, 430 paslanmaz çelikler için elde edilen veriler tablo 5 ve grafik 9-10 da verilmiştir. Çelikler şekil-4 te gösterildiği gibi başarılı bir şekilde B4C ve BN bileşikleri ile kaplanmıştır. Bu kaplama sonuçları göstermiştir ki, radyasyon ve nötron emilimini önemli ölçüde arttırmıştır. Böylece hem nötron hem de yüksek enerjili fotonların bertaraf edilmesi için önemli bir materyal olarak kullanılabilecektir. Çalışmamız proje amacına büyük ölçüde ulaşmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Projede borla kaplama işlemi için önce termal

buharlaştırma yöntemi uygulanmak istenmiş ancak yapılan deneyler ve denemeler sonucunda bu yöntemin başarısız olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra aynı yöntem diğer bileşikler için kullanılmak istenmiş ancak yine olumlu bir sonuç alınamamıştır. Böylece çelikleri saf bor elementi ile kaplama fikrinden vazgeçilmiştir. Bunun yerine literatürde nötronlara karşı etkili bir koruma örneği gösteren B4C ve BN bileşikleri ile çalışmaya devam edilmiştir. Sputter (saçtırma) olarak bilinen yöntem kullanılarak çeliklerin yüzeyleri daha düzgün ve homojen bir dağılıma sahip olması sağlanmıştır. Bu sonuçların radyasyon dozimetrisi, tıbbi ve radyasyon kalkanı gibi çeşitli uygulamalar için iyi bir argüman olacağı kanaatindeyiz.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Referanslar

[1] I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, Radiation shielding of concrete containing zeolite, Radiat. Meas. (2010), doi:10.1016/j.radmeas.2010.04.012.

[2] J.K. Shultis, R.E. Faw, Radiation shielding technology, Health Phys. (2005), doi:10.1097/01.HP.0000148615.73825.b1.

[3] B. Oto, N. Yildiz, T. Korkut, E. Kavaz, Neutron shielding qualities and gamma ray buildup factors of concretes containing limonite ore, Nucl. Eng. Des. (2015), doi:10.1016/j.nucengdes.2015.07.060.

[4] E. Kavaz, An experimental study on gamma ray shielding features of lithium borate glasses doped with dolomite, hematite and goethite minerals, Radiat. Phys. Chem. (2019), doi:10.1016/j.radphyschem.2019.03.032.

[5] O.O. Mgo-al, N.O. O, Characterization of a Broad Range Gamma-Ray and Neutron Shielding, 518, 2019, pp. 92–102, doi:10.1016/j.jnoncrysol.2019.05.012.

[6] V.P. Singh, M.E. Medhat, N.M. Badiger, A.Z.M. Saliqur Rahman, Radiation shielding effectiveness of newly developed superconductors, Radiat. Phys. Chem. (2015), doi:10.1016/j.radphyschem.2014.07.013.

[7] I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi, A. Akkurt, Radiation shielding of concretes containing different aggregates, Cement Concr. Compos. (2006), doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.09.006.

[8] B. Tellili, Y. Elmahroug, C. Souga, Investigation on radiation shielding parameters of cerrobend alloys, Nuclear Engineering and Technology (2017), doi:10.1016/j.net.2017.08.020.

[9] N. Ekinci, E. Kavaz, B. Aygün, U. Perişanoğlu, Gamma ray shielding capabilities of rhenium-based superalloys, Radiat. Eff Defects Solids (2019) 1–17 0150, doi:10.1080/10420150.2019.1596110.

[10] M.I. Sayyed, S.I. Qashou, Z.Y. Khattari, Radiation shielding competence of newly developed TeO2-WO3glasses, J. Alloy. Comp. (2017), doi:10.1016/ j.jallcom.2016.11.160.

[11] E. Kavaz, N.Y. Yorgun, Gamma ray buildup factors of lithium borate glasses doped with minerals, J. Alloy. Comp. (2018) 752, doi:10.1016/ j.jallcom.2018.04.106.

[12] M.I. Sayyed, A. Kumar, H.O. Tekin, R. Kaur, M. Singh, O. Agar, M.U. Khandaker, Evaluation of gamma-ray and neutron shielding features of heavy metals doped Bi2O3-BaO-Na2O-MgO-B2O3 glass systems, Prog. Nucl. Energy (2020), doi:10.1016/j.pnucene.2019.103118.

[13] S.A.M. Issa, M.I. Sayyed, A.M.A. Mostafa, G. Lakshminarayana, I.V. Kityk, Investigation of mechanical and radiation shielding features of heavy metal oxide based phosphate glasses

for gamma radiation attenuation applications, J.Mater. Sci. Mater. Electron. (2019), doi:10.1007/s10854-019-01572-x.
[14] D. Sariyer, R. Küçer, N. Küçer, Neutron shielding properties of concrete and ferro-boron, Acta Phys. Pol., A (2015), doi:10.12693/APhysPolA.128.B-201.

[15] E. Kavaz, N. Ekinci, H.O. Tekin, M.I. Sayyed, B. Aygün, U. Perişanoğlu, Estimation of gamma radiation shielding qualifiation of newly developed glasses by using WinXCOM and MCNPX code, Prog. Nucl. Energy 115 (2019) 12–20, doi:10.1016/j.pnucene.2019.03.029.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ