



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



UZAY UYGULAMALARI İÇİN KARBON
NANOTÜP VE BOR NİTRÜR TAKVİYELİ
KARBON/EPOKSİ NANOKOMPOZİTLER
İLE NÖTRON VE GAMA RADYASYONU
ZIRHLAMASI

Muhammed Yasin PEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Yasin PEKER tarafından hazırlanan ‘‘Uzay Uygulamaları İçin Karbon Nanotüp ve Bor Nitrür Takviyeli Karbon/Epoksi Nanokompozitler ile Nötron ve Gama Radyasyonu Zırhlaması’’ adlı tez çalışması 19/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mesut UYANER

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi DİLTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammed Yasin PEKER

Tarih: 31.07.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UZAY UYGULAMALARI İÇİN KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR TAKVİYELİ KARBON/EPOKSI NANOKOMPOZİTLER İLE NÖTRON VE GAMA RADYASYONU ZIRHLAMASI

Muhammed Yasin PEKER

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN

2024, 53 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN

Prof. Dr. Mesut UYANER

Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi DİLTEMİZ

Kompozit malzemelerin uzay endüstrisine adapte edilmesi, uzay araçlarının yapısal ve termal kontrol alt sistemlerinde önemli ölçüde bir dönüşüme yol açmıştır. Bu dönüşüm, kompozit malzemelerin hafif yapılarından ve üstün mekanik ve termal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle, mevcut ve gelecekteki derin uzay görevleri için önemli bir engel olan uzay radyasyonunun etkilerini azaltma konusundaki uygulamaları dikkat çekicidir. Bu çalışma, çeşitli elementler ve nanopartiküllerle güçlendirilmiş karbon fiber kompozitlerin geleneksel radyasyon koruyucu malzemelere alternatif olma potansiyelini araştırmaktadır. Gama ışını ve nötron radyasyonu zayıflamasına odaklanarak, karbon fiber/epoksi kompozitlere çeşitli ağırlık oranlarında karbon nanotüp (CNT) ve bor nitrür (BN) nanopartikülleri dâhil edilmiştir. Cs-137 gama ışını ve ²³⁹Pu-Be nötron kaynaklarının kullanıldığı deney düzeneklerinde altı grup numune incelenmiştir; katkısız karbon fiber/epoksi, ağırlıkça %0,5 CNT, %0,5 BN, %0,5 CNT + %0,5 BN, %1 CNT + %1 BN ve %2 BN. Sonuçlar, ağırlıkça %2 BN içeren numunenin hem gama ışını hem de nötron radyasyonuna karşı en etkili zayıflatma özelliklerini sergilediğini ve gama ışını radyasyonuna kıyasla nötron radyasyonuna karşı neredeyse üç kat daha etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama, gama ışını, nötron, kompozit malzemeler, bor nitrür, karbon nanotüp

ABSTRACT

MS THESIS

NEUTRON AND GAMMA RADIATION SHIELDING WITH CARBON NANOTUBE AND BORON NITRIDE REINFORCED CARBON/EPOXY NANOCOMPOSITES FOR SPACE APPLICATIONS

Muhammed Yasin PEKER

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN AERONAUTICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

2024, 53 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Prof. Dr. Mesut UYANER

Assoc. Prof. Dr. Seyid Fehmi DİLTEMİZ

The adoption of composite materials within the space industry has significantly transformed the structural and thermal control subsystems of space vehicles. This transformation stems from their lightweight nature and superior mechanical and thermal properties. Particularly, their application in mitigating the effects of space radiation, which is a significant challenge for current and future deep space missions, is noteworthy. This study explores the potential of carbon fiber composites, reinforced with diverse elements and nanoparticles, as alternatives to traditional radiation shielding materials. Focusing on gamma-ray and neutron radiation attenuation, various weight ratios of carbon nanotube (CNT) and boron nitride (BN) nanoparticles were incorporated into carbon fiber/epoxy composites. Experimental setups utilizing Cs-137 gamma-ray and ²³⁹Pu-Be neutron sources examined six groups of specimens; non-doped carbon fiber/epoxy, 0.5 wt.% CNT, 0.5 wt.% BN, 0.5 wt.% CNT + 0.5 wt.% BN, 1 wt.% CNT + 1 wt.% BN, and 2 wt.% BN. Results demonstrate that the 2 wt.% BN specimen exhibits the most effective attenuation properties against both gamma-ray and neutron radiation, with nearly triple the effectiveness against neutron radiation compared to gamma-ray radiation.

Keywords: Radiation shielding, gamma-ray, neutron, composite materials, boron nitride, carbon nanotube

ÖNSÖZ

Hayatım boyunca bana her anlamda destek olan ve yanımda olan, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, oğulları olmaktan gurur duyduğum annem Semra PEKER ve babam Murat PEKER'e ve kardeşim Raşit Eren PEKER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve her türlü desteği sağlayan çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın deneysel kısmının yürütülmesinde en başından sonuna kadar yardımcı olan, olumlu ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren, tecrübe ve bilgi birikimleriyle her zaman kendilerinden çok şey öğrendiğim çok değerli hocalarım Sayın Arş. Gör. Onur ERBAY'a gama ve nötron radyasyonu deneylerindeki katkılarından dolayı ve Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN'a deneysel sürecin yönlendirilmesi ve deneysel sonuçların anlamlandırılmasına katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini esirgemeyen, saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya malzeme üretimi sürecindeki katkılarından dolayı teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Muhammed Yasin PEKER
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	1
1.1.1. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.....	4
1.1.2. Kompozit malzemelerin üretim metotları	6
1.2. Uzay Ortamı ve Uzay Radyasyonu.....	14
1.2.1. Güneş parçacık olayları	14
1.2.2. Güneş rüzgârları.....	14
1.2.3. Galaktik kozmik ışınlar.....	15
1.2.4. Dünya manyetosferi.....	16
1.3. Tezin Amacı.....	17
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	19
2.1. Nötron Zayıflatma Çalışmaları	20
2.2. Gama Işını Zayıflatma Çalışmaları.....	21
2.3. Uzaydaki Radyasyon Türleri ve Korunma Yöntemleri	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Malzemelerin Hazırlanması	24
3.2. Deney Kurulumu.....	26
3.1.1. Gama ışını deneyinin kurulumu.....	27
3.2.2. Nötron deneyinin kurulumu.....	30
3.3. Teorik Arka Plan.....	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
4.1. Test Edilen Numunelerin Gama Işını Radyasyon Zayıflatması	34
4.2. Test Edilen Numunelerin Nötron Radyasyonu Zayıflatması.....	37
4.3. SEM Analizi	40
4.3. %2 BN Takviyeli Karbon/Epoksi Kompozitin Benzeri ve Yaygın Olarak Uzay Araçlarında Kullanılan Radyasyon Zırhlıyıcı Malzemeler ile Karşılaştırılması.....	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
6. KAYNAKLAR	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
Σ	: Makroskopik tesir kesiti
I	: Gama ışını/nötron yoğunluğu
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson oranı
α	: Termal genleşme katsayısı
Z	: Atom numarası

Kısaltmalar

CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
CNT	: Karbon nanotüp
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
BN	: Bor nitrür
VİM	: Vakum infüzyon metodu
SPE	: Güneş parçacık olayları
GCR	: Galaktik kozmik ışınlar
Cs-137	: Sezyum 137 izotopu
HVL	: Yarı değer katmanı
TID	: Toplam iyonizasyon dozu
HEO	: Yüksek eliptik yörünge
MULASSIS	: Çok katmanlı kalkan simülasyon yazılım aracı
NIST	: Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
FE-SEM	: Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
h-BN	: Hekzagonal bor nitrür
PMMA	: Polimetil metakrilat
CMT	: Kolemanit
PE	: Polietilen
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
UHMWPE	: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
TPNR	: Termoplastik doğal kauçuk
EPDM	: Etilen propilen dien monomer
UD	: Tek yönlü
CAD	: Bilgisayar destekli çizim

1. GİRİŞ

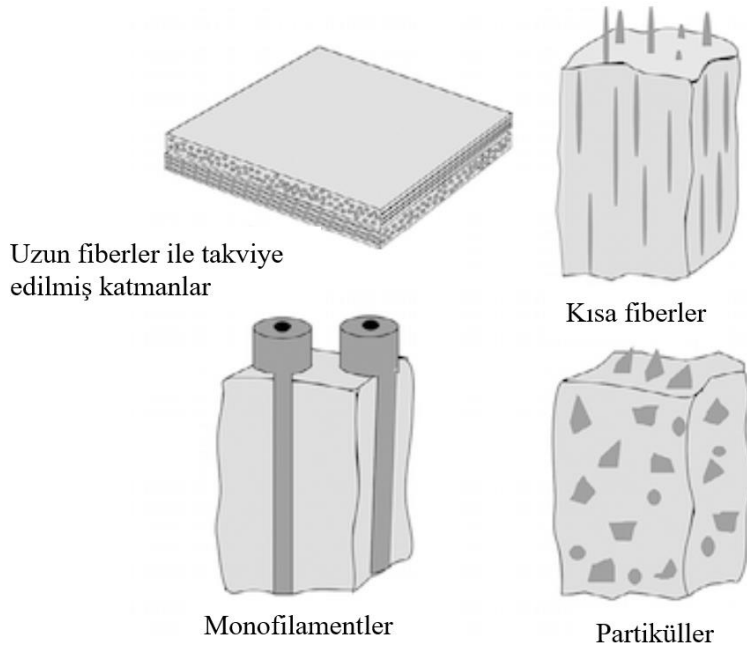
Derin uzay görevlerinin başarısızlıkla sonuçlanmasına veya uzun süreli insanlı uzay görevlerinde astronotların ölümüyle ya da ciddi sağlık problemleri ile karşılaşmasına sebep olabilecek uzay radyasyonunun engellenmesi, uzay endüstrisinin geleceği açısından oldukça önemlidir. Bu açıdan uzay aracının doğru malzeme ile uzay radyasyonuna karşı zırhlaması gerekmektedir. Gama radyasyonuna karşı en dirençli malzemeler kurşun ve çelik gibi metalik malzemeler iken bunların yoğunluklarının çok yüksek olması ve olası bir zırhlama durumunda uzay aracının ağırlığının oldukça artmasına sebep olacağı için daha hafif malzeme alternatifleri düşünülmelidir. Bu sebeple uzay görevlerinde zırhlama malzemesi olarak genellikle alüminyum tercih edilmesine karşın, kompozit malzemeler de bu tarz bir uygulama için seçilebilecek en uygun malzeme tiplerinden biridir. Arzu edilen malzeme özellikleri kompozit malzemelerde çeşitli imalat yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Bundan dolayı oldukça hafif olan ve güçlü mekanik özelliklere sahip karbon elyaf kompozit bu çalışmada tercih edilmiştir. Çeşitli içeriklere sahip karbon elyaf kompozitin radyasyon karşısında davranışının ve etkinliğinin incelenmesi, gelecekteki uzay görevlerinde alternatif bir zırhlama malzemesi olarak değerlendirilebilmesi adına önemli bir çalışma olacaktır.

1.1. Kompozit Malzemeler

Modern bilim ve teknoloji, kompozit malzemelerin endüstriyel olarak kullanılmasından büyük fayda sağlamıştır. Kompozit malzemeler giderek artan bir oranda geleneksel malzemelerin yerini alarak havacılık, uzay, inşaat, otomotiv, enerji, askeri ve spor dahil olmak üzere mühendislikte çok çeşitli uygulama alanlarına yayılmıştır. Kompozit malzemelerin son derece zorlu mühendislik alanlarında uygulanması, malzeme ve üretim teknolojisindeki son gelişmeler sayesinde mümkün hale gelmiştir. Kompozitler, çok yönlü nitelikleri, uyarlama seçenekleri, hassas ve karmaşık şekillerde üretilibilmeleri nedeniyle mevcut teknolojik düzeyde oldukça önemli ve kârlıdır [1].

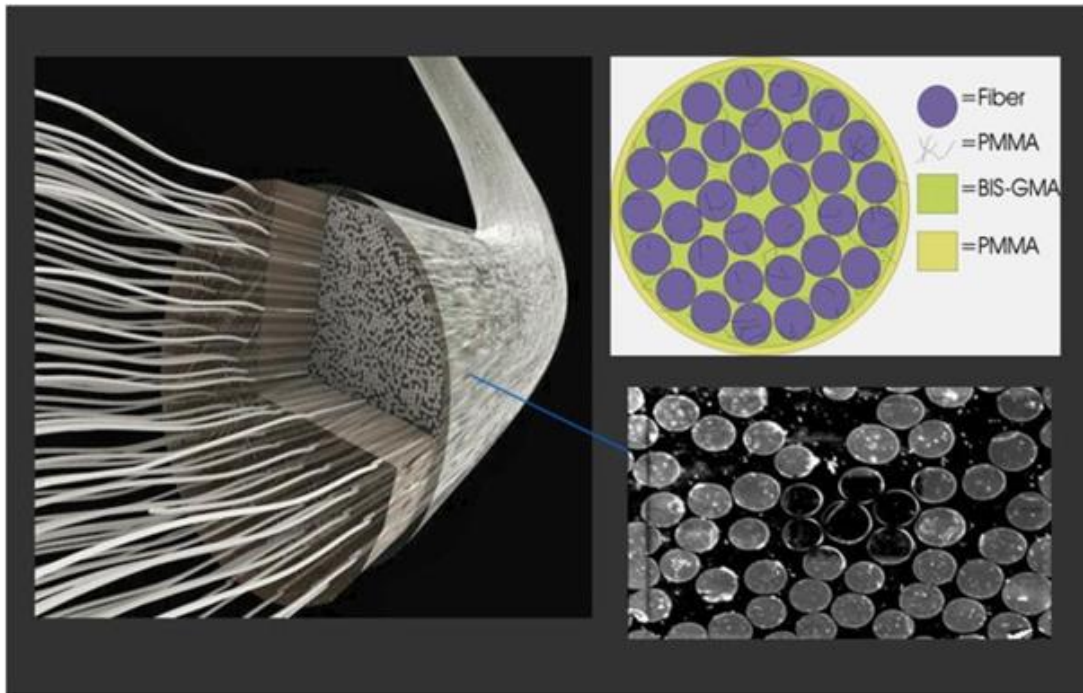
Kompozit malzeme, tanımlanmış bir arayüzle açıkça ayrılmış iki veya daha fazla farklı malzemenin makroskopik bir kombinasyonudur. İki bileşen bir araya geldiğinde, hiçbir bileşenin kendi başına üretemeyeceği özellikler meydana getirirler. Betonarme, ahşap ve polimer kompozitler bunlara birkaç örnektir. Kompozitler doğada kendiliğinden

de bulunabilmektedir. Örneğin odun, selüloz liflerinden oluşan bir matris içinde lignin ile birleştirilmiştir; kemikler ise inorganik hidroksiapatit kristalleri ile bir kolajen matrisinden oluşur. Bu doğal kompozitler sıklıkla anizotropik özellikler gösterir, yani özellikleri yönlere göre değişir. Doğal malzemelerde bu özellik avantaj sağlar; örneğin, odunun lif yönündeki gücü, yükleri taşımak için kritik öneme sahiptir. Bitki lifleri tarihsel olarak Mısır Firavunları, eski İnka ve Maya uygarlıkları tarafından çömlek ve tuğlaları güçlendirmek ve yarılmalarını önlemek için kullanılmıştır. Yapay kompozitlerde de bu konsept kullanılarak arzu edilen malzeme özellikleri ve bileşen tasarımı elde edilmeye çalışılır. Bu, geleneksel uygulamalardan farklıdır çünkü mühendisler kompozitlerin anizotropik doğasını göz önünde bulundurmalıdır; bu da, yönlere bağlı olarak dayanım ve sertlikte önemli değişikliklere sebep olabilir. Kompozitin içerisindeki her malzeme, metal alaşımlarının aksine kendi benzersiz kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur [2,3]. Bir kompozit tipik olarak bir matris ve takviye (dolgu) malzemelerinden oluşur. Takviyeler, kompozite mukavemet ve rijitlik kazandırır. Genellikle matristen daha sert, güçlü ve dayanıklı olan lifler veya parçacıklar şeklindedir. Matrisin işlevleri arasında liflerin doğru hizalanması, lifleri birbirine bağlamak, lifler arasında yükü aktarmak, lifleri aşınma ve çevresel etkilere karşı korumak yer alır. Örneğin, küçük karbon fiberler, matrisleri reçine olan karbon fiber takviyeli polimerlerde (CFRP'ler) dolgu maddesi olarak görev yapar. Kompozit malzemenin niteliklerini etkileyen önemli bir faktör, dolgu maddelerinin matris içindeki şekli ve dağılımıdır.



Şekil 1.1. Farklı tipteki takviye konfigürasyonlarının gösterimi [2]

Kompozitler çeşitli türlere ayrılır ve bunlar polimerik, metalik veya seramik matrislere sahip olabilir. Endüstriyel kompozitlerin çoğu polimer matrisler kullanır ve genellikle karbon veya cam lifleri gibi takviye elemanları içerir, ancak diğer lif türleri ve partiküller de kullanılabilir. Her matris türü (metalik, seramik veya polimerik) farklı avantajlar ve zorluklar sunar. Örneğin, metal kompozitler yüksek sıcaklık performansını geliştirmeye, seramik kompozitler ise sertliği artırmaya odaklanır. Polimerik matrisler içerisinde ise, dayanıklılık, yapışma ve işleme esnekliği gibi özellikleri nedeniyle yüksek performanslı kompozitler ve yapıştırıcılar için en yaygın matris çeşidi epoksi reçinelerdir. Cam elyaf takviyeli bir polimer matris yaygın kompozit malzeme türlerinden biridir. Çeşitli türlerdeki cam elyaf kompozitler için hem yüksek performanslı yapısal uygulamalar hem de düşük performanslı yapısal olmayan kullanımlar yaygın olarak test edilmiş ve başarılı olmuştur. Uygulamalar arasında yüksek performanslı yarış araçları, ticari ve askeri havacılık, bina inşaat endüstrisi, otomobil, kamyon ve demiryolu taşımacılığı ve denizcilik uygulamaları yer almaktadır. Yüksek basınçlı gaz uygulamaları arasında roket motoru muhafazaları, gemi ve tekne gövdeleri, hafif uçak ve planör yapımı, hemen hemen her tür eğlence ekipmanı, süs panelleri, aletler ve cihazlar yer almaktadır. Cam elyaf takviyeli organik kompozitlerin yaygın kullanımının ve gelecekte beklenen büyümesinin uygun fiyat, bulunabilirlik, işleme kolaylığı, pratik nitelikler gibi birkaç sebebi vardır [4].



Şekil 1.2. Cam elyaf takviyeli kompozitin yapısı [5]

1.1.1. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

Kompozitler tasarlanırken ana özellikler arasında sertlik, dayanım, tokluk, yoğunluk ve termal özellikler bulunur. Bu özelliklerdeki varyasyonlar ve bileşenler arasındaki termal genleşme uyumsuzlukları, malzemenin performansını etkileyebilir. Arzu edilen özelliklerin kombinasyonunu elde etme potansiyeli, kompozitleri değerli kılar, ancak anizotropik doğalarının dikkatlice yönetilmesi gerekir. Kompozit malzemelerin yapısı tipik olarak mekanik özelliklerini etkiler. Bu nedenle, bu özellikler genellikle bileşen arayüzlerinden, homojen olmayan yapıların kapladığı hacim oranından ve homojen olmayan yapıların şeklinden etkilenir. Diğer parametrelerin yanı sıra matrisin kırılabilirliği veya sünekliliği de kompozit malzemelerin mukavemetini etkiler. Örneğin, elyafların kırılması, elyaf-matris arayüzü ayrılması, matris çatlağı, elyaf dolgulu kompozitlerde hasar modlarına örnektir. Fiberler ve numunenin eksenleri arasındaki açı, hasar mekanizmasını belirler. Anizotropi, kompozit malzemenin yöneliminden etkilenen bir mekanik özelliktir. İzotropik malzemelerle karşılaştırıldığında, anizotropik kompozitler daha iyi mukavemet ve sertlik sunar. Bununla birlikte, bir yöndeki malzeme özellikleri, başka bir yöndeki özellikler için feda edilir. Örneğin, saf alüminyum matris içindeki silika elyaflardan yapılmış bir kompozit, elyaf yönünde yaklaşık 760 MPa'lık bir çekme mukavemetine sahiptir, ancak elyaf eksenine dik açıyla büküldüğünde sadece yaklaşık 95 MPa'lık bir mukavemete sahiptir [6].

E-cam/epoksi, kevlar/epoksi ve karbon fiber, kompozitlerde en yaygın kullanılan malzemelerdir. Bu üç kompozit malzeme arasında E-cam/epoksi, kevlar/epoksi ve karbon fiberden daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Öte yandan karbon elyaf, diğer iki kompozit malzemeye kıyasla daha yüksek boylamasına çekme ve basma mukavemeti ile öne çıkmaktadır. Enine çekme ve basma mukavemeti için, kevlar/epoksi, E-cam/epoksi ve karbon fiber ile karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir [7].

Çizelge 1.1'deki veriler, çeşitli elyaf ve reçine türlerinin mekanik ve termal özelliklerini göstermektedir. Mekanik özellikleri karşılaştırmak gerekirse, yine E-cam tipi liflerin diğer üç malzemedenden daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Kevlar-49 elyafı en yüksek Young Modülü (E) ve çekme mukavemetine sahipken, polyeester reçine dört malzeme türü arasında bu özellikler için minimum değerlere sahiptir

[8]. Sadece reçine türleri arasındaki mekanik özellikler de Çizelge 1.2'te gösterilmektedir [4].

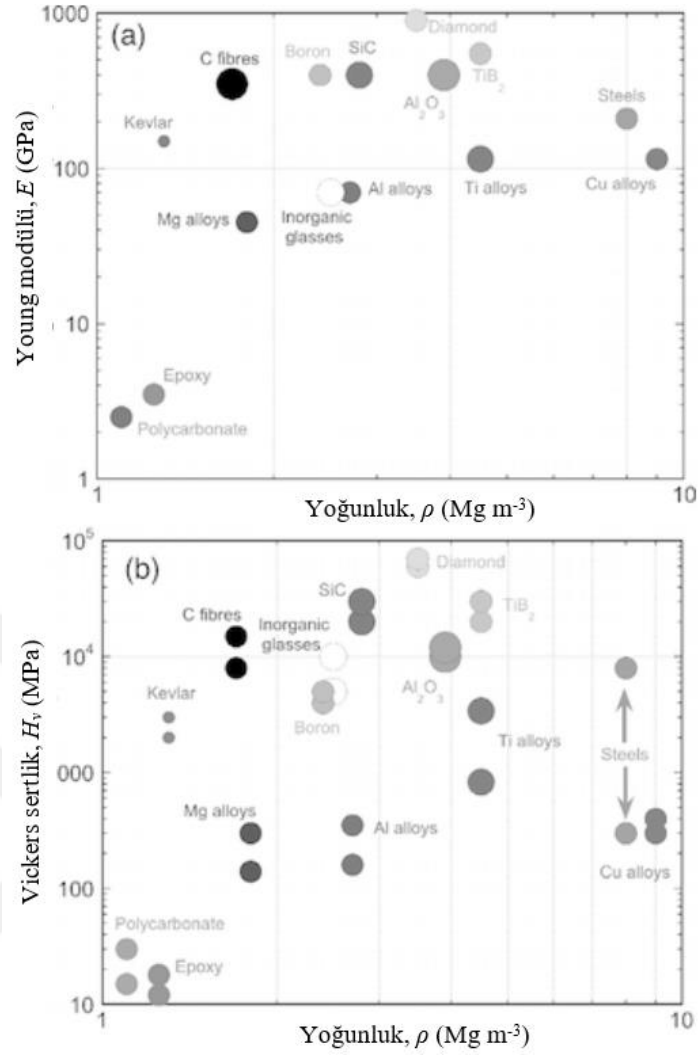
Çizelge 1.1. Çeşitli elyaf ve reçine türlerinin mekanik ve termal özellikleri [8]

Malzeme	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	G (GPa)	ν	α (°C ⁻¹)	Çekme mukavemeti (MPa)	Sıcaklık limiti T _{max} (°C)
E-cam Fiber	2600	74	30	0.25	$0.5 \cdot 10^{-5}$	2500	700
Kevlar-49 Fiber	1450	130	12	0.4	$-0.2 \cdot 10^{-5}$	2900	>1500
Poliester reçine	1200	4	1.4	0.4	$8 \cdot 10^{-5}$	80	60-200
Epoksi reçine	1200	4.5	1.6	0.4	$11 \cdot 10^{-5}$	130	90-200

Çizelge 1.2. Çeşitli reçine tiplerinin mekanik özellikleri [4]

Reçine	Takviye	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Basma Mukavemeti (MPa)
Poliester	E-cam CSM	1.44	80-180	140-150
	E-cam WR	1.63	210-300	150-270
	E-cam Uni	1.80	410-1180	210-480
	S-cam WR	1.64	440	210
Vinilester	E-cam WR	1.89	342	355
	Cam WR	1.90	520	-
	Aramid WR	1.35	500	-
	Karbon WR	1.50	600	-
Epoksi	E-cam WR	1.92	360	240
	E-cam Uni	1.92	1190	1001
	Aramid WR	1.33	517	172
	Carbon WR	1.38	1379	276
Fenolik	E-cam CSM	1.50	85-150	-
	E-cam WR	1.65	220-330	-
Akrilik	E-cam WR	1.70	308	292

Şekil 1.3'te gösterilen haritalarda da görülebileceği üzere karbon fiberler düşük yoğunluklarına rağmen güçlü mekanik özelliklere sahip olmasıyla dikkat çekmektedirler, bu sebepten kompozit uygulamalarda sıklıkla takviye malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Karbon fiberler, büyük ölçüde lifin eksenine paralel olarak hizalanmış grafen tabakalarından oluşur. Yapının detayları, liflerin üretim şekline bağlı olarak değişebilir, ancak ana nokta, grafenin tabaka içindeki çok güçlü bağlara sahip olmasıdır. Bu nedenle, karbon fiberlerdeki hizalanma, aksenal sertlik ve dayanımın yüksek olmasını sağlar [2,3].



Şekil 1.3. Çeşitli metal alaşımları, seramikler ve polimerler için yoğunluğa karşı (a) rijitlik ve (b) sertlik haritaları [2]

Uzay uygulamalarında radyasyona karşı sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımlar karşısında karbon fiberler hem daha hafif kalmakta hem de daha iyi mukavemete sahip olmaktadır. Bu üstün mekanik özellikleri sebebiyle, bu çalışmada uzay uygulamalarında kullanılmak amacıyla radyasyona karşı test edilecek olan ana kompozit karbon fiber/epoksi kompozit malzeme olarak seçilmiştir.

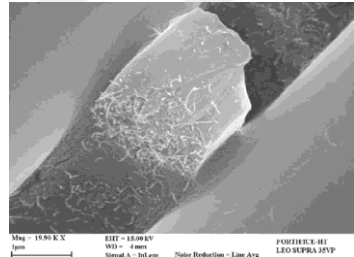
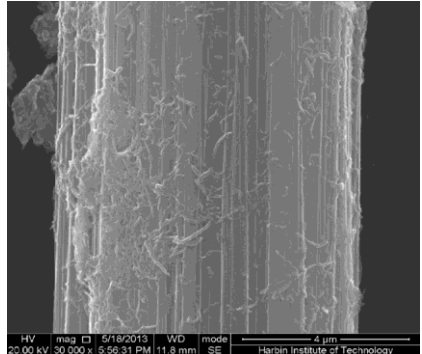
1.1.2. Kompozit malzemelerin üretim metotları

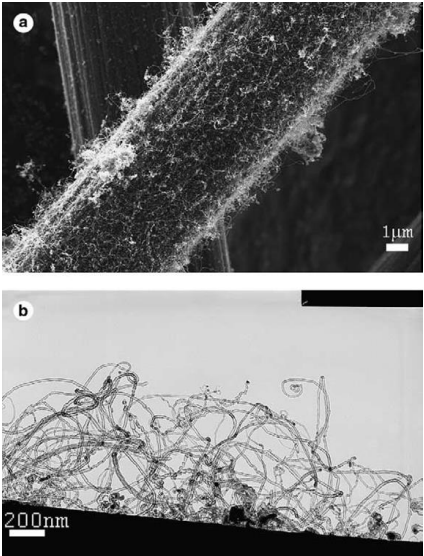
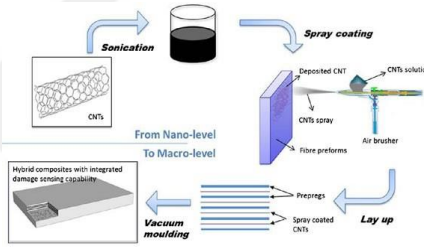
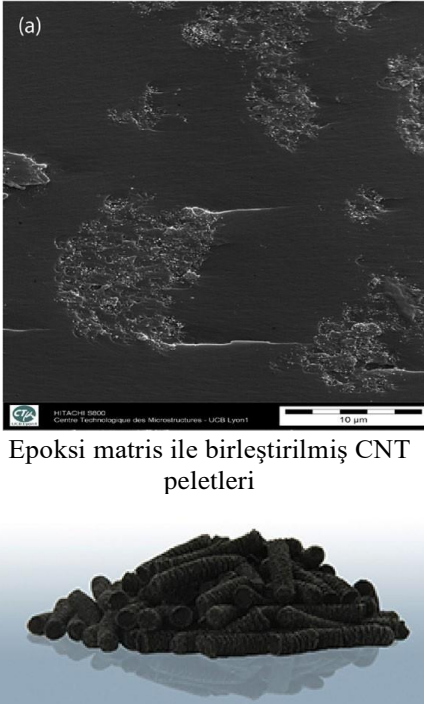
Kompozitler insanlık tarihinin en eski ve en sağlam malzeme türlerindedir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra üretim endüstrisinde hızla ilgi görmüş ve 1990'lardan sonra kompozit malzemelerin üretimi için daha ileri teknikler geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler otomotivden havacılık ve uzaya kadar geniş bir uygulama alanına sahip olduğundan, çeşitli üretim teknikleri mevcuttur.

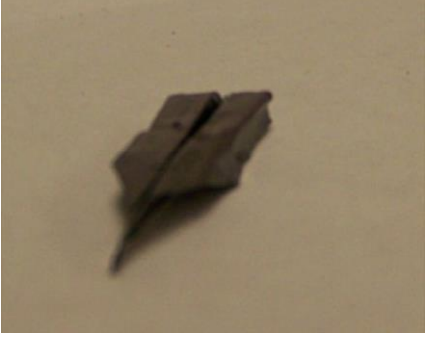
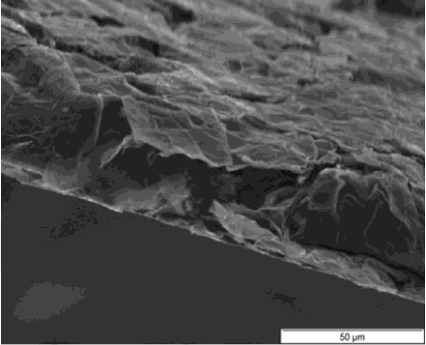
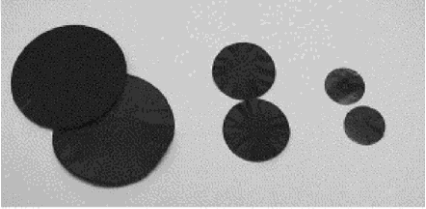
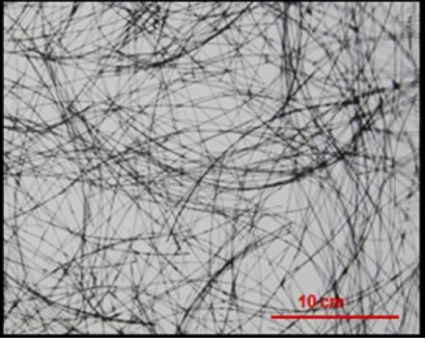
1.1.2.1. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji henüz yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, imalat sektöründe yükseliştir. Bu, üreticilerin maddeyi atomik, moleküler veya supramoleküler düzeyde değiştirerek malzemeleri geliştirmelerine yardımcı olabilir ve malzemelerin ömrünü uzatabilir veya onlara tamamen yeni nitelikler kazandırabilir. Nano fazı, kompozit yapıya dahil etmenin birçok olası yolu vardır. Çizelge 1.3'te bilimsel yayınlardan ve malzeme piyasasından elde edilen verilere genel bir bakış sunulmuştur. Nanoteknolojinin mümkün kıldığı ürünler bu tabloda uygun işleme yöntemleriyle ilişkilendirilmiştir. Tablonun ilk sütunu, nano fazı ortaya çıkaran kompozit bileşenini listelemektedir. Eleman, ikinci sütunda her bir rotanın işlem adımına bağlanmıştır. Dördüncü sütun bitmiş kompozitteki nano-fazı gösterirken, üçüncü sütun bileşeni bir pazar ürününe ve formuna bağlamaktadır [9].

Çizelge 1.3. Nano içerikli kompozit malzemelerin bir özeti [9]

Nano türü	Nano form ve element	Ara market ürünü	Entegre edilmiş nano-faz görselleri
Nano – güçlendirme	Nano parçacıkların reçine içinde dağılması	Reçine	 <p>Karbon fiberler arasında CNT katkılı matris</p>
Nano – mühendislik	Nano parçacıkların haşıl maddesi içinde dağılması	Fiber/Kumaş	 <p>CNT katkılı polimer ile karbon elyaf boyutlandırma</p>

<p>Nano – mühendislik</p>	<p>Elyaf yüzeyinde nanotüplerin büyümesi</p>	<p>Fiber/Kumaş</p>	 <p>Karbon elyaf yüzeyinde CNT büyümesi</p>
<p>Nano – mühendislik</p>	<p>Kumaş üzerine nano parçacık dispersiyonu ile sprej kaplama</p>	<p>Kumaş/Prepreg</p>	 <p>Karbon Prepregler üzerine CNT-solüsyon sprej biriktirme</p>
<p>Nano – güçlendirme</p>	<p>Termoplastik içinde nano parçacıkların karışımı</p>	<p>Pelet</p>	 <p>Epoksi matris ile birleştirilmiş CNT peletleri</p> <p>CNT peletleri</p>

<p>Nano – mühendislik</p>	<p>Ara katman olarak nano-kompozit film</p>	<p>Film</p>	 <p>Kağıt düzlemde katlanmış GNP film</p>  <p>SEM aracılığıyla GNP kağıt mikroyapısı</p>
<p>Nano – mühendislik</p>	<p>Ara katman olarak gözenekli nano parçacık preformu</p>	<p>Kağıt</p>	 <p>Farklı çaplarda SWCNT Buckypaper</p>
<p>Nano – mühendislik</p>	<p>Ara katman olarak nano katkılı polimer fiber</p>	<p>Örtü</p>	 <p>MWCNT katkılı polimerden yapılmış dokumasız örtü</p>

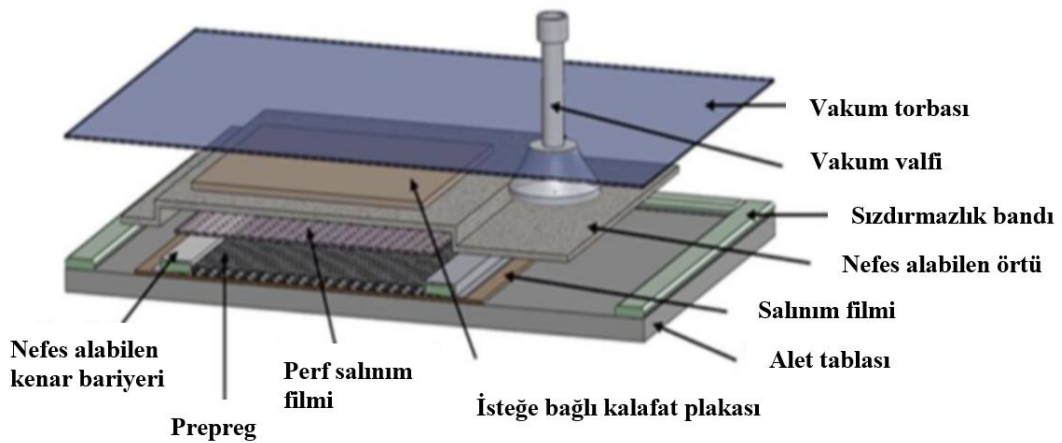
1.1.2.2. Otoklav dışı kürleme (out-of-autoclave curing)

Otoklav Dışı Kürleme (OoA) yüksek performanslı kompozit bileşenler üretme kapasitesi nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Otoklav kullanmadan gerçekleştirilen bu prosedür, enerji ve takım yapım maliyetlerini düşürmektedir. Bu da büyük hacimleri desteklemelerini ve döngü sürelerini iyileştirmelerini sağlar. Otoklav Dışı Kürleme, Ekuase vd. tarafından dokuz alt üretim prosedürü altında sınıflandırılmıştır,

Prepreg sıkıştırma kalıplama: Prepreg bazlı kompozit ürünlerde harici sıkıştırma için otoklavsız bir tekniktir. Bununla birlikte, parçanın otoklav veya kapalı bir kalıp olmadan basınçsız bir fırında kürlenmesi gerektiğinden, bu yaklaşım diğer otoklav prosedürleriyle aynı yüksek kalitede parçalar üretmez.

Vakum torbalama: Islak laminatlar, esnek şeffaf bir tabaka kullanılarak vakum torbalama işlemi sırasında atmosferik basınç kullanılarak kaplanır ve sıkıştırılır. Ağartıcı, ıslak laminattan (dokuma polyester kumaş) sıkılan ve emilen reçineyi alır. Vakum torbalama işlemi ucuz malzemeler kullanır, ancak ürettiği parçalar manuel yerleştirme ile yapılanlardan daha iyi mekanik niteliklere sahiptir. Ne kadar veya ne tür malzeme kullanılırsa kullanılsın, basınç tüm yüzey boyunca eşit olarak uygulanır.

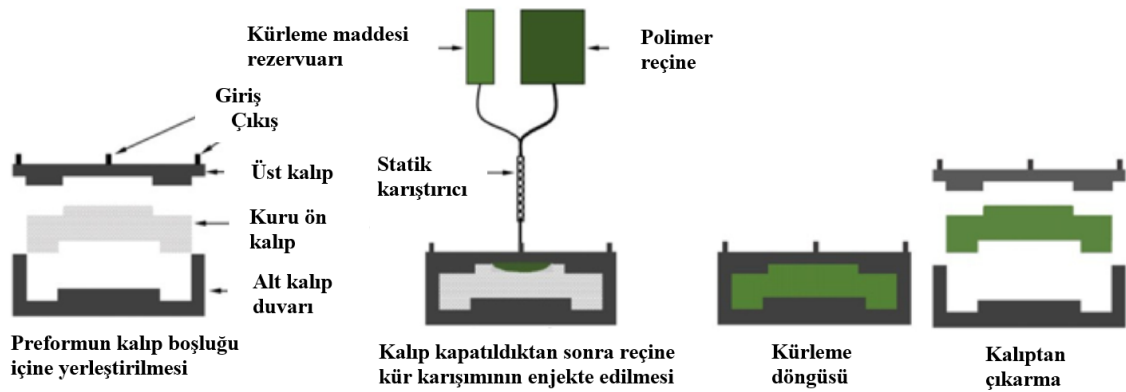
Sadece Vakum Torbası (VBO – Vacuum Bag Only)/Fırın Kürü: Kompozit laminatların işlenmesi için bir otoklav dışı (OoA) yöntem, sadece vakum torbası (VBO) kürlemesidir. Laminatın konsolidasyonu, otoklav gibi harici basınç olmadan modern bir fırında yapılır. Çok fazla basınç olmadığında OoA reçinesinin özelliklerini, elyaf yatağının tasarımını ve prepreg sistemini dikkate almak çok önemlidir.



Şekil 1.4. VBO kürünün üretimini gösteren görsel [10]

Reçine Transfer Kalıplama (RTM – Resin Transfer Molding): RTM prosesinde kompozit bir ürün oluşturmak için kapalı bir kalıp kullanılır. RTM sürecindeki adımlar Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Elyaf preform kalıbın şekline uyacak şekilde kesilir ve sızdırmaz bir kalıp boşluğuna yerleştirilir. Enjeksiyon portu aracılığıyla, düşük viskoziteli bir termoset reçine kalıp boşluğuna tipik olarak 3,5-7 bar basınçta enjekte edilir. Tam ıslanma sağlanana kadar, enjekte edilen reçine, sıkışmış hava kabarcıklarını serbest bırakırken preformu emdirir. Reçine enjeksiyonu durdurulur ve reçine dışarı akmaya başladığında havalandırma delikleri kapatılır. Kalıp ısıtılarak veya reçine çözeltisine önce inhibitörler eklenerek reçinenin sertleşmesi için zaman verilir. Kalıp açılır ve reçinenin sertleşmesi için zaman geçtiğinde parça çıkarılır.

Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding): Prepreg işleminin aksine, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), elyaf takviyelerini ve çekirdek bileşenlerini vakumla paketlemeden önce tek taraflı bir kalıp üzerine yerleştirir. Kalıptaki portlar aracılığıyla sıvı reçine enjekte edilir ve elyafın ıslanmasını kolaylaştıran infüzyon ortamı kullanılarak takviyeler boyunca vakumla çekilir. Otoklavın aksine, müteakip kütleme için yoğun ısı veya yüksek basınç gerekmez. Sürecin nispeten ucuz ekipmanı sayesinde, Mitsubishi Bölgesel Jet'in kuyruğunda olduğu gibi büyük, karmaşık parçalar hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde üretilebilir.



Şekil 1.5. RTM sürecinin gösterimi [10]

Hızlı Adım Kütleme: Bir laminat oluşturmak için prepreglerin tek taraflı bir kalıpta istiflenmesini ve ardından vakumla kapatılmasını içerir. Bir basınç odasının içinde laminat-kalıp tertibatını destekleyen iki esnek membran bulunur. Bir ısı transfer sıvısı (HTF – Heat Transfer Fluid) sistemi, reçine viskozitesini yönetmek ve laminatların sıcaklığını kontrol etmek için HTF'yi basınç odasında dolaştırır. Kütleme döngüsü,

sermaye, takım ve işletme maliyetlerinin tümü hızlı adım prosesi ile azaltılır. Ek olarak, hızlı adım prosesi yüksek kaliteli orta kompozit parçalar üretme kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, ısı transfer mekanizmasında yalnızca sıvıya güvenilmesi bir dezavantaj olabilir. Çok az basınç uygulandığından, hızlı adım prosedürü yalnızca küçük karmaşıklığındaki parçalara uygulanabilir.

Seeman Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi (SCRIMP – Seeman Composite Resin Infusion Molding Process): SCRIMP prosedürü VARTM prosedürünün bir çeşididir. Emdirme sırasında reçineyi verimli ve etkili bir şekilde dağıtmak için bir dağıtım ortamı (DM - Distribution Medium) kullanan VARTM işleminin geliştirilmiş bir versiyonudur. Sonuç olarak, düşük uçucu emisyonlara sahip yüksek kaliteli, tekrarlanabilir parçalar üretmek için kullanılır. SCRIMP prosesi, tipik olarak %60 ila %75 arasında yüksek elyaf hacim oranına sahip kompozit parçalar üretir.

Reçine Film İnfüzyonu (RFI): RFI yöntemi kullanılarak yüksek elyaf hacim fraksiyonlu kompozitler üretilmektedir. Kalın kompozitler üretilirken debulking işlemi sürekli tekrarlanmaz, katmanlar herhangi bir kıvrılma yaşamaz, takımlama ucuzdur, reçine kolayca sertleştirilir, yüksek kaliteli kompozitler oluşturur ve bu işlemin diğer faydalarının yanı sıra kuru elyaflar özel depolama gerektirmez.

Çift Esnek Alet Altında Reçine İnfüzyonu (RIDFT – Resin Infusion under Double Flexible Tooling): önceki prosedürlerle ilgili sorunları ele almak için oluşturulmuştur. Yüksek takım maliyetleri, düşük üretim oranları, zor reçine infüzyonu, uzun işlem süreleri, pahalı bir ön kalıp kullanımı ve çevre kirliliği bu sorunlardan birkaçıdır [10].

1.1.2.3. İleri robot teknolojileri

Üretim süreçlerinde robot kullanımı algılayıcı ve uyarlanabilir olduklarından dolayı son yıllarda gelişmiştir. Üreticilere bir ürünü hızlı ve daha fazla miktarda teslim etme konusunda yardımcı olmaktadır. Robotlar tarafından gerçekleştirilen otomatik görevler sayesinde üretim süreleri kısalmaktadır. Ayrıca, daha fazla verimlilik, doğruluk ve hassasiyet sunmaktadırlar. Kompozit üretimi için iki süreç robot teknolojisine dayanmaktadır. Bunlar otomatik elyaf yerleştirme (AFP - Automated Fiber Placement) ve otomatik bant döşemedir (ATL - Automated Tape Laying).

Otomatik Elyaf Yerleştirme (AFP): Fiber/polimer bant, ısı ve basınç, otomatik fiber yerleştirme (AFP) olarak bilinen eklemeli üretim yönteminde kullanılan üç girdidir. Basınç ve ısı kullanımıyla, uç efektör bandı ustalıkla manipüle eder ve bir yüzeye yerleştirir. Her bir kat, gerekli ağırlıkları etkili bir şekilde taşımak için çeşitli açılarda konumlandırılabilirdiğinden, yöntem son derece özel parçaların üretilmesini sağlar. Robotik, operatöre tüm önemli değişkenler üzerinde aktif kontrol sağlayarak süreci son derece tekrarlanabilir ve kontrollü hale getirir. Bu yöntem kullanılarak, çeliğin yarısı kadar ağır ve iki katı kadar güçlü, eklemeli olarak inşa edilen kompozit parçalar üretilir [11].

Otomatik Bant Döşeme (ATL): En iyi bilinen otomatik kompozit üretim tekniklerinden bir diğeri de otomatik bant döşemedir. Üretilen bileşenin karmaşıklığına bağlı olarak, bir parça kalıbına geniş tek yönlü bantlar döşemek için çeşitli derecelerde eklemeli, yüklü bir silindir sistemi kullanılır. ATL esasen manuel tek yönlü (UD) bant biriktirmeyi taklit eder, ancak bunu daha yüksek hızlarda, daha büyük parçalar üzerinde ve daha fazla proses kontrolü ile yapar. Bir elyaf yerleştirme tekniği olmasa da, modern ATL sistemleri bant başlangıcı, kesimi ve oryantasyonu üzerinde hassas kontrole sahiptir ve laminata ek katlar eklemekten daha karmaşık takviye eklemelerine olanak tanır [12].

1.1.2.4. 3D Baskı (Eklemeli İmalat)

Son yıllarda parlayan diğeri bir üretim süreci de tartışmasız eklemeli imalat veya 3D baskıdır. Eklemeli imalatta, CAD verileri ve özel yazılım kullanılarak bir 3D yüzeyin sanal bir temsili üretilir. 3D görüntü aynı program tarafından inanılmaz derecede ince 2D kalıplara dilimlenir. Malzeme serilerek fiziksel, 3D bir model oluşturulur. 3D baskı, üreticiler tarafından ürün geliştirme aşamasında masrafları azaltmak için kullanılan bir araçtır. Bu yöntem alet yapım sürecini hızlandırırken işçilik ve malzeme giderlerini de azaltmaktadır.

Karmaşık şekillere sahip ürünleri ucuza üretme kabiliyeti, özellikle küçük miktarlar gerektiğinde, geleneksel üretim süreci yöntemleri tarafından ciddi şekilde kısıtlanmaktadır. Bu nedenle 1990'lardan sonra kompozit malzemeler için daha gelişmiş üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Gelişmiş üretim yöntemleri sırasıyla yeni teknolojiler, nanoteknoloji, otoklav dışı kürlenme, robotik kullanımı ve eklemeli üretim olmak üzere 4 başlık altında sıralanabilir. Kompozit malzemeler için bu gelişmiş yöntemlerin geleneksel

üretim yöntemlerine kıyasla çok daha uygun maliyetli, daha az zaman alıcı olduğu ve tasarımlarda daha fazla özgürlük sağladığı görülmektedir.

1.2. Uzay Ortamı ve Uzay Radyasyonu

Bir uzay aracı uzaydaki fiziksel koşullardan etkilenir ve bu koşullar Dünya'daki bilinen çevresel isterlerin çok ötesine geçer. Uzay radyasyonunun tipik özellikleri (elektromanyetik dalgalar), galaktik arka plandan gelen ultraviyole x-ışınları ve gama radyasyonu, yüksek enerjili parçacıklar (elektronlar, protonlar, nötronlar ve alfa parçacıkları), uzayın soğuk arka planı, mikro yerçekimi, düşük Dünya yörüngelerinde atmosferin aerodinamik sürüklemesi ve atomik oksijenin etkisi. Bir uzay aracının tasarımı ve gerçekleştirilmesi sırasında bu koşullar göz önünde bulundurulmalıdır [13].

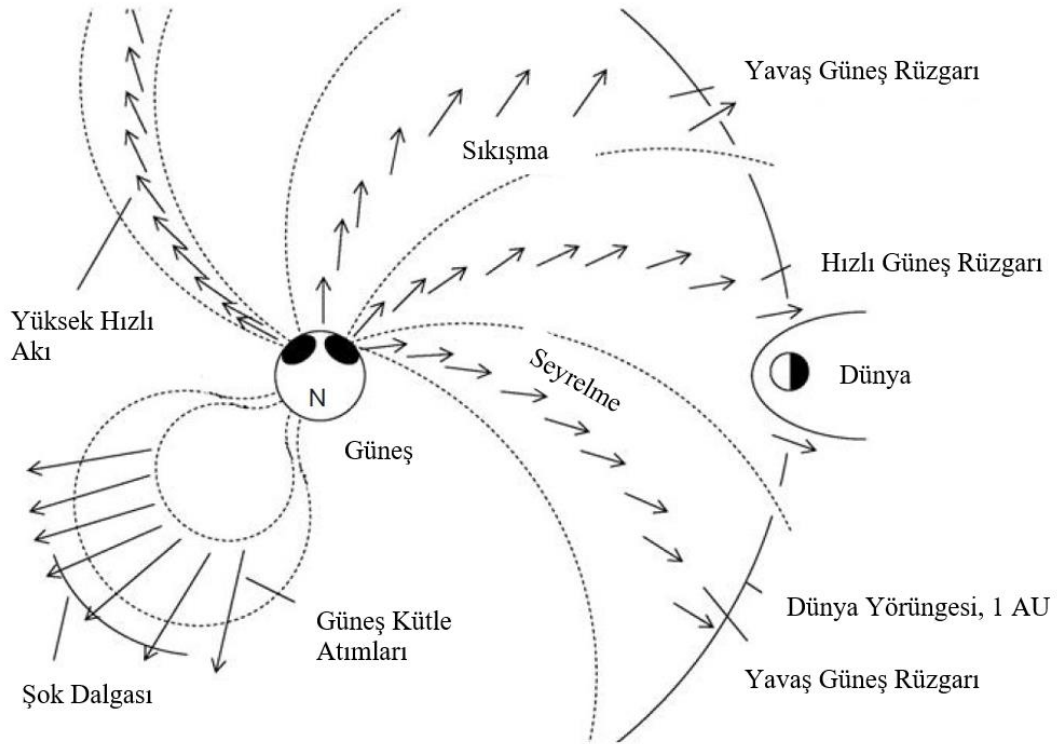
1.2.1. Güneş parçacık olayları

Gezegenler arası uzayın fiziğine önemli ölçüde Güneş'in etkisi hakimdir. Güneş parçacık olayları güneşten gelen enerjik patlamalardır. Yüksek enerjili proton ve elektronlardan oluştukları için insan hücrelerine ve teknolojik cihazlara zarar verebilirler. Radyasyon enerjisinin çoğu, sadece 200 km kalınlığında olan ve Dünya'nın bakış açısından optik olarak güneş diski olarak algılanan fotosfer tarafından yayılır. Güneş'ten gelen radyasyonun büyük bir kısmı manyetosferde hapsedilse de bir kısmı dünya yüzeyine ulaşmayı başarır [13]. Güneş radyasyonu aynı zamanda bir ışınım çeşididir ve bu ışınım güneş panelleri gibi sistemlerde kullanılarak elektrik enerjisi üretilmesine katkı sağlamaktadır. Güneş enerjisinin, elektrik enerjisine entegre edilebilmesi için güneş ışınımının makul bir ölçüde ve doğru bir düzeyde tahmin edilmesi gerekmektedir [14].

1.2.2. Güneş rüzgârları

Güneş, elektromanyetik radyasyonun yanı sıra güneş rüzgârı adı verilen bir madde de yayar. Bu süreç sırasında Güneş saniyede yaklaşık 1 milyon ton hidrojen kaybeder. Güneş rüzgârı, esas olarak proton ve elektronlardan oluşan nötr bir plazma akımıdır. Dünya'ya yakın ve daha genel olarak ekliptik düzlemde yavaş ve hızlı mod olarak ikiye ayrılabilir. Dünya'ya yakın uzay, Güneş'in dönüş periyoduna bağlı olarak yavaş ve hızlı güneş rüzgarları tarafından dönüşümlü olarak süpürülür. Bozulmamış güneş rüzgarı ile ilgili çalışmaların çoğu WIND ve ACE gibi uzay araçlarının L1 noktasındaki

gözlemlerine dayanmaktadır [15]. Güneş rüzgârındaki enerjik elektron ve iyonlardan oluşan plazma karışımı Güneş'ten 800-1000 km/s gibi yüksek hızlarda uzaklaşabilir. Bu parçacıkların ortalama hızı göz önüne alındığında, güneş rüzgârının Dünya'ya ulaşması 2-3 gün sürmektedir. Güneş rüzgârı yolculuğu sırasında Dünya'nın önünde bir şokla karşılaşır ve süpersonik hızdan ses altı hıza düşer. Bu şok yay şoku olarak adlandırılır [16].

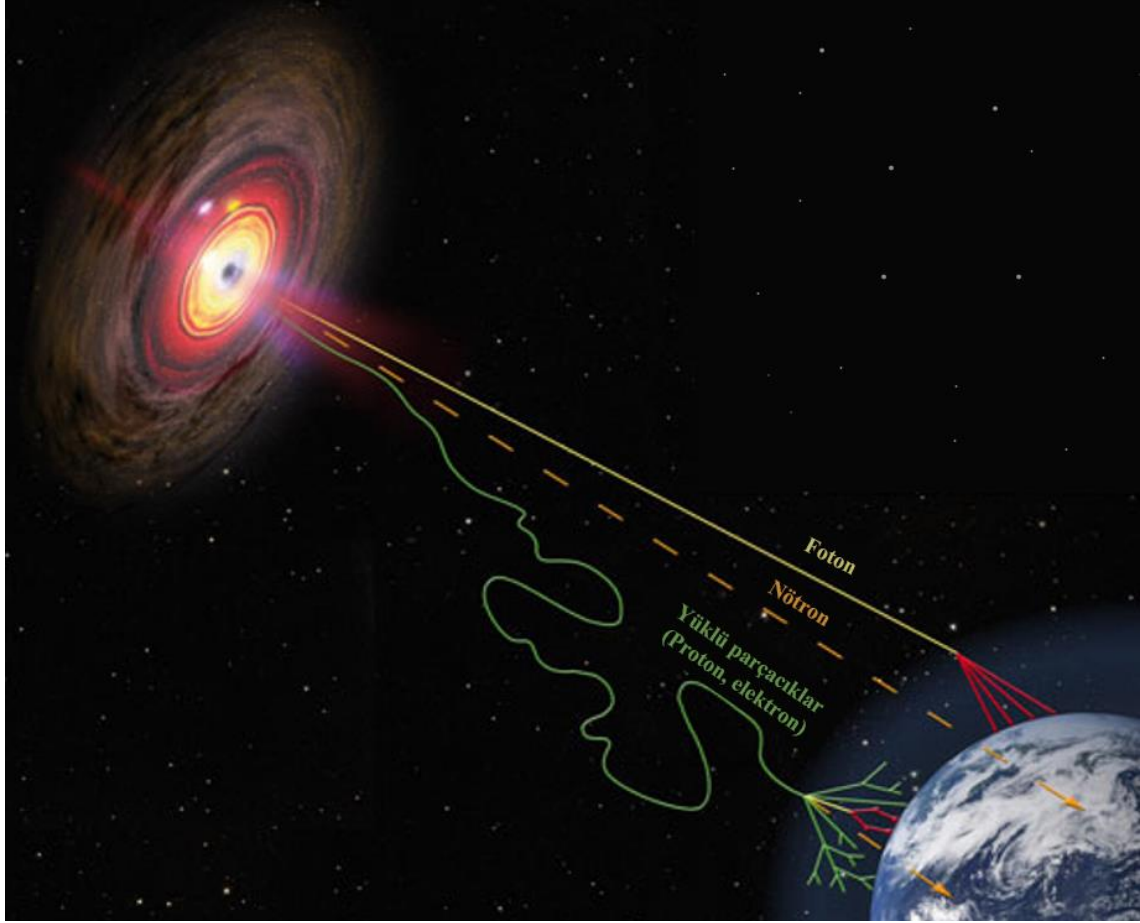


Şekil 1.6. Güneş rüzgarlarının Dünya'ya ulaşımını gösteren bir görsel [13]

1.2.3. Galaktik kozmik ışınlar

Güneş parçacık olayları (SPE – Solar Particle Events) haricinde, galaktik kozmik ışınlar (GCR – Galactic Cosmic Rays) olarak adlandırılan ve güneş sistemimizin dışından kaynaklanan yüksek enerjili parçacıklarda ciddi bir radyasyon tehdidi oluşturmaktadır. Protonlar, elektronlar ve atom çekirdekleri bunların bileşimini oluşturur. Bu parçacıklar ışık hızında hareket etme ve hem insan vücuduna hem de uzay araçlarına derinlemesine nüfuz ederek DNA ve hücrelere zarar verme yeteneğine sahiptir. Uzaydan gelen radyasyon hem insanlar hem de uzay araçları için tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Önemli ölçüde radyasyona maruz kalınması sonucu ortaya çıkabilen akut radyasyon hastalığı bulantı, kusma ve bitkinliği içerebilir. Uzun süre radyasyona maruz kalmak kanser ve

diğer hastalık riskini artırabilir. Radyasyon ayrıca uzay aracındaki elektrikli ekipmanlara da zarar vererek arıza ve hatalara yol açabilir. Bu durum, değiştirme veya onarımın mümkün olmadığı uzun süreli uzay görevlerinde özellikle riskli olabilir.

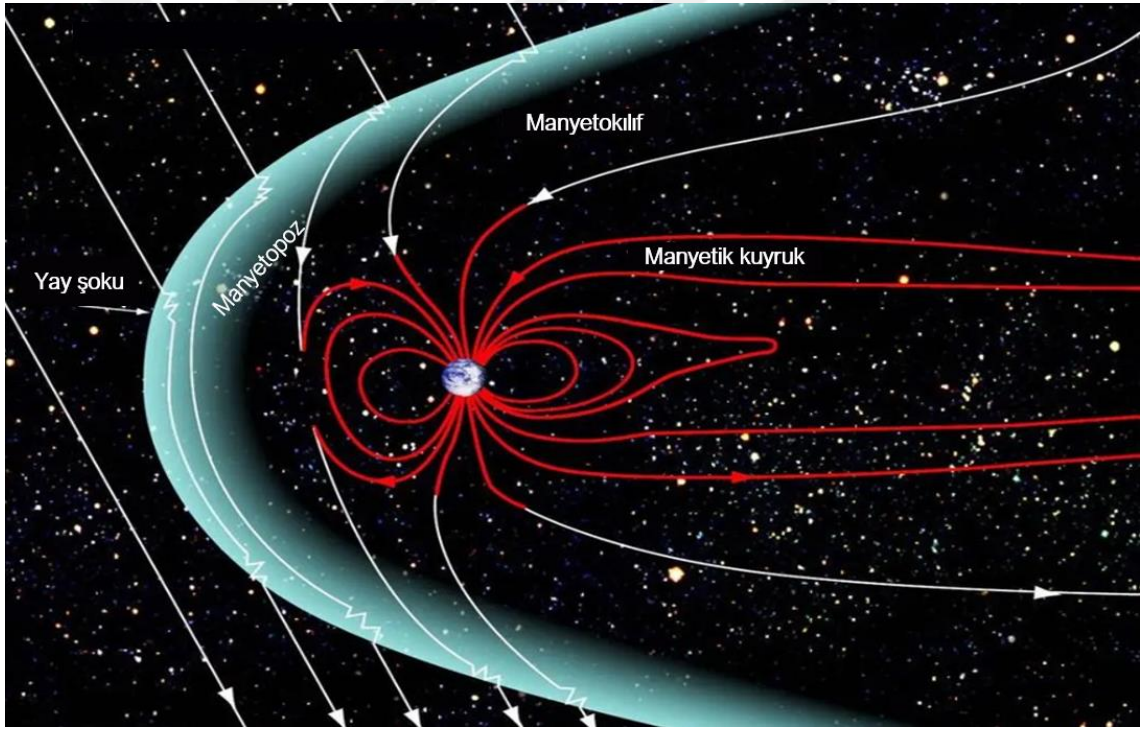


Şekil 1.7. Galaktik kozmik ışınların Dünya'ya ulaşımını gösteren bir görsel [17]

1.2.4. Dünya manyetosferi

Dünya'yı koruyan manyetosfer, Dünya'nın çekirdeğindeki %90 sıvı demir ve nikelden kaynaklanır. Güneş rüzgârının Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşimi, ilk olarak manyetosferin önünde bir yay şoku şeklinde kendini gösterir. Manyetosferin dış kısmı Şekil 1.8'deki gibi üç aşamada sınıflandırılabilir: yay şoku, manyetik kılıf ve manyetopoz [18]. Bir yay şoku, tipik güneş rüzgârı koşulları altında 11-14 Dünya yarıçapı ($RE = 6,371 \text{ km}$) aralığında Dünya'nın güneşe doğru olan tarafında oluşur. Akış, manyetik kılıf içerisinde, arkasındaki hızdan daha yavaş olur. Tipik olarak 9 ila 11 Dünya yarıçaplı bir mesafeyi kapsayan manyetopoz, manyetik kılıfı manyetosferden ayırır [19]. Manyetopoz terimi, güneş rüzgârının dinamik basıncı ile Dünya'nın manyetik basıncının birbirine eşit olduğu, güneş rüzgârı tarafından kontrol edilen bölgeyi ve Dünya'nın

manyetik alanı tarafından karakterize edilen ortamı ayıran sınırı ifade eder [20]. Dünya'nın manyetik alanı, bir mıknatıs çubuğunun etrafındakine benzer bir dipol şekline sahiptir. Bu manyetik alanın Güneş'in karşısındaki tarafı uzun bir kuyruk şeklindedir ve manyetik kuyruk olarak adlandırılır. Manyetik alanın eksenini Dünya'nın dönme ekseninden %10 daha fazla eğiktir. Radyo-aktif bir bölge olan Van Allen radyasyon kuşağı, Güneş rüzgârlarından gelen enerjik proton ve elektronların manyetosferde hapsolmesiyle oluşmuştur [21]. Bu radyasyon kuşağının varlığı 1958 yılında James Van Allen tarafından tasarlanan aletler kullanılarak Explorers 1 ve 3 tarafından doğrulandığından, keşfinin adıyla Van Allen radyasyon kuşağı olarak adlandırılmıştır [22]. Yay şokunun fiziksel bir olgu olmasının yanı sıra, güneş rüzgârının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğü de tespit edilmiştir [23]. Dolayısıyla jeomanyetik alanın dinamiğini etkileyen ana faktör aslında güneş rüzgârlarıdır [24].



Şekil 1.8. Dünya manyetosferi [25]

1.3. Tezin Amacı

Bu çalışmada, literatürde daha önce ele alınmamış olan, farklı ağırlık oranlarında CNT ve BN nanopartikülleri içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin, gama ışını ve nötron radyasyonuna karşı etkinliğini ortaya koyan bir araştırma gerçekleştirilmiştir.

Sırasıyla malzeme hazırlama süreci, deney setlerinin kurulumu ve çalışmanın teorik arka planı ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada, her bir numunenin zayıflama katsayıları hem gama ışını hem de nötron radyasyonu için incelenmiş olup, geçmiş ve gelecekteki olası çalışmalarla karşılaştırmak için tablolar ve grafikler şeklinde sunulmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak numune yüzeyleri CNT ve BN nanopartiküllerinin varlığını ve dağılımını göstermek amacıyla incelenmiştir. Çalışmanın, karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin pasif radyasyon kalkanı olarak uzay endüstrisinde uygulanabilirliğine dikkat çekmesi beklenmektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Uzay radyasyonu hem insanlı hem de insansız uzay görevleri için her zaman büyük bir engel olmuştur. İnsansız uzay görevlerinde radyasyonun zararlı etkilerini önlemek, uzay aracının belirli kısımlarını radyasyona dayanıklı malzemelerle kaplamakla mümkündür. Dolayısıyla insanlı görevlere kıyasla insansız görevlerde etkili radyasyon zırhlama sistemleri uygulamak daha kolaydır. Öte yandan uzay radyasyonu, astronotları radyasyonun zararlı etkilerinden koruyan Dünya'nın manyetik alanı gibi doğal bir aktif koruma sisteminin bulunmadığı derin uzay görevleri için en büyük tehlikeyi oluşturmaktadır. Mürettebat sağlığına ek olarak bu tür radyasyon, aviyonik hasara, ark hasarına, yüzey özellik değişikliklerine ve güneş pillerinin bozulmasına neden olarak uzay aracının alt sistemlerini de etkileyebilmektedir [26]. Ayrıca seyahat süresi uzadıkça radyasyona maruz kalma süresi de artar ve bu da görevi daha büyük risk altına sokar. Manyetosfer sınırları içindeki uzay görevleri için radyasyonun neden olduğu tehdit daha azdır çünkü Dünya'nın manyetik alanı evren boyunca yayılan yüklü parçacık radyasyonunun çoğunu saptırır. Bu nedenle, bir uzay aracı görevin isterlerine göre olası radyasyon türlerine karşı korunacak şekilde tasarlanmalıdır.

Son zamanlarda yapılan deneysel çalışmalar ve simülasyon çalışmaları göstermektedir ki, kompozit malzemelerin kullanımının, yüksek sertlik-mukavemet oranı, korozyon ve aşınmaya karşı iyi direnç, hafiflik ve yorulma performansı gibi olağanüstü mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra, radyasyona karşı zırhlama için yeni malzemelerin geliştirilmesinde önyak olduğu görülmektedir [27-30]. Emmanuel ve Raghavan tarafından yapılan araştırmanın amacı, yüksek eliptik yörüngelerdeki (HEO) uydu görevleri için kompozit malzemelerin radyasyon kalkanı performansını değerlendirmektir. Monte Carlo (M-C) yöntemlerine dayanan Geant4 yazılımının (V 4.9.2) bir aracı olan Avrupa Uzay Ajansı'nın MULASSIS (Çok Katmanlı Kalkan Simülasyon Yazılım Aracı) V1.19 parçacık taşıma simülasyonunu kullanan araştırmacılar, farklı parametrelerin kalkanın arkasındaki bir silikon dedektör üzerinde biriken toplam iyonizasyon dozunu (TID) nasıl etkilediğini araştırdı. Deneyde kullanılan iki malzemeden biri olan polietilenin (PE), daha düşük atom numarası (Z) nedeniyle grafitin (G) daha etkili bir radyasyon bariyeri olduğu gösterilmiştir [31].

Kolemanit $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$ (CMT) ve PMMA (polimetil metakrilat) kombinasyonu Bel ve arkadaşları tarafından incelenen kompozit malzemelerdi. Bu çalışmanın amacı bizim çalışmamızda olduğu gibi, kompozit malzemenin Cs-137 gama ışını kaynağından gelen gama ışını radyasyonuna ve ^{239}Pu -Be nötron kaynağından gelen nötronlara karşı koruma etkinliğini değerlendirmektir. Ağırlıkça %40 CMT içeren PMMA numunesinin, gama ışını radyasyonu için 5,02 cm HVL (yarı değer katmanı) ve nötron radyasyonu için 2,80 cm HVL ile diğer numuneler arasında en etkili kalkanlama özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir [32].

2.1. Nötron Zayıflatma Çalışmaları

Düşük atom numaralı elementler güçlü bir saçılma gücüne sahip olduklarından ve nötron enerjisini önemli ölçüde düşürebildiklerinden, nötron kalkanı için kullanılan malzemelerde genellikle yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar. Toyen ve diğerleri ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozitleri termal nötronlara karşı ağırlıkça %10'luk artışlarla %0 ila %50 arasında değişen farklı miktarlarda samaryum oksit (Sm_2O_3) ekleyerek araştırmışlardır. Sonuçlar, radyasyon korumasının etkinliğinin artan Sm_2O_3 ile arttığını göstermiştir. Bariz bir şekilde, ağırlıkça %50 Sm_2O_3 içeren UHMWPE, $2,26 \text{ cm}^{-1}$ zayıflatma katsayısı ve 0,31 cm HVL ile diğer numuneler arasında nötron radyasyonuna karşı en iyi korumayı gerçekleştirmiştir [33].

Başka bir çalışmada, bor karbür (B_4C) ile doldurulmuş bir termoplastik doğal kauçuk (TPNR) karışımı nötron radyasyonuna karşı test edilmiştir. En yüksek B_4C içeren TPNR ağırlıkça %20 olup $10,604 \text{ cm}^{-1}$ makroskopik kesit ve 0,065 cm HVL ile en iyi korumayı göstermiştir [34]. Özdemir ve diğerleri tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, ağırlıkça %20 borik asit içeren etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuk için Pu-Be nötronlarına karşı zayıflatma katsayısı $0,534 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [35]. İrim ve diğerleri, ağırlıkça %11 hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve ağırlıkça %3 gadolinyum oksit (Gd_2O_3) nanopartikülleri ile birleştirilmiş yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE), $1,08647 \text{ g/cm}^3$ gibi düşük bir yoğunlukta $0,3804 \text{ cm}^{-1}$ nötron zayıflatma katsayısına sahip olduğunu deneysel olarak bulmuşlardır [36].

Monte Carlo simülasyonları kullanılarak yapılan alternatif bir çalışmada, B_4C , B_2O_3 , Sm_2O_3 ve Gd_2O_3 bileşiklerini farklı oranlarda eklemenin, parafin ve polikarbonatın termal ve hızlı nötron zayıflatmalarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Simülasyon sonuçları,

B_4C , B_2O_3 ve Sm_2O_3 ile güçlendirildiğinde parafinin en yüksek makroskopik tesir kesitini; Gd_2O_3 ile güçlendirildiğinde ise polikarbonatın en yüksek makroskopik tesir kesitini sergilediğini ortaya koymuştur [37]. Farklı bir simülasyon çalışmasında, sürekli fiber ve dolgu takviyeli polimer kompozitlerin MCNP (Monte Carlo N-Particle) modeli, derin uzay araştırmaları için nötron kalkanı mekanizmasını ve performansını araştırmak üzere geliştirilmiştir. Polietilen fiber (PF), karbon fiber (CF) ve bazalt fiber (BF) olmak üzere üç farklı tipte yüksek performanslı fiber ve iki farklı tipte dolgu maddesi (B_4C , WO_3) ile çeşitli kompozitler oluşturulmuştur. Elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin termal nötron zırhlama özellikleri şu şekilde sıralanmıştır: polietilen elyaf/epoksi > karbon elyaf/epoksi > bazalt elyaf/epoksi. Ayrıca bazalt elyafın zırhlama üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu tespit edilmiştir [38].

2.2. Gama Işını Zayıflatma Çalışmaları

Öte yandan gama ışını, atom çekirdeklerinin radyoaktif olarak bozunması sonucu ortaya çıkan ve foton adı verilen ağırlıksız enerji paketlerinden oluşan bir elektromanyetik radyasyondur. İnsan sağlığı için en nüfuz edici ve tehlikeli radyasyon olarak kabul edilen bir iyonlaştırıcı radyasyon türüdür. Bu nedenle, gama ışını radyasyonuna karşı korunmak için yüksek yoğunluklu malzemeler tercih edilmektedir. Husain ve diğerleri, polimer kompozitlerin kalkanlama yeteneklerini incelemek için radyoaktif Cs-137 kaynağından gelen gama ışınlarını kullanmıştır. Polimer kompozitler oluşturmak için farklı kurşun oranları ve kurşun boyutları bir araya getirilmiştir. Sonuç olarak, beklendiği gibi kurşun parçacıklarının oranı artırılarak gama ışınlarının zayıflatılması artırılmıştır [39]. Li ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, 5 μ Ci radyoaktiviteye sahip ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynakları kullanılarak 356 keV ve 662 keV enerjili gama ışınları üretilmiştir. Kompozitlerin gama ışını radyasyonundan korunma kabiliyeti, tungsten (W) ve erbiyum oksit (Er_2O_3) dolgu maddelerinin birleştirilmesiyle önemli ölçüde artırılmıştır [40]. Bir başka çalışmada, farklı ağırlık yüzdelerinde (%5 ila %20) $BaTiO_3$ ve $CaWO_4$ tozu içeren polimer kompozitlerin çeşitli gama ışını enerjilerine (59,5 keV ila 1408 keV) karşı gama ışını zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Böylece, foton enerjisi arttıkça, kompozitlerin lineer zayıflama katsayıları düşmektedir. Üretilen polimer kompozitlerden ağırlıkça %20 $BaTiO_3$ ve ağırlıkça %20 $CaWO_4$, incelenen diğer numunelere kıyasla daha üstün gama ışını zayıflatma özellikleri

sergilemektedir. BaTiO₃ ile karşılaştırıldığında, CaWO₄ marjinal olarak daha üstün gama ışını zayıflatma özellikleri sergilemektedir. Ağırlıkça %20 BaTiO₃'ün doğrusal zayıflatma katsayısı 661,6 keV foton enerjisi için 0,1190 cm⁻¹ iken, ağırlıkça %20 CaWO₄ için aynı foton enerjisinde 0,1174 cm⁻¹'dir [41].

2.3. Uzaydaki Radyasyon Türleri ve Korunma Yöntemleri

Dünya dışı ortamda bir uzay görevini etkileyen iki ana radyasyon kaynağı vardır: galaktik kozmik ışınlar (GCR) ve güneş parçacık olayları (SPE) [42]. Galaktik kozmik ışınlar, süpernova patlamalarından arta kalanlar da dâhil olmak üzere güneş sistemimizin dışından gelen yüksek enerjili parçacıklardır. Bileşimleri atom çekirdekleri, protonlar, elektronlar, gama ışını ve x-ışınlarından oluşur [43]. Güneş parçacık olayları ise Güneş'in yoğun patlamalarından kaynaklanır. SPE'ler insan bedeni üzerinde GCR'den daha az etkiye sahip olsa da, yine de Mars ve Ay yüzeyindeki astronotların sağlığı için tehlikelidir [44]. Bu iki radyasyon kaynağının getirdiği parçacıklar insan vücuduna derinlemesine nüfuz ederek DNA ve hücrelere zarar verebilirken, aynı zamanda uzay araçlarındaki elektronik ekipmanlara da zarar verebilmektedirler [42, 44, 45]. Hatsuda ve diğerleri tarafından yürütülen deneysel bir çalışma, kozmik ışınların insan sağlığı için yarattığı tehlikeler kadar, bu parçacıkların derin uzaydaki gıda kaynakları üzerindeki etkisinin de önemli olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, derin uzay araçlarında ikincil radyasyon olarak nötronların oksidatif değişim yoluyla proteinleri ve lipitleri nasıl değiştirebileceğini ve et aktivasyonuna neden olabileceğini göstermektedir [46]. Daha hafif ikincil radyasyonlar, ilk GCR iyonu ile hedef çekirdek arasında nükleer bir bağlantı varsa, daha yavaş enerji kaybedeceklerinden çok daha derine nüfuz edebilirler. Bu nedenle, uzayda her türden radyasyonu tamamen absorbe edecek tek bir kalkan malzemesi sağlamak mümkün değildir [47]. Bu nedenle, bir uzay aracının uzaydaki radyasyona karşı maksimum korumaya ulaşabilmesi için hem aktif hem de pasif kalkanlama yöntemleriyle zırhlanması gerekmektedir.

Elektromanyetik kalkan ve plazma kalkanı gibi aktif kalkan tekniklerinin ardındaki temel fikir, gelen uzay radyasyonunun bir kısmını hem saptıran hem de hapseden, prensipte Dünya'nın manyetik alanına benzeyen bir kalkanlama yöntemi; pasif radyasyon kalkanı ise uzay aracı ile radyasyon kaynağı arasına fiziksel bir malzeme koymayı içerir [48]. Aktif radyasyon kalkanı kullanmanın birincil faydası biyolojik

tehlikelerin kayda değer ölçüde azaltılmasıdır [49]. Ancak galaktik kozmik ışınlar ve güneş parçacıklarının getirdiği tüm riskleri azaltmak için tek başına yeterli değildir çünkü bu tür bir koruma yalnızca protonlar, elektronlar, alfa ve beta parçacıkları gibi yüklü parçacıklara karşı etkilidir. Elektrik ve manyetik alanlar nötron veya gama ışını şeklindeki radyasyonu saptıramaz. Sonuç olarak, aktif zırhlama sistemini destekleyecek pasif zırhlama malzemesinin nötron ve gama ışınlarına karşı etkili olması gerekmektedir. Kompozit numunelerin nötron ve gama radyasyonuna karşı zayıflatma yeteneklerini araştıran bu çalışmanın arkasındaki ana mantık budur.



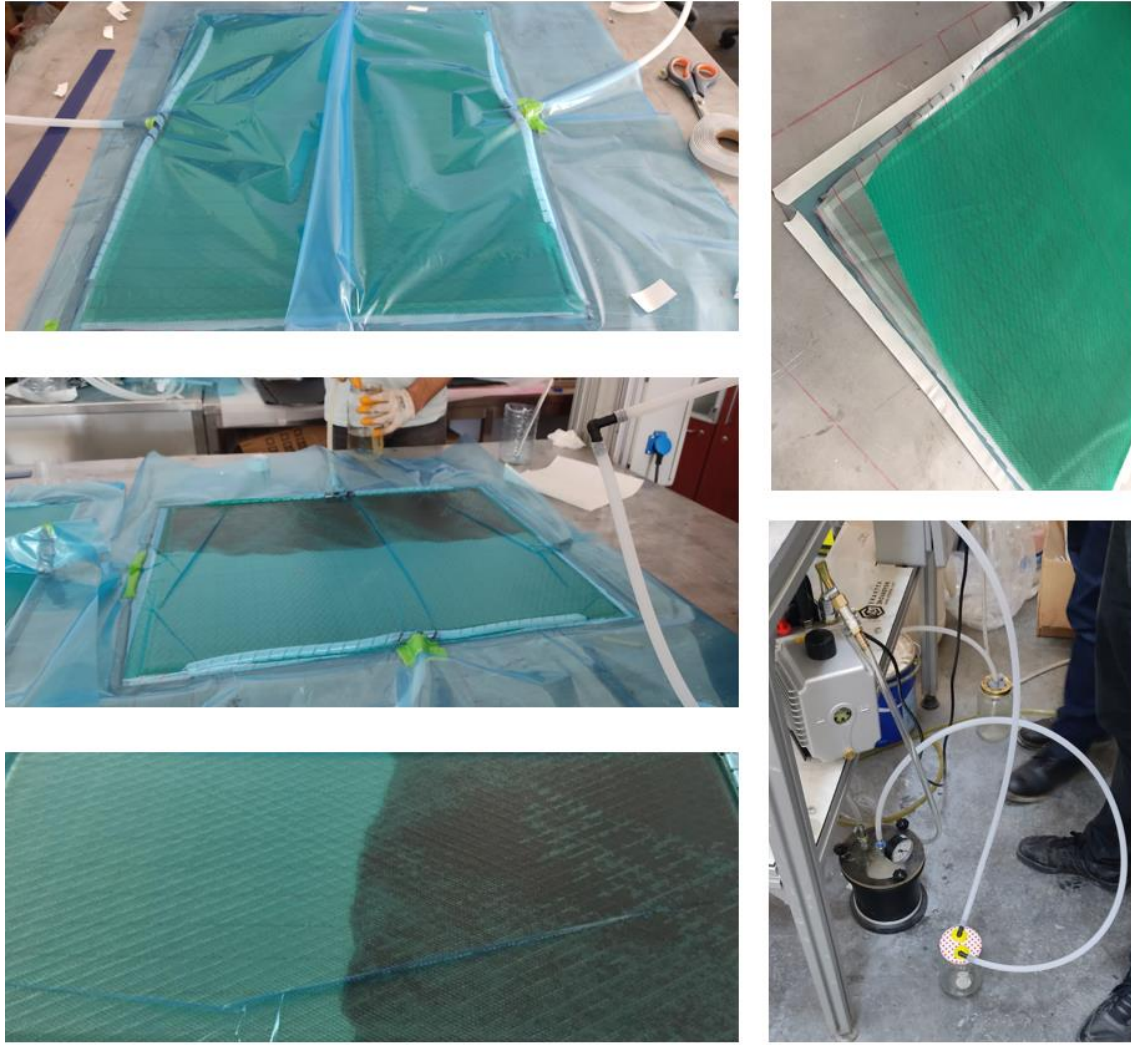
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Hali hazırda havacılık ve uzay, enerji, otomotiv vb. sektörlerde kullanılan karbon fiber epoksi kompozitler, uzay radyasyonuna karşı verimliliklerinin tespit edilmesi amacıyla içerlerine farklı oranlarda CNT ve BN nanopartiküller eklenmiş ve toplamda altı farklı malzeme numune olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Bu bölümde sırasıyla, malzemelerin hazırlanması, deney kurulumu ve teorik arka plan incelenmiştir.

3.1. Malzemelerin Hazırlanması

Deneyler için özel bir karbon fiber/epoksi kompozit malzeme üretilmiştir. Malzeme, çeşitli ağırlık oranlarında CNT ve BN nanopartikülleri ile epoksi içerisine karıştırılarak güçlendirilmiştir. Malzemede kullanılan CNT, 10-50 nm çap ve 3-20 µm uzunluğa sahip çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) iken, BN nanopartiküllerinin boyutu 50 ila 130 nm arasında değişmektedir [50-56]. Çalışmada kullanılan elyaf takviyesi DowAksa'nın karbon düz dokuma kumaşlarıdır (12 K). Bu kumaşların yüzey yoğunluğu 530 g/m², kalınlığı 0,6 mm ve çekme mukavemeti 4200 MPa'dır. Kullanılan epoksi matris MGS L160/H160 tır. 1 atm vakum basıncı altında, MGS L160/H160 matris reçinesi (ağırlık olarak 75/25) 80 °C'de 4 saat kürlenmiştir [57]. Karbon fiber epoksi bileşiğine karıştırılacak CNT ve BN nanopartikülleri, belirlenen orana karşılık gelen miktarda hassas terazide tartılmıştır. Tartılan nanopartiküller asetona eklenip, mekanik karıştırıcıda 10 dakika karıştırılmıştır. Nanopartiküllerin asetonda tamamen çözündüğü anlaşıldıktan sonra, epoksi hassas terazide tartılmış ve asetonda çözünmüş nanopartiküller epoksiye eklenmiştir. Elde edilen nanopartikül-aseton-epoksi karışımı, ultrasonik karıştırıcı kullanılarak 15 dakika boyunca karıştırılmış ve aseton buharlaşana kadar vakumlu bir fırında 65 derecelik bir sıcaklıkta 24 saat boyunca tutulmuştur. 24 saatin sonunda aseton buharlaşmış ve tamamen homojen bir şekilde karıştırılmış nanopartikül takviyeli epoksi oda sıcaklığına kadar soğutularak uygulamaya hazır hale getirilmiştir [58].

Bu çalışmada kullanılan karbon kumaşlar 50 cm x 50 cm kareler halinde kesilmiştir. Kullanılan karbon kumaşın özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Karbon kumaşları ayırmak için 55 cm x 55 cm ebatlarında ayırıcı kumaş (peelply), vakumlanan epoksinin ilerlemesini sağlayan infüzyon filesi 50 cm x 50 cm boyutlarında ve vakum



Şekil 3.1 Vakum İnfüzyon Metodu (VİM) ile malzemelerin üretimi

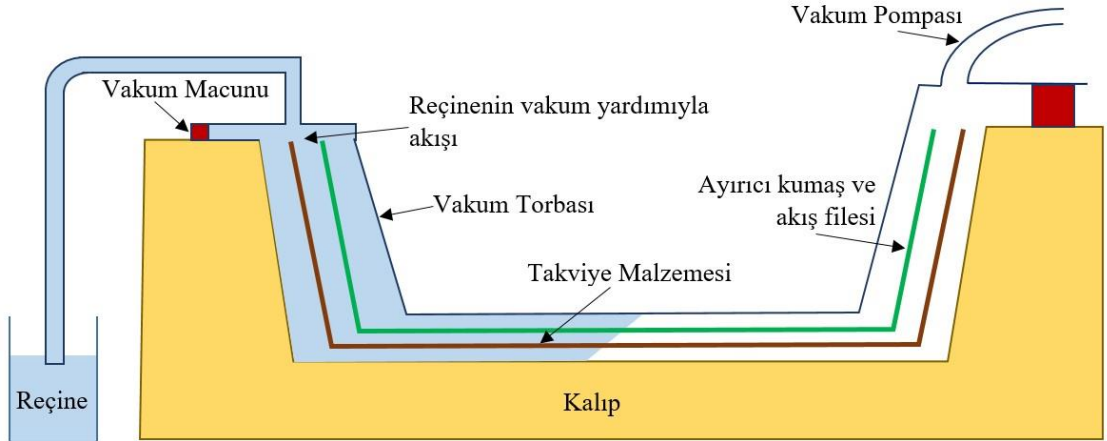
ortamını sağlayacak olan vakum torbası ise 60 cm x 60 cm boyutlarında kare olarak kesilmiştir. Vakum infüzyon işlemi özetle, vakum pompası vasıtasıyla elde edilen vakum ile kuru kalıplanmış kumaşların yüzeylerine epoksi reçinenin emdirilmesidir.

Çizelge 3.1. Karbon fiberin parametreleri ve özellikleri [58]

Parametreler	Özellikler
Yüzey Yoğunluğu	530 g/m ²
Dokuma Tipi	Düz
Fiber Tipi	12K Karbon Fiber
Çözümlü Sıklığı	3.75 ± 3% ends/cm
Kumaş Eni	100 cm
Çekme Mukavemeti (ISO 10618)	4200 MPa
Kumaş Kalınlığı (ISO 5084)	0,6 mm

Malzeme üretimi sırasında literatürde vakum infüzyon methodu (VİM) olarak bilinen yöntem, sırasıyla karbon elyaf kumaşların ve ayırıcı kumaşların istiflenmesi, epoksi karışımının hazırlanması ve vakum torbalama adımları ile takip edilmiştir.

DowAksa tarafından sağlanan karbon düz dokuma kumaşlar ve karbon kumaşları ayırmak için kullanılan peelply (ayırıcı kumaşlar) gerekli boyutlarda kesilmiştir. CNT ve BN nanopartiküllerinin homojen bir şekilde karıştırılmasıyla hazırlanan epoksi karışımının ilerlemesini sağlamak için infüzyon ağı ve vakum torbası da kumaşlara uygun boyutlarda kesilmiş ve kompozit malzemeler Şekil 3.2'de gösterilen şemadaki gibi VİM makinesinde üretilmiştir. VİM makinesine önceden hazırlanmış bir infüzyon ağı yerleştirilirken, infüzyon hattının üzerine bir ayırıcı kumaş yerleştirilmiştir. Nanopartikül karıştırılmış epoksi ile yapılan fırçalama işleminin ardından ayırıcı kumaşın üzerine 8 kat karbon fiber yerleştirildi. Üzerine sandviç modeli olarak ayırıcı kumaş ve infüzyon ağı yerleştirildikten sonra kenarlara sızdırmazlık bandı yapıştırılmış ve bant üzerine oturan boş bir hortum sızdırmazlık bandının üstüne yerleştirilip sabitlenmiştir. En üstte vakum torbası ile kapatılarak sızdırmazlık bandına yapıştırılmış ve böylece sızıntının önlenmesi sağlanmıştır. Son olarak sonra vakum pompası çalıştırılmış ve fazla epoksi, kumaştan uzaklaştırılmıştır.



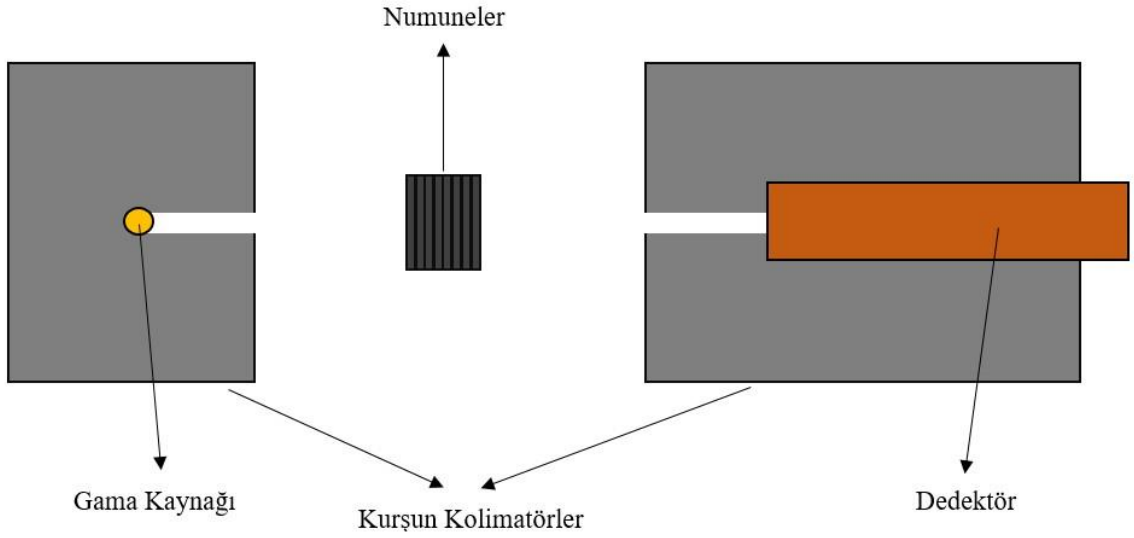
Şekil 3.2. Vakum İnfüzyon Methodu (VİM) şematik gösterimi

3.2. Deney Kurulumu

Karbon/epoksi kompozit ve içerisinde farklı miktarlarda CNT ve BN içeren beş tip numune olmak üzere toplam altı tip numune gama ışını ve nötron radyasyonuna karşı test edilmiştir. Bu 5 numunenin içerikleri ağırlık bakımından sırasıyla %0,5 CNT, %0,5 BN, %0,5 CNT + %0,5 BN, %1 CNT + %1 BN ve %2 BN idi.

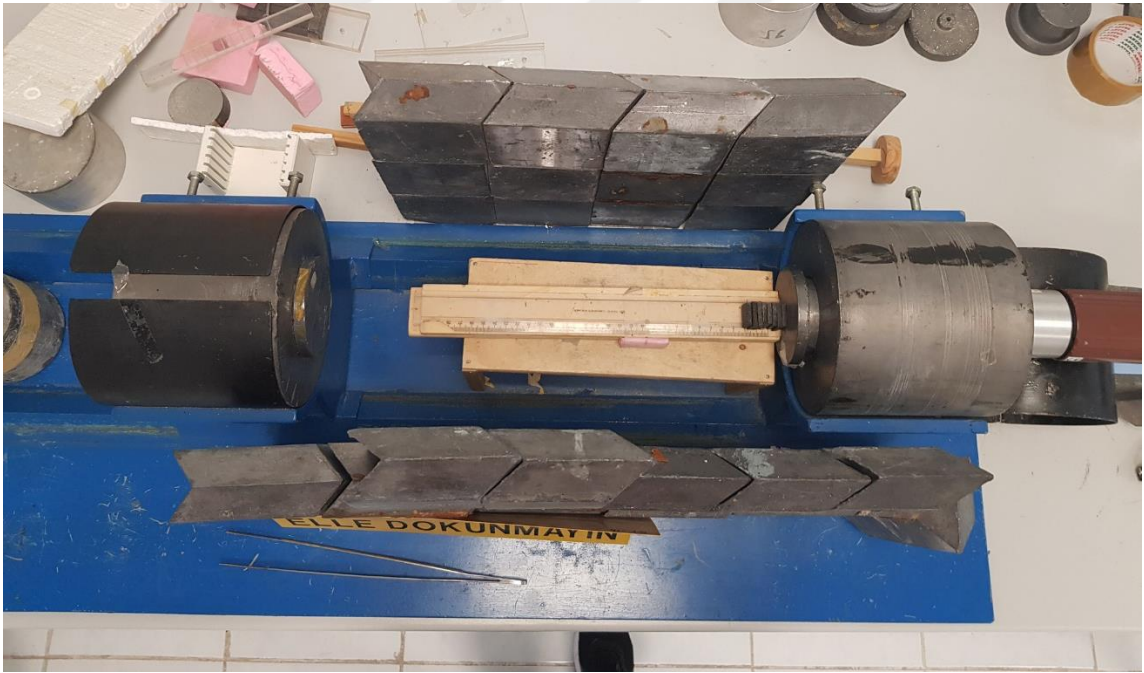
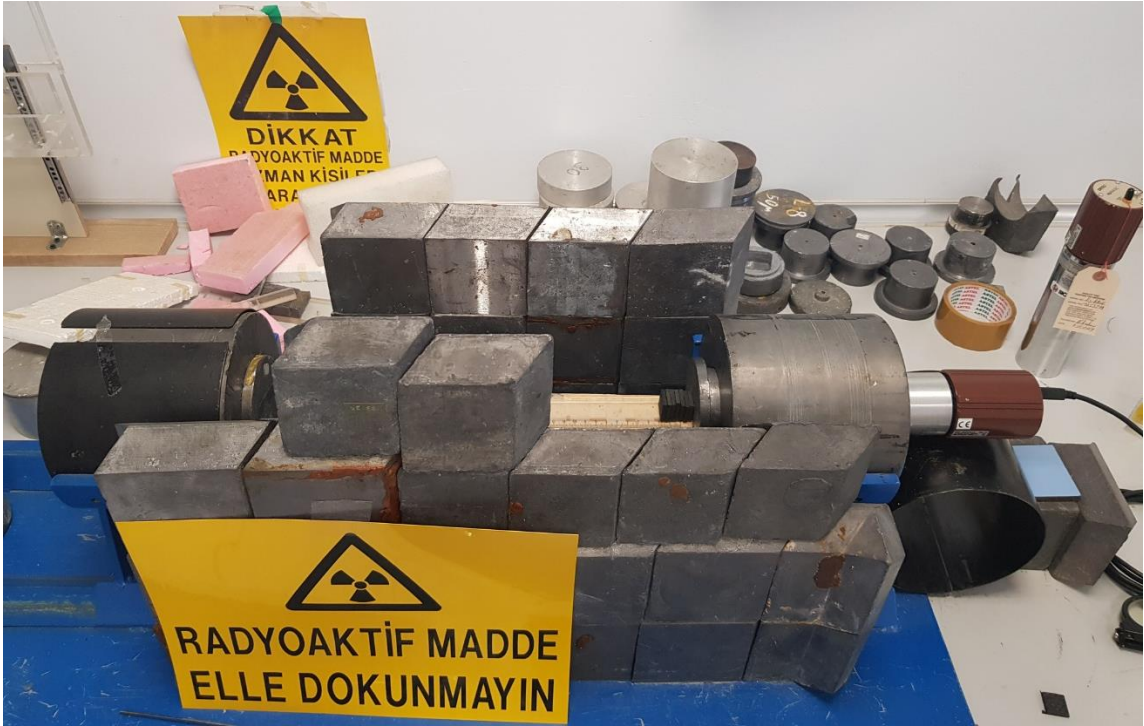
3.1.1. Gama ışını deneyinin kurulumu

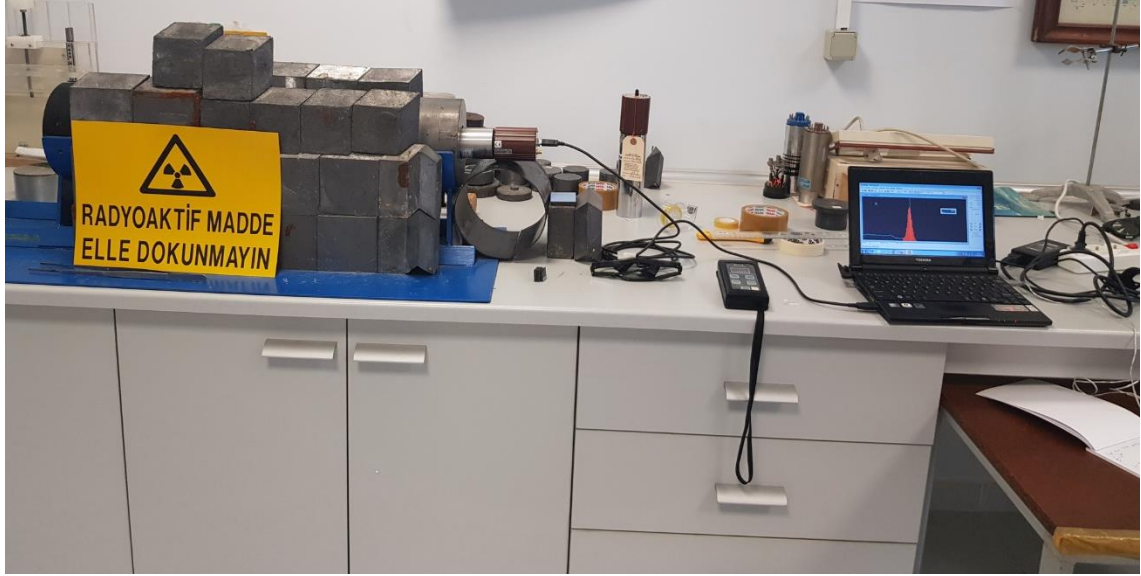
Çeşitli oranlarda CNT ve BN içeren karbon fiber kompozit malzemelerin gama ışını radyasyon geçirgenliğini araştırmak için İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı Radyoizotop Laboratuvarı'ndaki dar demet deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneğinin gösterimi Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Dar demet gama ışını iletiminin şematik gösterimi

Gama ışını kaynağı olarak 0,662 MeV pik enerjisine sahip Sezyum-137 ($Cs-137$) radyoizotopu kullanılmış ve tüm numuneler eşit bir zaman aralığında (60 saniye) gama ışınlarına maruz bırakılmıştır.





Şekil 3.4. Dar demet gama ışını deneyi

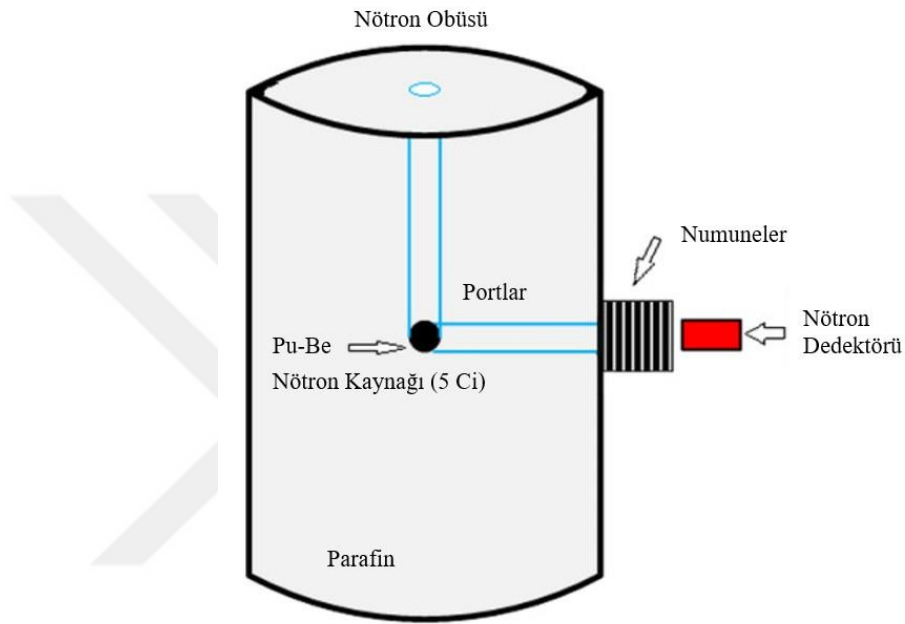
Denyde, her bir kompozit numune 12,5 mm x 12,5 mm boyutlarında 8 küçük parçaya kesilmiş ve bu numuneler deney düzeneğine farklı kalınlıklarda art arda yerleştirilmiştir. Her bir numunenin yerleştirilmesinden sonra iletilen gama ışınındaki zayıflama, dedektör (Alpha Spectra tarafından üretilen bir sodyum iyodür sintilasyon dedektörü) tarafından kaydedilmiş ve kaydedilen tüm veriler Maestro yazılımı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tüm veriler toplandıktan sonra, altı numunenin her biri için Microsoft Excel'de zayıflama grafikleri çizilmiş ve malzemelerin HVL (yarı değer katmanı) ile birlikte lineer zayıflama katsayısı (μ) Lambert-Beer Zayıflama Yasasına göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Gama iletiminin ölçümü için kullanılan gama dedektörü ve numune kalınlıklarının teker teker ölçüldüğü mikrometre

3.2.2. Nötron deneyinin kurulumu

Aynı karbon fiber kompozit malzemelerin nötron radyasyonu geçirgenliğini incelemek için İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü TRIGA MARK-II Reaktörü'nün bulunduğu tesisteki nötron obüsü deney düzeneği kullanılmıştır. Nötron obüsü kullanılarak, farklı kalınlıktaki her bir numune Şekil 3.6'da gösterildiği gibi eşdeğer bir süre boyunca termal nötronlara maruz bırakıldı.



Şekil 3.6. Termal nötron iletiminin şematığı [35]

Kompozit numuneler 60 mm x 60 mm boyutlarında küçük parçalar halinde kesilmiş ve 5 Ci aktiviteye sahip $^{239}\text{Pu-Be}$ nötron kaynağından nötronların gönderildiği 50 mm çapındaki dairesel nötron obüsü girişinin önüne farklı kalınlıklarda yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Termal nötron deneyi

İlgili nötron sayımlarını kaydetmek için bir nötron detektörü (Polimaster tarafından üretilen Model PM1401K Çok Amaçlı Radyasyon Tanımlayıcı) kullanılarak her bir numune için iletilen nötron yoğunluğu (I) ölçülmüştür. Tüm verilerin Microsoft Excel'de toplanmasının ardından, altı numunenin her biri için zayıflama grafikleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları dikkate alınarak, malzemelerin HVL ve makroskopik tesir kesiti (Σ), Lambert-Beer Zayıflama Yasası kullanılarak gama ışını iletim deneyinde olduğu gibi hesaplanmıştır.

3.3. Teorik Arka Plan

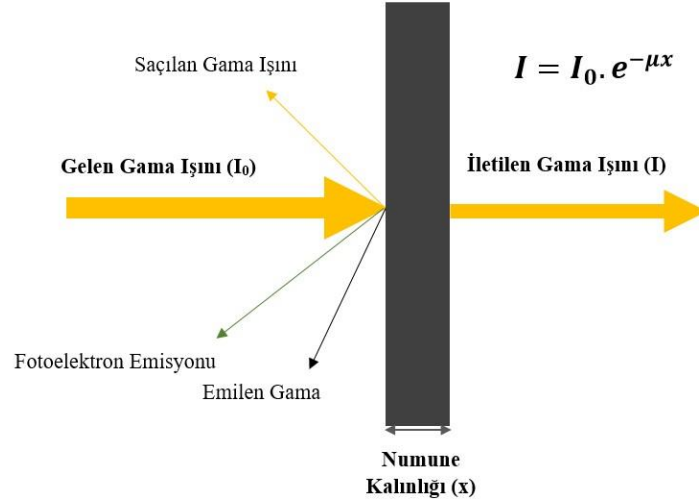
Lambert-Beer Zayıflama Yasası, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi gama ışınlarının malzeme ile nasıl etkileşime girdiğini açıklar. Aşağıdaki ifade, kalınlığı x (cm) olan bir malzemeden geçen monoenerjetik bir gama ışınının yoğunluk değişimini (dI) açıklamaktadır:

$$dI = -\mu I dx \quad (1)$$

Burada (I) gelen gama ışınının yoğunluğu (I_0), dx soğurucunun sonsuz küçük kalınlığı ve μ (cm^{-1}) lineer zayıflatma katsayısıdır. Lambert-Beer zayıflama denklemi yukarıdaki eşitliğin integre edilmesiyle elde edilebilir [59]:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\mu \int_0^x dx \quad (2)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$



Şekil 3.8. Gama ışını-katı madde etkileşimi için Lambert-Beer Zayıflama Yasası

Denklem (3)'teki doğrusal zayıflatma katsayısı (μ), bir malzemenin birim kalınlığı başına bir gama ışını demetinde zayıflatılan fotonların oranını temsil eden bir sabittir [60]. Radyasyon zayıflamasının daha iyi anlaşılmasını sağlayan bir diğer önemli terim, gelen

radasyon seviyesini yarıya indirmek için gereken malzeme kalınlığını ifade eden yarı değer katmanıdır (HVL). Bu kalınlık aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir [61]:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (4)$$

Lambert-Beer Yasası, denklem (5)'te olduğu gibi kompozitlerin toplam nötron iletimini hesaplamak için de kullanılabilir. Literatürde, nötron akışının zayıflaması için lineer zayıflama katsayısı yerine genellikle makroskopik tesir kesiti (Σ) ifadesi kullanılmaktadır, burada x numune kalınlığıdır. Denklem (6) kullanılarak, numunelerin nötron zayıflaması için yarı değer katmanı da belirlenebilir [59].

$$I = I_0 e^{-\Sigma x} \quad (5)$$

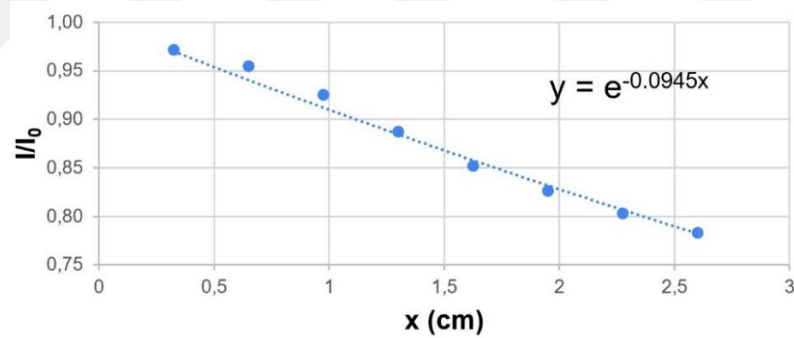
$$HVL = \frac{\ln 2}{\Sigma} = \frac{0.693}{\Sigma} \quad (6)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

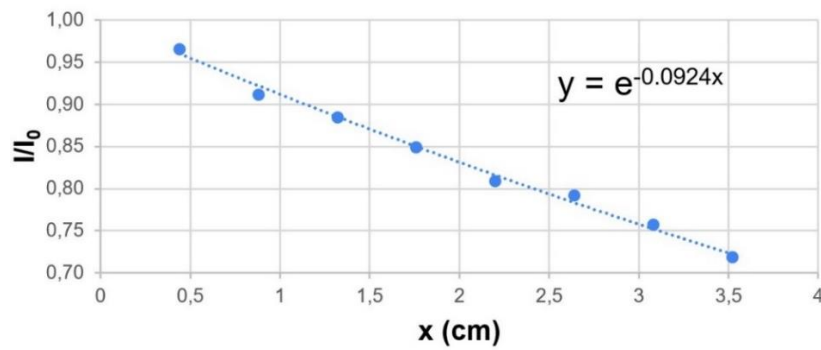
4.1. Test Edilen Numunelerin Gama Işını Radyasyon Zayıflatması

Gama ışınlarının zayıflaması doğrudan malzemenin yoğunluğuyla ilgili olduğundan, düşük yoğunluğa ($\sim 1,26 \text{ g/cm}^3$) sahip karbon/epoksi kompozit numunelerin gama ışını radyasyonuna karşı demir ve kurşun gibi ağır metaller kadar etkili olması beklenmiyordu. Öte yandan, test edilen numuneler, benzer yoğunluklara sahip muadilleriyle karşılaştırıldığında iyi performans gösterdiği söylenebilir. Her bir numunenin gama ışını geçirgenlikleri sırasıyla verilmiştir. Test edilen numunelerin gama ışını radyasyonuna karşı lineer zayıflatma katsayıları (μ) ve HVL değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Tüm numunelerin üstel eğilim denklemleri grafiklerin sağ üst köşesine yerleştirilmiştir. Lambert-Beer Yasası'ndan gelen denklem ($I/I_0 = e^{-\mu x}$) dikkate alındığında, denklemde x'in önündeki sayı her bir numunenin lineer zayıflatma katsayısını göstermektedir.

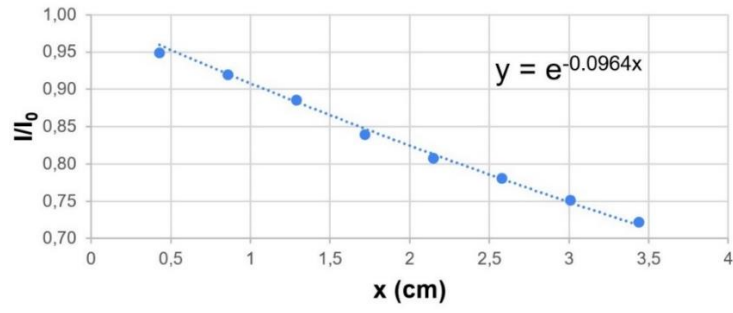
a)



b)

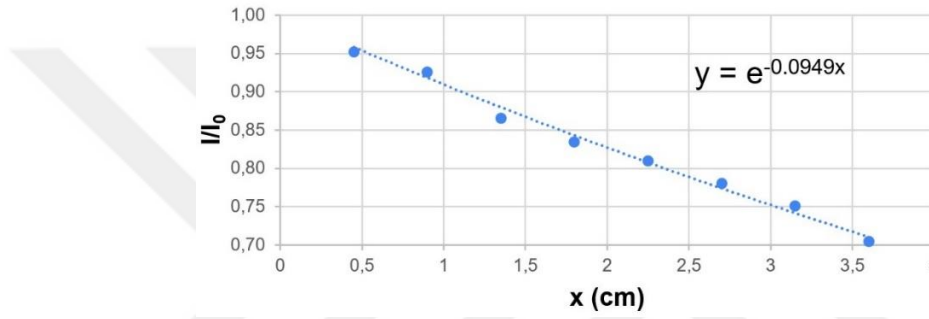


c)

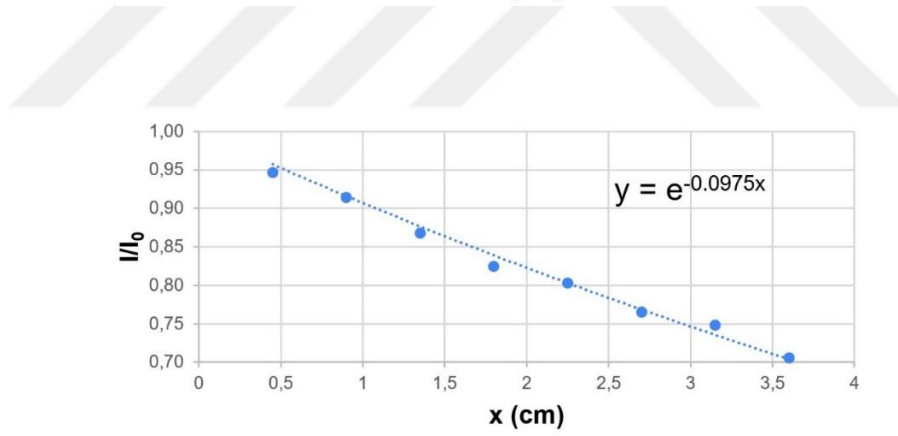


Şekil 4.1. a) Karbon fiber/epoksi; b) %0,5 CNT; c) %0,5 BN kompozitlerin gama ışını geçirgenliği

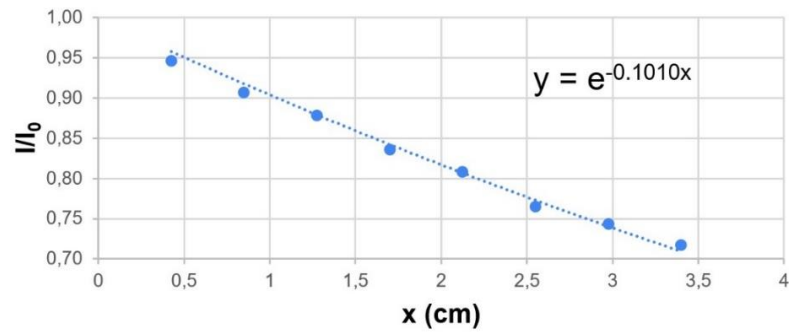
a)



b)

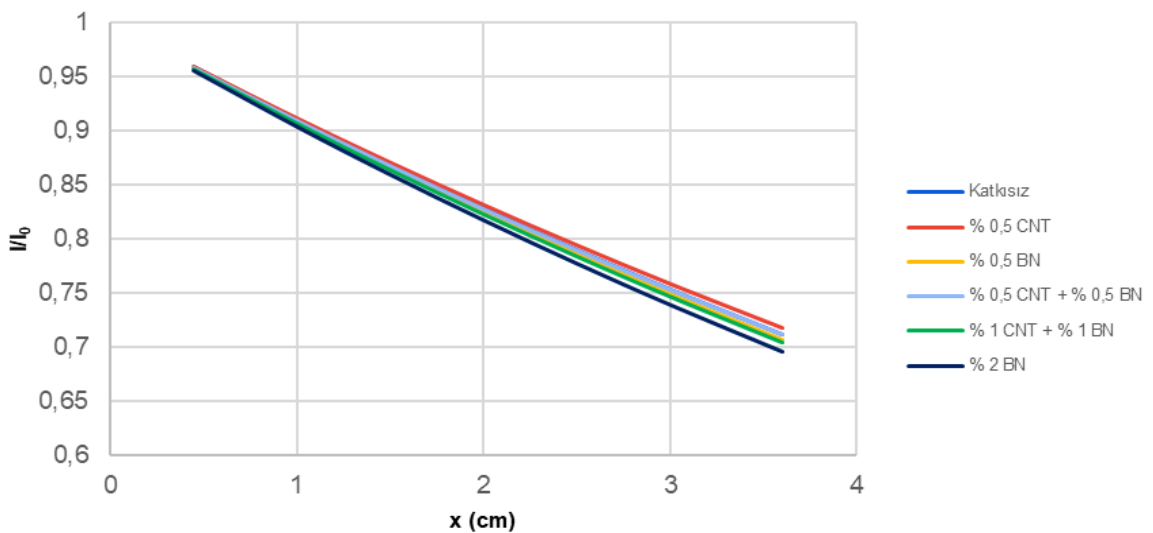


c)



Şekil 4.2. a) %0,5 CNT + %0,5 BN; b) %1 CNT + %1 BN; c) %2 BN kompozitlerin gama ışını geçirgenliği

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1'de açıkça görülebileceği gibi, %2 BN numunesi, diğer numuneler arasında gama ışını radyasyonuna karşı 0.101 cm^{-1} lineer zayıflama katsayısı ve 6.86 cm HVL değerleri ile en iyi koruma özelliklerini göstermiştir. Karbon/epoksi kompozite %0,5 BN nanopartikül eklenmesinin malzemenin zırhlama kapasitesini biraz artırdığı da gözlemlenmiştir. Nanopartikül katkısız numune $0,0945 \text{ cm}^{-1}$ lineer zayıflama katsayısına sahipken, %0,5 BN içerikli numune $0,0964 \text{ cm}^{-1}$ değerine sahiptir ve bu eklemenin malzemenin gama ışını radyasyonuna karşı kalkanlama kapasitesinde %2,01'lik bir artışa yol açtığı görülmektedir. Aksine, malzemeye CNT eklenmesi gama ışını radyasyonuna karşı etkinliğinin belli bir oranda azalttığı gözlemlenmiştir. Karbon/epoksinin doğrusal zayıflama katsayısı %0,5 CNT numunesinde $0,0945 \text{ cm}^{-1}$ 'den $0,0924 \text{ cm}^{-1}$ 'e, %0,5 BN'nin doğrusal zayıflama katsayısı ise benzer şekilde %0,5 CNT + %0,5 BN numunesinde $0,0964 \text{ cm}^{-1}$ 'den $0,0949 \text{ cm}^{-1}$ 'e düşmüştür.



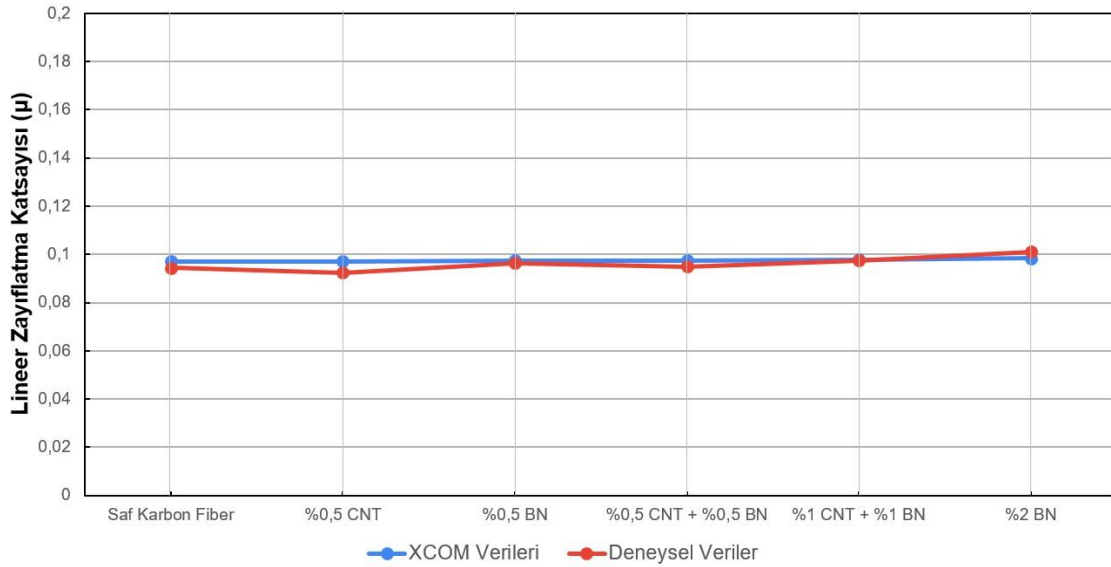
Şekil 4.3. Bütün numunelerin gama ışını geçirgenliğinin karşılaştırmalı grafiği

Çizelge 4.1. Cs-137 gama ışını kaynağına karşı test edilen numunelerin lineer zayıflama katsayıları (μ) ve yarı-değer katmanları (HVL)

Numune (%wt.)	$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	HVL (cm)
Karbon fiber/epoksi kompozit	0,0945	7,33
%0,5 CNT	0,0924	7,50
%0,5 BN	0,0964	7,19
%0,5 CNT + %0,5 BN	0,0949	7,30
%1 CNT + %1 BN	0,0975	7,11
%2 BN	0,1010	6,86

Numunelerin 0,662 MeV pik enerjili gama ışını radyasyonuna karşı lineer zayıflama katsayısına ilişkin deneysel sonuçlar, aynı enerji seviyesi için Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nün (National Institute of Standards and Technology - NIST) XCOM

verileriyle de karşılaştırılmış ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Çizelge 4.2'de aradaki fark yüzdesinin tüm numuneler için %5'in altında olduğu görülebilmektedir. İlgili farkların nedeni, XCOM veri tabanının yalnızca elementleri veya malzemelerin bileşik formlarını tanımasıdır. Bu nedenle, CNT içeren numunelerin doğrusal zayıflama katsayıları, CNT'nin normal karbon elementlerinden daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasına rağmen, XCOM'a göre özelleştirilememiştir.



Şekil 4.4. 0,662 MeV pik enerjili gama ışını radyasyonunda deneysel olarak elde edilen lineer zayıflama katsayılarının XCOM verileri ile karşılaştırılması

Çizelge 4.2. 0,662 MeV pik enerjili gama ışını radyasyonu için deneysel veriler ile XCOM verileri arasındaki hata tablosu

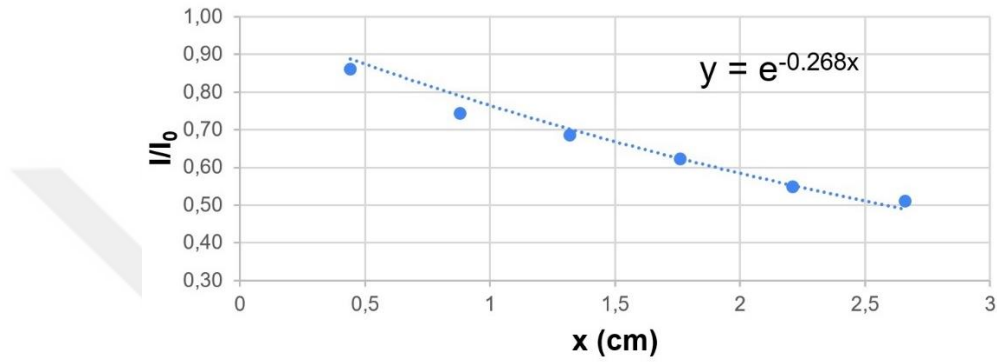
Numune (%wt.)	Deneysel Veriler	XCOM Verileri [62]	Fark Yüzdesi
Karbon fiber/epoksi kompozit	0,0945 cm ⁻¹	0,0971 cm ⁻¹	2.72 %
%0,5 CNT	0,0924 cm ⁻¹	0,0971 cm ⁻¹	4.81 %
%0,5 BN	0,0964 cm ⁻¹	0,0975 cm ⁻¹	1.15 %
%0,5 CNT + %0,5 BN	0,0949 cm ⁻¹	0,0975 cm ⁻¹	2.65 %
%1 CNT + %1 BN	0,0975 cm ⁻¹	0,0978 cm ⁻¹	0.32 %
%2 BN	0,1010 cm ⁻¹	0,0984 cm ⁻¹	2.65 %

4.2. Test Edilen Numunelerin Nötron Radyasyonu Zayıflatması

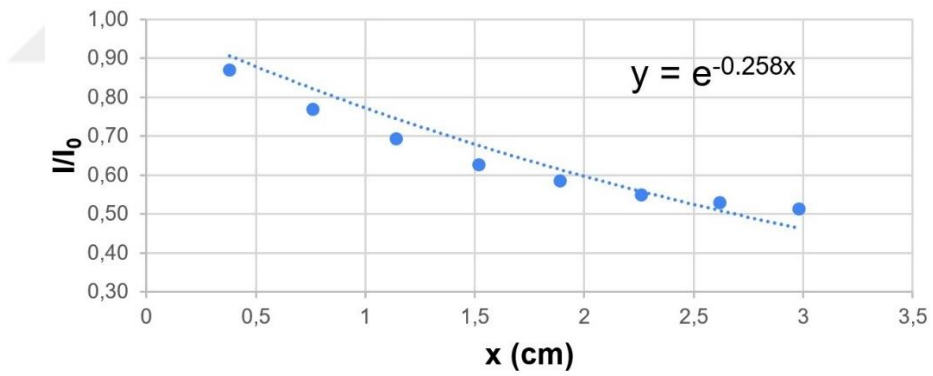
Test edilen numuneler nötron radyasyonuna karşı gama ışını radyasyonundan çok daha iyi koruma gösterirken, gama ışını zayıflamasına benzer bir eğilim göstermiştir. Malzemeye CNT eklenmesi, gama zayıflama grafiklerinde görüldüğü gibi, nötron radyasyonu için de zayıflamayı olumsuz bir şekilde etkilemiştir. Nötron ve gama ışını radyasyonuna karşı bu davranışın ana nedeni CNT allotroplarının içi boş yapısı ve

nispeten düşük yoğunluğu olabilir. Her bir numunenin makroskopik tesir kesitleri (Σ), gama ışını radyasyonunun zayıflatma katsayılarını belirlemek için kullanılan aynı yöntemle, deneysel verilerin regresyonundan hesaplanmıştır. Test edilen numunelerin nötron radyasyonuna karşı zayıflama ve HVL değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Karbon/epoksi kompozit için makroskopik kesit $0,268 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanırken, %0,5 CNT için $0,258 \text{ cm}^{-1}$ ve %0,5 BN için $0,290 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

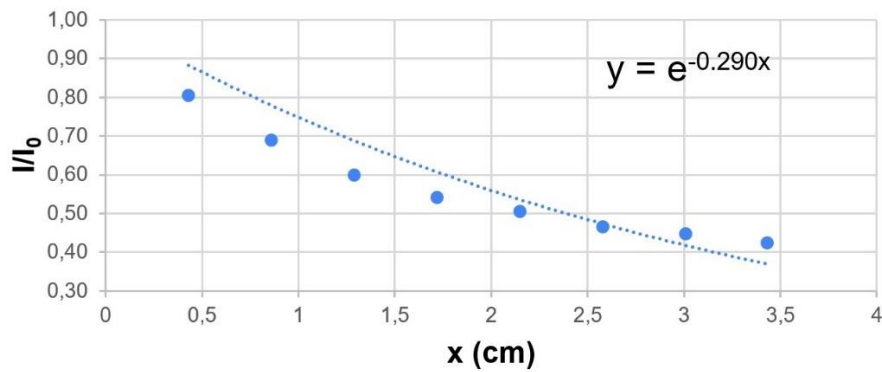
a)



b)

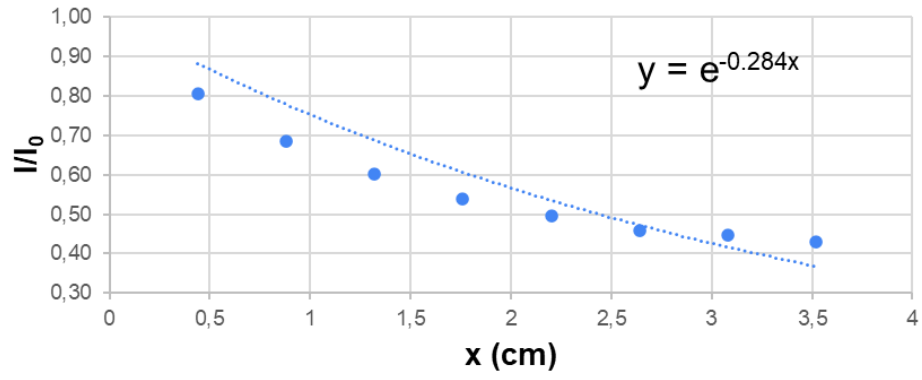


c)

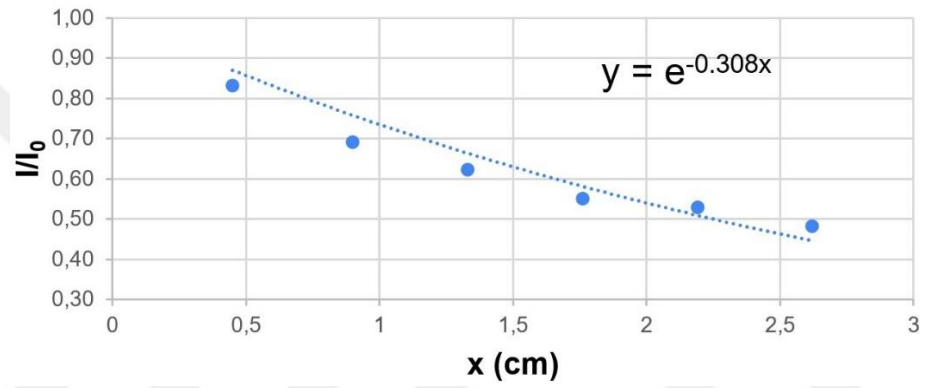


Şekil 4.5. a) Karbon fiber/epoksi; b) %0,5 CNT; c) %0,5 BN kompozitlerin termal nötron geçirgenliği

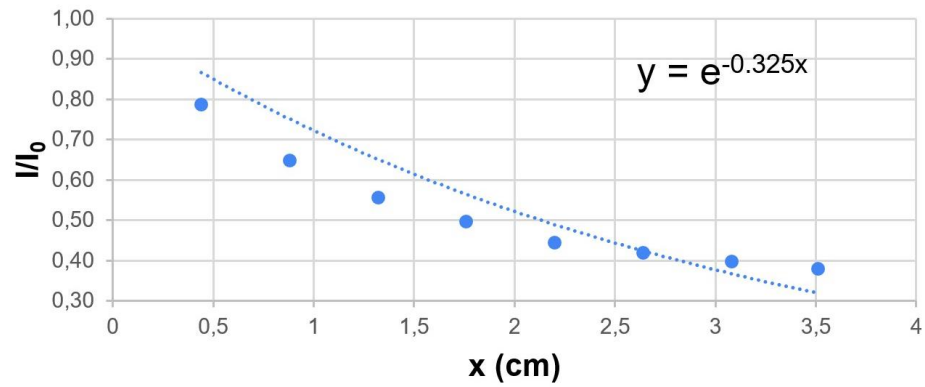
a)



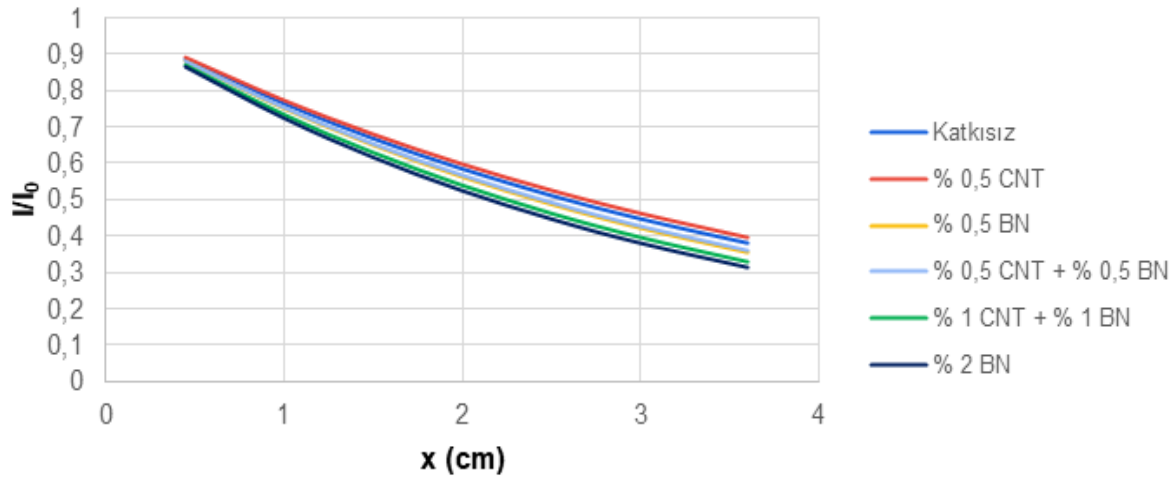
b)



c)



Şekil 4.6. a) %0,5 CNT + %0,5 BN; b) %1 CNT + %1 BN; c) %2 BN kompozitlerin termal nötron geçirgenliği



Şekil 4.7. Bütün numunelerin termal nötron geçirgenliğinin karşılaştırmalı grafiği

Çizelge 4.3. ^{239}Pu -Be nötron kaynağına karşı test edilen numunelerin makroskopik tesir kesitleri (Σ) ve yarı-değer katmanları (HVL)

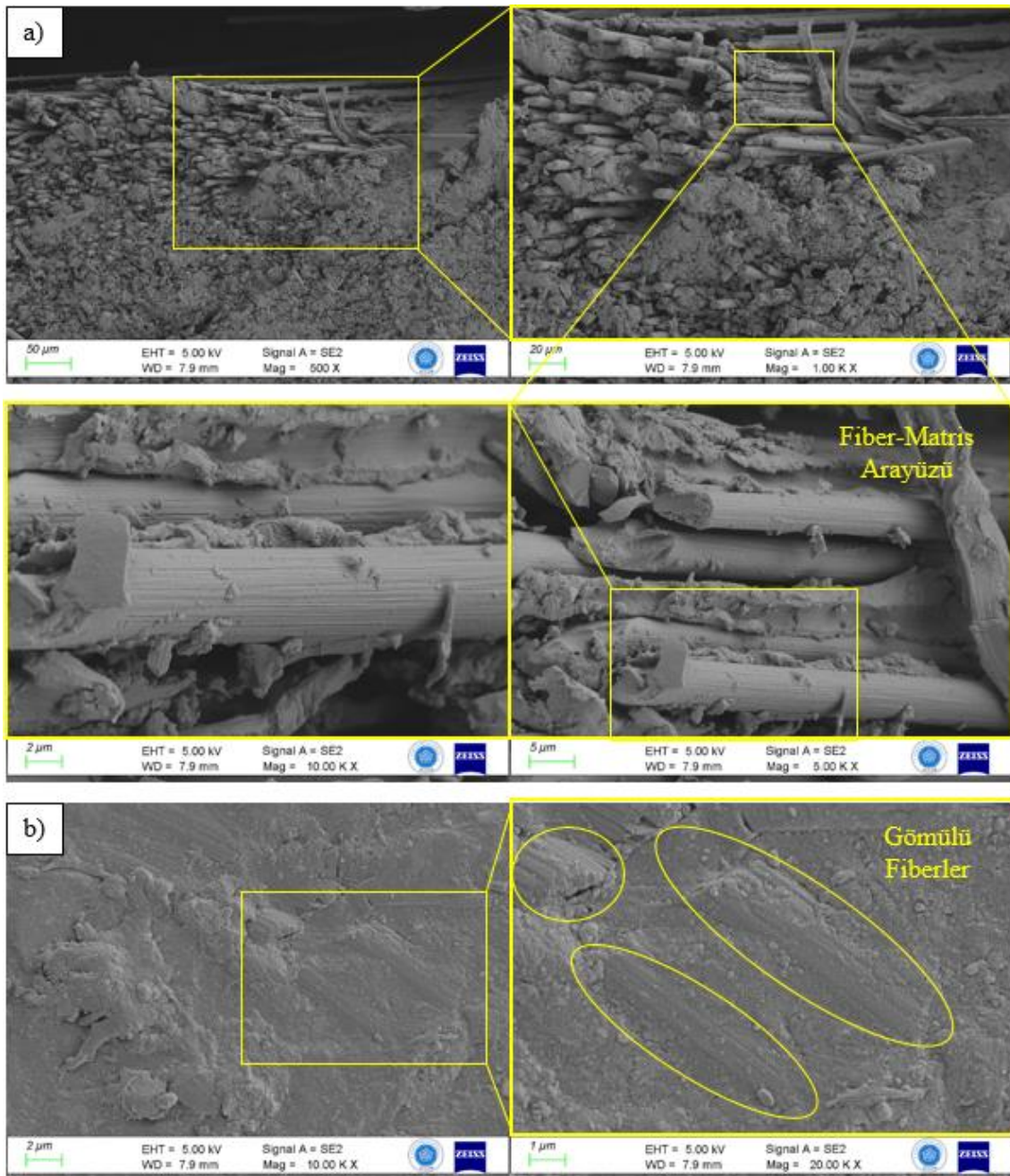
Numune (%wt.)	Σ (cm^{-1})	HVL (cm)
Karbon fiber/epoksi kompozit	0,268	2,59
%0,5 CNT	0,258	2,69
%0,5 BN	0,290	2,39
%0,5 CNT + %0,5 BN	0,284	2,44
%1 CNT + %1 BN	0,308	2,25
%2 BN	0,325	2,13

Diğer numunelerden de gözlemlenebileceği gibi, malzemeye BN eklenmesi radyasyona karşı zırlama etkinliğini artırırken, CNT eklenmesi bunu gözle görülür şekilde zayıflatmıştır. Altı numune arasında en iyi koruyucu malzeme $0,325 \text{ cm}^{-1}$ makroskopik kesit ve 2,13 cm HVL değerleri ile yine %2 BN olmuştur. Numunelerin hem gama ışını hem de nötron radyasyonuna karşı deneysel sonuçları göz önüne alındığında, %2 BN içeren karbon/epoksi kompozit, uzay radyasyonuna karşı zırlama için bu çalışmada test edilen numuneler arasından en uygun malzeme olduğu tespit edilmiştir.

4.3. SEM Analizi

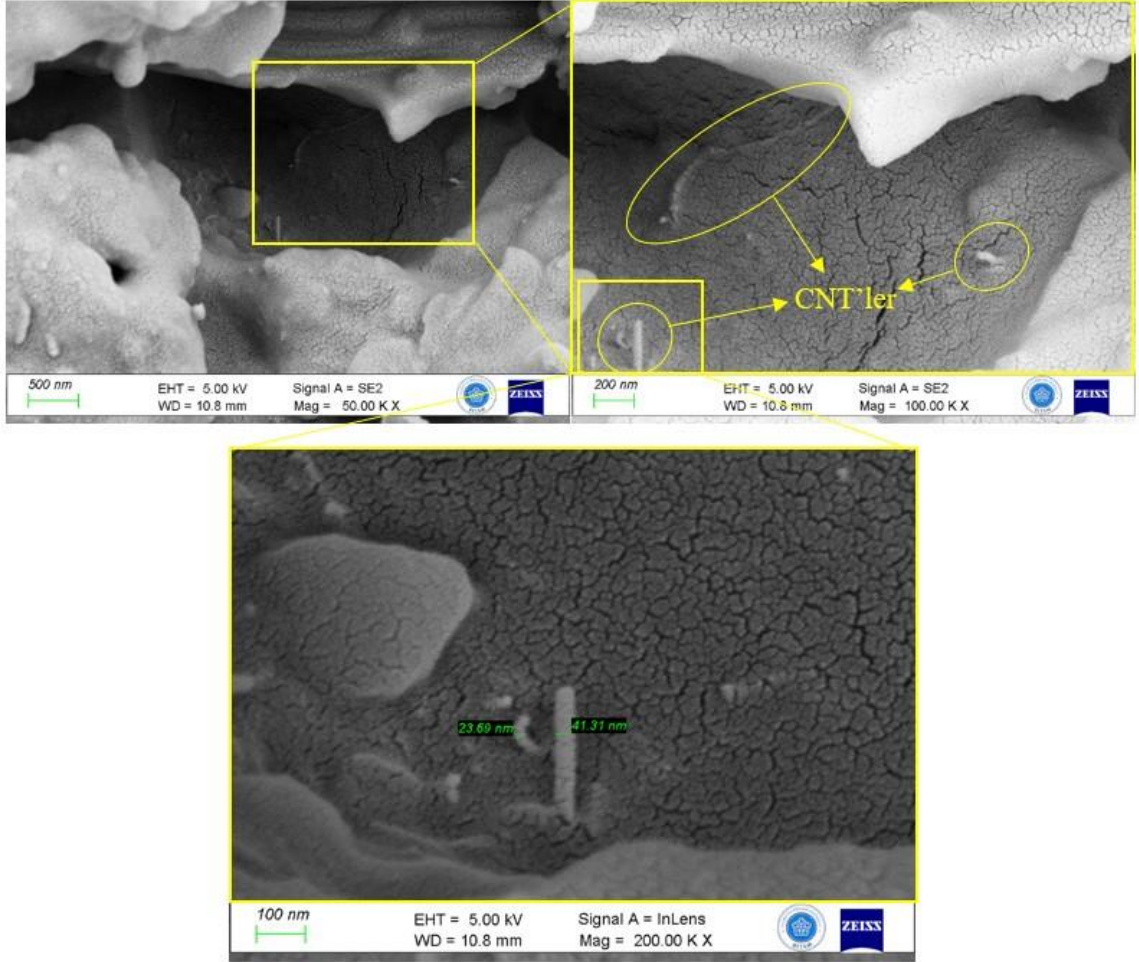
Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan ZEISS GeminiSEM 500 model FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) ile geri saçılan elektronlar kullanılarak karbon fiber/epoksi kompozitlerdeki CNT ve BN nanopartiküllerinin morfolojisi ve dağılımı detaylı olarak incelenmiştir. SEM incelemeleri sırasında nanopartiküllerin kompozit malzeme içindeki

kaba morfolojisi ve dağılımı ortaya çıkarılmış, dağılımlarına ve matris ile etkileşimlerine ışık tutulmuştur. Şekil 4.8, Katkısız karbon fiber/epoksi kompozitlerin SEM görüntülerini göstermekte ve karmaşık fiber-matris arayüzüne ve karbon fiberlerin epoksi matris içindeki dağılımına dair bilgiler sunmaktadır. Şekil 4.8a'da, karbon elyaflar arasında epoksinin homojen dağılımı belirgindir ve elyaflar ile matris arasındaki etkili bağlanmayı vurgulamaktadır. Buna karşılık, Şekil 4.8b, başka bir bölgede epoksi matris içine gömülü karbon fiberleri ortaya çıkarmakta ve kompozit malzeme içindeki uzamsal düzenlemelerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.



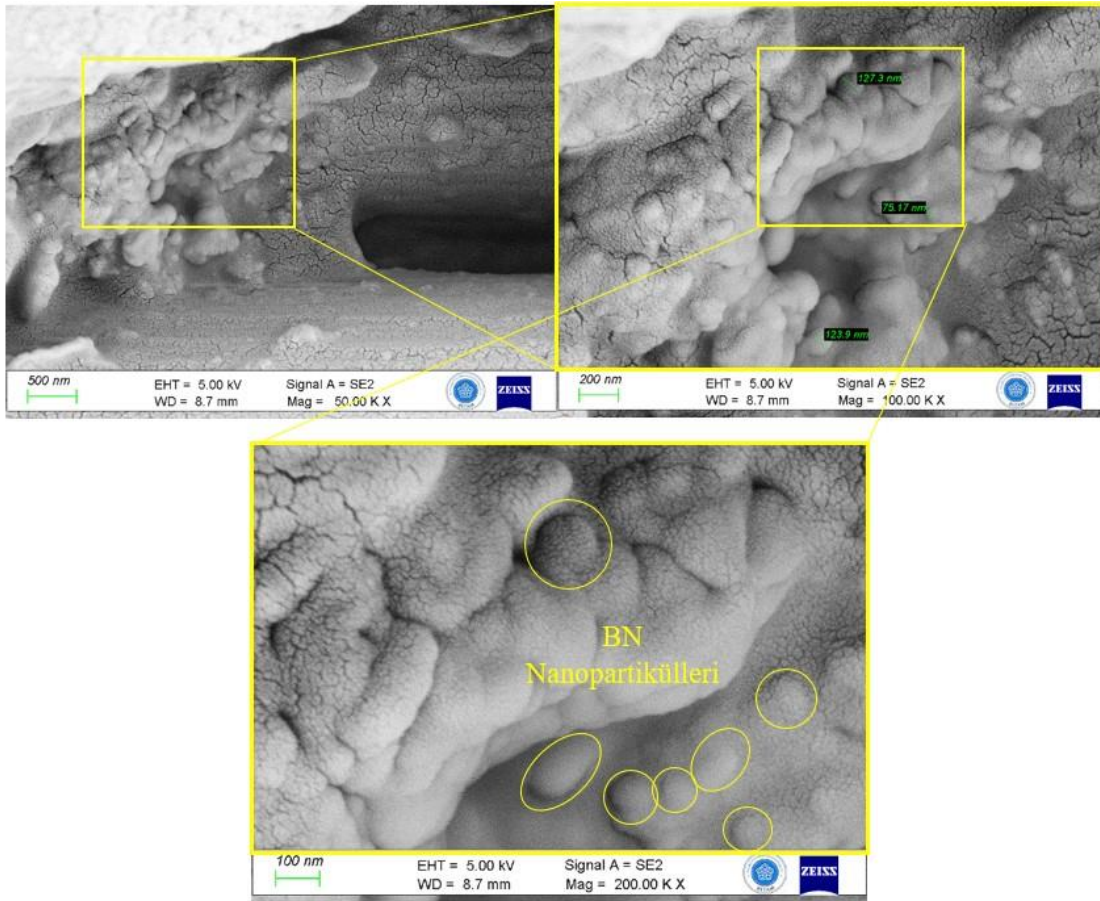
Şekil 4.8. Katkısız karbon fiber/epoksi kompozitin SEM görüntüleri

Buna ek olarak, Şekil 4.9, CNT'lerin kompozit içindeki varlığını, morfolojilerini ve dağılımlarını 50.000x büyütmede yakalayarak göstermektedir. SEM analizi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirmesinde potansiyel rol sahibi olan CNT'lerin epoksiye kısmen gömülü olduğunu göstermektedir. CNT'lerin gözlemlenen şekli ve boyutu, literatürdeki önceki tanımlarla uyumludur ve bunları 30 ila 50 nm arasında değişen bir çapa sahip solucan benzeri silindirik tüpler olarak tasvir etmektedir.



Şekil 4.8. Karbon fiber/epoksi kompozite dahil edilmiş CNT'lerin SEM görüntüleri

Benzer şekilde, BN nanopartikülleri 50.000x büyütmede tespit edilmiş ve Şekil 4.10'da gösterildiği gibi epoksi matris içinde dağılmıştır. SEM görüntüleri, farklı morfolojiler sergileyen BN nanopartiküllerinin varlığını ortaya koymaktadır; bazıları eliptik plaka benzeri bir yapı sergilerken, diğerleri dairesel plaka benzeri bir yapıya sahiptir. BN nanopartiküllerinin boyutları 50 ila 130 nm arasında değişmekte olup, kompozit malzeme içindeki takviye edici maddeler olarak rollerinin altını çizmekte ve özellikleri üzerindeki potansiyel etkilerini vurgulamaktadır.



Şekil 4.10. Karbon fiber/epoksi kompozite dahil edilmiş BN nanopartiküllerinin SEM görüntüleri

4.3. %2 BN Takviyeli Karbon/Epoksi Kompozitin Benzeri ve Yaygın Olarak Uzay Araçlarında Kullanılan Radyasyon Zırhlıyıcı Malzemeler ile Karşılaştırılması

Yüksek yoğunluğa sahip malzemelerin gama ışınlarına karşı çok daha etkili olduğu, hidrojen, bor ve azot gibi düşük atom numarasına (Z) sahip elementlerin ise nötron radyasyonuna karşı daha iyi performans gösterdiği iyi bilinmektedir. Özellikle sıvı hidrojen, galaktik kozmik ışınlar ve güneş parçacık olaylarına karşı en iyi malzeme olarak kabul edilir [63]. Ancak, son derece düşük kaynama noktası (~ -253 °C) nedeniyle hidrojeni sıvı halde tutmak ve ondan yapılar inşa etmek oldukça zordur. Bu nedenle, bir uzay aracı için kalkan malzemesi olarak düşünülemez. Öte yandan alüminyum, iyi radyasyon kalkanı ve yapısal muhafaza özellikleri nedeniyle uzayda kullanılan en yaygın malzeme olmakla birlikte, uzay görevinin türüne bağlı olarak çelik ve polietilen gibi diğer malzemelerin de uzay radyasyonuna karşı uygulamaları vardır. Nispeten düşük ağırlığı, güçlü mekanik özellikleri ve radyasyon zırhlaması etkinliği göz önüne alındığında, ağırlıkça %2 BN içeren karbon fiber/epoksi, özellikleri Çizelge 4.4'te aynı enerji

seviyesindeki hem gama ışını hem de nötron radyasyonu için yarı değer katmanları (HVL) açısından diğer bazı popüler radyasyon zırhlama malzemeleriyle karşılaştırıldığı için uzay radyasyon zırhlama malzemesi olarak da uygulanabilir, burada diğer malzemelerin bazı özellikleri literatürdeki diğer çalışmalardan ve bazıları XCOM veri tabanından toplanmıştır. Bu çalışmadaki ağırlıkça %2 BN karbon/epoksi kompozitin davranışı, Bel ve diğerlerinin çalışmasındaki ağırlıkça %40 CMT PMMA'nın aynı gama ışını ve nötron kaynaklarına karşı davranışına çok benzemektedir.

Çizelge 4.4. Ağırlıkça %2 BN katkılı karbon fiber/epoksi kompozitin diğer malzemelerle karşılaştırılması

Malzeme	Yoğunluk	Gama ışını için HVL değeri	Termal nötron için HVL değeri
%2 BN katkılı karbon fiber/epoksi kompozit	1.28 g/cm ³	6.86 cm	2.13 cm
%40 CMT katkılı PMMA	1.67 g/cm ³	5.02 cm [32]	2.80 cm [32]
Alüminyum	2.70 g/cm ³	3.46 cm [64]	7.80 cm [65]
Çelik	7.85 g/cm ³	1.18 cm [62]	4.90 cm [65]
Polietilen	0.92 g/cm ³	8.51 cm [61]	5.78 cm [66]
Beton	2.40 g/cm ³	4.13 cm [67]	8.15 cm [67]
Su	1.00 g/cm ³	8.04 cm [61]	5.40 cm [65]

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, değişen ağırlık oranlarında CNT ve BN nanopartikülleri ile birleştirilmiş karbon fiber/epoksi kompozitlerin gama ışını ve nötron radyasyonuna karşı etkinliğini göstermiştir. Karbon fiber/epoksi kompozit numune ve ağırlıkça, %0,5 CNT, %0,5 BN, %0,5 CNT + %0,5 BN, %1 CNT + %1 BN, ve %2 BN numunelerinden elde edilen sonuçlar, %2 BN numunesinin hem gama ışını hem de nötron radyasyonuna karşı en iyi zayıflatma özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Ağırlıkça %2 BN içeren karbon fiber/epoksi kompozit, deneysel sonuçlara göre Cs-137 gama ışını kaynağı için hesaplanan $0,101 \text{ cm}^{-1}$ lineer zayıflatma katsayısı (μ) ve $^{239}\text{Pu-Be}$ nötron kaynağı için hesaplanan $0,325 \text{ cm}^{-1}$ nötron zayıflatma kesiti (Σ) ile gama ışını ve nötron radyasyonunu etkili bir şekilde azaltmıştır. Bu hesaplamalara ve yarı değer katmanı (HVL) bulgularına dayanarak, 6,86 cm kalınlığındaki %2 BN numunesinin gelen gama ışınlarının yarısını önleyeceği ve aynı numunenin sadece 2,13 cm kalınlığının gelen termal nötronların yarısını durdurmak için yeterli olduğu söylenebilir. Alüminyum, çelik ve polietilen gibi şu anda uzay radyasyonuna karşı kalkan olarak kullanılan muadilleri ve malzemelerle karşılaştırıldığında, ağırlıkça %2 BN içeren karbon fiber/epoksi kompozit, gelişmiş mekanik özellikleri ve radyasyona karşı zırhlama verimliliği sayesinde uzay araçlarında kalkan olarak kullanabilecek farklı bir seçenektir. Öte yandan CNT radyasyon önleme özelliklerini düşük ölçüde azaltmasına rağmen malzemeye sağladığı gelişmiş mekanik özellikler sayesinde uzay uygulamalarında kolayca vazgeçilemeyecek bir nano malzemedir. Dolayısıyla CNT kullanılan zırhlama malzemelerinde CNT'den kaynaklı radyasyon zırhlama özelliklerindeki kötüleşme, 2 veya daha fazla radyasyona karşı etkili malzeme bileşeni ile desteklenerek azaltılabilir. Karbon fiber/epoksiye daha fazla BN eklenmesi, malzemenin radyasyona karşı etkinliğini kesinlikle artıracaktır; ancak, malzeme ağırlığında bir artışa ve mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açabilir, bu da malzemeyi uzay aracı kalkanı için uygunsuz hale getirebilir. Bu nedenle, çeşitli oranlarda BN içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin hem radyasyon kalkanı etkinliği hem de mekanik özellikler açısından araştırılması ve optimize edilmesi tavsiye edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Islam A. *Manufacturing engineering and mechanical properties of composite materials*. 2024. https://www.mdpi.com/journal/materials/topical_collections/Manufacturing_Composite.
2. Clyne TW, Hull D. *An introduction to composite materials*. Cambridge (UK): Cambridge University Press; 2019.
3. Campbell FC. *Structural composite materials*. Ohio (US): Asm International; 2010. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.scm.9781627083140>.
4. Chehroudi B. *Composite materials and their uses in cars*. 1999. <https://advtechconsultants.com/CompositeMaterial.htm>.
5. Khan AS, Azam MT, Khan M, Mian SA, Rehman IU. An update on glass fiber dental restorative composites: A systematic review. *Mater Sci Eng C*. 2015;47(1):26-39. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.015>.
6. Science Encyclopedia. *Composite Materials*. <https://science.jrank.org/pages/1668/Composite-Materials-Mechanical-properties.html>.
7. Abdel-Nasser YA, Elhewy AMH, Almallah I. Impact analysis of composite laminate using finite element method. *Ships Offshore Struct*. 2016;12(2):219-226. <https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1131005>.
8. Al-Waily M, Al-Shammari MA, Jweeg MJ. Analytical and numerical thermal buckling analysis investigation of unidirectional and woven reinforcement composite plate structural. *Int J Energy Environ Econ*. 2015;6(2):125-142. <https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.3.11>.
9. Kostopoulos V, Masouras A, Baltopoulos A, ve ark. A critical review of nanotechnologies for composite aerospace structures. *CEAS Space J*. 2017;9(1):35-57. <https://doi.org/10.1007/s12567-016-0123-7>.
10. Ekuase OA, Anjum N, Eze VO, Okoli OI. A review on the out-of-autoclave process for composite manufacturing. *J Compos Sci*. 2022;6:172. <https://doi.org/10.3390/jcs6060172>.

11. Cao D. *What is automated fiber placement (AFP) in composites manufacturing?*. 2022. <https://www.wevolver.com/article/what-is-automated-fiber-placement-afp-in-composites-manufacturing>.
12. Boisse P, editör. *Advances in composites manufacturing and process design*. Amsterdam (NL): Elsevier; 2015. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02644-5>.
13. Henjes C, Kügler H, Ley W, Magg M, Scharfenberg S. *The space environment*. İçinde: Ley W, Wittmann K, Hallmann W, editörler. *Handbook of space technology*. Chichester (UK): John Wiley & Sons; 2009.
14. Akarslan E, Hocaoğlu FO. Solar radiation modeling with adaptive approach. *Eur J Eng Nat Sci*. 2019;3(2):110-115. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejens/issue/49410/369782>.
15. Webster L, Vainchtein D, Artemyev A. Solar wind discontinuity interaction with the bow shock: Current density growth and dawn-dusk asymmetry. *Sol Phys*. 2021;296:87. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01824-2>.
16. Türk Katırcıoğlu F. A comprehensive study of the magnetosheath cavities [Doktora tezi]. İstanbul (TR): İstanbul Teknik Üniversitesi; 2010. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=zD1B0cW7zVr3VcnZjitVXk85076bahHDLG0Rv2MCWsMJ9EQukzz34OKJYA_iz2qh.
17. Cherenkov Telescope Array Observatory. *PeVatrons: The hunt for the origin of galactic cosmic rays with CTA*. 2020. <https://www.ctao.org/news/pevatrons-hunt-for-galactic-cosmic-rays/>.
18. Kurt A. Electrostatic double layers in earth's magnetosphere [Yüksek lisans tezi]. Çanakkale (TR): Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi; 2002. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=TJtEyl3GBWgytfBisjf717RQopBwohrkR3cAstxBi56vnpUiSdHj9B4RGSuhoc71>.
19. Lugaz N, Farrugia CJ, Huang CL, ve ark. Earth's magnetosphere and outer radiation belt under sub-Alfvénic solar wind. *Nat Commun*. 2016;7:13001. <https://doi.org/10.1038/ncomms13001>.
20. Kalafatoğlu EC. Upper atmospheric joule heating and magnetospheric substorms: A case study [Yüksek lisans tezi]. İstanbul (TR): İstanbul Teknik Üniversitesi; 2010. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=zqI_ZOq-b18GC2rT9c2JGvTk-o6rUTI-pXsgkyDlk_TvJLGydgnuMU9h8aK6g91Y.

21. Young LR, Sutton JP, editörler. *Handbook of bioastronautics*. Cham (CH): Springer; 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12191-8>.
22. Sellmaier F, Uhlig T, Schmidhuber M, editörler. *Spacecraft operations*. Cham (CH): Springer; 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88593-9>.
23. Ponomarev EA, Sedykh PA, Urbanovich VD. Bow shock as a power source for magnetospheric processes. *J Atmos Sol Terr Phys*. 2006;68(6):685-690. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.11.007>.
24. Volwerk M, Berchem J, Bogdanova YV, ve ark. Interplanetary magnetic field rotations followed from L1 to the ground: The response of the Earth's magnetosphere as seen by multi-spacecraft and ground-based observations. *Ann Geophys*. 2011;29(9):1549-1569. <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1549-2011>.
25. National Aeronautics and Space Administration. *Earth's magnetosphere*. 2011. <https://www.nasa.gov/image-article/earths-magnetosphere-3/>.
26. El-Hameed AMA. Radiation effects on composite materials used in space systems: A review. *NRIAG J Astron Geophys*. 2022;11(1):313-324. <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2079902>.
27. Kara M, Nomer AE, Kepir Y, Gunoz A, Avci A. Low-energy repeated impact response of nanoparticle reinforced carbon fiber epoxy composite pipes. *Compos Struct*. 2022;299:116100. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116100>.
28. Çetin ME, Baştosun Y, Tatar AC, ve ark. The effect of halloysite nanotube modification on wear behavior of carbon-aramid fiber reinforced hybrid nanocomposites. *Polym Compos*. 2022;43(1):624-637. <https://doi.org/10.1002/pc.26410>.
29. Özer M, Kaybal HB. Low-velocity impact response of halloysite nanotube reinforced glass/epoxy multi-scale composite. Part 1: Dynamic loading performance. *Polym Compos*. 2022;43(11):8377-8387. <https://doi.org/10.1002/pc.27008>.
30. Yılmaz S. Comprehensive analysis of 3D printed PA6.6 and fiber-reinforced variants: Revealing mechanical properties and adhesive wear behavior. *Polym Compos*. 2024;45(2):1446-1460. <https://doi.org/10.1002/pc.27865>.

31. Emmanuel A, Raghavan J. Influence of structure on radiation shielding effectiveness of graphite fiber reinforced polyethylene composite. *Adv Space Res.* 2015;56:1288-1296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.028>.
32. Bel T, Arslan C, Baydogan N. Radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate) / colemanite composite for the use in mixed irradiation fields of neutrons and gamma rays. *Mater Chem Phys.* 2019;221:58-67. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.014>.
33. Toyen D, Wimolmala E, Sombatsompop N, Markpin T, Saenboonruang K. Sm₂O₃/UHMWPE composites for radiation shielding applications: Mechanical and dielectric properties under gamma irradiation and thermal neutron shielding. *Radiat Phys Chem.* 2019;164:108366. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108366>.
34. Nurazila MZ, Hafizal Y, Harun MAM. Neutron attenuation and mechanical properties of polymer composites filled with boron carbide particles. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng.* 2020;785:012005. doi:10.1088/1757-899X/785/1/012005.
35. Özdemir T, Akbay İK, Uzun H, Reyhancan İA. Neutron shielding of EPDM rubber with boric acid: Mechanical, thermal properties and neutron absorption tests. *Prog Nucl Energy.* 2016;89:102-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.007>.
36. İrim ŞG, Wis AA, Keskin MA, ve ark. Physical, mechanical and neutron shielding properties of h-BN/Gd₂O₃/HDPE ternary nanocomposites. *Radiat Phys Chem.* 2018;144:434-443. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.10.007>.
37. Gaylan Y, Bozkurt A, Avar B. Investigating thermal and fast neutron shielding properties of B₄C-, B₂O₃-, Sm₂O₃-, and Gd₂O₃-doped polymer matrix composites using Monte Carlo simulations. *Süleyman Demirel Univ Fac Arts Sci J Sci.* 2021;16(2):490-499. <https://doi.org/10.29233/sdufeffd.933338>.
38. Liu B, Gu Y, Liu Y, Wang S, Li M. Space neutron radiation shielding property of continuous fiber and functional filler reinforced polymer composite using Monte Carlo simulation. *Compos Part A.* 2023;168:107483. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107483>.

39. Husain HS, Naji NAR, Mahmood BM. Investigation of gamma ray shielding by polymer composites. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng.* 2018;454:012131. doi:10.1088/1757-899X/454/1/012131.
40. Li R, Gu Y, Yang Z, ve ark. Gamma ray shielding property, shielding mechanism and predicting model of continuous basalt fiber reinforced polymer matrix composite containing functional filler. *Mater Des.* 2017;124:121-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.045>.
41. Akman F, Kaçal M, Almousa N, Sayyed M, Polat H. Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Prog Nucl Energy.* 2020;121:103257. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103257>.
42. Shahzad K, Kausar A, Manzoor S, ve ark. Views on radiation shielding efficiency of polymeric composites/nanocomposites and multi-layered materials: Current state and advancements. *Radiat.* 2023;3(1):1-20. <https://doi.org/10.3390/radiation3010001>.
43. Shen Z, Xia Y, Liu Y, Ding Y, Zhao C. Protection of materials from space radiation environments on spacecraft. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng.* 2019;585:012089. doi:10.1088/1757-899X/585/1/012089.
44. Toto E, Lambertini L, Laurenzi S, Santonicola MG. Recent advances and challenges in polymer-based materials for space radiation shielding. *Polym.* 2024;16(3):382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382>.
45. Medina DF. *Solar radiation and spacecraft shielding*. İçinde: Allahdadi F, Pelton J, editörler. Handbook of cosmic hazards and planetary defense. Cham (CH): Springer; 2014. p. 1-17. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02847-7_10-1.
46. Hatsuda M, Kawasaki H, Shigenaga A, ve ark. Effects of neutron radiation generated in deep space-like environments on food resources. *Sci Rep.* 2023;13:12479. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38990-1>.
47. Norbury JW, Schimmerling W, Slaba TC, ve ark. Galactic cosmic ray simulation at the NASA Space Radiation Laboratory. *Life Sci Space Res.* 2016;8:38-51. doi:10.1016/j.lssr.2016.02.001.
48. Clark A. *Radiation shielding techniques for human spaceflight*. California (US): Stanford University; 2015. <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/clark1/>.

49. Tripathi RK. *Meeting the grand challenge of protecting astronaut's health: Electrostatic active space radiation shielding for deep space missions*. Virginia (US): NASA Langley Research Center; 2011.
50. Ekrem M, Şahin ÖS, Karabulut SE, Avcı A. Thermal stability and adhesive strength of boron nitride nano platelets and carbon nano tube modified adhesives. *J Compos Mater*. 2018;52(11):1557-1565. <https://doi.org/10.1177/0021998317726147>.
51. Eskizeybek V, Avcı A, Gülce A. Preparation and mechanical properties of carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composites. *Adv Compos Mater*. 2017;26(2):169-180. <https://doi.org/10.1080/09243046.2015.1052188>.
52. Çetin ME. Investigation of carbon nanotube reinforcement to polyurethane adhesive for improving impact performance of carbon fiber composite sandwich panels. *Int J Adhes Adhes*. 2022;112:103002. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103002>.
53. Yao Z, Wang C, Wang Y, ve ark. Effect of CNTs deposition on carbon fiber followed by amination on the interfacial properties of epoxy composites. *Compos Struct*. 2022;292:115665. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115665>.
54. Raza R, Ali S, Ahmed F, Abbas SM. Radiation resistant metal decorated MWCNTs/PMMA nanocomposite films with enhanced thermomechanical properties. *Polym Compos*. 2015;36(5):969-978. <https://doi.org/10.1002/pc.23020>.
55. Çetin ME. The effect of carbon nanotubes modified polyurethane adhesive on the impact behavior of sandwich structures. *Polym Compos*. 2021;42(9):4353-4365. <https://doi.org/10.1002/pc.26153>.
56. Xu S, Wang X, Li Q. Research on the electromagnetic wave absorbing properties of carbon nanotube-fiber reinforced cementitious composite. *Compos Struct*. 2021;274:114377. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114377>.
57. Tinastepe MT, Kaybal HB, Ulus H, ve ark. Quasi-Static tensile loading performance of bonded, bolted, and hybrid bonded-bolted carbon-to-carbon composite joints: Effect of recycled polystyrene nanofiber interleaving. *Compos Struct*. 2023;323:117445. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117445>.

58. Okka MA. Experimental investigation and mathematical modeling of carbon nano tube and boron nitride nano particulated reinforced carbon / epoxy nanocomposites [Doktora tezi]. Konya (TR): Konya Teknik Üniversitesi; 2019. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=vjszP7PzV0HebcjFEvDf wNgLIgG69r_Dt7MG18MI7jTYoFxCPe3s6B6D9-q4XTSo.
59. Pires LF, Cássaro FAM, Tech L, Pereira LAA, Oliveira JAT. Gamma ray attenuation for determining soil density: Laboratory experiments for Environmental Physics and Engineering courses. *Rev Bras Ensino Fís.* 2020;42. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0340>.
60. More CV, Alsayed Z, Badawi MS, Thabet AA, Pawar PP. Polymeric composite materials for radiation shielding: A review. *Environ Chem Lett.* 2021;19:2057-2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>.
61. Biswas R, Sahadath H, Mollah AS, Huq MF. Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material: Polyboron. *J Radiat Res Appl Sci.* 2016;9:26-34. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>.
62. Berger M, Hubbell J, Seltzer S, Coursey J, Zucker D. *XCOM: Photon cross section database*. National Institute of Standards and Technology, Physical Measurement Laboratory, Radiation Physics Division: Maryland (US); 1999. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.
63. Thibeault SA, Fay CC, Lowther SE, ve ark. *Radiation shielding materials containing hydrogen, boron, and nitrogen: Systematic computational and experimental study - Phase I*. Virginia (US): National Institute of Aerospace; 2012.
64. Turgay ME, Aras B, Sezgin N, Şengül M. Shielding effect of aluminum against Cs-137 source, according to gamma ray transmission technique. *J Eng Appl Sci Technol.* 2022;7(2):109-113. doi:10.30931/jetas.1027422.
65. McAlister DR. *Neutron shielding materials*. Illinois (US): PG Research Foundation; 2016.
66. Barbagallo D, Bolduc B, Hassett B, ve ark. Neutron attenuation in polyethylene using an AmBe source. *J Undergrad Rep Phys.* 2020;30:100001. <https://doi.org/10.1063/10.0002041>.

67. Abdul-Majid S, Othman F. Neutron attenuation characteristics of polyethylene, polyvinyl chloride, and heavy aggregate concrete and mortars. *Health Phys.* 1994;66(3):327-338.

