

FeNbVTaW Tabanlı Yüksek Entropili Alaşımlarda HfN, TaN, ScN ve YN Takviyelerinin Radyasyon Zırhlama Performansına Etkisinin Teorik Değerlendirilmesi

Hamza Tunç¹

Rafet Yılmaz²

Özet

FeNbVTaW Tabanlı Yüksek Entropili Alaşımlarda HfN, TaN, ScN ve YN Takviyelerinin Radyasyon Zırhlama Performansına Etkisinin Teorik Değerlendirilmesi başlıklı bu bölümde, günümüzün hızla gelişen teknolojileri doğrultusunda nükleer enerji, uzay teknolojileri ve medikal radyoloji gibi yüksek radyasyon içeren alanlarda kullanılan malzemelere olan talebin arttığına dikkat çekilmektedir. Bu bağlamda, dayanıklı ve etkili radyasyon zırhlaması sunabilen yeni nesil malzemelere duyulan ihtiyaç önemli bir hal almıştır. Yüksek entropili alaşımlar, birden fazla elementin eşit oranlarda birleştirilmesiyle elde edilen ve geleneksel alaşımlara göre daha dayanıklı olan malzemelerdir. Ancak, bu alaşımların radyasyon zırhlama performanslarına dair hâlâ sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bölümde, YEA'ların metal nitrürler (HfN, TaN, ScN, YN) ile takviye edilerek radyasyon zırhlama kapasitelerinin nasıl geliştirilebileceği detaylı şekilde ele alınmaktadır. Metal nitrürler, yüksek sertlik, kimyasal stabilite ve yüksek erime noktası gibi üstün özellikleri sayesinde, YEA'ların yalnızca mekanik performansını değil, aynı zamanda radyasyon zırhlama kapasitesini de artırmaktadır. Bu tür alaşımlar, özellikle nükleer enerji, uzay ve savunma sanayii gibi kritik alanlarda önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, YEA ve metal nitrürlerin kombinasyonunun, zırhlama performansı ve maliyet etkinliği açısından büyük avantajlar sağladığı vurgulanmaktadır.

1 Öğr Gör., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, hamzatunc@yyu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2787-8126>

2 Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, ryilmaz@yyu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2734-8763>

1. GİRİŞ

Son yıllarda, gelişen ileri teknolojilerle birlikte malzeme mühendisliğinde yeni ve güçlü malzemelere olan talep artmıştır. Özellikle nükleer enerji, uzay teknolojileri ve medikal radyoloji gibi yüksek radyasyon içeren alanlarda kullanılan malzemelerin hem dayanıklı hem de radyasyonu etkili bir şekilde durdurabilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), sahip oldukları dayanıklılık, ısıya karşı direnç ve kimyasal kararlılık özellikleri sayesinde dikkat çekici bir alternatif olmuştur (Zhang et al., 2018).

Bu bölümde, YEA'ların yapısı, metal nitrür katkılarının etkisi ve radyasyon zırlama performansı gibi başlıklar detaylıca incelenecektir. Yüksek entropili alaşımlar, beş veya daha fazla elementin yaklaşık eşit oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Bu yapıları sayesinde, geleneksel alaşımlardan farklı olarak daha kararlı ve dayanıklı özellikler gösterebilirler. Ancak, bu alaşımların doğrudan radyasyon zırlama amacıyla kullanımı hâlâ tam olarak geliştirilmemiştir (Gelchinski et al., 2022).

Kurşun, beton ve bor katkılı kompozitler gibi geleneksel zırlama malzemeleri etkili olsalar da bazı önemli sorunlara sahiptir. Örneğin, kurşun zehirli olduğu için çevreye ve sağlığa zararlıdır. Beton gibi malzemeler ise kırılğan yapıya sahip olduklarından uzun süreli kullanımda sorun çıkarabilir. Bu yüzden hem çevre dostu hem de dayanıklı yeni malzemelere ihtiyaç vardır (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).

Bu bağlamda, yüksek entropili alaşımların seramik esaslı bileşenlerle, özellikle de metal nitrürlerle (örneğin HfN, TaN, ScN ve YN) takviye edilmesi, günümüzde oldukça dikkat çeken yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Metal nitrürler; olağanüstü sertlikleri, yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri, kimyasal stabilite ve radyasyonla etkin etkileşimleri sayesinde bu tür uygulamalarda büyük potansiyel taşımaktadır (Mota et al., 2015). Yüksek entropili alaşımlara bu tür bileşiklerin eklenmesi, yalnızca mekanik özelliklerin geliştirilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda radyasyon zırlama kapasitesini de önemli ölçüde artırır.

Bu kitap bölümünde, yüksek entropili alaşımlara metal nitrür katkısı yapıldığında radyasyon zırlama performansında ne gibi değişiklikler olduğu ayrıntılı şekilde incelenecektir. Önce yüksek entropili alaşımlar (YEA)'ın yapısı ve özellikleri anlatılacak, ardından nitrür katkısının bu alaşımların yapısal özelliklerine ve zırlama kabiliyetine etkisi değerlendirilecektir. Amaç, bu tür gelişmiş alaşımların gelecekte nükleer, uzay ve savunma gibi zorlu alanlarda nasıl kullanılabileceğini ortaya koymaktır.

2. Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA): Kavramsal Temeller

2.1. Tanım ve Sınıflandırma

Yüksek entropili alaşımlar (YEA), geleneksel alaşım kavramından farklı olarak, beş veya daha fazla elementin yaklaşık eşit oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Geleneksel alaşımlarda bir ana element (örneğin demir, alüminyum) baskınken, yüksek entropili alaşımlarda (YEA) her bir elementin katkısı benzer düzeydedir. Bu durum, alaşımın mikro yapısında yeni ve kararlı fazların meydana gelmesine imkan sağlar (Gao & Qiao, 2018). Yüksek entropili alaşımlar (YEA) genellikle şu kriterlere göre sınıflandırılır:

Element sayısı: Genellikle beş veya daha fazla.

- **Atomik oran:** Her bir element yaklaşık eşit oranlarda (%5-35 arası).
- **Kristal yapı:** Genellikle yüzey merkezli kübik (FCC), hacim merkezli kübik (BCC) veya hekzagonal yapılar görülür.
- **Faz türleri:** Tek fazlı katı çözeltiler, çok fazlı yapılar veya amorf fazlar olabilir.

Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda kararlılık, mükemmel mekanik özellikler ve korozyon direnci gibi avantajlar sağlar.

2.2. Termodinamik Temeller (Yüksek Entropi, ΔS_{mix})

Yüksek entropili alaşımlar (YEA)'nın temel kavramlarından biri, karışım entropisi (ΔS_{mix}) olarak bilinen ve çok sayıda elementin rastgele karışmasından kaynaklanan termodinamik bir özelliktir (Tancet et al., 2017). Karışım entropisi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i$$

Burada:

R : Gaz sabiti,

c_i : i . elementin mol kesri,

n : alaşımda yer alan toplam element sayısıdır.

Element sayısı arttıkça ve oranlar birbirine yaklaştıkça, karışım entropisi yükselir. Bu yüksek entropi, birden fazla elementin istikrarlı bir katı çözelti halinde bir arada kalmasını sağlar. Böylece malzeme, faz ayrışmasına karşı dirençli olur ve genellikle tek fazlı yapılar oluşur. Bu termodinamik avantaj,

yüksek entropili alaşımlar (YEA)₁ geleneksel alaşımlara kıyasla çok daha kararlı hale getirir (Liu et al., 2014).

2.3 Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA)'nın Genel Özellikleri (Mekanik, Termal, Yapısal)

Yüksek entropili alaşımlar birçok farklı özelliği ile öne çıkar:

- **Mekanik Özellikler:** yüksek entropili alaşımlar (YEA), yüksek sertlik, akma dayanımı ve aşınma direnci gösterir. Bazı yüksek entropili alaşımlar (YEA), oda sıcaklığında bile oldukça sünek olabilir (Florea et al., 2014).
- **Termal Özellikler:** Yüksek sıcaklıklarda kararlılık gösterirler, bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Ayrıca düşük termal iletkenlik gibi özellikler gösterebilirler.
- **Yapısal Özellikler:** Kristal yapıları genellikle FCC, BCC ya da karma yapılardır. Faz yapısı, seçilen elementlerin atomik yarıçap farkı, elektronegatiflik ve valans elektron sayısı gibi kriterlere bağlı olarak değişir.
- **Kimyasal Dayanıklılık:** Oksidasyona, korozyona ve çevresel bozunmaya karşı dirençlidirler.

Bu özellikler sayesinde yüksek entropili alaşımlar (YEA) uzay, havacılık, nükleer enerji, biyomedikal ve savunma sanayii gibi birçok alanda kullanıma potansiyeline sahiptir (Diao et al., 2016).

2.4 Literatürde YEA'ların Radyasyon Zırlamadaki Yeri

Yüksek entropili alaşımların radyasyon zırlama uygulamalarında kullanımı henüz gelişme aşamasında olmasına rağmen, yapılan çalışmalar bu alaşımların ciddi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, yüksek entropili alaşımlar (YEA)'nın yüksek atom numarasına sahip elementler içerebildiği takdirde foton ve nötron radyasyonuna karşı etkili olabileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, W, Ta, Hf, ve Zr gibi ağır elementleri içeren yüksek entropili alaşımlar (YEA) yüksek lineer zayıflatma katsayılarına ulaşabilmektedir (King, 2016).

Ayrıca, bu alaşımlar uzun süreli radyasyon etkilerine karşı yapısal kararlılık ve bozulmalara direnç göstermeleriyle dikkat çekmektedir. Yüksek radyasyon dozlarına maruz kaldığında bile mekanik özelliklerini büyük ölçüde koruyabildikleri çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Bu nedenle, yüksek entropili alaşımlar (YEA) radyasyon ortamlarında güvenilir yapısal malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Xia et al., 2015).Yüksek entropili

alaşımlar (YEA)ın radyasyon zırhlama uygulamalarında daha verimli hale getirilmesi için çeşitli katkı maddeleri ile desteklenmesi önerilmektedir. Bu katkı maddelerinden biri olarak metal nitrürler öne çıkmakta, bu konu bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3. Nitrür Takviyeli YEA Sistemleri

3.1 Nitrür Bileşiklerinin (HfN, TaN, ScN, YN vb.) Özellikleri

Metal nitrürler, özellikle geçiş metali nitratları olan HfN (hafniyum nitrür), TaN (tantal nitrür), ScN (skandiyum nitrür) ve YN (itriyum nitrür); yüksek sertlik, kimyasal kararlılık ve yüksek erime noktası gibi üstün özelliklere sahip bileşiklerdir. Bu özellikler sayesinde ileri mühendislik uygulamalarında, özellikle yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlarda sıkça tercih edilirler.

Bu bileşiklerin bazı temel özellikleri şunlardır:

Çizelge 1. Yüksek entropili alaşımlara katılacak metal nitrürlerin temel özellikleri

Nitrür Bileşiği	Yaklaşık Erime Noktası (°C)	Sertlik (GPa)	Elektriksel Özellik
HfN	~3300	16–20	İyi iletken
TaN	~3090	25–30	Yarı iletken / iletken
ScN	~2600	13–15	Yarı iletken
YN	~2500	12–14	Yalıtkan / Yarı iletken

Bu nitrürler, sadece mekanik değil, aynı zamanda termal ve elektriksel olarak da alaşımlara çok yönlü katkılar sağlar.

3.2 Nitrür Takviyesinin yüksek entropili alaşımlar (YEA)ın Mikroyapı ve Faz Davranışı Üzerindeki Etkileri

Yüksek entropili alaşımlara nitrür katkısı yapıldığında, alaşımın mikroyapısında çeşitli değişiklikler gözlemlenir. Bu katkılar:

- **Sert seramik fazların** oluşmasına neden olur (örneğin TaN takviyeli YEA'da sert TaN partikülleri),
- **Katı çözelti kararlılığını artırabilir**, böylece alaşımın faz ayrışmasına karşı daha dirençli olması sağlanır,
- **Çekirdeklenme ve tane büyümesi davranışlarını etkileyerek** daha ince ve homojen bir yapı elde edilmesini sağlayabilir.

Özellikle nitrürler, metal matris içinde ikinci faz olarak çözünmeyebilir, bunun yerine dağılımlı olarak bulunur ve bu da çökeltilme sertleşmesi gibi mekanizmalarla mukavemetin artmasına katkı sağlar (Pompe, 1980).

Ayrıca, bazı durumlarda nitrür katkısı, alaşımın kristal yapısını FCC'den BCC'ye veya çok fazlı yapılara doğru yönlendirebilir. Bu, özellikle mekanik özellikleri ve radyasyon tepkilerini doğrudan etkileyen bir değişimdir.

3.3 Nitrür Katkısının Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Katkısı

Nitrür takviyesi, yüksek entropili alaşımlar (YEA)ın fiziksel ve mekanik performansları önemli ölçüde iyileştirebilir. Katkının etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Sertlik artışı:** Sert nitrür fazları, alaşım matrisinde dağılmış şekilde bulunduğu, sertlikte belirgin artış sağlar. Örneğin TaN katkısı içeren yüksek entropili alaşımlar (YEA)da mikroskobik sertlik değerleri %30'a kadar artış gösterebilir.
- **Aşınma ve deformasyon direnci:** Nitrürlerin yüksek aşınma direnci, özellikle sürtünmenin yoğun olduğu uygulamalarda yüksek entropili alaşımlar (YEA)ı daha uzun ömürlü hale getirir.
- **Yüksek sıcaklık kararlılığı:** Nitrür katkısı, alaşımın oksidasyon sıcaklığını yükseltebilir ve yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olur.
- **Yoğunluk ve iletkenlik değişimi:** Bazı nitrürlerin yoğunluğu düşük olduğundan, alaşımın toplam yoğunluğunu düşürerek hafifletici bir etkisi olabilir. Elektriksel iletkenlik üzerinde ise katkının türüne göre pozitif veya negatif etkiler gözlenebilir.

Sonuç olarak, nitrür katkısı hem yapısal güçlendirme hem de zırhlama uygulamalarında istenen fiziksel özellikleri elde etmek için etkili bir yoldur. Bu tür katkılar, yüksek entropili alaşımları daha fonksiyonel, dayanıklı ve çok yönlü hale getirir.

4. Radyasyon Zırhlama Teorisi ve Değerlendirme Parametreleri

4.1 Radyasyon Türleri ve Zırhlama Prensipleri

Radyasyon, enerji taşıyan parçacıkların ya da elektromanyetik dalgaların bir ortamda yayılmasıdır. Temel olarak üç ana türü vardır:

- **Alfa parçacıkları (α):** Yüksek kütleli, çift pozitif yüklü helyum çekirdekleridir. Düşük penetrasyon yeteneklerine sahiptir, birkaç cm hava veya bir kâğıt tabakası tarafından durdurulabilirler.
- **Beta parçacıkları (β):** Elektron (β^-) veya pozitron (β^+) şeklinde olabilir. Daha hafif ve daha hızlıdır. Alüminyum gibi hafif metallerle durdurulabilirler.
- **Gama ışınları (γ) ve X-ışınları:** Elektromanyetik radyasyon türüdür, çok yüksek nüfuz edebilme özelliğine sahiptir. Ağır atom numarasına sahip yoğun malzemeler (kurşun, tungsten gibi) tarafından zayıflatılır.
- **Nötronlar:** Yüksüz olduklarından, doğrudan yüklü parçacıklarla etkileşmezler. Hidrojen içeren malzemeler (su, parafin, polietilen) tarafından etkili şekilde yavaşlatılabilirler.

Zırhlama malzemeleri bu radyasyon türlerini ya **soğurarak (absorbsiyon)** ya da **yön değiştirerek (saçılma)** durdurur. Etkili bir zırhlama için, malzemenin **yoğunluğu**, **atom numarası**, **kalınlığı** ve **bileşimi** önemlidir.

4.2 Lineer Zayıflama Katsayısı (μ), Kütle Zayıflama Katsayısı (μ/ρ)

Radyasyon zırhlamada temel değerlendirme parametrelerinden ikisi:

- **Lineer zayıflama katsayısı (μ):** Bir radyasyon ışınının, malzeme içindeki birim kalınlık başına ne kadar zayıfladığını ifade eder. Birimi cm^{-1} 'dir. Yüksek μ değeri, malzemenin daha iyi zırhlama yaptığı anlamına gelir (Cheng et al., 2005).
- **Kütle zayıflama katsayısı (μ/ρ):** Bir fotonun malzeme içerisinde geçerken birim kütle başına uğradığı zayıflamayı tanımlayan temel bir radyasyon etkileşim parametresidir. Zayıflama katsayısının, malzemenin yoğunluğuna (ρ , g/cm^3) bölünmesiyle elde edilir ve birimi cm^2/g 'dir. Bu parametre, farklı yoğunluklara sahip malzemelerin fotonlarla etkileşim verimliliğini karşılaştırmak için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle radyasyon zırhlama tasarımlarında, malzeme seçimini optimize etmek açısından kritik bir rol oynar (Hubbell, 1982). Zayıflama ilişkisi matematiksel olarak şöyledir:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Burada:

I_0 : Giriş radyasyon şiddeti,

I : Malzeme içinden geçen radyasyon şiddeti,

μ : Lincer zayıflama katsayısı,

x : Malzeme kalınlığı (cm)

4.3 Hedef Malzeme ile Etkileşim (Fotoelektrik, Compton, Çift Oluşumu)

Radyasyonun malzeme ile etkileşimi enerjiye ve hedefin atom numarasına bağlı olarak üç temel mekanizmayla gerçekleşir:

- **Fotoelektrik Etki:** Düşük enerjili fotonlar, atomun iç yörüngesinden bir elektronu koparır. Atom numarası yüksek malzemelerde daha baskındır. Zırhlamada özellikle kurşun gibi ağır metallerde önemlidir.
- **Compton Saçılması:** Orta enerjili fotonlar, atomun dış yörüngesindeki elektronlara çarparak enerjilerinin bir kısmını kaybeder ve yön değiştirir. Bu mekanizma, çoğu pratik radyasyon zırhlama koşulunda en yaygın olanıdır.
- **Çift Oluşumu (Pair Production):** Yüksek enerjili fotonlar (1.022 MeV üzeri), bir elektron ve bir pozitron oluşturacak şekilde enerjiye dönüşür. Bu süreç, genellikle daha yüksek enerjili gama ışınlarında görülür.

4.4 Yarı Değer Kalınlığı (HVL) ve Ondalık Değer Kalınlığı (TVL)

Zırhlama performansını değerlendirmek için kullanılan diğer önemli parametreler:

- **Yarı Değer Kalınlığı (HVL - Half Value Layer):** Işının şiddetini yarıya indirmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Şu formülle hesaplanır:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

- **Ondalık Değer Kalınlığı (TVL - Tenth Value Layer):** Işını 1/10 seviyesine düşürmek için gereken kalınlıktır:

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

Genel Değerlendirme

Bu parametreler, farklı malzemelerin radyasyonla etkileşim davranışlarını nicel olarak anlamamıza olanak tanır. Yüksek entropili alaşımlar gibi yeni nesil malzemelerde bu değerlere bakarak zırhlama performansı değerlendirilir. Nitrit katkılı yüksek entropili alaşımlar (YEA), özellikle yüksek μ ve düşük HVL değerleriyle klasik kurşun bazlı sistemlere alternatif olma potansiyeline sahiptir.

Araştırma kapsamında, FeNbVTaW yüksek entropili alaşım matrisine HfN, TaN, ScN ve YN seramik takviyeleri eklenerek oluşturulan dört farklı kompozit malzemenin gama fotonlarına karşı zırhlama performansı; kütle zayıflama katsayısı (μ / ρ), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve elektron yoğunluğu (N_{el}) parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

5.1. Kütle Zayıflama Katsayısı (μ/ρ)

Kütle zayıflama katsayısı (μ / ρ), malzemenin gama fotonlarını absorbe etme kabiliyetini ifade eder. Düşük enerjilerde (10–100 keV), özellikle fotoelektrik etkinin baskın olduğu bölgelerde HfN takviyeli kompozit, en yüksek μ / ρ değerini sergileyerek en iyi zırhlama performansını göstermiştir. Takiben TaN, ScN ve YN takviyeli kompozitler belirlenmiştir. Enerji arttıkça (100 keV – 1.5 MeV), Compton saçılması ön plana geçmiş ve tüm kompozitlerde μ / ρ değerleri azalmıştır. Ancak HfN ve TaN katkılı kompozitler, yüksek enerjilerde bile diğerlerine kıyasla daha etkin performans göstermeye devam etmiştir.

5.2. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Z_{eff} , malzemenin fotonlarla etkileşiminde etkili olan ortalama atom numarasını belirtir. Çalışma boyunca tespit edilen sonuçlara göre, HfN takviyeli kompozit en yüksek Z_{eff} değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuç, Hf elementinin yüksek atom numarası ($Z=72$) ile doğrudan ilişkilidir. TaN katkısı da Z_{eff} değerlerini artırıcı yönde etkide bulunmuştur. Buna karşın, Sc ($Z=21$) ve Y ($Z=39$) içeren ScN ve YN katkılı kompozitlerin Z_{eff} değerleri daha düşük seviyelerdedir. Z_{eff} değerlerinin düşük enerjilerde daha yüksek, yüksek enerjilerde ise daha düşük olması; fotoelektrik etkinin Z 'ye olan yüksek bağımlılığının bir yansımasıdır.

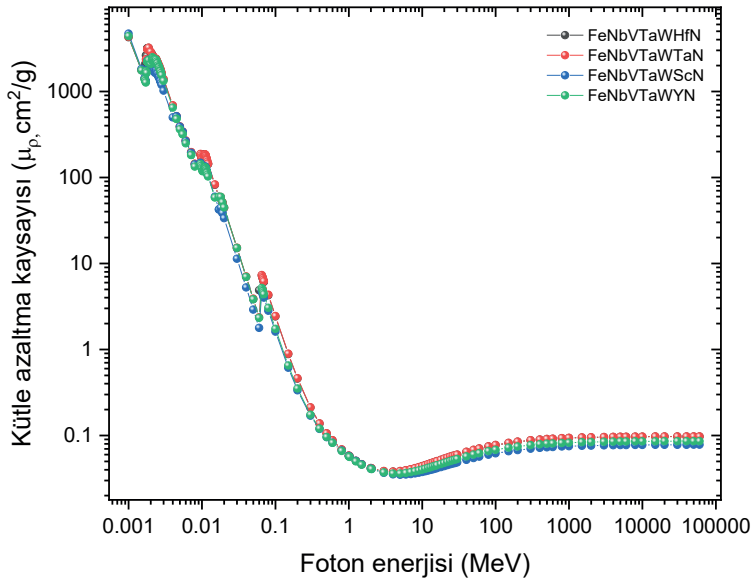
5.3. Elektron Yoğunluğu (N_{el})

N_{el} (electron density), birim kütledeki toplam elektron sayısını ifade eder ve özellikle Compton saçılması gibi foton–elektron etkileşimlerinin incelenmesinde kritik rol oynar. Veriler incelendiğinde, HfN takviyeli

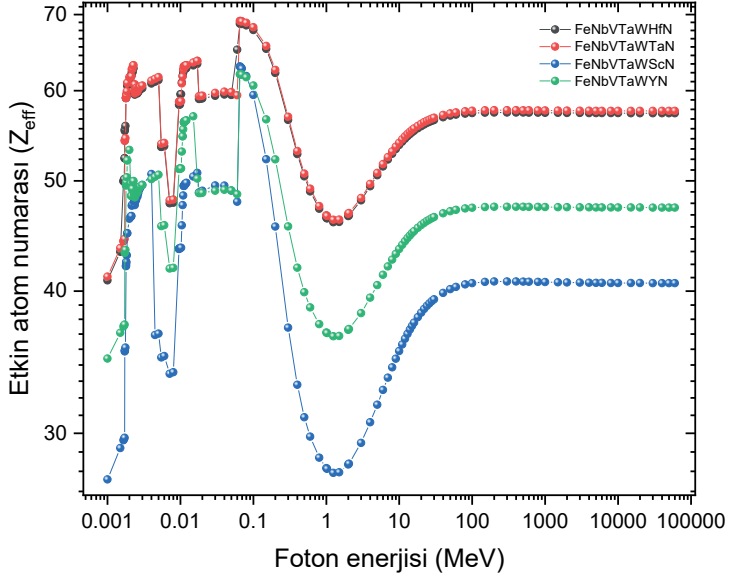
kompozit, tüm enerji aralıklarında en yüksek elektron yoğunluğuna sahiptir. Bu, onun Compton bölgesindeki foton etkileşimlerini daha fazla gerçekleştirebildiğini ve dolayısıyla yüksek enerjili fotonlar karşısında da etkin zırhlama sağladığını göstermektedir. TaN takviyesi de yüksek N_{el} değerleriyle dikkat çekerken, ScN ve YN takviyeli kompozitlerde N_{el} değerleri görece daha düşük seviyelerdedir. Bu durum, düşük yoğunluklu ve düşük Z 'ye sahip katkı maddelerinin elektron yoğunluğunu sınırladığını göstermektedir.

6. Bulgular

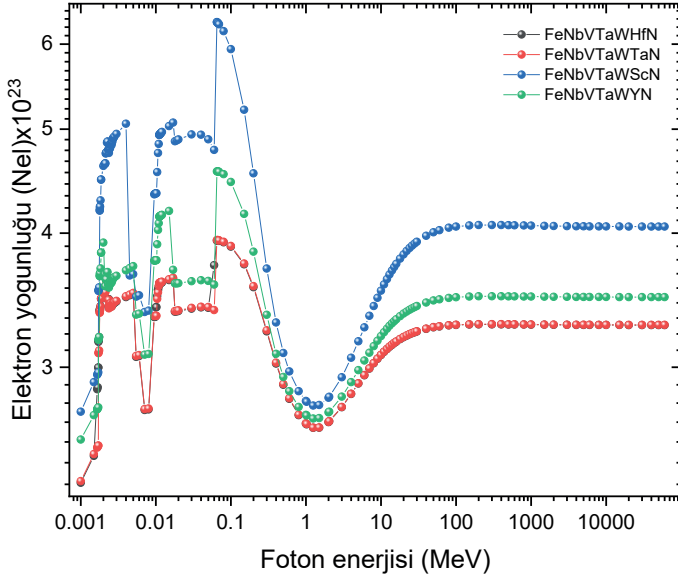
Bu çalışma kapsamında, FeNbVTaW yüksek entropili alaşım matrisi ve dört farklı seramik takviyesinden oluşan kompozit malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama performansları teorik olarak değerlendirilmiştir. İnceleme, **kütle zayıflama katsayısı** ($\mu / \tilde{n}$), **etkin atom numarası** (Z_{eff}) ve **elektron yoğunluğu** (N_{el}) parametreleri üzerinden yapılmıştır.



Şekil 1. Kütle azaltma katsayılarının gama enerjisine karşı değişimi.



Şekil 2. Etkin atom numarası değerlerinin gama enerjisine karşı değişimi.



Şekil 3. Elektron yoğunluğunun gama enerjisine göre değerleri.

HfN takviyeli kompozit, tüm enerji aralıklarında en yüksek μ / ρ , Z_{eff} ve N_{el} değerlerine sahip olarak, en yüksek zırhlama performansını göstermiştir.

TaN katkısı, özellikle düşük ve orta enerji düzeylerinde etkili olmuş; yüksek atom numarası ve yoğunluk nedeniyle zırhlama etkinliğini artırmıştır.

ScN ve YN takviyeli kompozitler, daha düşük atom numarası ve yoğunlukları nedeniyle daha düşük μ / ρ , Z_{eff} ve N_{el} değerleri sergilemiş ve görece daha düşük zırhlama kapasitesi göstermiştir.

N_{el} Parametresinin yüksek olması, özellikle orta-yüksek enerji seviyelerinde Compton saçılması yoluyla foton etkileşimlerini artırarak zırhlama performansını olumlu etkilemiştir.

Enerji arttıkça tüm parametrelerde genel olarak azalma eğilimi görülmüş, bu da foton–madde etkileşiminin enerjiye bağlı doğasını ortaya koymuştur.

7. Sonuç ve Öneri

- Radyasyon zırhlama uygulamaları için yüksek atom numarasına ve yüksek yoğunluğa sahip takviye fazlarının tercih edilmesi önerilmektedir.
- Araştırma kapsamında kullanılan HfN ve TaN katkıları, gelecekteki zırhlama malzemeleri için umut vadeden adaylardır.
- İleriki çalışmalar, bu kompozitlerin deneysel olarak sentezlenmesini, yoğunluklarının ölçülmesini, mikro yapılarının incelenmesini ve mekanik/termal dayanımlarının belirlenmesini içermelidir.
- Ayrıca, karışık seramik takviyeleri (örneğin HfN–TaN kombinasyonları) ile melez zırhlama yapıları geliştirilebilir.

8. Kaynaklar

- Zhang, W., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China. Materials*. <https://doi.org/10.1007/S40843-017-9195-8>
- Gelchinski, B. R., Balyakin, I. A., Yuriev, A. A., & Rempel, A. A. (2022). High-entropy alloys: properties and application. *Russian Chemical Reviews*. <https://doi.org/10.1070/rcr5023>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Toxicity of building materials: a key issue in sustainable construction. *International Journal of Sustainable Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.569583>
- Mota, O. U. O., Araujo, R. A., Wang, H., & Cagin, T. (2015). Mechanical Properties of Metal Nitrides for Radiation Resistant Coating Applications: A DFT Study. *Physics Procedia*. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2015.05.077>
- Gao, M. C., & Qiao, J. (2018). *High-Entropy Alloys (HEAs)*. <https://doi.org/10.3390/MET8020108>
- Tancret, F., Tancret, F., Toda-Caraballo, I., Menou, E., & Díaz-Del-Castillo, P. E. J. R. (2017). Designing high entropy alloys employing thermodynamics and Gaussian process statistical analysis. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.11.049>,
- Liu, W. H., Liu, W. H., Wu, Y., He, J., Zhang, Y., Liu, C. T., & Lu, Z. (2014). The Phase Competition and Stability of High-Entropy Alloys. *JOM*. <https://doi.org/10.1007/S11837-014-1119-4>
- Florea, I., Buluc, G., Comaneci, R., Baltatescu, O., Cimpoesu, N., & Carcea, I. (2014). Microstructure and Mechanical Tests of AlNiMnZnCu High Entropy Alloys. *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.1036.95>
- Diao, H., Xie, X., Sun, F., Dahmen, K. A., & Liaw, P. K. (2016). *Mechanical properties of high-entropy alloys*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5_6
- King, D. J. M. (2016). *Investigation of high-entropy alloys for use in advanced nuclear applications*.
- Xia, S., Wang, Z., Yang, T., & Zhang, Y. (2015). Irradiation Behavior in High Entropy Alloys. *Journal of Iron and Steel Research International*. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30084-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30084-4)
- Pompe, R. (1980). Nitride precipitation in a powdered iron alloy studied by thermoanalytical methods. *Thermochimica Acta*. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(80\)85003-9](https://doi.org/10.1016/0040-6031(80)85003-9)
- Cheng, S., Shen, H. Y., Zhang, G., & Huang, C. H. (2005, January 18). *Attenuation coefficient μ_t of blood measured by a modified direct method*. <https://doi.org/10.1117/12.567668>

Hubbell, J. H. (1982). Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90248-4](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90248-4)