**T.C.**
**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

# BAZALT—KARBON—ANTİMON TRİOKSİT KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE RADYASYON SOĞURMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Proje No: FKP-2024-12931**

Katılımlı Araştırma Projesi

**SONUÇ RAPORU**


**Proje Yürütücüsü:**
Aytaç Levet
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu/Elektrik ve Enerji

Prof. Dr. MEHMET BÜYÜKYILDIZ
BTÜ/Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/Fizik Bölümü
Öğrenci Kader GÜLEN
Fen Fakültesi/Fizik Bölümü
Doç.Dr. Sevda SARITAŞ
İspir Hamza Polat Meslek Yüksekokulu/Elektrik ve Enerji
Arş.Gör. Derya TURHAN
Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü



Ekim 2025

ERZURUM

ATATÜRK
ÜNİVERSİTESİ

## Önsöz

Bu çalışma, epoksi esaslı kompozitlerin radyasyon soğurma ve mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik olarak hazırlanmıştır. Çalışma sürecinde, radyasyon yoğunluğu yüksek uygulama alanlarında kullanılabilecek hafif, dayanıklı ve çevre dostu malzeme geliştirilmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında elde edilen bulguların, bilimsel literatüre ve uygulamalı alanlara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu proje, **Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi** tarafından desteklenmiştir (Proje No: FKP-2024-12931). Sağlanan bu destek, araştırmanın başarıyla yürütülmesine önemli katkılar sunmuştur.

## İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ ..... 8
2. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 10
2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi ..... 10
2.2. Spektroskopi Ölçüm sistemi ..... 12
2.2.1. Gamma İletim Ölçümleri ..... 12
2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ..... 14
2.2.3. Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) ..... 16
2.3. Basınç Dayanım Testi ..... 17
2.4. Eğilme Dayanımı Testi ..... 18
2.5. Ultrason Darbe Hızı (UPV) Testi ..... 18
3. TARTIŞMA VE SONUÇ ..... 20
3.1. Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri ..... 20
3.2. Mekanik test sonuçları ..... 31
3.3. X-ışını difraksiyonu (XRD), Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ..... 36
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 41

## TABLOLAR DİZİNİ

**Tablo 1.** Kompozit Çeşitleri 11
**Tablo 2**. Kompozit numunelerin teorik MAC değerleri ($cm^2/g$) 20
**Tablo 3**. Kompozit numunelerin deneysel MAC değerleri ($cm^2/g$) 21
**Tablo 4**. Kompozit numunelerin teorik etkin atom numarası (Zeff) değerleri 22
**Tablo 5**. Kompozit numunelerin deneysel etkin atom numarası (Zeff) değerleri 23
**Tablo 6**. Kompozit numunelerin teorik etkin elektron yoğunluğu (Neff) değerleri 25
**Tablo 7**. Kompozit numunelerin deneysel etkin elektron yoğunluğu ($N_{eff}$) değerleri 25
**Tablo 8**. Kompozit numunelerin teorik yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri 27
**Tablo 9**. Kompozit numunelerin deneysel yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri 27
**Tablo 10**. Kompozit numunelerin teorik ortalama serbest yol (MFP) değerleri 29
**Tablo 11**. Kompozit numunelerin deneysel ortalama serbest yol (MFP) değerleri 29
**Tablo 12**. Kompozit numunelere ait basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 32
**Tablo 13.** Kompozit numunelere ait iletim süresi ve darbe hızı sonuçları 34
**Tablo 14.** Kompozit numunelere ait EDX analiz sonuçları 38

**ŞEKİLLER DİZİNİ**

**Şekil 1.** Kompozit numunelerin hazırlanması 11
**Şekil 2.** Hazırlanan kompozit numuneler 12
**Şekil 3**. Gama ışını deney düzeneği 14
**Şekil 4**. EDX 'in şematik gösterimi 17
**Şekil 5**. Basınç dayanımı test cihazı 18
**Şekil 6**. Eğilme dayanımı deney sistemi ve cihazı 18
**Şekil 7**. UPV cihazı 19
**Şekil 8**.Kompozit numuneler için Kütle Azaltma Katsayısının enerjiye bağlı değişimi 21
**Şekil 9**. Kompozit numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi 23
**Şekil 10**. Kompozit numuneler için etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi 26
**Şekil 11.** Kompozit numuneler için yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimi 28
**Şekil 12**. Kompozit numuneler için ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimi 30
**Şekil 13.** Kompozit numuneler için basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 33
**Şekil 14**. Kompozit numuneler için iletim süresi ve darbe hızı değerleri 34
**Şekil 15**. Kompozit numuneler için XRD deseni 36
**Şekil 16**. Kompozit numuneler için XRD deseni 37
**Şekil 17**. Kompozit numuneler için SEM görüntüleri 39

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

## ÖZET

Bu çalışmada, epoksi esaslı kompozitlerin radyasyon zırhlama performansları ile mekanik dayanım özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır. Araştırmanın temel amacı, özellikle sağlık, nükleer enerji, havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek radyasyon içeren uygulamalarda kullanılabilecek, hafif, taşınabilir ve çevre dostu zırhlama malzemeleri geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda bazalt, karbon ve antimon trioksit ($Sb_2O_3$) katkıları farklı oranlarda epoksi matris içerisine ilave edilerek yedi ayrı kompozit numunesi (RT1–RT7) hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin radyasyon soğurma parametreleri teorik olarak WinXCOM yazılımı kullanılarak hesaplanmış; kütle azaltma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Zeff) ve etkin elektron yoğunluğu (Neff) gibi temel parametreler incelenmiştir. Deneysel doğrulama amacıyla HPGe dedektörlü gama spektroskopisi ile gama ışını geçirgenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Araştırma bulgularına göre saf epoksi (RT1) en düşük zırhlama performansını göstermiş, %5 $Sb_2O_3$ katkılı RT4 numunesi ise en yüksek radyasyon soğurma kapasitesine ulaşmıştır. $Sb_2O_3$ katkısı, yüksek atom numarası sayesinde gama ışınlarının zayıflatılmasında belirgin bir iyileşme sağlamış; buna karşılık mekanik dayanım üzerinde kısmi bir azalma oluşturmuştur. Karbon katkısının, özellikle basınç ve eğilme dayanımlarını bazalt katkısına kıyasla daha etkili biçimde artırdığı görülmüştür. Ultrason darbe hızı (UPV) testleri ise katkı oranının iletim süresi ve darbe hızını olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bazalt–karbon–antimon trioksit katkılı epoksi kompozitlerin hem mekanik hem de radyasyon zırhlama özellikleri bakımından dengeli bir performans sunduğu belirlenmiştir. Özellikle RT4 numunesi, radyasyon zırhlama verimliliği ile birlikte yeterli mekanik dayanımı koruyarak en uygun formülasyon olarak öne çıkmıştır. Bu yönüyle geliştirilen kompozitler, geleneksel kurşun bazlı zırhlama malzemelerine çevre dostu, hafif ve fonksiyonel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Çalışma, gelecek nesil radyasyon koruma malzemelerinin tasarımına katkı sunmakta ve çok işlevli kompozitlerin sanayi uygulamaları için önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.



**Anahtar Kelimeler:** Radyasyon zırhlama, Epoksi esaslı kompozitler, Antimon trioksit, Bazalt, Karbon, Mekanik dayanım



ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

**ABSTRACT**

In this study, the radiation shielding performance and mechanical properties of epoxy-based composites were systematically investigated. The primary objective of the study is to develop lightweight, portable, and environmentally friendly shielding materials that can be utilized in radiation-intensive applications such as healthcare, nuclear energy, aerospace, and defense industries. For this purpose, basalt, carbon, and antimony trioxide ($Sb_2O_3$) were incorporated into an epoxy matrix at different ratios, and seven composite samples (RT1–RT7) were prepared. The radiation attenuation parameters of the composites were theoretically calculated using WinXCOM software, including mass attenuation coefficient (MAC), half-value layer (HVL), mean free path (MFP), effective atomic number (Zeff), and effective electron density (Neff). Experimental validation was performed through gamma-ray transmission measurements using HPGe detector-based gamma spectroscopy.

The results indicated that pure epoxy (RT1) exhibited the lowest shielding capacity, while the RT4 sample with 5% $Sb_2O_3$ demonstrated the highest radiation attenuation performance. The incorporation of $Sb_2O_3$ significantly enhanced gamma photon attenuation due to its high atomic number; however, it caused a partial reduction in mechanical strength. Carbon addition, on the other hand, contributed more effectively than basalt in improving compressive and flexural strengths of the composites. Ultrasonic pulse velocity (UPV) tests revealed that increasing additive content negatively affected pulse velocity and transmission times.

Overall, basalt–carbon–antimony trioxide reinforced epoxy composites exhibited a balanced performance in both mechanical strength and radiation shielding. Among them, RT4 was identified as the most promising formulation, maintaining sufficient mechanical integrity while providing high shielding efficiency. Therefore, the developed composites can be considered as lightweight, multifunctional, and eco-friendly alternatives to conventional lead-based shielding materials. This research contributes to the advancement of next-generation radiation protection materials and highlights the potential of multifunctional composites for industrial applications.

**Keywords:** Radiation shielding, epoxy-based composites, antimony trioxide, basalt, carbon, mechanical strength

# 1. GİRİŞ

Radyoaktivitenin keşfiyle beraber radyasyon kullanımı günlük hayatımızda yaygınlaşmış ve yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Radyasyonun hayatımızda hem faydalı hem de potansiyel olarak tehlikeli olabilecek çok çeşitli alanlarda kendini gösterir. Sağlık, enerji üretimi, endüstri, bilimsel araştırmalar ve çevre gibi birçok alanda hayatımızı iyileştiren radyasyon, doğru kullanıldığında büyük faydalar sağlarken, yanlış kullanımı veya aşırı maruz kalma ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu nedenle, insan ve çevre sağlığı için radyasyonun doğru kullanımı ve korunma önlemlerinin alınması büyük önem taşır. Bu yüzden zırhlamada birçok farklı malzeme kullanılarak önlem alınabilir. Radyasyona maruz kalma ihtimali yüksek olan durumlarda, bu tür malzemelerin dikkatli ve güvenli bir şekilde kullanılması gerekmektedir (Simon & Linet, 2014).

Nükleer enerji, tıbbi görüntüleme, havacılık mühendisliği ve savunma gibi çeşitli sektörlerde radyasyona dayalı teknolojilere olan artan bağımlılık, etkili radyasyon koruması sunabilen malzemelere olan talebin artmasına yol açmıştır. Gama ışınları ve X ışınları da dahil olmak üzere iyonlaştırıcı radyasyon, önemli sağlık tehlikeleri ve ekipman bozulma riskleri oluşturur ve bu tür radyasyonun yaygın olduğu ortamlarda kalkanlamayı kritik bir husus haline getirir. Tarihsel olarak, kurşun gibi yoğun malzemeler, yüksek atom numaraları ve etkili zayıflatma yetenekleri nedeniyle radyasyon kalkanı için standart olarak hizmet etmiştir. Ancak, kurşun bazlı malzemelerin çevresel toksisitesi, ağır ağırlığı ve sınırlı mekanik çok yönlülüğü, araştırmacıları ve mühendisleri yalnızca verimli değil, aynı zamanda daha güvenli ve modern uygulamalar için daha uyarlanabilir alternatif çözümler aramaya yöneltmiştir.

Yenilik için umut vadeden bir yol, hafiflik, tasarım esnekliği ve üstün mekanik özelliklerin benzersiz bir kombinasyonunu sunan polimer matris kompozitler alanında yatmaktadır. Bunlar arasında, epoksi reçine bazlı kompozitler, mükemmel yapışma, kimyasal direnç, boyutsal kararlılık ve işleme kolaylığı nedeniyle oldukça tercih edilir hale gelmiştir. Bununla birlikte, epoksi matrisler kendi başlarına iyonlaştırıcı radyasyonu etkili bir şekilde zayıflatmak için gerekli yoğunluk ve atom numarasından yoksundur. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, hem yapısal hem de koruma gereksinimlerini karşılayan çok işlevli kompozit sistemlerin geliştirilmesini sağlayan takviye liflerinin ve yüksek Z dolgularının dahil edilmesi esastır.

Bazalt lif ve Karbon lif gibi lif takviyeleri, geleneksel takviyelere alternatif olarak ilgi görmektedir. Volkanik lavın hızla soğumasından üretilen bazalt lif, iyi termal direnç ve mekanik performansa sahip, toksik olmayan, doğal olarak bol bulunan ve uygun maliyetli bir çözüm sunar. Mükemmel elastiklik modülü ve yüksek sıcaklıklara direnci ile bilinir ve bu da onu zorlu mühendislik uygulamaları için uygun bir aday yapar. Olağanüstü çekme mukavemeti, sertliği ve hafif yapısıyla tanınan karbon lif, kompozitlerin yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini artırır. Tek bir kompozit içinde bazalt ve karbon liflerinin hibridizasyonu, mekanik mukavemeti, termal

kararlılığı ve dayanıklılığı iyileştirmek için her iki malzemenin en iyi özelliklerini birleştirerek potansiyel olarak sinerjik etkiler sağlayabilir.

Radyasyon kalkanlamadaki sınırlamaları ele almak için, yüksek atom numaralı malzemelerin eklenmesi hayati önem taşır. Antimon Trioksit ($Sb_2O_3$), antimonun yüksek atom numarası nedeniyle iyonlaştırıcı radyasyonu zayıflatmadaki etkinliğiyle yaygın olarak tanınan bu tür bir bileşiktir. Radyasyon kalkanlama özelliklerine ek olarak, $Sb_2O_3$ alev geciktirici özellikler sergiler ve bu da onu kompozit malzemelerde çok işlevli bir katkı maddesi yapar. Bir epoksi matris içinde dağıtıldığında, $Sb_2O_3$, kompozitin termal ve yangına dayanıklı özelliklerine katkıda bulunurken gama ve X-ışını zayıflamasını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

Bazalt, karbon ve antimon trioksit katkılı bir epoksi matrisle bütünleştirilmesi, gelişmiş kalkanlama malzemeleri geliştirmek için yeni bir yaklaşım sunar. Bu tür hibrit kompozitler, hem mukavemetin hem de korumanın en önemli olduğu endüstrilerin performans gereksinimleriyle uyumlu olarak mekanik sağlamlık ve radyasyon zayıflatma verimliliği arasında bir denge sunar. Polimer matris içindeki bazalt, karbon takviyesi ve yüksek Z dolgusunun benzersiz kombinasyonunun, ağırlık, sürdürülebilirlik ve çok işlevlilik açısından geleneksel koruma seçeneklerinden daha iyi performans gösteren bir malzeme sistemi yaratması bekleniyor.

Radyasyon zırhlama mekanizması, radyasyonun çeşitli türlerinin (alfa, beta, gamma, nötron gibi) maddelerle etkileşime girerek enerjilerinin emilmesi, yayılması veya soğurulması yoluyla radyasyonun zararlı etkilerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Radyasyonun şiddeti, türü ve enerjisi, hangi malzemenin veya yöntemin kullanılacağını belirlemektedir. Zırhlama, esasen radyasyonun insan vücuduna, çevreye ya da cihazlara zarar vermesini engellemeye yönelik yapılır (Belgin, 2017).

Son yıllarda, radyasyon zırhlama malzemeleri, teknoloji ve bilimdeki ilerlemelerle birlikte önemli bir gelişim göstermiştir. Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için kullanılan bu malzemeler, özellikle nükleer enerji, tıbbi uygulamalar ve endüstriyel alanlarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Zırhlama malzemeleri son yıllarda ciddi bir ilerleme göstermiştir. Yeni teknolojiler ve malzemeler, daha hafif, daha dayanıklı ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Özellikle epoksi reçineler, boron karbür, lityum bileşenleri ve grafen gibi yenilikçi malzemeler, zırhlamada etkili olacaktır.

Bu çalışma, bazalt ve karbon tozu ile takviye edilmiş ve farklı oranlarda antimon trioksit kullanılarak epoksi kompozitlerin radyasyon emilim etkilerinin sistematik olarak incelenmesine odaklanmaktadır. Amaçlar arasında kompozit numunelerin imalatı, mikro yapısal ve mekanik özelliklerinin analizi ve standart test yöntemleri kullanılarak radyasyon koruma performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi yer almaktadır. Dolgu içeriği, ve matris özellikleri arasındaki etkileşimi anlayarak, çalışma, yapısal performanstan ödün vermeden maksimum koruma verimliliği için kompozit yapılandırmalarını optimize etmeyi amaçlamaktadır.

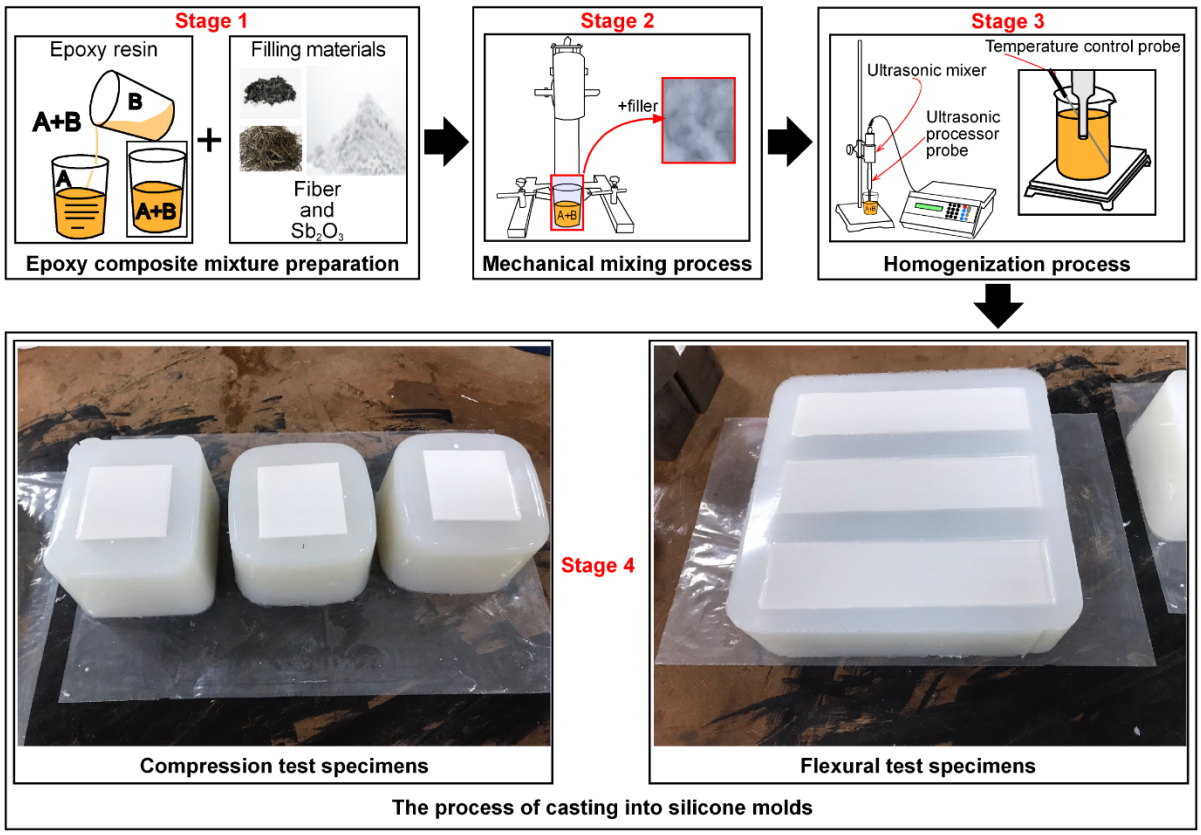
Bu araştırmanın sonuçlarının, geleneksel seçeneklerden daha hafif, daha güvenli ve daha uyarlanabilir olan yeni nesil koruma malzemelerinin ilerlemesine katkıda bulunması beklenmektedir. Bulgular, toksik ve ağır koruma malzemelerine alternatif arayan endüstriler için önemli sonuçlar doğurabilir ve nihayetinde daha güvenli çalışma ortamlarının ve daha verimli koruyucu teknolojilerin geliştirilmesini destekleyebilir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi

Bu çalışmada, kompozit numunelerin hazırlanması için karbon elyaf, antimon trioksit (Sb2O3) ve bazalt elyaf farklı oranlarda ilave edilmesiyle homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmış ve kuruması için kalıplara dökülerek kompozit malzemeler elde edilmiştir. Bazalt -karbon elyaf ve antimon trioksit içeren yedi farklı kompozit çeşitleri (RT1, RT2, RT3, RT4, RT5, RT6, ve RT7) yukarıdaki oranlara göre hazırlanmıştır. Kompozit malzemeler düşük maliyetle üretilerek bu malzemelerin radyasyon soğurma parametreleri incelenmiştir. Araştırmada kullanılan bazalt-karbon elyaf ve antimon trioksit katkılı epoksi malzemelerin radyasyon zırhlama malzemesi olarak alternatif oluşturmuştur. Numuneler Ba-133 radyoaktif kaynaklarla 900 saniyelik gama ışını bombardımanına tabi tutularak soğurma kabiliyetleri 0 keV – 200 keV, 200 keV -400 keV enerji aralığı için analiz edilmiştir.

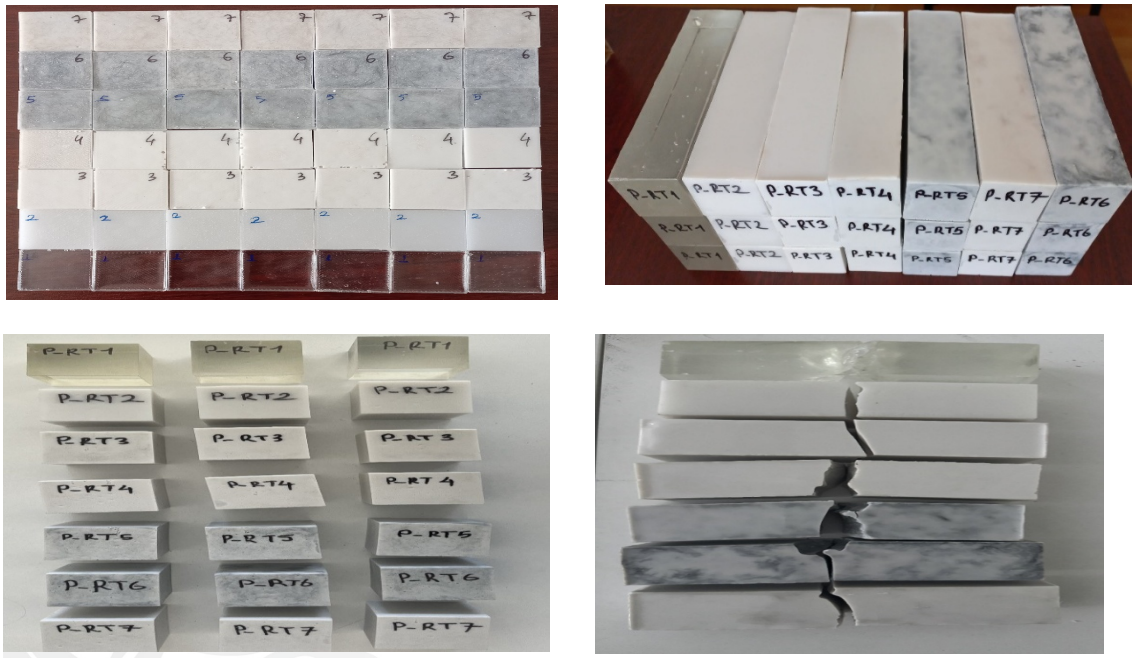
Bu çalışmada, Marker Reçine Teknolojileri, Türkiye firmasından tedarik edilen bir epoksi reçinesi (Resinin A) ve buna karşılık gelen sertleştirici (Resinin B) kullanılmıştır. Kompozitlere eklenen dolgu maddeleri antimon trioksit ($Sb_2O_3$), karbon fiber ve bazalt fiberdir. Tablo 1, epoksi esaslı kompozitlerin ayrıntılı formülasyonlarını, örnek kodlarını ve epoksi reçinesi, sertleştirici ve her bir dolgu malzemesinin ağırlık yüzdelerini özetlemektedir. Kompozit numuneler iki aşamalı bir dispersiyon işlemiyle hazırlanmıştır. Başlangıçta, dolgu maddeleri mekanik bir karıştırıcı (Vortex Genie 2) kullanılarak epoksi matrise eklenerek ön homojen bir dağılım sağlanmıştır. Bunu, karışımın homojenliğini daha da artırmak için ultrasonik homojenizasyon (Sonics VCX 130) takip etmiştir. Epoksi sistemi yaklaşık 20 dakikalık bir jelleşme süresi ve 1 saatlik bir ilk kürlenme süresi sergilemiştir. Elde edilen karışımlar daha sonra basınç ve eğilme testleri için gerekli boyutlarda özel olarak üretilmiş silikon kalıplara döküldü. Dökümden sonra, numunelerin tam polimerizasyonunu sağlamak için 24 saat boyunca ortam sıcaklığında kürlenmesi sağlandı. Malzemenin hazırlanmasından nihai numune üretimine kadar üretim sürecinin şematik bir gösterimi Şekil 1 ve 2'de sunulmaktadır.




**Şekil 1.** Kompozit numunelerin hazırlanması

**Tablo 1.** Kompozit Çeşitleri

| Kod | Epoksi(%) | Antimon Trioksit $Sb_2O_3$(%) | Karbon Elyaf (%) | Bazalt Elyaf (%) | Yoğunluk ($g/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| **RT1** | 100 | - | - | - | 1.096 |
| **RT2** | 99 | 1 | - | - | 1.099 |
| **RT3** | 97 | 3 | - | - | 1.115 |
| **RT4** | 95 | 5 | - | - | 1.128 |
| **RT5** | 96.8 | 3 | 0.1 | 0.1 | 1.109 |
| **RT6** | 96.8 | 3 | 0.2 | - | 1.110 |
| **RT7** | 96.8 | 3 | - | 0.2 | 1.113 |




**Şekil 2.** Hazırlanan kompozit numuneler

## 2.2. Spektroskopi Ölçüm sistemi

### 2.2.1. Gamma İletim Ölçümleri

Kütle azaltma katsayısı bir maddede birim alanda birim kütle başına düşen azaltmayı verir. Çoğunlukla foton radyasyonun geçişinde gerçekleşen enerji kaybını tanımlamak için kullanır. Bu katsayı lineer azaltma katsayısının ($\mu$), maddenin yoğunluğuna ($\rho$) oranıdır.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\frac{m}{V}} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{v}.t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{At}.t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{A}}$$

($\mu_m$) kütle zayıflatma katsayısını ifade eder ve birimi $cm^2/g$ olarak ifade edilir. Elektron başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesiti olan toplam elektronik tesir kesiti;

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A}\sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i}(\mu/\rho)_i = \frac{\sigma_a}{Z_{eff}}$$

formülü ile gösterilir. Burada fi, f1 + f2 + f3 +……+ fn = 1 olacak şekilde i. elementin kısmi bolluğudur. Zi ise i. elementin atom numarasıdır.

Atomik tesir kesiti, bir radyasyon parçacığının (foton veya elektron gibi) bir hedef atomla etkileşime girme olasılığının bir ölçüsüdür. Bir radyasyonun atomla etkileşme

olasılığı atomik tesir kesitiyle bulunabilir. Atomik tesir kesiti gelen parçacığın enerjisine, hedef parçacığın atom numarasına ve etkileşim türüne bağlı olarak değişir. Atomik tesir kesitinin matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_a = \frac{\mu_m}{N_A} M_T$$

Burada:

$\sigma_a$: atomik tesir kesitini(cm2/atom)

$\mu_m$: kütle azaltma katsayısı

MT: atomik kütleyi (g/cm3)

NA: Avogadro sayısını (6.22 x 1023 mol-1) göstermektedir (Attix, 2004; Knoll, 2010).

Etkin atom numarası, enerjiye bağlı olarak değişir. Yüksek enerjilerde Compton saçılması ve çift oluşum gerçekleşirken düşük enerjilerde fotoelektrik olay gerçekleşir. Bu nedenle Zeff, enerjinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmelidir (Midgley, 2004).

Zeff değeri özellikle Compton saçılması maddeyle etkileşim sürecinden etkilenir. Etkin atom numarası aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}}$$

$\sigma_{t,a}$: toplam atomik tesir kesiti ve $\sigma_{t,e}$: toplam elektronik tesir kesitidir (Arslan, 2023).

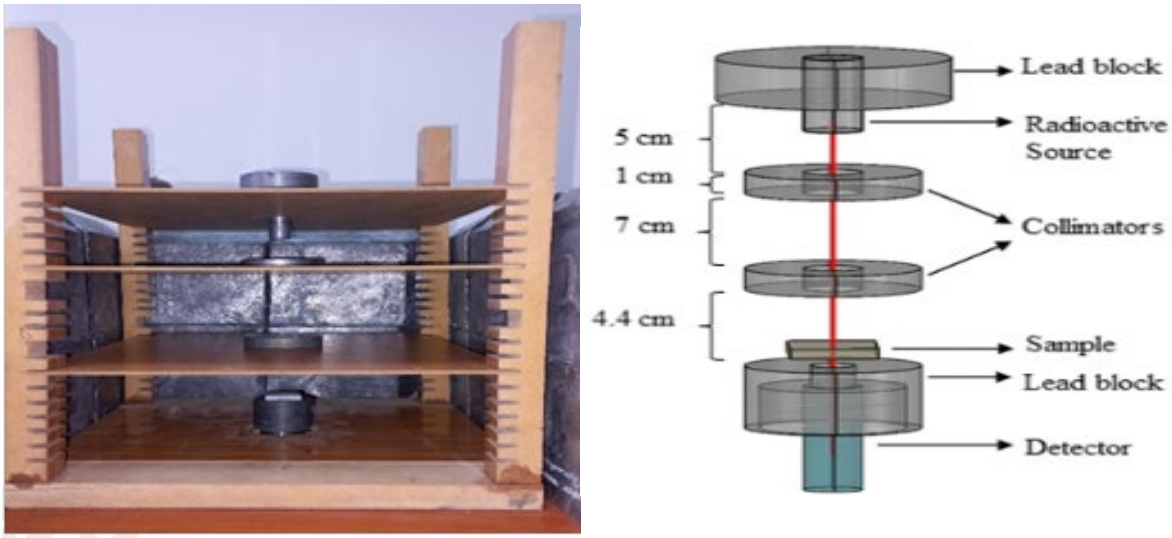
Etkin atom numarası, bir bileşiğin ya da karışımın radyasyonla etkileşimini ifade eden oldukça önemli bir değerdir ve enerjiye bağlı olarak değişen parametredir.

Etkin atom numarası ile etkin elektron yoğunluğu ile arasında doğrusal bir ilişki bulunur ve bir malzeme için elektron yoğunluğu aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$N_{eff} = \frac{N_A}{M_T} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad \text{(elektron /g)}$$

Yukarıdaki denklemde NA: Avogadro sayısını, Zeff: Etkin atom sayısını, $\sigma_e$: Elektronik tesir kesitini (cm2/atom), $\mu_m$: Kütle azaltma katsayısını ve MT: Atomik kütleyi (g/cm3) göstermektedir (Şen, 2021).

Hazırlanan kompozit numuneler, 900 saniyelik zaman aralıklarıyla üç kez ışınlanmış ve bu ışınlamalar sonucunda elde edilen spektrumlardaki pik alanları ölçülmüştür. Alınan ölçüm sonuçlarının daha da hassasiyetini artırmak için, hazırlanan her bir numune için bulunan pik alanlarının ortalamaları alınarak deneysel hesaplamalar yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3 te görülmektedir.




**Şekil 3**. Gama ışını deney düzeneği

### 2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşime geçirerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili dedektörler tarafından toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir. Elde edilen numunelerin numune yüzeyleri hakkında bilgi almak için DAYTAM da ölçümler alınacaktır

Taramalı Elektron Mikroskobu, madde ile elektronların etkileşime girmesi sonucu açığa çıkan ikincil sinyallerin toplanması ve görüntülenmesi prensibine dayanan yüksek çözünürlüğe sahip olan bir mikroskop çeşitidir. Optik mikroskoplar kıyasla, görüntüleme için elektron demeti kullanıldığından çok daha üstün büyütme ve çözünürlük performansı sunmaktadır (Goldstein et al., 2017). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), son yıllarda özellikle malzeme bilimi, metalürji, biyoloji, jeoloji ve nanoteknoloji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Reimer, 1998).

SEM'in temel çalışma prensibi, odaklanmış bir elektron demetinin numune yüzeyi üzerinde taranmasına dayanır. Elektron tabancasından çıkan elektronlar elektromanyetik mercekler yardımı ile çok ince bir noktaya odaklanarak bu yüksek enerjiye sahip elektronların numune yüzeyine çarptmasıyla birlikte çeşitli etkileşimler meydana gelir:

- İkincil elektronlar (SE): Düşük enerjili elektronların yüzeyden salınmasıyla elde edilir, yüzey morfolojisinin görüntülenmesinde kullanılır (Goldstein et al., 2017).
- Geri saçılmış elektronlar (BSE): Yüksek enerjili elektronların numuneye etki ederek

elastik saçılması sonucu oluşur, atom numarasındaki farklılıklara bağlı kontrast elde edilmesini sağlar (Reimer, 1998).
- Karakteristik X-ışınları: Elektronların, iç kabukta bulunan elektronları uyarmasıyla ortaya çıkar; bu X-ışınları enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS/EDX) ile elementel analiz yapılmasını sağlar.
- Katot ışıması: Numunenin elektron bombardımanı ile ışık yaymasıdır, bazı malzemelerin karakterizasyonunda kullanılır.

SEM cihazı, elektron tabancası, elektromanyetik mercekler, tarama bobinleri, numune odası, dedektörler ve görüntüleme sisteminden oluşmaktadır. Elektron kaynağı olarak tungsten filaman, $LaB_6$ kristali veya alan emisyonlu tabancalar kullanılmaktadır (Goldstein et al., 2017). Elektron demeti elektromanyetik merceklerle odaklanır ve tarama bobinleri yardımıyla numune yüzeyinde satır satır hareket ettirilir (Reimer, 1998). Dedektörler aracılığıyla elde edilen sinyaller işlenerek görüntüye dönüştürülür. Bu dedektörler arasında SE dedektörü yüzey morfolojisini, BSE dedektörü atom numarasına bağlı kontrastı, EDS/EDX dedektörü ise elementel analizi sağlamaktadır.

SEM, oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle malzeme biliminde mikro yapı, yüzey pürüzlülüğü ve kırılma yüzeylerinin incelenmesinde; metalürjide alaşımların tane boyutu ve faz dağılımlarının belirlenmesinde; nanoteknolojide nanoyapıların morfolojik analizlerinde: jeolojide ise mineral bileşimi ve mikroyapısal incelemelerde; biyolojide hücre ve dokuların yüzey yapılarının gözlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Goldstein et al., 2017).

SEM'in en önemli avantajları arasında çok yüksek büyütme (10 – 1.000.000x), yüksek çözünürlük (1–10 nm) ve geniş alan derinliği sayesinde üç boyutlu yüzey görüntüsü elde edebilme ve EDS/EDX sistemi ile elementel analiz yapabilme yeteneği yer almaktadır (Reimer, 1998; Egerton, 2011). SEM'in, birçok avantajlarının yanında bazı sınırlılıkları da bulunur. İlk olarak vakum ortamı gereklidir ve bu durum özellikle biyolojik örneklerin hazırlanmasını zorlaştırır. Buna ek olarak elektron demeti hassas veya organik numunelere zarar verebilir. Çalışmalarda kullanılan iletken olmayan numuneler için iletken kaplama (ör. altın, platin, karbon elyaf) ile hazırlanması gerekmektedir (Goldstein et al., 2017).

SEM, yüksek çözünürlükte yüzey görüntüleme ve elementel analiz yapabilmesi sayesinde modern bilimsel araştırmalarda vazgeçilmez bir araçtır. Hem kalitatif hem de kantitatif analizlerde sağladığı avantajlarla malzemelerin mikro ve nano ölçekli özelliklerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Reimer, 1998; Goldstein et al., 2017).

### 2.2.3. Enerji dağılımlı X-ışını (EDX)

Enerji dağılımlı X-ışını EDX, özellikle taramalı elektron mikroskopları (SEM) ve geçirimli elektron mikroskopları (TEM) ile entegre bir şekilde çalışarak numunelerin elementel bileşimini belirleyen, nitel ve nicel analiz yapmaya olanak sağlayan bir X-ışını mikroanaliz yöntemidir (Şekil 4). Bu yöntem, yüksek enerjili elektronun numunenin atomları ile etkileşimi sonucu oluşan karakteristik X-ışınlarının enerjisinin ölçülmesine dayanır ve malzeme bilimi, jeoloji, biyomedikal araştırmalar ve yarıiletken arıza incelemeleri gibi birçok alanda uygulama alanına sahiptir (Goldstein et al., 2017; Newbury & Ritchie, 2015).

Birincil elektron demeti numune atomlarının iç kabukta bulunan elektronlarını iyonize edebilecek kadar yüksek enerji taşıdığında, iç kabuktan bir elektron uzaklaştırılır ve daha üst enerjili bir elektron bu boşluğu doldurduğunda aradaki enerji karakteristik bir X-ışını fotonu olarak yayılır. Oluşan bu ışının enerjisi, kullanılan malzemenin atom numarasına özgüdür (ör. Kα, Kβ, Lα hatları) ve dedektörde ölçülen enerji tepe konumları sayesinde element tanımlaması yapılır. Aynı zamanda elastik ve inelastik saçılma ile hızlanan elektronların oluşturduğu sürekli (bremsstrahlung) arka plan spektruma eklenir; bu yüzden spektral analiz hem karakteristik hatların hem de arka planın doğru modellenmesini gerektirir (Reimer & Kohl, 2008; Williams & Carter, 2009).

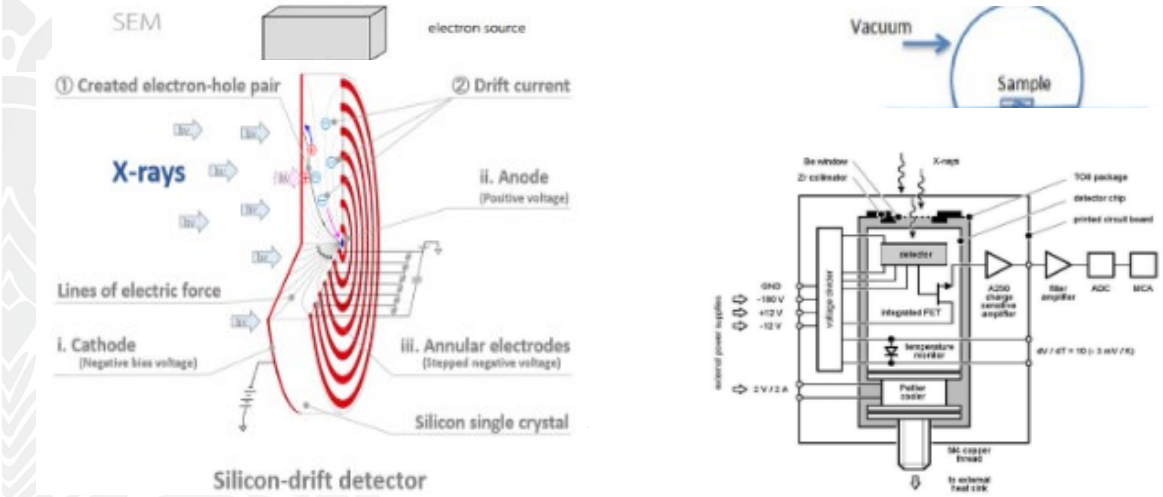
Dedektör teknolojisinde, genellikle geleneksel olarak Si(Li) dedektörler kullanılırken, modern sistemlerin çoğunda yüksek sayım hızı ve daha iyi enerji çözünürlüğü sağlayan Silikon Drift Dedektörler (SDD) ile donatımı yapılmıştır. Silikon Drift Dedektörler (SDD)'ler daha yüksek giriş sayım hızlarına, daha düşük gürültüye ve Peltier soğutmalı operasyonla sıvı azot kullanımının azlamasını mümkün kılar. Ayrıca dedektör penceresi tipi (kalın pencere, ince pencere, windowless) hafif elementlerin (B, C, N, O, Li vb.) dedekte edilebilirliğini doğrudan etkiler; ince pencere veya windowless tasarımlar hafif elementlerin X-ışınlarını daha az soğurur.

Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) spektrometresiyle gerçekleştirilen nicel analizlerde, spektral entegrasyon yaklaşımıyla beraber, k-oran kullanımı, standart tabanlı kalibrasyon ve matris düzeltmeleri (ZAF veya φ(ρz) modelleri) uygulanır. Bu durum sayesinde analiz edilen elementlerin gerçek kütle veya atomik konsantrasyonları güvenli bir şekilde hesaplanabilir. İnce filmler için Cliff-Lorimer ve zeta-factor yöntemleri tipik olarak tercih edilir; standartsız yöntemler pratik olmakla birlikte doğruluk sınırlamaları vardır.

EDX analizi için mekansal çözünürlük, elektron-numune etkileşim hacmi ile sınırlıdır. Etkileşim hacmi; numunenin atom numarası, yoğunluğu ve hızlandırma gerilimi ile ilişkilidir. Düşük kV (1–5 kV) yüzeysel analiz sağlarken, yüksek kV (10–30 kV) daha derin hacimlere nüfus eder. Bu durum, hassas ayrıştırma ve lokalizasyon analizlerin

yorumlanmasında göz önüne alınması gereken önemli bir parametredir (Newbury & Ritchie, 2015).

EDX, özellikle malzeme bilimi, nanoteknoloji, jeoloji ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. EDX tekniği, malzemelerin yüzey morfolojisini gözlemleme imkânı sağlarken bunun yanı sıra kimyasal kompozisyonunun aynı anda incelenebilmesiyle araştırmalarda kritik bir analiz yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca,enerji dağılımlı X ışını (EDX) hızlı ve tahribatsız analiz yapabilmesi nedeniyle geniş bir malzeme aralığında tercih edilmektedir (Goldstein et al., 2017; Newbury & Ritchie, 2015).




**Şekil 4.** EDX 'in şematik gösterimi

### 2.3. Basınç Dayanım Testi

Bu çalışmada ise hazırlanan epoksi bağlayıcılı karbon elyaf ve bazalt elyaf katkılı kompozitlerin basınç dayanımı için 50*50*50 mm ebatlarında üretilen küp numunelerle tespit edilecektir. Numuneler üretimi tarihini izleyen 3, 7 ve 28 gün sonrası her karışımdan en az 3 numune üzerinde TS EN 12390-3 ve ASTM C109/C109M-20'ye göre basınç dayanımı testine tabi tutulacaktır. Deneylerde yükleme hızı sabit olarak 0,6 MPa/s olarak kullanılacaktır. Basınç dayanımı;

$\sigma = F/A$

$\sigma$: Basınç mukavemeti, MPa veya $N/mm^2$,

F: Numuneye kırılmadan önce uygulanan maksimum yük, N,

A: Numuneye yük uygulanan yüzey alanı, $mm^2$

İle hesaplanacaktır. Basınç dayanımı test cihazı Şekil 5 gösterilmektedir.



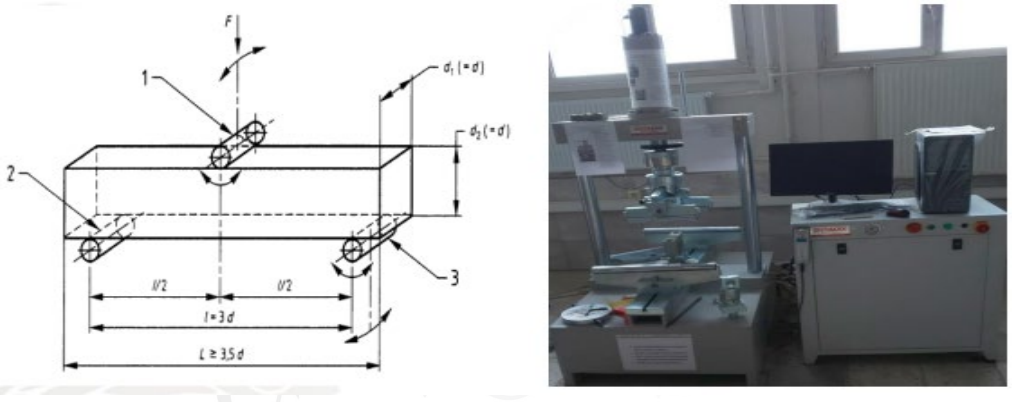
**Şekil 5**. Basınç dayanımı test cihazı

### 2.4. Eğilme Dayanımı Testi

Hazırlanan her karışım için 40x40x160 mm boyutlarında 3 adet kiriş numune üretilerek, TS EN 12390-5 (2010) standartlarına göre 3 noktalı yükleme sistemi ile ve yükleme hızı 50 N/s olarak test edilecektir. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times I}{2 \times d_1 \times d_2^2}$$

Burada, fcf eğilme dayanımı (MPa), F en büyük yük (N), I mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm), d1 ve d2 numunenin en kesit boyutlarıdır (mm). Şekil 6 da gösterilen deney sistemi kullanılarak numunelerin eğilme dayanımları test edilmiştir.




**Şekil 6**. Eğilme dayanımı deney sistemi ve cihazı

### 2.5. Ultrason Darbe Hızı (UPV) Testi

Ses dalgalarında titreşim frekansı 20 kHz'den fazla olan dalgalara ultrasonik dalgalar denir. Malzeme testinde kullanılan ultrasonik dalgalar piezo-elektrik özellik gösteren

transdüserler yardımı ile elde edilir. Numunenin yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalgalar numune içerisinde ilerlerken yolları üzerinde boşluklarla karşılaşırlar. Bu dalgalar boşluk kenarlarına gelince karşı tarafa geçemeyeceğinden, boşluğun etrafından dolaşacaktır. Bu olayın çok fazla sayıda tekrarlanmasıyla ultrasonik dalgaların belirli bir nokta arasındaki yolunu arttıracaktır. Ultrason hızındaki azalma, malzemelerin boşluklu yapıda olduğunu göstermekte buna bağlı olarak da malzemenin dayanımı da azalmaktadır. Transdüserlerin temas ettikleri yüzeylere daha iyi temas edebilmeleri için yüzeylerin temiz, düzgün ve boşluksuz yapıda olmaları ve transdüserlerle numune yüzeyi arasında boşluk kalmayacak bir ultrason jel vb. malzeme katmanı kullanılması gerekir. Ultrasonik hız ölçümleri, laboratuvarımızda mevcut dijital ultrasonik hız ölçme aleti ile tespit edilmiştir. Ultrasonik hızların tespiti için direk ölçüm yöntemi kullanılacaktır.




**Şekil 7**. UPV cihazı

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

## 3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gerçekleştirilen araştırma sonucunda elde edilen bulgular, bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

### 3.1. Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri

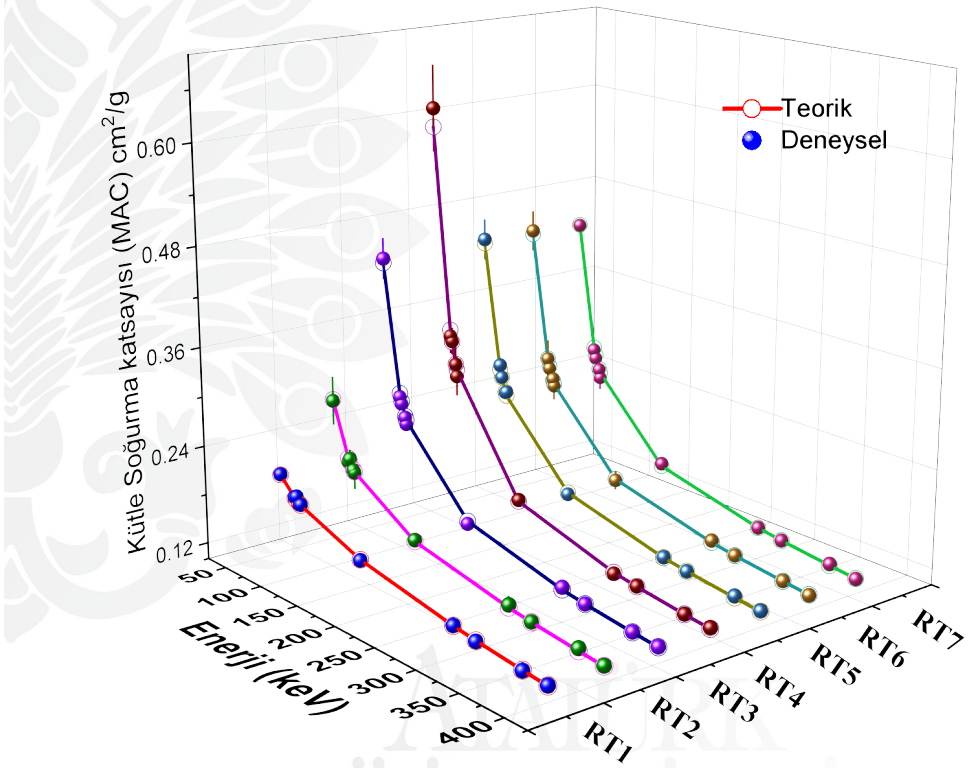
Bu bölümde elde edilen MAC, Zeff, Neff, HVL ve MFP değerleri tablolar ve grafiksel eğilimler ışığında tartışılmıştır. Bu çalışmada, farklı oranlarda $Sb_2O_3$, karbon elyaf ve bazalt elyaf içeren epoksi kompozitlerin kütle azaltma katsayısı (MAC), etkin atom numarası (Zeff), etkin elektron yoğunluğu (Neff), yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri hem teorik (WinXCOM) hem de deneysel (HPGe spektrometresi) yöntemlerle belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, katkı malzemesinin türü ve oranının radyasyon zırhlama performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Numuneler için Ba-133 radyoaktif kaynak kullanılmış ve 53,2–383,9 keV enerji aralığı için değerlendirmeler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Origin programı yardımıyla spektrumlara dönüştürülerek pik alanları hesaplanmıştır. İlk olarak numunelerin teorik ve deneysel MAC değerleri bulunmuştur. Numuneler için teorik MAC değerleri Tablo 2 de, deneysel MAC değerleri Tablo 3 de verilmiştir. Ayrıca teorik ve deneysel değerlerin bir arada yer aldığı veriler Şekil 8 de sunulmuştur.

**Tablo 2**. Kompozit numunelerin teorik MAC değerleri ($cm^2/g$)

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 0.199 | 0.277 | 0.432 | 0.587 | 0.432 | 0.432 | 0.432 |
| 72.8 | 0.178 | 0.211 | 0.276 | 0.342 | 0.276 | 0.276 | 0.276 |
| 75.0 | 0.177 | 0.207 | 0.267 | 0.327 | 0.267 | 0.267 | 0.267 |
| 79.6 | 0.174 | 0.199 | 0.250 | 0.301 | 0.250 | 0.250 | 0.250 |
| 81.0 | 0.173 | 0.197 | 0.245 | 0.294 | 0.245 | 0.245 | 0.245 |
| 160.6 | 0.141 | 0.145 | 0.151 | 0.158 | 0.151 | 0.151 | 0.151 |
| 276.4 | 0.118 | 0.118 | 0.120 | 0.121 | 0.119 | 0.119 | 0.119 |
| 302.9 | 0.114 | 0.114 | 0.115 | 0.116 | 0.115 | 0.115 | 0.115 |
| 356.0 | 0.107 | 0.107 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 |
| 383.9 | 0.104 | 0.104 | 0.104 | 0.105 | 0.104 | 0.104 | 0.104 |

**Tablo 3**. Kompozit numunelerin deneysel MAC değerleri ($cm^2/g$)

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 0.200 | 0.275 | 0.437 | 0.610 | 0.437 | 0.436 | 0.432 |
| 72.8 | 0.179 | 0.206 | 0.272 | 0.334 | 0.282 | 0.276 | 0.273 |
| 75.0 | 0.181 | 0.211 | 0.264 | 0.328 | 0.267 | 0.264 | 0.263 |
| 79.6 | 0.173 | 0.199 | 0.248 | 0.300 | 0.249 | 0.252 | 0.249 |
| 81.0 | 0.174 | 0.196 | 0.241 | 0.286 | 0.250 | 0.243 | 0.239 |
| 160.6 | 0.141 | 0.146 | 0.148 | 0.160 | 0.149 | 0.150 | 0.154 |
| 276.4 | 0.118 | 0.122 | 0.123 | 0.119 | 0.120 | 0.122 | 0.120 |
| 302.9 | 0.113 | 0.115 | 0.115 | 0.117 | 0.115 | 0.115 | 0.115 |
| 356.0 | 0.107 | 0.111 | 0.108 | 0.109 | 0.110 | 0.108 | 0.110 |
| 383.9 | 0.105 | 0.105 | 0.105 | 0.106 | 0.105 | 0.104 | 0.104 |




**Şekil 8**. Kompozit numuneler için Kütle Azaltma Katsayısının enerjiye bağlı değişimi

Elde edilen bulgular, incelenen enerji aralığında (53,2–383,9 keV) MAC değerlerinin genel olarak enerji arttıkça azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, foton-madde etkileşim mekanizmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Düşük enerjili fotonlar için fotoelektrik azaltma baskın etkileşim süreci olduğundan, düşük enerjilerde MAC değerleri yüksek çıkmaktadır. Özellikle 53,2 keV civarındaki değerlerin diğer enerji

noktalarına kıyasla belirgin derecede yüksek olması, fotoelektrik etkinin güçlü katkısından kaynaklanmaktadır.

Enerji yükseldikçe fotoelektrik etkileşimin olasılığı hızlı bir şekilde azalırken, Compton saçılması giderek daha baskın hale gelir. Bu nedenle 72,8–160,6 keV aralığında MAC değerlerinde düzenli bir düşüş gözlenmiştir. Daha yüksek enerjilere çıkıldığında (276,4–383,9 keV), Compton saçılması temel etkileşim mekanizması haline geldiği için MAC değerlerindeki azalma eğilimi görece yavaşlamaktadır. İncelenen enerji aralığında çift oluşumu (pair production) mekanizması için gerekli eşik değerine ulaşılmadığından, bu sürecin katkısı göz ardı edilebilir.

Deneysel ve teorik değerlerin birbirine oldukça yakın çıkması (maksimum %3,85 fark) kullanılan yöntemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Özellikle düşük enerjilerdeki küçük sapmalar, deneysel koşullardan (dedektör çözünürlüğü, pik alanı tayininde istatistiksel hatalar, örnek homojenliği vb.) kaynaklanabilir. Yüksek enerjilerde ise teorik ve deneysel sonuçların daha iyi örtüşmesi, Compton saçılmasının enerjinin artışıyla daha öngörülebilir hale gelmesiyle açıklanabilir.

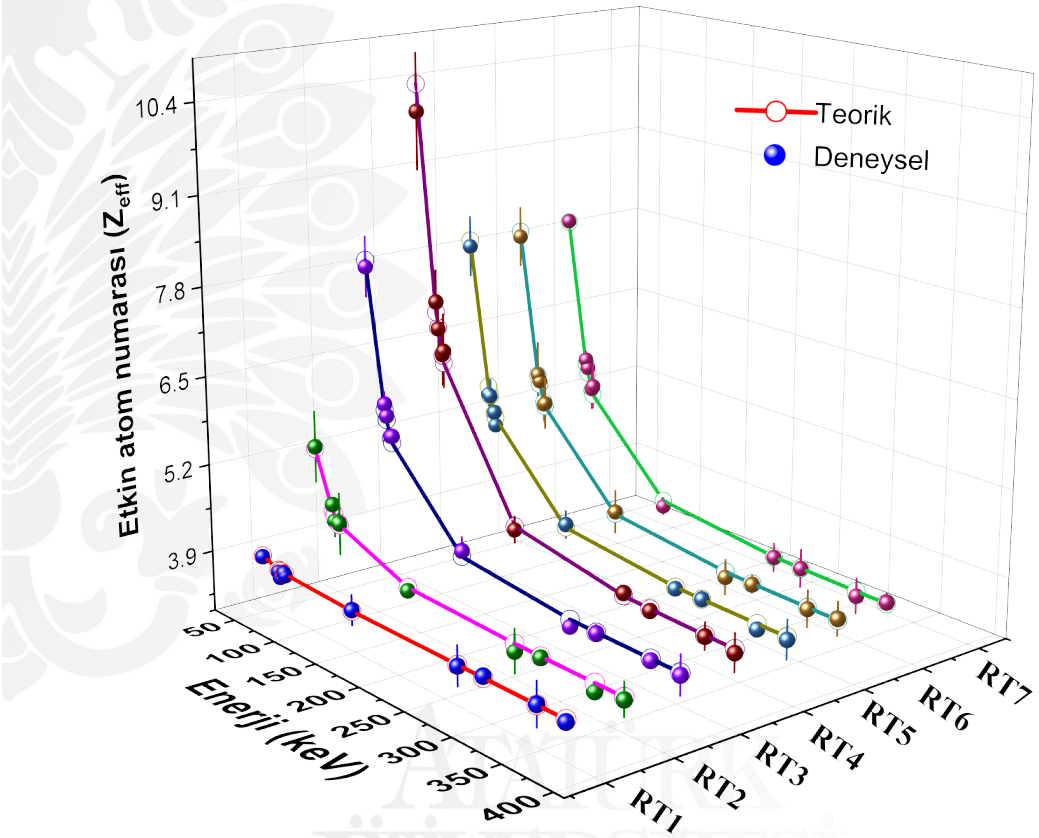
Bu bulgular, kompozit malzemelerdeki katkı maddesi oranının da önemli rol oynadığını göstermektedir. Yüksek atom numarasına (Z) sahip $Sb_2O_3$ katkısı özellikle düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim üzerinden MAC değerlerini belirgin şekilde artırmaktadır. Buna karşılık, karbon elyaf ve bazalt katkıları daha çok Compton saçılmasına etki ederek orta ve yüksek enerji bölgelerindeki davranışı şekillendirmektedir. Böylelikle, kompozitlerin içerik tasarımı sayesinde belirli enerji aralıklarında radyasyon zırhlama performansını optimize etmenin mümkün olduğu görülmektedir.

**Tablo 4**. Kompozit numunelerin teorik etkin atom numarası (Zeff) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.892 | 5.296 | 7.937 | 10.376 | 7.947 | 7.942 | 7.951 |
| 72.8 | 3.793 | 4.466 | 5.791 | 7.090 | 5.798 | 5.795 | 5.800 |
| 75.0 | 3.787 | 4.414 | 5.652 | 6.870 | 5.659 | 5.656 | 5.661 |
| 79.6 | 3.777 | 4.321 | 5.401 | 6.471 | 5.407 | 5.405 | 5.410 |
| 81.0 | 3.774 | 4.296 | 5.334 | 6.364 | 5.340 | 5.337 | 5.342 |
| 160.6 | 3.722 | 3.836 | 4.069 | 4.309 | 4.073 | 4.072 | 4.075 |
| 276.4 | 3.714 | 3.764 | 3.866 | 3.972 | 3.870 | 3.869 | 3.871 |
| 302.9 | 3.713 | 3.758 | 3.851 | 3.947 | 3.854 | 3.853 | 3.855 |
| 356.0 | 3.711 | 3.751 | 3.831 | 3.915 | 3.835 | 3.834 | 3.836 |
| 383.9 | 3.711 | 3.748 | 3.825 | 3.904 | 3.829 | 3.828 | 3.830 |

**Tablo 5**. Kompozit numunelerin deneysel etkin atom numarası (Zeff) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.876 | 5.326 | 7.839 | 9.976 | 7.856 | 7.863 | 7.963 |
| 72.8 | 3.769 | 4.561 | 5.882 | 7.245 | 5.678 | 5.802 | 5.865 |
| 75.0 | 3.694 | 4.328 | 5.713 | 6.851 | 5.654 | 5.712 | 5.745 |
| 79.6 | 3.789 | 4.328 | 5.432 | 6.483 | 5.423 | 5.364 | 5.429 |
| 81.0 | 3.756 | 4.312 | 5.436 | 6.541 | 5.235 | 5.386 | 5.481 |
| 160.6 | 3.737 | 3.792 | 4.155 | 4.258 | 4.122 | 4.105 | 3.988 |
| 276.4 | 3.697 | 3.654 | 3.765 | 4.012 | 3.846 | 3.787 | 3.863 |
| 302.9 | 3.736 | 3.741 | 3.841 | 3.921 | 3.854 | 3.841 | 3.852 |
| 356.0 | 3.720 | 3.632 | 3.806 | 3.898 | 3.758 | 3.811 | 3.769 |
| 383.9 | 3.682 | 3.715 | 3.794 | 3.851 | 3.790 | 3.845 | 3.846 |




**Şekil 9**. Kompozit numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi

Tablo 4, 5 ve Şekil 9 numunelerin etkin atom numaralarının enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Kompozit numuneler için hem teorik hem de deneysel yöntemlerle belirlenen etkin atom numarası (Zeff) değerleri, enerjinin artmasıyla birlikte genel

olarak azalan bir eğilim göstermektedir. Bu eğilim, düşük enerjilerde fotoelektrik soğurmanın baskınlığına, orta ve yüksek enerjilerde ise Compton saçılmasının ön plana çıkmasına bağlanabilir.

Düşük enerji bölgesinde (53,2 keV) en yüksek Zeff değerine sahip numune teorik hesaplamalarda RT4 (10,376) iken deneysel sonuçlarda yine RT4 (9,976) olarak belirlenmiştir. Bu, RT4 numunesinin yüksek atom numaralı katkı maddesi ($Sb_2O_3$) oranının fazla olduğunu ve düşük enerjili fotonların soğurulmasında etkin rol oynadığını göstermektedir. Aynı enerji seviyesinde en düşük Zeff değeri hem teorik hem deneysel hesaplamalarda RT1 numunesine aittir (sırasıyla 3,892 ve 3,876). Bu durum, RT1'in düşük enerjilerde foton soğurma performansının diğer numunelere kıyasla daha zayıf olduğunu ortaya koymaktadır.

Orta enerji bölgesinde (72,8–160,6 keV) teorik ve deneysel değerler arasında yakın bir uyum gözlenmektedir. Örneğin, 160,6 keV'de teorik değerler RT4 için 4,309, RT1 için 3,722 iken; deneysel değerler RT4 için 4,258, RT1 için 3,737 bulunmuştur. Farkların %2–3 bandında kalması, deneysel yöntemlerin güvenilirliğini göstermektedir. Bu bölgede fotoelektrik etkileşimin zayıflaması ve Compton saçılmasının baskın hale gelmesi nedeniyle Zeff değerleri arasındaki farkların azaldığı dikkat çekmektedir.

Yüksek enerji bölgesinde (276,4–383,9 keV) tüm numunelerin Zeff değerleri birbirine oldukça yakınsamaktadır. 383,9 keV'de teorik sonuçlar RT1 için 3,711, RT4 için 3,904; deneysel sonuçlar ise RT1 için 3,682, RT4 için 3,851 olarak bulunmuştur. Bu yakınsama, yüksek enerjilerde foton–madde etkileşiminde Compton saçılmasının baskınlığı ve atom numarasına olan bağımlılığın azalmasıyla açıklanabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde:

RT4 numunesi hem teorik hem deneysel sonuçlarda tüm enerji bölgelerinde en yüksek Zeff değerlerine sahiptir. Bu, RT4'ün zırhlama performansını özellikle düşük enerjilerde artıran bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. RT1 numunesi tüm enerji aralıklarında en düşük Zeff değerleri ile öne çıkmaktadır. Bu durum, RT1'in etkin atom numarası açısından diğer numunelere göre daha düşük performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Teorik ve deneysel sonuçlar arasında genel olarak iyi bir uyum bulunmakta, farklar çoğunlukla %1–4 aralığında kalmaktadır. Düşük enerjilerde görülen sapmalar, deneysel ölçüm hataları (dedektör çözünürlüğü, pik alanı tayinindeki istatistiksel belirsizlikler, örnek homojenliği vb.) ile açıklanabilir. Ayrıca deneysel verilerde elde edilen en büyük hata %8,87 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi hem teorik hem deneysel olarak benzer eğilimler göstermiş, düşük enerjilerde katkı malzemesinin türü ve oranı belirleyici olurken yüksek enerjilerde numuneler arasındaki farkların giderek

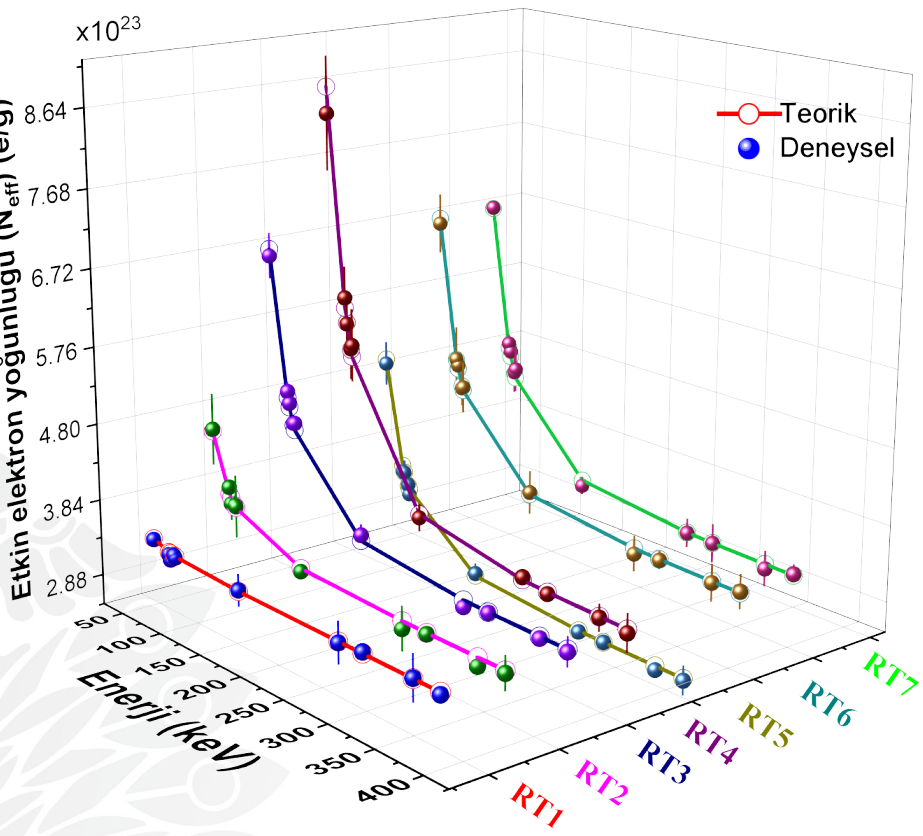
azaldığı ortaya konmuştur. Bu bulgular, kompozit malzemelerin özellikle düşük enerjili gama fotonlarına karşı tasarımında yüksek-Z katkılarının kritik rol oynadığını doğrulamaktadır.

**Tablo 6**. Kompozit numunelerin teorik etkin elektron yoğunluğu (Neff) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.379 | 4.557 | 6.709 | 8.611 | 4.989 | 6.707 | 6.711 |
| 72.8 | 3.293 | 3.843 | 4.894 | 5.884 | 3.640 | 4.894 | 4.896 |
| 75.0 | 3.288 | 3.798 | 4.777 | 5.702 | 3.552 | 4.776 | 4.778 |
| 79.6 | 3.279 | 3.718 | 4.565 | 5.371 | 3.395 | 4.564 | 4.566 |
| 81.0 | 3.277 | 3.697 | 4.508 | 5.282 | 3.352 | 4.507 | 4.509 |
| 160.6 | 3.232 | 3.301 | 3.439 | 3.576 | 2.557 | 3.439 | 3.439 |
| 276.4 | 3.224 | 3.239 | 3.268 | 3.296 | 2.429 | 3.267 | 3.267 |
| 302.9 | 3.223 | 3.234 | 3.255 | 3.275 | 2.420 | 3.254 | 3.254 |
| 356.0 | 3.222 | 3.228 | 3.239 | 3.249 | 2.408 | 3.238 | 3.238 |
| 383.9 | 3.222 | 3.225 | 3.233 | 3.240 | 2.404 | 3.232 | 3.232 |

**Tablo 7**. Kompozit numunelerin deneysel etkin elektron yoğunluğu (Neff) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.365 | 4.583 | 6.626 | 8.279 | 4.932 | 6.640 | 6.721 |
| 72.8 | 3.272 | 3.925 | 4.972 | 6.013 | 3.565 | 4.900 | 4.950 |
| 75.0 | 3.207 | 3.724 | 4.829 | 5.686 | 3.550 | 4.824 | 4.849 |
| 79.6 | 3.290 | 3.724 | 4.591 | 5.380 | 3.405 | 4.530 | 4.582 |
| 81.0 | 3.261 | 3.711 | 4.595 | 5.429 | 3.286 | 4.548 | 4.626 |
| 160.6 | 3.244 | 3.263 | 3.512 | 3.534 | 2.588 | 3.467 | 3.366 |
| 276.4 | 3.210 | 3.144 | 3.182 | 3.330 | 2.414 | 3.198 | 3.261 |
| 302.9 | 3.244 | 3.219 | 3.247 | 3.254 | 2.420 | 3.244 | 3.251 |
| 356.0 | 3.230 | 3.125 | 3.217 | 3.235 | 2.359 | 3.218 | 3.181 |
| 383.9 | 3.197 | 3.197 | 3.207 | 3.196 | 2.379 | 3.247 | 3.246 |




**Şekil 10**. Kompozit numuneler için etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi

Tablo 6, 7 ve Şekil 10 numunelerin etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Kompozit numunelerin etkin elektron yoğunluğu (Neff) değerleri, incelenen enerji aralığında (53,2–383,9 keV) genel olarak enerji arttıkça azalan bir eğilim göstermektedir. Bu durum, foton–madde etkileşim mekanizmalarının enerjiye bağlı değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim baskın olduğu için malzemelerin atom numarası ve elektron yoğunluğu daha belirgin bir etki yaratmakta, yüksek enerjilere çıkıldığında ise Compton saçılması baskın hale gelmekte ve Neff değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

Düşük enerjilerde teorik sonuçlarda en yüksek Neff değeri RT4 (8.611) iken en düşük değer RT1 (3.379) olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarda da benzer şekilde RT4 8.279 ile en yüksek, RT1 3.365 ile en düşük değere sahiptir. Bu sonuç, RT4 numunesinde yüksek atom numaralı katkı maddelerinin (özellikle $Sb_2O_3$) yoğunluk ve elektron sayısı açısından önemli katkı sağladığını, RT1'in ise görece daha düşük yoğunluk ve etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Orta enerjiler (72,8–160,6 keV) için hem teorik hem deneysel değerler düzenli şekilde azalmaktadır. Örneğin 160,6 keV'de teorik Neff RT4 için 3.576, RT1 için 3.232;

deneysel değerler ise RT4 için 3.534, RT1 için 3.244 bulunmuştur. Değerler arasındaki farkın daralması, Compton saçılmasının baskın hale gelmesiyle atom numarasına bağımlılığın azalmasıyla uyumludur.

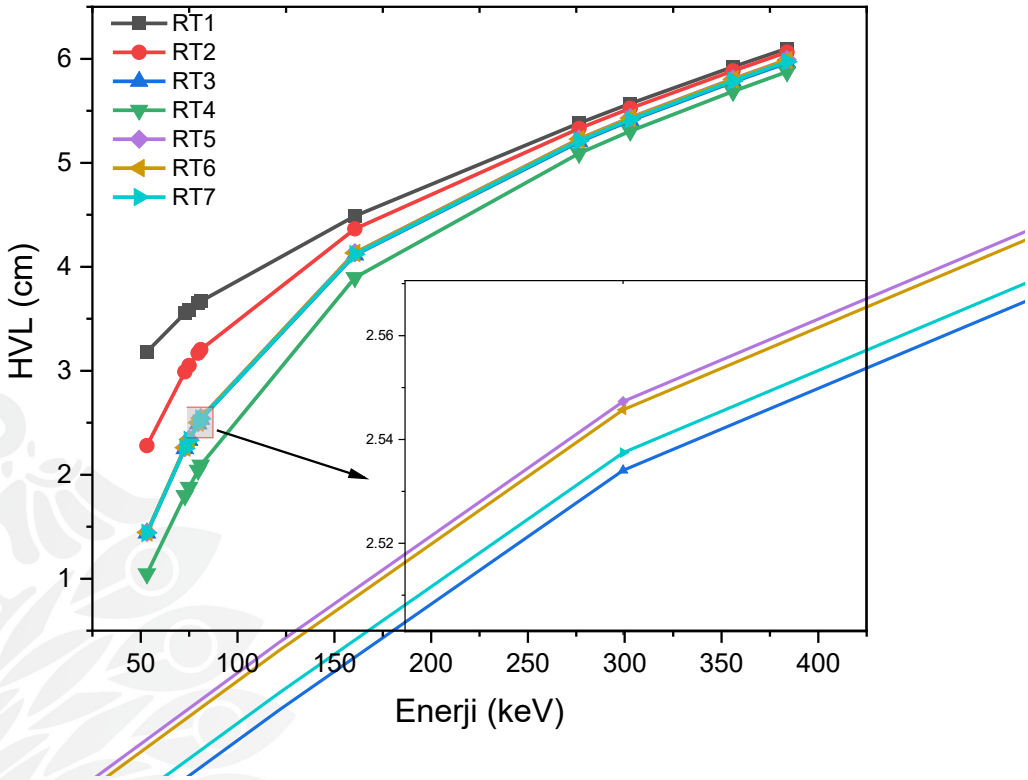
Yüksek enerjiler (276,4–383,9 keV) için tüm numuneler için Neff değerleri birbirine oldukça yakınsamaktadır. 383,9 keV'de teorik değerler RT1 için 3.222, RT4 için 3.240; deneysel değerler RT1 için 3.197, RT4 için 3.196 olarak hesaplanmıştır. Burada dikkat çekici nokta, RT4'ün düşük enerjilerde en yüksek değere sahipken yüksek enerjilerde farkını kaybetmesi ve diğer numunelerle benzer değerlere ulaşmasıdır. Bu durum, yüksek enerjilerde Compton saçılmasının baskın olmasıyla açıklanabilir. Genel olarak etkin elektron yoğunluğu ve etkin atom numarası değerleri, denklem 2.8 deki ilişkiden dolayı benzer sonuçlar göstermiştir.

**Tablo 8**. Kompozit numunelerin teorik yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.182 | 2.279 | 1.439 | 1.047 | 1.446 | 1.446 | 1.440 |
| 72.8 | 3.553 | 2.989 | 2.250 | 1.799 | 2.261 | 2.260 | 2.253 |
| 75.0 | 3.586 | 3.050 | 2.329 | 1.879 | 2.342 | 2.340 | 2.332 |
| 79.6 | 3.650 | 3.169 | 2.488 | 2.043 | 2.501 | 2.499 | 2.491 |
| 81.0 | 3.669 | 3.203 | 2.534 | 2.092 | 2.547 | 2.546 | 2.537 |
| 160.6 | 4.487 | 4.364 | 4.113 | 3.895 | 4.136 | 4.132 | 4.120 |
| 276.4 | 5.382 | 5.330 | 5.202 | 5.092 | 5.231 | 5.226 | 5.212 |
| 302.9 | 5.570 | 5.524 | 5.405 | 5.304 | 5.435 | 5.430 | 5.415 |
| 356.0 | 5.922 | 5.883 | 5.776 | 5.687 | 5.808 | 5.803 | 5.787 |
| 383.9 | 6.100 | 6.064 | 5.960 | 5.875 | 5.993 | 5.988 | 5.972 |

**Tablo 9**. Kompozit numunelerin deneysel yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 3.195 | 2.266 | 1.457 | 1.087 | 1.463 | 1.460 | 1.438 |
| 72.8 | 3.576 | 2.926 | 2.214 | 1.759 | 2.308 | 2.257 | 2.227 |
| 75.0 | 3.674 | 3.110 | 2.304 | 1.885 | 2.343 | 2.317 | 2.298 |
| 79.6 | 3.638 | 3.164 | 2.474 | 2.040 | 2.494 | 2.518 | 2.482 |
| 81.0 | 3.687 | 3.191 | 2.485 | 2.034 | 2.597 | 2.523 | 2.472 |
| 160.6 | 4.470 | 4.415 | 4.026 | 3.941 | 4.086 | 4.099 | 4.208 |
| 276.4 | 5.406 | 5.486 | 5.338 | 5.040 | 5.263 | 5.336 | 5.222 |
| 302.9 | 5.534 | 5.549 | 5.419 | 5.339 | 5.436 | 5.448 | 5.420 |
| 356.0 | 5.908 | 6.069 | 5.814 | 5.712 | 5.925 | 5.838 | 5.889 |
| 383.9 | 6.148 | 6.117 | 6.008 | 5.955 | 6.054 | 5.961 | 5.946 |




**Şekil 11.** Kompozit numuneler için yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimi

Tablo 8, 9 ve Şekil 11 numunelerin yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Kompozit numunelerin HVL değerleri, foton enerjisinin artışıyla birlikte düzenli olarak yükselmiştir. Bu durum, artan enerjiye sahip fotonların malzeme içinden daha kolay geçebilmesi nedeniyle soğurma katsayısının düşmesine ve dolayısıyla daha kalın tabakalara ihtiyaç duyulmasına bağlanabilir.

Düşük enerjilerde (53,2–81,0 keV) numuneler arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Örneğin, 53,2 keV'de RT4 numunesi teorik olarak 1,047 cm, deneysel olarak 1,087 cm HVL ile en düşük değere sahip olmuş; bu da RT4'ün ince bir tabaka ile bile gama ışınlarını zayıflatmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşın RT1 numunesi, hem teorik (3,182 cm) hem deneysel (3,195 cm) hesaplamalarda en yüksek HVL değerine sahiptir. Bu sonuç, RT1'in aynı enerjide radyasyonu azaltmak için daha kalın tabakalara ihtiyaç duyduğunu ve zırhlama etkinliğinin diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Orta enerjilerde (160,6 keV civarı) farklılıkların azaldığı ve numunelerin birbirine daha yakın değerler sergilediği görülmektedir. Örneğin RT4 için HVL değerleri teorik olarak 3,895 cm, deneysel olarak 3,941 cm iken; RT1 için sırasıyla 4,487 cm ve 4,470 cm olarak bulunmuştur. Buradaki farklar düşük enerjiye kıyasla çok daha sınırlıdır, bu da

Compton saçılmasının baskın hale gelmesiyle numuneler arasındaki atom numarası farklarının etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Yüksek enerjilerde (276,4–383,9 keV) tüm numuneler için HVL değerlerinin 5–6 cm civarında yakınsadığı dikkat çekmektedir. Örneğin 383,9 keV'de RT4 için 5,875 cm (teorik) ve 5,955 cm (deneysel), RT1 için 6,100 cm (teorik) ve 6,148 cm (deneysel) olarak bulunmuştur. Bu bölgede farklı numunelerin zırhlama performansları arasındaki fark minimum düzeye inmiştir.

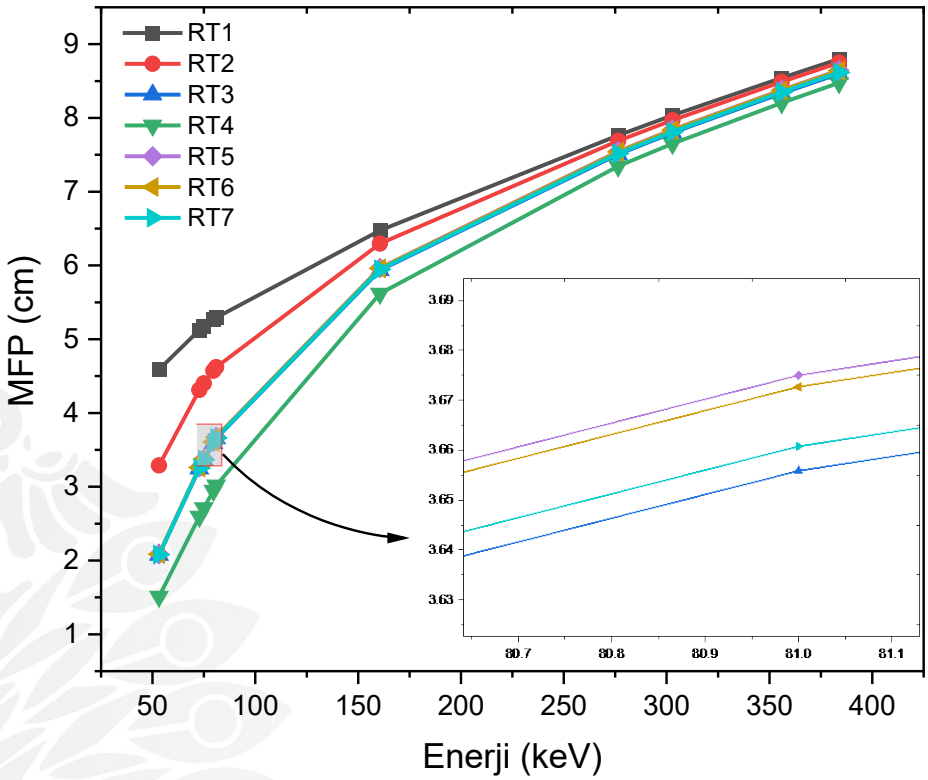
Genel değerlendirme yapıldığında; RT4 numunesi düşük enerji aralıklarında en düşük HVL değerine sahip olarak en güçlü zırhlama yeteneğini göstermiştir. RT1 numunesi ise tüm enerji bölgelerinde en yüksek HVL değerlerine sahip olup, radyasyon geçirgenliğinin en fazla olduğu numune olarak öne çıkmaktadır. Enerji arttıkça numuneler arasındaki farklar azalmış ve HVL değerleri birbirine oldukça yaklaşmıştır.

**Tablo 10**. Kompozit numunelerin teorik ortalama serbest yol (MFP) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 4.591 | 3.288 | 2.076 | 1.510 | 2.087 | 2.086 | 2.078 |
| 72.8 | 5.126 | 4.313 | 3.246 | 2.595 | 3.263 | 3.261 | 3.250 |
| 75.0 | 5.173 | 4.401 | 3.361 | 2.711 | 3.378 | 3.376 | 3.365 |
| 79.6 | 5.266 | 4.572 | 3.589 | 2.948 | 3.608 | 3.606 | 3.594 |
| 81.0 | 5.293 | 4.621 | 3.656 | 3.018 | 3.675 | 3.673 | 3.661 |
| 160.6 | 6.474 | 6.297 | 5.934 | 5.619 | 5.966 | 5.961 | 5.945 |
| 276.4 | 7.764 | 7.690 | 7.505 | 7.346 | 7.546 | 7.540 | 7.519 |
| 302.9 | 8.035 | 7.969 | 7.798 | 7.652 | 7.841 | 7.834 | 7.813 |
| 356.0 | 8.544 | 8.488 | 8.333 | 8.204 | 8.379 | 8.372 | 8.349 |
| 383.9 | 8.800 | 8.748 | 8.599 | 8.476 | 8.646 | 8.639 | 8.615 |

**Tablo 11**. Kompozit numunelerin deneysel ortalama serbest yol (MFP) değerleri

| Enerji (keV) | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.2 | 4.609 | 3.270 | 2.102 | 1.568 | 2.111 | 2.107 | 2.075 |
| 72.8 | 5.159 | 4.221 | 3.195 | 2.538 | 3.330 | 3.257 | 3.214 |
| 75.0 | 5.300 | 4.486 | 3.324 | 2.719 | 3.381 | 3.343 | 3.315 |
| 79.6 | 5.249 | 4.564 | 3.569 | 2.943 | 3.598 | 3.633 | 3.581 |
| 81.0 | 5.319 | 4.604 | 3.586 | 2.934 | 3.747 | 3.639 | 3.566 |
| 160.6 | 6.448 | 6.369 | 5.809 | 5.685 | 5.895 | 5.913 | 6.071 |
| 276.4 | 7.799 | 7.914 | 7.701 | 7.271 | 7.593 | 7.699 | 7.534 |
| 302.9 | 7.985 | 8.005 | 7.817 | 7.702 | 7.842 | 7.859 | 7.820 |
| 356.0 | 8.524 | 8.756 | 8.388 | 8.240 | 8.548 | 8.422 | 8.495 |
| 383.9 | 8.869 | 8.826 | 8.668 | 8.591 | 8.733 | 8.599 | 8.578 |




**Şekil 12**. Kompozit numuneler için ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimi

Tablo 10, 11 ve Şekil 12 numunelerin ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Ortalama serbest yol, fotonların malzeme içinde herhangi bir etkileşime uğramadan kat edebildiği ortalama mesafeyi ifade etmektedir. Bu parametrenin yüksek olması malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesinin düşük olduğuna, düşük olması ise etkin bir zırhlama özelliğine işaret eder. Enerjiye bağlı değişim incelendiğinde MFP değerlerinin enerji arttıkça sürekli yükseldiği görülmektedir. Düşük enerjilerde fotonların malzemede daha kolay soğurulması nedeniyle serbest yol kısalmış, yüksek enerjilerde ise fotonların maddeyle etkileşim olasılığı azaldığından serbest yol uzamıştır.

Ortalama serbest yol (MFP) sonuçları da HVL ile uyumlu şekilde enerjiyle artış göstermiştir. Düşük enerjiler (53,2 keV); Teorik sonuçlarda en kısa serbest yol RT4 (1,510 cm) iken en uzun değer RT1 (4,591 cm) olarak hesaplanmıştır. Deneysel ölçümlerde de aynı eğilim korunmuş, RT4 1,568 cm, RT1 ise 4,609 cm bulunmuştur. Bu sonuç, RT4 numunesinin düşük enerjili gama ışınlarını daha etkili biçimde soğurduğunu, RT1'in ise daha geçirgen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Orta enerjiler (72,8–160,6 keV); Bu bölgede MFP değerleri artış göstermiş ancak numuneler arasındaki farklar kısmen azalmıştır. Örneğin, 160,6 keV'de RT4 için değerler teorik 5,619 cm, deneysel 5,685 cm iken RT1 için sırasıyla 6,474 cm ve 6,448

cm'dir. Bu durum, orta enerjilerde farklı katkı oranlarının etkisinin devam ettiğini fakat düşük enerjilere kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Yüksek enerjiler (276,4–383,9 keV); MFP değerleri bu aralıkta 7–9 cm düzeyine ulaşarak birbirine oldukça yaklaşmıştır. 383,9 keV'de RT4 için değerler teorik 8,476 cm, deneysel 8,591 cm; RT1 için teorik 8,800 cm, deneysel 8,869 cm olarak bulunmuştur. Bu yakınsama, yüksek enerjilerde fotonların madde ile daha az etkileşmesi nedeniyle katkı maddelerinin etkisinin giderek azaldığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde:

Düşük enerjilerde foton–madde etkileşiminde fotoelektrik olay baskın olmuş, bu nedenle katkı malzemesi oranı (özellikle $Sb_2O_3$ içeriği) performansı doğrudan etkilemiştir. Orta ve yüksek enerjilerde Compton saçılmasının hâkimiyetiyle parametreler arasındaki farklar azalmış ve tüm numuneler benzer davranış sergilemiştir. RT4 numunesi tüm parametreler açısından en iyi zırhlama performansını göstermiş; RT1 ise en zayıf sonuçlara sahip olmuştur. Sonuç olarak, kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama kapasiteleri hem foton enerjisine hem de katkı bileşimine duyarlıdır. Özellikle düşük enerjili gama ışınlarına karşı korunmada yüksek-Z katkılarının kritik öneme sahip olduğu, yüksek enerjilerde ise malzeme seçiminin görece daha az belirleyici olduğu görülmüştür. Bu bulgular, radyasyon güvenliği uygulamalarında malzeme tasarımı ve optimizasyonu için yol gösterici niteliktedir.

### 3.2. Mekanik test sonuçları

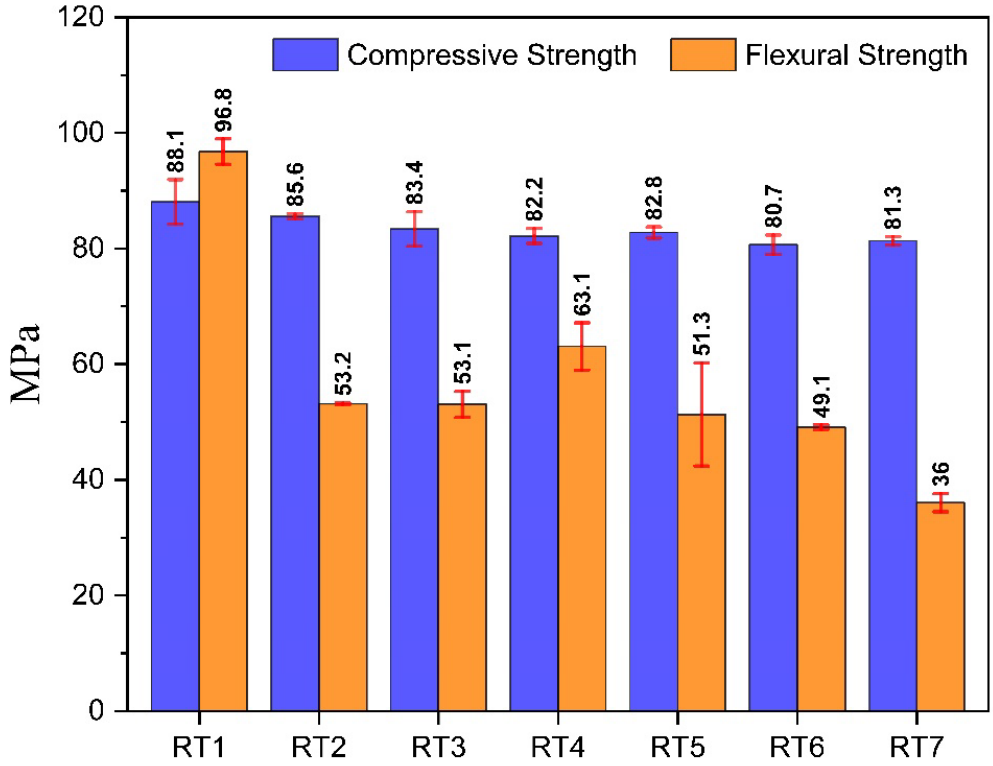
Çalışmada oluşturulan kompozit numuneler için basınç dayanımları ve eğilme dayanımları her bir numune grubu için 3 ayrı numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Atatürk üniversitesi mühendislik fakültesi inşaat bölümü labaratuvarında alınmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları sonuçları Tablo 12 de verilmiştir. Numunelere ait basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde değerlerin 79,22 MPa ile 92,79 MPa arasında değiştiği, ortalama dayanım değerlerinin ise 80,7 MPa ile 88,1 MPa aralığında olduğu görülmektedir. En yüksek ortalama basınç dayanımı PRT1 grubunda (88,1 MPa) elde edilmiştir ve bu grubun özellikle PRT1-1 numunesi 92,79 MPa ile tüm ölçümler arasında en yüksek değeri göstermiştir. Bununla birlikte, PRT1 grubundaki tekrarlarda gözlenen farklılıklar homojenlik açısından sınırlı bir dengesizliği işaret etmektedir. PRT2 grubu (85,6 MPa) ortalama dayanım açısından ikinci sırada yer almakta ve tekrarlar arasındaki sapmaların düşük olmasıyla oldukça kararlı bir yapı sergilemektedir. PRT3, PRT4 ve PRT5 grupları (82–83 MPa bandında) birbirine yakın dayanım değerleri sunmuş, orta düzeyde fakat tutarlı sonuçlar vermiştir. PRT6 grubu (80,7 MPa) en düşük ortalama basınç dayanımına sahip olup özellikle PRT6-2 numunesinde 78,7 MPa ile en düşük bireysel değer kaydedilmiştir, bu durum serideki zayıf nokta olarak dikkat çekmektedir. PRT7 grubu (81,3 MPa) ise dayanım açısından PRT6'dan biraz daha yüksek olmakla birlikte tekrarlardaki tutarlılığıyla öne çıkmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, PRT1 grubu yüksek mukavemet özellikleriyle ön plana çıkarken, PRT2 ve PRT7 grupları homojenlik ve

kararlılık açısından daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, malzeme bileşimi ve üretim parametrelerinin basınç dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve performans farklılıklarını belirgin şekilde ortaya çıkardığını göstermektedir.

**Tablo 12**. Kompozit numunelere ait basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

| | Basınç Dayanımı (Mpa) | Ortalama | Eğilme Dayanımı (Mpa) | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| PRT1-1 | 92.79 | | 99.91 | |
| PRT1-2 | 83.33 | 88.1±3.9 | 94.95 | 96.8±2.2 |
| PRT1-3 | 88.05 | | 95.52 | |
| PRT2-1 | 85.16 | | 53.12 | |
| PRT2-2 | 85.43 | 85.6±0.5 | 53.38 | 53.2±0.2 |
| PRT2-3 | 86.24 | | 52.98 | |
| PRT3-1 | 84.86 | | 54.65 | |
| PRT3-2 | 79.22 | 83.4±3.0 | 49.86 | 53.1±2.3 |
| PRT3-3 | 86.09 | | 54.65 | |
| PRT4-1 | 80.5 | | 68.87 | |
| PRT4-2 | 82.41 | 82.2±1.3 | 60.25 | 63.1±4.1 |
| PRT4-3 | 83.65 | | 60.1 | |
| PRT5-1 | 81.69 | | 63.88 | |
| PRT5-2 | 82.64 | 82.8±1.0 | 44.16 | 51.3±8.9 |
| PRT5-3 | 84.05 | | 45.87 | |
| PRT6-1 | 80.44 | | 48.86 | |
| PRT6-2 | 78.7 | 80.7±1.7 | 48.79 | 49.1±0.4 |
| PRT6-3 | 82.84 | | 49.67 | |
| PRT7-1 | 81.08 | | 33.81 | |
| PRT7-2 | 80.64 | 81.3±0.7 | 37.11 | 36.0±1.6 |
| PRT7-3 | 82.32 | | 37.18 | |

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ



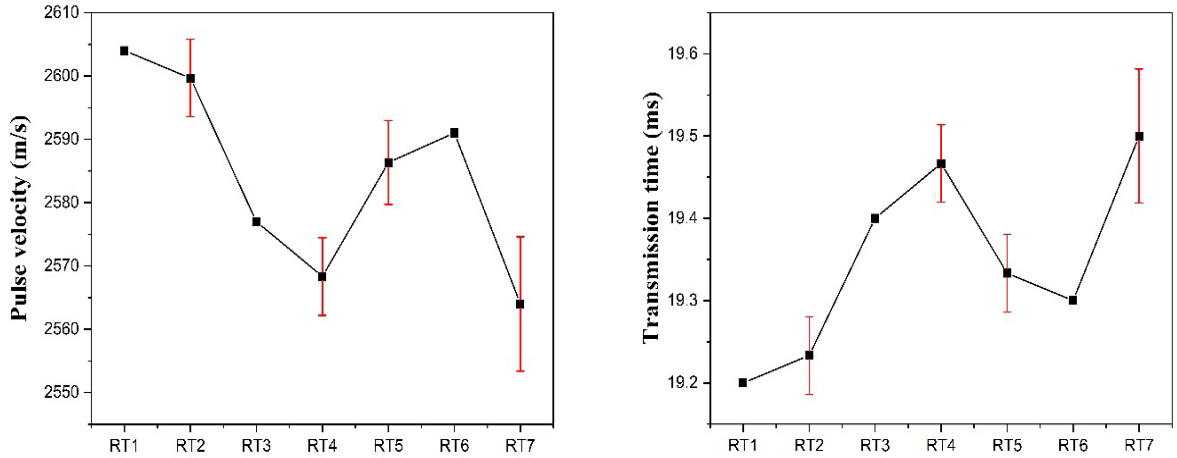

**Şekil 13.** Kompozit numuneler için basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

Kompozitlerin bileşimleri dikkate alındığında, katkısız RT1 (100% epoksi) grubunun basınç altında en yüksek ortalama dayanımı (≈88,1 MPa) verdiği; buna karşın $Sb_2O_3$ ilavesinin (RT2→RT4) oran arttıkça basınç dayanımını kademeli biçimde düşürdüğü (≈85,6→82,2 MPa) görülmüştür. Bu düşüş, partikül–matris ara yüzey bağlarının sınırlı dayanımı ve artan partikül içeriğine bağlı mikro boşluk/topaklanma ihtimaliyle ilişkilendirilebilir. Hibrit katkılar (RT5: %3 $Sb_2O_3$ + %0,1 C + %0,1 bazalt; RT6: %3 $Sb_2O_3$ + %0,2 C; RT7: %3 $Sb_2O_3$ + %0,2 bazalt) basınç dayanımını belirgin biçimde artırmamıştır. RT6'da karbon elyaf oranının artmasıyla ortalama ≈80,7 MPa ile en düşük değer elde edilmiştir, bu da fazla karbonun ara yüzeyi zayıflatıp gözenekliliği artırabildiğini düşündürmüştür. RT7'de bazaltın %0,2 düzeyindeki katkısı yük aktarımına sınırlı bir katkı sunarak ≈81,3 MPa'a çıkarmış ancak saf epoksinin gerisinde kalmıştır.

Eğilme dayanımı incelendiğinde saf epoksi numunesi (PRT1) 96.8 MPa ile en yüksek değeri göstermiştir. Ancak $Sb_2O_3$ katkısı %1–3 seviyelerinde bu değer hızlı bir düşüşle 53–54 MPa aralığına gerilemiştir. %5 katkıda eğilme dayanımı kısmen yükselerek 63.1 MPa seviyesine çıkmıştır. Karbon elyaf ve bazalt elyaf katkısı yapılan PRT5, PRT6 ve PRT7 numunelerinde ise eğilme dayanımı daha da düşerek sırasıyla 51.3 MPa, 49.1 MPa ve 36.0 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle eğilme dayanımı açısından katkı malzemelerinin matris sürekliliğini bozarak mekanik performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir.

**Tablo 13.** Kompozit numunelere ait iletim süresi ve darbe hızı sonuçları

| | İletim süresi (ms) | Ortalama | Darbe hızı (m/s) | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| PRT1-1 | 19.2 | | 2604 | |
| PRT1-2 | 19.2 | 19.20±0.00 | 2604 | 2604.00±0.00 |
| PRT1-3 | 19.2 | | 2604 | |
| PRT2-1 | 19.2 | | 2604 | |
| PRT2-2 | 19.2 | 19.23±0.05 | 2604 | 2599.67±6.13 |
| PRT2-3 | 19.3 | | 2591 | |
| PRT3-1 | 19.4 | | 2577 | |
| PRT3-2 | 19.4 | 19.40±0.00 | 2577 | 2577.00±0.00 |
| PRT3-3 | 19.4 | | 2577 | |
| PRT4-1 | 19.4 | | 2577 | |
| PRT4-2 | 19.5 | 19.47±0.05 | 2564 | 2568.33±6.13 |
| PRT4-3 | 19.5 | | 2564 | |
| PRT5-1 | 19.3 | | 2591 | |
| PRT5-2 | 19.3 | 19.33±0.05 | 2591 | 2586.33±6.60 |
| PRT5-3 | 19.4 | | 2577 | |
| PRT6-1 | 19.3 | | 2591 | |
| PRT6-2 | 19.3 | 19.30±0.00 | 2591 | 2591.00±0.00 |
| PRT6-3 | 19.3 | | 2591 | |
| PRT7-1 | 19.6 | | 2551 | |
| PRT7-2 | 19.5 | 19.50±0.08 | 2564 | 2564.00±10.61 |
| PRT7-3 | 19.4 | | 2577 | |




**Şekil 14**. Kompozit numuneler için iletim süresi ve darbe hızı değerleri

Kompozit numunelerde darbe hızı değerleri 2604 m/s ile 2551 m/s arasında değişmektedir (Tablo 13). Şekil 14 de bu değerlerin hata payları ile beraber bir görseli

sunulmuştur. Saf epoksi (PRT1) 2604 m/s ile en yüksek darbe hızına sahip olurken, en düşük değer 2551 m/s ile PRT7 numunesinde elde edilmiştir. Darbe hızı, malzemenin ani yükler karşısında enerjiyi iletme kapasitesini göstermesi açısından önemli bir parametredir. Bu bağlamda PRT1 numunesi, matris sürekliliğinin bozulmadığı ve katkı malzemesi içermediği için en iyi sonuçları vermiştir.

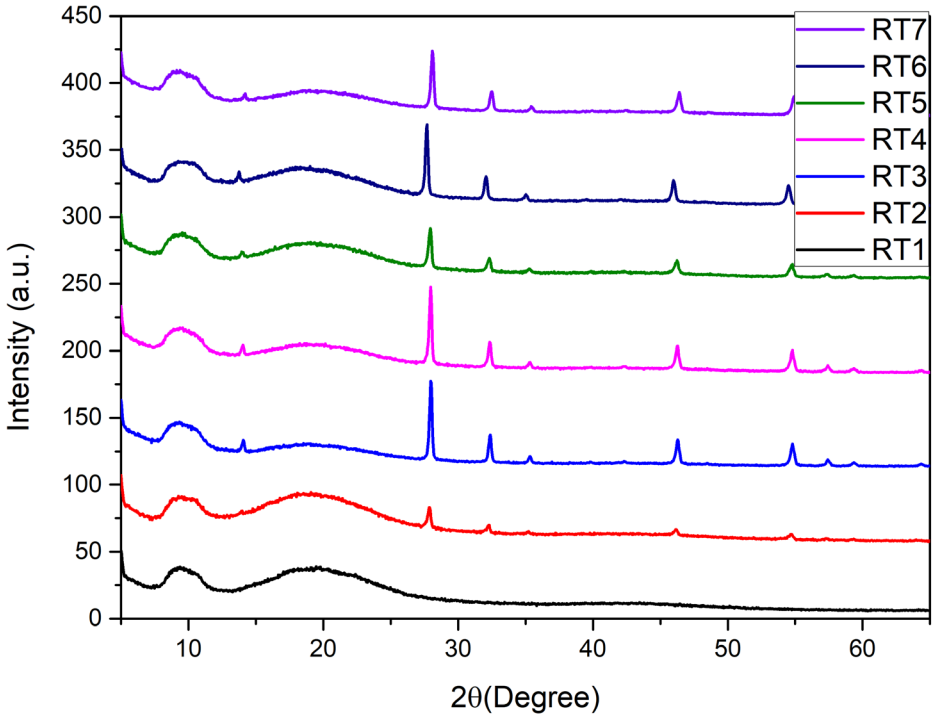
$Sb_2O_3$ katkısı yapıldığında (PRT2–PRT4) darbe hızında kademeli bir düşüş gözlenmiştir. Örneğin, %1 $Sb_2O_3$ içeren PRT2 numunesi 2599.7 m/s değerine sahipken, %5 $Sb_2O_3$ içeren PRT4 numunesinde bu değer 2568.3 m/s'ye kadar gerilemiştir. Bu durum, artan $Sb_2O_3$ oranının matris yapısını sertleştirmesine rağmen enerji iletim yollarında süreksizliklere yol açarak darbe hızını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Karbon elyaf ve bazalt katkılarının birlikte veya ayrı ayrı kullanımı farklı etkiler yaratmıştır. PRT5 numunesi ($Sb_2O_3$ + karbon elyaf + bazalt) 2586.3 m/s ile saf $Sb_2O_3$ katkılı numunelere göre daha yüksek darbe hızı göstermiştir. Benzer şekilde, yalnızca karbon elyaf katkısı içeren PRT6 numunesi 2591 m/s ile en iyi sonuçlardan birini vermiştir. Bu durum, karbon elyafın matris içinde yük transferine katkıda bulunarak darbe hızını iyileştirdiğini göstermektedir. Buna karşın yalnızca bazalt katkısı içeren PRT7 numunesinde darbe hızı 2564 m/s ile en düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu sonuç, bazaltın epoksi matrisle yeterince güçlü bir bağ kuramaması nedeniyle enerji iletim yollarında süreksizliklere yol açtığını düşündürmektedir.

Tablo 13 de kompozit numunelere ait iletim süresi değerleri 19.2–19.6 ms aralığında değiştiği görülmektedir. Saf epoksi (PRT1) numunesi 19.20 ms ile en kısa iletim süresine sahiptir. Bu sonuç, katkı malzemesi bulunmayan epoksi matrisin enerji iletiminde daha hızlı davrandığını ve süreksizlikten kaynaklı gecikmelerin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. $Sb_2O_3$ katkısı yapıldığında iletim sürelerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. PRT2 (%1 $Sb_2O_3$) 19.23 ms, PRT3 (%3 $Sb_2O_3$) 19.40 ms ve PRT4 (%5 $Sb_2O_3$) 19.47 ms değerlerine sahiptir. Bu eğilim, artan katkı oranının matris sürekliliğini bozarak enerji transferi yollarını uzattığını ve dolayısıyla iletim süresini artırdığını göstermektedir. Özellikle %5 $Sb_2O_3$ katkılı PRT4 numunesinde saf epoksiye kıyasla yaklaşık %1.4'lük bir artış meydana gelmiştir.

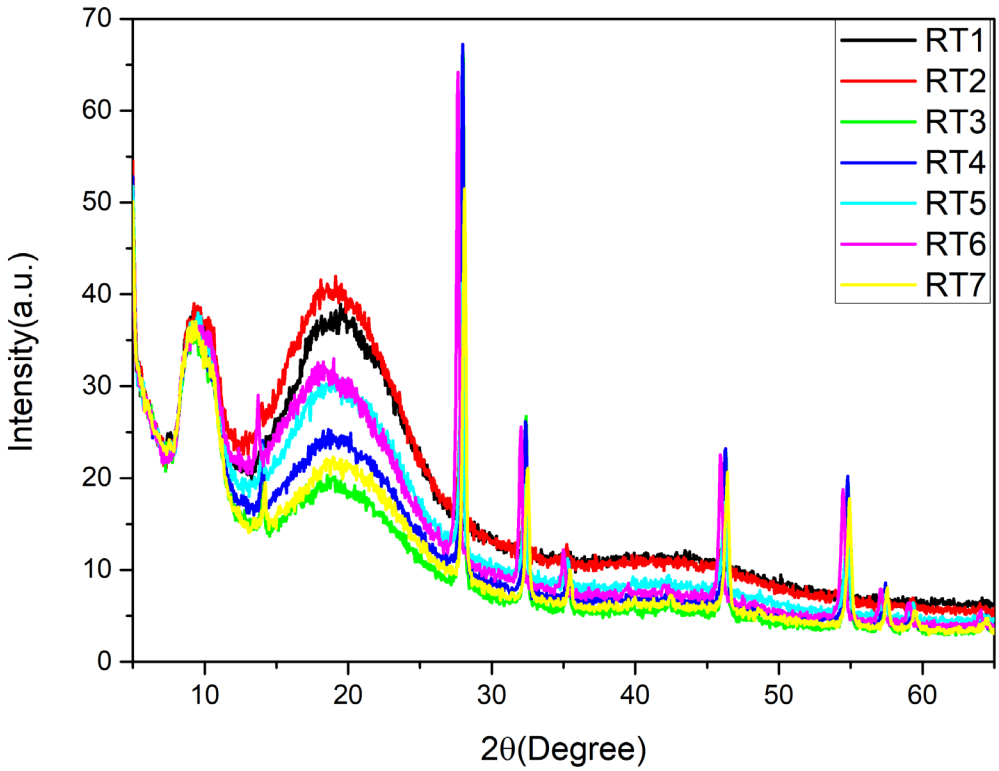
Karbon elyaf katkısının tek başına bulunduğu PRT6 numunesinde iletim süresi 19.30 ms olarak ölçülmüş ve %3 $Sb_2O_3$ katkılı PRT3'e kıyasla daha düşük kalmıştır. Bu sonuç, karbon elyaf katkısının matris içinde enerji iletimini kolaylaştırıcı bir rol üstlenmiş olabileceğini göstermektedir. Buna karşın bazalt katkısının tek başına bulunduğu PRT7 numunesinde iletim süresi 19.50 ms ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, bazaltın epoksi matrisle zayıf ara yüzey bağlanması nedeniyle enerji transferini yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Karbon elyaf ve bazaltın birlikte bulunduğu PRT5 numunesinde ise iletim süresi 19.33 ms olup, yalnızca $Sb_2O_3$ katkısı içeren numunelere kıyasla daha düşük bir değer vermiştir. Bu sonuç, karbon elyafın enerji transferini hızlandırıcı etkisinin, bazaltın olumsuz etkisini kısmen dengelediğini göstermektedir.

### 3.3. X-ışını difraksiyonu (XRD), Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin kristal yapısı, θ-2θ Bragg Brentana konfigürasyonunda (CuKa (λ = 1,5405 A˚) bir X-ışını difraktometresi kullanılarak XRD ile analiz edildi. 5° ile 65° arasında bir 2θ açı aralığında gerçekleştirilen RT1, RT2, RT3, RT4, RT5, RT6 ve RT7 yapı örnekleri için X-ışını kırınımı analizinin sonuçları Şekil 15 ve 16 da sunulmuştur. Referans Kodu 00 005 0534'e göre, yaklaşık 27,97°, 32,42°, 46,26° ve 54,79°'de gözlenen belirgin pikler sırasıyla (222), (400), (440) ve (622) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu desenler, a, b ve c uzunluklarının 11,15 Å (Zheng et al., 2025; Bai et al.. 2025). Ayrıca, tüm yapıların XRD desenlerinde gözlenen 9,23 ve 19,22 derecelerdeki iki belirgin tepe, 00-008-0594 koduyla referans alınan cis-9,10-epoksioktadekanol yapısına atfedilmektedir.




**Şekil 15**. Kompozit numuneler için XRD deseni.




**Şekil 16**. Kompozit numuneler için XRD deseni.

X-ışını kırınımı (XRD) desenleri aynı eksen boyunca ve tutarlı koşullar altında analiz edildiğinde, tepe yoğunlukları ve bu kırınım desenlerinin ortaya çıktığı açılar kısmen yorumlanabilir. XRD kırınım deseninin ve kompozit bileşimini özetleyen Tablo 1'in daha yakından incelenmesi, RT1 yapısının yalnızca epoksiden oluştuğunu ve cis-9,10-epoksioktadekanol yapısına atfedilen iki geniş tepeye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, yapının muhtemelen nanopartiküllere veya amorf malzemelere benzediğini düşündürmektedir.

RT2 yapısında, nispeten düşük antimon miktarı, tepelerinin daha düşük yoğunluğuna katkıda bulunmuş olabilir. Antimon miktarları RT3, RT5, RT6 ve RT7 yapıları arasında tutarlıdır. RT3 ve RT5 yapılarının merkezi tepe noktası referans olarak kullanıldığında, RT6 tepe noktasının daha küçük açılara kaydığı görülmektedir. Bu, nispeten yüksek karbon elyaf içeriğinin kristal tane boyutundaki artışla ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, RT7 tepe noktası daha büyük açılara kaymıştır ve bu da kristal boyutunun artan bazalt içeriği nedeniyle azaldığını göstermektedir. Karbon elyaf ve bazalt elyaf varlığının zıt etkileri, RT3 ve RT5 yapılarında neredeyse aynı özelliklere sahip tepe noktalarının oluşmasına yol açmıştır.

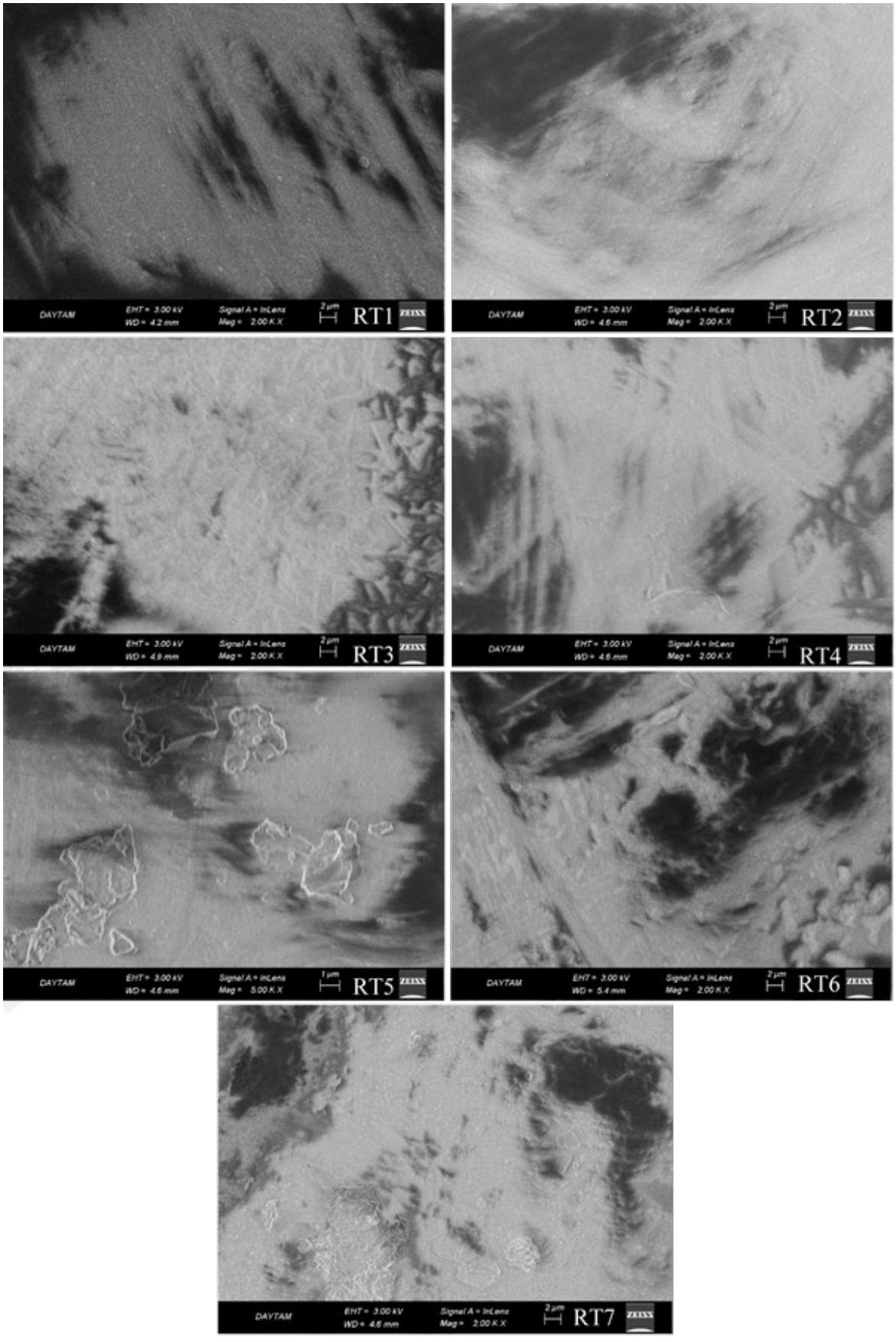
Debye Scherrer denklemi, $D = K\lambda / \beta Cos\theta$, nanopartiküllerin kristal boyutunu hesaplamak için kullanılır. Burada D yapının kristal boyutu, K Scherrer sabitini (0,98), λ dalga boyunu (1,54) ve β maksimum yarı genişlik (FWHM) değerini ifade eder.

Scherrer ilişkisi İnce filmdeki kristalit boyutunu, merkezi kırınım tepe noktasının yarı genişliğini analiz ederek tahmin etmek için kullanılır. Bu denklemde, λ X-ışınının dalga boyunu, β kırınım desenindeki keskin tepe noktasının yarı maksimumdaki tam genişliğini (FWHM) (radyan cinsinden ifade edilir), θ kırınım açısını ve D kristalit çapını temsil eder. En az antimon içeren RT2 yapısının kristalit boyutu 34 nm olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, en fazla antimon içeren RT4 yapısının kristalit boyutu 40 nm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 14.** Kompozit numunelere ait EDX analiz sonuçları

| Numuneler | C(%) | | | O(%) | | | Cl(%) | | | Sb(%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ağırlık | Atomik | Hata | Ağırlık | Atomik | Hata | Ağırlık | Atomik | Hata | Ağırlık | Atomik | Hata |
| RT1 | 68.49 | 74.57 | 4.36 | 30.76 | 25.16 | 10.69 | 0.75 | 0.27 | 8.27 | - | - | - |
| RT2 | 74.2 | 79.49 | 3.86 | 25.29 | 20.34 | 12.38 | 0.45 | 0.16 | 16.38 | 0.07 | 0.01 | 62.7 |
| RT3 | 73.88 | 79.36 | 4.28 | 25.16 | 20.29 | 12.38 | 0.93 | 0.34 | 7.54 | 0.03 | 0 | 54.24 |
| RT4 | 65.98 | 72.27 | 4.07 | 33.68 | 27.7 | 10.61 | - | - | - | 0.34 | 0.04 | 56.18 |
| RT5 | 70.36 | 76.11 | 3.99 | 29.27 | 23.77 | 11.19 | 0.3 | 0.11 | 20.27 | 0.07 | 0.01 | 61.5 |
| RT6 | 71.32 | 77.05 | 4.19 | 27.96 | 22.68 | 11.67 | 0.57 | 0.2 | 14.8 | 0.15 | 0.02 | 62.42 |
| RT7 | 65.83 | 72.07 | 4.1 | 33.96 | 27.91 | 10.63 | - | - | - | 0.21 | 0.02 | 49.06 |

Yapıların kimyasal bileşimi, Tablo 14'da gösterildiği gibi enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizi kullanılarak doğrulandı. Tablo 14'daki EDX sonuçları, RT4 numunesinin en yüksek antimon kütlesini içerdiğini göstermektedir; bu, kristalin boyutu ile ilgili XRD bulgularıyla örtüşmektedir. Tablo 14'de gösterildiği gibi, bu sonuçlar Tablo 1'daki sonuçlarla kısmen tutarlıdır. Bazı farklılıklar, nanometre ölçekli bir alandan alınan EDX ölçümlerinden kaynaklanıyor olabilir. Ek olarak, yapı içindeki klor, bazalt ve antimon kütlesindeki değişiklikler, yüzde sonuçlarını etkileyerek yarı nicel ölçümlere yol açmış olabilir. RT1 yapısı için XRD deseninde antimon oksidin yokluğu ve RT4'ün XRD desenindeki daha yüksek pik yoğunluğu, EDX bulgularını desteklemektedir. Ayrıca, RT2'den RT7'ye kadar olan yapılarda belirgin antimon oksit piklerinin, ilgili miktarlarıyla orantılı olarak yoğunluklarının arttığı görülmektedir.




**Şekil 17**. Kompozit numuneler için SEM görüntüleri.

Yüzey ve morfolojik inceleme için Zeiss Sigma300 model SEM kullanılmıştır. Şekil 17, RT1 ila RT7 yapılarının yüzey morfolojisini gösteren 2000x büyütmeli bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünü sunmaktadır. SEM ölçümleri için uygun olmadıkları için bu yapılar daha küçük ölçeklerde incelenmiştir. Numunelerin yüzey morfolojileri, katkı maddelerinin dağılım özellikleri ve matris ile etkileşimleri değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri RT1'den RT7'ye kadar farklı katkı oranlarını göstermekte olup, mekanik test sonuçları ile paralel değerlendirilmiştir.

RT1 numunesine ait SEM görüntüsü homojen ve pürüzsüz bir yüzey yapısı sergilemektedir. Belirgin faz ayrımı veya boşluk gözlenmemektedir. Bu yapı, saf epoksinin matris sürekliliğinin yüksek olduğunu ve katkı malzemeleri ile bozunmadığını göstermektedir. RT2 numunesinde matris içinde dalgalı ve lif benzeri yapılar gözlenmektedir. $Sb_2O_3$ parçacıkları homojen şekilde dağılmış olup belirgin aglomerasyon gözlenmemektedir. Düşük orandaki katkı, matris sürekliliğini kısmen bozmuş ve enerji transfer yollarında hafif etkiler yaratmıştır. RT3 numunesinde parçacık kümelenmeleri ve heterojen bir yüzey yapısı göze çarpmaktadır. $Sb_2O_3$ oranı arttıkça parçacıkların bir araya toplanma eğilimi artmış ve matris içinde süreksizlikler oluşmuştur. Bu durum, özellikle eğilme dayanımındaki düşüş ile uyumludur. RT4 numunesi belirgin faz ayrımı ve gözenek oluşumu sergilemektedir. Yüksek $Sb_2O_3$ oranı, epoksi ile uyumsuzluğu artırmış ve matris sürekliliğini zayıflatmıştır. Bu yapı, darbe hızı ve iletim süresi değerlerindeki olumsuz değişimlerle ilişkilidir. RT5 numunesinde yüzeyde düzensiz ve farklı boyutlarda parçacık kümelenmeleri gözlenmiştir. Karbon elyaf ve bazaltın homojen dağılmadığı, bazı bölgelerde aglomerasyon oluşturduğu görülmektedir. Bu yapı, mekanik dayanımın düşmesine ve malzemenin gevrekleşmesine neden olmuştur. RT6 numunesinde karbon elyaf parçacıklarının matris içerisinde daha homojen dağıldığı görülmektedir. Aglomerasyon RT5'e kıyasla daha azdır. Bu durum, darbe hızının PRT6 numunesinde nispeten daha yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Karbon elyaf katkısı, bazalt katkısına kıyasla daha düzenli bir yapı sağlamıştır. RT7 numunesinde bazalt partikülleri belirgin düzensizlikler oluşturmuş ve yüzey oldukça heterojen bir görünüm almıştır. Bazaltın epoksi matrisle zayıf ara yüzey etkileşimi, enerji transferini olumsuz etkilemiştir. Bu yapı, iletim süresinin artması ve darbe hızının en düşük seviyeye ulaşması ile uyumludur.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada epoksi esaslı kompozit malzemeler farklı oranlarda $Sb_2O_3$, karbon elyaf ve bazalt katkıları ile üretilmiş, numunelerin mekanik özellikleri, darbe davranışları, mikroyapısal karakterizasyonları ve radyasyon zırhlama performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

Saf epoksi (RT1), düşük yoğunluğu ve düşük atom numarası nedeniyle en zayıf zırhlama performansına sahip olmuştur. Lineer zayıflama katsayısı (μ) düşük, HVL ve MFP değerleri ise yüksek bulunmuştur. $Sb_2O_3$ katkısı arttıkça μ değerleri artmış, HVL ve MFP değerleri azalmıştır. %5 $Sb_2O_3$ katkılı RT4 numunesi en iyi zırhlama performansını göstermiştir. Zeff değeri, $Sb_2O_3$ katkısı ile anlamlı biçimde artmıştır. RT4 numunesi, yüksek-Z katkısı sayesinde en yüksek Zeff değerine ulaşmıştır. Karbon elyaf katkısı (RT6), Zeff üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuş ancak mekanik performansa katkı sağlamıştır. Bazalt katkısı (RT7), Zeff'i belirgin şekilde artırmamış ve zırhlama performansına sınırlı katkı sağlamıştır. Karbon ve bazalt katkılı numunelerde HVL ve MFP değerleri, saf $Sb_2O_3$ katkılı numunelere kıyasla daha yüksek çıkmış ve etkin zırhlama sağlanamamıştır. Genel olarak en iyi zırhlama RT4 (%5 $Sb_2O_3$) numunesinde, en zayıf zırhlama ise RT1 (saf epoksi) numunesinde elde edilmiştir.

Saf epoksi (PRT1) numunesi, basınç (88.1 MPa) ve eğilme dayanımı (96.8 MPa) açısından en yüksek değerlere ulaşmıştır. Katkı malzemesi bulunmadığında matris sürekliliği bozulmamış, yük taşıma kapasitesi yüksek olmuştur. $Sb_2O_3$ katkısı ile basınç dayanımı kısmen azalmış, eğilme dayanımı ise belirgin şekilde düşmüştür. %3 $Sb_2O_3$ içeren PRT3 numunesinde eğilme dayanımı 53 MPa seviyelerine kadar gerilemiştir. Karbon elyaf katkısı (PRT6), darbe hızını artırarak mekanik davranışta olumlu etki göstermiştir. Ancak eğilme dayanımı açısından saf epoksiye kıyasla daha düşük değerler vermiştir. Bazalt katkısı (PRT7) mekanik özelliklerde en düşük değerlere yol açmıştır. Özellikle eğilme dayanımı 36 MPa seviyelerine kadar düşmüştür.

Saf epoksi (PRT1), 2604 m/s darbe hızı ve 19.20 ms iletim süresi ile en iyi sonuçları vermiştir. $Sb_2O_3$ katkısı arttıkça darbe hızı azalmış, iletim süresi artmıştır. %5 $Sb_2O_3$ katkılı PRT4 numunesi 2568.3 m/s darbe hızı ve 19.47 ms iletim süresi ile en zayıf sonuçlardan birini vermiştir. Karbon elyaf katkısı (PRT6), 2591 m/s darbe hızı ve 19.30 ms iletim süresi ile $Sb_2O_3$'un olumsuz etkisini kısmen dengelemiştir. Bazalt katkısı (PRT7), 2564 m/s darbe hızı ve 19.50 ms iletim süresi ile en düşük performansı göstermiştir.

Saf epoksi (RT1), homojen ve süreksizlik içermeyen bir yapı sergilemiştir. $Sb_2O_3$ katkısı arttıkça matris sürekliliği bozulmuş, özellikle %5 katkıda parçacık kümelenmeleri ve gözenekler belirginleşmiştir. Karbon elyaf katkısı (RT6), matris içinde daha homojen dağılım sağlamış ve aglomerasyon eğilimini azaltmıştır. Bazalt katkısı (RT7), heterojenlik oluşturmuş ve epoksi ile zayıf ara yüzey etkileşimi sergilemiştir. Bu yapı, darbe ve mekanik performanstaki düşüşlerle uyumludur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, epoksi matrisli kompozitlerde katkı malzemelerinin radyasyon zırhlama ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin birbirinden farklı yönlere evrildiğini göstermektedir. Antimon trioksit ($Sb_2O_3$) katkısı, özellikle düşük enerjili foton etkileşimlerinde etkin rol oynayarak radyasyon soğurma kapasitesini artırmış, fakat artan katkı oranı mekanik özelliklerde belirgin zayıflamalara yol açmıştır. Bu nedenle, ileride yapılacak çalışmalarda nano boyutta veya yüzey modifikasyonu uygulanmış $Sb_2O_3$ partiküllerinin kullanımı ile matris uyumunun geliştirilmesi önerilmektedir. Karbon elyaf katkısı, darbe hızı ve iletim süresi üzerinde olumlu etki göstermiştir; bu durum karbon elyaf esaslı katkıların yük transferi mekanizmalarını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda grafen, karbon nanotüp veya benzeri ileri karbon yapılarının kullanımı, mekanik özellikler ile birlikte elektriksel ve termal özelliklerde de iyileştirme sağlayabilir. Bazalt katkısı ise mevcut haliyle mekanik ve mikroyapısal açıdan olumsuz sonuçlar doğurmuş, ancak uygun yüzey işlemleri ya da daha ince partikül boyutlarının tercih edilmesiyle epoksi matrisle uyumu artırılarak performansının iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Uygulama alanları açısından değerlendirildiğinde, yüksek-Z katkılı numuneler radyasyon güvenliği için öne çıkarken, karbon elyaf katkılı numuneler darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda avantajlı hale gelmektedir. Gelecek çalışmaların yalnızca gama ışınları ile sınırlı kalmayıp nötron zırhlama performanslarını da içermesi, ayrıca bu kompozitlerin ısıl dayanım, çevresel etkilere karşı direnç ve uzun dönemli kararlılık gibi mühendislik açısından kritik özelliklerinin test edilmesi önem arz etmektedir. Böylelikle, geliştirilen kompozitlerin hem yapısal hem de radyasyon güvenliği uygulamalarında daha geniş bir kullanım potansiyeline sahip olması sağlanabilir.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

## Referanslar


Arslan, İ., 2023, Nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilecek nikel tabanlı bazı önemli alaşımların radyasyon zırhlama karakteristiklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Attix, F. H. (2004). Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley-VCH

Belgin, E. E., 2017, Elektromanyetik radyasyon zırhlama uygulamaları için farklı metal tuz takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Springer.

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement (4th ed.).* John Wiley & Sons.

Midgley, Stephen M. (2004). A parameterization scheme for the x-ray mass attenuation coefficient and energy absorption coefficient. *Physics in Medicine & Biology, 49(4),* 307–322. https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/4/016

Newbury, D. E., & Ritchie, N. W. M. (2015). Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative Scanning, 37(1), 1–22.

Reimer, L., & Kohl, H. (2008). *Transmission electron microscopy: Physics of image formation*. Springer.

Simon, S. L., & Linet, M. S., 2014, Radiation-exposed populations: who, why, and how to study. *Health Physics, 106(2),* 182-195.

Şen Baykal, D. (2021). *Radyoloji ünitelerinde kullanılabilecek cam zırhlama malzemelerine farklı kimyasal katkılamalarının etkisinin Monte Carlo yöntemi ile incelenmesi* (Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. Springer.


ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ