



Derleme / Review Paper

Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Ali Murat SÜRÜCÜ^{1a*}, Serkan SUBAŞI^{1b}

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce/TÜRKİYE

Received/Geliş: 19.10.2020

Accepted/Kabul: 05.01.2021

Öz: Etrafa dikkatlice bakıldığında radyasyonun hayatın her anında var olan bir gerçek olduğu görülmektedir. Bilimdeki gelişmelere bağlı olarak radyasyon ışınlarının daha yaygın kullanımı neticesinde, insanoğlu radyasyona çok daha fazla maruz kalmaktadır. Radyasyon kaynaklarının kullanımında radyasyona maruz kalmaması dikkat edilmesi gereken hayati bir konudur. Bu amaçla radyasyondan korunmak için farklı teknikler geliştirilmiştir. Bu derlemede radyasyon ve radyasyondan korunma yöntemleri hakkında bilgi verilmekte ve kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan nano boyutlu malzemelerin radyasyon zırhlamaya olan katkısı sistematik olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama, nanomalzemeler, CNT, kompozit malzemeler, nanoteknoloji

Investigation of the Effects of Nanomaterials on Radiation Shielding Properties of Composite Materials

Abstract: A careful look around shows that radiation is a reality that exists in every moment of life. As a result of the widespread use of radiation rays due to developments in science, human beings are exposed to radiation much more. Avoiding exposure to radiation in the use of radiation sources is a vital issue to be considered. For this purpose, different techniques have been developed to protect from radiation. In this review, information about radiation and radiation protection methods is given and the contribution of nano-sized materials used in the production of composite materials to radiation shielding was systematically examined.

Keywords: Radiation shielding, nanomaterials, CNT, composite materials, nanotechnology

1.Giriş

Radyasyon, elektromanyetik dalga veya parçacık şeklindeki enerji yayımıdır. Elektromanyetik spektrum ise dalga boylarına göre atom altı değerlerden başlayıp (Gama ışını veya X-ışını) binlerce kilometre uzunlukta olabilecek radyo dalgalarına kadar birçok farklı ışınım türlerini içermektedir. Evrenin herhangi bir yerinde fizik kurallarınca mümkün olan tüm elektromanyetik radyasyon ve türevleri; dalga boyları ve frekanslarına göre elektromanyetik spektrumu oluşturmaktadır (Şekil 1). Radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan şeklinde iki gruba ayrılır [1]. İyonlaşma; atomlardan ve moleküllerden elektron koparılmasıdır. Enerji yüklü fotonlardan oluşan elektromanyetik dalgalar, çarptıkları cisimlerden elektron koparabilirler.

İyonlaştırıcı radyasyonun temelde beş çeşidi bulunmaktadır. Bunlar; alfa, beta parçacıkları, X ışınları, gama ışınları ve nötronlardır [3]. X ışınları 0,125-125 keV arasındaki enerji değerlerine sahiptir ve kaza veya herhangi bir olumsuz durumda elektrikle ilişkisi kesilerek oluşabilecek

Bu makaleye atıf yapmak için

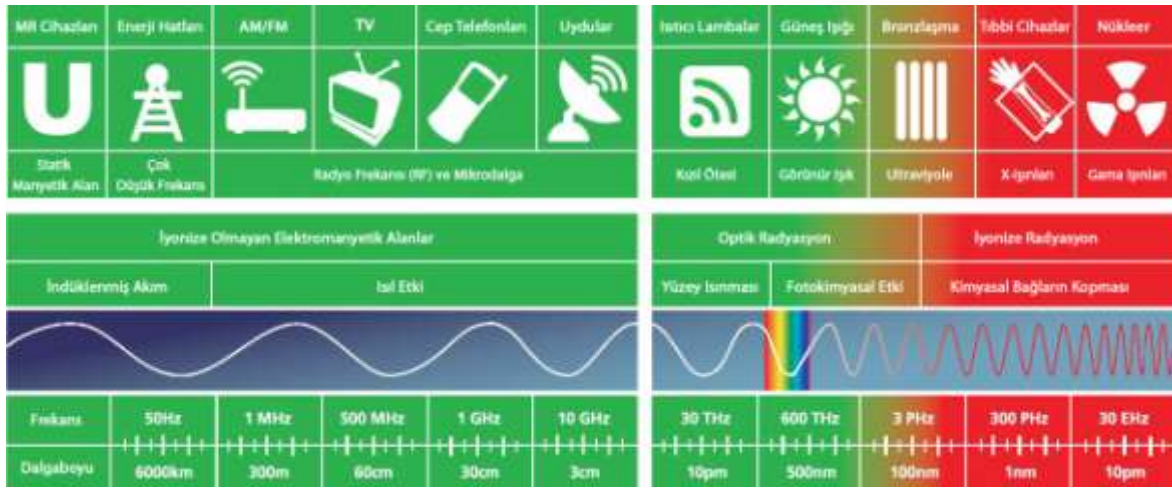
Sürücü A.M., Subaşı, S., "Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(1); 182-194.

How to cite this article

Sürücü A.M., Subaşı, S., "Investigation of the Effects of Nanomaterials on Radiation Shielding Properties of Composite Materials" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(1); 182-194.

ORCID ID: ^a0000-0002-0329-2091, ^b0000-0001-7826-1348

tehlikenin önlenmesi, bu konuda onu diğer radyasyon türlerine göre avantajlı hale getirmektedir [4].



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum [2]

Ancak gama ışınları 1 MeV'den daha büyük enerji değerlerinde oldukları ve X ışınları gibi müdahale edilemediği için gama radyasyonundan korunmak çok daha önemli hale gelmiştir. Gama ve X ışınları elektromanyetik dalga türleri olduklarından alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetlerinin çok daha fazla olduğu bilinmektedir [5].

İyonlaştırıcı radyasyonların canlıda oluşturduğu etkileri üç basamakta sıralamak mümkündür. İyonize radyasyon enerjisinin canlı dokuya nüfuzu sonucunda, dokuyu oluşturan atom ve moleküllerde meydana gelen iyonlaşma ve uyarılma, radyasyon etkisinin ilk basamağını oluşturur. İkinci basamakta ise hasar görmüş atom ve moleküller diğer hücre yapıları ile reaksiyona girerek serbest radikallerin ortaya çıkmasına neden olurlar. Organizmada radyasyonun etkisi ile oluşan bu tür moleküler değişiklikler, üçüncü basamakta çeşitli hasarlara yol açan enzimatik reaksiyonları meydana getirir. İyonize radyasyon, hücre içi moleküllerde ve daha önemlisi genetik materyal olan kromozomlarda hasarlar oluşturur. Mutasyon olarak bilinen bu genetik hasarlar hücre tarafından onarılamaz ise, hücreyi ölüme götüren süreci başlatan değişiklikler meydana gelir. İyonize radyasyonların kanser hastalıklarının tedavisinde kullanılmasının sebebi de budur [6]. İyonize radyasyonun birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Günümüzde tıbbi görüntüleme cihazlarından nükleer santrallere, güvenlik kontrol sistemlerinden kanserle savaş ve endüstriyel radyografi cihazlarına kadar birçok uygulamada radyasyon ışınlarından faydalanılmaktadır [7].

Radyasyonun geniş kullanım alanına karşın hayati öneme sahip zararlarından korunma konusunda radyasyondan korunmanın temelini oluşturan ALARA (As-Low-As-Reasonably Achievable) adı verilen prensip geliştirilmiştir. Bu prensibe göre radyasyondan korunmak için mümkün olan en düşük doza maruz kalmanın sağlanması gerekir. Radyasyon maruziyetinin azaltılabilmesi ise maruziyet süresinin düşük olması, radyasyon kaynağına olan mesafenin fazla olması ve kaynağın uygun malzeme ile zırhlaması esaslarına bağlıdır [8]. Radyasyon kaynağı ile kaynağın sebep olduğu doza maruz kalan kişiler arasına malzeme koyularak dozun etkisini yok etmeyi amaçlayan kurala zırhlama kuralı denir. Farklı radyasyon tipleri için kullanılacak malzemeler de farklıdır [9]. Radyoaktif kaynaktan saçılan alfa ışınlarını soğurmak için kâğıt parçası yeterliyken, gama ve nötron ışınlarını soğurmak için kurşun ve beton plakalar gereklidir (Şekil 2).

Radyasyon zırhlama malzemesinin tasarımında kullanılan malzemeler kurşun, tuğla, ağır agregalı beton ve çelik gibi geleneksel malzemelerdir. Ancak bu malzemelerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Radyasyon zırhlamada en verimli malzeme kurşundur (Pb). Fakat kurşunun toksik

etkisi nedeniyle zırhlama uygulamalarında kullanımını sağlık açısından bazı problemler ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 2. Farklı radyasyon türlerine göre zırhlama malzemeleri [10]

Öyle ki, 8 Haziran 2011 tarih ve 2011/65/EU sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi, bazı tehlikeli maddelerin elektrikli ve elektronik cihazlarda kullanımının sınırlandırılmasına ilişkin direktifi (RoHS) ile tüm elektrik endüstrisi ve birçok elektrikli ürünün içeriği etkilenmiş ve kurşunla birlikte bazı malzemelerin kullanımını belirlenen seviyelere göre kısıtlanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. RoHS tarafından belirlenen kullanımı kısıtlanmış maddelerin tolere edilen maksimum konsantrasyon değerleri [11]

Madde	Ppm (<)
Kurşun (Pb)	1000
Civa (Hg)	100
Kadmiyum (Cd)	100
Hekzavalent Krom	1000
Polibromlu Bifeniller (PBB)	1000
Polibromlu Difenil Eterler (PBDE)	1000

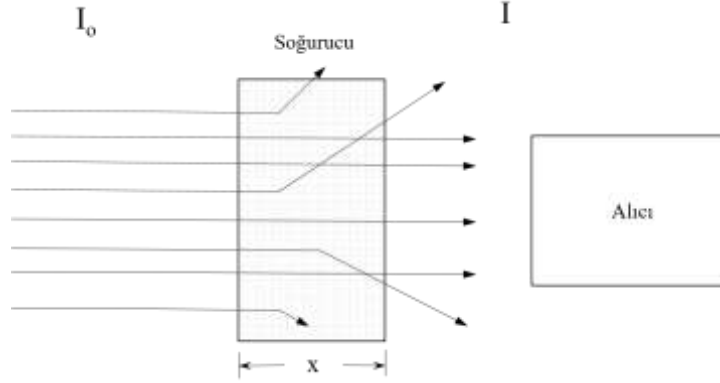
Zırhlama konusunda hafif, ekonomik, toksik etki göstermeyen ve yüksek zırhlama özelliğine sahip yapı oluşturma çalışmaları devam etmektedir. Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin bir araya gelerek üstün özellikli yeni malzeme oluşturma prensibine dayanmaktadır. En yaygın kullanılan çeşitleri polimer matrisli kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitlerde genellikle matris fazı olarak epoksi, polyester ve vinilester gibi reçineler ve takviye fazı olarak da cam, karbon ve aramid elyaflar kullanılmaktadır. Gösterdikleri üstün mekanik özellikler, korozyon direnci ve hafiflik gibi kabiliyetlerinden dolayı çok fazla tercih edilmektedir [12,13]. Kompozit malzemeleri önemli kılan diğer bir konu ise endüstri ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamalarıdır. Bu malzemelerin etkinliğini artırabilmek için imalatlarında çeşitli takviye ve dolgu malzemeleri eklenerek performanslarının artırılması hedeflenmektedir [14]. Bu nedenle kompozit malzemeler, radyasyon zırhlama konusunda araştırmacıların ilgisini çekmeyi başarmıştır.

Bir radyasyon ışınının madde ile etkileşimi sırasında ışınlar ya malzeme tarafından soğrulur ya da saçılırlar. Işınların bu tür etkileşimleri Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumu gibi mekanizmalarla gerçekleşir.

Zırhlama malzemesine gelen ışınların şiddetinde (sayısında) etkileşimden sonra azalma meydana gelir. Bu azalma Beer-Lambert metodu (1) ile hesaplanmaktadır:

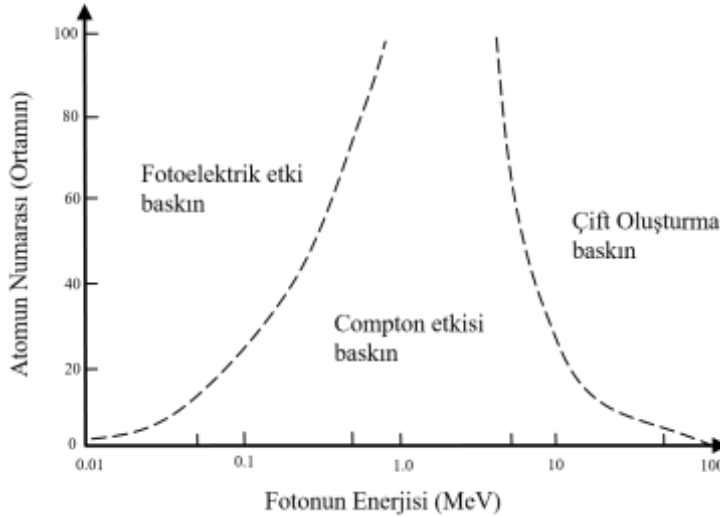
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Burada I_0 , gelen ışının şiddeti; I , zırlama maddesinden geçen ışının şiddeti; x , soğurma malzemesinin kalınlığı; μ ise lineer azalma katsayısıdır [15]. Soğurma ortamında birim uzunluk başına etkileşme olasılığı lineer azalma katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Bu üstel bağıntı bir ışın hüzmesinin tam olarak soğurulamayacağını ifade eder. Ancak üstel azalma veya soğurma, ışın hüzmesini algılanamayacak kadar düşük değerlere indirmek için kullanılabilir [16]. Soğurucu maddeye gönderilen radyasyon ışınlarının maddeyle etkileşimden sonraki davranışı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Azalma mekanizmaları ile ışın hüzmesinin değişimi [17]

Bir malzemenin iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonu (İEMR) zayıflatma yeteneği radyasyonun türüne ve enerjisine göre değişirken; zırlama malzemesinin ise etkin kesitine, yoğunluğuna, atom numarasına ve kristal yapısına bağlı olarak değişmektedir [8]. Bu veriler, araştırmacılara radyasyon zırlama çalışmalarına ışık tutan bazı grafikler sunmuştur. Bunlardan en önemlisi ışınların meydana geldiği enerji değeri için kullanılacak radyasyon zırlama malzemesinin seçimi konusunda araştırmacılara fikir veren baskın üç olay grafiğidir ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Radyasyon madde etkileşimindeki baskın üç olay

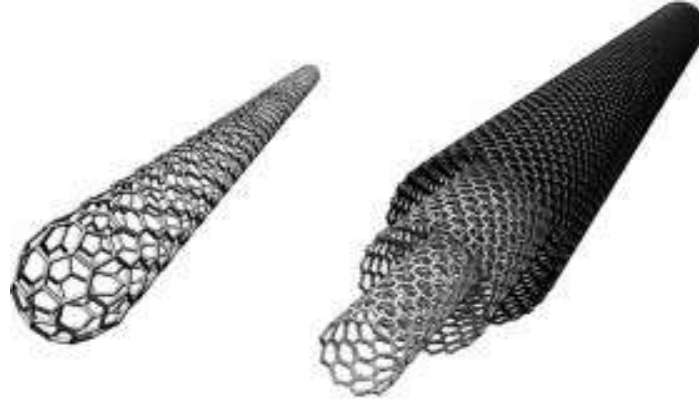
Şekil 4.'e göre düşük enerji değerlerinde Fotoelektrik etkinin, orta enerjilerde Compton saçılmasının ve yüksek enerjilerde de Çift Oluşturma etkisinin daha baskın olduğu görülmektedir [18].

2. Nanomalzemeler ve Radyasyon Zırhlama Çalışmaları

2.1. Nanomalzemeler

Nanoteknoloji, boyutları 1 ile 100 nm arasında olan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik davranışlarını araştıran ve kullanım alanlarıyla ilgilenen disiplinler arası bir alandır. Nanomalzemeler nanoteknolojinin temel taşlarını oluşturlar ve bu boyutta eşsiz optik, manyetik, mekanik ve elektriksel özellikler taşırlar. Nanoteknolojiyi bu kadar ilginç kılan unsur, malzemelerin bu boyutta makro dünyadan farklı davranmalarıdır. Makro boyuttan nano boyuta geçerken güç/ağırlık oranı, iletkenlik, optik ve manyetik özellikleri kayda değer biçimde değişmektedir [19]. Modern nanoteknoloji, 1965 Nobel Fizik Ödülü sahibi Richard Feynman tarafından ortaya atılmıştır. 1959 yılında Amerikan Fizik Derneği toplantısında, atom düzeyinde manipülasyon kavramını tanıttığı “Altta Çok Yer Var (There's Plenty of Room at the Bottom)” başlıklı bir konferans sunmuştur. Bu yeni fikir yeni düşünme yollarını ortaya çıkarmış ve Feynman'ın hipotezleri o zamandan beri kanıtlanmıştır. Bu nedenlerden dolayı Richard Feynman modern nanoteknolojinin babası olarak kabul edilmiştir [20].

Alüminyum oksit, selüloz, kobalt oksit, bakır, altın, gümüş, titanyum dioksit, kuantum noktaları ve lipidler nanopartiküler halde endüstride gittikçe yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Nanoteknoloji bilimi, başka bir Japon bilim adamı olan Iijima'nın 1991 yılında karbon nanotüpleri (CNT) geliştirdiğinde daha da ileriye götürülmüştür. Karbon nanotüpler; grafen tüp şeklinde ve sadece karbon atomu içeren allotroplardır. Çapları 1-2 nm boyutlarında iken boyları mikron seviyelerinde olabilmektedir. Çok basit bir yapı gibi görünmesine rağmen oldukça karmaşık bir nanomalzeme olan karbon nanotüpler, uzunluk, çap ve çeşitlerine göre katıldıkları malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini şaşırtıcı şekilde değiştirebilmektedir. Karbon nanotüpler tek duvarlı (Single Wall Carbon Nanotube-SWCNT) ve çok duvarlı (Multi Wall Carbon Nanotube-MWCNT) olmak üzere Şekil 5'te gösterildiği gibi ikiye ayrılırlar [21].



Şekil 5. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler [22]

2.2. Literatürde Nanomalzemelerin kullanıldığı Bazı Radyasyon Zırhlama Çalışmaları

Pastöre ve Ark. [23] CNT (karbon nanotüp) dolgulu kompozitlerin x ışını zayıflatma özelliklerini inceledikleri bir çalışmada; %0, %0.2, %1, %2 oranlarında SWCNT(0.5 nm çap ve 1.6 µm uzunluk), %50 Grafit tozu (<20 µm) ve %50 Grafit tozu + %10 Kadmiyum Sülfür (CdS) içeren epoksi (EPOC 828) bağlayıcı kompozit numuneler üretilmişlerdir. 20 mm çapında ve 2 mm kalınlığında hazırlanan kompozit numunelerde reçine ve dolgu malzemeleri 30 dk boyunca 1500 rpm değerinde karıştırılmış ardından 6 saat vakumla gaz giderme işlemi uygulandıktan sonra %0.25 oranında amin bazlı sertleştirici ile manuel karıştırılarak oda sıcaklığında 24 saati geçmemek koşuluyla sertleşmeye bırakılmıştır. Farklı oranlarda SWCNT-Epoksi bileşimiyle Tablo 2'de

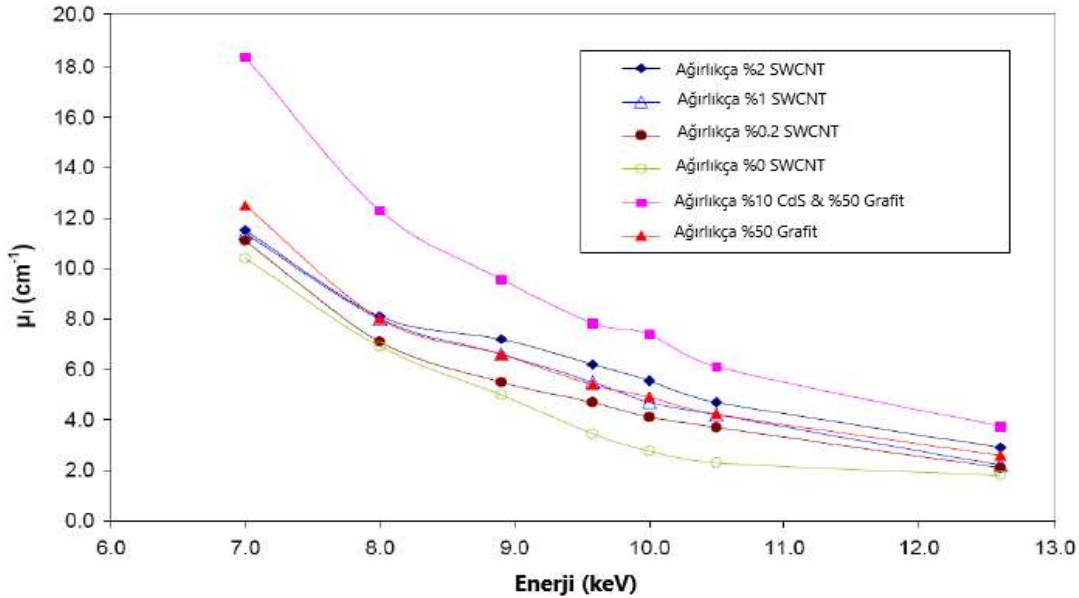
gösterilen numuneleri üretmişler ve 30 keV'a kadar (10-20-30 keV) olan enerji değerlerinde ölçümler yapmışlardır.

Yapılan ölçümler sonucunda araştırmacılar, CNT bazlı polimer matrisli kompozitlerin çok ilginç X-ışını koruma özelliklerine sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. CNT'lerin zırhlama konusunda bilinen diğer malzemelere göre kıyaslandığında etkileyici performans göstermemesine rağmen ağırlıkça % birkaç SWCNT içeren kompozitlerin %50 grafit bazlı kompozit numunesi ile aynı sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Kompozitlerin lineer zayıflatma katsayılarının gösterildiği Şekil 6'ya göre en iyi performansı diğer kompozitlere göre daha yüksek yoğunluk değerine sahip olan (1.48 g/cm^3) %10 CdS + %50 Grafit içeren numune göstermesine rağmen (yoğunluk avantajından dolayı); kütle zayıflatma katsayıları ağırlıkça %2 SWCNT içeren kompozit numunesi ile hemen hemen aynı değerleri göstermektedir.

Tablo 2. Üretilen kompozitlerin bileşim oranları.

Matris Fazı	Dolgu Malzemesi
Epoksi (EPOC 828)	% 0 SWCNT
	% 0.2 SWCNT
	%1 SWCNT
	%2 SWCNT
	%50 Grafit Tozu (<20 μm)
	%50 Grafit Tozu + %10 Kadmiyum Sülfür

Bu sebeple CNT ihtiva eden kompozitlerin özellikle mekanik dayanım ve hafiflik avantajlarından dolayı gerekli karakterizasyon ve optimizasyon sürecinden sonra kullanılabileceği önerilmiştir.



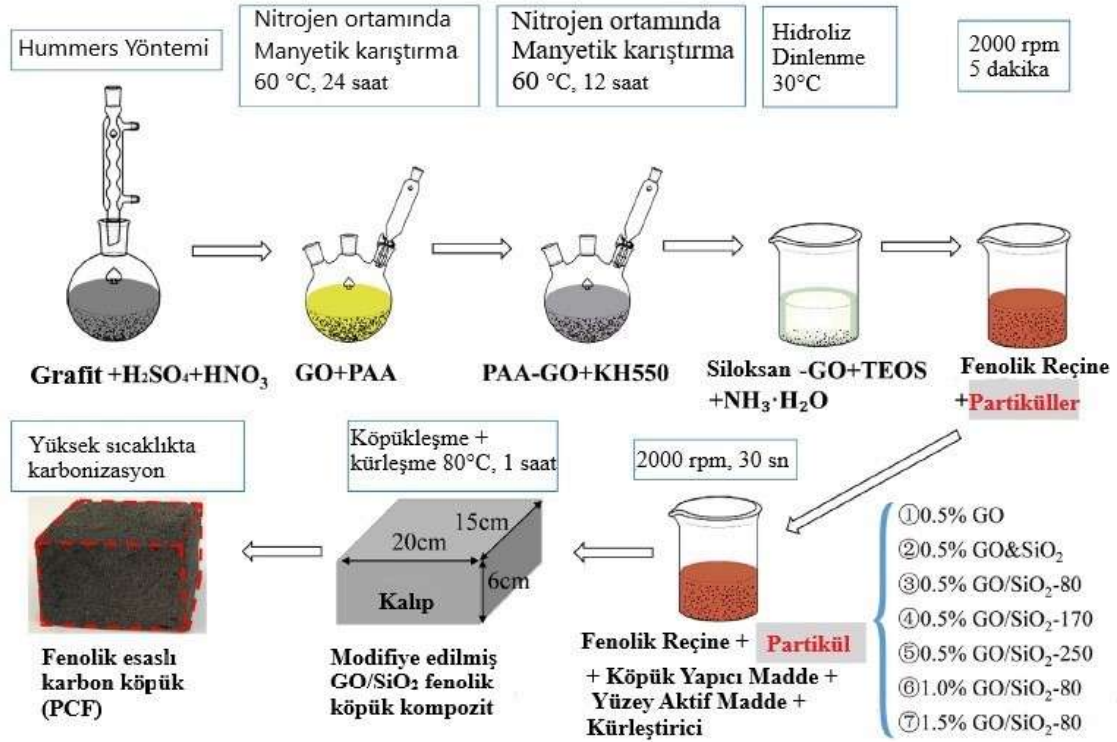
Şekil 6. Farklı karbon bazlı epoksi kompozit numunelerin X-ışını doğrusal zayıflatma katsayısı.

Zeng ve ark. [24] fenolik bazlı karbon köpük (PCF) numunelerin X-bant aralığında (8-12 GHz) elektromanyetik radyasyona karşı zırhlama performanslarını inceledikleri araştırmalarında öncelikle GO (grafen oksit)/SiO₂ hibrid nanomalzemeleri üretmişlerdir. Hibrid nanomalzemelerin üretimi dört aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Hummers yöntemiyle grafit taneciklerden grafen oksit eldesi,
- Grafen okside karboksil grubu eklemek için poliakrilik asit (PAA) ile reaksiyona sokulması,
- Siloksan aşıllı grafen eldesi için silan bağlama maddesi (KH550) ilave edilmesi ve
- Hidroliz polikondenzasyon reaksiyonu ile hibrid GO/SiO₂ nanomalzemesinin elde edilmesi.

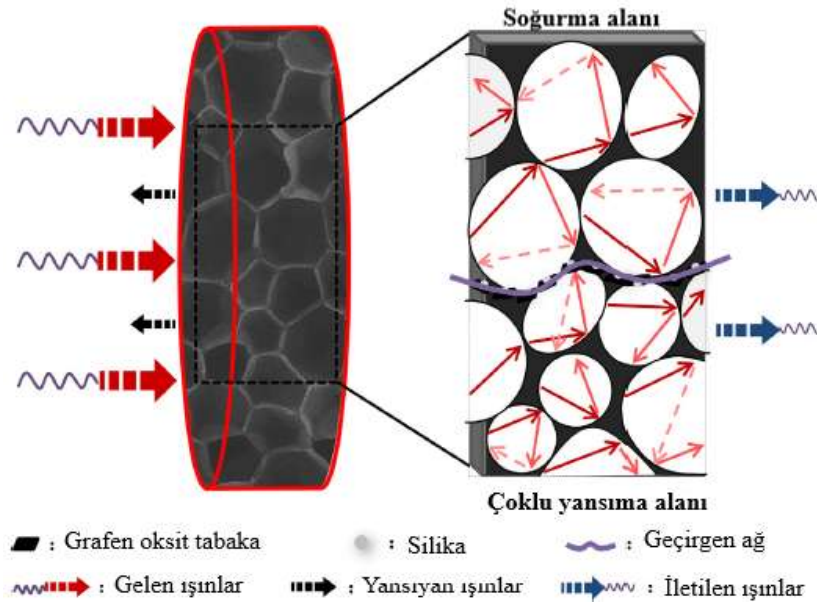
Hummers yöntemiyle grafen oksit eldesinden fenolik esaslı karbon köpüklerin üretimine kadar gerçekleşen üretim süreci Şekil 7’de gösterilmiştir.

Fenolik reçine matrisine farklı tip ve miktarlarda takviye ve dolgu malzemeleri eklenerek 2000 rpm’de 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra dimetil silikon yağı (1 gr), tween-80 (polisorbat, 1 gr), fenol sülfonik asit (kürleştirici madde, 7 gr) ve n-Pentan (üfleme ajanı, 4 gr) 2000 rpm hızda 30 saniye boyunca karıştırılarak karışıma ilave edilmiştir.



Şekil 7. GO/SiO₂ sentezinin deneysel süreci ve karbon köpük kompozitlerinin hazırlanması

Karışım hızla kalıba dökülerek 80°C altında 1 saat köpürtülmüştür ve nihai ürünlerin eldesi için dakikada 5°C artışla 20 dakika boyunca 300°C’ye ve dakikada 2°C’lik artışla 2 saat boyunca 500°C’ye ısıtma prosedürü uygulanmıştır. Üretilen karbon köpüğün gözenekli yapısının, Şekil 8’de gösterildiği gibi elektromanyetik dalgaların çoklu yansımalarını ve çoklu soğurmalarını büyük ölçüde artıran bir takım arayüz oluşturduğu belirtilmiştir.



Şekil 8. Fenolik esaslı karbon köpüklerde gelen dalganın tasviri

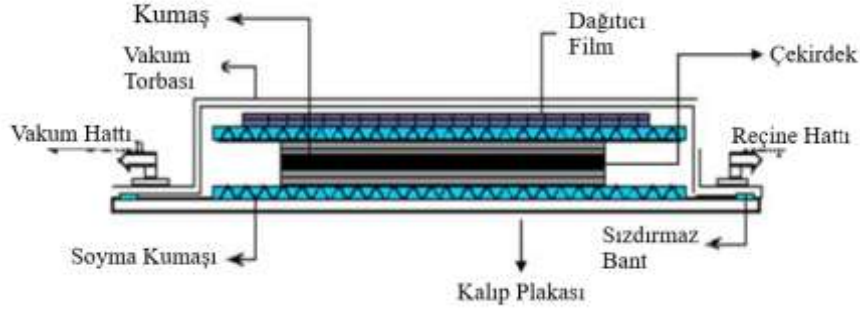
Yapılan çalışmada hibrid nanomalzemelerin eklenmesinin hücre yapısını önemli ölçüde geliştirdiği, hücre-matris arayüzünün hücre yoğunluğunun artmasıyla arttığı, gelen elektromanyetik dalganın girişiyle matriste ara yansımanın meydana geldiği ve bunun da yansıyan ışınların etkisini azalttığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, 80 nm, 170 nm ve 250 nm olmak üzere üç farklı partikül boyutlarındaki GO/SiO₂ hibrid nanomalzemelerini içeren ağırlıkça %0.5, %1 ve %1.5 oranlarındaki PCF kompozitlerinin EMI (elektromanyetik girişim) koruma özellikleri, belirli bir köpük kalınlığındaki nanopartikül içeriğinin artmasıyla EMI SE değerinin arttığını göstermişlerdir. SEM sonuçlarına göre ağırlıkça %1 GO/SiO₂-80 içeren PCF'nin faydalı mikro yapı, küçük hücre çapı ve dar yayılma aralığı gösterdiğini ve bunun da verimli iletken ağlar oluşturmaya yardımcı olduğunu açıklamışlardır. Yalnızca, ağırlıkça % 1.5 GO/SiO₂ ile modifiye edilmiş karbon köpüğün ~50 dB'ye kadar EMI SE (elektromanyetik kalkan etkinliği) değerine sahip olduğuna dikkat çekmişler ve bunun; matris ile arayüzü artırarak üç boyutlu yapıya sahip GO/SiO₂'nin %99'dan fazla elektromanyetik radyasyon dalgalarını koruyabileceğini ortaya koymuşlardır.

Galehdari ve ark. [25] uzay uygulamalarında yapısal mukavemet ile güneş enerjili parçacık (SEP) ve galaktik kozmik radyasyondan (GCR) koruma sağlayan hibrid sandviç panel ürettikleri çalışmalarında partikül olarak Bor Nano tozu (%99,5 B, 500 nm), Bor Karbür (0,7 mikron) ve Gadolinyum nanoparçacıkları (700 nm) kullanmışlardır. Dolgusuz epoksi reçinesi ve üç farklı partikül içeren toplam 4 çekirdek plakası; 304,8x304,8 mm boyutlarındaki kalıba basit şekilde dökülerek elde edilmiştir. Çekirdek malzemelerinin bileşim oranları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çekirdek Tabakası Bileşimi

Çekirdek Tabakası	Reçine/Sertleştirici (Karışım oranı)	Partikül	Partikül Miktarı (Ağ. %)
1	EPON 862/ Epikure W(1/0.264)	-----	-----
2	EPON 862/ Epikure W(1/0.264)	Bor Nano Toz	3%
3	EPON 862/ Epikure W(1/0.264)	Bor Karbür	3%
4	EPON 862/ Epikure W(1/0.264)	Gadolinyum Nanopartikül	3%

Sandviç panel imalatında yüksek hacimli yapıların üretimi için uygun maliyetli bir yöntem olan ısı-vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (H-VARTM) tercih edilmiş ve deney düzeneğinin kurulum şeması Şekil 9'da gösterilmiştir. Panellerin üretiminde takviye malzemesi olarak gelişmiş mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan düz dokunmuş ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kumaşlar kullanılmıştır.

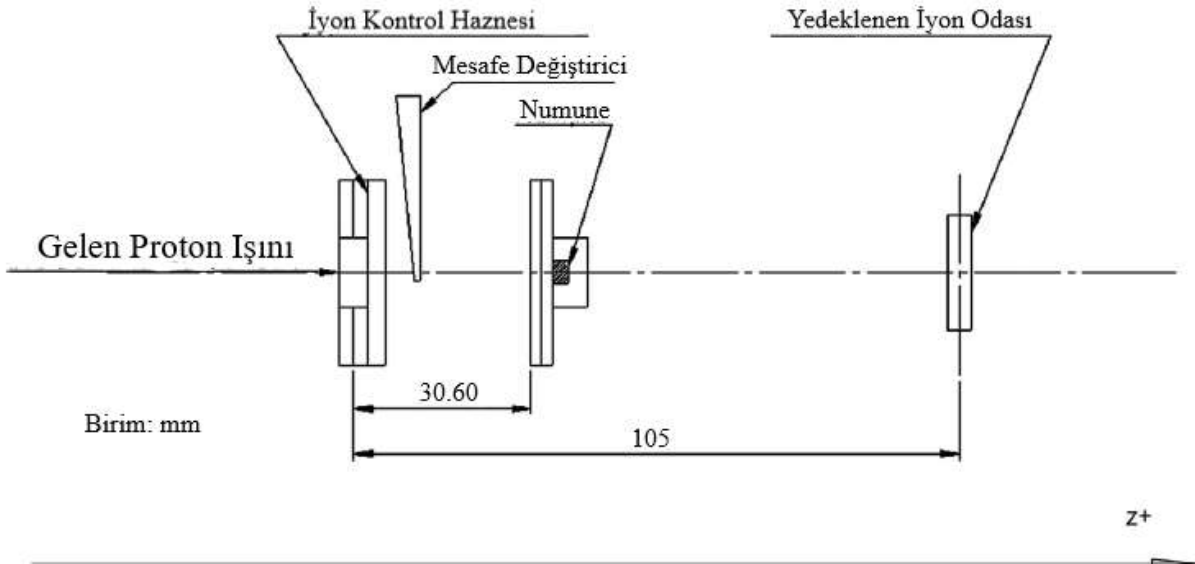


Şekil 9. H-VARTM düzeneği kurulum şeması

Üretilen sandviç paneller üzerinde yapılan nötron radyasyon zırlama deneylerinin sonuçlarına göre tüm imal edilmiş sandviç panellerin %99'dan fazla zırlama performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Li ve ark. [26] yaptıkları çalışmada polidimetil siloksan (PDMS) içerisine disperse edilmiş SWCNT kompozitlerinin (PDMS/SWCNT) proton radyasyonlarına karşı performanslarını inceleyerek saf PDMS ve Alüminyum ile karşılaştırmışlardır.

PDMS/SWCNT kompozit numunesi, nanomalzemenin (SWCNT, $\approx 1-2$ nm) PDMS içerisine UP200s ultrasonik homojenizatör yardımıyla ağırlıkça %1.12 oranında SWCNT dağıtılmış ve 80°C ' de kür edilerek üretilmiştir. Üretilen malzemelerin Şekil 10'da gösterilen deney düzeneğinde, 63 ve 105 MeV enerji değerlerinde ayrı ayrı radyasyon zırlama testleri yapılmıştır.



Şekil 10. Proton radyasyonu altında durdurma test ölçümleri için deney düzeneğinin gösterimi

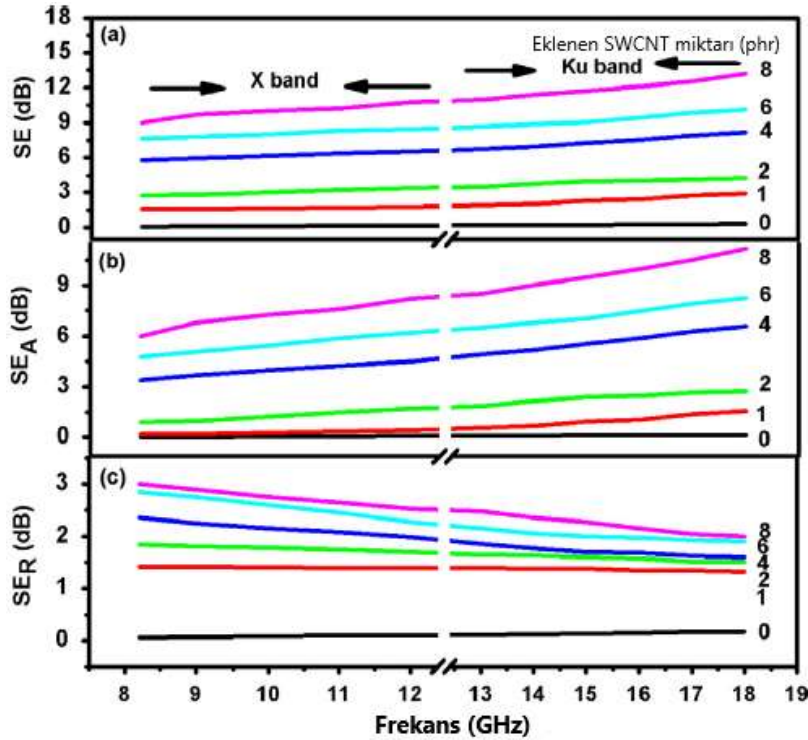
Yapılan test sonuçlarına göre SWCNT'lerin PDMS matrisinin proton zırlama yeteneğini geliştirdiği ve üretilen kompozitin 53.53 MeV'den yüksek enerjilerde PDMS'e kıyasla ağırlık avantajı gösterdiği belirtilmiştir. 105 MeV'de ise PDMS/SWCNT kompoziti saf PDMS ve Alüminyumdan sırasıyla %3.11 ve %20.91 daha hafif bulunmuştur.

Tablo 4. Kullanılan kompozitlerin formülasyonları

Kompozitler	Bütül Kauçuk (phr)	Çinko oksit	Stearik Asit	Tetrametil tiuramdisülfid	Sülfür	SWCNT
BR	100	5	3	1	0.5	0
BR-1SWCNT	100	5	3	1	0.5	1
BR-2SWCNT	100	5	3	1	0.5	2
BR-4SWCNT	100	5	3	1	0.5	4
BR-6SWCNT	100	5	3	1	0.5	6
BR-8SWCNT	100	5	3	1	0.5	8

Joseph ve ark. [27] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise Bütül Kauçuk (BR)-SWCNT kompozitlerin X ve Ku bandı (8.2-12.4 GHz ve 12.4-18 GHz) frekans aralığında İEMR zırhlama özellikleri araştırılmıştır. BR-SWCNT kompozitlerinin hazırlanması için öncelikle matris malzemesi hazırlanmıştır. Ağırlıkça %2 BR, tolüen içerisinde çözündürülmüş, daha sonra aktivatörler (çinko oksit ve stearik asit), hızlandırıcı (tetrametil tiuramdisülfid) ve vulkanizasyon edici ajanın (sülfür) ilave edilerek 30 dk boyunca karıştırılmasıyla matris malzemesi hazır hale getirilmiştir. SWCNT ise tolüen içerisinde 30 dk boyunca karıştırılarak karışıma ilave edilmiştir. Nihai karışım 60 dakika boyunca karıştırılmış ve vakumlu fırında 12 saat kurumaya bırakılmıştır. Elde edilen malzeme 200°C’ de 2 MPa’lık basınç altında 90 dakika süreyle 1 mm kalınlığında sıcak preslenmiştir. Üretilen kompozitlerin formülasyonları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Numuneler X bandı (8.2-12.4 GHz) için 22.86 x 10.88 mm ve Ku bandı (12.4-18 GHz) için ise 15.80 x 7.90 mm boyutlarında olacak şekilde hazırlanmıştır ve belirtilen band aralıklarında zırhlama testleri yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. (a) Toplam EMI kalkanı etkinliği (SE), (b) soğurma kalkanı etkinliği (SE_A) ve (c) BR-SWCNT kompozitlerinin X ve Ku bant frekans aralığı (8.2-18 GHz) üzerinde yansım kalkanı etkinliği (SE_R) değişimi

Deney sonuçlarına göre BR matrisine SWCNT eklenmesi malzemenin zırhlama özelliklerini geliştirmiştir. Ölçüm alınan frekans aralıklarında (8.2-18 GHz) BR-8SWCNT kompozit için 9-13 dB aralığında radyasyondan korunma etkinliği elde edilmiştir.

Ayrıca 15 GHz frekansta iki farklı kalınlık değerinde (1 mm ve 2 mm) BR-8SWCNT kompozitin SE , SE_A ve SE_R varyasyonu analiz edilmiş; 1 mm kalınlığındaki kompozitin SE , SE_A ve SE_R değerlerinin, kalınlığın 2 mm'ye artışıyla sırasıyla 18, 14.5 ve 3.5 dB'ye yükseldiği bulunmuştur.

3. Sonuçlar

Son yıllarda endüstride oldukça popüler hale gelen kompozit malzemeler birçok sektörde geleneksel malzemelerin yerini almaya başlamıştır. Nanoteknolojideki gelişmelere paralel olarak nanomalzemelerin kompozit yapılarda takviye fazı olarak kullanımını da birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu incelemede radyasyon zırhlamada kullanılan nano-takviyeli kompozit malzemeler farklı radyasyon tip, enerji, frekans ve test yöntemlerinde incelenmiştir. Özellikle insan hayatı için önemli olan iyonize radyasyon kaynaklarının bulunduğu veya maruz kalınabilecek yerler için kullanılacak zırhlama malzemesinin tasarımında öncelikle dikkat edilmesi gereken parametreler malzemenin yüksek yoğunluğu, insan ve çevreye zararsız oluşu, boşluksuz ve hafif yapıya sahip olmasıdır.

Bu makalede, nanomalzemelerle takviye edilmiş kompozit malzemelerin radyasyon soğurma performanslarıyla ilgili yapılan bazı çalışmalar incelenmiş ve sonuç olarak;

- Epoksi matrise eklenen %0.2, %1, %2 SWCNT ile %50 Grafit tozlu örneklerle yapılan çalışmada ağır grafit tozlu numunelerin zırhlama performansının, çok düşük oranlarda katılan SWCNT ile elde edilebildiğini,
- Fenolik matrise üç farklı boyut ve %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında GO/SiO₂ hibrid nanopartikül eklenerek üretilen kompozit köpüklerin testlerinde; sabit köpük kalınlığındaki nanopartikül ilavesinin artmasıyla zırhlama performansının arttığı ve %1.5 GO/SiO₂ köpüğünün yaklaşık 50 dB'e kadar (10GHz) %99 zırhlama performansı gösterdiği;
- Nano bor (500 nm), bor karbür (700 nm) ve gadolinyum nanopartikül (700 nm) içeren yaklaşık 19 mm kalınlığındaki epoksi matrisli hibrid panellerin nötron radyasyonlarına karşı zırhlama veriminin %99 olarak belirlendiği,
- Polidimetil siloksan içerisine katılan SWCNT kompozitlerin proton radyasyonlarına karşı performanslarının; saf PDMS ve alüminyum örnekleriyle kıyaslandığı ve 105 MeV enerji değerinde sırasıyla %3.11 ve %20.91 oranlarında ağırlık avantajı sağladığı,
- X ve Ku bant (8.2-18 GHz) aralığında bütül kauçuk-SWCNT (%0-%8) kompozitlerinin zırhlama özelliklerinin incelendiği ve %8 SWCNT takviyeli kompozitin 9-12 GHz aralığında etkin bir zırhlama özelliği gösterdiği belirlenmiştir.

Elde edilen veriler ışığında nanomateriyallerin eklenmesiyle malzemelerin iyonize radyasyonları zırhlama özelliklerini iyileştirdiği söylenebilmektedir.

Ancak nanomalzeme takviyesindeki oransal artışın zırhlama performansını arttırdığına dair kesin bir çıkarım yapılamamaktadır. Toplam zırhlama etkinliğinin ise nanoboyutlu malzemelerle takviye edilen kompozit örneklerinin kalınlıklarının artmasıyla arttığı görülmektedir.

Kompozit yapıdaki takviye malzemelerinin boyutları nanometrik ölçeğe yaklaştığında madde-radyasyon etkileşiminde geleneksel dalga emme mekanizmasının daha verimli gerçekleştiği görülmektedir. Radyasyon zırhlama etkinliğinin yanında hafiflik ve mekanik özelliklerinden dolayı nanomalzemelerin konuya katkısının göz önüne alınması önerilmiştir. Umut vadeden sonuçlar, zırhlama uygulamalarında nanomalzeme kullanımının gelişime açık bir konu olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

- [1]. Radyasyon, (2020), Erişim Adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Radyasyon>.
- [2]. Karaca E., (2019), “Radyasyon Nedir? Zararları ve Korunma Yolları Nelerdir?”, Erişim Adresi: <https://bilgihanem.com>
- [3]. Knoll G.F., “Radiation Detection and Measurement”, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, (1979).
- [4]. Gündüz E., “Modern Fiziğe Giriş”, Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova, İzmir, (1989).
- [5]. Meriç, N., “An approach for obtaining the intensity of the radiation transmitted through a scatterer”, Czech J Phys, 2005, 55: 1025–1038.
- [6]. Coşkun, Ö., “İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri”, SDU Teknik Bilimler Dergisi, 2011, 1 (2): 13-17.
- [7]. Radyasyon ‘Radyasyon ve Biz’, (2020), Erişim adresi: <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/r06.htm>
- [8]. Belgin, E.E., “Elektromanyetik Radyasyon Zırhlama Uygulamaları İçin Farklı Metal Tuz Takviyeli Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).
- [9]. Binici, H., Küçükönder, A., Sevinç, A. H., Eken, M., Kara, M., “Hafif ve Ağır Malzemelerin Isı, Ses ve Radyasyon Yalıtım Özelliklerinin Araştırılması”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013, 28(2): 113-123.
- [10]. Işınmıdan (Radyasyondan) Korunma, (2017), Erişim adresi: <http://www.nukleer.web.tr/>
- [11]. “On The Restriction Of The Use Of Certain Hazardous Substances In Electrical And Electronic Equipment”, (2011, 8 June), 2011/65/EU, Erişim Adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content-EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=en>
- [12]. Imak, A., Solmaz, M.Y., Topkaya, T., “Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2016, 3(3): 448-458.
- [13]. Çakır M., Berberoğlu B., “E-Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Elyaf Oranındaki Artış İle Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5(3):734-740.
- [14]. İlhan, R., Feyzulloğlu, E., “Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf ve Dolgu Maddeleri”, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2019, 6(1): 355-381.
- [15]. Kaçar, A., “Yapılarda Radyasyon Kalkanı Olarak Kullanılan Barit Agregalı Ağır Beton Elemanların Zırh Kalınlık Hesaplarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [16]. Erdem M., Baykara O., Doğru M., Kuluöztürk F., “A novel shielding material prepared from solide waste containing lead for gamma ray”, Radiation Physics and Chemistry, 2010, Vol. 79:917-922.
- [17]. James, E. M., “Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği”, çev. A.Güneş Tanır, Mustafa Hicabi Bölükdemir, Kemal Koç, Palme Yayıncılık, Ankara, (2013).
- [18]. Gülbiçim H., “Saf Ve Bor Katkılı Vermikülit’in Gama Radyasyon Geçirgenliğinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [19]. Nanomalzemeler, (2019), Erişim adresi: <https://nanoteknoloji.org/nanomalzemeler/>.
- [20]. Hulla, J. E., Sahu S. C., Hayes A. W., “Nanotechnology: History and future,” Human and Experimental Toxicology, 2015, vol. 34(12):1318–1321.
- [21]. Iijima, S., “Helical microtubules of graphitic carbon.”, Nature, 1991, 354: 56–58.
- [22]. Dumas, L., Bonnaud, L., Dubois, P., “Polybenzoxazine Nanocomposites: Case Study of Carbon Nanotubes,” Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology, Elsevier Inc., (2017).
- [23]. Pastore, R., Micheli, D., Marchetti, M., Angelini, E., X-Ray Attenuation Properties of Carbon Nanotubes Filled Composite Materials, 3rd. IEEE International Workshop on Metrology for

Aerospace, June 22-23, 2016, Florence, Italy.

- [24]. Zeng Y., Luo, X., Yu, K., Qian K., “EMI shielding performance of phenolic-based carbon foam modified with GO/SiO₂ hybrid nanomaterials”, *Chemical Physics Letters*, 2019, 715: 166–172.
- [25]. Galehdari, G.A., Mani, V., Kelkar A.D., “Fabrication of Nanoengineered Radiation Shielding Multifunctional Polymeric Sandwich Composites.”, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2016, 10(3):316-319.
- [26]. Li, Z., Nambiar, S., Zheng, W., Yeow, J.T.W., "PDMS/single-walled carbon nanotube composite for proton radiation shielding in space applications", *Materials Letters*, 2013, 108:79–83.
- [27]. Joseph, N., Janardhanan, C., Sebastian, M. T., “Electromagnetic interference shielding properties of butyl rubber-single walled carbon nanotube composites”, *Composites Science and Technology*, 2014, vol. 101:139–144.