

Biyopolimerlerin Radyasyon Zırhlamadaki Rolü

Mustafa Ersin Pekdemir¹

Serpil Yalçın Kuzu²

Sibel Selçuk Pekdemir³

Özet

Biyopolimerler, sürdürülebilirlik, düşük toksisite, yüksek hidrojen içeriği ve hafiflik gibi üstün nitelikleri sayesinde geleneksel ağır metal bazlı radyasyon kalkanlarının yerini alabilecek güçlü alternatif malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel kurşun esaslı zırh sistemleri yüksek foton soğurma verimliliği sunsa da toksisite, ağırlık ve işlenebilirlik açısından önemli sınırlamalara sahiptir. Buna karşılık selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler, hızlı nötronların elastik saçılma yoluyla moderasyonu için gerekli olan hidrojen açısından zengin yapıları sayesinde nötron zırhlamada yüksek bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, foton zayıflatma performansını artırmak amacıyla bu matrislerin Bi_2O_3 , PbO_2 , WO_3 , Fe_3O_4 , ZnO veya CdO gibi yüksek atom numaralı dolgu maddeleriyle güçlendirilmesi, hibrit kompozitlerin hem gama hem de nötron radyasyonunu sönmülmesini mümkün kılmaktadır. Son yıllarda Monte Carlo tabanlı simülasyonlar ve deneysel çalışmalar, bu hibrit biyopolimer kompozitlerinin kütle zayıflatma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) bakımından ticari kurşunsuz epoksi-bismut kompozitlerine yaklaşıldığını, hatta bazı durumlarda üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Eklenebilir imalat ve nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, biyopolimerlerin çok katmanlı, esnek ve çok işlevli kalkan sistemlerine dönüştürülmesini kolaylaştırmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde biyopolimer tabanlı kompozitler, modern tıp, nükleer enerji, uzay teknolojileri ve kişisel koruyucu ekipmanlar için çevre dostu, hafif ve yüksek performanslı bir radyasyon zırhlama yaklaşımı sunmaktadır.

- 1 Doç.Dr., Polimer ve Biyomalzeme Araştırma Laboratuvarı, Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, epekdemir@firat.edu.tr, 0000-0002-4979-1777
- 2 Doç. Dr., Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, skuzu@firat.edu.tr, 0000-0001-8905-8089
- 3 Dr., Polimer ve Biyomalzeme Araştırma Laboratuvarı, Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, sspekdemir@firat.edu.tr, 0000-0002-8643-7590

1. Giriş

Radyasyon, tıbbi görüntüleme ve tedavi uygulamaları, nükleer enerji üretimi, endüstriyel radyografi ve uzay ortamı gibi çok geniş bir yelpazede insan faaliyetleri ile iç içe olan bir olaydır. İyonlaştırıcı radyasyonun kontrollü biçimde kullanımı önemli teknolojik avantajlar sunarken, yetersiz zırhlama DNA hasarı, mutasyon, kanser oluşumu ve doku bozulması gibi ciddi biyolojik risklere neden olmaktadır. Bu nedenle etkili, güvenilir ve sürdürülebilir radyasyon zırhlama malzemelerinin geliştirilmesi günümüzde hem malzeme bilimi hem de radyasyon güvenliği açısından kritik bir araştırma alanıdır.

Geleneksel olarak kurşun (Pb), tungsten (W) ve baryum (Ba) gibi yüksek atom numarasına (Z) sahip ağır metaller, gama ve X ışınlarının soğurulması açısından yüksek etkinlik göstermiştir. Ancak bu malzemeler toksisite, aşırı ağırlık, işlenebilirlik zorlukları ve bertaraf problemleri gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Özellikle giyilebilir koruyucular, taşınabilir cihazlar ve uzay uygulamaları gibi hafiflik ve ergonomi gerektiren alanlarda bu sınırlamalar daha belirgin hâle gelmektedir (Chang, Guo, & Zhang, 2023; Karatas, Ercan, Altin, Ogul, & Bulut, 2025; More, Alsayed, Badawi, Thabet, & Pawar, 2021a).

Bu bağlamda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerler, yeni nesil sürdürülebilir zırhlama malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler; biyoyumumluluk, düşük toksisite, yüksek hidrojen içeriği ve film, lif veya kompozit yapılarına kolaylıkla işlenebilme gibi avantajlara sahiptir. Özellikle hidrojen açısından zengin yapıları, nötronların yavaşlatılmasında çok önemli bir avantaj sağlar. Dahası, bu biyopolimerler yüksek Z'li metal oksitler, manyetik nanopartiküller veya iletken fazlar ile birleştirildiğinde, geleneksel polimerlere ve hatta bazı sentetik metal takviyeli sistemlere yaklaşan, bazı durumlarda ise onları aşan radyasyon zayıflatma performansına ulaşabilmektedir (Hashim, Al-Attayah, & Obaid, 2019; More et al., 2021a; Okonkwo, Idumah, Okafor, & Ezeani, 2023).

Bu bölümde biyopolimerlerin radyasyon zırhlamadaki rolü ayrıntılı biçimde incelenecek; foton ve nötron etkileşim mekanizmaları açıklanacak, biyopolimer matrislerin yapısal avantajları ve hibrit kompozit stratejileri tartışılacak ve literatürde bildirilen performans sonuçları değerlendirilecektir.

2. Radyasyonun Temelleri ve Zırhlama İlkeleri

Radyasyon, enerjinin parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar hâlinde yayılmasıdır. İyonlaştırıcı radyasyon X ışınları, gama ışınları, alfa ve beta

parçacıkları ve nötronları içermekte olup atomlardan elektron kopararak kimyasal bağları bozabilir ve biyolojik doku üzerinde ciddi hasarlara yol açabilir. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyonla çalışan ortamlarda uygun zırhlama stratejilerinin geliştirilmesi zorunludur (Chang et al., 2023; More et al., 2021a).

2.1. Foton Madde Etkileşimi

Bir foton bir malzeme ortamından geçerken, enerjisi ile malzemenin atom numarası, yoğunluğu ve elektron dağılımı gibi atomik özellikleri tarafından belirlenen üç temel etkileşim mekanizmasından biriyle etkileşime girer. Bu mekanizmalar sırasıyla fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Her bir belirli enerji aralıklarında baskın hâle gelir ve foton zayıflatma davranışının enerjiye bağlı karakterini belirler (Chang et al., 2023; More et al., 2021a). Fotoelektrik soğurma düşük enerjili fotonlarda (≈ 10 – 100 keV) hâkimdir. Bu süreçte foton, iç kabuk elektronlarından birine tüm enerjisini aktararak elektronu atomdan koparır. Fotoelektrik olayın olasılığı atom numarası ve enerjiye (E) bağlı yaklaşık olarak Z^n/E^3 ($n \approx 3$ – 4) şeklinde değişir. Malzemenin atom numarası arttıkça etkileşim kesiti keskin biçimde yükselir. Bu nedenle kurşun ($Z=82$), bizmut ($Z=83$) ve tungsten ($Z=74$) gibi yüksek Z 'li malzemeler özellikle tıbbi görüntülemede kullanılan düşük enerjili X ışınlarının soğurulmasında son derece etkilidir. Ayrıca L ve K kabukları civarında görülen kenar yapıları (absorption edges), yüksek Z 'li dolgu maddelerinin kompozit malzemelerde tercih edilme nedenlerinden biridir (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a).

Compton saçılması orta enerjili fotonlarda (≈ 200 keV– 2 MeV) baskındır. Bu mekanizmada foton, zayıf bağlı bir dış kabuk elektronu ile elastik olmayan bir çarpışma yaparak enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve yön değiştirir. Compton saçılma olasılığı atom numarasına güçlü bir şekilde bağlı değildir; bunun yerine malzemenin elektron yoğunluğuna bağlıdır. Bu sebeple polimerler, kompozitler ve düşük Z 'li biyopolimer matrisler Compton bölgesinde benzer zayıflatma davranışı gösterebilir. Bu enerji aralığı birçok endüstriyel radyografi, gama tarama ve radyasyon güvenliği uygulamasında kritik olduğundan, biyopolimer matris ve yüksek Z dolgu kombinasyonları Compton mekanizmasında önemli avantaj sağlar (Chang et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).

Çift oluşumu (pair production) foton enerjisinin 1.022 MeV'in üzerine çıktığı yüksek enerji aralıklarında gerçekleşir. Foton, çekirdeğin güçlü elektrik alanı yakınında bir elektron pozitron çiftine dönüşür. Etkileşimin başlama eşiği elektron kütlesiyle (m_e) orantılı $E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022$ MeV olup, kesit enerjinin

ve atom numarasının artmasıyla belirgin bir şekilde yükselir. Bu nedenle ağır metal oksit dolgular (Bi_2O_3 , WO_3 , PbO_2) yüksek enerjili gama ışınlarına karşı çok etkilidir ve kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama etkisini ciddi ölçüde artırır (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). Bu üç mekanizmanın enerjiye bağlı baskınlığı, bir malzemenin foton zayıflatma performansının neden tek bir parametreye değil, foton enerjisi aralığı, Z, yoğunluk ve mikro yapı ilişkisine bağlı olduğunu açıklamaktadır. Bu nedenle biyopolimer matrislerin yüksek Z katkılarıyla güçlendirilmesi, hem fotoelektrik bölgede hem de yüksek enerjili çift oluşumu bölgesinde önemli performans kazançları sağlamaktadır.

Monoenerjik bir foton demetinin, kalınlığı t olan bir malzemedan geçerken gösterdiği zayıflama, Lambert–Beer yasasına göre

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

bağıntısı ile ifade edilir. Burada I_0 giriş yoğunluğu, I çıkış yoğunluğu ve μ ise birim yol boyunca etkileşim olasılığını temsil eden doğrusal zayıflatma katsayısıdır (LAC) (cm^{-1}). Kütle zayıflatma katsayısı (MAC) ise yoğunluk (ρ) esaslı karşılaştırma yapmak için μ/ρ ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) şeklinde tanımlanır. Foton yoğunluğunu %50 azaltmak için gerekli malzeme kalınlığı olan yarı değer kalınlığı (HVL)

$$HVL = \ln(2) / \mu \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Yoğunluğu %10'a indirmek için gereken onda bir değer kalınlığı (TVL) ise

$$TVL = \ln(10) / \mu \quad (3)$$

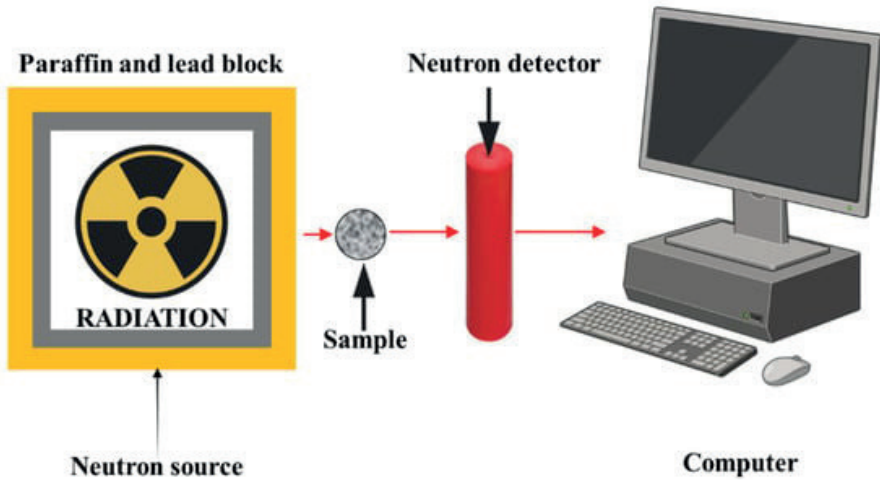
olarak tanımlanır. Yüksek Z veya yoğun malzemeler yüksek μ değerine, dolayısıyla küçük HVL/TVL değerlerine sahiptir. Buna karşılık hafif, hidrojen bakımından zengin biyopolimerlerin μ değeri daha düşüktür; fakat bu malzemeler nötron yavaşlatması açısından önemli bir üstünlük sağlar (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a).

2.2. Nötron Zırhlamasına İlişkin Hususlar

Nötronlar elektriksel olarak yüksüz parçacıklar olduklarından, maddeyle etkileşimlerinde elektrostatik kuvvet rol oynamaz ve bu durum foton etkileşimlerinden tamamen farklı, çekirdek temelli bir zayıflatma

mekanizmasını ortaya çıkarır. Nötronların malzemeden geçişi elastik saçılma, inelastik saçılma ve nötron yakalama ile gerçekleşir. Bu süreçlerin sonucunda oluşan ikincil yüklü parçacık üretimi çekirdek reaksiyonlarına dayanır. Bu çalışmalarda kullanılan nötron doz ölçümü deneysel geometrisi Şekil 1'de sunulmuştur. Özellikle hafif çekirdeklerde gerçekleşen elastik saçılma nötron yavaşlatması (moderasyon) açısından kritik öneme sahiptir. Hidrojen çekirdeğinin nötronla neredeyse eşit kütleye sahip olması tek çarpışmada büyük enerji transferine olanak verir. Bu sebeple selüloz, kitosan, nişasta, poli(vinil alkol) (PVA), poli(vinilpirolidon) (PVP) ve PLA gibi hidrojen açısından zengin biyopolimerler etkili nötron yavaşlatıcılar olarak kullanılır (Hashim et al., 2019; More et al., 2021a).

Daha yüksek enerjili nötronlar hedef çekirdeği uyatarak inelastik saçılma yoluyla enerji kaybederler. Bu sırada ortama gama ışınları olarak da tanımlanan ikincil yüksek enerjili fotonların yayılması nötron zırhlarının aynı anda gama zırhlanmasına da sahip olmasını gerektirir. Nötronların tamamen soğurulduğu nötron yakalama olayında ise çekirdek foton yayarak daha kararlı hâle döner. Bu amaçla en yüksek yakalama kesitine sahip elementlerden bor-10 ve lityum-6 biyopolimer matrislere eklenerek $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ gibi reaksiyonlar sayesinde nötron absorpsiyon kapasitesi önemli ölçüde artırılır. Yakalama reaksiyonları ve inelastik saçılma sonrasında oluşan alfa parçacıkları, protonlar ve gama ışınları gibi ikincil radyasyon ürünleri ise zırh tasarımının çok katmanlı yapılmasını gerektirir (Chang et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).



Şekil 1. Nötron doz ölçümleri için deneysel geometri. (Pekdemir, Pekdemir, Yılmaz, Onay, & Nazem Qader, 2025)

2.3. Radyasyon Zırhlama Parametreleri ve Sınırlamaları

Zırhlama malzemeleri için temel performans göstergeleri arasında LAC, MAC, HVL, ortalama serbest yol ($MFP = 1/\mu$) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) bulunur. Nötron zırhlaması için makroskobik saçılma/soğurma değerleri kritik öneme sahiptir. Geleneksel metaller mükemmel foton zayıflaması sağlar, ancak nötronlar için genellikle düşük performans gösterir. Buna karşılık, hidrojen açısından zengin polimerler nötronları yavaşlatır, ancak yüksek Z dolgu maddeleriyle karıştırılmadıkça sınırlı gama zayıflaması sunar (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a; Okonkwo et al., 2023).

Geleneksel olarak, kalkanlama paradigması, ağırlık veya çevresel etkiden bağımsız olarak maksimum zayıflamayı önceliklendirmiştir. Giyilebilir koruyucu cihazlar, havacılık panelleri ve biyomedikal cihazlar gibi modern uygulamalarda talep, hafif, esnek ve sürdürülebilir malzemelere doğru kaymaktadır. Bu değişim, nötronlar için hidrojen açısından zengin matrisleri, gama için gömülü yüksek Z dolgu maddeleriyle birleştirebilen ve kütleyi ve çevresel etkiyi en aza indirirken entegre koruma sağlayan biyopolimerik kompozitlerin araştırılmasını teşvik etmektedir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023).

3. Biyopolimerler ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanımı

3.1. Biyopolimerik Malzemelere Genel Bakış

Biyopolimerler; bitkiler, yosunlar ve mikroorganizmalar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, doğal veya doğala yakın makromoleküllerdir. Yapısal olarak selüloz, kitosan, nişasta ve aljinat gibi polisakkaritler, PLA ve poly3-hydroxybutyrate (PHB) gibi alifatik polyesterler ve jelatin ve kolajen gibi protein bazlı polimerler başta olmak üzere çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu malzemeler biyobozunurluk, düşük toksisite, biyouyumluluk ve yüksek hidrojen içeriği özellikleri sayesinde sürdürülebilir malzeme tasarımında giderek daha fazla tercih edilmektedir (Hashim et al., 2019; Karataş, Ercan, Altın, Oğul, & Bulut, 2025). Hidrojen bakımından zengin bileşimleri, özellikle nötron yavaşlatılmasında önemli bir avantaj sağlayarak polietilen gibi geleneksel moderatörlere yakın verimlilik sunar (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

Biyopolimerlerin düşük atom numarası ve yoğunluğa sahip olmaları, fotoelektrik olay veya çift oluşumu mekanizmaları üzerinden yüksek enerjili fotonların zayıflatılmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle modern kalkanlama tasarımları, biyopolimer matrislerin Bi_2O_3 , WO_3 , PbO_2 , Gd_2O_3 ,

ZnO, CdO ve FeS₂ gibi yüksek Z'li inorganik dolgularla güçlendirildiği hibrit kompozit sistemlere yönelmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; Elsafi, El-Nahal, Sayyed, Saleh, & Abbas, 2022; Nuray, 2024; Saied, Ward, & Hamieda, 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025). Bu hibrit yapıdaki polimer matrisleri mekanik dayanım, işlenebilirlik, nötron moderasyonu ve esneklik sağlar. Ayrıca yüksek atom numaralı dolgu maddelerinin kullanımı gama ışınlarının zayıflamasını da sağlar. Böylece aynı malzemede hem gama hem de nötron koruması sağlanabilmektedir.

Literatürde bu tür biyopolimerik hibrit kompozitlere ilişkin çok sayıda örnek bulunmaktadır. Örneğin PbO₂ ile güçlendirilmiş karboksimetil selüloz (CMC)/PVP ve PVA esaslı polimerler, gama ışınları zırlamasında yüksek MAC ve düşük HVL değerleri elde ederek kurşunsuz esnek film tasarımlarına olanak sağlamıştır [8,19]. Zn-borat/parafin dolgulu koyun yünü biyopolimer kompozitleri çalışmada yoğunluk ve dolgu oranına bağlı olarak 20–80 keV aralığında zayıflatma katsayılarının önemli ölçüde arttığı ve hafif kurşunsuz kalkan tasarımlarının mümkün olduğu gösterilmiştir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025). 3D baskı yoluyla Bi veya W içeren polimer matrislerinin üretildiği çalışmalarda ise, karma radyasyon alanlarında daha hafif ve şekillendirilebilir zırhların mümkün olduğunu göstermiştir (Elsafi et al., 2022). Ayrıca kitosan, PLA veya selüloz matrislere eklenen manyetik Fe₃O₄ nanoparçacıkları ve grafen oksit ve karbon nanotüpleri gibi karbon temelli dolgular elektromanyetik girişim (EMI) sönümleme, dielektrik kayıp ve termal kararlılık gibi ek işlevsellikler sunmuştur (El Rahman, Metwally, Sabry, & Mohammed, 2024; Thongpool, Phunpueok, Barnthip, & Jaiyen, 2015).

Biyopolimer tabanlı kompozitlerin bir diğer avantajı geniş işlemeye uygunluklarıdır. Çözelti döküm, elektroegirme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve çok katmanlı 3D baskı gibi yöntemler, bu malzemelerin film, kaplama, lif, köpük veya yapısal panel formunda üretilebilmesine olanak sağlar (Elsafi et al., 2022; Hashim et al., 2019; Niksarlıoğlu et al., 2023). Biyobozunurluk ve düşük çevresel ayak izi, biyopolimerik kompozitleri hem radyasyon koruması hem de sürdürülebilirlik hedefleri açısından geleceğin malzemeleri arasında konumlandırmaktadır (Hashim et al., 2019; Karataş et al., 2025).

3.2. Selüloz Bazlı Kompozitler

Selüloz, β-(1→4) bağlı D-glukopiranoz, birimlerinden oluşan lineer zincir yapısı, kristalin mikrofibril düzeni ve yoğun hidroksil grubu içeriği sayesinde en yaygın doğal biyopolimerlerden biri olarak tanımlanır

(Thongpool et al., 2015). Yüksek kristalinitesi ve güçlü hidrojen bağı ağı nedeniyle, selülozun işlenmemiş hâlde dahi dikkate değer mekanik dayanım ve radyasyon kararlılığı sergilediği çeşitli çalışmalar tarafından bildirilmiştir (Sarkar, Bediako, Choi, & Yun, 2019). Hidrojen yönünden zengin yapısı, hızlı nötron moderasyonuna katkı sağlamakla birlikte yüzeydeki fonksiyonel grupların nanoparçacık bağlanmasına elverişli olduğunu göstermiştir (Hashim et al., 2019; Thongpool et al., 2015).

Selüloz tabanlı malzemelerin foton ve nötron kalkanı olarak daha etkili hâle getirilebilmesi için yüksek Z'li metal oksitlerin veya fonksiyonel nanoparçacıkların matrise dâhil edildiği hibrit kompozit tasarımları yaygın olarak benimsenmiştir. Örneğin, selüloz asetat matrisine ZnO ve CdO nanoparçacıklarının eklendiği sistemlerde üretilen kompozitlerin, tanınal X-ışını enerjilerinde beton ve alçıdan daha yüksek LAC değerine sahip olduğu ve TVL değerlerinin 20–40 keV aralığında 0.14–0.91 cm arasında kalması, ince tabakalarda bile etkili foton zırhlaması sağladıklarını ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan çalışma ZnO ve CdO'nun yüksek yoğunluğu ile K-kenar enerjilerinin tanınal foton enerjilerine yakın olması sayesinde, CA–CdO–ZnO kompozitlerinin hafif, kurşunsuz ve tıbbi görüntüleme uygulamalarında beton ve alçıya alternatif olabilecek verimli zırhlama malzemeleri olduğunu göstermiştir (Nafee, Tijani, Al-Hadeethi, & Hussein, 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025). UV-engelleyici dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş selüloz ve bakteriyel selüloz filmlerinde ultraviyole geçirgenliğinde %90'a varan azalma ve aynı anda iyi mekanik/bariyer performansı elde edildiği rapor edilmiştir (Vázquez, Velazquez, & Cazón, 2021).

Radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma işlemlerinin selüloz lif takviyeli biyokompozitlerde ara yüzey etkileşimini ve yapısal kararlılığı iyileştirdiği çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Lenfeld, Brdlík, Borůvka, Běhálek, & Habr, 2020). Selüloz lif takviyeli polimer kompozitlerin kontrollü gama dozlarına maruz bırakılması sonrasında mekanik dayanımın büyük ölçüde korunduğu, hatta belirli dozlarda iyileştiği; bunun da fiber matris ara yüzey bağlanmasının radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma yoluyla güçlenmesiyle ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Shahriar Kabir et al., 2019).

Ağır metal oksit dolguların selüloz kompozitlerinde foton zayıflatma katsayılarını önemli ölçüde artırabildiği ve yarı değer kalınlığını düşürebildiği çeşitli derlemelerde vurgulanmaktadır (Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). Ayrıca, üç boyutlu baskı ile üretilen Bi içeren polimer kompozitlerinin özellikle düşük enerjili fotonlara karşı yüksek zayıflatma performansı sergilediği gösterilmiştir. Bu yaklaşımın uygun matris seçimiyle selüloz temelli sistemlere de uyarlanabileceği değerlendirilmiştir (Elsafi et al.,

2022; Nuray, 2024). Bu bulgular, selüloz bazlı hibrit kompozitlerin hafiflik, esneklik, nötron moderasyonu ve yüksek Z katkılarıyla güçlendirilmiş foton zayıflatma kabiliyetini bir arada sunarak modern kalkanlama uygulamalarında önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

3.3. Kitosan Bazlı Kompozitler

Kitosan, kabuklu deniz canlılarının dış iskeletlerinde bulunan kitinin deasetilasyonu sonucunda elde edilen bir polisakkarittir ve yapısı β -(1 $\rightarrow$ 4) bağlı glukozamin ile N-asetil-glukozamin birimlerinden oluşmaktadır. Yüksek hidrojen ve azot içeriği, film oluşturma kapasitesi, biyolojik bozunabilirlik ve kimyasal fonksiyonelleştirmeye uygunluk gibi özellikler kitosanı hem radyasyon etkileşimleri hem de kompozit üretimi açısından değerli bir biyopolimer hâline getirmektedir (Mallakpour, Tukhani, & Hussain, 2021). Hidrojen bakımından zengin yapısı nedeniyle kitosanın nötron moderasyonu için uygun bir matris olarak değerlendirildiği, ayrıca yüzeydeki fonksiyonel grupları sayesinde nanoparçacıklarla güçlü ara yüzey bağlanmaları oluşturabildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; Mallakpour et al., 2021).

Kitosan filmlerinin gama ışınlarına maruz kaldığında zincir kopması ve radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma gibi yapısal değişiklikler sergilediği; bu süreçlerin uygun dozlarda mekanik esnekliği ve enerji dağılımını iyileştirebildiği çeşitli çalışmalar tarafından gösterilmiştir. Kitosan–gliserol temelli filmlerde 25 kGy'ye kadar uygulanan ışınlamanın kristallliği azalttığı ve esnekliği artırdığı bildirilmiştir (Al-Masry et al., 2021). Nanopartikül takviyeleriyle güçlendirilmiş kitosan kompozitlerinin radyasyon koruma performansının belirgin şekilde iyileştiği de literatürde vurgulanmaktadır. Özellikle Fe₃O₄-kitosan sistemlerinde manyetik kayıp mekanizmalarının dielektrik sönümlleme ile birleşerek hem foton hem de elektromanyetik radyasyonun zayıflatılmasına katkı sağladığı genel kompozit derlemelerinde belirtilmektedir (Bawazeer et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).

Kitosan–jelatin–nanodoldurucu esaslı kompozitlerin yüksek dielektrik sabitleri ve EMI koruması sunduğu; ayrıca giyilebilir hafif koruyucular için uygun mekanik esneklik sağladığı çalışmalarla desteklenmiştir (Duan, Chen, Yu, & Xie, 2022; Mallakpour et al., 2021). Ayrıca sterilizasyon gerektiren biyomedikal uygulamalarda kitosan tabanlı filmlerin kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve bitkisel ekstrakt içeren kitosan filmlerinin 20 kGy'ye kadar gama ışını dozlarına maruz bırakıldıktan sonra antimikrobiyal özelliklerini ve optik bütünlüklerini koruduğu rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021).

Bu veriler doğrultusunda, kitosanın hem nötron moderatörü olarak hidrojen zenginliğinden kaynaklanan avantajları hem de foton ve EMI zayıflaması için yüksek Z veya fonksiyonel nanoparçacıklarla uyumlu bir polimer matris oluşturabilmesi, onu çok katmanlı ve çok işlevli radyasyon koruma sistemleri için son derece uygun ve çok yönlü bir bileşen hâline getirmektedir.

3.4. PLA ve Hibrit Kompozit Sistemleri

PLA, mısır ve şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir bir alifatik polyester olup şeffaflığı, işlenebilirliği ve çeşitli dolgu maddeleriyle uyumluluğu sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025). Bununla birlikte, saf PLA'nın nispeten kırılgan bir yapıya sahip olduğu ve foton-radyasyon etkileşimlerinde sınırlı performans gösterdiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Radyasyon altında zincir hareketliliğinin azalması, mekanik dayanım kaybı ve enerji sönmüleme kapasitesindeki düşüş gibi etkiler PLA'nın tek başına bir kalkan malzemesi olarak yetersiz kalmasına neden olabilmektedir (Karatas et al., 2025; Thongpool et al., 2015).

Bu sınırlamaların aşılması amacıyla PLA'nın PHB, poli(3-hidroksibütirat-ko-3-hidroksivalerat) (PHBV) gibi biyobozunur poliesterlerle birleştirildiği veya yüksek atom numaralı metal oksitlerle güçlendirildiği hibrit kompozit tasarımlarına yönelik çalışmalar artmıştır. Monte Carlo tabanlı Geant4 simülasyonlarında, Bi_2O_3 veya Gd_2O_3 içeren PLA-PHB kompozitlerinin saf PLA'ya kıyasla gama ve nötron zayıflatma etkinliğinde anlamlı iyileşme sağladığı rapor edilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Bu performans artışı, fotoelektrik olayın Z^3 bağımlılığı ve ağır oksitlerin yüksek yoğunluk değerleri ile ilişkilendirilmektedir.

DeneySEL çalışmalar da PLA'nın yüksek Z oksit katkılarıyla radyasyon bariyer özelliklerinin belirgin şekilde geliştiğini göstermektedir. PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı ve LAC değerinin arttığı, dolgu oranları uygun düzeylerde tutulduğunda mekanik dayanım ve işlenebilirliğinin korunduğu bildirilmiştir (Nuray, 2024). Benzer şekilde, PLA-kitosan-selüloz nanokristali gibi PLA tabanlı çok katmanlı sistemlerde bariyer, mekanik ve fonksiyonel özelliklerin birleşimi sayesinde ambalajlama ve radyasyona maruz yapılar için umut verici sonuçlar elde edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022).

PLA tabanlı kalkanlama uygulamalarında, PLA'nın kitosan, nişasta veya diğer polisakkaritlerle karıştırılmasıyla elde edilen çok katmanlı filmler ve esnek kaplamalar da önem taşımaktadır. Bu hibrit yapılar; radyasyon

zayıflatma, biyobozunurluk, steril tıbbi ambalajlarda kullanılabilirlik, UV engelleme ve antimikrobiyal davranış gibi çok yönlü özellikler sunmaktadır. Kitosan, selüloz nanokristali (CNC) ve çeşitli fonksiyonel katkılarla modifiye edilen PLA filmlerinde UV koruma kapasitesi, mekanik dayanım ve ısıl stabilitede belirgin iyileşmeler elde edildiği rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Bu bulgular, PLA'nın yüksek Z dolgu maddeleri ve biyopolimerlerle birlikte kullanıldığında hem foton hem de nötron zayıflatma sağlayabilen, hafif, işlenebilir ve sürdürülebilir hibrit kalkan sistemleri için dikkate değer bir bileşen olduğunu göstermektedir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024).

3.5. Nişasta ve Diğer Polisakkarit Kompozitleri

Nişasta, film oluşturma kabiliyeti, geniş bulunabilirliği ve hidrojen bakımından zengin kimyasal yapısı nedeniyle sürdürülebilir kompozit tasarımlarında öne çıkan bir biyopolimerdir. Ancak saf hâliyle sınırlı mekanik dayanım ve termal kararlılık sergilemesi sebebiyle genellikle selüloz, kitosan veya çeşitli nanoparçacık katkılarıyla güçlendirildiği literatürde belirtilmektedir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025). Bu hibritleştirme stratejileri sayesinde nişastanın hem nötron moderasyonu hem de foton zayıflatma kapasitesinin artırılabilirdiği rapor edilmiştir. Mısır nişastası ve kitosan matrisine entegre edilen selüloz nanokristallerinin (CNC), kompozitin mekanik dayanımı ile bariyer performansını anlamlı şekilde iyileştirdiği; aynı zamanda UV radyasyonu ve kimyasal ajanlara karşı daha yüksek koruma sağladığı bildirilmektedir (Duan et al., 2022). CNC'nin yüksek kristalin yapısı, hidroksil fonksiyonelliği ve polimer matrise güçlü bir ara yüzey bağlanma kapasitesi bu iyileşmenin temel nedenleri arasında gösterilmektedir.

Nişasta temelli nanokompozitlerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarının, biyobozunurluk korunurken EMI sönmülme kapasitesini artırdığı ve özellikle düşük frekanslı EMI kalkanlama uygulamalarında ek işlevsellik sağladığı genel derleme çalışmalarında vurgulanmaktadır (Thongpool et al., 2015). Ayrıca bakteriyel selüloz-kitosan-gliserol kompozitlerinden üretilen şeffaf filmlerde %95'e varan UV engelleme kapasitesine ve 135 °C'ye kadar termal kararlılığa ulaşıldığı; bu özelliklerin söz konusu sistemleri radyasyona maruz kalabilen ambalaj ve koruyucu kaplama uygulamaları açısından uygun hâle getirdiği rapor edilmiştir (Sarkar et al., 2019).

Nişasta esaslı hibrit sistemlerin performansının iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri altında iyileştirilebildiği; özellikle biochar–ZnO katkılı termoplastik nişasta filmlerinde hem antimikrobiyal özelliklerin hem de UV/görünür ışık bariyer kapasitesinin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir (Vázquez et al., 2021). Bu nanopartikül katkılarının, foton soğurma ve saçılma mekanizmalarını güçlendirdiği; ayrıca matrisin gaz bariyeri ve mekanik özelliklerini desteklediği ifade edilmektedir. Bu bulgular doğrultusunda nişasta ve diğer polisakkarit esaslı biyopolimer kompozitlerin; yüksek hidrojen içerikleri, çok yönlü işlenebilirlikleri ve çeşitli nanoparçacık katkılarıyla uyumlu yapıları sayesinde sürdürülebilir, hafif ve çok işlevli radyasyon koruma malzemeleri için önemli bir potansiyel sunduğu anlaşılmaktadır (Duan et al., 2022; Karatas et al., 2025; Sarkar et al., 2019; Thongpool et al., 2015; Vázquez et al., 2021).

3.6. Radyasyon Zırhlama Performans Değerlendirmesi

Biyopolimer esaslı kompozitlerin radyasyon zırhlama performansları; LAC, MAC, HVL, TVL ve Zeff gibi parametreler kullanılarak nicel olarak değerlendirilebilmektedir (Chang et al., 2023; More et al., 2021a). Deneysel çalışmalar ve Monte Carlo tabanlı simülasyon sonuçları, metal oksitler, boratlar, ağır element içeren bileşikler ve manyetik nanoparçacıklarla güçlendirilmiş biyopolimer matrislerin; saf polimerlere, geleneksel sentetik polimerlere ve düşük yoğunluklu metalik kalkanlara yakın hatta bazı durumlarda bu sistemlerin üzerinde zayıflatma performansı gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023; Saied et al., 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025).

3.6.1. Gama Işını Koruma Performansı

Yüksek atom numaralı dolgu maddeleri içeren biyopolimer kompozitlerinin foton etkileşim mekanizmalarında belirgin iyileşme sağladığı birçok çalışma tarafından rapor edilmiştir. Çinko borat/parafin dolgulu koyun yünü kompozitlerinde, 20–80 keV foton enerjisi aralığında MAC değerinin dolgu oranıyla birlikte anlamlı şekilde arttığı ve hafif, esnek kurşunsuz kalkan tasarımlarının mümkün olduğu bildirilmiştir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025). Bu sonuçlar, fotoelektrik soğurmanın dolgu maddesi konsantrasyonuna duyarlılığını doğrulamaktadır. Benzer biçimde, CMC–PVP–PbO₂ nanokompozitlerinde 59.5 keV gama ışınları için yüksek LAC değerlerinin elde edildiği ve polimer matris içinde homojen dağılmış PbO₂ nanoparçacıklarının metalik kurşun–kauçuk sistemlerine alternatif olabilecek hafif ve esnek bir yapı sunduğu belirtilmektedir (Saied et al., 2024). Biyopolimer poliester sistemleri de benzer eğilim göstermektedir. Geant4

tabanlı Monte Carlo simülasyonlarında, Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içeren PLA-PHB kompozitlerinin 662 keV civarında saf PLA'ya göre daha yüksek MAC değerleri verdiği ve bazı ticari kurşunsuz epoksi-bismut kompozitleriyle rekabet edebilecek seviyelere ulaştığı rapor edilmiştir. Bu bulgular deneysel olarak da desteklenmiş; PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı ve doğrusal zayıflama katsayısının belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Bu bulgular deneysel olarak da desteklenmiş; PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı, doğrusal zayıflama katsayısının ise belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir (Nuray, 2024).

Düşük enerjili X ışını bölgesinde (20–100 keV), selüloz ve kitosan kaynaklı biyopolimer kompozitlerinin ek avantajlar sunduğu da rapor edilmiştir. Bakteriyel selüloz bazlı filmlerde ve nişasta-kitosan-CNC sistemlerinde UV/görünür bölgede ışık geçirgenliğinin güçlü biçimde bastırıldığı ve bu yapılar da mekanik ile bariyer özelliklerinin korunduğu gösterilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Ayrıca kitosan bazlı yüksek Z katkılı filmlerde tanınal enerji seviyelerinde anlamlı gama zayıflatma verimliliğinin şeffaflık ve biyobozunurluk korunarak elde edilebildiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Hashim et al., 2019; Saied et al., 2024).

3.6.2. Nötron Yavaşlatma ve Karma Alan Koruması

Biyopolimer matrislerin %6 ile %8 aralığında olan doğal hidrojen içerikleri, hızlı nötron moderasyonu için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Selüloz, nişasta ve kitosan gibi polisakkarit yapılar da nötron iletiminin kalınlıkla birlikte üssel olarak azaldığı; bu eğilimin özellikle yüksek hidrojen yoğunluğu ve elastik saçılma süreçleriyle ilişkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Bawazeer et al., 2023; S. C. Gupta, Baheti, & Gupta, 2000; Karatas et al., 2025; Selçuk Pekdemir et al., 2025). Bu sonuçlar, biyopolimer matrislerin yüksek hidrojen içeriği sayesinde nötron moderasyonu açısından rekabetçi olabildiğini göstermektedir. Nişasta veya kitosan esaslı hibrit sistemlerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarının, nötron zayıflatma performansına ek katkı sağlayabildiği; elastik saçılmanın yanı sıra manyetik etkileşimlerin de nötron akısı dağılımını etkilediği geniş kapsamlı derleme çalışmaları tarafından vurgulanmaktadır (Bawazeer et al., 2023).

PLA tabanlı kompozitlerde de benzer bir eğilim görülmektedir. PLA- Gd_2O_3 ve PLA- Bi_2O_3 sistemlerinde, nötron moderasyonu ile foton soğurucunun aynı matris içinde birleştirildiği hibrit tasarımların karma radyasyon alanlarında ($\gamma + n$) eşzamanlı koruma sağlayabildiği; böylece

ayrı katmanlara duyulan ihtiyacın azaldığı Monte Carlo tabanlı çalışmalarda rapor edilmiştir (Akhdar & Alshehri, 2023; Niksarlıoğlu et al., 2023). Bu tür hibrit yapıların, hem yüksek Z katkılarının fotoelektrik etkileşimlerdeki etkinliği hem de polimer matrisin hidrojen kaynaklı nötron moderasyonu sayesinde çok işlevli bir koruma mekanizması sunduğu ifade edilmektedir.

3.6.3. Mekanik, Termal ve Çevresel Hususlar

Biyopolimer kompozitlerin radyasyon altında mekanik davranışları, zincir kopması ile radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma süreçlerinin dengesine bağlı olarak şekillenmektedir. Kitosan ve selüloz esaslı biyopolimer filmlerde, uygun ışınlama doz aralıklarında zincir kopması ve radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma süreçlerinin dengesiyle yapısal bütünlüğün büyük ölçüde korunabildiği; bazı sistemlerde mekanik dayanım ve esnekliğin iyileşebildiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Vázquez et al., 2021). Örneğin kitosan–gliserol temelli filmlerde endüstriyel sterilizasyonu temsil eden gama dozları sonrasında kristalliğin azaldığı, ancak filmlerin elastikiyet ve optik bütünlüklerini koruduğu gösterilmiştir (Al-Masry et al., 2021). Bakteriyel selüloz esaslı filmlerde ise UV ışınları altında yüksek UV-engelleme kapasitesiyle birlikte mekanik ve bariyer özelliklerinin korunabildiği rapor edilmiştir (Vázquez et al., 2021).

Termal açıdan, yüksek atom numaralı metal oksit dolgularının PLA ve benzeri biyopolimer matrislerde ayrışma başlangıç sıcaklığını yükselttiği ve ısı kararlılığı artırdığı rapor edilmektedir. Özellikle PLA/Gd₂O₃ nanokompozitlerinde dolgu oranındaki artışın ayrışma sıcaklığını anlamlı ölçüde yükselttiği ve termal dayanımı güçlendirdiği deneysel olarak gösterilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023). Çevresel açıdan bakıldığında biyopolimer tabanlı kalkanların toksik olmamaları, yenilenebilir kaynaklardan üretililebilmeleri ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri sayesinde yaşam döngüsü değerlendirmelerinde polivinil klorür (PVC) veya polietilen (PE) gibi geleneksel polimerlere kıyasla belirgin karbon ayak izi azaltımı sağladığı, ayrıca kurşunsuz polimerik sistemlerin medikal ortamlarda kullanım için güçlü adaylar olduğu literatürde vurgulanmaktadır (Karataş et al., 2025; More, Alsayed, Badawi, Thabet, & Pawar, 2021b; Okonkwo et al., 2023).

3.6.4. Uygulama Alanları

Radyolojik ve nükleer tıp tesislerinde, kurşunsuz alternatifler olarak biyopolimer esaslı çok katmanlı hafif önlükler ve cerrahi örtüler üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Bu sistemlerin tanınal X ışını enerjilerinde klinik gereksinimlere yakın koruma seviyelerine ulaşabildiği, buna karşın kütlelerinin metalik kalkanlara göre önemli ölçüde düşük olduğu rapor edilmektedir

(Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). ZnO veya diğer fonksiyonel dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş şeffaf biyopolimer filmlerin, ışık bariyeri ve gaz geçirgenliği düşük yapıları sayesinde hassas ürünlerin ve radyofarmasötiklerin ambalajlanması için potansiyel adaylar olduğu belirtilmektedir. UV-engelleyici ve bariyer özellikleri iyileştirilmiş bakteriyel selüloz ve nişasta esaslı filmler, şeffaf koruyucu kaplama ve pencere benzeri uygulamalar için umut verici performans sergilemektedir (Al-Masry et al., 2021; Alves et al., 2024). Hidrojel sistemlerinin, geçici nötron moderasyonu amacıyla sökümler ve atık depolama sahalarında kullanılabilecek potansiyel adaylar olduğu ve bu tür hidrojelde yüksek su içeriği sayesinde nötron yavaşlatma kapasitesinin anlamlı ölçüde artabildiği çalışmalarla gösterilmiştir (S. C. Gupta et al., 2000).

ZnO veya grafen oksit katkılı selüloz/kitosan tabanlı filmlerin UV/gama sönümleme, antimikrobiyal aktivite ve EMI kalkanlama gibi çok işlevli özellikler sunabildiği; ayrıca selüloz ve nişasta içerikli matrislerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarıyla EMI ve gama zayıflatma performansının artırılabilirliği geniş kapsamlı derlemelerde ifade edilmektedir (Bawazeer et al., 2023; Díaz-Cruz et al., 2022; Hashim et al., 2019). Ek olarak, 3D baskılı PLA- Fe_3O_4 parçalarının giyilebilir dozimetre kasaları ve hafif EMI kalkanları olarak değerlendirildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022).

Bununla birlikte, yüksek Z dolgularının hidrofilik biyopolimer matrislerde homojen dağıtılması güç olabilmekte; aglomerasyon mekanik zayıflık ve zayıflatma anizotropisine neden olabilmektedir. Bu sorunun yüzey fonksiyonelleştirme stratejileri ve polimer matris içerisinde in-situ nanopartikül sentezi ile azaltılabildiği rapor edilmektedir (Mallakpour et al., 2021; Yue et al., 2023). Uzun süreli ışımda oksidatif bozunma ve renk değişimi görülebildiği; bu etkinin antioksidan katkılar ve uygun çapraz bağlama yöntemleriyle hafifletilebildiği bildirilmektedir (Al-Masry et al., 2021; Bawazeer et al., 2023). Nem emilimine duyarlı polisakkarit filmlerde ise hidrofobik kaplamalar ve plazma işlemlerinin etkili olduğu belirtilmektedir (S. C. Gupta et al., 2000).

Güncel araştırmalar, Monte Carlo ve diğer hesaplamalı yöntemlerin eklemeli imalat teknolojileriyle birleştirilmesinin yüksek performanslı biyopolimer kompozitlerinin tasarımını hızlandırdığını göstermektedir (Elsafi et al., 2022; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Sürdürülebilirlik, düşük yoğunluk, işlenebilirlik ve çok işlevlilik avantajları göz önünde bulundurulduğunda, biyopolimer kompozitlerin gelecek nesil çevre dostu radyasyon kalkanı teknolojilerinde önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

3.7. Sentetik ve Yarı Sentetik Biyopolimerler: PCL, PVA ve PVP Sistemleri

Polisakkaritler ve alifatik polyesterler radyasyon kalkanlama çalışmalarında öne çıkan yenilenebilir biyopolimer sınıfını oluşturmakla birlikte, yarı sentetik ve sentetik biyoyumlu polimerlerin de özellikle poli(ϵ -kaprolakton) (PCL), PVA ve PVP radyasyon zırhlama uygulamalarında dikkat çektiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Bu polimerler petrokimyasal kökenli olmalarına rağmen, biyoyumluluk, kontrollü bozunabilirlik ve çevresel etkililiğe uygunluk gibi özellikleri nedeniyle literatürde çevre dostu ve hibrit kompozit tasarımlarında değerlendirilen polimer sınıfı içerisinde ele alınmaktadır (Bawazeer et al., 2023; Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Okonkwo et al., 2023).

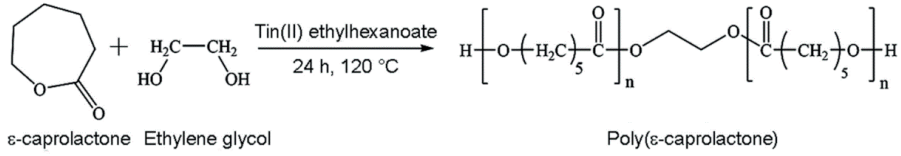
Yapısal ayarlanabilirlikleri, hidrofiliklikleri, geniş işleme pencereleri ve çok çeşitli inorganik nanoparçacıkları stabilize edebilme yetenekleri sayesinde bu polimerlerin, uygun dolgu kombinasyonları ile hem foton hem de nötron zayıflatma için çok yönlü matrisler oluşturabildiği rapor edilmiştir (El Rahman et al., 2024; S. C. Gupta et al., 2000; Thongpool et al., 2015).

3.7.1. Poli(ϵ -kaprolakton) (PCL)

Poli(ϵ -kaprolakton), ϵ -kaprolaktonun halka açılma polimerizasyonu yoluyla elde edilen yarı kristalin ve düşük erime sıcaklıklı ($\approx 60^\circ\text{C}$) bir alifatik poliester olarak Şekil 2'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır (Pekdemir, Öner, Kök, & Qader, 2021). Kolay işlenebilirliği, esnekliği ve hidrojen bakımından zengin kimyasal yapısı, PCL'yi radyasyon zırhlı tasarımında uygun bir aday hâline getirmektedir. PCL'nin FeS_2 , Bi_2O_3 ve ZnO gibi yüksek Z'li veya manyetik dolgu maddelerini başarıyla barındırabildiği ve bu katkıların foton zayıflatma verimliliğini anlamlı şekilde artırdığı çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. PCL/PVC matrisine %20 FeS_2 nanoparçacığı eklendiğinde, 662 keV gama fotonları için doğrusal zayıflama katsayısının belirgin biçimde arttığı ve HVL değerinin azaldığı; böylece kurşun esaslı polimer kauçuk sistemlere yakın bir performans elde edildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022). FeS_2 katkısının ayrıca ayrışma başlangıç sıcaklığını yükselterek kompozitin radyasyon altındaki termal dayanımını iyileştirdiği belirtilmektedir.

Yüksek Z oksitlerle güçlendirilmiş polimer matrislerde, tanınal foton enerjilerinde epoksi bismut benzeri ticari kurşunsuz kompozitlerle karşılaştırılabilir kütle zayıflama katsayılarının elde edilebildiği ve bu eğilimin PCL sistemleri için de geçerli olduğu çeşitli derlemelerde bildirilmektedir (Okonkwo et al., 2023). Ayrıca yüksek Z katkılarının düşük enerjili foton

bölgesinde fotoelektrik soğurmayı artırdığı, buna karşın PCL'nin sahip olduğu şeffaflık, esneklik ve işlemeye uygunluk gibi özelliklerin korunduğu vurgulanmaktadır (Karataş et al., 2025). PCL'nin yavaş bozunma kinetiği, mekanik esnekliği, yüksek radyasyon toleransı ve dolgu maddeleriyle uyumlu yapısı nedeniyle nükleer tesislerde, elektronik muhafaza yapılarında ve orta vadeli koruyucu yapı elemanlarında kullanılabilecek sürdürülebilir bir biyopolimer matris olduğu ifade edilmektedir (Díaz-Cruz et al., 2022; Pekdemir et al., 2021).



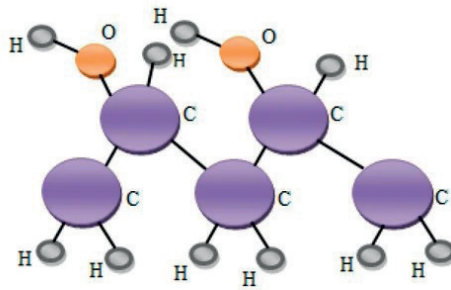
Şekil 2. PCL'nin halka açılma yoluyla polimerizasyonun şematik gösterimi (Pekdemir et al., 2021)

3.7.2. Poli(vinil alkol) (PVA)

Poli(vinil alkol), zincir boyunca hidroksil grupları içeren yarı kristalin ve suda çözünebilen bir polimerdir. PVA'nın tipik üretim süreci, polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenmesi şeklindedir ve bu süreç Şekil 3'te şematik olarak sunulmuştur (Gaaz et al., 2015). Yoğun hidrojen bağı ağı sayesinde yüksek mekanik mukavemet ve iyonlaştırıcı radyasyona karşı belirgin dayanım sergilediği; orta doz aralığında (<50 kGy) baskın olarak çapraz bağlanma mekanizmasının görüldüğü ve bunun boyutsal stabiliteyi artırdığı çeşitli çalışmalarca bildirilmiştir (Coqueret, 2024; Omar & Elnabi, 2011).

PVA bazlı kompozitler, gama ve X-ışını koruması için kapsamlı olarak incelenmiştir. CMC-PVP-PbO₂ benzeri ağır metal oksit katkılı sistemlerde olduğu gibi, PbO₂ ve diğer yüksek Z oksitlerle güçlendirilmiş PVA filmlerinde tanınal foton enerjilerinde yüksek doğrusal zayıflama katsayıları elde edildiği ve dolgu oranının artışıyla koruma performansının düzenli biçimde yükseldiği rapor edilmiştir (Hashim et al., 2019). BaSO₄ katkılı PVA kompozitlerinin ise özellikle 100 keV altındaki foton enerjilerinde yüksek zayıflama verimliliği sunduğu bildirilmiştir (Thongpool et al., 2015). Bu sistemlerde, düşük katkı yüklemelerinde optik şeffaflığın büyük ölçüde korunması, PVA tabanlı kurşunsuz radyasyon koruyucu pencereler için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Montmorillonit gibi nanokil takviyelerinin PVA matrisinde gaz bariyeri davranışını, mekanik dayanımı ve radyolitik stabiliteyi geliştirdiği ifade edilmektedir (Gaaz et al., 2015; Yue et al., 2023). PVA'nın yüksek hidrofilik yapısı ve su tutma kapasitesi, nötron moderasyonu amacıyla hidrojel formunda kullanılmasına da olanak tanımaktadır. PVA-temelli radyasyonla çapraz bağlanmış hidrojellerin nötron yumuşatıcı ortamlar, geçici koruyucu tabakalar ve dozimetrik fantomlar olarak kullanılabildiği; yapılan deneysel çalışmaların suca zengin PVA hidrojellerinin hızlı nötronlar için etkili bir yavaşlatıcı ortam oluşturduğunu gösterdiği belirtilmiştir (S. C. Gupta et al., 2000).



Şekil 3. Polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenen PVA (Gaaz et al., 2015)

3.7.3. Poli(vinilpirolidon) (PVP)

Poli(vinilpirolidon) (PVP), polar laktam fonksiyonları içeren amfifilik bir polimer olup nanoparçacıkları stabilize etme, metal oksitleri homojen dağıtma ve polimer-inorganik ara yüzey bağlarını güçlendirme özellikleriyle bilinmektedir. PVP'nin orta düzey radyasyon dozlarında kimyasal kararlılığını koruduğu, zincir kopmasının sınırlı düzeyde gerçekleştiği ve radyasyonla indüklenen yapısal bozulmalara karşı belirgin dayanım sergilediği çeşitli çalışmalar tarafından rapor edilmiştir (El Rahman et al., 2024; Hashim et al., 2019; Lenfeld et al., 2020).

PVP'nin nanoparçacık stabilizasyonundaki rolü özellikle kurşunsuz esnek zırh tasarımlarında önem taşımaktadır. CMC-PVP-PbO₂ kompozitlerinde PbO₂ yükleme oranının artırılmasıyla 59.5 keV foton enerjisinde kütle zayıflama katsayısının anlamlı şekilde yükseldiği, HVL değerlerinin azaldığı ve esnekliğin korunduğu gösterilmiştir (Hashim et al., 2019). PVP ayrıca üretim sırasında nanoparçacık agregasyonunu engelleyerek dolgu maddelerinin matris içerisinde daha homojen dağılmasını sağlamakta, bu durum hem foton zayıflatma verimliliğini hem de mekanik kararlılığı

artırmaktadır (El Rahman et al., 2024; Mallakpour et al., 2021). PVA/PVP karışım matrisleri içerisinde yüksek Z nanodoldurucular (Bi_2O_3 , WO_3 vb.) kullanılarak elde edilen kompozitlerde ise 100 kGy'ye kadar kümülatif radyasyon dozları altında yapısal bütünlüğün korunduğu ve gama zayıflatma katsayılarının yüksek kaldığı belirtilmiştir. Bu bulgular, PVP'nin radyokimyasal dayanımının güçlü bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Lenfeld et al., 2020; Nuray, 2024).

PVP'nin polar fonksiyonel gruplara sahip katkı maddelerine yüksek afinitesi, onu PLA ve PCL gibi hidrofobik biyopolimer sistemlerinde uyumlulaştırıcı bir ara faz hâline getirmektedir. Bu etkileşim, hem organik polimer zincirleri hem de inorganik dolgu maddeleri ile güçlü ara yüzey bağlanmalarının oluşmasını sağlayarak kompozitin bütünsel mekanik performansını ve radyasyon altındaki stabilitesini artırmaktadır (El Rahman et al., 2024; Hashim et al., 2019). Bu bulguların tümü birlikte değerlendirildiğinde PCL, PVA ve PVP sistemlerinin yüksek Z nanoparçacıkları ile uyumluluğu; hidrojen içeriği nedeniyle nötron moderasyonuna katkısı; radyasyon altında yapısal stabiliteyi koruma yeteneği; işlenebilirlik, şeffaflık ve çok yönlü kompozit tasarımına uygunlukları sayesinde sürdürülebilir ve hafif radyasyon kalkanlama teknolojilerinde önemli tamamlayıcı bileşenler olduğu anlaşılmaktadır. Bölümde sunulan karşılaştırmalar Tablo 1'de özetlenmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; El Rahman et al., 2024; Gaaz et al., 2015; Hashim et al., 2019; Pekdemir et al., 2021).

4. Sonuç

Biyopolimerler, radyasyon kalkanı alanında giderek artan bir biçimde dönüştürücü bir malzeme sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin sürdürülebilirlik, işlevsellik ve yapısal ayarlanabilirlik açısından sunduğu geniş tasarım alanı, geleneksel metalik ve petrokimyasal bazlı kalkanlama çözümlerinin ötesine geçen yeni bir yaklaşımı temsil etmektedir. Hidrojen bakımından zengin moleküler iskeletleri hızlı nötronların moderasyonu için doğal bir avantaj sağlarken; yüksek atom numaralı oksitler, boratlar, metalik nanopartiküller ve manyetik dolgu maddelerinin entegre edilmesi gama, X ışını ve elektromanyetik radyasyonun etkili bir şekilde zayıflatılmasına olanak tanımaktadır (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

Son on yılda nanoteknoloji, hibrit kompozit mühendisliği ve eklemeli üretimde kaydedilen gelişmeler, biyopolimerlerin mekanik dayanımını, radyasyon toleransını, bariyer özelliklerini ve çok işlevliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi doğal biyopolimerler üzerine yapılan çalışmalar; bu sistemlerin doğrusal zayıflama

katsayısı (LAC), kütle zayıflama katsayısı (MAC) ve yarı değer kalınlığı (HVL) açısından geleneksel polimer matrisleriyle rekabet edebildiğini, hatta belirli koşullarda ağır metal katkılı ticari kompozitlere yaklaşabildiğini göstermektedir (Al-Masry et al., 2021; Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Bu biyopolimerik yapılar; düşük toksisite, biyolojik olarak parçalanabilirlik, düşük yoğunluk ve yüksek esneklik gibi yıllardır hedeflenen çevresel ve ergonomik avantajları sağlar.

Bu doğal matrisleri tamamlayan poli(ϵ -kaprolakton) (PCL), poli(vinil alkol) (PVA) ve poli(vinilpirolidon) (PVP) gibi sentetik ve yarı sentetik biyopolimerler ise radyasyon kalkını tasarımıında ek esneklik sunmaktadır. Kontrollü radyokimyasal kararlılıkları, ışınlama altında çapraz bağlanma davranışları ve nanopartikül stabilize edebilme özellikleri sayesinde; FeS₂, Bi₂O₃, PbO₂ ve ZnO gibi yüksek Z dolgu maddeleriyle birleştirildiklerinde düşük ve orta enerjili fotonlarda yüksek LAC değerleri ve düşük HVL performansları elde edilebilmektedir (Díaz-Cruz et al., 2022; Karataş et al., 2025; Okonkwo et al., 2023; Saied et al., 2024). PCL'nin esnekliği ve yavaş bozunma profili onu hafif ve giyilebilir kalkanlar için uygun bir matris hâline getirirken, PVA'nın hidrofilik yapısı ve ışınlama altında çapraz bağlanma eğilimi nötron yumuşatıcı hidrojel formülasyonlarında avantaj sağlamaktadır (S. C. Gupta et al., 2000). PVP ise yüksek radyokimyasal kararlılığı ve nanoparçacıkların homojen dağılımını iyileştirme kapasitesi sayesinde hibrit biyopolimer sistemlerinde etkili bir uyumlulaştırıcı faz olarak görev yapmaktadır (Hashim et al., 2019; Lenfeld et al., 2020; Saied et al., 2024).

Bütün bu gelişmelere karşın, biyopolimer tabanlı kalkanların geniş ölçekli uygulamalara tam olarak entegre edilebilmesi için bazı teknik sınırlamaların aşılması gerekmektedir. Uzun süreli ışımada oksidatif bozunma, yüksek Z dolgularının hidrofilik matrislerde homojen dağıtılmasındaki zorluklar, ışınlama altında mekanik performansın değişimi, nem emiliminin bariyer özellikleri üzerindeki etkisi ve üretim süreçlerinin ölçeklenebilirliği başlıca kısıtlayıcı faktörlerdir (Al-Masry et al., 2021; Bawazeer et al., 2023; Yue et al., 2023).

Yine de son yıllardaki araştırmalar, çok ölçekli modelleme, moleküler dinamik simülasyonları ve Monte Carlo tabanlı radyasyon-malzeme etkileşim analizlerinin biyopolimer kompozitlerin tasarımını hızlandırdığını ortaya koymaktadır (Elsafi et al., 2022; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024; Okonkwo et al., 2023). Bu hesaplamalı yaklaşımların eklemeli üretim teknikleri ve makine öğrenimi yöntemleriyle birleştirilmesi, kompozit bileşiminin hedeflenen foton ve nötron enerjilerine göre optimize edilmesine

olanak tanıyarak kişiselleştirilmiş kalkan mimarilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde hem yenilenebilir doğal biyopolimerler hem de onların sentetik türevleri radyasyon kalkanı teknolojilerinde yalnızca geleneksel malzemelerin çevreci bir alternatifi değil, aynı zamanda çok işlevli, hafif, yüksek performanslı ve sürdürülebilir yeni bir malzeme paradigmasının merkezinde yer almaktadır. Bu sınıfın sunduğu düşük karbon ayak izi, toksik olmayan üretim potansiyeli ve geri dönüştürülebilirlik özellikleri; biyopolimer tabanlı kompozitleri geleceğin dairesel ekonomi odaklı radyasyon koruma stratejilerinde güçlü adaylar hâline getirmektedir (Chang et al., 2023; More et al., 2021b; Vázquez et al., 2021).

Tablo 1. Sentetik polimerlerin karşılaştırmalı tablosu.

Polimer	Temel Nitelikler	Radyasyon Davranışı	Tipik Dolgu Maddeleri	Uygulamalar
PCL	Esnek, yarı kristalin, yavaş bozunan	Düşük-orta γ dozlarında stabil; FeS_2 ve yüksek Z oksit katkılarıyla foton zayıflatma performansı artırılabilir (Selçuk Pekdemir et al., 2025)	FeS_2 , Bi_2O_3 , ZnO	Giyilebilir hafif kalkanlar, kablo kaplamaları, yapısal filmler
PVA	Hidrofilik, çapraz bağlanabilir, güçlü hidrojen bağları	İyonlaştırıcı radyasyon altında çoğunlukla çapraz bağlanır; hidrojel formunda iyi nötron moderasyonu sağlar (Al-Masry et al., 2021 ; Bawazeer et al., 2023 ; Omar & Elnabi, 2011)	PbO_2 , BaSO_4 , montmorillonit	Şeffaf koruyucu camlama filmleri, nötron hidrojenleri, tıbbi koruyucu bariyerler
PVP	Amfifilik, yüksek nanoparçacık stabilizasyon kapasitesi, şeffaf	Yüksek radyokimyasal kararlılık; zincir kırılması minimum düzeydedir, yüksek Z dolgu ile iyi gama zayıflatma sunar (Karataş et al., 2025 ; Yue et al., 2023)	PbO_2 , Bi_2O_3 , WO_3	Esnek kurşunsuz zırh filmleri, nanoparçacık dağıtıcı/stabilizatör, uyumlulaştırıcı kaplamalar

Kaynakça

- Akhdar, H., & Alshehri, M. (2023). Geant4 simulation of photon-and neutron-shielding capabilities of biopolymer blends of poly (lactic acid) and poly (hydroxybutyrate). *Polymers*, 15(21), 4257.
- Al-Masry, W. A., Haider, S., Mahmood, A., Khan, M., Adil, S. F., & Siddiqui, M. R. H. (2021). Evaluation of the thermal and morphological properties of γ -irradiated chitosan-glycerol-based polymeric films. *Processes*, 9(10), 1783.
- Alves, Z., Brites, P., Ferreira, N. M., Figueiredo, G., Otero-Irurueta, G., Gonçalves, I., . . . Nunes, C. (2024). Thermoplastic starch-based films loaded with biochar-ZnO particles for active food packaging. *Journal of Food Engineering*, 361, 111741.
- Bawazeer, O., Makkawi, K., Aga, Z. B., Albakri, H., Assiri, N., Althagafy, K., & Ajlouni, A.-W. (2023). A review on using nanocomposites as shielding materials against ionizing radiation. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 9(3), 325-340
- Chang, Q., Guo, S., & Zhang, X. (2023). Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*, 233, 112253.
- Coqueret, X. (2024). Radiation-induced cross-linking polymerization: Recent developments for coating and composite applications. *Nukleonika*, 69.
- Darie-Niță, R. N., & Frackowiak, S. (2025). An Overview of Potential Applications of Environmentally Friendly Hybrid Polymeric Materials. *Polymers*, 17(2), 252.
- Díaz-Cruz, C. A., Caicedo, C., Jiménez-Regalado, E. J., Díaz de León, R., López-González, R., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Evaluation of the antimicrobial, thermal, mechanical, and barrier properties of corn starch–chitosan biodegradable films reinforced with cellulose nanocrystals. *Polymers*, 14(11), 2166.
- Duan, Q., Chen, Y., Yu, L., & Xie, F. (2022). Chitosan–gelatin films: plasticizers/nanofillers affect chain interactions and material properties in different ways. *Polymers*, 14(18), 3797.
- El Rahman, A., Metwally, H., Sabry, N., & Mohammed, M. (2024). Gamma-ray shielding effectiveness, optical, mechanical, dielectric properties of nanofiller-reinforced PVA/PVP polymeric blend nanocomposites. *Scientific reports*, 14(1), 27466.
- Elsafi, M., El-Nahal, M., Sayyed, M., Saleh, I., & Abbas, M. (2022). Novel 3-D printed radiation shielding materials embedded with bulk and nanoparticles of bismuth. *Scientific Reports*, 12(1), 12467.
- Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., & Al-Amiery, A. A. (2015). Properties and applications of polyvinyl al-

- cohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites. *Molecules*, 20(12), 22833-22847.
- Gupta, S. C., Baheti, G., & Gupta, B. (2000). Application of hydrogel system for neutron attenuation. *Radiation Physics and Chemistry*, 59(1), 103-107.
- Hashim, A., Al-Attiyah, K., & Obaid, S. (2019). Fabrication of novel (biopolymer blend-lead oxide nanoparticles) nanocomposites: structural and optical properties for low-cost nuclear radiation shielding. *Ukrainian journal of physics*(64,№ 2), 157-163.
- Karatas, O., Ercan, H. U., Altin, M., Ogul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227.
- Karataş, Ö., Ercan, H. Ü., Altın, M., Oğul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227, 112396.
- Lenfeld, P., Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., & Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers on properties and characterization of biopolymer composites. *Polymers*, 12(12), 3006.
- Mallakpour, S., Tukhani, M., & Hussain, C. M. (2021). Sustainable plant and microbes-mediated preparation of Fe₃O₄ nanoparticles and industrial application of its chitosan, starch, cellulose, and dextrin-based nanocomposites as catalysts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 179, 429-447.
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021a). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(3), 2057-2090.
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021b). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 2057-2090.
- Nafee, S., Tijani, S., Al-Hadeethi, Y., & Hussein, M. A. (2024). Radiation shielding potential of cellulose acetate-CdO-ZnO polymer composites in comparison with concrete and gypsum. *Radiation Physics and Chemistry*, 225, 112145.
- Niksarlioglu, S., Akman, F., Pekdemir, M. E., Kuzu, S. Y., Kaçal, M. R., & Yılmaz, M. (2023). An extensive investigation on gamma shielding properties of PLA/Gd₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110936.
- Nuray, K. (2024). Neutron shielding properties of cellulose acetate CdO-ZnO polymer composites. *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng*, 10.

- Okonkwo, U. C., Idumah, C. I., Okafor, C. E., & Ezeani, E. O. (2023). Construction of radiation attenuating polymeric nanocomposites and multifaceted applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62(12), 1639-1661.
- Omar, M. A. A., & Elnabi, M. E. M. G. (2011). Gamma radiation synthesis and characterization of polyvinyl alcohol/silver nano composites film. *Journal of Science and Technology*, 12(1), 104-110.
- Pekdemir, M. E., Öner, E., Kök, M., & Qader, I. N. (2021). Thermal behavior and shape memory properties of PCL blends film with PVC and PMMA polymers. *Iranian Polymer Journal*, 30(6), 633-641.
- Pekdemir, M. E., Pekdemir, S. S., Yılmaz, D., Onay, H., & Nazem Qader, I. (2025). Snail Shell-Reinforced Waste-Based Polymer Composites for Radiation Shielding and Anti-Reflective Applications. *Polymers*, 17(23), 3115.
- Saied, M., Ward, A., & Hamieda, S. F. (2024). Effect of apricot kernel seed extract on biophysical properties of chitosan film for packaging applications. *Scientific reports*, 14(1), 3430.
- Sarkar, A. K., Bediako, J. K., Choi, J.-W., & Yun, Y.-S. (2019). Functionalized magnetic biopolymeric graphene oxide with outstanding performance in water purification. *NPG Asia Materials*, 11(1), 4.
- Selçuk Pekdemir, S., Yalçın Kuzu, S., Yılmaz, D., Pekdemir, M. E., Taş, R., & Kök, M. (2025). Physicochemical, Radiation Shielding, and Anti-Reflective Properties of PCL/PVC Nanocomposites Reinforced With Microwave-Synthesized FeS₂ Nanospheres. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(45), e57737.
- Shahriar Kabir, M., Hossain, M. S., Mia, M., Islam, M. N., Rahman, M. M., Hoque, M. B., & Chowdhury, A. S. (2019). Mechanical properties of gamma-irradiated natural fiber reinforced composites. *Nano hybrids and composites*, 23, 24-38.
- Thongpool, V., Phunpueok, A., Barnthip, N., & Jaiyen, S. (2015). BaSO₄/polyvinyl alcohol composites for radiation shielding. *Applied Mechanics and Materials*, 804, 3-6.
- Vázquez, M., Velázquez, G., & Cazón, P. (2021). UV-Shielding films of bacterial cellulose with glycerol and chitosan. Part I: equilibrium moisture content and mechanical properties. *CyTA-Journal of Food*, 19(1), 105-114.
- Yue, S., Wang, S., Hana, D., Huang, S., Sun, L., Xiao, M., & Meng, Y. (2023). Polyvinyl alcohol/montmorillonite nanocomposite coated biodegradable films with outstanding barrier properties. *ES Materials & Manufacturing*, 20(2), 834.