



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇİNKO BORAT KATKILI POLİMER KOMPOZİT ZİRH MALZEMELERİN
ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Toygar ÇARDAK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

NİSAN 2023

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇİNKO BORAT KATKILI POLİMER KOMPOZİT ZİRH MALZEMELERİN
ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Toygar ÇARDAK
(193136310009)**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN

NİSAN 2023



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 182N18 numaralı genel projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Toygar ÇARDAK

İmzası:

(Faint, stylized signature watermark)

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında olanca yoğunluğuna rağmen beni sürekli itekleyerek yardımını eksik etmeyen ve yol gösteren tez danışmanım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN'e, tez çalışması kapsamındaki yardımları ve değerlendirmeleri ile tezime vermiş oldukları ciddi katkılar için başta Dr. Öğr. Üyesi Ömer Yunus GÜMÜŞ hocam olmak üzere Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK'e en içten teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca nötron analizlerini gerçekleştiren Atatürk Üniversitesi fizik bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ali GÜROL'a çok teşekkür ederim.

Nisan 2023

Toygar Çardak
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
SEMBOLLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler	15
1.1.1 Radyasyon	15
1.1.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon türleri	16
1.1.1.2 Radyasyonun madde ile etkileşimi.....	21
1.1.1.3 Radyasyondan korunma	26
1.1.2 Polimerler.	34
1.1.2.1 Polimerlerin yapısal özellikleri	35
1.1.2.2 Polimerlerin mekanik özellikleri.....	37
1.1.2.3 Radyasyonun polimer malzemelerle etkileşmesi.....	41
2. MATERİYAL VE YÖNTEM.....	43
2.1 Kullanılan malzemeler	43
2.1.1 Termoplastik poliüretan	43
2.1.2 Polipropilen	44
2.1.3 Çinko borat.....	45
2.2 Kompozitlerin Hazırlanması	45
2.3 Test Numunelerinin Hazırlanması	47
2.4 Analiz ve Testler	48
2.4.1 Yakma analizleri	48
2.4.2 Çekme testleri.....	48
2.4.3. SEM-EDX görüntüleri	48
2.4.4 Gama analizleri	48
2.4.5 Nötron eşdeğer dozu ölçümleri	49
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
3.1 SEM-EDX Analizleri	51
3.2 Mekanik Test Sonuçları	55
3.3 Kütle Azaltma Katsayıları	64
3.4 Nötron Eşdeğer Dozu ve Tesir Kesitleri.	70
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	88

KISALTMALAR

ALARA	: Kabul Edilebilir En Düşük Değer (As Low As Reasonably Achievable)
ÇB	: Çinko Borat
EPA	: Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
HVL	: Yarı Kalınlık Değeri (Half Value Layer)
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
ICRP	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Radiation Protection)
keV	: Kilo Elektron Volt
MeV	: Mega Elektron Volt
OIT	: Oksidasyon İndüksiyon Süresi
PP	: Polipropilen
RoHS	: Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama (Restriction of Hazardous Substances)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microcopy)
TENMAK	: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TPU	: Termoplastik Poliüretan
TVL	: Ona Bir Kalınlık Değeri (Tenth Value Layer)
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (United Nations Scientific Committee for the Effects of the Atomic Radiation)

SEMBOLLER

μ	: Lineer Azaltma Katsayısı
μ_m	: Kütle Azaltma Katsayısı
μ_κ	: Çift Oluşumu Lineer Azaltma Katsayısı
μ_σ	: Compton Saçılması Lineer Azaltma Katsayısı
μ_τ	: Fotoelektrik Etki Lineer Azaltma Katsayısı
α	: Alfa Parçacığı
γ	: Gama Radyasyonu
n	: Nötron
Σ	: Makroskopik Tesir Kesiti
N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
Sv	: Sievert

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması	18
Çizelge 1.2: Alternatif (α, n) nötron kaynakları	20
Çizelge 1.3: RoHS tarafından kullanımı kısıtlanmış maddelerin tolere edilen maksimum konsantrasyon değerleri	29
Çizelge 2.1: Kullanılan malzemelerin özellikleri ve ağırlıkça yüzde oranları .	43
Çizelge 2.2: Kullanılan radyoaktif kaynaklar ve özellikler .	49
Çizelge 3.1: Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri.	57
Çizelge 3.1(Devam): Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri.	58
Çizelge 3.2: Termoplastik poliüretan (TPU) örnekleri için kütle azaltma katsayıları (cm^2/g)	65
Çizelge 3.3: Polipropilen (PP) örnekleri için kütle azaltma katsayıları (cm^2/g)	65
Çizelge 3.4: Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozit malzemelerin kütle azaltma katsayıları.....	69
Çizelge 3.5: Termoplastik poliüretan (TPU) için elde edilen nötron doz ölçümleri ve hesaplanan tesir kesitleri	71
Çizelge 3.6: Polipropilen (PP) için elde edilen nötron doz ölçümleri ve hesaplanan tesir kesitleri	72
Çizelge 3.7: Literatürde mevcut bazı malzemeler için nötron tesir kesiti değerleri ..	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Web of science tabanlı radyasyon zırhlama çalışmalarının yıllara göre dağılımı.....	2
Şekil 1.2: Web of science tabanlı nötron ve gama ışınları için zırh malzemeleri hakkında yapılan çalışmaların derlenmesi	3
Şekil 1.3: Web of science tabanlı nötron ve gama zırhlaması için polimer malzemelerle yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	3
Şekil 1.4: Radyasyonun sınıflandırılması.....	16
Şekil 1.5: Radyasyon kaynakları dağılım grafiği.....	16
Şekil 1.6 : Compton saçılması	23
Şekil 1.7: Gama ışınlarının kalınlığı x olan bir maddeden geçerken soğurulması	30
Şekil 1.8: Lineer azaltma katsayısı eşitliğinin şematize edilmesi.....	31
Şekil 1.9: Nötronun maddeden geçişi.....	34
Şekil 1.10: Termoplastik polimer malzemeler için gerilme/uzama grafiği	38
Şekil 1.11: Termoplastiklerin değişik sıcaklıklardaki gerilme/uzama eğrisi.....	39
Şekil 1.12: Gevrek ve sünek malzemeler için gerilme/uzama grafiği	40
Şekil 1.13: Moleküler ağırlığın çarpma dayanımı, gerilme dayanımı ve viskozite özellikleri arasındaki ilişki	41
Şekil 2.1: Poliüretan tekrarlayan birimi.	44
Şekil 2.2: Polipropilen monomer yapısı	44
Şekil 2.3: Kompozit hazırlamada kullanılan ekstrüder.....	46
Şekil 2.4: TPU numuneleri	46
Şekil 2.5: PP numuneleri	46
Şekil 2.6: Çekme test numuneleri.	47
Şekil 2.7: Gama analizleri için hazırlanan test numuneleri.	47
Şekil 2.8: HpGE dedektör kesiti	48
Şekil 2.9: Deneyde kullanılan Canberra NP100B nötron dedektörü.....	49
Şekil 2.10: Ölçümlerde kullanılan nötron kaynağı	50
Şekil 3.1: Çinko borat'a ait SEM görüntüleri	51
Şekil 3.2: Saf TPU yüzey görüntüleri sırasıyla a)100X-100µm ölçek, b)500X-10µm, c)5,00KX-1µm	52
Şekil 3.3: Ölçek 4,00 KX ölçek, 1µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b) %8,40, c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri	52
Şekil 3.4: Ölçek 5.00 KX, 1µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%36,45, b)%39,06, c)%43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.	52
Şekil 3.5: 1,00 KX ölçek 10µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b)%8,40 c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik polimer etkileşimleri.....	53
Şekil 3.6: Ölçek 1,00 KX, 10µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%36,45, b)%39,06, c)%43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik polimer etkileşimleri.	53
Şekil 3.7: Ölçek 100X, 100µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b)%8,40 c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.	53

Şekil 3.8: Ölçek 100X, 100µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla %36,45, %39,06, %43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.	54
Şekil 3.9: Sırasıyla 5,00KX-1µm, 4,00KX-2µm, %5,6, %8, %17 PP tanecik-polimer etkileşimleri.	54
Şekil 3.10: 500X-10µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla %5,6, %8, %17 çinko borat katkılı PP tanecik-polimer etkileşimleri.	54
Şekil 3.11: Numunelere ait genel gerilme-gerinim değerleri	55
Şekil 3.12: Numunelere ait çekme dayanımı değerleri.....	55
Şekil 3.13: Numunelere ait kopma anındaki % uzama değerleri.....	56
Şekil 3.14: Numunelere ait elastik modül değerleri	56
Şekil 3.15: Termoplastik poliüretan (TPU) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.	66
Şekil 3.15(Devam): Termoplastik poliüretan (TPU) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması ...	67
Şekil 3.16: PP örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayıları, sırasıyla 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.....	68
Şekil 3.16(Devam): Polipropilen (PP) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının sırasıyla 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.	69
Şekil 3.17: Çinko borat katkısının nötron doz transmisyonuna etkisi	73
Şekil 3.18: TPU örnekleri için kalınlık doz transmisyonu ilişkisi	73

ÇİNKO BORAT KATKILI POLİMER KOMPOZİT ZIRH MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Teknoloji dünyasındaki gelişmeler, radyasyonun birçok alanda yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bu sebepten dolayı, radyasyonun faydaları ile birlikte zararları da ortaya çıkmıştır. Radyasyondan yararlanırken zararını da en aza indirme ihtiyacı birçok araştırmanın başlığına konu olmuştur. Radyasyondan korunmak için çok sayıda yöntem vardır. Radyasyon zırhlama korunmak için en önemli yöntemlerin başında gelir. Radyasyonun çeşidine bağlı olarak zırhlama malzemeleri de çeşitlilik arz etmektedir. Malzemenin yoğunluğu, toksik özellik gösterip göstermemesi, hafifliği, esnekliği, maliyeti ve kolay elde edilebilir olması gibi özellikleri zırhlama malzemesi seçiminde etkilidir. Malzemelerin bu vasıflarından hareketle yola çıkılarak literatürde üzerinde çalışılan seramik, cam, çelik, beton ve polimerler sınıfından pek çok malzeme mevcuttur. Bu çalışmada ise çinko borat katkı polimer kompozitlerin nötronlar ve gama ışınlarına karşı zırhlama özelliği araştırılmak istenmiştir. Çalışma kapsamında termoplastik poliüretan (TPU) malzemeye sırasıyla %5, %10, %20, %30, %40 ve %45 oranlarında çinko borat ve polipropilen (PP) malzemeye ise sırasıyla %5, %10 ve %20 oranlarında çinko borat katkılanmıştır. Numunelerin kütle azaltma katsayıları sırasıyla 31, 59,5, 81, 276, 302, 356, 384, 661,6 1172 ve 1332 keV enerji değerlerinde hem deneysel hem de XCOM programı ile teorik olarak hesaplanmıştır. Nötron doz ölçümlerinden faydalanılarak deneysel makroskopik tesir kesitleri hesaplanmıştır. Ayrıca numunelerin çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması gibi mekanik özellikleri test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem TPU hem de PP örnekleri için 31, 59,5 ve 81 keV enerji değerlerinde artan katkı oranı ile kütle azaltma katsayılarının arttığı gözlenmiştir. Enerjinin artan değerlerinde çinko borat oranının artmış olmasının kütle azaltma katsayıları bakımından çok anlam ifade etmediği görülmüştür. Genel olarak nötron doz transmisyonu değerlerinin artan numune kalınlığı ve artan katkı oranına bağlı olarak azalma eğiliminde olsa da katkı maddesinin homojen olmayan dağılımına atfedilebilecek anomalilerin olduğu net bir şekilde gözlenmektedir. Öte yandan artan katkı oranına bağlı olarak çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi numunelerin mekanik özellikleri azalış gösterirken, elastiklik modülünün artış gösterdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen analiz ve testler göstermiştir ki; çinko borat katkı TPU ve PP örneklerinin nötronlar ve x-ışınları/düşük enerjili gama ışınları için alternatif bir zırh malzemesi olabileme potansiyeli vardır.

Anahtar kelimeler: Termoplastik poliüretan, Polipropilen, Çinko borat, Gama radyasyonu, Nötron ve Zırh malzemesi

PRODUCTION OF ZINC BORATE REINFORCEMENT POLYMER COMPOSITE SHIELDING MATERIALS AND DETERMINATION OF THEIR PROPERTIES

SUMMARY

Advances in the world of technology have enabled the widespread use of radiation in many areas. Though there are important benefits of radiation in different fields, its harms need to be addressed equally. The need to minimize the damage due to radiation has been the subject of many research. Radiation shielding materials are one of the most important subjects in this regard. Depending on the type of radiation, shielding materials may also vary. Properties such as density, non-toxicity, lightness, flexibility, cost and easy availability of the material are effective in the selection of shielding materials. There are various materials that could be considered as shielding materials such as ceramics, glass, steel, concrete and polymers. In this study, the goal was to investigate the shielding properties of zinc borate added polymer composites against neutrons and gamma rays. Within the scope of the study, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% and 45% zinc borate was added to thermoplastic polyurethane (TPU), and 5%, 10% and 20% zinc borate was added to polypropylene (PP), respectively. The mass absorption coefficients of the samples were calculated both experimentally and theoretically with the XCOM software at energy values of 31, 59.5, 81, 276, 302, 356, 384, 661.6, 1172 and 1332 keV. Experimental macroscopic cross sections were calculated using neutron dose measurements. In addition, mechanical properties such as tensile strength, modulus of elasticity and elongation at break were also tested. The obtained results showed that the mass absorption coefficients increased with increasing zinc borate ratio at 31, 59.5 and 81 keV energy values for both TPU and PP samples. No significant effect was observed in terms of absorption coefficients at higher energy values. Although the neutron dose transmission values did decrease due to increasing sample thickness and increasing zinc borate ratio, the reason behind the anomalies at higher energy levels were thought to be the result of inhomogeneous zinc borate distribution in the polymer material. On the other hand, it was observed that the tensile strength and elongation at break characteristics of the samples decreased, while the modulus of elasticity increased with increasing zinc borate ratio. As a result, the analyses and tests carried out showed that zinc borate doped TPU and PP samples have the potential to be used as shielding material for neutron, x-rays and low-energy gamma ray radiation.

Keywords: Thermoplastic polyurethane, Polypropylene, Zinc borate, Gamma radiation, Neutrons and Shielding material

1. GİRİŞ

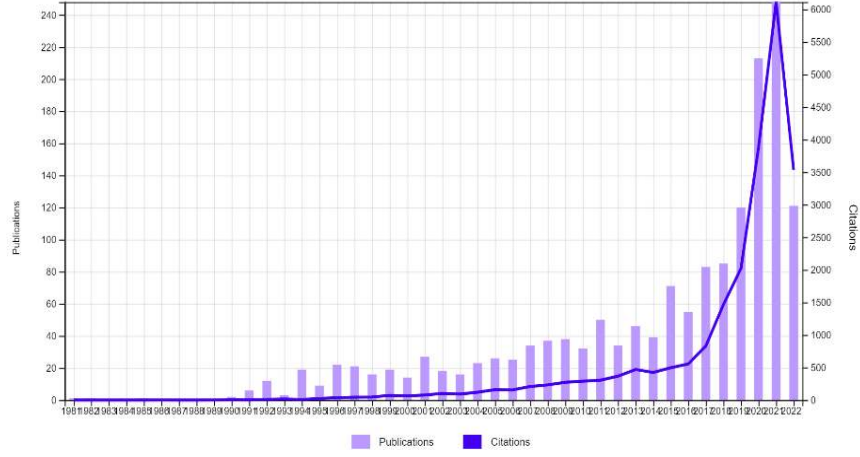
Radyasyonla çalışma güvenlik önlemlerinin azami seviyede olmasını gerektirmektedir. Radyasyondan korunmanın en önemli kuralı radyasyon seviyesini olabildiğince aşağılara çekmektir. Radyasyondan korunma üç temel prensibe dayanır. Bunlar; zaman, mesafe ve zırhlamadır. Uzaklık ve süre radyasyonun biyolojik etkilerini yok etmekte tek başlarına işe yaramazlar. İnsan sağlığı ve çevre kirliliği bakımından radyasyonun iyi zırhlanması gerekmektedir. Seramikler, cam malzemeler, beton, alaşımlar, çeşitli metaller ve polimer kompozit malzemeler olmak üzere pek çok zırh malzemesi bulunmaktadır. Zırhlanacak radyasyonun ve etkileşimlerinin iyi analiz edilmesi ve bu doğrultuda önlemler alınması zırhlama da birinci kuraldır. Radyasyon türleri doğası gereği farklı etkileşimlere neden olmaktadır. Bunlardan diğerlerine nazaran enerjisi ve giriciliği yüksek olan gama (γ) ve nötron (n) radyasyonu iyonlaştırıcı etkisi yüksek olan radyasyon türleridir. Çoğunlukla alfa (α) veya beta (β) yayınlayan kararsız atom çekirdeğinden çıkan çok yüksek enerjili fotonlar gama (γ) ışınlarıdır. Gama ışınları madde içinden geçerken, elektronlarla etkileşimlerde bulunur. Bu nedenle de atomlarda iyonlaşmaya neden olur. Nötronlar kullanım alanları geniş ve doğrudan olmasa da madde ile etkileştiklerinde ikincil radyasyona (α , β , γ ve x ışınları) neden olarak iyonlaştırıcı özelliğe sahip olan, bu nedenle zırhlanmaya ihtiyaç duyulan bir radyasyon çeşididir. Diğer radyasyon tiplerinden farklı olarak nötronlar yüksüz olduklarından madde ile etkileşime girdiklerinde Coulomb kuvvetinin etkisinde kalmadan maddenin derinliklerine kadar ilerleyebilirler. Bu kabiliyetleriyle nötronlar, bir madde çekirdeğinde değişiklik yapılması istenildiğinde kullanılabilirler. Nötron ile bombardıman edilen çekirdek nötronu soğurarak kütesini artırabilir. Kütesi artan atom kararsız hale gelir ve kararsız haldeki atom çeşitli ışımlar yaparak kararlı hale gelir ki bu esnada da çeşitli radyasyonlar yayımlanır. Nötronlar diğer yüklü parçacıklara kıyasla (alfa, beta, gama) madde içerisinde daha girici olduğundan zırhlanması da aynı ölçüde zor olmaktadır. Alfa ve Beta parçacıklarının malzeme içerisinde aldıkları yollar kısa olmasından dolayı hesaplama yapılırken genelde ihmal edilirler. Bu nedenle zırh malzemesi tasarımı sırasında nötron ve gama ışınları

dikkate alınmaktadır. Bor nötron zırhlamasında istenilen özelliklere haiz olan elementlerden birisi ve ülkemizde rezerv bakımından fazlaca bulunan bir mineraldir. Doğal olarak elde edilen bor minerali aşağı yukarı % 20 ^{10}B ve % 80 ^{11}B izotopu içermektedir. Borun termal nötron yutma tesir kesiti de 750 barn'dır. Doğada bor, serbest halde bulunmamakla birlikte oksijen ile birleşerek bor tuzları şeklinde bulunur. Kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) içeren bileşikler çok yaygındır. Bor'un yeryüzünde bilinen 230'dan fazla cevheri bulunmaktadır. Bor elementini cevherinden ayırmak pahalı ve zor bir işlem olduğundan dolayı sanayi dallarında, bor mineralleri olduğu gibi kullanılmaktadır. Dünya toplam bor rezervi 1,2 milyar ton olup; bu rezervin % 72,2'si Türkiye'de bulunduğundan dolayı Türkiye bor minerali açısından rakipsizdir [1].

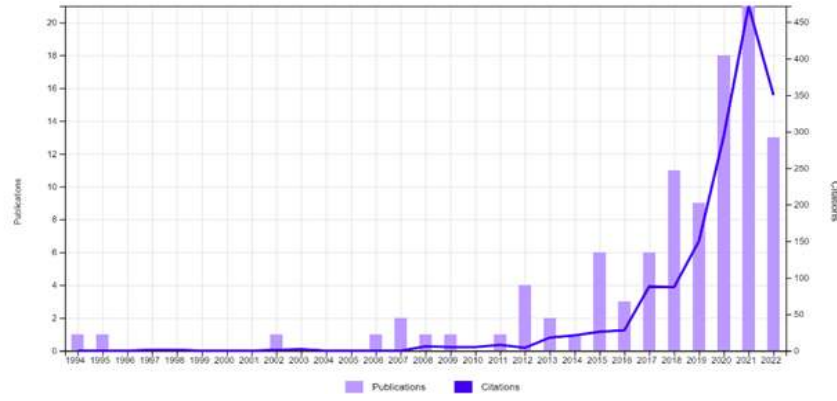
Nükleer tekniklerin uygulama alanlarının yaygınlaşması dolayısıyla yaygın kullanım alanının olması ile radyasyona karşı zırh malzemeler belirgin ticarileşme potansiyeli olan bir çalışma alanıdır. Radyasyon zırhlama ile ilgili olarak web of science veritabanına göre yapılan çalışmalar sorgulandığında Şekil 1.1'de görüldüğü üzere çalışmaların giderek hızla arttığı görülmektedir. Nötron ve gama ışınları için genel olarak zırhlama malzemesi sorgulaması sonucu Şekil 1.2' de, nötron ve gama ışınları için sadece polimer bazlı zırh malzemeleri hakkında yapılan sorgulama sonucu ise Şekil 1.3'de görüldüğü şekildedir. Şekil 1.1 referans alındığında, 2021 verileri dikkate alınarak yapılan kaba bir hesaplama göre, nötron ve gama radyasyonu zırhlama için yapılan çalışmaların yaklaşık % 8,5'ini, genel olarak radyasyon zırhlama ile ilgili yapılan çalışmaların ise sadece % 1,3'ünü polimer bazlı zırh malzemelerin oluşturduğunu söyleyebiliriz. Polimer malzemelerin sadece hafif ve esnek olabilme gibi iki önemli vasfı dikkate alındığında bile bu alanda çalışmaların yetersiz ve hala geliştirilebilecek yönleri olduğu açıktır.

2023	1	2008	491	1993	142
2022	832	2007	447	1992	182
2021	1,569	2006	421	1991	127
2020	1,327	2005	448	1990	56
2019	1,169	2004	342	1989	30
2018	996	2003	317	1988	28
2017	1,056	2002	299	1987	12
2016	821	2001	360	1986	20
2015	790	2000	317	1985	17
2014	733	1999	258	1984	7
2013	641	1998	288	1983	25
2012	613	1997	266	1982	14
2011	623	1996	295	1981	26
2010	475	1995	165	1980	12
2009	535	1994	212	1975	1

Şekil 1.1: Web of science tabanlı radyasyon zırhlama çalışmalarının yıllara göre dağılımı [2].



Şekil 1.2: Web of science tabanlı nötron ve gama ışınları için zırh malzemeleri hakkında yapılan çalışmaların derlenmesi [3].



Şekil 1.3: Web of science tabanlı nötron ve gama zırhlaması için polimer malzemelerle yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı [4].

Literatürde yapılan çalışmalar aşağıda kronolojik olarak sıralanmıştır: Bhuiyan ve Ahmed 1989'da Hindistan'da polietilen matrisin içine bor katarak poli-boron adında bir zırh malzemesi üretmişlerdir. Bu çalışmada nötron geçirgenliğinin zırh kalınlığına bağlı olarak değişimi ölçülmüş, kalınlık arttıkça makroskopik tesir kesitinin azaldığı dolayısı ile ortalama serbest yolun arttığı gözlemlenmiştir [5]. El-Sayed Abdo'nun 2002 yılında yapmış olduğu bir çalışmada, dolomit-kum, manyetit-limonit, barit-barit, ilmenit-ilmenit karışım zırhlama malzemelerinin, gama ışınları etkileşimleri sonrası toplam kütle azaltma katsayısı, hızlı nötronlar ile etkileşimleri sonrası saçılan nötron tesir kesit (Σ_R) değerleri teorik olarak hesaplanmıştır [6]. Gwaily ve arkadaşlarının 2002'de bor karbür ve doğal kauçuk kullanarak 40 HAF/NR kodlu termal nötron radyasyon zırhı oluşturmuşlardır. Örnekler 5 cm x 5 cm şeklinde hazırlanmış ve dört farklı kalınlıkta (2, 3, 6 ve 9 mm) üretmişlerdir. Deneyler 70°C'de gerçekleştirilmiş ve 28 gün sürmüştür. Bu zırhı oluştururken

kauçuğa değişik oranlarda B₄C katkılamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre oksidatif yaşlanma zamanı artan bor karbür miktarına bağlı olarak azalmıştır. Örnek kalınlığı arttıkça logaritmik geçirgenliğin lineer bir şekilde düştüğü görülmüştür. Yavaş nötronlarda %10'a kadar B₄C katılması ile makroskopik tesir kesitinin hızla arttığı, sonrasında ise çok değişmediği görülmüştür [7]. Adib ve Kilany 2003 yılında bizmut elementi kullanarak nötron filtre yapmışlardır. Bizmut elementinin termal nötron filtre olarak kurşun elementi yerine kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Nötron enerji değerleri 0,2 MeV ile 10 MeV arasında seçilmiştir. Ortam sıcaklıkları sırasıyla 100, 300 ve 500 K olarak ayarlanmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgulara göre, 20 cm kalınlığındaki polikristalin soğuk nötronlar için filtre olarak kullanılmasının etkili olabileceği belirtilmiştir. Tek kristal olarak kullanılan ve 10 cm kalınlığındaki bizmut, iyi bir termal nötron filtre olacağı öngörülmüştür [8]. Ersez ve arkadaşları 2006 yılında beton bir tabakaya monte edilecek %4 Sb ve %96 Pb'den oluşan 120 mm kalınlığındaki malzeme için ortaya çıkan radyasyonu engelleyebileceği öngörülmüştür. Yapılan çalışmada Si, Na, K, B katkılı camların gama ışınlarını tutamadığı ve bu malzemelerin zırh malzemesinin sağlayacağı güvenlik sınırları içerisinde olamayacağı belirtilmiştir. Seçilen malzeme yapısında Nötron yansıtıcısı olarak Ni-Ti alaşımı içerisinde borosilikat cam kullanılmıştır. İki farklı kalınlık değerinde üretilen malzeme radyasyonu etkili bir şekilde soğurduğu tespit edilmiştir [9]. Morioka ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları bir çalışmada, %6 oranında bor içeren ve 300°C sıcaklığa dirençli olan fenol bazlı nötron zırhlama malzemesi geliştirmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, %10 seviyelerine kadar artan bor yüzdesinde ve artan kalınlığa bağlı olarak nötron geçirgenliğinde düşüş görülmüştür [10]. Chichester ve Blackburn 2007 de yapmış oldukları bir çalışmada bizmut (Bi) ve kurşunun (Pb), biyolojik zırhlama malzemesi olarak kullanımında yeterli olamayacağını, bizmutun beton ile karıştırıldığında veya polietilen bir matris içerisinde kullanıldığında daha etkili sonuç alınabileceği ifade edilmiştir. Çeşitli kalınlıklarda üretilen numuneler test edildiğinde, Bi ve Pb'nin nötronları iyi tutamadığı, su, beton, polimer ve bizmut karışımının nötronları daha iyi tuttuğu sonucuna varılmıştır [11]. Chaudhari ve arkadaşlarının 2007 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, polipropilenin sertliği ve radyasyon direncinin polietilen ile oluşturulacak karışım sayesinde artacağı beklenmiştir. Ancak polipropilenin ve polietilenin uyumsuz ve karıştırılması zor bir yapıya sahip olduklarından dolayı uygun karışım oranının, yapılan mekanik ve elektron ışıması testleri sonrası,

polietilen katkısının %20'den fazla olması durumunda sağlanacağı vurgulanmıştır. Yüksek polipropilen içerikli karışım yoğunluklarının radyasyon doz oranının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Polipropilenin gerilme kuvveti radyasyon artışıyla azalmaktadır [12]. Haydaruzzaman ve arkadaşlarının 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada, tropikal ve subtropikal bölgelerde yetişen corchorus türlerinden elde edilen bir çeşit lif olan jüt ile %50 oranında katkılanmış polipropilenin gama radyasyonu altındaki performansı ölçülmüştür. Toplam uygulanan doz 250-1000 krad enerji aralığındadır. Elde edilen kompozit yapı en iyi sonuçları 500 krad enerji değerinde göstermiştir [13]. Huang ve arkadaşlarının 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada, metilen difenil diizosiyanat (MDI), polietilen glikol ve trietanolamin altında damıtılmıştır. Oluşan segmentli poliüretan köpük kuvars-cam içerisine kapatılmıştır ve nötron etkileşmesi ($1012 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) için 3,5 MW gücündeki termal-nötron reaktörüne konulmuştur. Etkileşim sonrası oluşan gazlar gaz-kromatografisi ile belirlenmiştir. Numunenin, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri nötron etkileşiminin artmasıyla artış göstermiştir. Pozitron spektroskopisi sonuçlarına göre; oksijen gazının varlığında poliüretandaki serbest hacim deliklerinin radyasyonun etkisiyle büyüdüğü gözlemlenmiştir (numuneye gönderilen pozitronların serbest hacimlerde uzun süre kalması sonucu böyle bir çıkarım yapılmıştır). Düşük nötron seviyelerinde, zincirlerin kayma deformasyonu birçok boşluğa neden olmuş ve numunenin serbest hacminin büyümesine neden olmuştur. Numunenin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) artmasıyla, poliüretan yapısal kusurlar azalmış ve buna bağlı olarak serbest hacimde küçülme görülmüştür [14]. Murray ve arkadaşlarının 2013 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, medikal alanda kullanılmak üzere sentezlenen poliüretanın elektron ışıması sonrası kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişiklik tespiti için karakterizasyon analizi yapılmıştır. Işıma sonrası elde edilen bulgulara göre poliüretan içerisindeki yumuşak bölgede radyasyon doz artışına bağlı olarak karboksilik asit oluşumu gözlemlenmiştir. 200 kGy ışımaya maruz bırakılan örneklerde çapraz bağlarda artış ve yüzey morfolojilerinde değişiklik gözlemlenmiş ve ışımaya maruz kalmayan örneklere göre yüzeydeki tepelik sayısında artış olduğu belirtilmiştir [15]. Alfaro ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında, polipropilen ve pirinç püskülü külü ile oluşturulan kompozitin iyonize radyasyona maruz bırakıldıktan sonra, mekanik ve termal testleri incelenmiş ve malzemede meydana gelen değişiklikler kaydedilmiştir. Pirinç püskülü külünün sahip olduğu düşük termal iletkenlik, termal şoklara karşı dirençli yapısı yoğun sıcaklığa ve ani

sıcaklık değişimine dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Taramalı diferansiyel kalorimetre analiz sonuçlarına göre saf polipropilen ve pirinç püskülü külü-polipropilen kompozitinin iyonize radyasyon doz miktarının artmasıyla erime sıcaklıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Sertlik testi sonucunda kompozit polipropilenin sertliği içerisinde bulunan pirinç püskülü külü sayesinde artış gözlemlenmiştir. Gerilim kuvveti testi sonucunda; 500 kGy lik aralıklarla çıkartılan doz oranına bağlı olarak saf polipropilenin 30 MPa gerilim kuvvetinin 15 MPa, kompozit polipropilenin ise yaklaşık olarak 24 MPa olan gerilim kuvveti 14 MPa seviyelerine kadar düşmüştür. Polimer yapıların iyonize radyasyonlar ile etkileşimleri sonucu polimer zincir ayrılması mekanizmalarının tetiklemesinden dolayı morfolojik yapıda bozunma meydana gelebileceği belirtilmiştir [16]. Marta Walo ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları bu çalışmada, poliestere/üretan için radyasyon hassasiyeti, mekanik özellikleri ve kimyasal bileşenlerin ilişkisi incelenmiştir. Poliüretanlar PUR1 (%40/%60 - %60/%40), %40 yumuşak segment, %60 sert segment, PUR2 (%40/%60 - %60/%40) olmak üzere dört farklı numune üzerinde çalışılmıştır. Oligo (etilen-bütlen adipat) diol kullanılarak sentezlenen poli(ester-üretan) 112 kGy dozda yüksek enerjili elektronlar ile uyarılmıştır. Etkileşim öncesi ve sonrası için mekanik termal analiz, ATR-FTIR spektroskopisi, mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; poliüretan numunelerdeki elastiklik yumuşak segmente bağlı olarak değişmektedir. Bu bölgede bulunan hidrojen bağları radyasyonun etkisiyle kopmaya başlamıştır. Ester bağlarının radyasyondan etkilenmesiyle %40 yumuşak, %60 sert segment içerikli poliüretan numuneleri için kopma uzamasında artış görülmüştür. Üretan gruplarındaki sert segmentlerin radyasyona karşı dayanıklı olduğu, bu bölgedeki hidrojen bağlarının radyasyondan daha az zarar gördüğü belirtilmiştir. Bu sebeple %60 yumuşak, %40 sert segment içerikli poliüretan numunesinin mekanik özelliklerinde değişim görülmemiştir. PUR1 %40/%60 numunesi radyasyon maruziyeti sonrası gerilim kuvvetinde 2 MPa'lık bir düşüş kopma uzaması değeri ise %880'den %1250'ye çıkmıştır. PUR2 40/60 numunesinin gerilim kuvvetinde 10 MPa'lık bir düşüş, kopma uzamasında %150 oranında artış meydana geldiği görülmüştür. PUR2 numunelerinin PUR1 numunelerine göre moleküler ağırlıkları sebebiyle daha fazla radyasyona duyarlı olduğu belirtilmiştir [17]. Heliang Sui ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, poliüretan, oda sıcaklığındaki nitrojende 1000 kGy'e kadar gama radyasyon dozlarına maruz bırakılmıştır. Gerilme testi, pozitron spektroskopisi ve dinamik mekanik analizleri

sonucunda malzeme içerisindeki serbest hacimler ile mekanik özellikler arasındaki ilişki belirtilmiştir. Pozitron spektroskopisi sonuçlarına göre poliüretanın sert bölgesinde gama radyasyonu etkileşimi sonrası herhangi bir bozulma görülmediği ve yapıda fazla bulunan fenil zinciri sayesinde radyasyona karşı dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Sert yapıda izosiyanat (-NCO) kullanılmasının, yapı içerisinde yeni kimyasal reaksiyonlar ile yeni zincirlerin oluşabileceğini ve bu zincirlerin serbest hacimlerini azaltabileceği öngörülmüştür. Ayrıca yumuşak bölgede gama radyasyonundan dolayı meydana gelen zincirlerin kırılması, yeni serbest hacimlerin oluşmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. Mekanik testler sonucunda ise; poliüretan yapısındaki bozulmaların kimyasal yapıdaki, zincir uçlarının artmasına ve yeni serbest hacimlerin oluşmasına yol açarak moleküller arasındaki bağların etkileşimini azalttığı belirtilmiştir [18]. Kulwinder ve arkadaşlarının 2015 yılında yayınladıkları makalede, gama radyasyonu etkileşim parametreleri; kütle azaltma katsayısı, kütle enerji azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve KERMA altı adet polimer ve plastik malzemeler için incelenmiştir. Seçilen malzemelerin zırhlama kabiliyetleri 10-1400 keV enerji aralıklarında ölçülmüştür. En yüksek toplam kütle azaltma katsayısı değeri 10-110 keV enerji aralığı için polivinilklorür (PVC), 110-1400 keV enerji aralığında ise radyo-kromik boya filmi olarak kaydedilmiştir. Düşük enerji aralıklarında (10-110 keV) PVC beton zırhlama malzemesinden daha iyi zırhlama davranışı gösterdiği görülmüştür. Ancak yüksek enerji Aralıklarında (10-1400 keV) beton zırhlama malzemesi için toplam lineer azaltma katsayısı değerinin malzemeler arasındaki en yüksek lineer azaltma katsayısı değeri olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebinin, malzemenin element bileşimi yoğunluğunun lineer azaltma katsayısından bağımsız olması olarak belirtilmiş. KERMA değerleri hava ile karşılaştırıldığında PVC ve beton zırhlama malzemesi (NBS) KERMA değerlerinin havanın sahip olduğu değerlerden 10-110 keV enerji aralığı için daha yüksek olduğu (>1) gözlemlenmiştir. Bu sonuç PVC ve beton zırhlama malzemesinin havadan daha fazla foton soğurabileceğini göstermektedir. PVC malzemesi için 10-1400 keV enerji aralıklarında etkin atom numarası maksimum değerini almaktadır. Malzemeler için yüksek etkin atom numarası gama ışınlarını iyi bir şekilde absorbe edebilme kabiliyeti anlamına gelmektedir [19]. Ghobashy ve arkadaşlarının 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada, farklı radyasyon dozları (0, 50, 100, 150 kGy) altında poliüretan için çapraz bağ oluşumunun etkileri gözlemlenmiştir. Gama radyasyonunun poliüretan üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla, termogravimetrik

analiz (TGA-DTG), fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR-ATR) ve x-ışını kırınımı (XRD) testleri yapılmıştır. Gama radyasyonu sonucunda poliüretanda meydana gelen çapraz bağ oluşumunun poliüretanın termal stabilitesini ve kristallliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Poliüretanların yapısı gereğince sert segmentin yumuşak segmente göre daha az kristallenebileceği belirtilmiştir. Poliüretan numunelerin renginin, oksijensiz vakumlu ortamda gama ışınları maruziyeti sonrası sarıya döndüğü gözlemlenmiştir [20]. Ambika ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış oldukları çalışmalarında izoftalik reçine temelli polimer kompozite farklı oranlarda (0, %5, %10, %20, %30, %40, %50, %60) Bi_2O_3 katkılanarak gama radyasyonu zırlama özellikleri incelenmiştir. Dolgu için kullanılacak olan Bi_2O_3 , matris içerisine elektrik blendırı ile daha sonra da ultrasonikatör yardımıyla dağıtılmıştır. Oda sıcaklığında 12 saat bekletildikten sonra vakum fırınında 80°C 'de 6 saat bekletilerek karakterizasyon için uygun ölçülerde kesim işlemi uygulanmıştır. Polimer kompozitin mekanik özelliklerinde %40 Bi_2O_3 katkı oranına kadar iyileşme gözlemlenmiştir. Radyasyon şiddetinin değerinin yarıya düşmesi için gerekli kalınlık olan yarı değer kalınlığı maksimum 2,77 cm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre ISO- Bi_2O_3 polimer kompozit mekanik özellikleri ve gama ışını azaltma verimliliği açısından zırlama malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [21]. Abdullah Al Naim ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada, belirli oranlarda (2,5-10%) Çinko oksit (ZnO) katkılı polivinil klorür (PVC) nano-kompozit, gama ışınlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini ölçme amacıyla farklı dozlarda (5-40 kGy) radyasyona maruz bırakılmıştır. Radyasyona maruz kalmayan numunelere ZnO nano partikülleri eklendiğinde malzemenin sünekliğinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gama radyasyonunu, nano-kompozit numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Gerilim kuvveti her enerji değeri için numunelerde artış göstermişken, elastik modülünde katkı oranının artmasıyla ciddi bir düşüş yaşandığı bildirilmiştir [22]. Zali ve arkadaşlarının 2018 yılında hazırladıkları bu çalışmada, boron karbit (B_4C) dolgulu termoplastik doğal kauçuk (TPNR) için nötron geçiş oranı ve kompozitin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Polimer kompozite farklı dolgu oranlarında (5-20%), B_4C katkılanarak eriyik şekilde karıştırılıp hazırlanmıştır. Elde edilen bulgulara göre derişim oranı arttıkça nötron geçirgenliğinin azaldığı (0,674'den 0,302 seviyesine), gerilme kuvvetinin ise katkı oranı artışı ile 3,9 MPa seviyesinden, 1,82 MPa seviyesine gerilediği görülmüştür [23]. Xiaomin Li ve arkadaşlarının 2019

yılında yapmış oldukları bir çalışmada, Poliimid/B₄C kompozit filmi farklı oranlarda mikro ölçekte B₄C katkılanarak in-situ polimerizasyon tekniğiyle üretilmiştir. Elde edilen polimer kompozitin nötron geçirgenliği analiz edilmiştir. Analiz edilen numunelerin termal stabilitesi büyük ölçüde artış gösterirken, mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra nötron geçirgenliği (I/I_0) B₄C katkı oranına bağlı eksponansiyel bir şekilde değişim göstermiştir. B₄C %30 katkı oranında optimum nötron geçirgenliği (I/I_0) 0,24 ve gerilme kuvveti 406 MPa olarak ölçülmüştür [24]. Pavlenko ve arkadaşlarının 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, poliimid matris üzerine, dolgu malzemesi olarak seçilen bizmut silikat (Bi₁₂SiO₂₀) ile hazırlanan polimer kompozit, zırhlama kapasite ölçümleri yapılmıştır. Polimer kompozit 350°C'de 1 saat bekletildikten sonra preslenerek 280°C'de 1 saat tavlama işlemi yapılmış ve soğuk odada 15°C'de soğutulmuştur. 0,5-1 mm ölçülerinde kesilerek elektron (1- 6 MeV) ve gama (0,4 - 0,662MeV) ölçümleri yapılmıştır. Gama ışını kaynağı olarak Ir-192 (0,4 MeV) ve Cs-137 (0,662 MeV) kullanılmıştır. Kompozitin gama radyasyonuna karşı koruyuculuğunu içeriğindeki % 48 oranında bulunan ağır bir element olan bizmut sağlamıştır. Deneysel ölçümlerde sırasıyla lineer azaltma katsayıları $0,87 \pm 0,10 \text{ cm}^{-1}$, $0,39 \pm 0,04 \text{ cm}^{-1}$, 0,4 MeV ve 0,662 MeV 'de bulunmuştur [25]. Nagaraja ve arkadaşlarının 2019 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, x-ışını, gama ışını ve nötron zırhlama parametreleri; yoğun olarak kullanılan polistiren, polipropilen, politetrafloroetilen (PTFE), polivinil klorür (PVC) ve poliklorotrifloroetilen (PCTFE) polimerleri için ölçülmüştür. Politetrafloroetilen (PTFE)'nin sahip olduğu, yüksek kütle azaltma katsayısı, Z_{eff} , spesifik gama sabiti ve düşük değerdeki HVL, TVL, ile seçilen polimerler arasında en göze çarpan zırhlama kabiliyetine sahip polimer olduğu belirtilmiştir [26]. Kaçal ve arkadaşlarının 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, 8 farklı polimerin (poliamid (nylon 6) (PA-6), poliakrilonitril (PAN), poliviniliden klorür (PVDC), polianilin (PANI), polietilen tereftalat (PAN), polifenilen sülfür (PPS), polipirrol (PPy), politetrafloroetilen (PTFE) 81-1333 keV enerji aralıklarında gama ve nötron zırhlama parametreleri ölçülmüş ve deneysel ve teorik veriler deney sonunda karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre enerji artışıyla lineer azaltma katsayısı değerlerinde hızlı bir düşüş görülmüştür. Düşük enerji bölgelerinde lineer azaltma katsayısı, numunelerin atom numarasına ve yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Deneysel sonuçlarda görüldüğü gibi poliamid ile polifenilen sülfür aralarındaki lineer azaltma katsayısı farkı 81 keV değerinde 0,056, 303 keV enerji değerinde ise 0,015

olduğu görülmüştür. Yüksek enerji seviyelerinde lineer azaltma katsayısının atom numarasından bağımsız olduğu ve polimerlerin azaltma yeteneklerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Numune poliamid ve PTFE'nin aralarındaki fark, 1333 keV enerji değerinde 0,006 kadar düşük bir değer olarak kaydedilmiştir. Bütün polimer numuneler için 81-1333 keV enerji aralıklarında HVL değeri artış göstermiştir. Numunelerdeki bu artış gelen fotonlar için malzemedeki zırhlama etkinliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. Polimerlerdeki hafif elementlerin (hidrojen gibi) bulunması nötron zırhlama kabiliyetini artıran bir parametredir. Deney sonuçlarında görüleceği üzere, poliamid içerdiği hidrojen atomlarının fazla olmasından dolayı uzaklaşan tesir kesit değeri numuneler arasındaki en yüksek değer olan 0,11 civarında ölçülmüştür. PTFE'deki hidrojen içeriğinin az olmasına rağmen saçılan nötron tesir kesiti değerinin yüksek olması ise malzemenin yoğunluğundan kaynaklandığı belirtilmiştir [27]. Sonika Thakur ve arkadaşlarının 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, nötron zırhlamaya karşı içerdiği düşük atom numaralı elementler sebebiyle etkili olabilecek olan polimetil metakrilat $(C_5O_2H_8)_n$, gama zırhlamalarına karşı etkili olacağı düşünülen Neodim elementi ile farklı katkı oranlarında (%0, %0,1, %0,5, %1, %2) katkılandırılmıştır. Gama zırhlama özelliklerini belirlemek amacıyla 356 keV ve 662 keV iki farklı foton enerjisinde ölçüm yapılmıştır ve lineer azaltma katsayısı, HVL ve TVL hesaplanmıştır. Kütle azaltma katsayısı ise geniş enerji bandı olan 1 keV - 100 GeV aralığında XCOM programı yardımıyla hesaplanmıştır. Nötron zırhlama parametresi olan hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti hesaplanıp sıklıkla kullanılan diğer nötron zırhlama malzemeleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre; Nd_2O_3 sahip olduğu ağır moleküler kütle, katkı oranının artırılmasıyla lineer azaltma katsayısında artışa neden olmuştur. Neodim oksit katkı oranı (%0,1) artırıldığında HVL ve TVL değerlerinde ani bir düşüş gözlemlenmiş ve daha sonra lineer bir azalma çizgisi takip etmiştir. Kütle azaltma katsayısı ölçümünde enerji artışıyla keskin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş eğrisi orta bölgede azalıp dengeli hale gelmiştir. Bu değişikliğin sebebinin ilk bölgede fotoelektrik soğurma, eğimin azalmaya başladığı bölgede Compton saçılması ve son olarak dengeli durumda çift oluşumu gözlemlenmesi olarak ifade edilmiştir. Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerinin Neodim oksit katkı oranının artmasıyla arttığı görülmüştür. En yüksek değer ise %2 katkılı Nd_2O_3 ($2-0,352 \text{ cm}^{-1}$) numunesi olan Neodim oksit katkı oranının en fazla kullanıldığı numunede tespit edilmiştir [28]. Berna ve

arkadaşlarının 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada, suda hidrojel oluşturabilen poli (2-hidroksietil metakrilat) (PHEMA) için gama zırhlama özelliklerine bakılmıştır. Azobisin (izobütironitril) ile 70°C’de 0,5 saat bekletilerek polimerizasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen polimer kompozit farklı katkı oranlarında (%10 - %50) tungsten (VI) ile katkılanarak 80°C’de hazırlanmıştır. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre; tungsten (IV) parçacıklarının PHEMA matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Üretilen numuneler arasında %50 WO₃ katkılı numunenin en yüksek lineer azaltma katsayısına sahip olduğu belirtilmiştir [29]. Sharma ve arkadaşlarının 2020 yılında yayınladıkları bir çalışmalarında, bizmut(III) oksiklorür (BiClO) katkılı polyester için gama radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Metil etil keton peroksit (MEKP) tepkime başlatıcı, kobalt oktaot %6 (Co-6) hızlandırıcı olarak seçilmiştir. Gama radyasyonu kaynakları olarak 59,5 keV-1408,0 keV aralığında enerji veren Mn-54, Na-22, Ba-133, Co-57, Co-60, Cs-137, Am-241 ve Eu-152 seçilmiştir. Kütle azaltma katsayısı değerinin gönderilen foton enerjisinin artmasıyla eksponansiyel biçimde, düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin baskın olmasıyla düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir (122,1 keV hariç). Hazırlanan polimer kompozitlerin (%5, %10, %15, %20) 1112,1 keV < E < 1408 keV enerji aralığında Compton saçılması etkisinden dolayı μ/ρ değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bi (Z = 83) elementinin ağır olmasından dolayı polimer kompozitteki BiClO oranı arttıkça μ değerinde artış gözlemlenmiştir. En yüksek lineer azaltma katsayısı (μ) ise %20 BiClO katkı oranlı polimer kompozitte tespit edilmiştir [30]. Guang Hu ve arkadaşlarının 2020 yılında yayınlamış oldukları bir çalışmada, epoksi reçine, boron karbit (B₄C), kurşun (Pb) ve grafen oksit ile oluşturulan çok katmanlı yapının gama ve nötron zırhlama özellikleri incelenmiş, çok katmanlı ve uniform malzemelerin arasındaki verim farkının hesaplanması amaçlanmıştır. Toplam onaltı katmandan oluşan yapının her katmanı genetik algoritması (GA) ve Monte Carlo N parçacık aktarımı (MNCP) ile dizayn edilmiştir. Malzeme 25°C sıcaklıkta üretilmiş olup deneysel ve teorik zırhlama parametreleri deneyler sonunda karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kademeli zırhlama malzemenin uniform malzemeye göre daha efektif zırhlama kabiliyeti gösterdiği belirtilmiştir [31]. Zaheer Uddin ve arkadaşlarının 2020 yılında hazırladıkları bu çalışmada, %40’a kadar boron karbit katkılı polietilenin Monte Carlo simülasyonu yardımıyla hızlı nötronlara (Am–Be nötron kaynağı) karşı nötron zırhlama özellikleri incelenmiştir. HDPE/B₄C

kompoziti SEM görüntü analizine göre %10 B₄C katkıli polietilen, saf polietilen ile kıyaslandığında yüzey kalitesini ve pürüzsüz yapısını koruduğu belirtilmiştir. Ancak B₄C katkı oranı artırıldığında yüzey morfolojisinin pürüzlü ve düzensiz bir hal aldığı bildirilmiştir. Bunun nedeni, malzemedeki kristalleşme oranının artması ve B₄C dağılımının etkilediği bir durum olabileceği belirtilmiştir. B₄C katkısı %10 olan kompozit malzeme için %63,6'lık bir oranla hızlı nötronların geçişini engellediği ve içerdiği uygun miktardaki boron ve hidrojen içeriği sayesinde yüksek kütle uzaklaştırma tesir kesit değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tüm numuneler arasında %10'luk B₄C katkılanırlan kompozitin iyi nötron zırlama, mekanik dayanıklılık, termal stabilite gibi özellikler ile öne çıktığı ifade edilmiştir [32]. Jinghui Fan ve arkadaşlarının 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada, etilen propilen dien monomer (EPDM), mikro ve submikro olarak kurşun tungstat (PbWO₄) ile katkılanırlarak gama radyasyonuna karşı zırlama özelliği ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Gama radyasyon kaynağı olarak Am-241 (59,5 keV), Eu-155 (87,5 ve 105,3 keV) radyoizotopları kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre; kütle azaltma katsayısı PbWO₄ katkı oranının artmasıyla ani bir yükseliş göstermektedir. Bu yükselişin sebebi, zırlama parametresinin farklı elementlerin farklı gama ışını enerji değerlerinde fotoelektrik etkiye bağlı olması ile açıklanmıştır. Submikro PbWO₄/EPDM numunelerin %1-10 oranında mikro PWO/EPDM numunelerine göre daha fazla kütle azaltma katsayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Mekanik test sonuçlarına göre; 400 phr submikro PbWO₄ dolgulu numunelerin gerilme kuvveti 9,95 MPa olarak hesaplanırken, mikro PbWO₄ dolgulu numunelerin gerilme kuvveti 4,28 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre katkı malzemesinin boyutları küçüldükçe, dolgu ile matris arasındaki yüzey etkileşimi önemli ölçüde artmaktadır. Kopma uzaması değerleri submikro ve mikro boyut dolgu katkıli numuneler için de azalmaktadır. Bunun sebebi olarak katkı oranının artırılmasıyla polimer zincirinin hareketi kısıtlamasına dayandırılmıştır [33]. Hasan Eskalen ve arkadaşlarının 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada, saf ve şeffaf boron (B) katkıli çinko oksit (ZnO) ince film sprey piroliz yöntemiyle sentezlenmiştir ve radyasyon zırlama kabiliyeti ölçülmüştür. Farklı boron katkı oranlarında (5, 10, 20%) katkılanırlan çinko borat (ZnO) için kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, ortalama serbest yol, onda bir kalınlık (TVL) ve yarı değer kalınlık (HVL) gibi zırlama parametreleri ölçülmüştür ve 6 MeV enerji değerine sahip elektronlar kullanılmıştır. En yüksek lineer azaltma katsayısı %20 boron katkıli ZnO ince filmde

($0,0125 \pm 0,0012 \text{ cm}^{-1}$), en düşük değer %5 boron katkı ZnO ince filmde ($0,0078 \pm 0,0012 \text{ cm}^{-1}$) elde edilmiştir. Numuneler arasındaki en yüksek kütle azaltma katsayısı, %20 boron katkı ZnO ince film ($0,00267 \pm 0,00034 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$) için ölçülmüştür. HVL 89,291 cm değerinden, 55,609 cm değerine ZnO içerisindeki boron katkılandırılma oranına göre düşmüştür. TVL değeri 296,618 cm değerinden, 184,728 cm değerine düşmüştür. Ortalama serbest yol 128,82 cm'den, 80,22 cm değerine düşmüştür. Yukarıda belirtilen zırhlama parametreleri ZnO film içerisindeki boron katkı oranının artmasıyla düşüğe geçmiştir. [34]. Kaçal ve arkadaşlarının 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda (%2, %4, %6, %8, %10) çinko (Zn) katkılanmış doymamış polyester (UP) için gama zırhlama parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü ve radyasyon kaynağı olarak A-241, Eu-152, Cs-137, Ba-133, Co-60, Co-57, Mn-54 ve Na-22 seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; matrise eklenen çinko katkısının foton zırhlama karakteristiğine pozitif anlamda etki yaptığı belirlenmiştir. En yüksek kütle azaltma katsayısı 59,5 keV için $0,330 \text{ cm}^{-1}$ değeri ile %10 oranında Zn katkısı ile sağlanmıştır [35]. Chen Hu ve arkadaşlarının 2021 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, nadir bir toprak elementi olan gadolinyum ve metal-organik çerçeve GdCl_3 ve piromelitik dianhidrit yardımıyla dimetilformamid (DMF) içerisinde sentezlenerek 5-10 mg trietilamin damlatılmış ve sertçe karıştırılmıştır. Çökelti oluşana kadar 12 saat boyunca 120°C 'de bekletilmiştir. DMF ile yıkandıktan sonra beyaz saf Gd-MOF elde edilmiş ve 70°C 'de kurutulmuştur. Gd-MOF 10 ml susuz Dimetilasetamid ile 30 dakika ultrasonik banyoda tutulmuş ve sonikasyon sonrasında 0,801g 4,4'- oksidianilin eklenerek 20 ml susuz dimetilasetamid buz banyosunda nitrojen atmosferi eşliğinde bekletilmiştir. 0,883g piromelitik dianhidrit eklenerek poliimid asit (PAA) çözeltisi elde edilmesi için 4 saat karıştırılmıştır. Elde edilen Gd-MOF/PAA 80°C 'de 3-5 saat ısıtılma işleminden sonra sırasıyla 100°C , 150°C , 200°C , 250°C , 330°C değerlerinde Gd-MOF/PI eldesi için fırında bekletilmiştir. Gd-MOF yapısının %1 ve %3 katkı oranlarında termal ve hızlı nötron zırhlama özellikleri superMC programıyla belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre Gd-MOF derişiminin %1-3 değişiminde termal nötron geçirgenliğinde düşüş gözlemlenmiştir. Bunun başlıca sebebi Gd-155 ve Gd-157 çekirdek sayılarının nötronlar ile daha fazla etkileşime geçmesi ayrıca Gd-MOF/PI filminin yüksek termal nötron zırhlama özelliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Kompozit filmin hızlı nötron zırhlama kabiliyetinde ise Gd-MOF katkı oranı arttırıldığında yavaşça bir azalma görülmüştür.

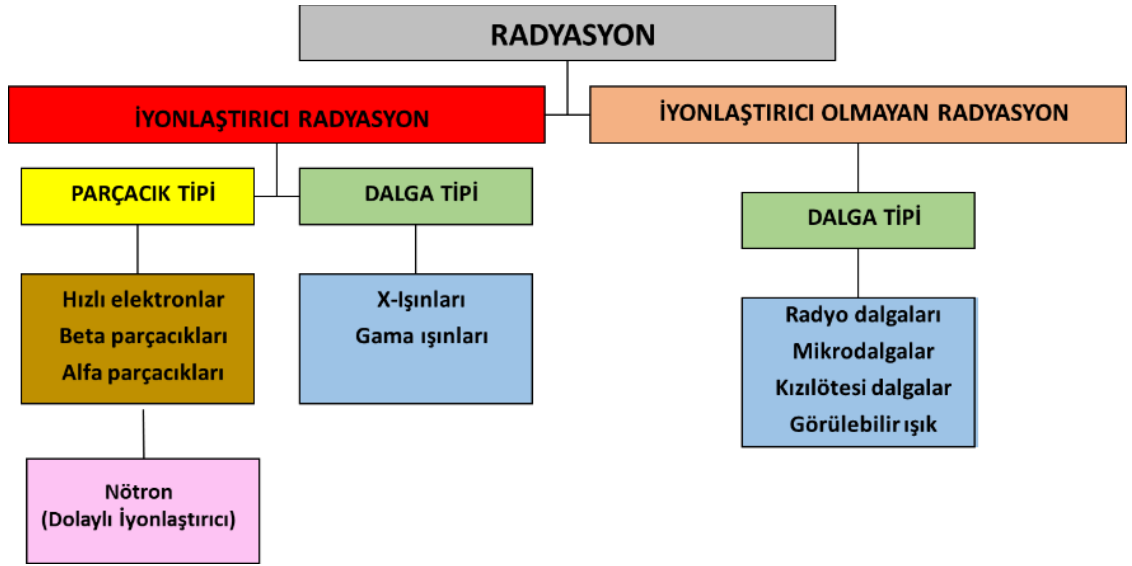
Bu düşüşün, hızlı nötronları durdurma kabiliyeti olan hidrojen atomlarının Gd-MOF katkı oranı arttıkça azalmasından kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir [36]. Kaçal ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları çalışmalarında hazırladıkları bu çalışmada, Li_2WO_4 katkılı polyester kompozitin gama ışıması altındaki performansını analiz etmiştir. Matris olarak Polyester, Li_2WO_4 ise belirli katkı oranlarında (%5, %10, %15, %20) dolgu malzemesi olarak seçilmiştir. Hızlandırıcı olarak kobalt oktoat %6 (Co-6), metil etil keton peroksit (MEKP) ise reaksiyon başlatıcısı olarak seçilmiştir. Co-60, Na-22, Cs-137, Mn-54, Co-57, Ba-133, Eu-152 ve Am-241 gama radyasyon kaynakları olarak kullanılmıştır (59,5 keV-1408,0 keV). Elde edilen bulgular, en verimli katkı oranının %20 Li_2WO_4 katkı oranında bulunduğunu göstermiştir. Seçilen polimer bazlı kompozitin düşük enerji aralıklarında medikal amaçlı kullanılabileceği öngörülmüştür [37]. Al-Buriah ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınlamış oldukları çalışmalarında, poli (N-izopropilakrilamid), polietilen tereftalat, polistiren, polikarbonat gibi polimerlerin düşük enerjilerdeki radyasyon azaltma katsayıları analiz edilmiştir. Bu bağlamda lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, MFP, Z_{eff} , N_{eff} , spesifik gama ışın sabiti, gama doz oranları, TSP, dışsal tesir kesit (veya uzaklaştırılan), toplam tesir kesiti, 0,01, 0,03, 0,07 ve 0,1 MeV enerji değerlerinde hesaplanmıştır [38]. Kamuran ve arkadaşlarının 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20) CdS katkılı polimer kompozitlerin gama ve nötron zırlama özellikleri incelenmiştir. Kadmiyum Sülfür homojen bir şekilde polyester ile karıştırılarak elde edilen kompozit tabakalar 10x20 mm şeklinde kesilmiştir. Polimer kompozitlerin karakterizasyonu için SEM ve XRD kullanılmıştır. Sonuçlar XCOM ve Geant 4 simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre %20 CdS katkılı polimer kompozitin kütle azaltma katsayısı diğer kompozitlere göre daha fazladır (59,5 keV’de $0,9500 \pm 0,0216$). Nötron geçişinin CdS katkı oranı arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir [39]. Kılıçoğlu ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınlamış oldukları bir çalışmada, farklı polimer yapılarındaki N95 tip koruyucu maskeler gama radyasyonuna maruz bırakılmıştır. Kütle azaltma katsayıları ve diğer parametreler teorik olarak WinXCOM ve MATLAB üzerinden, 0,015-20MeV enerji aralığında hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en düşük TVL, HVL, MFP değerleri N2 kodlu PVC’de görülmüştür [40]. Luka Pirker ve arkadaşlarının 2021 yılında yapmış oldukları makalede, Polipropilen yapıdaki FFP2 ve FFP3 maskeleri dezenfeksiyon işlemi için gama ışını ve elektron bombardımanına maruz bırakılmıştır. İşlem sonrası meydana

gelen yapısal değişiklikler dinamik mekanik analiz (DMA), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Raman ve X-ray fotoelektron (XPS) spektrometreleriyle ölçülmüştür. Radyasyon dozu üst seviyelere(50 kGy) çıkarılmadıkça örneklerin kimyasal yapılarında bozulma görülmemiştir. Sonuç olarak maskelerin dezenfeksiyon işlemi sonrasında filtrasyon performansı olarak eski hallerine döndükleri belirtilmiştir [41]. Yılmaz 2022 de yapmış olduğu tez çalışmasında, doymamış polyester reçine matriksine, metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt octoate (%6) eklenerek polimer kompozit elde edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ve Sn kullanılarak gama ışıması altında, radyasyon koruma verimi (RPE), radyasyon geçirme oranı, kütle azaltma katsayıları, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yol değerleri, elektronik tesir kesiti, moleküler tesir kesiti, atomik tesir kesiti, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlik parametreleri hesaplanmıştır. Radyoaktif kaynak olarak Co-57, Na-22, Mn-54, Ba-133, Am-241 ve Cs-137 kullanılmış, 59,5 keV- 1408,0 keV enerji aralıklarında numuneler gama ışımasına maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; %20 $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitin diğer numunelere kıyasla en iyi gama radyasyonu zırlama kabiliyetine sahip olduğu belirtilmiştir [42].

1.1 Genel Bilgiler

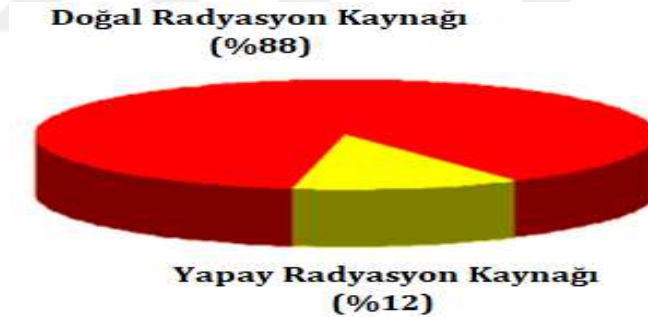
1.1.1 Radyasyon

Radyasyon parçacık veya elektromanyetik dalgalar aracılığıyla belirli bir ortama aktarılan enerjidir. Bu enerji madde üzerinde bıraktığı etkiye göre “iyonlaştırıcı radyasyon” ve “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” olarak ikiye ayrılır. İyonlaştırıcı radyasyon, çarptığı maddede iyonlar (yükli parçacık) oluşturabilen radyasyon çeşididir ve farklı türlerinin canlılarda bıraktığı ciddi biyolojik etkiler, nüfuz ettiği maddelerde ise yapısal değişikliklere yol açtığı için iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun aksine tehlikeli kabul edilmektedir. Radyasyonunun enerjisine ve niteliğine göre sınıflandırılması şekil 1.4’deki gibidir.



Şekil 1.4: Radyasyonun sınıflandırılması.

Maruz kaldığımız radyasyonun yaklaşık %88’lik kısmı doğal kaynaklı, %12’lik kısmı ise yapay kaynaklıdır (Şekil 1.5). Dünyadaki canlılar, evrenden gelen kozmik ışınlar ve yer kabuğunda bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyona sürekli maruz kalmaktadır. Buna ek olarak insan yapımı faaliyetler gereği ek olarak yapay kaynaklı radyasyona da maruz kalmaktadır.



Şekil 1.5: Radyasyon kaynakları dağılım grafiği.

1.1.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon türleri

İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri hakkında detaylı bilgi aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Alfa Parçacıkları

Nötron ve proton fazlalığından dolayı kararsız olan çekirdek parçacık yayımlayarak kararlı hale geçmeye çalışır. Denklem 1.1’de görüldüğü üzere çekirdek 2 proton ve 2 nötron kaybeder [43] .

$${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He + Q \quad (1.1)$$

Alfa parçacığı yapısal olarak bir helyum atomunun çekirdeğine eşdeğerdir. Yunan alfabesindeki (α) ile belirtilir. Ağırlıklı olarak atom numarası 82'den büyük olan radyonüklidler tarafından bozunma ürünü olarak yayımlanırlar. Alfa parçacıkları mevcut iki proton nedeniyle çift pozitif yüke sahiptirler. Bu özellik belirli bir madde içerisinde alfa parçacığı ile hedef maddenin elektronlarının arasındaki Coulomb çekimi sebebiyle iyon çiftleri oluşturur ve iyonizasyonu gerçekleştirir. Sahip oldukları iki nötron ise parçacığa ek kütle vererek hedef materyalin elektronlarıyla doğrudan çarpışmasını kolaylaştırır. Alfa parçacığı madde içerisinde katettiği mesafe boyunca kinetik enerjisini yitirinceye kadar çok sayıda iyon çifti üretir. Yüksek kütlesi ve yükü sayesinde iyonlaştırma yetenekleri çok fazladır ancak maddeye nüfuz etme kabiliyetleri çok düşüktür. Etkileşime girdikleri ortamlarda veya maddelerde enerjilerini çok çabuk kaybederler. Bu nedenle, doğrudan canlı dokuya zarar verme olasılıkları düşüktür, ancak alfa parçacığı yayan atomlar solunum yoluyla etkileşime girildiğinde vücutta zararlı olabilirler [44].

Beta Parçacıkları

Radyoaktif bir çekirdekte nötron ve proton oranı dengesizliğinin neden olduğu nükleer kararsızlık;

(I) denklem 1.2'de görüldüğü üzere nötronun çekirdek içerisinde, bir proton, bir elektrona dönüşmesiyle;

$$n \rightarrow p + e^- \quad (1.2)$$

(II) denklem 1.3'de görüldüğü üzere, bir protonun, nötron ve pozitron'a dönüşmesiyle;

$$p \rightarrow n + e^+ \quad (1.3)$$

(III) denklem 1.4'de görüldüğü üzere, elektron ile protonun birleşerek nötrona dönüşmesi ile üç farklı şekilde gerçekleşebilir;

$$p + e^{-} \rightarrow n \quad (1.4)$$

Belirli bir yük ve kütleye sahiptirler. Alfa parçacıkları kadar yavaş değiller ve madde içerisinde daha derine nüfuz edebilirler.

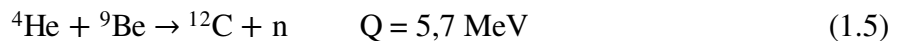
Nötronlar

Nötronun ilk deneysel gözlemi 1930 yılında Bothe ve Becker tarafından berilyum atomunun α parçacığı ile bombardımanı sonucu nüfuz etme özelliği yüksek olup ancak yüksüz bir radyasyon yayımlandığında gerçekleşmiştir. Önce yüksek enerjili bir gama ışını olabileceği varsayıldı. Kısa süre sonra Curie ve Joliot bu radyasyonun parafine düştüğünde 5,3 MeV enerjili bir protonun yayımlandığını bildirdiler. Ancak varsaydıkları gibi gama radyasyonu olmuş olsaydı, bu tür bir protonu serbest bırakabilmek için en az 52 MeV'lik bir enerjiye sahip olması gerektiğini hesapladılar. 1932 yılında Chadwick bilinmeyen radyasyonu bir parçacık olarak tanımlayan hipotezini öne sürmüştü. Kafa kafaya gerçekleşecek bir çarpışma esnasında 5,3 MeV enerjili bir nötron enerjisini protona aktarabileceğini öne sürmüştü. Geri tepme deneyleri yaparak hipotezini doğrulamıştır ve nötronu keşfeden kişi olarak tarihe geçmiştir [45]. Nötron sadece atom çekirdeği sınırları içerisinde kararlı olan yüksüz bir parçacıktır. Kütleli 1 u'ya (atomik kütle birimi) eşittir. Çekirdeğin dışında ortalama ömrü yaklaşık olarak 15 dakikadır. Önemli miktarlarda nötron radyasyonu çekirdek ve parçacık radyasyonu arasındaki reaksiyonlarda nötronların çekirdekten fırlatılmasıyla oluşur. Nötronların yüklerinin olmaması alfa ve beta parçacıklarından farklı olarak maddede doğrudan bir iyonizasyon olmamasını sağlar. Vücut içerisine kolayca nüfuz edebilir ve tehdit oluşturabilir. Nötronlar genellikle kinetik enerjilerine göre sınıflandırılırlar. Nötron sınıfları arasında keskin bir ayırım olmasa da yaklaşık olarak aşağıda verildiği gibi sınıflandırılır; [46].

Çizelge 1.1: Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması.

Nötron Çeşitleri	Enerji Değerleri
Soğuk nötronlar	<0,003 eV
Yavaş (termal) nötronlar	0,003 – 0,4 eV
Epitermal nötronlar	0,4 – 100 eV
Orta nötronlar	100 – 200 eV
Hızlı nötronlar	200 keV -10 MeV
Yüksek enerjili nötronlar	>10 MeV

Nötronlar sahip oldukları kısa ömürlerinden dolayı doğada serbest halde bulunamazlar. Hedef olarak seçilen çekirdek alfa, beta, proton ve gama ışınlarıyla bombardıman edilerek uyarılmış çekirdek elde edilir. Nötron yayınlanması ise bileşik çekirdeklerin son nötronunun bağlanma enerjisine bağlıdır. Eğer bağlanma enerjisi son nötronun bağlanma enerjisinden yüksekse, nötron yayınlanabilir. Geri kalan uyarılma enerjisi nötron ve çekirdek arasında paylaşılır. Kalan çekirdek uyarılmış haldedir ve daha sonra gama ışını yayımlayarak taban düzeyine geçer. Alfa parçacıklarının birleşerek oluşturduğu düşünülen çekirdeklerin ayrılma enerjileri büyüktür ve bu çekirdekler çok karardır (^{12}C , ^4He , ^{16}O). Hafif çekirdekler için bağlanma enerjisi 2-20 MeV, orta ağırlıktaki çekirdekler için 7-10 MeV, ağır çekirdekler için ise 6 - 7 MeV civarındadır. Nötron elde etmek için hafif çekirdekler tercih edilmektedir. Nükleer reaktörler en fazla nötron üreten kaynaklardır. Reaktörlerde yakıt olarak genellikle yavaş nötronlar için fisyon tesir kesitleri büyük olan ^{235}U ile yapay yollarla üretilen ^{233}U ve ^{239}Pu kullanılmaktadır. Reaktörlerde ısı nötron elde edebilmek amacıyla moderatör denilen yavaşlatıcı ortamlar kullanılmaktadır. Hızlandırılan yüklü parçacıkların belirlenen hedef üzerine düşürülmesiyle tek enerjili nötronlar üretilebilir. (α, n) , $(\alpha, 2n)$, (p, n) gibi reaksiyonlar sonucu oluşabilen nötronların enerjileri gelen parçacıkların enerjisine ve hedef çekirdeğin kütlesine bağlı olarak değişmektedir. Gelen yüklü parçacıkların enerjilerinin artmasıyla, istenilen enerjide nötron elde etmek için kullanılması gereken hedef çekirdeğin bulunduğu bölge de genişlemektedir. Kullanılması en uygun radyoaktif nötron kaynakları (α, n) kaynaklarıdır. En çok kullanılan hedef-radyoaktif madde karışımları ise polonyum-berilyum, radyum-berilyum, plutonyum-berilyum ve amerisyum-berilyumdur. Laboratuvar şartlarında nötron eldesi için α -Be kaynakları kullanılabilir. Bir α parçacığı ile berilyumun kararlı izotopu olan ^9Be çarpıştırılarak yaklaşık 13 MeV enerji değerine kadar nötron elde edilebilir. Denklem 1.5'de α -Be reaksiyonu verilmiştir.

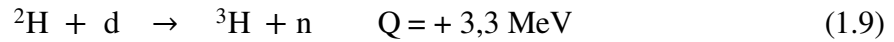
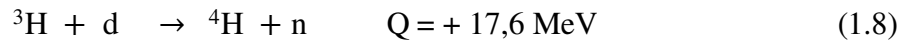
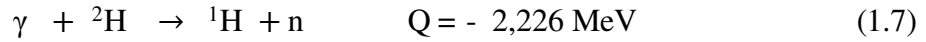
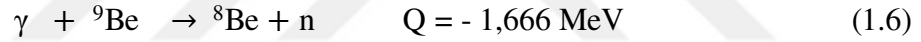


Alfa parçacıklarının oluşturduğu reaksiyonlar nötron kaynağı olarak kullanılsa bile Be reaksiyonlarına göre birim aktivite değerleri düşük nötron verimlerine sahiptirler [43]. Alternatif reaksiyonlar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2: Alternatif (α , n) nötron kaynakları [43].

Reaksiyon	Q- Değeri (MeV)	$10^6 \alpha$ parçacığı başına nötron verimi
$^{10}\text{Be}(\alpha, n)$	+1,07	Am-241/ α parçacığı için 13
$^{11}\text{Be}(\alpha, n)$	+0,158	Am-241/ α parçacığı için 13
$^{19}\text{F}(\alpha, n)$	-1,93	Am-241/ α parçacığı için 4,1
$^{13}\text{C}(\alpha, n)$	+2,2	Am-241/ α parçacığı için 11
Tabii Li	-2,79	
$^9\text{Be}(\alpha, n)$	+5,75	Am-241/ α parçacığı için 70

Gama ışınlarının ^9Be ile çarpıştırılmasıyla nötron elde edilebilir (γ -n). Foton kaynağı tek enerjili ise nötronlar da tek enerjili olarak elde edilebilir. Gama kaynaklarının yarı ömürlerinin kısa olmasından dolayı reaktörlerde yeniden aktifleştirilmeleri gerekmektedir. Foto nötron kaynaklarından elde edilen γ ışınları sadece belirli enerjideki nötronları üretmek amacıyla kullanılmaktadır [43]. Örnek reaksiyonlar denklem 1.6 ve denklem 1.7’de verilmiştir. Nötronlar nükleer reaksiyonlar sonucunda da elde edilebilirler. Kullanılacak olan yüklü parçacığın enerjisinin ve nötron yayınlanma açısına dikkat edilerek istenilen enerjilerde tek enerjili nötronlar elde edilebilir. Örnek reaksiyonlar denklem 1.8 ve denklem 1.9’da verilmiştir.



Gama Işınları

Radyoaktif bir çekirdek alfa veya beta bozunması yaptıktan sonra enerjisini tüketemediği durumda gama radyasyonu yayımlayarak enerjisini dengelemeye çalışır. Gama ışınları yüksek enerjili fotonlardır ve kısa dalga boyuna sahiptirler. Tıbbi bakım, elektrik üretimi ve endüstride yaygın olarak kullanılan gama ışını insan sağlığına zararlı olduğu bilinen iyonlaştırıcı radyasyonlar arasında giriciliği en

yüksek olan radyasyon çeşididir. Bu nedenle gama radyasyonundan korunmak için yüksek yoğunluklu malzemeler tercih edilir. Gama ışınları yoğun bir şekilde iyonlaşmaya sebep olmazlar, elektrik veya manyetik alandan etkilenip sapmazlar. Gama bozunumunun alfa ve beta bozunumundan farkı atom veya kütle numarasında değişikliğe neden olmaz. Ayrıca, alfa ve beta parçacıklarına göre gama ışınları çok kısa yarı ömürlere sahiptirler. Yüksek enerji durumundan (E_i) daha küçük bir enerji durumuna (E_s) geçen bir çekirdek fazla enerjisi ($\Delta E = E_i - E_s$) gama ışını yayınlanması, dahili dönüşüm ve çift oluşumu şeklinde üç yoldan birisiyle dışarı atmaktadır.

X-Işınları

X ışınlarını, 0,125 ile 125 keV enerji aralığında veya buna karşılık gelen, dalga boyu 10 ile 0,01 nm aralığında olan elektromanyetik radyasyon veya foton demeti olarak tanımlayabiliriz. X-Işınları hızlandırılmış parçacıkların bir hedefi bombardımanı sonucu yapay yollarla ve atomik geçişler ve çekirdek tarafından elektron yakalanması sonucu olarak doğal yollarla elde edilebilir. Atoma gönderilen yüksek enerjili elektron atomun düşük enerjili yörüngesinden elektron kopartır. Elektronun kopmasıyla yörüngede bir boşluk oluşur. Oluşan bu boşluk yüksek enerjili yörüngelerden gelen bir elektron ile doldurulur. Bu süreç sırasında yüksek enerjiden düşük enerji seviyesine geçen elektron fazla enerjisini X-ışını olarak yayınlar. X-ışınları 1895 yılında Wilhelm Roentgen tarafından katot ışını tüpü içerisinde elektrik akışı üzerinde çalışırken keşfedilmiştir. X-ışınları başta sağlık olmak üzere oldukça yaygın kullanım alanına sahip elektromanyetik radyasyon çeşididir.

1.1.1.2 Radyasyonun madde ile etkileşimi

Nükleer bozunmalarda gama ışımaları maddeyle etkileştikleri zaman gerçekleşen üç baskın mekanizma vardır;

- a) Fotoelektrik olay 0,01 MeV
- b) Compton saçılması 0,1 MeV
- c) Çift oluşumu 1,02 MeV

Üç mekanizma birbirinden bağımsız olarak gerçekleşir ve denklem 1.10, denklem 1.11 ve denklem 1.12' deki gibi yazılabilirler;

$$-\mu_t I \Delta x \quad (1.10)$$

$$-\mu_\sigma I \Delta x \quad (1.11)$$

$$-\mu_\kappa I \Delta x \quad (1.12)$$

Bu denklemlerdeki μ_t , μ_σ , μ_κ sırasıyla fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu lineer azaltma katsayılarıdır. Üç ana mekanizmaya ayrıca ufak etkilerde bulunan bazı olaylar şu şekilde sıralanabilir;

- (i) Thomson saçılması: Atoma iletilen foton ile serbest elektron yerine, büyük kütleli çekirdek arasında geçen bir etkileşim türüdür.
- (ii) Rayleigh saçılması: Düşük foton enerjili ve yüksek atom numaralı çekirdekler arasında yeterli enerji aktaramama durumudur.
- (iii) Nükleer fotoelektrik olay: Yüksek enerjili fotonun çekirdek tarafından soğurularak bir nükleonun dışarı atılması durumudur.
- (iv) Nükleer rezonans saçılma: Bir çekirdeğin, iki nükleer enerji seviyesi arasındaki farka eşit enerjiye sahip foton ile uyarılmasıyla gerçekleşir.
- (v) Elastik nükleer-potansiyel saçılma: Fotonların saçılmasına çekirdeklerin oluşturduğu elektromanyetik alanların sebep olması olayıdır.

Fotoelektrik Olay

Bir fotonun iç yörünge elektronları ile etkileşmesi sonucu, sahip olduğu enerji elektronunun bağlanma enerjisinden büyükse enerjisini elektrona aktararak yörüngeden kopartır. Kopmuş elektron fotoelektron olarak isimlendirilir. Bu olay ise fotoelektrik olay olarak adlandırılır. Düşük enerjili fotonlarda daha yaygın olarak görülür. Denklem 1.13'de gösterildiği gibi kinetik enerjiye sahip bir elektron yayınlanır.

$$K_e = h\nu - I_B \quad (1.13)$$

Denklemdaki $h\nu$ gelen foton enerjisini, I_B ise yörünge elektronunun bağlanma enerjisini temsil etmektedir. Fırlatılan elektron bir beta parçacığıyla aynıdır ve bilindiği üzere beta parçacıkları madde içerisinde ilerlerken iyonizasyon (ikincil iyonizasyon) üretir. Bir atomun K veya L katmanlarından elektron çıkartıldığında,

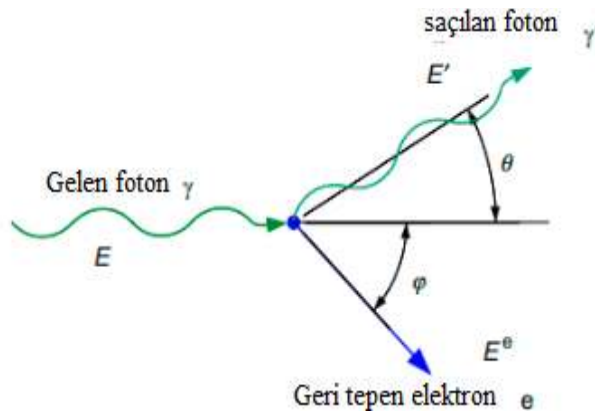
dış kabuklarda bulunan yüksek enerjili elektronlar düşük enerjili boşluğa doğru hareket ederek düşük enerji seviyesine geçiş yaparlar. Bu geçişler sırasında enerji farkı X- ışınının oluşmasına sebep olur. X- ışınları da gama ışınları ile aynı özelliklere sahiptir. Temel farkları gama ışınları atomun çekirdeğinin enerji değişimlerinden kaynaklanırken, X-ışını atomik yörüngede bulunan elektronların enerji dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır.

Fotoelektrik etkiyi deneysel olarak tanımlayacak olursak;

1. Radyasyon yoğunluğu farketmeksizin frekans değeri metalin eşik değerinin aşmadığı sürece elektronlar metalden kopamaz
2. Fırlatılan elektronların kinetik enerjisi, gelen radyasyonun frekansı ile doğru orantılı olarak artar, ancak radyasyon yoğunluğundan bağımsızdır.
3. Düşük ışık yoğunluklarında bile frekans değeri eşik değerin üzerindeyse elektronlar dışarı atılır.

Compton Saçılması

Kuantum mekaniğinin gelişiminde önemli yere sahip Compton olayı Arthur Holly Compton tarafından keşfedilmiştir. Fotoelektrik olayının aksine, Compton etkisinde bir foton serbest bir elektron ile çarpışır. Bu çarpışma sonucunda gama ışını ve geri tepme elektronu oluşur. Serbest elektronların yüksek enerjili fotonlar tarafından saçılmaları Compton saçılması olarak isimlendirilir. Momentum korunumuna göre elektronlar fotonların tüm enerjisini soğuramaz. Bu sebeple fotonlar kinetik enerjilerinin bir kısmını elektronlara aktarır θ açısı ile saçılır. İlerlemekte olan foton ise kalan enerjisi ile θ açısına bağlı olarak saçılır.



Şekil 1.6: Compton saçılması temsili.

Foton sapırıldıktan sonra enerjisini kaybeder ve yeni fotonun enerjisi, foton saçılma açısı olan θ 'ya bağlı olarak denklem 1.14'de ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \quad (1.14)$$

Denklem 1.15'de belirtildiği üzere enerji korunumu yasası gereğince, elektronun kinetik enerjisi fotonun kaybettiği enerjiye eşit olacaktır.

$$E_k^e = E - E' \quad (1.15)$$

Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden çok yüksek değil veya eşit ise fotoelektrik olayın oluşma olasılığı fazladır. Compton etkileşimi düşük enerji seviyelerinde baskın olsa da 100 keV enerji seviyesine kadar fotoelektrik etkiye nazaran daha az baskındır.

Çift Oluşumu Olayı

Enerjisi 1,02 MeV'den daha yüksek fotonlar yüksek atom numarasına sahip atomlar ile etkileşime girdiklerinde fotonlar yok olur ve bir elektron-pozitron çifti oluşmaktadır. Çift oluşmu bir fotonun çekirdek yanından geçmesiyle veya elektron yakınından geçmesiyle meydana gelir. Ortaya çıkan elektronlar ise iyonlaşmalara sebep olurlar. Enerjinin ve momentumun korunumunu gözeterek denklem 1.16'de çift oluşum denklemi verilmiştir;

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_- + mc^2 \quad (1.16)$$

Bu denklemde $h\nu$ gelen fotonların enerjisi, $2m_0c^2$ elektron ve pozitron durgun kütle enerjileri toplamıdır. Büyük kütleli bir çekirdek gelen kinetik enerjinin büyük bir kısmını absorbe edeceği için mc^2 ifadesi ihmal edilebilir. Böylece denklem (1.16a)'da belirtildiği gibi tekrar yazabiliriz;

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \quad (1.16a)$$

Bir nötron kinetik enerjiye sahip ise alfa, beta, pozitron veya elektron gibi diğer aynı kinetik enerjiye sahip olabilecek nükleer parçacıklara göre madde içerisinde daha kolay ilerleyecektir. Bunun sebebi daha önce bahsedildiği gibi nötronların yapısı gereği yüksüz olmaları ve Coulomb bariyerine takılmadan ilerleyebilmeleridir. Nötronların çekirdekler ile çarpışması, nötronların saçılması ve çekirdeklerin momentum korunumu ile geri tepmesi (elastik saçılma) veya nötronun kinetik enerjisinin gama radyasyonu olarak kaybı ile sonuçlanabilir (elastik olmayan saçılma). Bir nötronun atom çekirdeği tarafından yakalanması diğer nükleer parçacıkların emisyonu (elastik olmayan reaksiyon) veya çekirdeğin ikiye bölünmesi (nükleer fisyon) ile sonuçlanabilir.

Elastik Nötron Saçılması

Bir parçacığın kinetik enerjisinin bir kısmının kayıp olmadan diğerine aktarılması olayıdır. Diğer bir deyişle nötronun kinetik enerjisinin çekirdek ile çarpışması sırasında çekirdeğe aktarılmasıdır. Saçılan nötronun kinetik enerjisi ve geri tepen çekirdeğin kinetik enerjileri toplamı ilk nötronun çarpışmadan önceki kinetik enerjisine eşit olacaktır. Geri tepen çekirdek ise uyarılmış halde değildir. Elastik saçılma, hızlı nötronların hafif su veya parafindeki hidrojen (^1H), ağır sudaki döteryum (^2H), grafitteki carbon (^{12}C) gibi düşük atom numaralı çekirdekler ile etkileşimleri yaygın olarak bilinir. Nötron çekirdeğe çarptığı sırada ve elastik saçılmaya maruz kaldığı durumda nötron α açısıyla saçılır, çekirdek β açısıyla geri teper. Buradaki kinetik enerji (E_K) kaybı denklem 1.17’de belirtilmiştir.

$$E_K = \frac{4Mm_n}{M + m_n} \cos^2\beta \quad (1.17)$$

Denklemden belirtilen M değeri çekirdek kütlelerini, m_n değeri nötron kütlelerini, β geri tepen çekirdeğin açısını ifade etmektedir.

İneleristik Nötron Saçılması

İneleristik saçılma, hızlı nötronların yüksek atom numarasına sahip olan çekirdekler ile çarpıştığında görülür. Geri tepen çekirdek enerjisini gama radyasyonu olarak kaybedebilir veya bir süre kararsız durumda kalabilir. Nötronların ineleristik saçılmayı başlatabilmeleri için 1 MeV veya daha fazla bir enerjiye sahip olmaları

gerekmektedir. Nötron saçılması hızlı ve orta ölçekteki nötronları termal nötron seviyesine düşürmeyi amaçlayan bir mekanizmadır.

Nötron Yakalama

Atom içerisine nüfuz eden nötron çekirdek tarafından yutulur ve çekirdeği kararsız duruma getirir. Çekirdek bu kararsızlığı parçacık veya foton yayımlayarak gidermeye çalışır. Yavaş nötronların çekirdeklere yaklaştıktan sonra çekirdeğe girmesi ve yakalanması nükleer reaksiyonlar sebebiyle kolaydır. Bu nedenle termal nötronların birçok çekirdek tarafından yakalanması olasıdır. Çekirdeklerin nötron yakalama gücü nötron enerjisi kadar çekirdeğin türüne de bağlıdır. Nötron soğurma tesir kesiti (σ) 10^{-24} cm^2 veya “barn” bir çekirdeğin nötron soğurma gücünü ifade etmektedir. Nötron soğurma etkileşimleri (n, γ) , (n, α) , $(n, 2n)$, (n, p) ve fisyon olarak sınıflandırılabilir. Önemli nötron yakalama etkileşimlerinden bir tanesi olan U-235 ile bir nötronun reaksiyona girdiği denklem 1.18’de belirtilmiştir.



Nükleer Fisyon

Nötron kaynaklı fisyon reaksiyonunda nötronlar ağır element atomları ile etkileşime girerek çekirdek tarafından yutulur ve çekirdek kararsız duruma geçer. Kararsız çekirdek iki farklı çekirdeğe bölünür ve bu bölünme sırasında nötron ve yüksek miktarda enerji (^{235}U fisyonu için 194 MeV enerji) salınımı meydana gelir.

1.1.1.3 Radyasyondan korunma

Radyasyonun canlılar üzerindeki etkilerinin canlıya zarar verici ve hatta öldürücü özellikte olabileceği bilinmektedir. Bunun yanı sıra tıpta teşhis ve tedavi, bilimsel alanda araştırmalar, nükleer reaktörlerde ise enerji üretimi amacıyla radyasyonun kullanımı bir hayli fazladır. Radyasyonun kullanımı sırasında çalışanların ve tedavi görece kimselerin etkili bir biçimde korunması gerekmektedir. Bu bağlamda 1957 yılında kurulan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), 1928 yılında kurulan iyonize radyasyon sonucu oluşabilecek hastalıkların önlenmesi amaçlı kurulan Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP), 1955 yılında kurulan iyonize radyasyonun etkilerini belirlemek amaçlı kurulan Atomik Radyasyonun Etkileri

Üzerine Bilimsel Komisyon (UNSCEAR), 1970 yılında insan sağlığı ve çevre korunması için kurulan Amerika Birleşik Devletleri Çevre Korunma Ajansı (USEPA) radyasyon maruziyeti sonucu oluşabilecek insan sağlığı, çevre korunması gibi konularda söz sahibi olan ve radyasyon ile ilgili sınırlayıcı koruma önlemleri belirleyen kurumlardır. Bu çalışmalar ülkemizde ise Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK/NÜKEN) tarafından yürütülmektedir. Zararlı etkilerden korunmamızı sağlayan belirli bir takım önlemler ve kavramlar vardır. Bu önlemler ve kavramlar radyasyon sebebiyle doğabilecek bütün etkileri ortadan kaldıramadığı durumlarda bile etkiyi en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Radyasyondan korunmanın üç temel kuralı olan zaman, mesafe ve zırhlama canlılar ve çevre için uygun koruma standardı oluşturmaktadır.

Zaman

Radyasyon doz miktarı radyasyon kaynağı ile aynı ortamda geçirilen süre ile orantılı olarak artmaktadır. Bu sebeple kaynak yakınında olabildiğince daha az zaman geçirmemiz gerekmektedir. Radyasyona maruz kalma süresini planlayarak alınabilecek doz minimum seviyeye indirgenebilir. Radyasyona maruz kalınabilecek ortamda alınabilecek önlem gereğince radyasyon seviyesi dozimetre ile ölçülmelidir ve maruziyet yaşayan kişilerin alabileceği doz sınırına göre gerekli kontroller yapılmalıdır. Aşağıdaki denklem 1.19'a göre bölgede geçirilen süre baz alınarak doz hesaplanabilir;

$$Doz = Doz\ Oranı \times Zaman \quad (1.19)$$

Radyasyon maruziyetinin olduğu ortamlarda maruz kalabileceğimiz doz miktarı 0,1 μ Sv/s-10 μ Sv/s arası değişebilir ancak bu durum tek şartın doz limiti olduğu anlamına gelmez. ALARA prensibinden hareketle mümkün olan en düşük doz miktarının alınması sağlanmalıdır. Bu prensip gereğince maruziyet alanındaki kişilerin harcadıkları zamanın azaltılıp azaltılamayacağı analiz edilir.

Mesafe

Mesafe ilkesi, radyasyon yoğunluğunun kaynaktan uzaklaştıkça azalması ve mesafenin karesi ile ters orantılı olarak değişmesi kuralından yararlanmaktadır. Ters kare yasası olarak da bilinen bu kuralı matematiksel bir nokta olarak kabul

edeceğimiz. Saniyede S parçacık yayan bir kaynak ile açıklamaya çalışırsak, r yarıçaplı bir kürenin birim alandaki akış hızını φ [(cm)] olarak alalım. Kürenin $4\pi r^2$ 'lik alanı için tüm yüzeyin akışı $\varphi 4\pi r^2$ olacaktır. Eğer araya giren herhangi bir malzeme yok ise kaynak gücünü S olarak alabiliriz. Buna göre kaynaktan gelen akı denklem 1.20'de olduğu gibi,

$$\varphi = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (1.20)$$

Zırhlama

Zırhlama ilkesi, radyasyon maruziyeti yaşayabilecek kişilerin radyasyon kaynağı ile arasına zırhlayıcı materyal kullanılarak maruziyeti önleme amacı taşımaktadır. Bu materyaller radyasyon çeşidi ve enerjisine göre farklılık göstermektedir. Alfa parçacıkları için kullanılması gereken zırhlama malzemesi için kâğıt benzeri materyal yeterli olabilir ancak gama ve nötron radyasyonunu zırhlamak için daha kapsamlı ve yoğun malzemeler gerekmektedir. Bir malzemenin radyasyon zırhlama kabiliyeti üç faktöre bağlıdır. Bu faktörler radyasyon enerjisi, zırhlama malzemesinin yoğunluğu ve zırhlama malzemesini oluşturan elementlerin atom numarasıdır. Zırhlama parametrelerinden olan kütle azaltma katsayısı, radyasyon enerjisinin artışıyla düşer. Zırhlama malzemesinin yoğunluğunun ve içerdiği elementlerin atom numaralarının artmasıyla azaltma katsayısını artırabiliriz [47]. Radyasyon zırhlama malzemesi üretimi sırasında kullanılan başlıca malzemeler kurşun, agregalı beton, çelik gibi yüksek yoğunluklu ve ağır geleneksel malzemelerdir. Yüksek yoğunluklu olmaları bazı durumlarda avantaj olsa da ağır olmaları daha küçük çaplı zırhlama malzemesi ihtiyacı hissedilen alanlar için sıkıntı yaratmaktadır. Zırhlama malzemesinin yoğun olması ile x-ışınları ve gama ışınları zırhlama özelliği de doğru orantılı olarak artar. Radyasyon zırhlamada en verimli olarak kabul edilen malzeme kurşundur (Pb). Yüksek yoğunluğu ($11,34 \text{ g/cm}^3$) yüksek atom numarasına sahip olması, x ve gama ışınlarını azaltıcı etkinlikte olmasından dolayı zırhlama malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Kurşun (Pb) kolay işlenebilen yapısı, düşük iletkenliği ile kararlı elementler içerisinde en yüksek atom numaralı ağır metaldir. Ancak kurşun (Pb) sahip olduğu toksik etki nedeniyle sağlık açısından problem yaratmaktadır [48]. Avrupa parlamentosunun 2011/65/EU 8 Haziran 2011 tarihli kararına göre kurşun dahil (Pb) bazı maddelerin kullanımına toksiklik tehlikesi

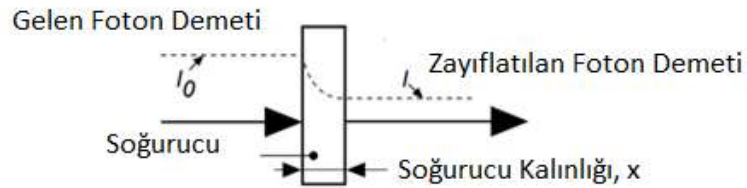
nedeniyle kısıtlama getirilmiştir. Çizelge 1.3’de kullanımı kısıtlanmış maddeler belirtilmiştir [49].

Çizelge 1.3: RoHS tarafından kullanımı kısıtlanmış maddelerin tolere edilen maksimum konsantrasyon değerleri.

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

Zırhlama alanında öne çıkan ve sıklıkla tercih edilen kurşun ve beton, uzun süreli kullanımda ve çevresel etkilere maruz kalmaları sebebiyle yapılarında mekanik bozulmalar meydana gelmektedir. Özellikle betonda meydana gelen çatlaklar, radyasyon geçirgenlik özelliğini olumsuz anlamda etkileyebilecek yoğunluk kaybına sebep olmaktadır [50, 51]. Kurşun x-ışınları ve gama ışınlarına karşı yüksek atom numarası (Z) ve yüksek kütle azaltma katsayısına sahip olması sebebiyle iyi bir zırhlayıcıdır. Ancak nötronların yüksüz yapısı kurşunu nötron zırhlama kabiliyeti konusunda etkisiz kılmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi kurşunun zırhlama açısından verimli olmasına rağmen negatif özellikleri araştırmacıları yeni malzeme arayışına itmiştir. Özellikle sağlık alanında toksik olmayan, çevre dostu, esnek, kolay üretilbilirlik ve hafiflik özellikleri sağlayabilecek malzemeler üzerinde son yıllarda çalışmalar sıklaşmıştır. Nötronlar radyasyon çeşitleri arasında giriciliği en yüksek ve en tehlikeli radyasyon çeşididir. Nötronlar, gama ve x-ışınlarından farklı olarak hafif çekirdeklerle yavaşlatılabilirler. Nötronlar için zırhlama yapılırken hidrojen gibi hafif çekirdeklerce zengin malzemeler, ağır çekirdek içeren malzemelere göre daha etkili olmaktadır. Nötron radyasyonu etkileşime girdiği çekirdekleri uyararak ikincil radyasyon olarak gama ışını yayınlanmasına sebep olur. Bu yüzden nötron zırhlaması yapılırken gama ışınlarına karşı da zırhlama yapılması gerekmektedir. Nötronlara karşı kullanılan en etkili zırh malzemeleri hafif çekirdekler içeren polimer grupları ve su gibi hidrokarbonlardır [52]. Zırhlama sürecinde nötronlar termal seviyeye indirilerek termalize edilmelidirler. Bu işlem nötronların enerjilerini tüketecekleri hafif atom çekirdekleri sayesinde olmaktadır. Zırhlama işlemi için seçilmesi gereken malzeme hidrojen gibi hafif elementlerce zengin olması gerekmektedir. Termalize olan nötronların ise bölgeden uzaklaştırılması için termal nötron tesir kesiti yüksek

olan bir malzeme olması gerekmektedir. Seçilecek zırh malzemesinin kolay elde edilebilir ve kolay hazırlanabilir olması da polimer matrisleri nötron zırhlama konusunda öne çıkarmaktadır [53]. Gama ışını için zırhlama malzemesi seçiminde yüksek atom numaralı ve yüksek yoğunluklu malzemeler tercih edilmelidir. Hedef malzemeye gelen fotonların, malzeme içerisinden geçtiği esnada şiddetinde azalma meydana gelir. Fotonların soğurucu malzeme içerisindeki bu etkileşim, Lambert Beer yasası çerçevesi içinde gerçekleşir. X-ışınları ve gama ışınlarının şiddetinin azalmasını da bu kanun ile açıklayabiliriz. Gama ışını fotonu malzemede etkilenmeden uzun mesafe katedebilir ancak etkileşime geçtiği anda etkinliği sona erer. Şekil 1.7’de gösterildiği gibi soğurucuya nüfuz eden bir ışıdan çıkan foton sayısını dikkate almamız gerekmektedir. İnce homojen bir levhaya temas eden tek enerjili paralel olarak gönderilen foton ışınının zayıflatılması, Beer-Lambert üstel bozunma yasasına göre denklem 1.21 ’deki gibi ifade edilmiştir



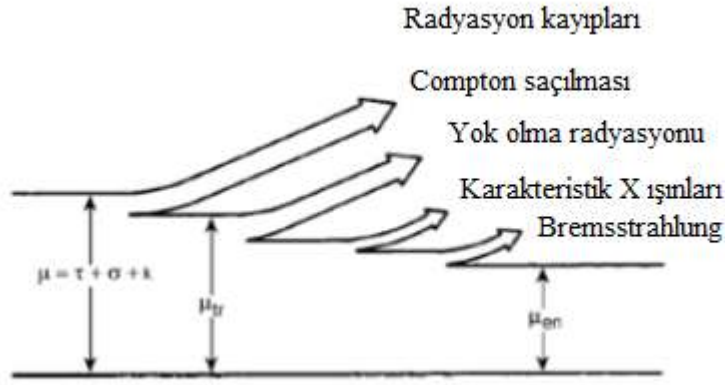
Şekil 1.7: Gama ışınlarının kalınlığı x olan bir maddeden geçerken soğurulması [54].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.21)$$

Bu denklemde I_0 , radyoaktif kaynaktan yayımlanan radyasyon şiddetini, I dedektör tarafından okunan radyasyon şiddetini μ lineer azaltma katsayısını, x ise soğurucu malzemenin kalınlığını göstermektedir. Lineer azaltma katsayısı soğurucu ortamdaki birim uzunluk başına etkileşim olasılığıdır. Radyasyon şiddetinin üstel olarak azalması, fotonun tamamen soğurulamayacağı anlamına gelmektedir. Foton şiddeti dedektör tarafından algılanamayacak seviyeye düştüğünde tamamen soğurma gerçekleşmiştir diyebiliriz. Lineer azaltma katsayısı soğurucu malzemenin veya ortamın yoğunluğuna bağlıdır. Fotonun, x kalınlığına sahip soğurucu maddeden geçerken soğurulma veya saçılmaya uğrama olasılığını ifade etmektedir. Daha da açıkça ifade etmek gerekirse lineer azaltma katsayısı, foton ile maddenin etkileşiminde gerçekleşen mekanizmaların olma olasılıklarının toplamı bize toplam lineer azaltma katsayısını vermektedir. Denklem 1.22’de, görüldüğü üzere

$$\mu = \mu_{\sigma} + \mu_{\tau} + \mu_{\kappa} \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (1.22)$$

sırasıyla fotoelektrik, Compton ve çift oluşum mekanizmalarının olma olasılık değerlerinin toplamı lineer azaltma katsayısını vermektedir. Bazı etkileşimlerin ortamdan enerji taşıyan radyasyon enerjisi ürettiği bilindiğinden dolayı, lineer azaltma katsayısı, bir ortamdaki veya soğurucu malzemedeki enerji birikimini belirlemek için kullanılmamaktadır. Fotonların azaltma katsayıları, gelen fotonların enerjisi ve soğurucu malzemenin atom numarasına bağlı olarak değişir.



Şekil 1.8: Lineer azaltma katsayısı eşitliğinin şematize edilmesi [54].

Kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısının özgül ağırlığa bölünmesiyle elde edilir. Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ , μ_m) birim alandaki kütle başına denk gelen foton şiddetindeki azalma olarak tanımlanabilir. Kütle azaltma katsayısı foton etkileşimi, biyolojik olarak enerji depolanması, zırlama ve dozimetrik malzemeler için temel bir büyüklüktür [55]. Kütle azaltma katsayısının büyüklüğü, foton enerjisine, soğurucunun kimyasal yapısına ve bağlarına, soğurucu malzemenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlıdır. Polimer kompozitler için teorik hesaplanan kütle azaltma katsayısı denklem 1.23'de olduğu gibi,

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (1.23)$$

belirlenmiştir. Denklemde $(\mu/\rho)_i$ malzemenin i. elementinin kütle azaltma katsayısı w_i , malzeme içerisindeki i. element için ağırlık kesridir. Nötronlar enerjilerine göre maddeden geçerken etkileşebildikleri gibi hiç etkileşmeden de geçebilirler işte bu durum tesir kesitiyle belirlenir ve σ sembolüyle gösterilir. Nötronların parçacık veya

çekirdeklerle olan etkileşimlerinin olasılığına mikroskopik tesir kesiti, ağır malzemelerle yaptığı etkileşimlerin olasılığına ise makroskopik tesir kesiti denir. Makroskopik tesir kesiti farklı etkileşimlerin toplamından elde edilmektedir. Denklem 1.24 ve denklem 1.25’de belirtilmiştir.

$$\Sigma = N\sigma \quad (1.24)$$

$$N = \frac{\rho}{A} N_A \quad (1.25)$$

Denklemdaki N hedef maddedeki atom yoğunluğu, ρ hedef maddenin yoğunluğu ve N_A ise avogadro sayısıdır. Numuneden geçmekte olan bir nötron için A alanı olarak tanımlanan ve kesit alanları s olan N tane hedef çekirdek ile etkileşim ihtimalleri denklem 1.26’deki;

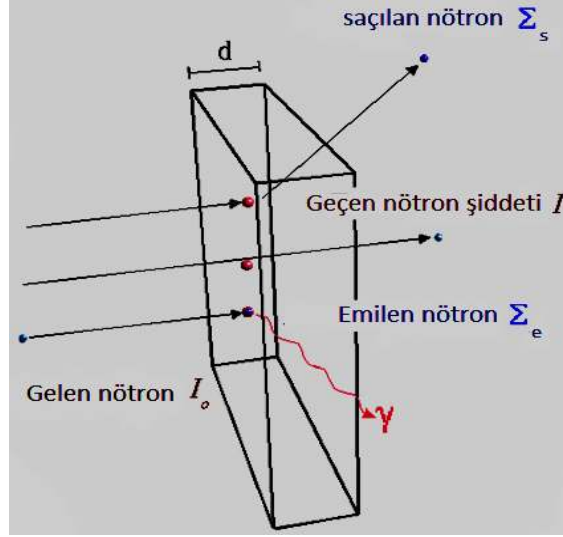
$$N.s/A \quad (1.26)$$

gibi ifade edilmiştir. Mikroskopik tesir kesitinin ölçüsü, nötronun soğurucu malzeme içerisinde yaptığı iki çarpışma arasındaki mesafe ölçütü olan ortalama serbest yola bağlı olarak değişmektedir. Reaktörlerdeki zincirleme reaksiyonlarının başlatılması için nötronların çekirdekle etkileşme olasılığını gösteren mikroskopik tesir kesitinin büyük değerlere sahip olması istenen bir özelliktir. Hedef atomun bir izotopu soğurucu özellik gösterirken, diğer bir izotopu ise kısmen geçirici özellik gösterebilir. Bu durumda soğurma ikincil γ -ışınlarının oluşmasına neden olur ve bu ışınların miktarı ve enerjileri maddeden maddeye değişiklik gösterebilir. Hızlı nötronların yavaşlatılması elastik ve elastik olmayan saçılmalarla sağlanır. Demir ve demirden daha yüksek atom numaralı elementler elastik olmayan saçılmalar için etkilidirler. Nötronların elektrik yüklerinin olmamasından dolayı zırhlamaları da çok zordur ve bu nedenle soğurucu atomların elektrik alanından etkilenmeden enerjilerine göre çekirdeğe kadar ulaşarak nükleer bir reaksiyonu başlatır ve ikincil radyasyon oluşmasına ön ayak olurlar. Nötronlar enerjilerinin büyük bir kısmını zırhlama malzemesiyle yaptıkları esnek ve esnek olmayan çarpışmalarla kaybederler. Esnek çarpışmalar sırasında nötronları yavaşlatmakta hafif elementler daha etkili olmaktadırlar. Nötron yavaşlatmada etkili olabilecek hafif elementlere örnek olarak hidrojen oranı yüksek parafin, su, beton, polimer gibi malzemeler verilebilir. Nötronların yakalanmasında ise genelde lityum ve bor tercih edilmektedir.

Özetleyecek olursak nötronlar için en etkili yavaşlatıcılar hidrojen içeriği yüksek olan malzemeler ve iyi soğurucular ise düşük enerjili nötronların soğurulmasında ikincil gama ışını oluşumuna karşı koyabilecek bir özellikte malzeme seçimi uygun olacaktır. Nötron yakalanması nötronların hedef atom tarafından yutulması ile başlamaktadır ve uyarılmış duruma geçen atomun izotopuna dönüşmesi veya gama ışını yayınlarak uyarılmış durumundan kurtulması ile son bulur. Nötron tutucu olarak genelde gadalinyum titanat, hafniyum diborid, titanyum diborid, kadmiyum, hidrojen, bor gibi elementler ve bileşikler kullanılırlar. Zırhlamada kullanılan su ve su bazlı soğurucuların korozyon problemi yaratabileceği göz ardı edilmemelidir ve önlemek için korozyon koruyucu kullanılabilir. Kurşun, zirkonyum ve bazı metaller tek başlarına hızlı nötronları soğuramazlar. Bahsi geçen malzemelerin fayda ve zararları olabileceğini öngörerek farklı tür ve özellikteki malzemeleri birlikte kullanmak nötron zırhlama yaparken verim almamızı kolaylaştırabilir. Nano ve mikro parçacıklı polimer kompozit yapılar atom numarası yüksek elementler ile kullanılarak nötron zırhlamada kullanılabilir. Nötronların şiddeti birim alan başına nötron sayısı (n/cm^2) veya akış oranını ile (n/cm^2s) ifade edilmektedir. I_0 şiddetindeki nötronların akışı d kalınlığında bir zırh malzemesi tarafından nötron kaynağının şiddetine ve nötron saçılma ve soğurma tesir kesiti katsayısına ($\Sigma_{s,e}$) bağlı olarak azaltılır (Şekil 1.9). Fotonların soğurulması için kullanılan Lambert Beer kanununa benzer olarak nötronlar için de aşağıda bulunan denklem 1.27'deki ifade gibi yazılabilir.

$$I = I_0 e^{-\Sigma_{s,e} d} \quad (1.27)$$

Denklemden yer alan I_0 ifadesi kaynaktan çıkan nötronların sahip oldukları şiddeti, I herhangi bir çarpışma olmadan bir zırh malzemesinde d mesafesini kat eden nötronları ifade eder. $\Sigma_{s,e}$ ifadesi, nötron parçacığının etkileşimde bulunmadan soğurucu malzeme içerisinden geçme ve ilerleme olasılığını temsil etmektedir. Nötron emilmesi veya saçılması sırasında birim uzunluk başına olasılığı gösterdiği için birim olarak cm^{-1} kullanılabilir. Kullandığımız bu ifade nötron zırhlama ve dozimetri çalışmalarında önemli bir parametredir.



Şekil 1.9 Nötronun maddeden geçişi [57].

1.1.2 Polimerler

Polimer kelimesinin kelime kökenini incelediğimizde, antik yunancada “poly” çok, “meros” ise parça anlamına gelmektedir. Polimerler çok sayıda moleküllerden oluşan ve molar kütleleri birkaç bin ile birkaç milyon arasında değişen büyük molekül öbekleridir. Küçük molekül birimlerinin (mer) uzun zincirler halinde birleşerek oluşturduğu zincir moleküllerinden (polimer), ikincil veya çapraz bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu malzemelerdir. Bir molekülün monomer olarak (“mono”, tek) adlandırılabilmesi için her birinin monomerlerle bağlanabileceği iki veya daha fazla bağlanma bölgesine sahip olması gerekmektedir. Monomer moleküllerini bir polimere dönüştürmek için kullanılan reaksiyonlara polimerizasyon denir. Polimerizasyon reaksiyonları ekleme ve yoğunlaşma polimerizasyonları olmak üzere iki şekilde oluşturulabilir. Ekleme polimerizasyonunda moleküllerin çift bağı açılır ve herhangi bir yan ürün oluşmadan iki ayrı bağ oluşumu gerçekleşir. Örnek olarak Polietilende ekleme polimerizasyonu verilebilir. Yoğunlaşma polimerizasyonunda bağ oluşumu reaksiyonları sırasında polimer zinciri dışında kalan bir molekül açığa çıkar ve bu molekül H_2O , HCl ve CH_3OH gibi basit moleküller olabilmektedir. Örnek olarak Fenol-formaldehid'in polikondenzasyonla oluşumu verilebilir [58]. Bir polimerin konifğürasyonu kimyasal bağları kırılmadan ve yeniden biçimlendirilmeden değiştirilememektedir. Dayanıklılık, rijitlik, esneklik, tokluk, elastiklik, kimyasal ve çözücü direnci gibi özellikler polimerik malzemelerin haiz olduğu özelliklerdir. Çeşitli dolgu malzemelerinin, renklendirici maddelerin, stabilizatörlerin ve buna benzer polimer malzemeleri takviye ediciler eklenerek

polimer yapılar geliştirilebilir. Bu sayede polimerler kullanıcılara çok sayıda kombinasyon sağlamakta ve farklı alanlarda kullanımını geçerli kılmaktadır. Polimerlerin, organik ve inorganik, elastomerler, fiberler, termoset ve termoplastikler gibi birçok farklı yapı türü bulunmaktadır.

1.1.2.1 Polimerlerin yapısal özellikleri

Polimerizasyon derecesi, kimyasal durum, fiziksel ve morfolojik özellikler gibi parametreler polimerin kalitesini ve kullanım alanını belirleyen parametrelerdir. Polimerizasyon derecesi zincirdeki -mer sayısı ile ifade edilmektedir. Polimerizasyon derecesi molekül türüne ve polimerizasyon şekline bağlıdır. Polimerizasyon derecesine bağlı olarak derecenin büyümesiyle zincirlerin hareketi zorlaşmaktadır ve malzemenin yüksek sıcaklık dayanımı, rijitlik, akma dayanımı artar, erime noktası yükselir. Molekül yapısının karmaşıklaşmasıyla kristallenme oranı düşer. Molekül zincirleri arasındaki zayıf Vander-Waals bağları çapraz bağların oluşumuyla güçlendirilebilmektedir. Polimerlerin yüzey morfolojisi ve topografyası malzemenin önemli özelliklerini temsil eder ve polimerlerin kimyasal üretim metotlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Polimer malzemelerin morfolojileri, su iticilik, yapışkanlık, mikro ve makro parçacıklar ile uyum gösterebilme, boyama gibi özelliklerle karakterize edilirler. Bu nedenle polimerlerin otomotiv, havacılık, inşaat, tekstil ve medikal gibi alanlarda kullanılması için yüzey kalitesi çok önemlidir. Polimerlerin morfolojik analizi; X-ışını kırınımı (XRD), kinetik-dinamik-mekanik analiz (DMA), termodinamik diferansiyel kalorimetre (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi farklı testler ile analiz edilebilir. X-ışını difraksiyon çalışmalarında tespit edildiği üzere basit yapı polimerlerin yapısı kristal yapıdadır. Kristal polimerler sıkı ve düzenli yapısı, atom ve moleküllerin ötelenebilir olmasıyla bilinmektedir. İyi bir öteleme her bir kristal tipini tanımlayan kafesin şeklini verir. Polimerlerde görülen kristal yapı metal ve seramik yapılardaki kristal yapılardan daha farklı olmaktadır. Polimerlerin içerisindeki kristal yapıları, molekül zincirlerinin birbiri ardına kristal bölge adını verdiğimiz bölgelerde sıralanmış şekilde görebiliriz. Hiçbir polimerde kristal yapının oranı %100'e erişmemektedir. Kristal yapılar polimerlerin üretim aşamasındaki katılaşma sırasında ortaya çıkmakta olup soğurma hızıyla ters orantılı olarak değişir. Düşük soğurma hızı kristallerin oluşması için uygun ortamı sağlamaktadır. Alarici ve arkadaşlarının 2008 yılında yaptığı çalışmada, gama ışını doz oranlarının biyomedikal polipropilenin

morfolojisine ve kristal yapısına etkisi araştırılmıştır. Gama doz oranının 10 kGy seviyesine çıkmasıyla polipropilenin kristalleşme miktarında artış gözlemlenmiştir. Gama radyasyon doz oranının 25 kGy seviyesine yükseltilmesinden sonra kristallik derecesinde azalma görülmektedir. Gama ışıması sonrası polipropilende görülen kristal yapının artışı, bağ yapıdaki zincir ayrılması sonucunda oluşan mekanik özelliklerde bozulma ve moleküler ağırlıkta düşüş gibi etkiler eşlik etmiştir. Kristal yapıdaki değişikliklerin zincir ayrılması, çapraz bağ oluşumu, radyasyon dozuna bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir [59]. Amorf polimerler olarak bilinen poli (metil metakrilat) (PMMA), polistiren (PS), polikarbonat gibi polimerlerin yapılarında kristal yapıların eksikliği ve büyük molekül zincirlerinin arasındaki bağların güçsüz olduğu bilinmektedir. Genellikle amorf yapı polimerlerin yoğunlukları yarı-kristal polimerli yapılara göre daha düşük seyreder. Kendilerini tekrar eden lifler yerine karmaşık lif düzeni bulunmaktadır. Kristal polimerlere göre daha yumuşaktırlar, kimyasal dirençleri zayıf ve erime noktaları düşüktür. Malzeme içerisindeki moleküler yapılar tarafından doldurulamayan hacimler, serbest hacim olarak adlandırılmaktadır. Polimer yapılarıdaki serbest hacimlerin varlığı malzemenin termal ve mekanik özelliklerini ciddi şekilde etkilemektedir. Wei Huang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kullandıkları polimer yapıda bulunan serbest hacimlerin radyasyonun etkisiyle büyüdüğü gözlemlenmiştir. Numunenin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) artmasıyla polimer yapıda serbest hacimlerde küçülme görülmüştür [14]. Camsı geçiş sıcaklığını polimer zincirlerinin ısıyı soğuramadıkları noktada elastik özellik göstermeye başladığı geçiş noktası olarak açıklayabiliriz. Camsı geçiş sıcaklığından sonra polimerler camsı özelliklerini yitirir ve viskoz özellikler kazanmaya başlarlar. Polimer yapıdaki boşlukların camsı geçiş sıcaklığına yaklaştıkça arttığı gözlemlenir. Camsı geçiş sıcaklığı zincirlerin yapısı ve kristallik-saflik durumuna bağlı olarak değişebilir. Çapraz bağlı polimerler lineer polimerlere göre yapılarındaki serbest hacimlerin sayısının az olmasından dolayı kimyasallara karşı daha dayanıklıdır. Birçok polar gruba sahip polimer polar kimyasallara karşı hassaslık gösterir. Aynı polimer polar gaz ve sıvılara karşı daha geçirgendir. Bu argümanın tersi ise apolar polimer polar gaz ve sıvılara karşı direnç göstermektedir. Örnek olarak polietilenin su geçirgenliği çok düşüktür ancak oksijen geçirgenliği çok yüksektir. Başka bir örnek verecek olursak poli(vinil alkol) yapısı düşük oksijen geçirgenliğine ve yüksek su geçirgenliğine sahiptir. Polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) güneş ışığı altında kolayca bozulabilmektedir. Polietilen

güneş ışığına dayanıklı olsa bile çevreye zarar verebilmektedir. Bazı mikroorganizmalar polimer yapıları hidroliz ve oksidasyon ile katalize ederek bozulmasına sebep olabilir [60, 61].

1.1.2.2 Polimerlerin mekanik özellikleri

Her malzemenin belirli bir karakteristik “gerilme-şekil değiştirme” grafiği vardır ve bu grafik çekme deneyi ile hesaplanabilir. Mekanik özellikler malzemenin dislokasyon yoğunluğu, atomlar arası bağ kuvvetleri veya üretim teknikleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Polimerler için temel mekanik karakteristik özellikleri; kopma uzaması, Young modülü, çekme kuvveti, tokluk ve viskoelastiklik gibi parametrelerdir. Bir kesit için birim alana düşen kuvvet gerilim olarak tanımlanır. Kuvvet kesite dik ise normal gerilme (σ), kuvvet numunede açılı değişimine neden oluyor ise kayma gerilmesi (τ) olarak tanım yapılır. Dış kuvvetlerin numuneler üzerindeki etkisi sonucu malzemenin uğradığı şekil değişimini elastik veya plastik şekil değişimi olarak adlandırabiliriz. Gerilme altındaki numunelerde ölçüm öncesi boy değeri L_0 , boy değişimi ΔL ile ifade edilir. Bu değerleri birbirlerine oranladığımızda denklem 1.28’deki gibi birim uzamayı (ε) elde ederiz.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.28)$$

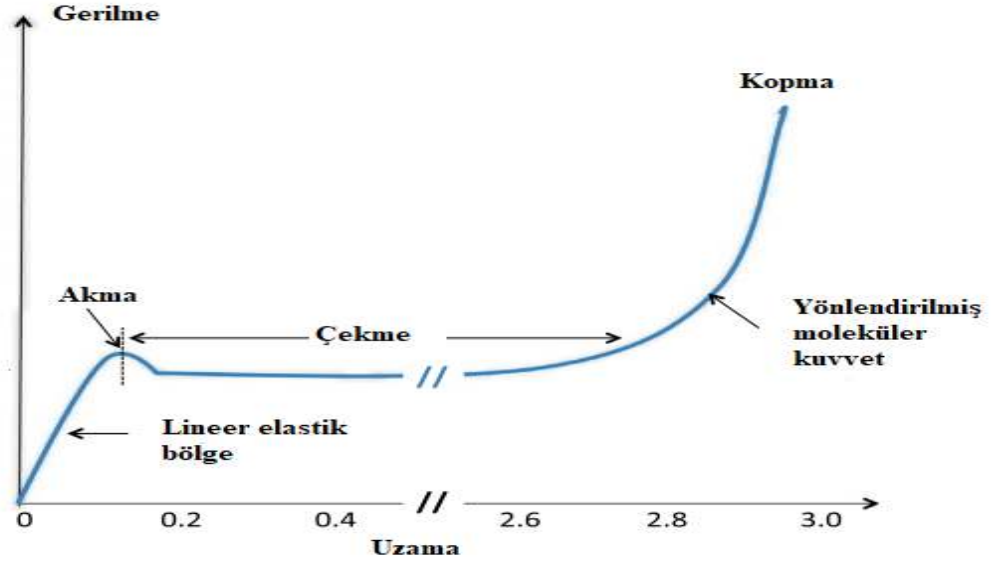
Elastik bölgede gerilme ve birim uzama birbiriyle doğru orantılıdır ve bu bölgede Hooke kanunu geçerlidir. Gerilme-uzama grafiğindeki doğrunun eğimi ise elastik modül olarak adlandırılmaktadır.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (1.29)$$

Çekme deneyi malzemelerin dayanımını ve mekaniksel davranışlarını belirlemek için yapılmaktadır. Numunelere düzenli bir şekilde artırılan çekme zorlamaları uygulanmaktadır. Çekme deneyleri numuneler kopma noktalarına kadar zorlanır ve koptuktan sonra deney tamamlanır. Uygulanan kuvvet F , zorlanma ile oluşan boy değişimi ΔL olarak tanımlarsak denklem 1.30’da,

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (1.30)$$

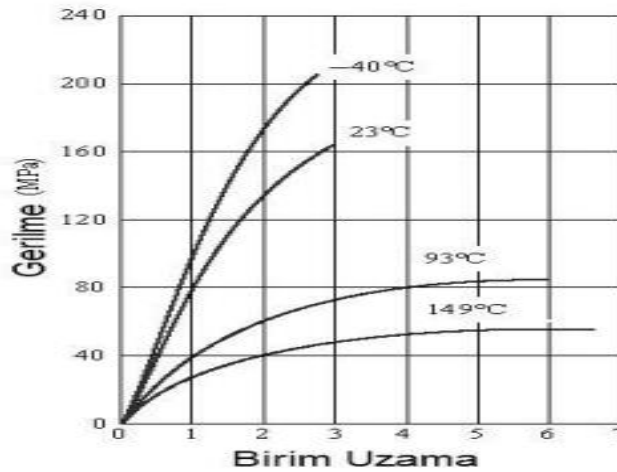
şeklinde gerilme değeri ifade edilir.



Şekil 1.10: Termoplastik polimer malzemeler için Gerilme/uzama grafiği [83].

Eğrinin akma dayanım noktasına kadar olan bölümünde şekil değişimleri elastiktir. Akma gerilmesinin aşılmasından sonra ise kalıcı şekil değişimleri başlamaktadır. Eğri üzerindeki kuvvet boşaltılmaya çalışılırsa, malzemede elastik şekil değişimi görülür ancak birim uzamalar kalır. Elastik bölgede Hooke Kanunu geçerli olduğu için gerilme ile birim uzama doğrusal olarak artış gösterir. Bu değer malzemenin atomları arasındaki dislokasyonlar ve kafes yapıları ile ilgilidir. Eğrinin dik bir pozisyonda olması malzemenin tok, yatay pozisyonda olması ise sünek olduğu anlamına gelmektedir. Akma sınırı dislokasyonlara bağlı olarak gelişir. Akma sınırındaki dalgalanma, kafesteki ara yer atomlarının dislokasyon boşluklarına yerleşerek dislokasyonların hareketini engellemektedir. İlk hareket sonrası dislokasyonların engellerden kurtularak ilerlemesiyle akma hareketi daha çabuk gerçekleşir. Kalıcı şekil değişimi devam ettikçe gerilimi artırarak dengelememiz gerekmektedir. Bunun sebebi malzemelerdeki dislokasyonların her seferinde artması ve birbirlerini engellemesinden ileri gelmektedir. Bu dislokasyon yoğunluğu kuvvetin artmasıyla aşılabilir. Dislokasyonların birbirlerinin hareketlerini engellemesi ise pekleşme olarak tanımlanmaktadır. Çekme deneyinde kuvvetin artmasıyla şekil değiştiren malzemenin dayanımı artmaktadır. Malzeme pekleşmeye başlar ve şekil değiştirme her kesitte devam eder. Çekme dayanımı noktası aşıldıktan sonra malzemede deformasyon görülür ve şekil değişiminin dengelenemediği noktada kopma meydana gelir. Bir malzemenin kalıcı şekil değiştirme kabiliyetine

süneklik denir. Tokluk ise malzemenin kopması için harcanabilecek enerjidir. Termosetlerde çapraz bağların bulunması sebebiyle malzeme rijit durumdadır. Zincirlerin hareket kabiliyeti kısıtlanır ve hareket edemez bu da sünekliğin düşük olması sonucunu doğurur. Termoset malzemeler yüksek rijitlik ve dayanıma sahiptir. Elastomer malzemeler az sayıdaki çapraz bağları sebebiyle uygulanan kuvvetin şiddetine göre kolayca uzarlar. Kuvvetin etkisi azaldığında tekrar eski hallerine kolaylıkla dönebilirler. Termoplastiklerin zincirleri akma sınırından sonra birbiri üzerinde kaymasıyla plastik şekil değişimine başlarlar. Zincirler çekme doğrultusuna göre tekrar düzenlenir [62]. Termoplastik amorf polimerin akış bölgesindeki hareketi moleküler ağırlığına bağlıdır. Yüksek moleküler ağırlığın sebep olduğu moleküler karmaşıklığın üstesinden gelebilmek için orantılı olarak yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyarız. Çapraz bağların yoğun olduğu polimerlerde akış hareketi görülmez. Şekil 1.14’de görüldüğü gibi, termoplastik malzemelerin, sıcaklık artışı ile elastik modülü ve çekme dayanımı düşmekte, sünekliği artmaktadır.



Şekil 1.11: Termoplastiklerin değişik sıcaklıklardaki gerilme/uzama eğrisi [62].

Bir malzemenin kopma uzaması değeri, kırılma veya kopma olmadan şekil değişimine göstereceği direncin ölçüsüdür. Kopma uzaması bir polimerin ne kadar sünek olduğunu göstermektedir. Kopma uzaması ölçümü denklem 1.31’de,

$$\frac{L}{L_0} \times 100 = \% \text{ uzama} \quad (1.31)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemde ilk ölçüm L_0 , son ölçüm L olarak belirtilmiştir. Gevrek yani kolayca kırılan malzemeler için kopma uzaması değeri daha küçük olacaktır. Polimerlerdeki yüksek derecedeki tokluk malzemenin herhangi

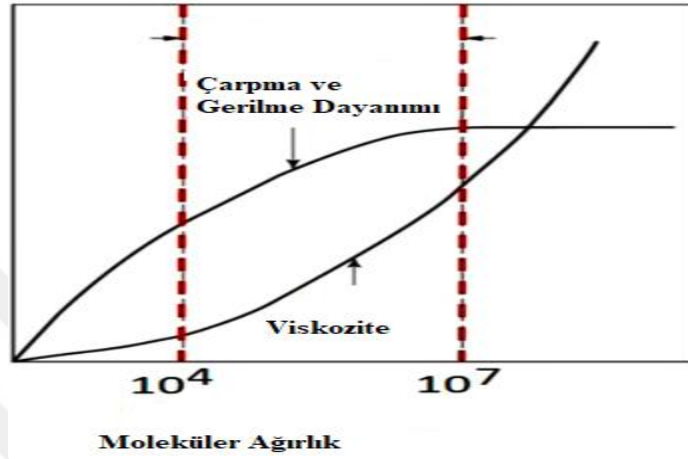
bir kırılma olmadan darbe sonucu plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. Başka bir ifadeyle açıklamak gerekirse tokluk malzemenin kırılmadan önce depoladığı enerjidir diyebiliriz. Şekil 1.14’de görüldüğü üzere mavi renk ile gösterilen malzeme gerilime oldukça dayanıklıdır ve kırılması için yüksek gerilim değeri gerekmektedir. Ancak bu malzeme kırılmadan önce çok fazla uzatılamaz. Bu tarz malzemeleri gevrek malzeme olarak adlandırmamız mümkündür. Kırmızı renk ile temsil edilen malzeme mavi ile gösterilen malzeme kadar sert değildir ancak daha fazla tokluk kabiliyeti göstermektedir. Grafikte kırmızı renk ile temsil edilen malzeme diğer malzemelere göre daha fazla enerji depolayabilir. Bu yüzden diğer malzemelere göre tokluk değeri daha yüksektir diyebiliriz



Şekil 1.12: Gevrek ve sünek malzemeler için gerilme/uzama grafiği.

Genellikle kristal polimerler camı geçiş sıcaklığı (T_g) üzerinde amorf polimerlere göre daha fazla tokluk kabiliyeti göstermektedir. Polimerlerdeki tokluk, farklı metotlar veya mekanizmalar ile düşük veya oda sıcaklığı altında geliştirilebilir. Bu yöntemler plastik deformasyonları mikro ve nano ölçekte absorbe etmek için polimer morfolojisinin modifikasyonlarını içerir [63]. Polimer malzemelerde iyi mekanik özellik ve yüksek stabilite elde etmek için yüksek molekül ağırlık gerekmektedir. Polimer işleme sırasında düşük moleküler ağırlık yeterlidir çünkü malzemenin viskozite değeri moleküler ağırlıktaki artışlarla artmaktadır ve bu da polimerin işlenmesini zorlaştırır. Ayrıca yüksek moleküler ağırlık polimerlerdeki zincir dolaşıklığını artırır ve bu sayede polimerin çekme dayanımı ve elastik modülünde iyileşmeye yol açar. Kompozit malzemeler birden fazla ve farklı özellikteki malzemenin bir araya getirilerek oluşturulduğu malzeme yapısıdır. Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek elastik modül ve yüksek mukavemet gibi

özelliklerinden dolayı havacılık ve gemi sanayisinde tercih edilir. Kompozit malzemeler aldıkları hasarları absorbe ederler ve esnek yapıları sayesinde her hasar sonrası makroskobik etki meydana gelmez [64]. En yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler polimer matrisli kompozitlerdir. Matris fazı olarak genellikle epoksi reçine, polyester takviye fazı olarak da çeşitli mineraller, elyaflar, cam veya karbon gibi malzemeler kullanılmaktadır [65].



Şekil 1.13: Moleküler ağırlığın çarpma dayanımı, gerilme dayanımı ve viskozite özellikleri arasındaki ilişki [63].

Polimer kompozitler sahip oldukları esneklik, kolay üretilebilirlik, hafiflik, düşük maliyet gibi özellikleri nedeniyle zırhlama malzemesi olarak alternatif oluşturmaktadır. Polimer matrislere, PbWO₄, Sm₂O₃ gibi çeşitli metal oksitler eklenerek radyasyon zırhlama kabiliyetleri artırılmaktadır [66, 67]. Kullanılan fiberlerin, polimer kompozitlerin mekanik, elektriksel ve optik özelliklerini ciddi ölçüde iyileştirdiği görülmüştür [68, 69]. Nano fiber katkılı polimer matrislerin mikro fiber katkılı polimer matrislere göre azaltma katsayısına daha fazla etki ettiği görülmüştür [70]. Bunun sebebinin ise nano fiberlerin yüzeyde daha uniform halde bulunduğu ve bu sayede malzemenin zırhlama özelliğini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir [71].

1.1.2.3 Radyasyonun polimer malzemelerle etkileşmesi

İyonize radyasyon ile polimerlerin etkileşiminde önemli yere sahip olan serbest radikaller, radyasyonun polimer zincirini parçalamasıyla veya C-H zincirinin ayrışması yoluyla ortaya çıkar. Polimerler, oligomerler ve monomerlerin radyasyon ile etkileşimi sonucunda oluşan mekanizmalar aşağıda verilmiştir; Çapraz bağ oluşumu, polimer zincirlerinin birleştirildiği ve üç boyutlu bir ağı oluşturulduğu bir

işlemdir. Uzun zincirli dallanma, polimer zincirlerinin birleştirildiği ancak ağ yapısının henüz oluşmadığı bir işlemdir. Zincir ayrılması sonucunda polimerlerin moleküler ağırlığı azalır ve bu da oksidasyon ve diğer bozulmalara sebep olabilir. Genellikle oksidasyon ve zincir ayrılması aynı anda gerçekleşir. Monomerler veya oligomerlerin ışınlanmasıyla başlatılır. Polimerizasyon ve çapraz bağ oluşumunun birlikte kullanılmasına radyasyon ile iyileştirme veya kütleme çalışması diyebiliriz. Polimerleri iyonize radyasyona karşı gösterdiği tepkilere göre çapraz bağ oluşumunun baskın olduğu, zincir ayrılmasının baskın olduğu grup olarak ikiye ayrabiliriz. Polimerlerin radyasyon ile çapraz bağ oluşumu ticari amaçla da sıklıkla kullanılan bir işlemdir. Kullanım için genellikle 50-250 kGy arasında radyasyon dozu oranı yeterli olmaktadır. Radyasyon ile çapraz bağ oluşumu gözlemlenmiş polimerlerde, sadece mekanik ve kimyasal özellikler değil, aynı zamanda termal ve yanıcılığa karşı direnç gösterme özelliklerini de geliştirdiği belirtilmiştir. Yüksek dozdaki radyasyon etkileşmesi ile polimerde bozulmalar meydana gelebilir. Bu bozulmalar sonucunda polimerlerin modifikasyonundan sorumlu iyonlar ve radikaller oluşmaktadır. Bu bozulmanın ek olarak kimyasallara gerek duyulmadan sadece çevre ve sıcaklık ile kontrol edilebilme gibi avantajı vardır. Ayrıca kimyasal bozulmaya göre daha az maliyet gerektirir. Radyasyon ile bozulma sonrası malzemede toksik etki yaratacak kalıntı kalmaması avantajlar arasında sayılabilir. Günümüzde birçok radyasyon çeşidi polimer bozulması için kullanılmaktadır. Bu bozulmaların avantajları; mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve malzemenin yenilenmesi, zincir ayrılması yoluyla polimerlerin bozulması ve düşük molekül ağırlıklı karışımların yenilenmesi veya iyileştirilmesi olarak belirtilebilir[72,73].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan Termoplastik Poliüretan (TPU) (Ravtahane) Resinex (Türkiye) firmasından satın alınmıştır. Çinko borat (ÇB) Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Polipropilen (PP) numuneleri ise bir Suudi Arabistan firması olan Sabic şirketi ürünüdür. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin özellikleri ve bileşen içindeki oranları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Kullanılan malzemelerin özellikleri ve ağırlıkça yüzde oranları.

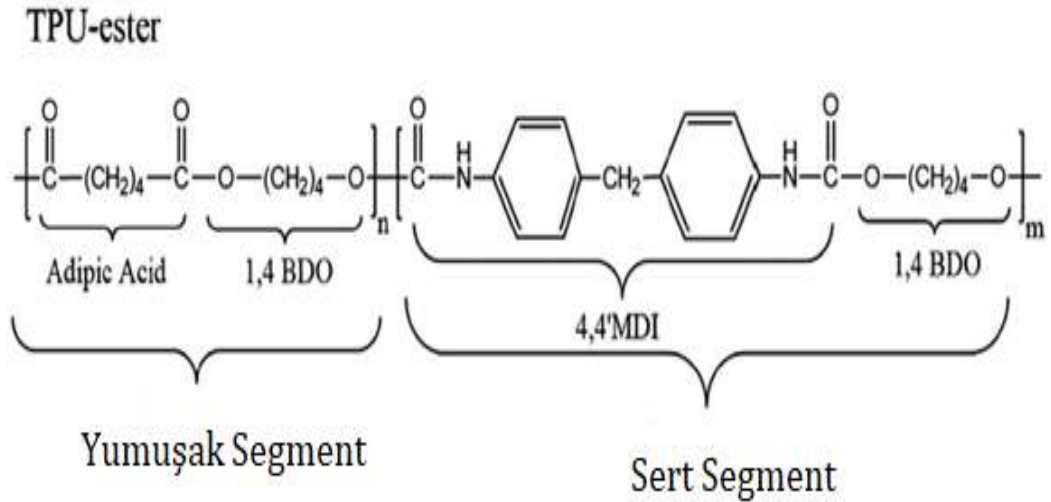
Malzeme	Hesaplanan katkı	Kimyasal formülü	Özgül ağırlık (25 °C)	Molekül ağırlığı (g/mol)	Kimyasal bileşen (%)			
					B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	
ÇB	-	Zn ₂ B ₆ H ₇ O _{14,5}	2,71	434,6	48	37,5	14,5	
TPU (Katkısız)	-			744,16	C ₃₉	O ₁₂	N ₂	H ₅₂
					62,9	25,8	3,8	7,5
TPU+ÇB (%5)	4,58				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					2,20	1,72	0,66	95,42
TPU+ÇB (%10)	8,40				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					4,03	3,15	1,22	91,6
TPU+ÇB (%20)	17,44				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					8,37	6,54	2,53	82,56
TPU+ÇB (%30)	36,45				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					17,5	13,7	5,26	63,54
TPU+ÇB (%40)	39,06				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					18,76	14,66	5,68	60,9
TPU+ÇB (%45)	43,88				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	TPU
					21,1	16,5	6,3	56,1
PP (Katkısız)	-			0,90	C ₃	H ₆		
					84,6	15,4		
PP+ÇB (%5)	5,6				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	PP
					2,69	2,10	0,81	94,4
PP+ÇB (%10)	8				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	PP
					6,43	5,02	1,94	86,61
PP+ÇB (%20)	17				B ₂ O ₃	ZnO	H ₂ O	PP
					8,93	6,97	2,70	81,4

*ÇB: Çinko borat, TPU: Termoplastik poliüretan, PP: Polipropilen

2.1.1 Termoplastik poliüretan (TPU)

Termoplastik poliüretanlar çok yönlü özellikleri sebebiyle konveyör bantları, kablolar, filmler, teknolojik aygıtlar, medikal amaçlı kullanılan malzemeler gibi

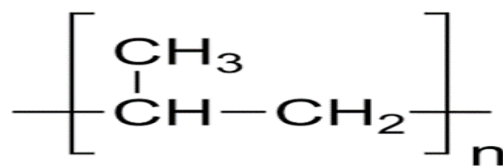
birçok endüstri ve medikal üründe kullanılmaktadır. Yüksek uzama değeri, çekme kuvveti, elastiklik, yağlara karşı direnç, kimyasallara karşı direnç, aşınma direnci gibi birçok kabiliyete haiz olması termoplastik poliüretanları çok sayıdaki uygulama için kullanışlı hale getirmiştir. Termoplastik poliüretanlar üç temel hammadde olan; poliöl veya uzun zincir diöl, zincir genişletici veya kısa zincirli diöl ve çapraz bağlayıcı diizosiyanatlar ile kombine edilerek oluşturulur. Termoplastik poliüretanın poliöl ve izosiyanatlardan yapılmış yumuşak segmenti malzemenin esnekliğinden sorumludur. Zincir genişletici ve izosiyanatlardan oluşan termoplastik poliüretanın sert segmenti ise malzemenin sertliğinden sorumludur. Şekil 2.1’de poliüretan kimyasal yapısı şematize edilmiştir. Gama ışını, termoplastik poliüretanın yapısında carcenogen 4,4’-metilendianilin bulunması sebebiyle, poliüretanın kimyasal ve fiziksel karakteristik yapısını etkileyebilmektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak sterilizasyon sırasında gama ışınlarının kullanılmasının, poliüretan malzemeler için uygun olmayacağı belirtilmiştir [74].



Şekil 2.1: Poliüretan tekrarlayan birimi.

2.1.2 Polipropilen (PP)

Polipropilen sahip olduğu mukavemeti, tokluğu ve yüksek erime noktası ile birçok film ve çok katmanlı yapılarda kullanılmaktadır. Uygun katkılandırılmalar yapılarak polipropilen reçineler mükemmel işlenebilirlik sergileyebilirler.



Şekil 2.2: Polipropilen monomer yapısı.

2.1.3 Çinko borat

Çinko (63,409 g/mol) mavimsi açık gri renkte olan kırılgan bir metaldir. Periyodik tabloda geçiş grubunda yer almaktadır. Düşük kaynama noktasına sahiptir. Borat minerali (BO_3) borat anyon grubu içermektedir. Boraks, kolemanit, üleksit gibi birçok borat minerali; yumuşak ve kolayca çözünür yapıdadır. Polimerler, kimyasal içeriklerinden dolayı kolaylıkla yanabilmektedir. Bu tehlikeyi azaltabilmek için polimere yanma önleyici malzemeler katılabilir. Halojen içerikli bileşikler tek başlarına veya antimon trioksit, polipropilen'e katkılanırılan alev önleyicilerin başında gelmektedir [101]. Ancak bazı halojenlerin polipropilen ile kullanılması, tutuşma esnasında toksik gazların yayılma tehlikesini de beraberinde getirmektedir. Boron bileşikleri olan çinko borat ve borik asit yangınlığa karşı etkili olması sebebiyle öne çıkmaktadır. Çinko boratın düşük toksikliği, düşük maliyeti, mantarlara ve böceklerle karşı koruyuculuğu, sızdırmaya karşı direnç gibi özellikleri fonksiyonel bir malzeme olduğunun göstergesidir. Polimerlere katkılanırıldıklarında termal kararlılık ve elektriksel özelliklerde iyileşme görülebilir [102]. Çinko borat, sentetik hidratlı bir metal borattır. Birçok farklı kristal hidratlı çinko borat yapısından bir tanesidir. Farklı tiplerdeki yapılar ise; $\text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $3\text{ZnO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$, $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $6\text{ZnO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ olarak sıralanabilir. Çinko borat hidrasyon suyunun termal stabilitesi 290-300°C arasındadır. Bu özellik çinko borat katkılanırılacak polimer için işlenebilirlik kabiliyeti sağlamaktadır [103].

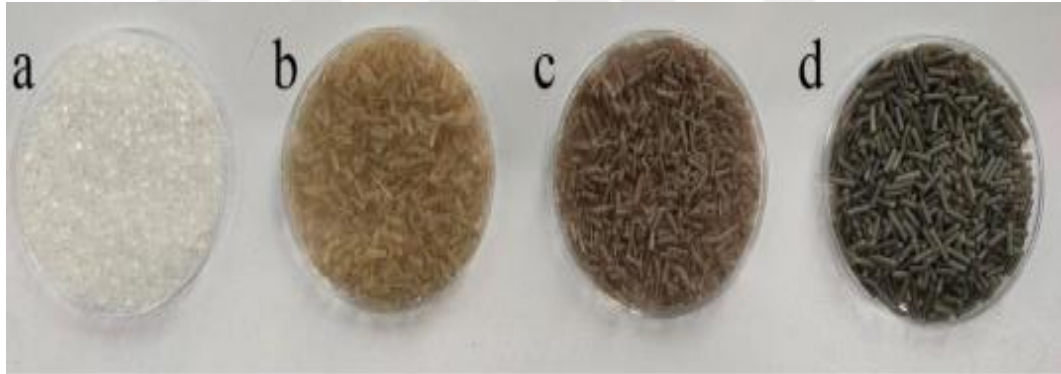
2.2 Kompozitlerin Hazırlanması

Çinko borat katkılı polimer kompozitler Bursa Teknik Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Polmak (Türkiye) marka çift vidalı ekstruder kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2.3). Granül halinde polimerler ana beslemeden gönderilirken çinko borat tozları belirlenen debilerde yan besleme ünitesinden kovanlar içinde eriyik hale gelmiş polimere katkılanmıştır. Ekstrüder bölge sıcaklıkları TPU örnekleri için 190 - 210°C aralığında, PP örnekleri için ise 200 - 220°C aralığında ayarlanmıştır. Ekstruderden filament halinde elde edilen kompozitler su banyosundan geçirilerek soğutulduktan sonra döner bıçaktan geçirilerek pellet haline getirilmiştir. TPU örneklerinin %5, %10, %15, %20, %30, %40 ve %45 çinko borat katkılı olarak 1 mm, 2 mm ve 4 mm olmak üzere üç farklı

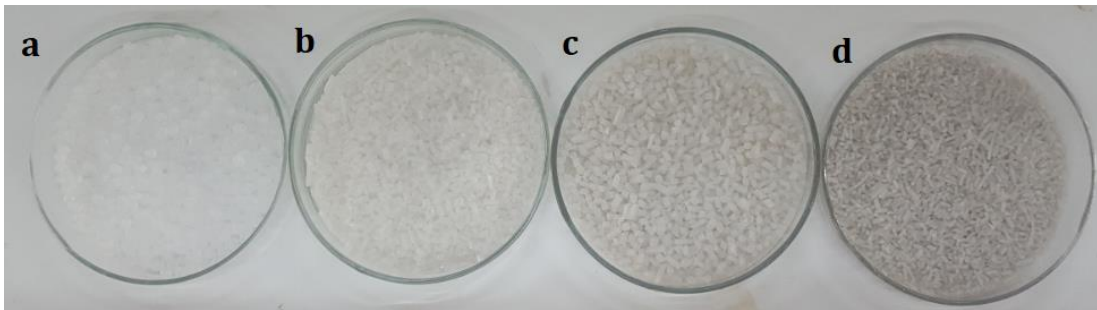
kalınlıkta üretilmesi planlanmışken, PP örneklerinin ise sadece 4 mm kalınlıkta ve %5, %10 ve %20 çinko borat katkısı ile üretilmesi planlanmıştır. Örnekler hazırlandıktan sonra yapılan yakma analizleri sonucu örnek yüzdelерinin TPU örnekleri için sırasıyla %4,58, %8,40, %17,44, %36,45, %39,06 ve %43,88 olduğu, PP örnekleri için ise sırasıyla %5,6, %8 ve %17 olduğu anlaşılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.3: Kompozit hazırlamada kullanılan ekstrüder (BTÜ-Polimer Malzeme Müh. Lab).



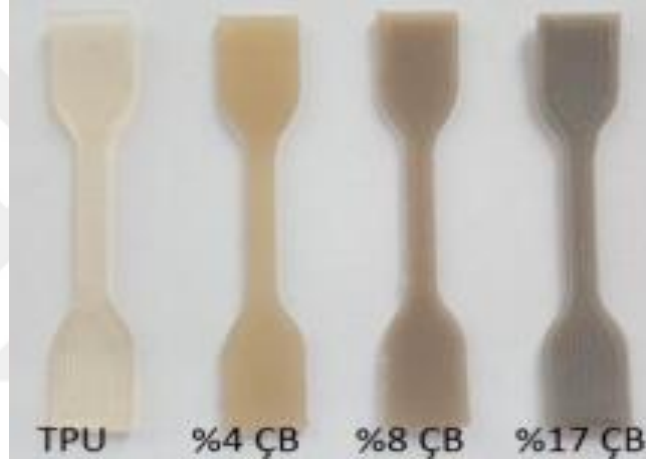
Şekil 2.4: a) Katkısız TPU, b) %4,58 ÇB katkılı, c) %8,40 ÇB katkılı, d) %17,44 ÇB katkılı.



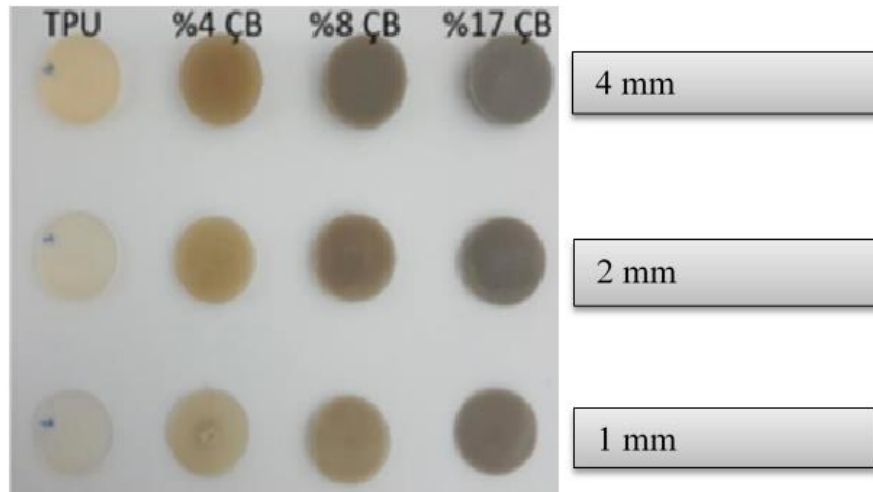
Şekil 2.5: a) Katkısız PP, b) %5,6 ÇB katkılı, c) %8 ÇB katkılı, d) %17 ÇB katkılı.

2.3 Test Numunelerinin Hazırlanması

Çekme testleri, gama ve nötron analizleri için örnekler 3B yazıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Granül halindeki kompozitler Polimer Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan tek vidalı ekstruder (Plartek, Türkiye) kullanılarak 1,75 mm kalınlığında filament haline getirilmiştir. Elde edilen filamentler çekme test numuneleri için 3B yazıcıda ISO 527-2 standartına göre hazırlanırken, gama ve nötron analizleri için ise 3 cm çapında, 1, 2 ve 4 mm kalınlıklarında disk şeklinde hazırlanmıştır (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7). Polipropilen numuneleri sert olduğu için kesme makinasıyla numuneler kesilememiştir. Bu nedenle çekme deneyleri gerçekleştirilememiştir.



Şekil 2.6: Çekme test numuneleri örnekleri.



Şekil 2.7: Gama analizleri için hazırlanan test numuneleri örnekleri.

2.4 Analiz ve Testler

2.4.1 Yakma analizleri

Hazırlanan kompozitlerin istenilen bileşimde olup olmadıklarını kontrol etmek için yakma analizi kullanılmıştır. Yaklaşık 5 gram kompozit 0.001 hassasiyet oranı ile tartılarak önceden sabit tartıma getirilip porselen krozelere konulmuştur. Bu krozeler kül fırınında (Nabertherm - LHT 08-18, Almanya) 900°C’de 5 dakika sürede yakılarak polimer malzeme uzaklaştırılmıştır. Geriye kalan inorganik maddeler tartılarak kompozitlerin gerçek bileşenleri belirlenmiştir. Hedeflenen oranlara yakın olarak yukarıda belirtilen oranlarda örnek bileşenleri belirlenmiştir.

2.4.2 Çekme testleri

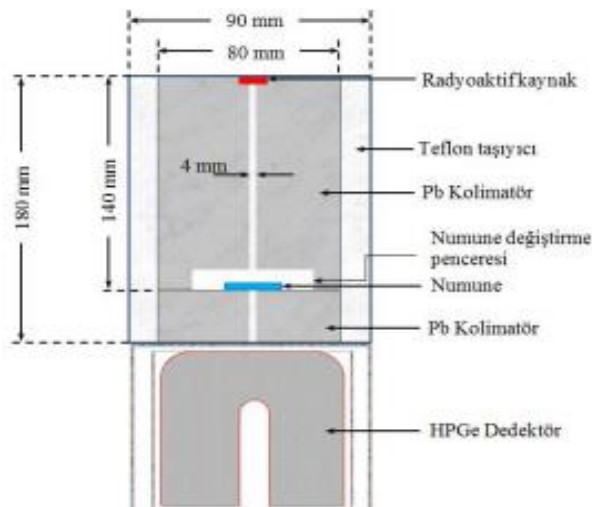
Kompozitlerin kopma uzaması, elastik modülleri ve kopma dayanımını belirlemek için çekme testleri Ünlversal mekanik test cihazı (SHIMADZU - AGS-X, Japonya) kullanılarak 300 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

2.4.3 SEM-EDX görüntüleri

Numunelerin SEM görüntüleri Bursa Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan SEM-EDX (Carl Zeiss / Gemini 301) cihazı ile alınmıştır.

2.4.4 Gama analizleri

Numunelerin gama radyasyonunu ölçimleri Giresun Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde bulunan ORTEC marka GEM SP7025-P4 model HPGe dedektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil (2.8)’de deney geometrisi verilmiştir.



Şekil 2.8 : HPGe Dedektör kesiti.

Ölçümler her malzeme için 5000 s'lik süreler halinde beş kez tekrar edilmiştir. Hesaplamalar sırasında ölçüm sonuçlarının ortalamaları alınıp kullanılmıştır. Radyoaktif kaynak olarak Eckert&Ziegler firmasından satın alınan ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs ve ^{60}Co noktasal radyoizotoplar kullanılmıştır. Bu radyoizotopların özellikleri ve yayınladıkları foton enerjileri (kütle azaltma katsayılarının hesaplanacağı) Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Kullanılan radyoaktif kaynaklar ve özellikleri.

Çekirdek	Enerjisi (keV)	Olasılığı (%)	Yarı ömrü (yıl)	Aktivitesi (kBq)	Ürün
^{133}Ba	31	62,8	10,51	-	$\text{CsK}_{\alpha 1}$
^{241}Am	59,5	35,92	432,60	442,00*	^{237}Np
	81	32,90	10,51	460,00*	
	276,4	7,16	10,51	460,00*	
^{133}Ba	302	18,33	10,51	460,00*	^{133}Cs
	356	62,05	10,51	460,00*	
	384	8,94	10,51	460,00*	
^{137}Cs	661,6	85,00	30,05	473,00*	^{137}Ba
^{60}Co	1172	99,85	5,27	424,00*	^{60}Ni
^{60}Co	1332	99,98	5,27	424,00*	^{60}Ni

* Referans tarihi 1 Ocak 2017.

2.4.5 Nötron eşdeğer doz ölçümleri

Nötron eşdeğer doz ölçümleri için Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan Canberra marka NP100B serisi BF_3 gazlı orantılı sayaç kullanılmıştır (Şekil 2.9). Kaynak olarak ^{241}Am -Be nötron kaynağı kullanılmıştır. Kaynak içerisindeki α yayınlayıcısı 486 yıl yarı ömürlü ^{241}Am izotoptudur. Radyoaktif çekirdekten oluşan alfa parçacıkları ile berilyum hedefi bombardıman edilir ve nötron elde edilir.



Şekil 2.9: Deneyde kullanılan Canberra NP100B nötron dedektörü.

Faydalanılan nükleer reaksiyon denklem 2.1'deki gibi,



ifade edilmektedir. Nötron ile bor arasındaki etkileşim ile elde edilen alfa parçacıkları, lityum çekirdeği ile birlikte BF₃ gaz ortamında ikincil iyonizasyona sebep olmaktadır. İyonlaşma sonucu oluşan elektronlar anot teline ulaşır ve dedekte edilir ve ADM616 model seri dijital veri okuyucuyla okunur [57]. Dedektörün kablosu ADM-606 analizöre bağlanarak pulsların bilgisayar ortamına aktarılması sağlanır. RADACS yazılımı ile eşdeğer doz ölçüm sonuçları XLS, dosyası olarak kaydedilir. Seçtiğimiz kaynak 4,5 MeV etkin enerji sağlayabilmektedir. Kaynaktan çıkan alfa parçacıkları ile nötron bağlama enerjisi düşük berilyum bombardıman edilerek nötronlar elde edilmektedir. Bu etkileşim sonrasında nötron parçacıkları ile beraber gama ışınlarının da ortaya çıkmasından dolayı hem nötron hem de gama ışınlarına karşı koruyuculuğu olan malzemeler ile çalışılması gerekmektedir. Radyasyon güvenliği açısından kaynağın etrafına nötron parçacıklarına karşı parafin wax ve gama ışınlarına karşı ise kurşun levhalar kullanılarak oluşturulan zırh kutusu (68 x 68 x 68 cm) ile kaynak güvenli hale getirilmiştir (Şekil 2.10).

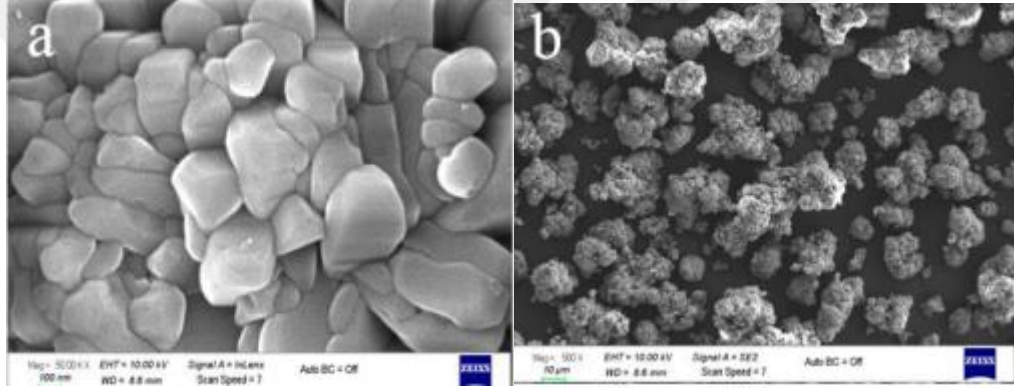


Şekil 2.10: Ölçümlerde kullanılan nötron kaynağı (Parafin ve kurşun koruma içinde)[57].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 SEM-EDX Analizleri

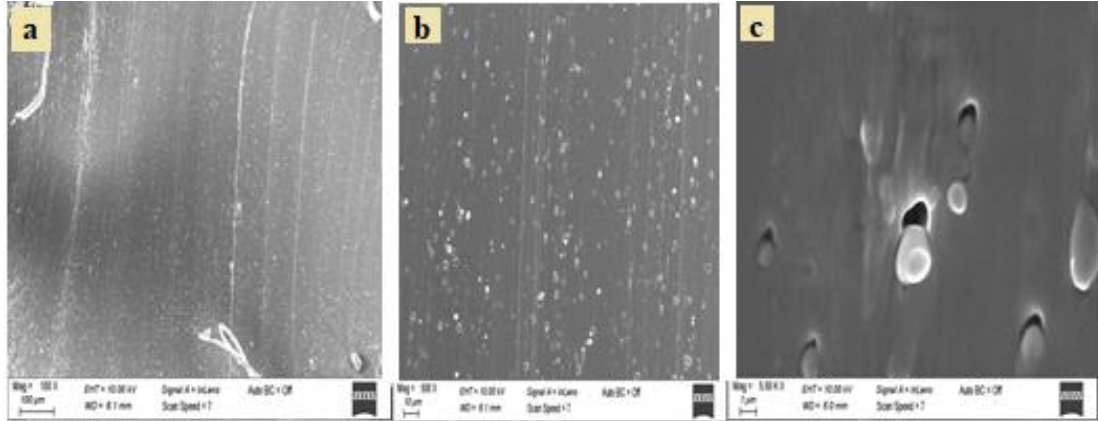
Polimer matris içerisindeki çinko borat taneciklerinin dağılımlarını gözlemlemek için numunelerden SEM görüntüleri alınmıştır. Çinko borat taneciklerinin 300-400 nm boyutlarındaki kristallerinin boyutlarındaki kristallerin bir araya gelmesi ile yaklaşık 10-15 µm çaplarında topaklardan oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.1).



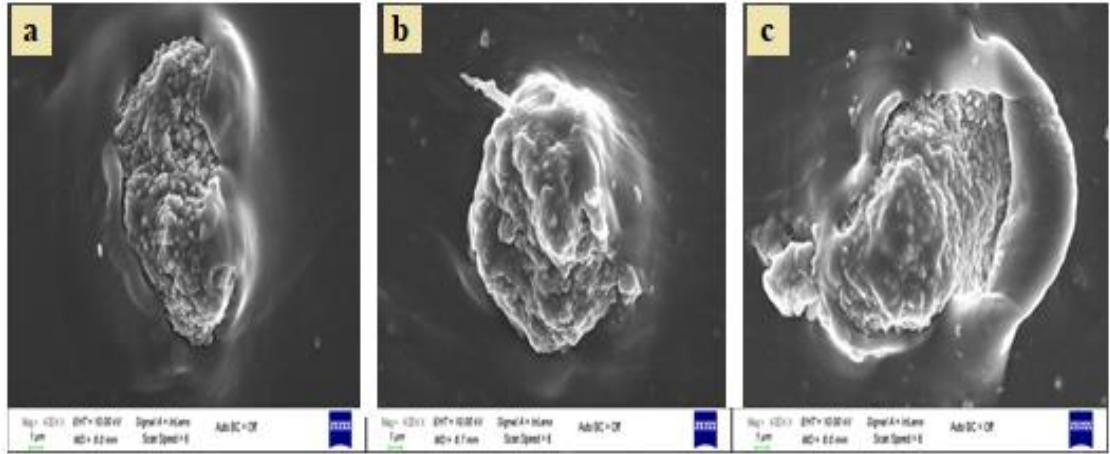
Şekil 3.1: Çinkoborata ait SEM görüntüleri a) 5000 X büyütme, b) 500 X büyütme.

Şekil 3.2 ile Şekil 3.8 arasında (Şekil 3.2-3.8) TPU örnekleri için farklı oranlarda büyütme ile tüm katkı oranları için alınmış SEM görüntüleri yer almaktadır. Görüntüler incelendiğinde polimer-tanecik arasında iki farklı etkileşim olduğu söylenebilir. Daha az katkı oranlarında görüldüğü üzere (Şekil 3.3a, 3.3b, 3.3c) taneciklerin matris ile çok iyi bir şekilde uyum sağladığı ve polimer matrisin tanecikleri sardığı görülmektedir. Çinko borat katkı oranının artmasıyla (Şekil 3.4a, 3.4b, 3.4c) taneciklerin polimer matrisi yırttığı ve düzensiz yapılar oluşturduğu görülmektedir. Termoplastik poliüretan numunelerinde yüksek katkı oranlarında (Şekil 3.6a, 3.6b, 3.6c) parçacıkların topaklanma ve mikro boşluklar oluşturduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 da PP örnekleri için SEM görüntülerine yer verilmiştir. Uyumsuz polimerlerden olan polipropilen genellikle büyük parçacıkların formasyonu ile güçlü faz dağılımı göstermektedir. Polipropilen ve Termoplastik poliüretan yapıları için geçerli olan polarite farkı ve oluşabilecek ara yüzey gerilimleri tanecikler ile uyuşma sorunu yaratabilmektedir. Çeşitli

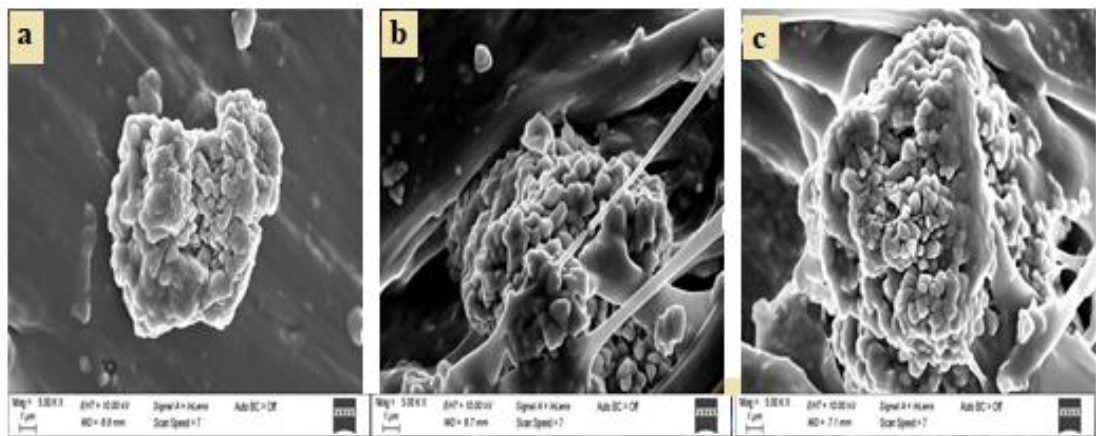
uyumlaştırıcı konsantrasyonları kullanılarak bu sorunlar giderilebilir. Şekil 3.10’da görülmekte olan yüzey kusurları visko-elastik akış yüzünden olduğu öngörülebilir.



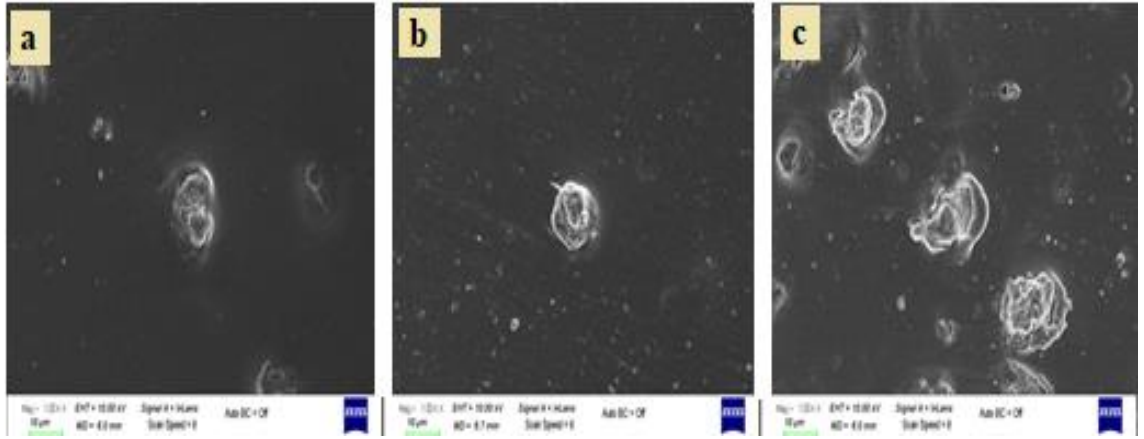
Şekil 3.2: Saf TPU yüzey görüntüleri sırasıyla a)100X-100µm ölçek, b)500X-10µm, c)5,00KX-1µm.



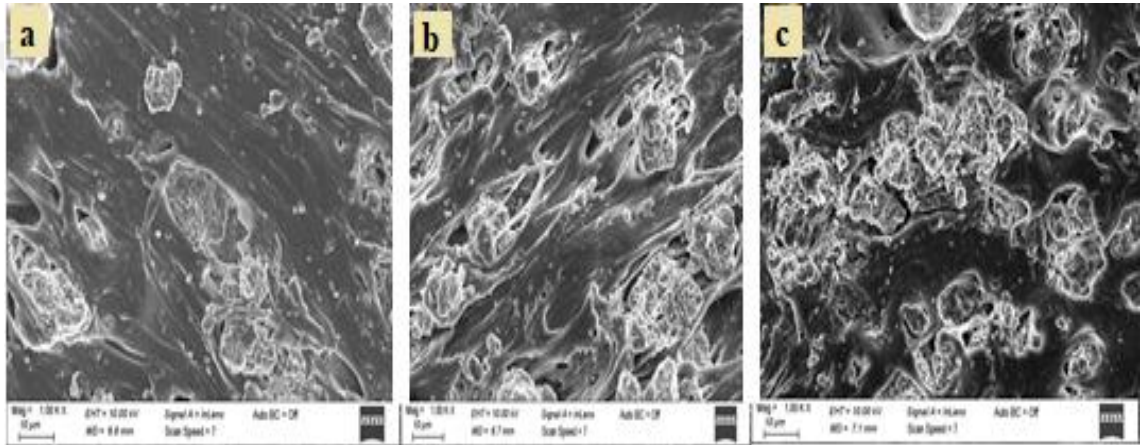
Şekil 3.3: Ölçek 4,00 KX, 1µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b) %8,40, c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.



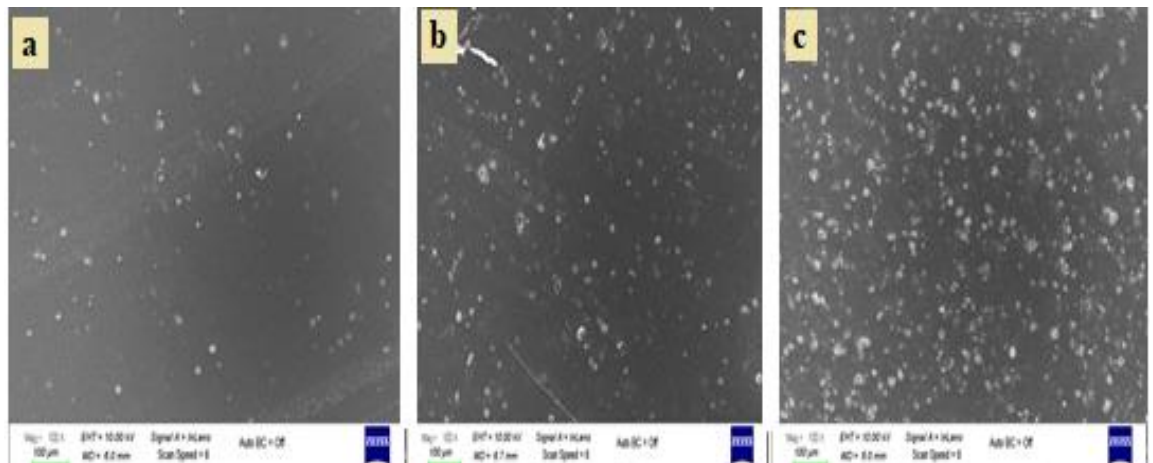
Şekil 3.4: Ölçek 5,00 KX, 1µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%36,45, b)%39,06, c)%43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik-polier etkileşimleri.



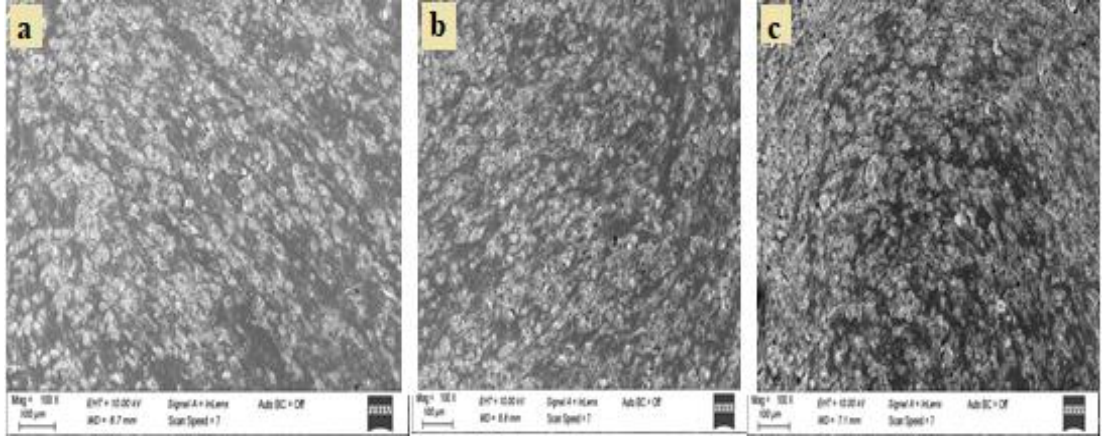
Şekil 3.5: 1,00 KX ölçek 10µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b)%8,40 c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik polimer etkileşimleri.



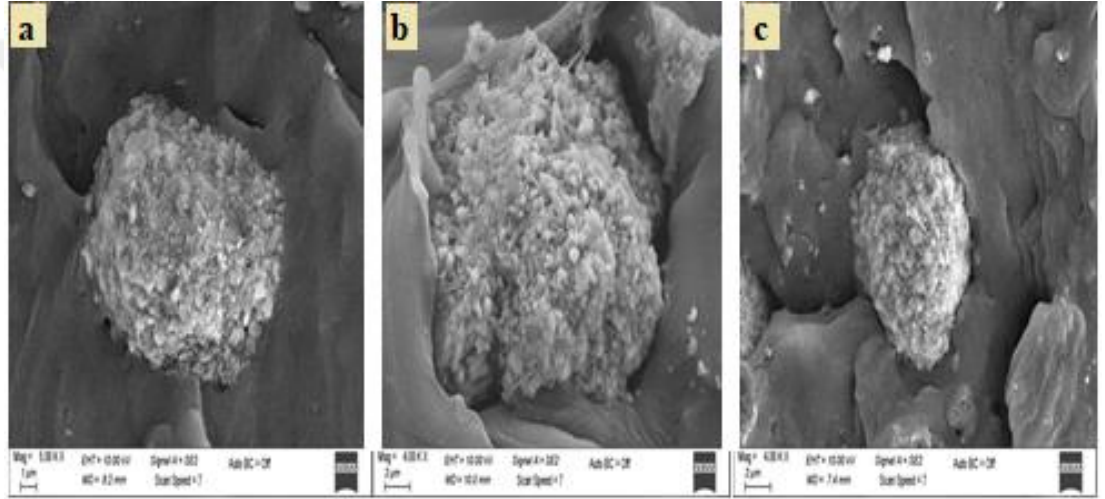
Şekil 3.6 : Ölçek 1,00 KX, 10µm boyutlu soldan sağa sırasıyla a)%36,45, b)%39,06, c)%43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik polimer etkileşimleri.



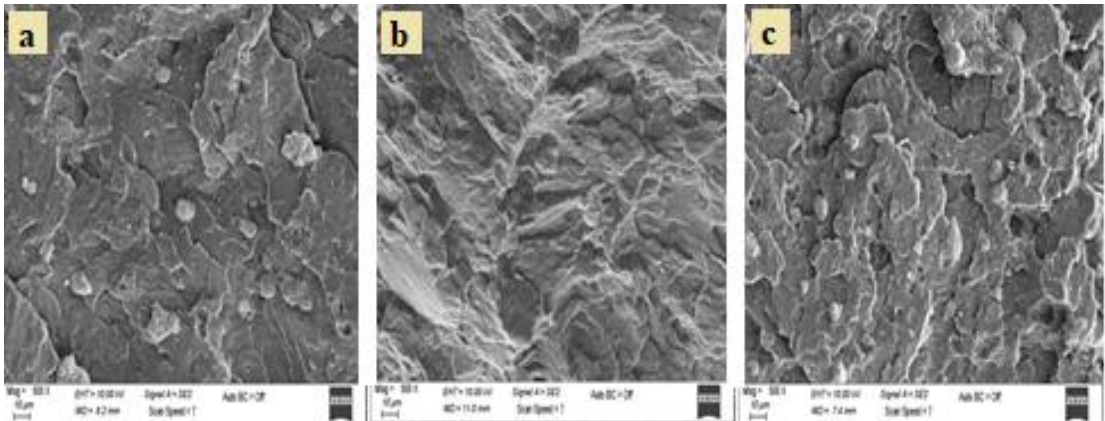
Şekil 3.7: Ölçek 100X, 100µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla a)%4,58, b)%8,40 c)%17,44 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.



Şekil 3.8: Ölçek 100X, 100µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla %36,45, %39,06, %43,88 çinko borat katkılı TPU tanecik-polimer etkileşimleri.



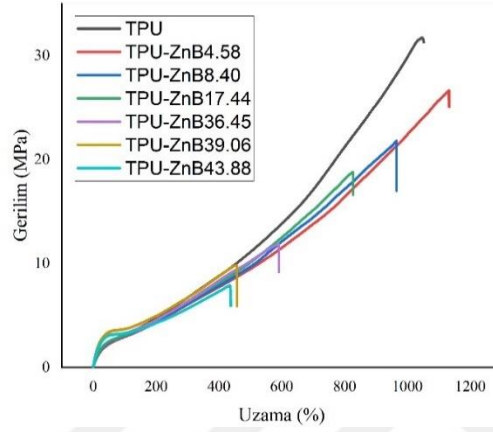
Şekil 3.9: Sırasıyla 5,00KX-1µm, 4,00KX-2µm, %5,6, %8, %17 PP tanecik-polimer etkileşimleri.



Şekil 3.10: 500X-10µm boyutlu, soldan sağa sırasıyla %5,6, %8, %17 çinko borat katkılı PP tanecik-polimer etkileşimleri.

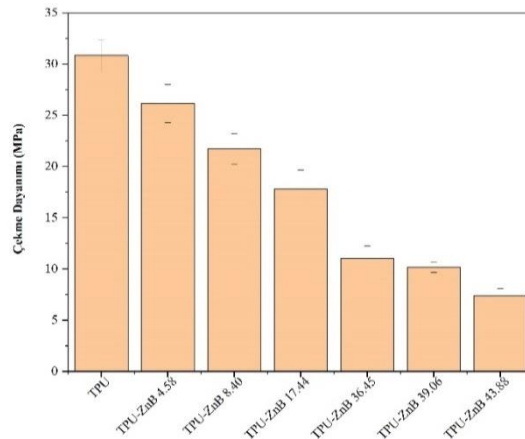
3.2 Mekanik Test Sonuçları

Polimer yapısına katkı maddeleri girdiğinde mekanik özellikleri önemli ölçüde değişerek artabilir ya da azalabilir. Hazırlanan kompozitler ile TPU yapısına çinko borat katkılандırmasının mekanik özellikleri nasıl değiştirdiğini araştırmak amacıyla çekme testleri uygulanmış ve kopma anındaki kuvvet ve uzama ile elastik modül değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.4’de gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir.



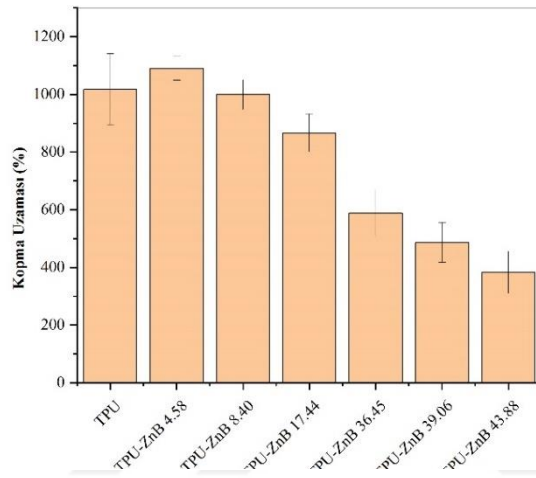
Şekil 3.11: Numunelere ait genel gerilme-gerinim eğrileri.

Şekil 3.5’de görüleceği gibi çekme dayanımları artan çinko borat oranı ile azalmaktadır. Ham TPU için 31 MPa olan çekme dayanımı değeri, %17,44 oranında çinko borat içeren kompozitte 18 MPa’a kadar düşmüşken, %43,88 oranında çinko borat katkısının olduğu durumda 7 MPa değerine düşmüştür. Bu durumun ortaya çıkması SEM görüntüleriyle de açıklandığı gibi polimer-tanecik etkileşimlerinin zayıf olması ve ayrı fazlar oluşturmamasından kaynaklanabilir. Polimer matrisinde yer alan her bir taneciğin ara yüzeyi yapıda boşluklar oluşturduğu düşünüldüğünde bu sonucun ortaya çıkması beklenebilir.



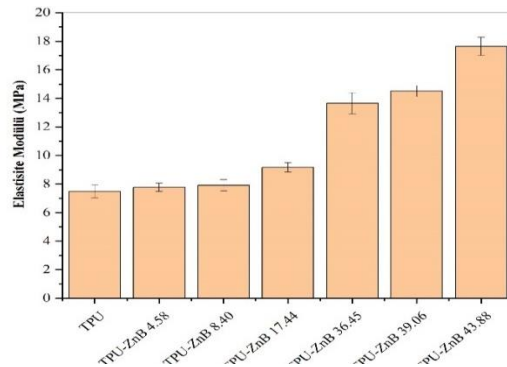
Şekil 3.12: Numunelere ait çekme dayanımı değerleri.

Numunelerin kopma uzaması değerlerine bakıldığında (Şekil 3.6) artan çinko borat oranı ile azaldığı görülmüştür, ancak bu azalma oranı çekme dayanımlarındaki kadar büyük değildir. TPU içersine %4,58 oranında çinko borat katkılандığında kopma uzaması değerleri deneysel hata sınırları içerisinde değişmediği ve yaklaşık %1100 civarında oldukları görülmektedir. %8,40 çinko borat içeren kompozitte bu değer %1000, %17,44 çinko borat içeren kompozitte %900, % 36,45 çinko borat içeren örnekte %600, %39,06 çinko borat içeren örnekte %450 iken, %43,88 çinko borat içeren örnekte ise %380 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar kopma uzaması değerlerinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 3.13: Numunelere ait kopma anındaki % uzama değerleri.

Şekil 3.7’de kompozitlerin elastik modül değerleri verilmiştir. 7,5 MPa olan TPU modül değerinin yapıya %8’e kadar çinko borat girmesi ile az bir orada arttığı ve yaklaşık 8 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Bu artış %17 çinko borat oranında daha belirgin olarak gerçekleşmekte ve 9,2 MPa değerine ulaşmaktadır. Ancak bu değer bile malzemenin elastik özelliğini önemli ölçüde bozmadığı ve hala makul seviyelerde kaldığı değerlendirilebilir.



Şekil 3.14: Numunelere ait elastik modül değerleri.

Çizelge 3.1’de literatürde mevcut çalışmalardan derlenmiş farklı yapıdaki polimerlerin mekanik özellikleri ile ilgili değerler yer almaktadır.

Çizelge 3.1: Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri.

Polimer	Katkı Maddesi ve Katkı Oranları (≈%)	Çekme Dayanımı (≈MPa)	Kopma Uzunluğu (≈%)	Elastik Modül (≈MPa)	Referans
Polieter-polyester ve heksametilen diizosiyanat katkılı poliüretan (PLLA-PU)	Katkısız	3.6	1300	4.5	[84]
	%9 PLLA	17	670	7.6	
	%23 PLLA	20	590	15.1	
	%34 PLLA	31	610	68	
Poliüretan	Katkısız	80	100	-	[85]
Polipropilen	Katkısız	31	-	-	[16]
	Pirinç püskülü külü	24	-	-	
Polietilen	Katkısız	10	8	240	[32]
	% 10 B ₄ C	9	6	243	
	% 20 B ₄ C	11	8	250	
	% 30 B ₄ C	7	3	490	
	% 40 B ₄ C	8	4	300	
Termoplastik doğal kauçuk (TPNR)	Katkısız	4	163	-	[86]
	%5 B ₄ C	3	55		
	%10 B ₄ C	2	25		
	%15 B ₄ C	2	22		
	%20 B ₄ C	2	21		
Poliüretan elastomer Polidopamin nanoparçacıklarıyla güçlendirilmiş	Katkısız	5	690	-	[87]
	%1 PDAPs	7	718		
	%2.5 PDAPs	7	760		
	%5 PDAPs	8	755		
Bio-poliüretan/ Hidrofilik poli(etilen oksit) katkılı (PEO)/hidrofobik poli(ε-kaprolakton) diol katkılı (PCL)	PCL2000	47	720	30	[88]
	PCL530-Iso	40	810	20	
	PEO-PCL 30-70	43	870	17	
	PEO-PCL 70-30	17	370	80	
Epoksi matris /Kil/B ₄ C	%3 Kil nanokompozit katkılı	36	-	3110	[89]
	%3 Kil-/%5 B ₄ C nanokompozit katkılı	33		3420	
	%3 Kil-/%20 B ₄ C nanokompozit katkılı	26		3900	
Klorotrifloroetilen (CTFE)	Katkısız	36	80	1034	[76]
Perfloroalkoksi polimer (PFA)	Katkısız	28	300	827	
Polistiren (PS) (yüksek /orta akış)	Katkısız	36	1	2276	
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) homopolimer	Katkısız	14	12	1069	
Polipropilen homopolimer	Katkısız	21	100	1103	
Polipropilen kopolimer	Katkısız	23	200	896	

Çizelge3.1 (devam): Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri.

Polimer	Katkı Maddesi ve Katkı Oranları (≈%)	Çekme Dayanımı (≈MPa)	Kopma Uzaması (≈%)	Elastik Modül (≈MPa)	Referans
Etilen-Vinil Asetat (EVA)	Katkısız	8,35		21,74	[90]
	%1 ZnB (nano)	7,13		18,59	
	%3 ZnB (nano)	7,50		19,59	
	%5 ZnB (nano)	7,01	-	18,78	
	%1 ZnB (mikro)	6,28		15,80	
	%3 ZnB (mikro)	6,35		15,40	
	%5 ZnB (mikro)	6,34		16,11	
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	Katkısız	26,97		1517	[91]
	%1 ZnB (nano)	27,44		1595	
	%3 ZnB (nano)	27,45		1610	
	%5 ZnB (nano)	27,40	-	1621	
	%1 ZnB (mikro)	27,86		1563	
	%3 ZnB (mikro)	27,83		1583	
	%5 ZnB (mikro)	28,08		1645	
Polipropilen kompozitleri	Katkısız	14,96		821	[91]
	Maleik anhidrit polipropilen aşılması(MAP)	16,59		842	
	ZnB	13,22		909	
	MAPP/ZnB	14,64		970	
	ZnB/AP(amonyum fosfat)	10,46	-	712	
	ZnB/AT (antimon trioksit)	8,70		629	
	ZnB/MH(magnezyum hidroksit)	14,04		922	
Poliüretan/ZnB	ZnB/AP/AT	11,50		863	[92]
	Katkısız	4,50			
	ZnB (%0,5)	4,45			
	ZnB (%1)	4,40			
	ZnB (%3)	4,38	-	-	
	ZnB (%5)	4,50			
Termoplastik Poliüretan (TPU)	ZnB (%7)	4,45			Bu çalışmada
	Katkısız	31	1000	7,5	
	ZnB (%4,58)	26	1100	7,8	
	ZnB (%8,40)	21	1000	8,0	
	ZnB (%17,44)	18	900	9,2	
	ZnB (%36,45)	11	600	13,7	
	ZnB (%39,06)	10	450	14,5	
	ZnB (%43,88)	7	380	17,6	

Numunelerin mekanik özellikleri tayin edildikten sonra literatürdeki yerini tespit edebilmek amacıyla farklı tip polimerlere farklı katkı malzemeleri ve katkı oranlarında hazırlanmış olan malzemeler ile ilgili çalışmalar derlenmiş ve mekanik özellikleri bir tablo halinde sunulmuştur. Bu tablo hazırlanırken çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması değerleri baz alınarak karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Çizelge 3.1 incelendiğinde [84, 16, 32, 86, 89, 90, 91] referans numaralı çalışmalarda polimer kompozit malzemelere yapılan farklı katkı maddelerinin oranları arttıkça çalışmamızdakine benzer olarak çekme dayanımı değerlerinde bir düşüş yaşandığı açıkça görülmektedir. Referans [84 ,32, 86] numaralı çalışmalarda katkı oranına bağlı olarak kopma uzaması değerlerinde çalışmamızdakine benzer olarak bir azalış gözlemlenmiştir. Elastik modül açısından

tablo incelendiğinde [84, 32, 89] numaralı referanslarda çalışmamızdaki tersine değerlerde artış olduğu görülmektedir. Referans [90]'da ise etilen-vinil asetat (EVA) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeye sırasıyla %1, %3 ve %5 oranlarında nano ve mikro ölçekte ZnB katkılanmıştır. Artan katkı ile birlikte etilen-vinil asetat (EVA) örneklerinin elastisite değerleri azalış gösterirken, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemesinde ise bu değerler artış göstermiştir. Termoplastik poliüretan (TPU) malzemesinin genel olarak mekanik özelliklerine bakıldığında çekme dayanımı değerlerinin literatürdeki değerler mertebesinde, kopma uzaması değerlerinin yüksek ve elastisite modülünün ise düşük olduğu görülmektedir. Çizelge 3.1'de ilk sırada yer alan [84] numaralı referans çalışmasında, farklı PLLA katkı oranları kullanılarak hazırlanan polimer malzemenin çekme dayanımı, PLLA katkı yüzdesi artmasıyla arttığı görülmektedir. Poly(L-laktid) (PLLA) bir alifatik polyesterdir. PLLA diol katkılanmasıyla kompozit yapının mekanik özelliklerinin iyileştiği söylenebilir ve ayrıca PLLA diol yapısının sadece poliüretanın yumuşak segmenti için uygun olmadığı belirtilmiştir. Termoplastik polieter-polyester bazlı poliüretan elastomer, PLLA diol ve PTMG (Politetrahidrofuran) yumuşak segment, HDMI ve 1,4 bütanediol (BDO) sert segment olarak kullanılmıştır. Yumuşak segmentteki PTMG malzemeye esneklik sağlarken, PLLA ise poliüretana ayrıca dayanıklılık kazandırmıştır [84]. Aynı zamanda PLLA katkı oranının %9'a çıkmasıyla kopma uzaması değeri %1300'den %670'e düşmüştür. Üretmiş olduğumuz termoplastik poliüretanın kopma uzaması değerleriyle karşılaştırdığımızda çinko borat oranının %4,58 katkılanmasıyla %1100 olan kopma uzaması değerinin katkı oranının %43,88'e çıkmasıyla %380'e düştüğü görülmektedir. Çekme dayanımı değerleri için ise PLLA katkı oranının %34 oranına çıkartılmasıyla 27,4 MPa'lık bir artış yaşanmıştır. Bu noktada PLLA'nın yarattığı etki sebebiyle esnek zincirlerin hareketlerini kısıtlamış ve kopma uzaması değerinin düşmesine sebep olabilecek çapraz bağların oluşumuna katkı sağlamıştır. Hazırladığımız numune ile bu çalışmadaki matris tabanlar birbirlerine benzer olsa da kullanılan katkı oranları sebebiyle çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri birbirleriyle uyumadığı görülmektedir. Kısaca PLLA malzemeyi daha dayanıklı hale getirmiş, çinko borat ise ters etki yaparak dayanımı düşürmüştür. Çizelge 3.1'de [32] numaralı referansla gösterilen çalışmada, yüksek B₄C katkı oranlarında parçacık-parçacık etkileşimlerinin etkileri malzemenin kırılma mekaniğini etkilemektedir. Bu etkileşimler dolgu oranının artmasıyla elastik modül değerini de etkilemektedir. Bor

karbür (B_4C) katkılanmış polietilen kompozit çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerine bakıldığında bir dalgalanma görülmektedir ve katkı oranının artmasıyla da azalmaktadır. Aynı anomali kendi çalışmamızdaki %8,40 çinko borat katkılanmasıyla kopma uzamasındaki düşüş ile görülmüştür. Bu fenomen aynı çalışmada bahsi geçen “*Filler-matrix de-bonding theory*” ile açıklanabilir. Bu teoriye göre; arayüzdeki yapışma kuvvetleri uygulanan çekme gerilimi ile aşıldığında polimer matrisi B_4C parçacıklarının bağlarını kopartmaktadır. Ayrılmış B_4C parçacıkları reçine bağlarında gerilme artırıcılar (matrisde bulunan delikler) olarak görev görürler ve akmaya neden olurlar. Bu sonuç çekme değeri ve uzama değerinde B_4C 'nin hacimsel olarak artışı ile azalmaktadır. Bağ çözülmesi malzemede kullanılan matris ve dolgu yüzeyi arasında gerçekleşebilen en yaygın bozunma mekanizmasıdır. Bozunma matrise yapılan katkının dağılımındaki düzensizlik ve bozukluk sebebiyle stresin bu bozuk alanlara yönlmesiyle görülmektedir. Yapılan katkı türü değiştirilerek daha uyumlu katkılanırılma ve matris yüzeyinde daha iyi bir dağılım elde edilmeye çalışılsa da, matris yüzeyinde hali hazırda oluşmuş artık gerilmeler ve üretim sırasında meydana gelen gözenekler kompozitin mekanik veriminin düşmesine yol açacaktır. Numunemizde %8,40 çinko borat katkılanmasıyla kopma uzamasında meydana gelen bu anomalinin kaynağının bu şekilde oluşabileceği düşünülmektedir. Kopma uzamasındaki katkı oranı artışı ile meydana gelebilecek azalmanın aynı zamanda polimer-dolgu arasındaki çekimsel kuvvetlerden oluşabileceği ve bu kuvvetlerin çapraz bağlar ile bir bağ oluşturabilmek için polimer zincirlerinin serbest hareketliliğini kısıtlamasına sebep olmaktadır. Numunemizde %17,44 çinko borat katkılanmasıyla kopma uzaması %900 seviyesine düşerken, elastik modülünün 9,2 MPa değerine çıkması bu şekilde açıklanabilir. Referans [86] ile katkılanırılmış diğeri bir polimer olan termoplastik doğal kauçuk (TPNR) için belirlenmiş olan çekme dayanımı kademeli olarak katkı oranının artmasıyla azalmaktadır ancak %20 B_4C katkısı ile tekrar artış göstermiştir. Çinko borat katkılı poliüretan SEM görüntülerinden elde ettiğimiz sonuçlara göre katkı oranının %17,44 seviyesine çıkmasıyla matris yüzeyinde topaklanmaların meydana geldiği görülmektedir. Aynı sonuç, B_4C katkılı TPNR ile yapılan çalışmada da belirtilmiş ve bu meydana gelen topaklanmaların dolgu-matris bağlarına zarar verip kopma uzaması ve çekme dayanımında düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. Referans [91] ile belirtilen çalışmada, çinko borat ve çeşitli alev önleyici bileşiklerin, polipropilen ve orta-yoğunluktaki fiber levha (MDF) dolgulu

odun-plastik yapısının (MDF-PP) mekanik özellikleri incelenmiştir. Alev önleyici-geciktirici kabiliyeti nedeniyle polipropilen matrise katkılanılan çinko borat yapısının, kompozitin çekme dayanımında %11'lik bir kayıp yaratıp çekme değerinin 13,22 MPa değerine düştüğü, elastik modül değerinin ise artış göstererek 909,7 MPa değerine yükseldiği görülmektedir. Katkısız polipropilen matrise %3 oranında MAPP (maleik anhidrit polipropilen) aşılansıyla kompozitin çekme dayanımında ve elastik modülünde hafif bir artış yaşanmıştır. Daha sonrasında MAPP ve çinko borat katkılanılan polipropilenin çekme dayanımı ve elastik modülünde kontrol numunesine göre kıyaslandığında çekme dayanımında düşüş elastik modülde ise artış gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar [93, 94] referans nolu çalışmalara atıf yapılarak, yüksek oranda çinko borat magnezyum hidroksit, amonyum fosfat gibi alev önleyicilerin polimer matrisler içerisinde katkı maddesi olarak kullanılması çekme dayanımı için negatif etki yaratacağı belirtilmiştir. Çinko boratın, antimon trioksit, amonyum fosfat, magnezyum hidroksit gibi diğer alev önleyiciler ile polimer yapı içerisinde kullanılması elastik modül ve esneklik dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir. Bunun sebepleri; polimer ve çinko borat arasındaki yüzeyin kırılğan olması, polimer matris ve alev önleyicilerin beraber kullanıldıklarında aralarında oluşan yapısal uyumsuzluk olarak gösterilmiştir. Bu çalışmadan hareketle tez çalışması kapsamında katkı malzemesi olarak kullandığımız çinko borat inorganik yapısının yukarıda bahsedildiği gibi polimer yapıyla arasındaki uyumsuzluk ve bununla birlikte ortaya çıkan mekanik özelliklerde negatif etkilerin görülmesi, çinko borat katkılı poliüretan numunemizin çekme dayanımındaki 24 MPa'lık düşüşün yaşanmasına doğrudan etki edebilecek bir argüman olabileceği öngörülmüştür. Referans [90]'da etilen vinil asetat (EVA) ve yüksek yoğunluklu poli etilen (HDPE) malzemeleri ayrı ayrı farklı oranlarda (%1, %3, %5) çinko borat tozları katkılanılarak çift vidalı ekstrüder ile karıştırılarak elde edilmiştir. Çinko borat katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen mekanik özellik değerleri çizelge 3.1'de verildiği şekildedir. Hem nano hem de mikro boyuttaki çinko boratın EVA matrise katkılanılması çekme dayanımını ve elastik modülü düşürdüğü görülmektedir. Ancak mikro boyuttaki çinko borat katkısının mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi nano boyutta katkılanılan çinko borata göre daha fazladır. Kopma uzamasının ise nano boyuttaki %1 çinko borat katkılanılması ile arttığı görülmektedir. Bu katkı oranı %3 seviyesine çıktığında 456,70 MPa değerine düşmektedir. %5 katkı oranında ise 476,92 MPa seviyesinde

kopma uzaması değeri elde edilmiştir. Aynı anomali değeri mikro boyuttaki çinko borat katkılıdırıldığındaki kopma uzaması testlerinde de görülmüştür. Çinko borat katkılı HDPE kompozitleri için ise %1 katkı ile çekme dayanımı artış gösterir. Katkı oranının artmasıyla çekme dayanımı kademeli olarak azalmaktadır. Elastik modül değeri için mikro ve nano boyuttaki çinko borat katkısı ile kademeli olarak artmaktadır. Kopma uzaması değeri nano boyuttaki %1 katkılı çinko borat katkısı ile neredeyse iki katı değerine çıkmıştır. Katkı oranının %3'e çıkarılmasıyla tekrar artış gösterse de %5 katkılıdırılma ile kopma uzaması değerinin başlangıç seviyesine düştüğü görülmüştür. Sonuç olarak mikro ölçekteki çinko borat katkısının, kompozitin kopma uzaması değerleri hariç diğer mekanik özelliklerine negatif anlamda etki ettiği görülmektedir. İnorganik malzemelerin polimerlerde dolgu malzemesi olarak kullanımında, malzemenin mekanik özellikleri dolgu malzemesinin matris içerisinde iyi dağılmış olmasına ve dolgu-matris uyumuna bağlı olarak değişmektedir [95]. Mekanik yükün veya malzeme üzerindeki herhangi bir stres çeşidinin matris yapıdan dolgu malzemesine tamamen aktarılabilmesi mekanik özellikleri iyileştirebilmektedir. Ancak dolgu malzemesi olarak kullanılan çinko boratın mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi, beraber kullanıldığı matrise karşı uyumsuzluğu ile açıklanabilir [90]. Çinko borat gibi inorganik dolgu malzemeleri, matris ile aralarında görülen düşük yapışkanlık sebebiyle tam olarak matris ile uyum sağlayamaz ve malzemenin çekme dayanımını düşürür. Bu tez çalışmasında artan katkıya bağlı olarak çekme değerindeki azalış bu duruma atfedilebilmektedir. Referans [97]'de Başar Yıldız ve arkadaşlarının 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada, çinko borat katkılı poliüretan malzemenin alev önleyici özelliği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen kompozitin ilk katmanı alifatik poliüretan yapısından oluşmaktadır. İkinci katmanı ise çinko borat katkılı aromatik poliüretandan oluşmaktadır. Elde edilen mekanik test sonuçlarına göre çinko borat katkılıdırılması sonucunda mekanik özelliklerde düşüş görülmektedir. Kopma uzaması değerinde ise belirgin bir değişim görülmediği belirtilmiştir. OIT ölçümleri sonucunda kompozitin oksidatif stabilite sağladığı görülmüştür. Bunun sebebinin çinko borat yapısında ($4\text{ZnO} \cdot 6\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) bulunan çinko oksit (ZnO) kimyasal bileşiğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Çinko borat katkısında çinko oksit yapısının bulunması poliüretanı ultraviyole ışıklardan koruyucu bir etkidir. Gelen ışın poliüretanda katkılıdırılan inorganik çinko borat sayesinde absorbe edilir ve uzun süre boyunca kompozitin stabil yapısını korumaya devam eder [92]. Yaptığımız

Çalışma sonucunda, materyal ve yöntem kısmında bahsedildiği gibi: Üretilmiş olduğumuz polipropilene çinko borat katkılandırılması için çift vidalı ekstruder kullanılmıştır. Elde edilen numunemiz mekanik testler için oldukça kırılgan ve sert olduğu gözlemlenmiştir. Hinsken ve arkadaşlarının 1991 yılında yaptığı çalışmada, eriyik haldeki polipropilenin bozulma mekanizmaları incelenmiştir. Gerçekleşen bozulmanın moleküler ağırlıkta bir azalmaya ve polipropilenin moleküler ağırlığının dağılımının daralmasına yol açtığı belirtilmiştir. Ekstrüzyon sırasında eriyik haldeki polipropilen yüksek sıcaklıklarda kaymaya maruz kalır. Oksijenin ve safsızlıkların varlığı (hidroperoksitlerin veya katalizör kalıntılarının polimer yapıyı bozması ve kütle dağılımını etkilemesi) polipropilenin viskozitesinin düşmesine ve zincir ayrılmasının meydana gelmesine sebep olabileceği ifade edilmiştir. Bunun sonucunda polipropilenin mekanik özelliklerinde ciddi bir kayıp ve malzeme yüzeyinde sarılma görüldüğü belirtilmiştir [96]. Polipropilen ile ilgili bu çalışmadaki elde edilen sonuçlar kendi numunemizin neden kırılgan olduğu ve mekanik testlerinin neden gerçekleşemediği sorularına bir dayanak oluşturulabilir. Özetle, literatürde bulunan çeşitli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, katkı oranlarının etkileri ve malzemede meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Bu alışma kapsamında üretilmiş numunelerin davranışları ile karşılaştırma yapıldıktan sonra belirli çıkarımlar elde edilmiştir

Çinko borat katkılı polipropilen (PP) ve termoplastik poliüretan numuneleri için:

1. Çinko borat katkılı polipropilen kompozitin mekanik testlerinin yapılamayacak kadar gevrek bir yapıda olması, polipropilenin üretim safhasında oluşabilecek safsızlıklar, kütle dağılımı veya çeşitli artıkların birikmesi sebebiyle açıklanabilir.
2. Literatürdeki çeşitli tiplerdeki polimer malzemelere katkı olarak kullanılan çinko borat'ın sahip olduğu polimer malzemeler ile uyumsuzluk, düşük yapışkanlık gibi özellikleri numunelerimizin çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerindeki yaşanan düşüşün doğrudan sebepleri olarak belirtilebilir.
3. Termoplastik poliüretan numunenin, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri dikkate alındığında diğer numunelere göre nde olduğu görülmektedir.

4. Mikro boyutta kullanılan çinko borat'ın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Nano boyutlarda yapılabilecek çinko borat katkılandırmasının, yüksek katkı oranlarında topaklanma problemini giderebileceği, matrise daha iyi tutunabileceği ve mekanik özellikleri daha az etkileyebileceği öngörülebilir.
5. Çinko borat polimerlerin bozulmasını yavaşlatır, polimer zincirleri için fiziksel bir bariyer ve camsı bir kafes görevi görebilecek koruyucu bir tabaka oluşturmaktadır [86]. Polimerlerin yapısı gereği içerdikleri karbon ve hidrojen, malzemeleri aşırı sıcaklığa karşı hassaslaştırmakta ve yanma tehlikesi oluşturmaktadır. Çinko borat alev geciktirici, çevre dostu olması sebebiyle tercih edilebilir bir vasfa sahiptir [90].

3.3 Kütle Azaltma Katsayıları

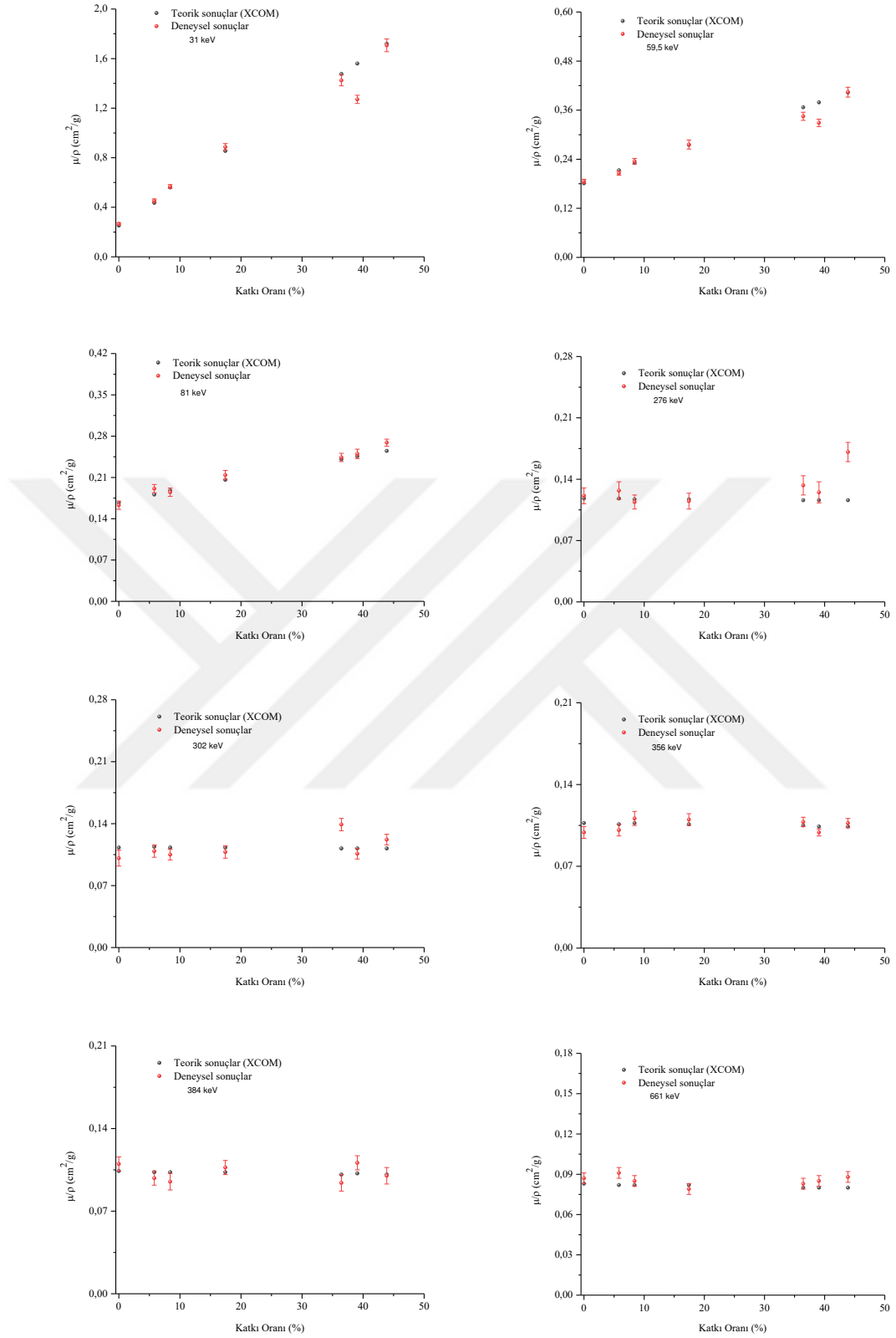
Üretilen örneklerin gama radyasyonunu zırlama özelliklerini belirlemek amacıyla sırasıyla 31, 59,5, 81, 276, 302, 356, 384, 661,6, 1172 ve 1332 keV gama ışını enerjilerinde ışımlar I_0 şiddetinde gönderilmiş ve numunelerden geçen ışın şiddeti (I) dedektörde tespit edilerek kütle azaltma katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca XCOM programı yardımıyla teorik kütle azaltma katsayıları hesaplanmıştır. Hem TPU hem de PP örnekleri için deneysel ve kütle azaltma katsayıları sırasıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmiştir. Şekil 3.8'de TPU örnekleri için Şekil 3.9'da ise PP örnekleri için her bir enerji değeri için teorik ve deneysel değerlerin karşılaştırıldığı grafikler yer almaktadır.

Çizelge 3.2: Termoplastik poliüretan (TPU) örnekleri için kütle azaltma katsayıları (cm²/g).

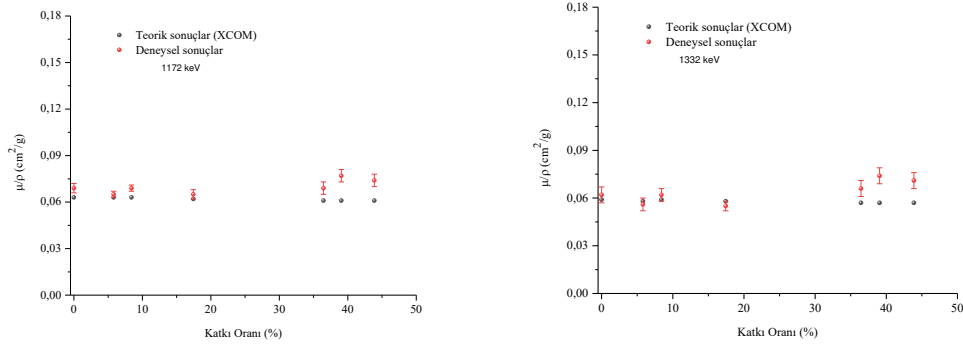
Enerji (keV)	KATKISIZ TPU		%5,8 KATKILI TPU		%8,4 KATKILI TPU		%17,44 KATKILI TPU		%36,45 KATKILI TPU		%39,06 KATKILI TPU		%43,88 KATKILI TPU	
	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik
31	0,266±0,009	0,252	0,453±0,014	0,436	0,568±0,015	0,560	0,887±0,027	0,855	1,424±0,044	1,476	1,271±0,033	1,560	1,707±0,051	1,719
59,5	0,186±0,005	0,181	0,206±0,005	0,213	0,235±0,007	0,231	0,276±0,011	0,275	0,345±0,010	0,367	0,329±0,009	0,379	0,404±0,012	0,403
81	0,163±0,007	0,167	0,191±0,007	0,181	0,185±0,007	0,188	0,214±0,008	0,206	0,244±0,007	0,241	0,250±0,008	0,246	0,269±0,006	0,255
276	0,121±0,009	0,118	0,127±0,010	0,118	0,114±0,008	0,117	0,115±0,009	0,117	0,133±0,011	0,116	0,125±0,012	0,116	0,171±0,011	0,116
302	0,101±0,007	0,113	0,109±0,007	0,114	0,105±0,006	0,113	0,108±0,007	0,113	0,139±0,007	0,112	0,106±0,006	0,112	0,122±0,006	0,112
356	0,099±0,005	0,107	0,101±0,005	0,106	0,111±0,006	0,107	0,110±0,005	0,106	0,108±0,004	0,105	0,099±0,003	0,104	0,107±0,004	0,104
384	0,110±0,006	0,104	0,098±0,006	0,103	0,095±0,007	0,103	0,107±0,006	0,103	0,094±0,007	0,101	0,111±0,006	0,102	0,100±0,007	0,101
661,6	0,087±0,004	0,083	0,091±0,004	0,082	0,085±0,004	0,082	0,079±0,004	0,082	0,083±0,004	0,080	0,085±0,004	0,080	0,088±0,004	0,080
1172	0,069±0,003	0,063	0,065±0,002	0,063	0,069±0,002	0,063	0,065±0,003	0,062	0,069±0,004	0,061	0,077±0,004	0,061	0,074±0,004	0,061
1332	0,062±0,005	0,059	0,056±0,004	0,058	0,062±0,004	0,059	0,055±0,003	0,058	0,066±0,005	0,057	0,074±0,005	0,057	0,071±0,005	0,057

Çizelge 3.3: Polipropilen (PP) örnekleri için kütle azaltma katsayıları (cm²/g).

Enerji (keV)	KATKISIZ PP		%5,6 KATKILI PP		%8 KATKILI PP		%17 KATKILI PP	
	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik	Deney sel	Teorik
31	0,264±0,009	0,238	0,436±0,011	0,447	0,678±0,029	0,703	0,892±0,047	0,874
59,5	0,244±0,008	0,191	0,230±0,006	0,225	0,257±0,006	0,263	0,282±0,006	0,289
81	0,208±0,007	0,178	0,184±0,005	0,191	0,259±0,006	0,206	0,247±0,006	0,215
276	0,156±0,012	0,126	0,185±0,012	0,125	0,175±0,012	0,124	0,181±0,011	0,123
302	0,148±0,007	0,122	0,166±0,007	0,121	0,135±0,006	0,120	0,173±0,007	0,119
356	0,108±0,004	0,115	0,074±0,004	0,113	0,091±0,004	0,112	0,107±0,004	0,112
384	0,107±0,006	0,112	0,109±0,005	0,110	0,112±0,007	0,109	0,120±0,005	0,108
661,6	0,082±0,004	0,089	0,092±0,004	0,087	0,079±0,004	0,086	0,082±0,004	0,086
1172	0,060±0,004	0,067	0,084±0,004	0,067	0,074±0,004	0,066	0,071±0,004	0,065
1332	0,061±0,004	0,063	0,078±0,004	0,062	0,067±0,005	0,062	0,077±0,005	0,061



Şekil 3.15: Termoplastik poliüretan (TPU) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.

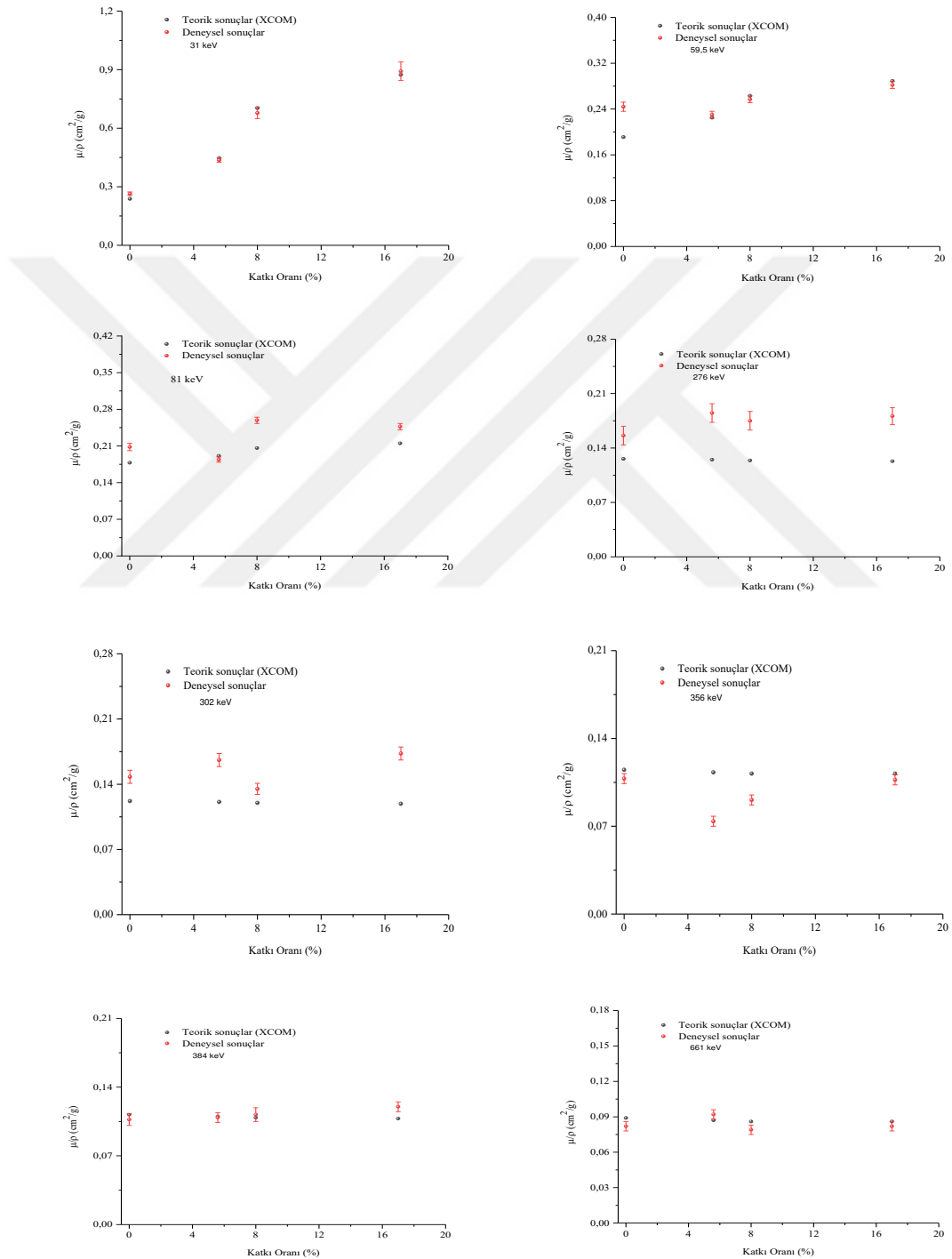


Şekil 3.15 (devam): Termoplastik poliüretan (TPU) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.

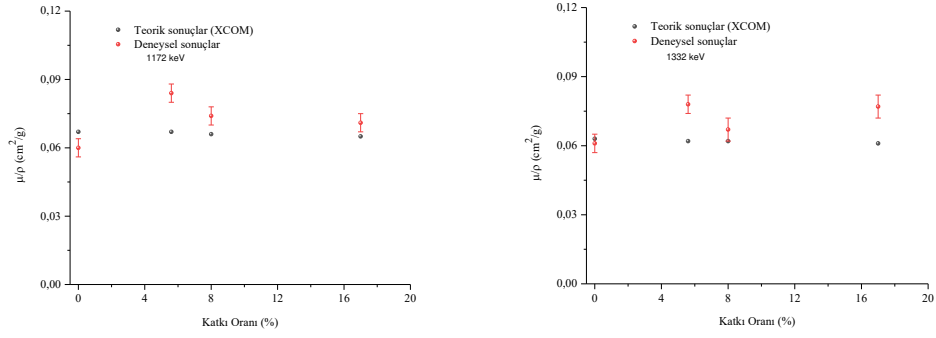
Çizelge 3.2 ve Şekil 3.8'deki sonuçlardan görüleceği üzere kütle azaltma katsayılarının artan enerji ile azaldığı ve artan katkılandırma miktarı ile arttığı gözlemlenmiştir. Uygulanan enerjileri üç kısımda; düşük enerji bölgesi (31-276 keV), orta enerji bölgesi (276-661 keV), yüksek enerji bölgesi (1172-1332 keV) olarak ele alırsak düşük enerji bölgesinde keskin bir azalış gözlemlenirken orta ve yüksek enerji bölgelerinde azalış daha stabil bir şekilde olmaktadır. Şekil 3.9'daki grafikler ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde 31 keV x-ışını enerjisi değerinde artan katkı oranları ile kütle azaltma katsayılarında arttığı net bir şekilde gözlenmektedir. Sadece %39,06 katkılı örnek için deneysel ve teorik kütle azaltma katsayıları arasında bir fark olduğu görülmektedir. Benzer davranış 59,5 keV enerji değerinde de gözlenmektedir. 81 keV enerjide kütle azaltma katsayısı değerlerinde artan katkı oranıyla, 31 ve 59,5 keV enerjilerine nispeten daha az olmakla birlikte, bir artış gözlenmektedir. 276, 302, 356, 384, 661,6, 1172 ve 1332 keV enerji değerlerinde artan katkı oranıyla birlikte kütle azaltma katsayıları açısından anlamlı bir artış elde edilemezken genel olarak deneysel ve teorik kütle azaltma katsayısı değerleri arasında gözle görülen bir fark vardır.

Polipropilen örnekleri için genel olarak artan enerji değerleri ile kütle azaltma katsayıları azalmaktadır. Şekil 3.9'daki grafikler incelendiğinde teorik ve deneysel değerlerin uyumlu olduğu 31 keV x-ışını enerjisi değerinde artan katkı oranları ile kütle azaltma katsayılarında arttığı net bir şekilde gözlenmektedir. Benzer davranış 59,5 keV enerji değerinde de gözlenmektedir. 81 keV enerjide kütle azaltma katsayılarında artan katkı oranıyla, 31 ve 59,5 keV enerjilerine nispeten daha az olmakla birlikte, bir artış gözlenmektedir. %10 ve %20 katkı oranlarında deneysel ve teorik değerler arasında az da olsa bir fark belirlemektedir. 276, 302, 356, 1172 ve

1332 keV enerji değerlerinde kütle azaltma katsayıları açısından anlamlı bir artış gözlenmezken deneysel ve teorik değerler arasında da fark vardır. 384 ve 661 keV enerji değerlerinde deneysel ve teorik değerlerin nispeten uyumlu olduğu gözlenirken, 384 keV enerji değerinde artan katkı oranıyla kütle azaltma katsayılarının da artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.16: Polipropilen (PP) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.



Şekil 3.16 (devam): Polipropilen (PP) örneklerinin teorik ve deneysel kütle azaltma katsayılarının 31-1332 keV enerji aralığında karşılaştırılması.

Literatürde mevcut çalışmalardan derlenmiş olan çeşitli polimerler kompozitlerin kütle azaltma katsayıları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4: Literatürden derlenmiş bazı polimer kompozit malzemelerin kütle azaltma katsayıları.

Polimer kompozit türü	Katkı oranı (%)	Kütle Azaltma Katsayıları (cm ² /g)									Kaynak
		59,5 keV	80,9 keV	276,3 keV	302,8 keV	356,0 keV	383,8 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1332 keV	
Polyester	%5 CdS	0,400	0,256	0,112	0,115	0,110	0,102	0,084	0,059	0,057	[39]
	%10 CdS	0,592	0,333	0,115	0,119	0,109	0,099	0,081	0,062	0,057	
	%15 CdS	0,783	0,426	0,115	0,113	0,109	0,105	0,080	0,062	0,057	
	%20 CdS	0,950	0,494	0,117	0,114	0,108	0,103	0,082	0,063	0,059	
Yüksek yoğunluklu Polietilen	Katkısız	0,196	-	-	-	0,116	-	0,090	0,070	0,065	[78]
	%10 ZnO	0,397	-	-	-	0,111	-	0,090	0,072	0,067	
	%20 ZnO	0,318	-	-	-	0,108	-	0,085	0,068	0,061	
	%30 ZnO	0,483	-	-	-	0,126	-	0,097	0,077	0,069	
	%40 ZnO	0,455	-	-	-	0,112	-	0,087	0,067	0,062	
	%30 ZnO	0,636	-	-	-	0,123	-	0,099	0,078	0,073	
	%40 ZnO	0,579	-	-	-	0,107	-	0,083	0,065	0,061	
Polyester	%2 Zn	0,215	0,177	0,117	0,112	0,104	0,103	0,083	0,059	0,056	[35]
	%4 Zn	0,244	0,198	0,111	0,110	0,103	0,106	0,081	0,063	0,059	
	%6 Zn	0,296	0,217	0,116	0,107	0,105	0,101	0,083	0,064	0,057	
	%8 Zn	0,309	0,224	0,112	0,115	0,107	0,102	0,083	0,061	0,055	
	%10 Zn	0,330	0,241	0,112	0,114	0,109	0,104	0,084	0,062	0,057	
Polietilen (PE)	Katkısız	0,112	-	-	-	-	-	0,112	0,054	0,056	[97]
Polipropilen (PP)	Katkısız	0,126	-	-	-	-	-	0,072	0,054	0,058	
Polistiren (PS)	Katkısız	0,089	-	-	-	-	-	0,083	0,074	0,051	
Polikarbonat (PC)	Katkısız	-	-	-	-	-	-	0,082	0,063	0,059	
Polimetil metakrilat (PMMA)	Katkısız	0,109	-	-	-	-	-	0,066	0,049	0,053	
Polivinil asetat (PVA)	Katkısız	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Polivinilpirolidon (PVP)	Katkısız	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Polipropilen	Katkısız	-	-	-	-	-	-	0,088	0,067	0,060	[26]
Polivinil klorür (PVC)	Katkısız	-	-	-	-	-	-	0,077	0,060	0,534	
Politetrafloroetilen (PTFE)	Katkısız	-	-	-	-	-	-	0,070	0,054	0,052	
Polistiren	Katkısız	-	-	-	-	-	-	0,083	0,061	0,057	

Çizelge 3.4'te görüldüğü üzere çeşitli katkılandırma maddeleri ve oranlarıyla üzerinde araştırmalar yapılmış farklı polimer malzemelerin 59,7 keV ile 1332 keV arasında ki enerji değerleri için kütle azaltma katsayıları verilmiştir. Çizelge 3.4'te verilen ilk örnekte kullanılan kadmiyum sülfür katkı oranının artmasıyla kütle azaltma katsayısı da artmaktadır. Numunelerimizin değerleriyle kıyaslandığında arada çok fark olmasının sebebi kullanılan katkı oranının atom numarasının fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Çizelge 3.4'te ikinci sırada ise makro ve nano ZnO katkı yüksek yoğunluklu polietilen çalışması bulunmaktadır. Dolgu-matris etkileşimi sonucunda ZnO nano-parçacıklarının kompozitteki hacim boşluklarını makro boyutta katkılandırılan ZnO'ya kıyasla daha iyi doldurduğu ve daha yüksek yapışma sağladığı belirtilmiştir. Dispersiyon yoğunluğunu etkileyen bu davranış ise doğrudan elektron yoğunluğunu ve yüzey hacmi yoğunluğuyla alakalı olmasından dolayı kütle azaltma katsayısını etkilemiştir. Bu tez kapsamında üretilen kompozitler için yorum yapacak olursak, %8 çinko borat katkılandırılan TPU ve %5,6 çinko borat katkılandırılmış PP kompozitlerinde 81 keV enerjide meydana gelen anomaliler katkılanan maddenin homojen bir şekilde dağılmamış olmasıyla açıklanabilir. Üçüncü sırada bulunan çinko katkı polyester çalışmasında, çinko oranının artmasıyla gama zırlama kapasitesinin arttığı görülmektedir. Tabloda derlenmiş olan çalışmalara bakıldığında çinko elementinin polimerler ile kullanıldığında gama ışımlarına karşı etkin olduğu söylenebilir. Bu tez çalışması kapsamında çeşitli katkı oranlarında çinko borat ilave edilerek üretilen TPU ve PP örneklerinin her ikisinin de kütle azaltma açısından literatürdeki örneklere benzer bir davranış sergilediği görülmektedir. Yüksek enerjilerde kütle azaltmanın etkin olmaması malzemelerin yeterince yoğun olmamasına atfedilebilmektedir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etki yüksek olduğu için kütle azaltması daha etkin bir şekilde kendini göstermektedir. Deneysel kütle azaltma katsayısı değerleri ile teorik değerler arasında gözlenen uyumsuzluklar polimer malzeme yüzeyinin yeterince pürüzsüz olmaması ve homojen dağılımın ideal olarak sağlanamamasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.

3.4 Nötron Eşdeğer Dozu ve Tesir Kesitleri

Nötron dedektörü ile ortalama doz ($\mu\text{Sv/h}$) ölçümü yapılarak ortamdaki nötronların belirlenmesi için 10 boş sayım alınmıştır. Akabinde dedektör ile kaynak arasında

koyulan her numune için sayımlar 10 kere tekrarlanarak ortalama bir değer elde edilmiştir. Ölçüm ve hesaplamalar sonucu Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da TPU ve PP örnekleri için ayrı ayrı özetlenmiştir. Ayrıca Makroskobik tesir kesitleri için aşağıdaki yol izlenerek hesaplama yapılmış ve bulunan değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Boş Sayım = Gelen nötronların eşdeğer doz oranı

Doz = Numuneyi geçen nötronların eşdeğer doz oranı

Doz transmisyonu = Numuneyi geçen nötronların eşdeğer doz oranı/Gelen nötronların eşdeğer doz oranı olmak üzere;

$$\Sigma = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{Doz}{Boş Sayım}\right) \quad (3.1)$$

Denklemden makroskobik tesir kesit (Σ) hesaplanmıştır (Çizelge 3.5).

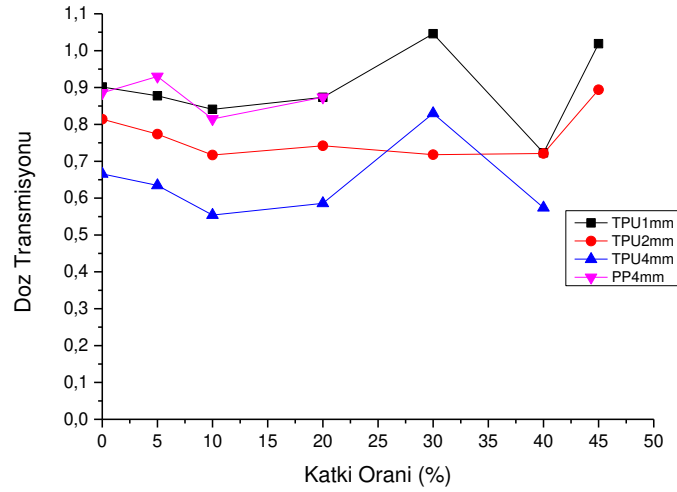
Çizelge 3.5: Termoplastik poliüretan (TPU) için elde edilen nötron doz ölçümleri ve hesaplanan tesir kesitleri.

Planlanan Kalınlık (cm)	Katkı Oranı (%)	Doz Transmisyonu (D/D_0)	Kalınlık (cm)	Makroskobik Tesir Kesiti Σ (cm ⁻¹)
0,1	Katkısız	0,901	0,100	1,043
	%4,58 ÇB katkılı	0,878	0,100	1,301
	%8,40 ÇB katkılı	0,841	0,105	1,649
	%17,44 ÇB katkılı	0,873	0,100	1,358
	%36,45 ÇB katkılı	1,046	0,109	-0,413
	%39,06 ÇB katkılı	0,723	0,900	0,360
	%43,88 ÇB katkılı	1,019	0,130	-0,145
0,2	Katkısız	0,814	0,180	1,143
	%4,58 ÇB katkılı	0,774	0,210	1,220
	%8,40 ÇB katkılı	0,717	0,240	1,386
	%17,44 ÇB katkılı	0,742	0,205	1,456
	%36,45 ÇB katkılı	0,718	0,192	1,725
	%39,06 ÇB katkılı	0,721	0,180	1,817
	%43,88 ÇB katkılı	0,894	0,260	0,431
0,4	Katkısız	0,666	0,380	1,070
	%4,58 ÇB katkılı	0,634	0,315	1,447
	%8,40 ÇB katkılı	0,554	0,500	1,181
	%17,44 ÇB katkılı	0,586	0,480	1,113
	%36,45 ÇB katkılı	0,830	0,396	0,471
	%39,06 ÇB katkılı	0,574	0,390	1,423
	%43,88 ÇB katkılı	-	-	-

Çizelge 3.6: Polipropilen (PP) için elde edilen nötron doz ölçümleri ve hesaplanan tesir kesitleri.

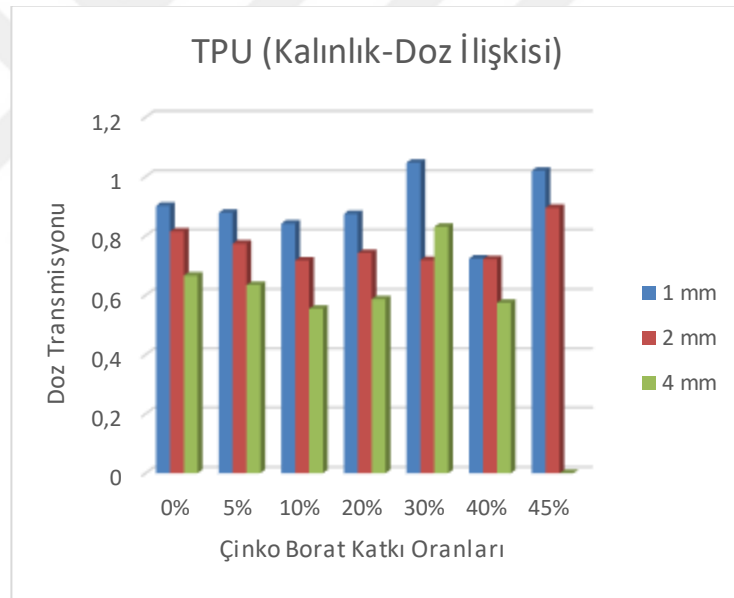
Katkı Oranı (%)	Doz Transmisyonu (D/D_0)	Kalınlık (cm)	Makroskobik Tesir Kesiti Σ (cm ⁻¹)
Katkısız	0,885	0,400	0,304
% 5,6 ÇB katkılı	0,930	0,350	0,207
% 8 ÇB katkılı	0,815	0,350	0,586
% 17 ÇB katkılı	0,874	0,300	0,450

Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Şekil 3.11'den nötron analizlerine genel olarak bakıldığında artan kalınlık ve katkı oranına bağlı olarak nötron doz transmisyonunun azaldığı gözlenmektedir. Öte yandan, 1 mm kalınlıklı TPU örnekleri içerisinde %36,45 ve %43,88 çinko borat katkılı örneklerde doz transmisyonunda anlamsız bir yükseliş gözlenmektedir. Benzer şekilde anlamsız artışa 2 mm kalınlıkta TPU örneklerinde %43,88 çinko borat katkılı numunede rastlanırken, 4 mm kalınlıklı TPU örneklerinde ise %39,06 çinko borat katkılı örnekte rastlanmaktadır. PP örneklerinde de net olmamakla birlikte çinko borat katkısıyla doz transmisyonunun azaldığı görülmektedir. Doz transmisyonu değerinde %8 çinko borat katkılandırılması sonrasında %12,36'lık bir düşüş meydana gelmektedir. Bunun sebebinin, deney mekanizması ve geometrisinden meydana gelebilecek hatalar haricinde polimer ve çinko borat yapısında meydana gelebilecek elastik ve elastik olmayan saçılmaların yaratacağı fenomenlerden kaynaklanabileceği öngörülebilir. Özellikle %5,6 çinko borat katkılı örnekte anlamsız bir doz artışı gözlenmektedir. 4 mm kalınlıkta TPU ve PP örnekleri karşılaştırıldığında %5, %8 ve %17 çinko borat katkılarının hepsinde nötron doz transmisyonunun TPU örneklerinde PP örneklerinden daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum TPU'nun PP'ye nazaran nötron zırlama bakımından daha tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.17: Çinko borat katkısının nötron doz transmisyonuna etkisi.

Şekil 3.11’de TPU örnekleri için kalınlık doz transmisyonu ilişkisi grafiğinde görüldüğü üzere beklenene yakın olarak kalınlık arttıkça doz transmisyonunun azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 3.18: TPU örnekleri için kalınlık doz transmisyonu ilişkisi.

Aşağıda Çizelge 3.7’de çeşitli polimer kompozit malzemeler için literatürden derlenmiş nötron tesir kesiti değerleri yer almaktadır. Tablo incelendiğinde epoksi numunesinin $\text{kil+B}_4\text{C}$ ve molibden katkılı iki örneği bizim elde ettiğimiz sonuçlarla uyum sağlarken diğer örnekler oldukça düşük nötron tesir kesiti değerlerine sahiptir. Nötron tesir kesitinin düşük olması doz transmisyonunun yüksek olduğuna işaret ettiği için bu çalışmada elde edilen sonuçlar nötron zırhlama için diğerlerine göre daha tercih edilebilir olarak belirmektedir. Bu tez kapsamında PP örnekleri için çinko borat katkı oranıyla değişmekle birlikte tesir kesiti değerleri $0,207 \text{ cm}^{-1}$ ile $0,586 \text{ cm}^{-1}$

¹ değerleri arasında değişmektedir. TPU örnekleri için ise tesir kesiti değerleri 0,145 cm⁻¹ ile 1,817 cm⁻¹ değerleri arasında değişmektedir.

Çizelge 3.7: Literatürde mevcut bazı malzemeler için nötron tesir kesiti değerleri.

Polimerler	Katkı Oranları	Tesir Kesit (cm ⁻¹)	Uygulanan Enerji Miktarı	Tesir Kesiti Türü	Kaynak
Elastomer	Katkısız	0,020	2 MeV	DeneySEL Makroskopik	[98]
	%3 B ₄ C	0,020			
	%9 B ₄ C	0,021			
	%27 B ₄ C	0,019			
	%3 Gd ₂ O ₃	0,023			
	%9 Gd ₂ O ₃	0,024			
	%27 Gd ₂ O ₃	0,031			
	%3 Sm ₂ O ₃	0,030			
	%9 Sm ₂ O ₃	0,028			
	%27 Sm ₂ O ₃	0,026			
	%10 Gd ₂ O ₃ + %2 B ₄ C	0,027			
Spektra/Epoksi	Katkısız	0,189	2 MeV	DeneySEL Makroskopik	[99]
	%10 B ₄ C	0,289			
	%20 B ₄ C	0,313			
Poli(N-izopropilakrilamid)	Katkısız	0,1371	81-1332 keV	Teorik	[5]
Polietilen tereftalat	Katkısız	0,1007			
Polistiren	Katkısız	0,0963			
Polikarbonat	Katkısız	0,1022			
Polyester	%5 CdS	0,1367	4,5 MeV	Teorik Makroskopik	[38]
	%10 CdS	0,1394			
	%15 CdS	0,1420			
	%20 CdS	0,1433			
Epoksi/Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen fiber	Katkısız	0,189	2 MeV	DeneySEL	[99]
	%10 B ₄ C	0,289			
	%20 B ₄ C	0,313			
Polietilen B201	Kurşun-boron	0,157			
Epoksi	İlmenit	0,198			
Epoksi	Molibden	0,462			
Epoksi	Kil+B ₄ C	1,047			
CC (Beton kontrol numunesi)	Katkısız	0,132	21 keV-5 MeV	DeneySEL	[100]
		0,135		Teorik	
Atık polimer	Beton	0,137		DeneySEL	
		0,148		Teorik	
Atık polimer	Çelik cüruf	0,141		DeneySEL	
		0,149		Teorik	
Atık polimer	Çelik cüruf + demir	0,152		DeneySEL	
		0,164		Teorik	
Atık polimer	Çelik cüruf + demir + boraks	0,155		DeneySEL	
		0,167		Teorik	
Polipropilen (PP)	ÇB	0,207-0,586	4,5 MeV	DeneySEL	Bu çalışmada
Termoplastik Poliüretan (TPU)	ÇB	0,145-1,817	4,5 MeV	DeneySEL	Bu çalışmada

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nötronlar malzeme bilimi, uzay araştırmaları, medikal uygulamalar ve enerji sektörü gibi pek çok kritik alanda oldukça etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Nötronların madde ile etkileşiminin anlaşılması güvenlik önlemleri açısından zırhlama çalışmalarında önem arz etmektedir. Nötronlar çoğunlukla enerjilerini yaptıkları esnek ve esnek olmayan çarpışmalarla kaybederler. Esnek çarpışmaların olması durumunda nötronları yavaşlatmakta hafif elementler daha etkilidirler. Bu nedenle içinde hidrojen oranı yüksek parafin, su ve polimer gibi malzemelerin kullanılması en uygundur. Nötronların yakalanmasında ise genelde lityum ve bor kullanılır. Elastik olmayan çarpışmalarda gelen nötronlar enerjilerinin bir kısmını hedef atomuna aktararak onu uyarırlar. Kararsız durumundaki bu hedef atomu gama ışınları yayınlamaya kararlı duruma geçer. Bu durum nötronlara karşı zırh malzemesi seçerken, seçilen kalkan malzemesinin uyarma sonucu malzemeden yayımlanacak gama ve x-ışınları içinde etkin azaltma sağlamasını gerektirmektedir. Aynı zamanda ideal bir zırh malzemesinin esnek, saydam, hafif, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı, ucuz, üretimi kolay, hammaddesi bol ve çevreye duyarlı olması gibi pek çok özellik beklenmektedir. Bu amaçla pek çok akademik çevrelerce yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Bu tez çalışmasında çinko borat katkılı üretilen TPU ve PP kompozitlerinin düşük enerjilerde (31, 59,5 ve 81 keV) elektromanyetik radyasyona karşı artan katkı ile birlikte etkin bir zırh malzemesi olabileceği anlaşılmıştır. Yüksek enerjilerde enerji arttıkça malzemenin yoğunluğu ile ilişkilendirilebilecek şekilde kütle azaltma katsayısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sırasıyla 276, 302, 356, 384, 661,6, 1172 ve 1332 keV enerji değerlerinde artan katkı oranıyla birlikte kütle azaltması açısından anlamlı bir sonuç gözlenmezken, artan çinko borat katkı oranı ile değişmekle birlikte TPU örnekleri için 31 keV’de kütle azaltma katsayıları 0,266-1,707 cm²/g, 59,5 keV’de 0,186-0,404 cm²/g ve 81 keV de 0,163-0,269 cm²/g arasında değerler almaktadır. PP örnekleri için ise, 31 keV’de kütle azaltma katsayıları 0,264-0,892 cm²/g, 59,5 keV’de 0,244-0,282 cm²/g ve 81 keV de 0,208-0,247 cm²/g arasında değerler almaktadır. Bu sonuçlardan hareketle gama radyasyonu için termoplastik poliüretan’ın

polipropilen'den daha etkili bir zırh malzemesi olduğu söylenebilir. Yapılan literatür araştırması sonuçları çoğu polimer çeşidinin katkı oranı ve katkı maddesine bağlı olarak kütle azaltması bakımından benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Öteyandan nötron tesir kesitinin düşük olması doz transmisyonunun yüksek olduğuna işaret ettiği için bu çalışmada elde edilen sonuçlar nötron zırhlama için literatüre göre daha tercih edilebilir olarak belirlemektedir. Tesir kesiti değerleri PP örnekleri için çinko borat katkı oranıyla değişmekle birlikte $0,207 \text{ cm}^{-1}$ ile $0,586 \text{ cm}^{-1}$ değerleri arasında değişmektedir. TPU örnekleri için ise $0,145 \text{ cm}^{-1}$ ile $1,817 \text{ cm}^{-1}$ değerleri arasında değişmektedir. Katkı oranına bağlı olarak tesir kesiti değerlerinin düzenli bir artış beklenirken, anomalilerin görüldüğü numunelerde homojen dağılımının yeterince sağlanamadığıyla ilişkili olarak inişli çıkışlı değerler elde edilmiştir. Kullanılan çinko boratın bor bileşeninin % 80 ^{10}B ve % 20 ^{11}B içeriğine sahip olması sonucu oluşan ikincil iyonizasyonlara atfedilebilmektedir. ^{10}B 'un hızlı nötron yakalama tesir kesiti yüksektir. Katkı arttıkça numune içerisindeki hidrojen miktarının azalmasına yol açacağından azalan hidrojen miktarı nötronların yavaşlatma hızını düşürmektedir. Bu durum hızlı nötron yakalama tesir kesitini arttıracaktır. Tesir kesitindeki önce azalış sonra artışın olması zayıfta olsa bu gerekçeye atfedilmektedir. Çinko borat'ın matris içinde katkı oranının artması, termal nötronların yakalanmasında önemli rol oynamaktadır. Eğer çekirdekler arasındaki boşluklar serbest ortalama yol değerinden daha yüksek ise, yakalanan nötronların sayısı daha düşük olacaktır. Bu sebeple nano boyuttaki çinko borat parçacıkları mikro boyuttaki çinko borat parçacıklarına göre termal nötron akısı daha fazla olması beklenebilir. Böylece mikro boyutta çinko borat katkılı kompozitlerin toplam tesir kesiti değerlerinin nano kompozitlere görece daha büyük olması öngörülmüştür. Mikro boyuttaki çinko borat katkısı matris içerisinde nano boyuttaki çinko borat katkısına göre daha kolay topaklanır ve mikro parçacıkların arasındaki mesafe nano parçacıklara göre daha azdır. Mikro boyuttaki çinko borat katkısının nötronlar ile etkileşim olasılığının nano boyuttaki katkılandırmanın getireceği parçacıklar arasındaki uzaklık sorunu nedeniyle daha yüksek olabileceği söylenebilir. Genel olarak sonuçlarda görülen inişli çıkışlı davranışlar SEM görüntüleriyle de açıklandığı gibi polimer-tanecik etkileşimlerinin zayıf olması ve ayrı fazlar oluşturmamasından kaynaklanabilir. Polimer matrisinde yer alan her bir taneciğin ara yüzeyi yapıda boşluklar oluşturduğu düşünüldüğünde bu sonucun ortaya çıkması beklenebilmektedir. Mekanik özellikler açısından kompozitlerin davranışını

incelediğimizde genel olarak çinko borat katkısının malzemenin mekanik özelliklerini kötü yönde etkilediği söylenebilir. Öneri olarak; çinko borat katkısının literatürde kullanım amacının genellikle alev önleyici olması belirtilmektedir. Bu nedenle üretilen örneklerde yanma analizlerinin yapılması önerilmektedir. Genellikle gama radyasyonuna karşı soğurucu olarak kurşun tercih edilmektedir. Kurşunun toksik özelliklerinin yüksek olması çoğu durumda dez avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Düşük enerji aralığında (31-81 keV) üretilen numunenin diğer vasıfları güçlendirilerek kurşuna alternatif olarak tercih edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/rezervler.html>>, erişim tarihi 05.01.2023.
- [2] **Url-2** <<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/e4a39512-c597-457e-8f9c-549023c3d314-46d1966b/relevance/1>>, erişim tarihi 05.01.2023.
- [3] **Url-3** <<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/956ba4c0-8f8a-40af-93bb-5fedd1218049-46d213b9/relevance/1>>, erişim tarihi 05.01.2023.
- [4] **Url-4** <<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/e9c7e2de-755f-49a0-96ca-21dfd621ef28-46d2323c/relevance/1>>, erişim tarihi 05.01.2023.
- [5] **Bhuiyan, S.I., Ahmed, F., Mollah, A.S., & Rahman, M.A.** (1989). Studies of the neutron transport and shielding properties of locally developed shielding material: poly-boron. *Health physics*, 57 5, 819-24 .
- [6] **A. El-Sayed Abdo** (2002). Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 29, Issue 16, Pages 1977-1988.
- [7] **Gwaily, S.E., Badawy, M.M., Hassan, H.H., & Madani, M.** (2002). Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields: I. B4C/NR composites. *Polymer Testing*, 21, 129-133.
- [8] **Adib, M., & Kilany, M.** (2003). On the use of bismuth as a neutron filter. *Radiation Physics and Chemistry*, 66, 81-88.
- [9] **T. Ersez, G. Braoudakis, J.C. Osborn** (2006). Radiation shielding for neutron guides, *Physica B: Condensed Matter*, Volumes 385–386, Part 2, Pages 1268-1270.
- [10] **Morioka, A., Sakurai, S., Okuno, K., Sato, S., Verzirov, Y., Kaminaga, A., Nishitani, T., Tamai, H., Kudo, Y., Yoshida, S., & Matsukawa, M.** (2007). Development of 300 °C heat resistant boron-loaded resin for neutron shielding. *Journal of Nuclear Materials*, 367, 1085-1089.
- [11] **D.L. Chichester, B.W. Blackburn** (2007). Radiation fields from neutron generators shielded with different materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 261, Issues 1–2, Pages 845-849.

- [12] **Chaudhari, C.V., Dubey, K.A., Bhardwaj, Y.K., Naxane, G., Sarma, K., & Sabharwal, S.G.** (2007). Effect of electron beam radiation on the polypropylene/ polyethylene blends: Radiation stabilization of polypropylene. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms*, 263, 451-457.
- [13] **Haydaruzzaman, Ruhul A. Khan, Mubarak A. Khan, A.H. Khan, M.A. Hossain** (2009). Effect of gamma radiation on the performance of jute fabrics-reinforced polypropylene composites, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 78, Issue 11, Pages 986-993.
- [14] **Huang, W., Chen, Z., Xiong, J. et al.** (2010). Radiation effect of neutrons in a reactor on polyurethane. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit.* 25, 966-968.
- [15] **Murray, K.A., Kennedy, J.E., McEvoy, B., Vrain, O., Ryan, D., Cowman, R., & Higginbotham, C.L.** (2013). The influence of electron beam irradiation conducted in air on the thermal, chemical, structural and surface properties of medical grade polyurethane. *European Polymer Journal*, 49, 1782-1795.
- [16] **E.F. Alfaro, D.B. Dias, L.G.A. Silva** (2013). The study of ionizing radiation effects on polypropylene and rice husk ash composite, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 84, Pages 163-165.
- [17] **Walo, M., Przybytniak, G., Łyczko, K., & Piątek-Hnat, M.** (2014). The effect of hard/soft segment composition on radiation stability of poly(ester-urethane)s. *Radiation Physics and Chemistry*, 94, 18-21.
- [18] **Sui, H., Liu, X., Zhong, F., Li, X., Wang, B., & Ju, X.** (2014). Relationship between free volume and mechanical properties of polyurethane irradiated by gamma rays. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(2), 701-706.
- [19] **Mann, K.S., Rani, A., & Heer, M.S.** (2015). Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry*, 106, 247-254.
- [20] **Ghobashy, M.M., & Abdeen, Z.I.** (2016). Radiation Crosslinking of Polyurethanes: Characterization by FTIR, TGA, SEM, XRD, and Raman Spectroscopy.
- [21] **Ambika, M.R., Nagaiah, N., Harish, V., Lokanath, N.K., Sridhar, M.A., Renukappa, N.M., & Suman, S.K.** (2017). Preparation and characterisation of Isophthalic-Bi₂O₃ polymer composite gamma radiation shields. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 351-358.

- [22] **Al Naim, A.F., Alnaim, N., Ibrahim, S.S., & Metwally, S.M.** (2017). Effect of gamma irradiation on the mechanical properties of PVC/ZnO polymer nanocomposite. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10, 165 - 171.
- [23] **Zali, N.M., Yazid, H., & Megat Ahmad, M.H.** (2018). Neutron shielding behavior of thermoplastic natural rubber/boron carbide composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 298.
- [24] **Li, X., Wu, J., Tang, C., He, Z., Yuan, P., Sun, Y., Lau, W., Zhang, K., Mei, J., & Huang, Y.** (2019). High temperature resistant polyimide/boron carbide composites for neutron radiation shielding. *Composites Part B: Engineering*.
- [25] **Cherkashina, N.I., Pavlenko, V.I., & Noskov, A.V.** (2019). Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*.
- [26] **Nagaraja, N. & Manjunatha, H.C. & Seenappa, L. & Sridhar, K. & Ramalingam, H.B..** (2019). Selection of shielding materials for gamma/X-ray and neutron radiations among the commonly used polymers. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*. 13. 325.
- [27] **Kaçal, M.R., Akman, F., & Sayyed, M.I.** (2019). Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology*.
- [28] **Thakur, S., Kaur, P., & Singh, L.** (2019). Investigation of polymethyl methacrylate incorporated neodymium oxide for gamma-ray and neutron shielding behaviour. *ADVANCES IN BASIC SCIENCE (ICABS 2019)*.
- [29] **Körpınar, B., Canbaz Öztürk, B., Çam, N. F., & Akat, H.** (2020). Radiation shielding properties of poly(hydroxyethyl methacrylate)/tungsten(vi) oxide composites. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 121986.
- [30] **Sharma, A., Sayyed, M.I., Agar, O., Kaçal, M.R., Polat, H., & Akman, F.** (2020). Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 122330.
- [31] **Hu, G., Shi, G., Hu, H., Yang, Q., Yu, B., & Sun, W.** (2020). Development of gradient composite shielding material for shielding neutrons and gamma rays. *Nuclear Engineering and Technology*, 52, 2387-2393.
- [32] **Uddin, Z., Yasin, T., Shafiq, M., Raza, A., & Zahur, A.** (2020). On the physical, chemical, and neutron shielding properties of polyethylene/boron carbide composites. *Radiation Physics and Chemistry*.

- [33] **Fan, J., Wu, J., & Ma, Y.** (2020). Effect of different size of PbWO₄ particles on EPDM composite for gamma-ray shielding. *International Journal of Modern Physics B*, 34, 2050046.
- [34] **Eskalen, H., Kavun, Y., Kerli, S., & Eken, S.** (2020). An investigation of radiation shielding properties of boron doped ZnO thin films. *Optical Materials*, 105, 109871.
- [35] **Kaçal, M.R., Polat, H., Oltulu, M., Akman, F., Agar, O., & Tekin, H.O.** (2020). Gamma shielding and compressive strength analyses of polyester composites reinforced with zinc: an experiment, theoretical, and simulation based study. *Applied Physics A*, 126, 1-15.
- [36] **Hu, C., Huang, Q., & Zhai, Y.** (2022). Correction: Thermal, mechanical investigation and neutron shielding analysis for Gd-MOF/polyimide materials. *RSC advances*, 12(10), 5768.
- [37] **Kaçal, M.R., Dilsiz, K., Akman, F., & Polat, H.** (2021). Analysis of radiation attenuation properties for Polyester/Li₂WO₄ composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109257.
- [38] **Al-Buriahi, Eke, C., Alomairy, S., Yildirim, A., Alsaedy, H., & Sriwunkum, C.** (2021). Radiation attenuation properties of some commercial polymers for advanced shielding applications at low energies. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(6), 2386–2396.
- [39] **Dilsiz, K., Ogul, H., Akman, F., Agar, O., Kacal, M. R., Polat, H., & Dursun, İ.** (2021). Evaluation of cds doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865.
- [40] **Kilicoglu, O., Kara, U., & Inanc, I.H.** (2020). The impact of polymer additive for N95 masks on gamma-ray attenuation properties. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 124093 - 124093.
- [41] **Pirker, L., Krajnc, A.P., Malec, J., Radulovic, V.M., Gradišek, A., Jelen, A., Remškar, M., Mekjavić, I.B., Kovač, J., Mozetič, M., & Snoj, L.** (2020). Sterilization of polypropylene membranes of facepiece respirators by ionizing radiation. *Journal of Membrane Science*, 619, 118756 - 118756.
- [42] **Yılmaz, M.** (2021). *Farklı Oranlarda Bizmut Tungstat veya Kalay ile Katkılanmış Polimer Kompozitlerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl.
- [43] **Knoll, G. F.** (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- [44] **L'Annunziata, M. F.** (Ed.). (2012). *Handbook of radioactivity analysis*. Academic Press.

- [45] **Krane, K.** (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons. p. 68.
- [46] **L'Annunziata, M.F.** (2007). *Radioactivity: introduction and history*. Elsevier BV. Amsterdam, Netherlands. ISBN 978-0-444-52715-8.
- [47] **Hassan, H. E., Badran, H. M., Aydarous, A., & Sharshar, T.** (2015). Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for γ -rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 360, 81–89.
- [48] **Seven Uzun, A.** (2021). Radyasyonun ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Kurşunun İnsan Sağlığına Etkileri Üzerine Bir Araştırma . *DÜSTAD Dünya Sağlık ve Tabiat Bilimleri Dergisi* , 4 (2) , 65-74.
- [49] **Sürücü, A.M., & Subaşı, S.** (2021). Nanomateryallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*.
- [50] **Dong, M., Sayyed, M.I., Lakshminarayana, G., Ersundu, M.Ç., Ersundu, A.E., Nayar, P., & Mahdi, M.A.** (2017). Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. *Journal of Non-crystalline Solids*, 468, 12-16.
- [51] **Mostafa, A.M., Issa, S.A., & Sayyed, M.I.** (2017). Gamma ray shielding properties of PbO-B₂O₃-P₂O₅ doped with WO₃. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 294-300.
- [52] **Şenyiğit, M.,** (2011). *Nükleer Reaksiyonlar Sonucu Açığa Çıkan Gamma Işınları ve Nötronların Germanyum Detektör Sistemi İle Etkileşimleri*. (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [53] **Tuna, T.,** (2017). *Polyester Matrisli Bor Karbük Takviyeli Nötron Radyasyonu Zırhlama Malzemesinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [54] **Martin JE** (2006). *Physics for Radiation Protection, A Handbook*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [55] **Manohara, S.R., & Hanagodimath, S.M.** (2007). Effective atomic numbers for photon energy absorption of essential amino acids in the energy range 1 keV to 20 MeV. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms*, 264, 9-14.

- [56] **Küçük, N. & Gezer, O.** (2017). Doğal Siyah Obsidyen Cevherleri İçin Yığılma Faktörlerinin Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 17 (3) , 872-880.
- [57] **AYGÜN B.** (2015). *Nükleer Uygulamalarda Radyasyon Güvenliği Amacıyla Yeni Kalkan Malzemelerin Deneysel ve Monte Carlo Simülasyon Kodları (CERN-FLUKA VE GEANT4) ile Belirlenmesi ve Fabrikasyonu.* (Doktora Tezi). Atatürk Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [58] **Sunny, A. T., & Thomas, S.** (2009). Polymeric materials: Elastomers, plastics, fibers, composites, nanocomposites and blends. *Advances in Polymer Processing*, 47–70.
- [59] **Alariqi, S.A., Kumar, A.P., Rao, B.S., Tevtia, A.K., & Singh, R.K.** (2006). Stabilization of γ -sterilized biomedical polyolefins by synergistic mixtures of oligomeric stabilizers. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 2451-2464.
- [60] **Nebhani, L., & Jaisingh, A.** (2020). Chemical analysis of polymers. *Polymer Science and Innovative Applications*.
- [61] **Popelka, A., Zavahir, S., & Habib, S.** (2020). Morphology analysis. *Polymer Science and Innovative Applications*.
- [62] **URL-5** < <https://web.itu.edu.tr/~arana/mal201>>. Prof. Dr. Ahmet Aran (2007-2008), Ders notları, erişim tarihi 05.01.2023.
- [63] **Deshmukh, K., Kovářík, T., Muzaffar, A., Basheer Ahamed, M., & Khadheer Pasha, S.K.** (2020). Mechanical analysis of polymers.
- [64] **İmak, A. , Solmaz, M. Y. & Topkaya, T.** (2016). Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi . *El-Cezeri* , 3 (3) , 0-0.
- [65] **Post, W., Cohades, A., Michaud, V., van der Zwaag, S., & Garcia, S. J.** (2017). Healing of a glass fibre reinforced composite with a disulphide containing organic-inorganic epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, 152, 85–93.
- [66] **Huang, W., Yang, W., Ma, Q., Wu, J., Fan, J., & Zhang, K.** (2016). Preparation and characterization of γ -ray radiation shielding pbwo4/EPDM composite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309(3), 1097–1103.
- [67] **Wang, P., Tang, X., Chai, H., Chen, D., & Qiu, Y.** (2015). Design, fabrication, and properties of a continuous carbon-fiber reinforced Sm2O3/polyimide gamma ray/neutron shielding material. *Fusion Engineering and Design*, 101, 218-225.

- [68] **Amin, G.A., & Abd-El Salam, M.H.** (2014). Optical, dielectric and electrical properties of PVA doped with Sn nanoparticles. *Materials Research Express*, 1.
- [69] **Sharma, M., Sharma, S.M., Abraham, J., Thomas, S., Madras, G., & Bose, S.** (2014). Flexible EMI shielding materials derived by melt blending PVDF and ionic liquid modified MWNTs. *Materials Research Express*, 1.
- [70] **Haber, F.E., & Froyer, G.** (2008). Transparent polymers embedding nanoparticles for X-rays attenuation.
- [71] **Noor Azman, N. Z., Siddiqui, S. A., Hart, R., & Low, I. M.** (2013). Effect of particle size, filler loadings and x-ray tube voltage on the transmitted X-ray transmission in tungsten oxide—epoxy composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 71(1), 62–67.
- [72] **Drobny, J.G.** (2013). Fundamentals of Radiation Chemistry and Physics.
- [73] **Rao, V.** (2009). Radiation processing of polymers. *Advances in Polymer Processing*, 402–437.
- [74] **Shintani, H.** (1995). Formation and elution of toxic compounds from sterilized medical products: Methylenedianiline formation in polyurethane. *Journal of Biomaterials Applications*, 10(1), 23–58.
- [75] **Url-6** <[https:// physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html) >, erişim tarihi 05.01.2023.
- [76] **Campo, E. A.** (2008). Mechanical properties of polymeric materials. *Selection of Polymeric Materials*, 41–101.
- [77] **More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P.** (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2057–2090
- [78] **Alsayed, Z., Badawi, M. S., Awad, R., El-Khatib, A. M., & Thabet, A. A.** (2020). Investigation of γ -ray attenuation coefficients, effective atomic number and electron density for zno/HDPE composite. *Physica Scripta*, 95(8), 085301.
- [79] **Sharma, A., Sayyed, M.I., Agar, O., Kaçal, M.R., Polat, H., & Akman, F.** (2020). Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 122330.
- [80] **Nasehi, F., Ismail, M.I., & Yazdansetad, F.** (2019). Evaluation of X and Gamma-rays Attenuation Parameters for Polyacrylamide and ZnO Composites as Light Shielding Materials Using MCNP and X-COM Simulation. *Journal of Nuclear Medicine and Radiation Therapy*, 10, 1-7.

- [81] **Buyukyildiz, M., & Kurudirek, M.** (2016). A study of the effective atomic number of $\text{sixpb}_{0.7}\text{-x}(\text{fe}_{2}\text{o}_{3})_{0.3}$ ternary alloys for photons. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 31(4), 327–334.
- [82] **Eshwarappa, K. M., Sheela, M., Kamat, V. A., & Kiran, K. U.** (2019). Preparation and characterization of bismuth-filled high-density polyethylene composites for gamma-ray shielding. *Radiation Protection and Environment*, 42(4), 180.
- [83] **Tanzi, M. G., Rimondini, L., & Candiani, G.** (2019). *Mechanical Properties of Materials*. Elsevier EBooks, 105–136.
- [84] **Shi, L., Zhang, R., Ying, W., Qiu, J., Wang, Y., Guo, Y., Wang, W., Tang, Z., & Zhu, J.** (2019). Polyether-polyester and HMDI Based Polyurethanes: Effect of PLLA Content on Structure and Property. *Chinese Journal of Polymer Science*, 37(11), 1152–1161.
- [85] **Sui, H., Liu, X., Zhong, F., Li, X., Wang, B., & Ju, X.** (2014). Relationship between free volume and mechanical properties of polyurethane irradiated by gamma rays. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.
- [86] **Nurazila, M. Z., Hafizal, Y., & Harun, M. K.** (2020). Neutron attenuation and mechanical properties of polymer composites filled with boron carbide particles. *IOP Conference Series*.
- [87] **Lv, J., Wang, H., Liu, Y., Chen, J., Chen, H., Xu, J., Sun, J., Zhao, H., & Zhu, C.** (2020). Nanocomposite enhanced radiation resistant effects in polyurethane Elastomer with low fraction of polydoapmine nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 186, 107908.
- [88] **Gorna, K., & Gogolewski, S.** (2003). The effect of gamma radiation on molecular stability and mechanical properties of biodegradable polyurethanes for medical applications. *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 465–474.
- [89] **Kiani, M. F., Ahmadi, S. J., Outokesh, M., Adeli, R., & Mohammadi, A.** (2017). Preparation and characteristics of epoxy/clay/B4C nanocomposite at high concentration of boron carbide for neutron shielding application. *Radiation Physics and Chemistry*, 141, 223–228.
- [90] **HÜLYA B** (2011). *Production and Characterization of Zinc Borate-Polymer Nano Composites*. (Thesis). Marmara University-Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences.
- [91] **Altuntas, E., Narlioglu, N., and Alma, M.** (2017). "Investigation of the fire, thermal, and mechanical properties of zinc borate and synergic fire retardants on composites produced with PP-MDF wastes," *BioRes.* 12(4), 6971-6983.

- [92] **Yildiz, B. D., Seydibeyoğlu, M. Ö., & Güner, F. S.** (2009). Polyurethane–zinc borate composites with high oxidative stability and flame retardancy. *Polymer Degradation and Stability*, 94(7), 1072–1075.
- [93] **Arao, Y., Nakamura, S., Tomita, Y., Takakuwa, K., Umemura, T., & Tanaka, T.** (2014). Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants. *Polymer Degradation and Stability*, 100, 79–85.
- [94] **Umemura, T., Arao, Y., Nakamura, S., Tomita, Y., & Tanaka, T.** (2014). Synergy Effects of Wood Flour and Fire Retardants in Flammability of Wood-plastic Composites. *Energy Procedia*, 56, 48–56.
- [95] **Radman, S.; Ramazani, S.A.A.; Rahimi, A.; Frounchi, M.** (2008). “Investigation of Flame Retardancy and Physical-Mechanical Properties of Zinc Borate and Aluminum Hydroxide Polypropylene Composites”, *Materials and Design*, 29, 1051–1056.
- [96] **Hinsken, H., Moss, S., Pauquet, J., & Zweifel, H.** (1991). Degradation of polyolefins during melt processing. *Polymer Degradation and Stability*, 34(1–3), 279–293.
- [97] **Mirji, R., & Lobo, B.** (2017). Computation of the mass attenuation coefficient of polymeric materials at specific gamma photon energies. *Radiation Physics and Chemistry*, 135, 32–44.
- [98] **Castley, D., Goodwin, C., & Liu, J.** (2019). Computational and experimental comparison of boron carbide, gadolinium oxide, samarium oxide, and graphene platelets as additives for a neutron shield. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108435.
- [99] **Mehelli, O., Derradji, M., Belgacemi, R., Abdous, S., Habes, A., & Liu, W.** (2021). Outstanding thermal neutrons shields based on epoxy, UHMWPE fibers and boron carbide particles. *Applied Radiation and Isotopes*, 176, 109837.
- [100] **Malkapur, S. M., Ghodke, S., Sujatha, P., Singh, Y., Shivakumar, K. S., Sen, M., Narasimhan, M. C., & Pulgur, A.** (2021). Waste-polymer incorporated concrete mixes for neutron and gamma radiation shielding. *Progress in Nuclear Energy*, 135, 103694.
- [101] **Melamed, L., Eden, E., Leifer, M., & Georlette, P.** (2015b). Performances of Blends Between Poly(pentabromobenzyl acrylate) and Magnesium Hydroxide as Flame Retardants for Polypropylene Block Copolymers. *Fire Technology*, 51(1), 41–52.
- [102] **Schubert, D.** (2019b). Hydrated Zinc Borates and Their Industrial Use. *Molecules*, 24(13), 2419.

[103] **Tektaş, E.; Mergen, A.**(2003). “Çinko Borat”, Etibank.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Toygar Çardak
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

Tezden Çıkan Çalışmalar:

1. Songül Akbulut Özen, Ömer Yunus Gümüş, **Toygar Çardak**, Ahmet Çelik, Recep İlhan and Ali Gürol. Study of Shielding Properties of Zinc Borate Doped Polypropylene Matrix. International Conference on Radiation Applications (RAP 2023), May 29 - June 2, 2023, Anavyssos, Attica, Greece (Sözlü Sunum). Tam metni konferans kapsamında Q2 faktörlü Applied Radiation and Isotopes dergisine yayın için gönderilecek.