

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**POLYMETHYL METHACRYLATE YAPININ FARKLI İYONİZAN
RADYASYON TİPLERİ KARŞISINDAKİ DAVRANIŞLARININ PARTİKÜL
TAKVİYESİYLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hilal MACUN ELMALI

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**POLYMETHYL METHACRYLATE YAPININ FARKLI İYONİZAN
RADYASYON TİPLERİ KARŞISINDAKİ DAVRANIŞLARININ PARTİKÜL
TAKVİYESİYLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hilal MACUN ELMALI
(302211005)**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE CHANGE OF THE BEHAVIOR OF
POLYMETHYL METHACRYLATE STRUCTURE AGAINST DIFFERENT
TYPES OF IONIZING RADIATION WITH PARTICLE REINFORCEMENT**



M. Sc. THESIS

**Hilal MACUN ELMALI
(302211005)**

Nuclear Researches Division

Radiation Science and Technology Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 302211005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hilal MACUN ELMALI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “POLYMETHYL METHACRYLATE YAPININ FARKLI İYONİZAN RADYASYON TİPLERİ KARŞISINDAKİ DAVRANIŞLARININ PARTİKÜL TAKVİYESİYLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sema ERENTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kaan Keçeci
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 25 Haziran 2024





Aileme ve Türk Milletine,



ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Öğretim Üyesi ve danışmanım Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN’a desteklerinden ve sabrından ötürü en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca danışmanımın proje yürütücüsü olarak bana destek vermiş olduğu 44249 numaralı İTÜ BAP Projesi için, bana bu fırsatı sunan İTÜ BAP Koordinasyon Birimi’ne teşekkürlerimi iletirim. Bu tezin veri toplama sürecindeki tüm laboratuvar saatlerinde yanımda bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü araştırma görevlilerinden Arş. Gör. Onur Erbay’a ve malzeme tedarik ve gerektiğinde yeniden üretim yapabileceğimiz hususundaki desteklerini benden esirgemeyen Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi öğretim görevlilerinden Öğr. Gör. Fuat Berke GÜL’e teşekkür ederim.

Haziran 2024

Hilal MACUN ELMALI
(Araştırma Görevlisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Radyasyon Türleri ve Malzemeye Etkileşimi	2
1.1.1 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	3
1.1.2 İyonlaştırıcı radyasyon	4
1.1.2.1 Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon	4
1.1.2.2 Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon	6
1.2 Polimerik Malzemeler	10
1.2.1 Polimer malzemelerin sınıflandırılması	11
1.2.1.1 Termoplastikler	12
1.2.1.2 Elastomerler	13
1.2.1.3 Termosetler	14
1.2.2 Polimer malzemelerin özellikleri	14
1.2.2.1 Kristalleşme.....	14
1.2.2.2 Termal özellikler	15
1.3 Polimer Malzemelerde Radyasyon Uygulamaları	16
1.3.1 X-ışını difraksiyon (kırılma) analizi (XRD).....	16
1.3.2 Yakın kenar X-ışını soğurma ince yapı spektroskopisi (NEXAFS)	17
1.3.3 Genişletilmiş X-ışını soğurma ince yapı spektroskopisi (EXAFS).....	17
1.4 Polimer Malzemelerde Hasar Mekanizması.....	17
1.4.1 Polimer malzemelerin mekanik özellikleri	18
1.4.2 Frenkel ve Schottky kusuru	19
2. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER.....	21
2.1 Polimerlerin Sentezi	21
2.1.1 Polimerizasyon prosesleri	21
2.1.1.1 Kütle polimerizasyon	22
2.1.1.2 Çözelti polimerizasyon.....	22
2.1.1.3 Süspansiyon polimerizasyon	23
2.1.1.4 Emülsiyon polimerizasyon	24
2.1.2 Kondenzasyon (basamaklı) polimerizasyon.....	25
2.1.3 Radikal zincir büyütme polimerizasyonu.....	25
2.1.4 İyonik zincir katılma polimerizasyonu opolimerizasyon	26
2.1.5 Kopolimerizasyon	26

2.1.6 Halka-açılması polimerizasyonu	27
2.1.7 Stereospesifik polimerizasyon	27
2.1.8 Radyasyon polimerizasyon	28
2.2 Kompozit Polimer Malzemeler	29
2.2.1 Poli(metil metakrilat) yapının özellikleri	29
2.2.1.1 Mekanik özellikler	30
2.2.1.2 Optik özellikler	30
2.2.1.3 Termal özellikler	31
2.2.1.4 Radyasyon zırlama özellikleri	31
2.3 Sodyum Metaborat Dekahidrat Özellikleri	33
2.4 PMMA/Boraks Kompozitinin Sentezi ve Özellikleri	33
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
3.1 Deney Düzenegi	35
3.1.1 Gama transimyon yöntemi	35
3.1.2 Beta transimyon yöntemi	37
3.1.3 Nötron Howitzer (NH ₃)	38
3.2 Kullanılan PMMA ve PMMA/Boraks Örnekleri	39
4. BULGULAR	41
4.1 Gama Transimyon Ölçümleri	41
4.1.1 Cs-137 Radyoizotopu bulguları	41
4.1.1.1 Katkısız PMMA örneklerinin karşılaştırılması	41
4.1.1.2 PMMA/Boraks kompozit polimerinin karşılaştırılması	42
4.1.1.3 Cs-137 ile HVL ve TVL değerlendirme	43
4.1.2 Co-60 Radyoizotopu bulguları	44
4.1.2.1 Katkısız PMMA örneklerinin karşılaştırılması	44
4.1.2.2 PMMA/Boraks kompozitleri ile katkısız PMMA karşılaştırılması	45
4.1.2.3 Co-60 ile HVL ve TVL değerlendirme	47
4.2 Beta Transimyon Bulguları	47
4.2.1 Sr-90 ile HVL ve TVL değerlendirme	48
4.3 Nötron Transimyon Bulguları	49
4.3.1 Pu-Be ile HVL ve TVL değerlendirme	49
4.4 Alınan Doz Eşdeğeri	50
5. TARTIŞMA	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	63

KISALTMALAR

ATRP	: Atom Transfer Radikal Polimerizasyon
EXAFS	: Genişletilmiş X-Işını Soğurma İnce Yapı Spektroskopisi (Excessive X-Ray Absorption Fine Edge)
HVL	: Yarı Levha Kalınlığı (Half Value Layer)
MeV	: Megaelektron Volt
MMA	: Metil metakrilat
NEXAFS	: Yakın Kenar X-Işını Soğurma İnce Yapı Spektroskopisi (Near-Edge X-Ray Absorption Fine Edge)
nm	: Nanometre
PMMA	: Poli(metil metakrilat)
TS	: Gerilme Direnci (Tensile Strength)
TVL	: Onuncu Levha Kalınlığı (Tenth Value Layer)
XAFS	: X-Işını Soğurma İnce Yapı Spektroskopisi (X-Ray Absorption Fine Edge)
XRD	: X-Işını Kırınım (X-Ray Diffraction)



SEMBOLLER

E	: Enerji
m	: Kütle
c	: Işık hızı
α	: Alfa parçacığı
β^-	: Elektron beta parçacığı
β^+	: Pozitron beta parçacığı
γ	: Gama fotonu
n^0	: Nötron parçacığı
h	: Planck sabiti
λ	: Dalga boyu, bozunma sabiti
p	: Momentum
T	: Sıcaklık
wt%	: Ağırlıkça yüzde
Ci	: Curie
I	: Intensity, yeğlilik
W/mK	: Isıl iletkenlik katsayısı
A	: Aktivite
t	: Zaman
$T_{1/2}$	: Yarı ömür
θ	: Açı
d	: Mesafe
σ_y	: Elastik sınırı
ΔX	: Soğurucu kalınlığı
μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
ρ	: Yoğunluk



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Katkısız PMMA polimerinin mekanik özellikleri [93].....	30
Çizelge 2.2 : Katkısız PMMA polimerinin termal özellikleri [93].....	31
Çizelge 2.3 : Boraks mineralinin özellikleri.....	33
Çizelge 4.1 : Katkısız PMMA örneklerinin Cs-137 kaynağı ölçümleri	42
Çizelge 4.2 : PMMA/Boraks kompoziti ve katkısız PMMA polimerinin karşılaştırılması	43
Çizelge 4.3 : 6 mm kalınlığından yarı levha ve onuncu levha kalınlığının tespiti. ...	43
Çizelge 4.4 : Katkısız PMMA örneklerinin Co-60 radyoizotopu değerlendirme bulguları	46
Çizelge 4.5 : PMMA/Boraks örneklerinin Co-60 radyoizotopu karşılaştırma bulguları	47
Çizelge 4.6 : 15 mm kalınlığından yarı levha ve onuncu levha kalınlığının tespiti. .	47
Çizelge 4.7 : 6-8 mm aralığındaki kalınlıklardan yarı levha ve onuncu levha kalınlığı tespiti.	48
Çizelge 4.8 : Çeşitli katkı ve kalınlıklar ile yarı levha ve onuncu levha kalınlığının tespiti.	50
Çizelge 4.9 : Alınan doz eşdeğeri.	50
Çizelge 5.1 : Literatür karşılaştırması.....	52



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Radyasyon türleri.	3
Şekil 1.2 : Elektromanyetik spektrum [7].	3
Şekil 1.3 : İyonlaştırıcı radyasyon türleri.	4
Şekil 1.4 : Alfa bozunumu [13].	5
Şekil 1.5 : Beta bozunumu [17].	6
Şekil 1.6 : Fotoelektrik olay [20].	7
Şekil 1.7 : Compton saçılması [22].	7
Şekil 1.8 : Çift oluşum [24].	8
Şekil 1.9 : Gama radyasyonun madde ile etkileşimi [26].	8
Şekil 1.10 : Nötron etkileşimleri [27].	9
Şekil 1.11 : Nötron dönüşüm etkileşimleri [29].	9
Şekil 1.12 : Fisyon reaksiyon [31].	10
Şekil 1.13 : Polimerik malzemelerin bazı kullanım alanları [35].	11
Şekil 1.14 : Polimerlerin zincir ve ağ yapısı [37].	12
Şekil 1.15 : Polimerlerin sınıflandırılması [38].	12
Şekil 1.16 : Yarı-kristalin polimer [41].	13
Şekil 1.17 : Elastomer polimerin zincir yapıları [43].	13
Şekil 1.18 : Kristalleşme-Sıcaklık eğrisi [50].	15
Şekil 1.19 : Genel XRD analizi [54].	16
Şekil 1.20 : Gerilim-Gerinim eğrisi ve polimerin elastik özellikleri [63].	18
Şekil 1.21 : Gerilim-Gerinim eğrisinde çekme mukavemeti [66].	19
Şekil 1.22 : Frenkel kusuru [68].	19
Şekil 1.23 : Schottky kusuru [70].	20
Şekil 2.1 : Polimer sentezi yöntemleri	21
Şekil 2.2 : Kütle polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [74].	22
Şekil 2.3 : Çözelti polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [74].	23
Şekil 2.4 : Süspansiyon polimerizasyonu [73].	23
Şekil 2.5 : Süspansiyon polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [75].	24
Şekil 2.6 : Emülsiyon polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [73]. ..	25
Şekil 2.7 : Radyasyon polimerizasyonu [87].	28
Şekil 2.8 : PMMA'nın metilmetakrilat monomeri ile polimerizasyonu.	30
Şekil 2.9 : Radyasyon soğurucu levha.	32
Şekil 2.10 : PMMA/Boraks kompozitinin polimerizasyon şeması.	34
Şekil 3.1 : Fotoçoğaltıcı tüp tabanı.	36
Şekil 3.2 : Gama transmisyon deney düzeneği.	36
Şekil 3.3 : Gama radyasyonundan korunma	37
Şekil 3.4 : Beta transmisyon deney düzeneği.	37
Şekil 3.5 : Beta trasnmisyon ölçüm örneği.	38
Şekil 3.6 : Nötron Howitzer.	39
Şekil 3.7 : Nötron Howitzer deney düzeneği.	39

Şekil 3.8 : Katkısız PMMA (base mat) örnekleri.	40
Şekil 3.9 : %2,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.	40
Şekil 3.10 : %5,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.	40
Şekil 3.11 : %7,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.	40
Şekil 4.1 : Cs-137 gama kaynağının katkısız PMMA örnekleri üzerindeki yeğİnliği.....	41
Şekil 4.2 : PMMA/Boraks kompozitlerinin Cs-137 kaynağı karşısındaki yeğinliklerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.3 : Co-60 gama kaynağının katkısız PMMA polimerleri üzerindeki yeğinliği.....	44
Şekil 4.4 : PMMA/Boraks kompozitlerinin Co-60 kaynağı karşısındaki yeğinliklerinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 4.5 : Sr-90 beta kaynağının katkısız PMMA ve PMMA/Boraks kompozitlerinin yeğinliklerinin karşılaştırılması.....	48
Şekil 4.6 : Pu-Be Nötron Howitzer (NH ₃) ölçüm grafiği.	49



POLYMETHYL METHACRYLATE YAPININ FARKLI İYONİZAN RADYASYON TİPLERİ KARŞISINDAKİ DAVRANIŞLARININ PARTİKÜL TAKVİYESİYLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Keşfinden bu yana geçen süreç içerisinde endüstride, sağlık sektöründe ve daha birçok alanda sıklıkla kullanılan iyonizan radyasyonun farklı tipleri ile yine hızla eski tip malzemelerin yerini alan malzeme bilim ve teknolojileri kapsamında oldukça önemli yere sahip olan Poli(metil metakrilat) yapının bu tez çalışması içerisinde radyasyon zırhlama performansı değerlendirilmiştir.

Radyasyonun gerekli önlemler alındıktan sonra araştırmalarda ve çeşitli sektörlerde kullanılması herhangi bir sorun teşkil etmemekle birlikte, polimerik yapılar kullanılarak, özellikle tıpta ve uzay-uçak teknolojilerinde önemli gelişmeleri kayıt altına alınmıştır. Elbette burada söz konusu olan gerekli önlemler; kişisel olarak radyasyondan korunma yöntemleri ile radyasyonun zırhlamasıdır. Her tip iyonizan radyasyonun giriciliğinin de farklı olması sebebiyle, standart bir radyasyondan korunma yöntemi bulunmamaktadır. Beta parçacıklarının, gama fotonlarının ve nötronların, enerjisine bağlı olarak malzeme içindeki penetrasyonu farklılık göstermektedir. Homojen özelliklerdeki polimerik yapının kalınlığının artırılması, radyasyon penetrasyonunun tespitinde önem taşımaktadır. Yarı levha kalınlığı ve onuncu levha kalınlığının bulunması için deneyler yapılarak lineer zayıflatma katsayısı üzerinden hesaplamalarda saçılma etkisinin azaltılmasında yapıdaki aglomerasyonun önlenmesi önem taşımaktadır.

Bir radyasyondan korunma yöntemi olan zırhlama, yalnızca canlıların sağlığına olan olumsuz etkilerinden korunmayı kapsamamaktadır. Radyasyonu zırhlayarak aynı zamanda doğal ve yapay çevreyi, elektronik aletlerin üzerinde bırakacağı radyasyon hasarı etkilerinden de korumaktayız. Tüm sebeplerin karşılığı olarak radyasyondan korunmak üzere çeşitli malzemelerde testler yapılmıştır ve günümüzde de gelişen malzeme teknolojileri ile bu test ve deneylere devam edilmektedir.

Nükleer reaktör çevrelerinde kullanılan içeriği geliştirilmiş baritli betonlar yüksek radyasyon tutma performansı göstermesine rağmen oldukça ağır yapılardır. Ancak günümüz teknolojisinde, amaçlanan performansın, daha hafif bir yapı ve daha kolay şekil alabilen malzemeler kullanılarak, yüksek radyasyon tutma performansı göstermesidir.

Bu amaçlar doğrultusunda, termoplastik malzemeler içerisinde de yer alan akrilik bir sentetik cam olan poli(metil metakrilat) yapının, yüksek dayanıklılık ve ısı direnç özellikleri gösteren, mekanik özellikleri iyi olan ve korozyona karşı direnç gösteren, mor ötesi ışınlara ve her olumlu/olumsuz hava koşullarına uyum ve dayanıklılık gösteren bir polimerik malzemedir. Bu yapı, uzay-uçak sanayiinde, sağlık ve gıda sektörlerinde kullanılırken radyasyon zırhlama çalışmalarında, radyasyon soğurucu performansının tespit etmek için güncel araştırmalar yapılmaktadır.

Poli(metil metakrilat) yapının özelliklerinin amaca uygun olarak geliştirilmesi, polimerik yapının matris yapısının uygunluğundan kaynaklanmaktadır. Poli(metil metakrilat) yapının geliştirilmesi ve çeşitli sektörlerde kullanılması maksadıyla Poli(metil metakrilat) esaslı kompozit polimerik malzemeler elde edilmektedir. Poli(metil metakrilat) esaslı polimer kompozitleri, poli(metil metakrilat) matrisine çeşitli nano yapılar, metaller ve seramikler eklenerek oluşturulmaktadır. Bu çalışmada poli(metil metakrilat) polimerine, endüstriyel çevrelerde Tinkal olarak isimlendirilen ve Boraks olarak bilinen Sodyum Metaborat Dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) katkısıyla yapı takviye edilmiştir.

Sodyum Metaborat Dekahidrat, deterjan gibi temizlik malzemelerinde, böcek ilaçlarında, ateşe dayanıklı malzeme üretiminde, cam üretiminde kozmetik ürünlerde ve metal işleme gibi birbirinden bağımsız ve çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Sodyum Metaborat Dekahidrat aynı zamanda içeriğinde yer alan Bor elementinin getirmiş olduğu avantaj ile reaktiviteyi kontrol etmek amacıyla nükleer reaktörlerde yakıt havuzlarında nötron soğurma işlevi görmektedir.

Bu tez çalışması içerisinde Poli(metil metakrilat) polimerik malzemesinin, ağırlıkça farklı miktarlarda Sodyum Metaborat Dekahidrat takviyesi ile oluşturulan PMMA/Boraks kompozit örneklerin, gama, beta transmisyon yöntemleri ile bağül geçirgenliğinin tespiti, sayesinde lineer zayıflatma katsayısının yanısıra yarı levha kalınlığı ile onuncu levha kalınlığının tespiti deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Benzer bir yöntem olan nötron transmisyon yöntemi ile makroskopik tesir kesiti tespit edilmiştir.

Poli(metil metakrilat), artan Boraks takviyesi ile birlikte daha yüksek zırhlama performansı göstermiştir ve bu sonuçlar, PMMA/Boraks kompozitinin radyasyon tutma performansındaki yetkinliğini kanıtlamıştır. Bu çalışmadan yola çıkılarak, daha hafif bir zırhlama malzemesi elde etmek maksadıyla, Boraks takviyesi artırılarak oluşturulacak olan PMMA/Boraks kompozit polimerinin performansının da boraks miktarınca artacağı öngörülmektedir.

INVESTIGATION OF THE CHANGE OF THE BEHAVIOR OF POLYMETHYL METHACRYLATE STRUCTURE AGAINST DIFFERENT TYPES OF IONIZING RADIATION WITH PARTICLE REINFORCEMENT

SUMMARY

Poly(methyl methacrylate) structure, which has a very significant place within the scope of material science and technologies that are rapidly replacing old type materials with its different types of ionizing radiation, which has been frequently used in industry, healthcare sector, and many other areas, is examined in this thesis and shielding performance was evaluated.

The use of radiation in research and various sectors does not pose any problems after the necessary precautions are taken, important developments have been recorded, especially in medicine and space-aircraft technologies. Radiation is split into two groups ionizing and non-ionizing radiation. The ionizing radiation is divided into indirect and direct ionizing radiation. There are many methods of protection from ionizing radiation, which is the principal theme of this thesis. Certainly, the necessary precautions in question here are; the shielding of radiation and personal radiation protection methods. The interaction of ionizing radiation with matter varies depending on the type and energy of the radiation. Since the penetration of each type of ionizing radiation is different, there is no standard radiation protection method. Gamma, beta and neutron transmission methods are used for the penetration of beta, gamma and neutron radiation sources, which varies depending on their energy and the electromagnetism of the medium in which they act. That's why, in order to take a decision the penetration on the materials, experiments are carried out to find the half value layer and the tenth value layer thicknesses and calculations are made based on the linear attenuation coefficient.

The shielding, a method of radiation protection, does not only include protection from its negative effects on the health of living things. By shielding radiation, we also protect the natural and artificial environment and also the electronic devices will leave on them from the radiation damaging effects. According to these all reasons, tests have been carried out on various materials to protect against radiation, and today these tests and experiments continue with developing material technologies. Although barite concretes with improved content used in nuclear reactor environments show high radiation shielding performance, they are quite heavy structures. However, with today's technology, the intended performance is for a lightweight material to show high radiation shielding performance.

For these purposes, Poly(methyl methacrylate) structure, which is an acrylic glass also included in thermoplastic materials, has high durability and thermal resistance properties, has good mechanical properties and is resistant to corrosion, adapts to ultraviolet rays and all positive/unfavorable weather conditions. Since it is a polymeric material that is durable, it is used in the aerospace industry, health and food sectors,

and experiments have been carried out to see its shielding performance in radiation shielding studies.

The radiation effect on polymer materials has various purposes and applications. One application among these applications is radiation polymerization. Other applications include characterization and analysis. For example; X-ray diffraction analysis shows the alignment of atoms and molecules through interaction with electromagnetic beam. Another analysis method, X-ray Absorption Fine Structure, has variants including Near-Edge X-ray Absorption Fine Structure and Extended X-ray Absorption Fine Structure. In general, X-ray Absorption Fine Structure spectroscopy provides information about the nature, number and position of neighboring atoms relative to the atom examined. Additionally, X-ray Absorption Fine Structure spectroscopy is used together with X-ray diffraction to perform structural analysis.

The appropriate development of the properties of the poly(methyl methacrylate) structure is because of the suitability of the matrix structure of the polymeric structure. Poly(methyl methacrylate) based composite polymeric materials are obtained in order to develop the poly(methyl methacrylate) structure and use it in various sectors. Poly(methyl methacrylate)-based polymer composites are created by adding various nanostructures, metals and ceramics to the poly(methyl methacrylate) matrix. In this study, Sodium Metaborate Decahydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), market name Tinkal and known as Borax, was reinforced to poly(methyl methacrylate) polymer. The methods of synthesis of polymer materials are quite diverse. The types of polymerization are collected under two main groups. Among the described polymerization methods and processes, PMMA/borax composite polymer is synthesized by atom transfer radical polymerization method that is a radical chain polymerization method.

In the atomic transfer radical polymerization method, parameters such as monomer, catalyst, initiator, solvent and suitable temperature should be combined in polymer synthesis process. Parameters for the synthesized polymeric material synthesized in this study; Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) as the reinforcement, Methyl Methacrylate ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) as a monomeric structure, Bromide (Bu_4NBr) as a solvent, Copperbromide (CuBr), as a catalyst and ethyl-2-bromoisobutyrate ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{BrO}_2$) as the initiator.

Sodium Metaborate Decahydrate is used in a widespread variety of independent areas such as cleaning materials like detergent, insecticides, fire-resistant material production, glass production, cosmetic products and metal processing. Sodium Metaborate Decahydrate also functions to absorb neutrons in fuel pools in nuclear reactors in order to control reactivity, with the advantage of the Boron element it contains.

In this thesis study, PMMA/Borax composites formed by using poly(methyl methacrylate) polymeric material with different amounts of Sodium Metaborate Decahydrate reinforcement by weight; determination of relative intensity and linear attenuation coefficient as well as half plate thickness and tenth plate thickness was carried out experimentally using gamma, beta and neutron transmission methods. In the experiments, Co-60 and Cs-137 as gamma photon sources, Sr-90 as beta particle source, and Neutron Howitzer (NH_3) containing Pu-Be as neutron source were used. The results of 2.5%, 5.5% and 7.5% doped PMMA/Borax composites and base material as PMMA were compared. On the other hands, when looking at past studies and comparing PMMA composites obtained with Borax reinforcement with other composites, the strengths of the PMMA/Borax composite come to the fore.

Poly(methyl methacrylate) showed higher shielding performance with increasing Borax reinforcement, and these results proved the proficiency of PMMA/Borax composite in radiation shielding performance. Based on this thesis, it is predicted that the performance of the PMMA/Borax composite polymer, which will be created by increasing the Borax reinforcement, will increase with the amount of borax in order to obtain a lighter shielding material.

The consequences of this study show that the PMMA/Borax polymer composites synthesized by the method of ATRP can be considered as an appropriate radiation protection material or coating material.





1. GİRİŞ

Radyasyonun keşfi ile birlikte, radyasyon kaynakları araştırmalarda, sanayide, sağlık sektöründe tedavi yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Keşfin ilk yıllarında herhangi bir korunma önlemi bulunmadığı ya da gereksinim olduğu bilinmediğinden dolayı başta Marie Curie olmak üzere birçok bilim insanımız ve radyoaktiflerin kullanıldığı çeşitli sektörlerde çalışan insanların sağlığı ciddi anlamda zarar görmüş hatta bu zarar kimi zaman ölümle sonuçlanmıştır.

Günümüzde iyonizan radyasyonun sağlıktan uzay-uçak endüstrisine kadar uzanan birçok alanda kullanımı bulunmaktadır. Sadece iyonizan radyasyonun değil, aynı zamanda polimer yapıların da endüstriyel anlamda uzay uçak teknolojilerinde olduğu gibi farklı kullanım alanları mevcuttur. Radyasyon teknolojisinin ve polimer malzemelerin kullanım sahalarındaki değişimler ve gelişimler, bilim dünyasını heyecanlandırmakla birlikte söz konusu teknolojilerin insan ve çevre sağlığına uyumlandırılması önem arz etmektedir.

İyonizan radyasyonun zırhlaması ve radyasyondan korunma yöntemlerinin geliştirilmesi konusunda öncelik her zaman radyasyon tipini ve enerjisini belirlemek ile birlikte toplum sağlığını önceliklendirmektir. İyonizan radyasyonun tipini ve enerjisini tanımlamak için kalibre edilmiş ölçüm ve dedeksiyon yöntemleri ile birlikte yenilenen ve içeriği farklı katkı malzemeleriyle güçlendirilen zırhlama malzemeleri, iyonizan radyasyon maruziyetini en küçüklemeyi hedefleyerek geliştirilir.

Polimer malzemeler iyonizan radyasyonun zırhlaması çalışmalarında, oldukça çeşitli ve iyileştirilebilen yapıları sebebiyle günümüzde adından sıklıkla söz ettirir konuma gelmiştir. Polimer yapılar arasında yer alan polymethyl methacrylate yapı söz konusu zırhlama çalışmalarına katkıda bulunması muhtemel malzemelerdendir. Kısaca PMMA olarak bilinen malzemenin 2. Dünya savaşından günümüze kadar başarısı kanıtlanmış olup geliştirilebilirliği ile ön plana çıkmıştır. Özellikle yüzey sertliğinin yüksek olması, yüksek şeffaflığa sahip olmasına karşılık mor ötesi ışınlarla ve hava koşullarına karşı iyi direnç gösteriyor olması ile birlikte kolaylıkla ısı işlem altında

şekillendirilebiliyor olması PMMA polimerinin endüstriyel anlamda tercih edilebilirliğini arttırmaktadır [1].

Bu çalışmada yer alan önemli konu başlıkları, polimer yapılar, iyonizan radyasyon ve polimer malzemelerde iyonizan radyasyonun etkisidir. Polimer yapıların radyasyonla ilişkisi konusu, yapı malzemesi olan polimer malzemenin radyasyondan korunma sahasında kullanılabilirliği kapsamında değerlendirilecektir.

1.1 Radyasyon Türleri ve Malzemeyle Etkileşimi

Radyasyon, 1895 yılında W. Röntgen'in X-ışınlarını keşfetmesiyle birlikte ortaya çıkmış ve H. Becquerel'in çalışmaları ile radyoaktivite terimi literatüre kazandırılmıştır [2].

Radyasyon bilindiği üzere, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar biçimindeki enerjinin yayılımı ve aktarımıdır. Bu nedenle radyasyon kısaca ortamda taşınan enerji olarak tanımlanabilir. Radyoaktivite ya da radyoaktif bozunma ise fazla enerjiye sahip atomların enerjilerinin bir kısmını radyasyon yayımlayarak bırakması olayıdır. Radyoaktif bir çekirdeğin bozunması olasılıklara bağlıdır ve birim sürede yayılan radyasyon, aktivite olarak isimlendirilir [3].

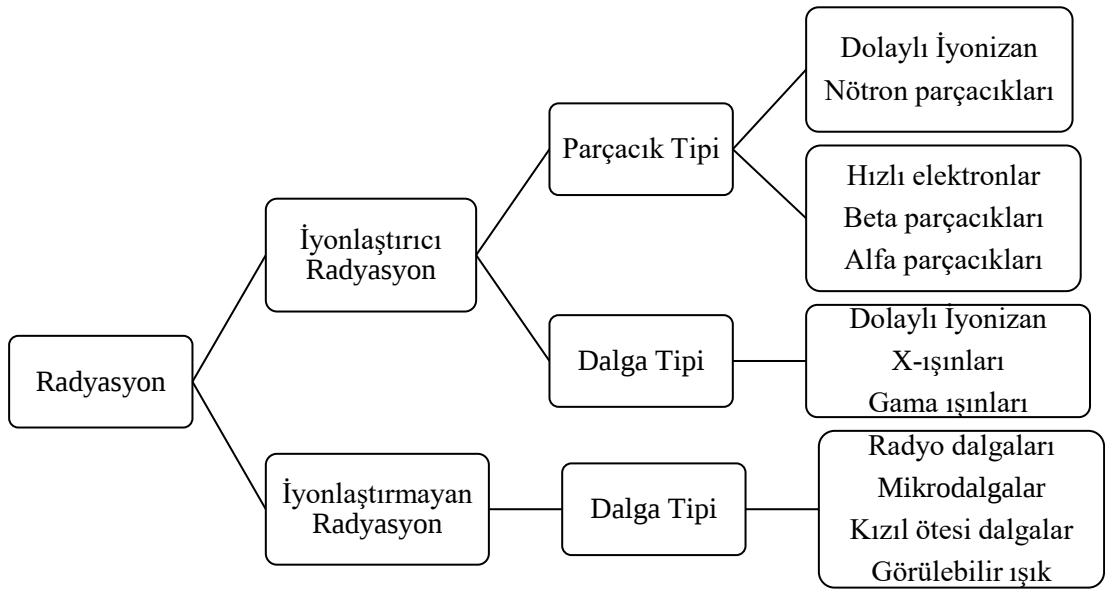
Radyoaktif bir maddenin $t = 0$ anındaki atom sayısının yarılanması için geçen vakte yarı-ömür denir ve $T_{1/2}$ ile sembolize edilir [4]. Denklem 1.1'de aktivitenin yarı ömür ve zamana bağlı olan bağıntısı verilmiştir.

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (1.1)$$

Ayrıca λ ile sembolize edilen bozunma sabiti Denklem 1.2'de verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (1.2)$$

Radyasyonun davranışlarını, etkilerini ve etki alanlarını daha anlaşılır olmasını sağlamak amacıyla sınıflandırmaya başvurulmaktadır. Radyasyon sınıflandırması yer alan Şekil 1.1, etkileşime girdiği malzemedan elektron koparıp koparmamasına bağlı olarak temelde iki ana başlık altında incelendiğini gösterir: iyonlaştırıcı olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyon [5].

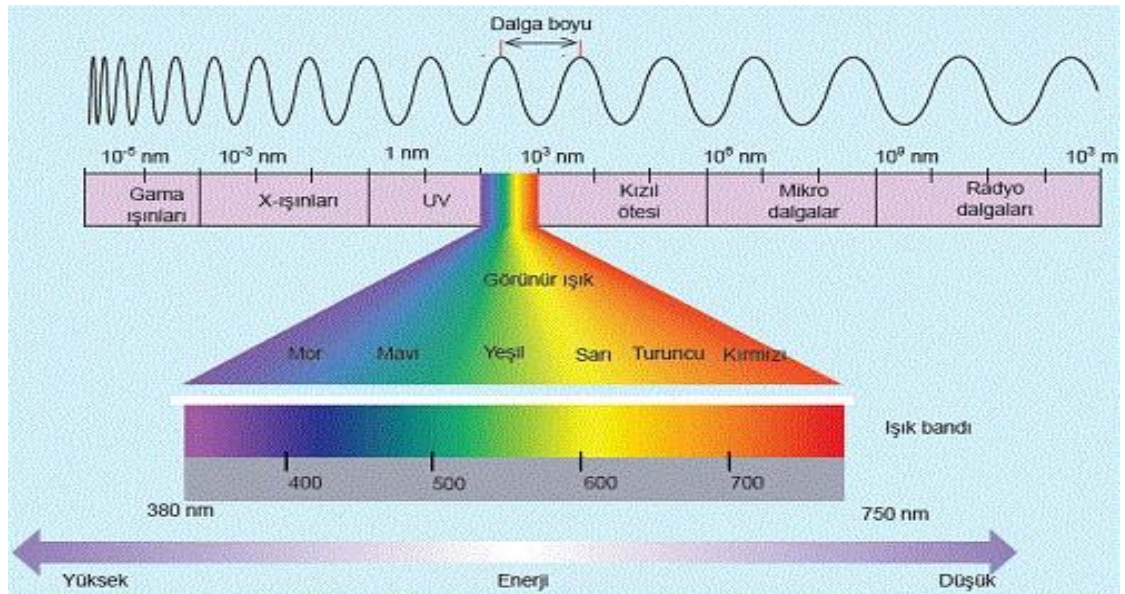


Şekil 1.1 : Radyasyon türleri.

1.1.1 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaşmanın gerçekleşmesi için yeterli enerjiyi taşımayan radyasyon tipidir, atomdan elektron koparamaz, yalnızca etkileşime girdiği atomu uyarılabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun tamamı elektromanyetik radyasyondur [6].

İletişim gibi alanlarda kullanılan radyo frekans dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi dalgalar ve görünür ışık bu tip radyasyona örnektir. Şekil 1.2’de verilen spektrumda dalga boyu ve enerji dağılımı belirtilmiştir.



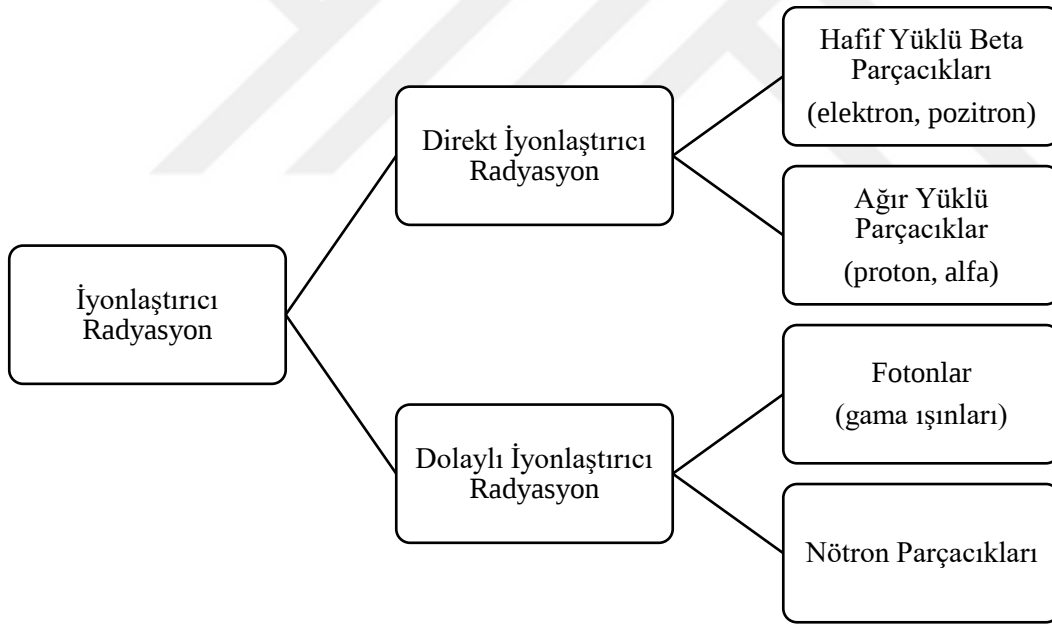
Şekil 1.2 : Elektromanyetik spektrum [7].

Elektromanyetik dalga spektrumunda Şekil 1.2’den de görüleceği üzere dalga boyu uzarken frekans azalmaktadır ve enerji de frekans ile aynı şekilde azalmaktadır. Bir diğer yönden bakıldığında kısa dalga boyu, yüksek frekans ve yüksek enerji görülmektedir.

1.1.2 İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon 10 eV’tan fazla enerji taşıyan bir enerji formu olup bu enerji kimyasal bağları kırmaya ve atomlardan elektron koparmaya yetecek kadardır [8].

Şekil 1.3’te gruplandırılan iyonlaştırıcı radyasyon türlerinden olan yüklü parçacık radyasyonunda, doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon ile malzeme atomlarının yörünge elektronları arasındaki Coulomb etkileşimi söz konusu olurken yüksüz parçacık olan foton ve nötron etkileşimlerinde ilk olarak bir yüklü parçacık salınır ve bu yüklü parçacık tıpkı doğrudan iyonlaştırıcı radyasyonda olduğu gibi atomun elektronları ile Coulomb etkileşmesi sonucunda enerjisini malzemeye aktarır [9].



Şekil 1.3: İyonlaştırıcı radyasyon türleri.

1.1.2.1 Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon

Alfa, beta ve fisyon parçacıkları gibi yüklü parçacıklar, doğrudan iyonlaştırıcı radyasyondur. Uzun menzilli elektromanyetik kuvvet etkisiyle ortamla etkileşime girerler. Yüklü parçacıklar, tüm kinetik enerjilerini kaybedene kadar atom elektronlarıyla etkileşime girerler ve kinetik enerjileri tümüyle tükendiğinde ortam elektronlarını yakalar ve nötr hale gelir [10].

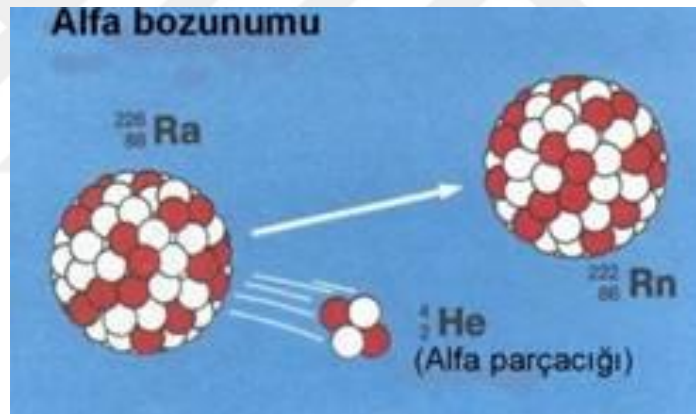
Belirli bir başlangıç enerjisine sahip yüklü parçacıklar durdurulmadan veya ortama dahil olmadan önce ortamdaki geçebilecekleri maksimum menzile sahiptir.

1.1.2.1.1 Alfa parçacığı etkileşimleri

Alfa parçacıkları, esasında ikişer nötron ve protondan oluşur. Esasında bir helyum çekirdeği olan alfalar pozitif yüklüdür. α ile sembolize edilir. Genellikle doğal radyoaktif atomlarda meydana gelen çekirdeğin, Şekil 1.4, alfa atarak bozunma olayı atom numarası büyük izotoplarda gerçekleşir [11]. Denklem 1.3'te yer alan X ana izotopu temsil ederken Y kız izotopu temsil etmektedir.



Diğer radyasyon türlerine göre sahip oldukları elektrik yükünün görece büyük olması sebebiyle, madde içerisinde geçerken yoğun bir iyonlaşma oluşturur ve enerjilerini oldukça hızlı bir şekilde kaybederler. Bu nedenle kağıt gibi ince bir malzeme ile durdurmak mümkündür [12].



Şekil 1.4 : Alfa bozunumu [13].

1.1.2.1.2 Beta parçacıkları etkileşimleri

Çekirdekte bulunan fazla enerji, çekirdek etrafında $E = mc^2$ ile açıklanabilen bir kütle meydana getirir. Söz konusu kütle çekirdekteki fazla enerjiyi beta ışıması olarak çıkarır. Esasında beta parçacıkları pozitif ve negatif yüklü elektronlardır. Şekil 1.5'te görselleştirilmiştir. Negatif yüklü elektronlar β^- ile sembolize edilirken pozitif yüklü elektronlar ise β^+ ile sembolize edilir. Denklem 1.4 ve denklem 1.5 ile gösterilmiştir [14].



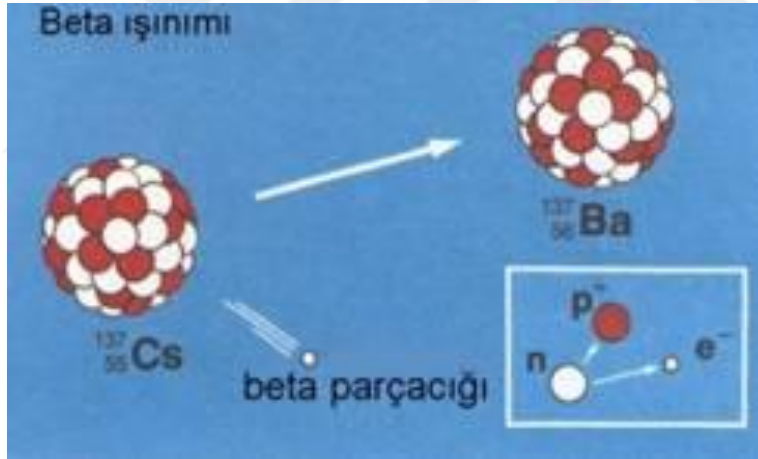
$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu \quad (1.5)$$

β^- bozununlarında nötronun karşı parçacığı antinötrino çıkarak bozunma gerçekleşir.

Antinötrino $\bar{\nu}$ ile sembolize edilir. Işık hızına yakın hıza sahip olan ve elektriksel olarak yüksüz olan bu parçacıklar maddelerin içinden neredeyse hiç etkileşime girmeden geçebilen temel parçacıklardandır [15].

Çekirdekteki enerji fazlalığının sebebi nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa β^- , eğer proton fazlalığından kaynaklanıyorsa β^+ ortaya çıkar. Diğer bir deyişle nötron fazlalığı protona, proton fazlalığı nötrona dönüşür [16].

Beta parçacıkları yük ve kütleye sahip oldukları için malzeme ile etkileşimlerinde iyonlaşma meydana gelir. Alfa parçacıklarına nazaran beta parçacıklarının yükleri daha hafif olması sebebi ile bu iyonlaşma daha azdır ancak penetrasyonu daha yüksektir. Bu nedenle beta parçacıklarını ince alüminyum levha gibi bir zırh malzemesiyle durdurmak mümkündür.



Şekil 1.5 : Beta bozunumu [17].

1.1.2.2 Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon

Dolaylı iyonlaştırıcı bir foton veya nötron etkileşime girmeden, yönünü ve enerjisini değiştirmeden çok sayıda atomu geçer. Ayrıca dolaylı iyonlaştırıcı radyasyonun, yüklü parçacıklar gibi belirli bir menzili yoktur.

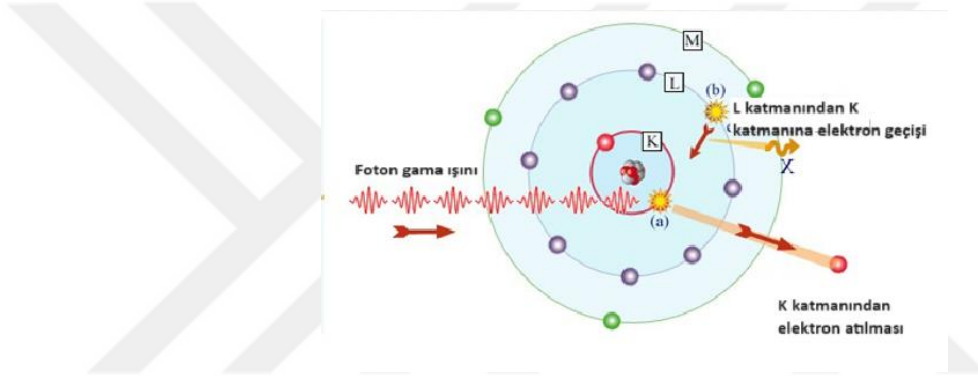
Malzemeye etkileşimi iki aşamada gerçekleşir;

- İlk olarak yüklü parçacık salımı gerçekleşir.
- Salınan yüklü parçacıklar atomun elektronlarıyla etkileşir [18].

1.1.2.2.1 Foton etkileşimleri

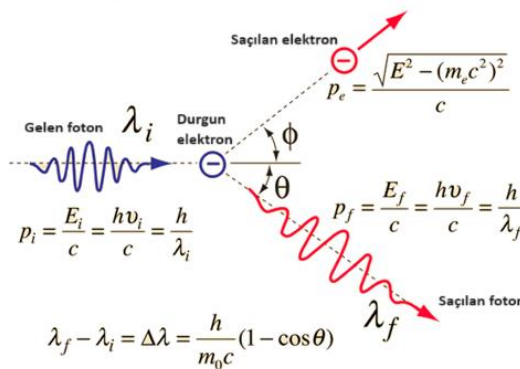
Fotonlar, elektromanyetik dalga formundadır ve elektrikçe yüksüz olmaları sebebiyle malzeme içerisinde elektrik ve manyetik alandan etkilenmezler. Malzemeyle etkileşimi özellikle 3 reaksiyon altında incelenir;

- Fotoelektrik olay; iki aşamalı olarak gerçekleşir. İlk olarak, Şekil 1.6’da belirtilen, (a) foton atomun yörünge elektronuna tüm enerjisini aktararak elektronu koparır ve (b) bir üst katmandaki elektron çıkan elektronun boşluğunu kapatır. Bu sırada yörüngeler arası bağlanma enerjisi kadar enerjiye sahip X-ışını yayımlanır. Yayımlanan X-ışını karakteristik X-ışını olarak tanımlanır [19].



Şekil 1.6 : Fotoelektrik olay [20].

- Compton saçılması; birçok elektron için oluşması muhtemel bir etkileşimdir. Elektron ile etkileşen foton, Şekil 1.7, enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak saçılır. Hem elektron hem de foton denklem 1.6’da verilen enerjinin korunumu ve denklem 1.7’de verilen momentumun korunumu kanunları kapsamında saçılır [21].



Şekil 1.7 : Compton saçılması [22].

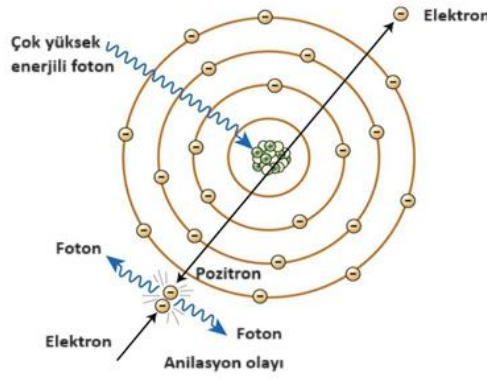
$$h\nu_i + m_e c^2 = h\nu_f + \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} \quad (1.6)$$

Enerjinin korunumu denklemi.

$$p_i = p_f + p_e \quad (1.7)$$

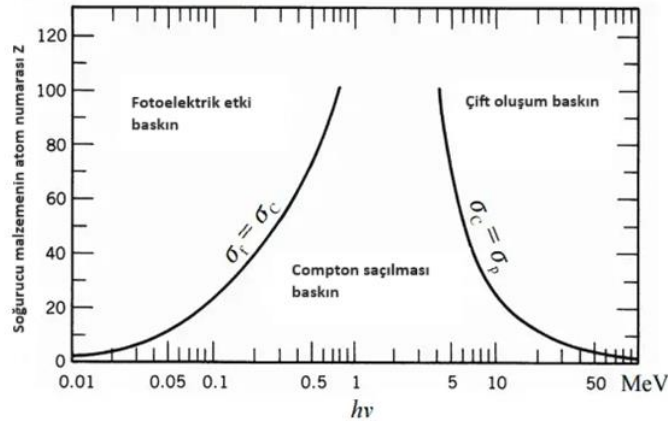
Momentumun korunumu denklemi.

Çift oluşum reaksiyonlarının meydana gelmesi için fotonun enerjisinin en az iki elektronun durgun kütlesi kadar olmalıdır. ($E_\gamma \geq 1.022 \text{ MeV}$). Çift oluşum olayında fotonun enerjisi tamamen soğurulur ve zıt yüklü kütlelere dönüşür [23]. Şekil 1.8'deki gibi oluşan zıt yüklü kütlelerden olan pozitron şekilde de görüldüğü üzere elektron ile etkileşime girerek nötrlenir ve meydana gelen fotonlara anilasyon (yok olma) radyasyon adı verilir [25].



Şekil 1.8 : Çift oluşum [24].

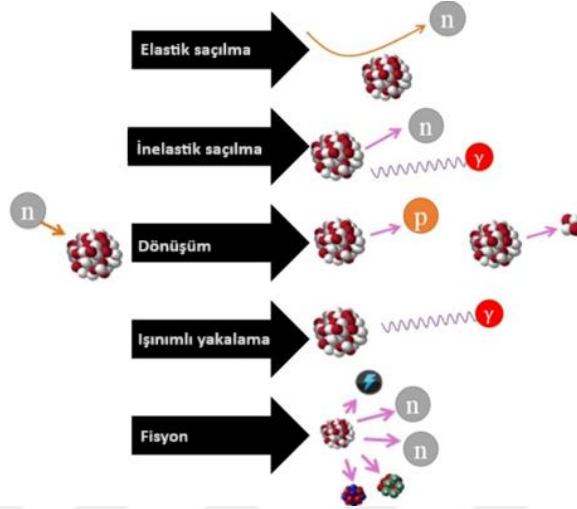
Şekil 1.9'da gama radyasyonunun madde ile etkileşiminin soğurucu malzemenin atom numarası ile olan ilişkisine yer verilmiştir.



Şekil 1.9 : Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi [26].

1.1.2.2 Nötron etkileşimleri

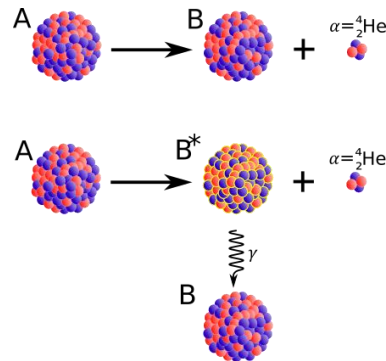
Nötronlar elektriksel olarak yüksüz olmaları sebebiyle çekirdek kuvvetleri ile etkileşime girerler. Şekil 1.10 ile nötron etkileşimleri sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.10 : Nötron etkileşimleri [27].

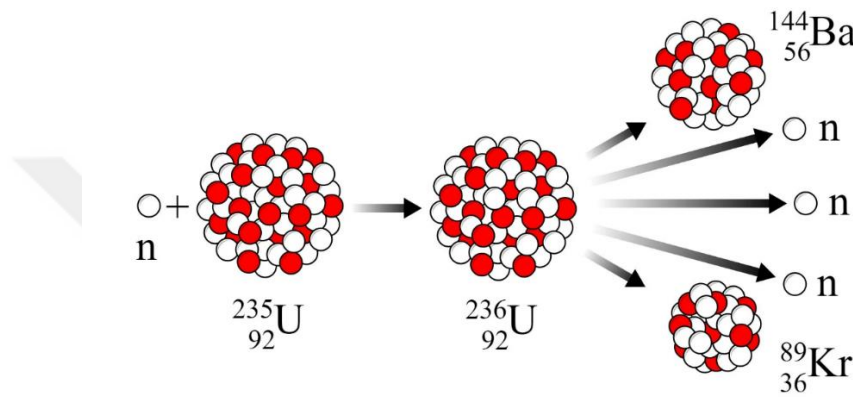
Nötron etkileşimleri 3 ana başlık altında kategorize edilir;

- Saçılma etkileşimleri; esnek ve esnek olmayan saçılma olarak ikiye ayrılır. Esnek saçılmada nötron ile çekirdek etkileşime girdiğinde hedef çekirdekten tek bir nötron saçılır. Bu durumda çekirdeğin enerjisi değişmez. Esnek olmayan saçılmada ise gelen nötron enerjisinin bir kısmı geri tepen çekirdek tarafından emilir ve çekirdek uyarılmış durumda kalır [28].
- Dönüşüm etkileşimleri; nötron ve çekirdek etkileşmesi sonucunda yüklü parçacığın salındığı reaksiyondur. (n, α) , (n, p) tiplerinde gerçekleşebilen reaksiyonlardan (n, α) reaksiyonu Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11 : Nötron dönüşüm etkileşimleri [29].

- Soğurulma etkileşimleri içerisinde yer alan *Işınımlı Yakalama Reaksiyonu* gelen nötronun tamamen soğurulduğu ve bileşik çekirdeğin olduğu bir etkileşimdir. Bir veya daha fazla gama radyasyonu salarak temel duruma bozunur. Bir diğer etkileşim türü olun *Fisyon Reaksiyonu* ise bir atomun çekirdeğinin daha hafif çekirdeklere ayrıldığı reaksiyondur ve Şekil 1.12’de verilmiştir. Sonucunda nötronlar ve gama ışınları ile birlikte yüksek enerji açığa çıkar [30].



Şekil 1.12 : Fisyon reaksiyonu [31].

1.2 Polimerik Malzemeler

Polimerler, monomer ismi verilen küçük farklı moleküler yapıların uygun şartlar altında moleküller arası bağlarla birbirlerine eklenmesiyle oluşan makromoleküllerdir [32]. Monomer molekülleri ve büyük moleküller oluşturulmasına yatkın fonksiyonel gruplar, polimerizasyon reaksiyonları sonucunda birbirleri ile bağ yaparak polimer moleküllerine dönüşürler. Çok sayıda küçük molekülün birbirine bağlanması sonucu oluşan yapı uzun bir zincire benzediğinden dolayı oluşan yeni molekül polimer molekülü, polimer zinciri ya da makromolekül olarak adlandırılabilir [33].

Polimerleri diğer malzemelerden ayıran en önemli özelliği büyük moleküllere sahip olmasıdır. Polimer malzemeler, doğada bulunma durumuna göre doğal veya sentetik olarak değerlendirilebilirler. Nişasta, protein, selüloz gibi doğal polimerlerin yanı sıra poli(laktik asit) gibi doğal monomerden elde edilen değiştirilmiş doğallar ile tamamen kimyasal sentetikler de mevcuttur. Ayrıca, polimer malzemelere gereken fiziksel ya da mekanik özellikler gibi özellikler belirli bir zincir uzunluğu/büyüklüğü ile

kazandırılabilir. Bu gibi özellik arttırıcı takviyeler ile birlikte polimerik malzemelerin çok daha fazla alanda kullanılmaya başlanması ve endüstriyel anlamda geliştirilmeye elverişli olması diğer yapısal malzemelere göre daha fazla avantaj sağlamaktadır [34].

Şekil 1.13'te de görüldüğü üzere, polimerik malzemeler otomotiv sektöründe, plastik ara bağlantı parça üretiminde, ayakkabı tabanlarında gibi çeşitli ve birbiri ile doğrudan bağlantısı olmayan birçok alanda kullanılmaktadır. Çok çeşitli alanlara hızla yayılmasının arkasında çeşitli takviyeler ile yapılan müdahaleler ve araştırma-geliştirme süreçleri yer almaktadır.

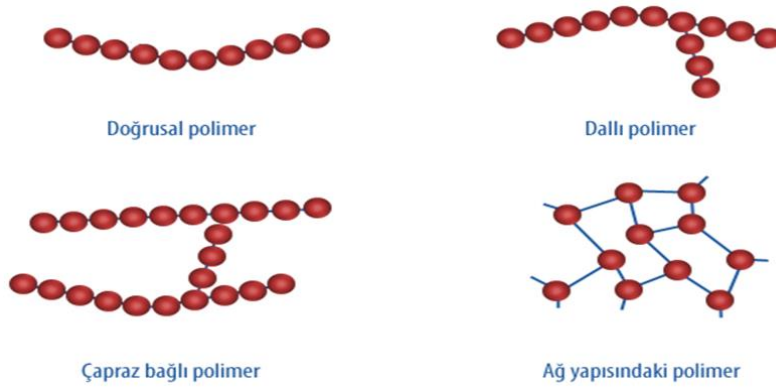


Şekil 1.13 : Polimerik malzemelerin bazı kullanım alanları [35].

1.2.1 Polimer malzemelerin sınıflandırılması

Son yıllarda yapılan çalışmalar ve polimerlerin kullanım alanlarının oldukça artmasıyla birlikte polimerik malzemelerin sınıflandırılması ihtiyacı hasıl olmuştur. Doğal veya yapay olarak yapılan sınıflandırma, polimerik malzemelerin özelliklerinin kapsayıcı olarak karşılamadığı için mekanik ve termal özelliklerinde belirleyici rol oynayan zincirine göre sınıflandırma yapmak daha gerçekçi bir yaklaşım sağlayacaktır. Şekil 1.14'te zincir yapılarına yer verilmiştir.

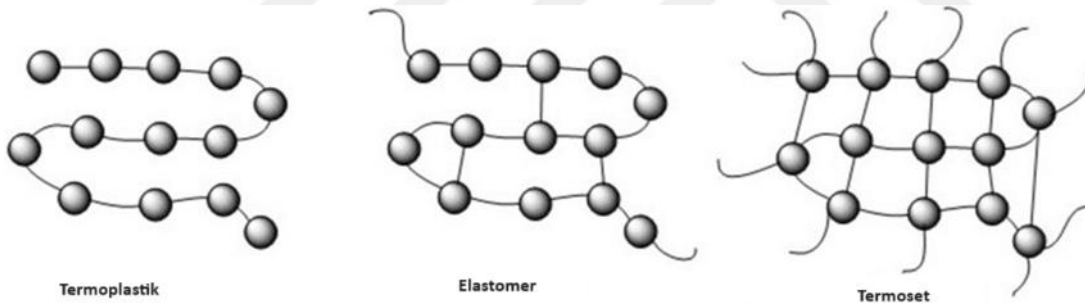
Polimer zincirlerinin şekilleri ve ağ yapısı polimerin özelliklerini etkiler. Polimer molekülleri dallanmış, çapraz bağlı ya da doğrusal (lineer) yapılar olabilirler. Çapraz bağlantı oranının arttıkça ağı yapıdaki polimere dönüşür [36].



Şekil 1.14 : Polimerlerin zincir ve ağ yapısı [37].

Doğrusal ya da dallanmış polimerler ısı ile şekil değiştirilebilir, eritilebilir veya uygun çözücüler ile çözünmesi sağlanabilir. Buna rağmen, ağ yapılı bir polimerik malzemenin eritilmesi veya çözünmesi olası değildir.

Zincir yapılarına göre özelliği farklılaşan polimerler termoplastikler, elastomerler ve termosetler olarak üç grup altında incelenebilir. Şekil 1.15'te zincir ve ağ yapılarına göre sınıflandırılan polimerlere yer almaktadır.

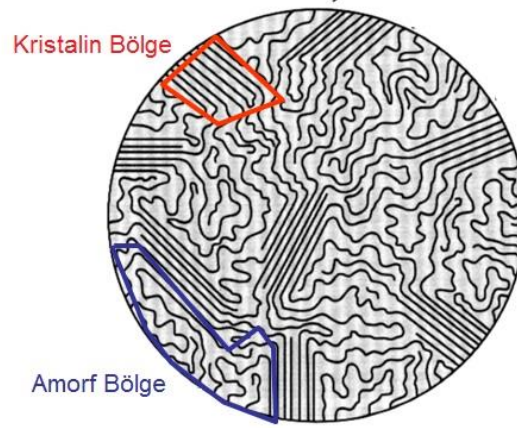


Şekil 1.15 : Polimerlerin sınıflandırılması [38].

1.2.1.1 Termoplastikler

Günlük hayatta sıkça kullanılan polimerik malzemeler arasında en çok yeri kapsayan ve plastik kelimesini tam olarak karşılayan gruptur. Doğrusal veya dallanmış zincirler içerirler. Bu nedenle uygun koşullar ve sıcaklık altında erir, yeniden şekillendirilebilir. Kolayca uygun çözücünde çözünebilirler [39].

Termoplastikler aynı zamanda kristalin veya amorf yapıda olabilirler. Amorf yapıda bir polimerde zincirler arası bağıntı belirli düzen göstermezken kristalin yapı belirli bir düzen içerir. Kullanılan termoplastikler genellikle kristalin ve amorf bölgeleri birarada bulundurduklarından yarı-kristalin, Şekil 1.16, olarak isimlendirilir [40].

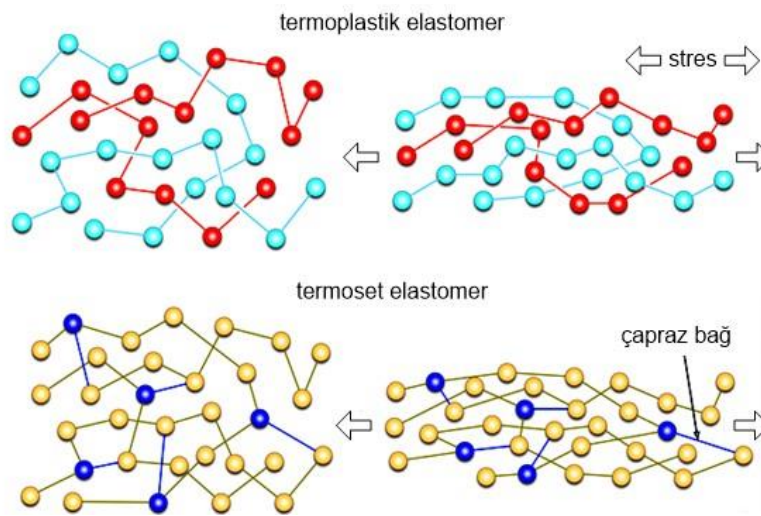


Şekil 1.16 : Yarı-kristalin polimer [41].

1.2.1.2 Elastomerler

Kauçuk olarak da bilinen elastomerler, elastik ve esnek özellikli polimerik yapılardır. Çekme etkisi ile yüksek oranda uzama göstermelerine karşın çekme etkisi kesildiğinde süratle ilk ebatlarına dönerler. Bu özellikleri zincir yapısındaki az orandaki çapraz bağdan kaynaklanır. Çekme etkisi ile polimer zincirleri birbirleri üzerinden akar ancak çapraz bağlantılar kalıcı akışı engeller. Çapraz bağlantı oluştuktan sonra elastomer polimerlerin erimesi durumu gözlemlenmez [42].

Şekil 1.17’de elastomer yapıdaki polimerik malzemelerin zincir yapıları yer almaktadır.



Şekil 1.17 : Elastomer polimer zincir yapıları [43].

1.2.1.3 Termosetler

Çok fazla çapraz bağlantı içeren (ağsı yapı) sert yapılı polimerlerdir. Isıya dayanıklı malzemelerdir, eritilemez ya da yeniden şekillendirilemezlerdir. Çok yüksek sıcaklıklara ulaştırıldığında zincir ve bağlantı kırılmaları sonucunda bozunurlar.

Başlangıçta termosetler, çeşitli katkı maddeleri içeren viskoz sıvı formundadır. Kalıplama ve şekillendirme işleminden kullanılabilir termosete dönüştürülecek olan bu sıvıya reçine ismi verilmektedir.

Önpolimerler, kısmi olarak polimerize edilmiş, akma özelliğini korumakta olan sistemler olup, çeşitli takviye içeren reçine ile birlikte, ısı ve ışık gibi etkiler sonucu çapraz bağlantılı yapıya dönüşerek termoset polimer elde edilmektedir [44].

1.2.2 Polimer malzemelerin özellikleri

Polimer malzemeler; katı, sıvı ve çözelti hallerinde kullanılabilen ve tüm bu hallerde farklı polimerik özellik bulundurma ihtimali oldukça yüksek yapılardır. Polimer bir malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi, söz konusu polimerin molekül yapısının kimyasal birleşim ve moleküler mimari olarak iki farklı yönünü ele alarak değerlendirilmesi gerekmektedir [45].

Kimyasal birleşim, polimerin lokal yapısını tanımlayan bir terimdir ve yinelenen birimleri gösterir. Polimerin formülü ve adı kimyasal birleşimle belirtilir.

Moleküler mimari ise makromoleküler yapının tamamını gösterir. Polimer doğrusal bir yapıya sahipse ortalama molekül ağırlığı ve bu ağırlığın dağılımı, dallanmış bir yapıya sahipse zincir boyunca dal sayısı ve dal uzunluğu, ağ yapısına sahipse düğüm noktaları arasındaki zincirlerin ortalama uzunluğu önemlidir [46].

1.2.2.1 Kristalleşme

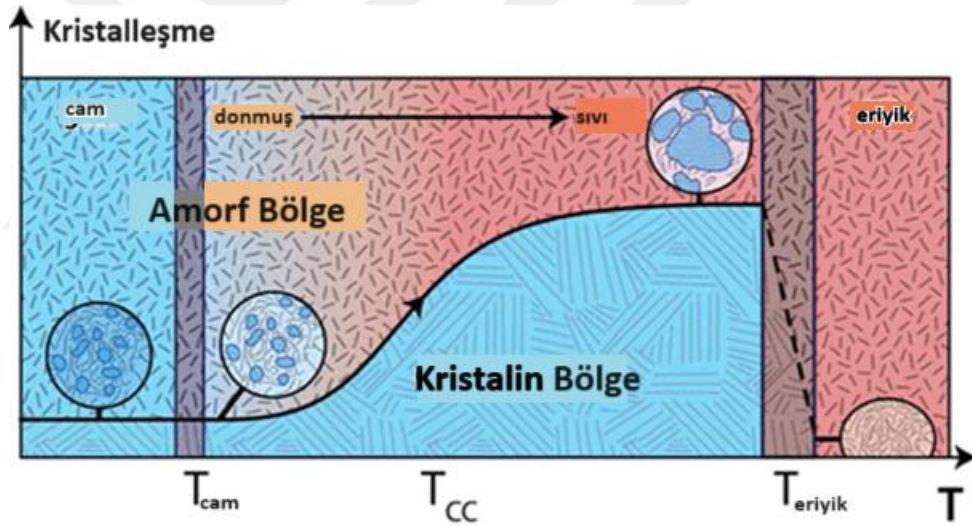
Polimerlerde kristalleşme önemli bir işlemdir. Moleküler zincirlerin kısmi hizalanmasıyla ilişkilidir ve polimerin optik, mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Kristalleşme oranı polimerden polimere farklılık gösterir. Bir polimerin kristalizasyon kabiliyeti; moleküler düzen, dallanma, molekül içi ve moleküller arası etkileşim gibi pek çok parametreye bağlıdır. Polimer malzemelerdeki çapraz bağların fazla olması kristalleşmeyi engelleyen bir özelliktir [47].

Polimer kristalizasyon işlemi esas olarak polimer moleküllerinin düzensiz bir durumdan düzenli bir kristalin duruma dönüştürülmesi işlemi içerir. Farklı dönüşüm ortamlarına göre toplu kristalleştirme işlemine ve çözelti kristalleştirme işlemine ayrılabilir [48].

1.2.2.2 Termal özellikler

Lineer (doğrusal) bir polimer, yeterince yüksek sıcaklıklarda amorf halde ve sıvıdır. Aynı polimer yeterince düşük sıcaklıklarda sert bir katıdır. Polimer bir malzeme, soğutulduğunda kristalleşme ve camsılaşma olmak üzere iki yolla katılaşabilir [49].

Şekil 1.18’de belirtildiği gibi T_{cc} kristalleşmenin hızla gerçekleştiği sıcaklığı gösterirken, T_g ya da T_{cam} camsı geçiş sıcaklığını gösterir. Bir polimerin endüstriyel ve pratik bir uygulamaya elverişli olduğunu kristal erime noktası ve camsı geçiş sıcaklığı ile belirlenmektedir.



Şekil 1.18 : Kristalleşme-Sıcaklık eğrisi [50].

Ergimiş halde bulunan sıcak bir polimerik yapı soğutulduğunda, kristal erime noktası sıcaklığının biraz altında kristalleşme başlar.

Camsı geçiş sıcaklığında malzeme camsı özelliklerini kaybederek yerine viskoz özellikler kazanmaya başlar. Camsı geçiş sıcaklığını, çapraz bağlantı ve dallanma oldukça etkiler. Çapraz bağlantılar, bağların dönmesini zorlaştırır ve bu nedenle camsı geçiş sıcaklığı artar. Buna rağmen eğer moleküler yapı dallanmış zincirlerden oluşuyorsa hacim artar, yoğunluk azalır ve buna bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığı azalır [51].

1.3 Polimer Malzemelerde Radyasyon Uygulamaları

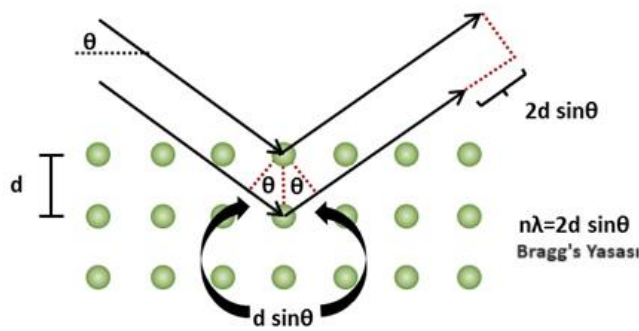
Yüksek enerjili radyasyonun sağlık uygulamalarında ve tahribatsız muayene gibi uygulamaların birçoğunda kullanıldığı gibi polimer malzemeler üzerinde de çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamalar polimerin karakterizasyonunu ve analizini kapsamaktadır.

1.3.1 X-Işını difraksiyon (kırılma) analizi (XRD)

X-ışını kırılma yöntemi elektromanyetik ışınla etkileşim yoluyla moleküllerin veya atomların dizilişlerini göstermektedir. Özellikle kristalin yapıdaki polimer malzemelerin kristal yapısını elde etmek için kullanılır. Ancak polimerik kristaller X-ışını kırılımı için oldukça küçük yapıdadır. Bu sebep ile polimerik malzemeden çekilen bir lif (fiber) kullanılır [52].

Kristalin yapıdaki bölgelerin, lif eksenine paralel olan moleküllerin uzun eksenleri ile olan uzaklığı sebebi ile elde edilen şekil, tek kristalden elde edilen dönme şekli ile denktir. Bu durumda lif eksenine dik olarak keskin kırılma hatları oluşmaktadır. XRD yöntemi ile özetle polimer kristalinin yapısını, mükemmelliğini ve fazın saflığını, kristalin doğrultularını ve örgü sabitlerini belirlemek gibi bilgiler elde edilebilir [53].

Şekil 1.19'da yer alan grafikteki noktalar kristalin yapıdaki bir malzemeyi sembolize etmektedir.



Şekil 1.19 : Genel XRD analizi [54].

Gelen X-ışını malzemenin farklı noktalarında dağılım gösterirken kırılan X-ışınları da bu sebepten ötürü farklı bir optik yol uzunluğuna sahiptirler. Bu yol uzunluğunun büyüklüğü Bragg Kanunu ile açıklanır ve bu denklem kristal düzlemler arası mesafe ve X-ışınlarının geliş açısına bağlıdır [55].

1.3.2 Yakın kenar X-ışını soğurma ince yapı spektroskopisi (NEXAFS)

X-ışını soğurma ince yapı (XAFS), X-ışını soğurulma spektrumlarında gözlemlenen salınımlardır. Soğurma kenarı çevresindeki kenarın yaklaşık 30 eV-1000 eV aralığında görünen spektral özelliklerle ilgilidir.

NEXAFS Spektroskopisi, polimer karışımlarının ve kopolimerlerin kimyasal bileşiminin kantitatif analizleri için uygulanabilir [56].

1.3.3 Genişletilmiş X-ışını soğurma ince yapı spektroskopisi (EXAFS)

NEXAFS aralığını (30-1000 eV) aşan foton enerjilerinde, X-ışını soğurulma spektrumları dalgalı ince yapıyla karakterize edilir. EXAFS spektroskopisi, malzemenin fiziksel durumundan bağımsız olarak hemen hemen her karışımdaki yerel yapı elemanlarının belirlenmesine olanak tanır.

Genel olarak XAFS spektroskopisi, incelenen atoma göre komşu atomların niteliği, sayısı ve konumu hakkında bilgi verir. Bu kapsamda XAFS spektroskopisi, XRD ile birlikte yapısal analiz için de kullanılır [57].

1.4 Polimer Malzemelerde Hasar Mekanizması

Hasar kelime anlamı olarak bir sistemin veya parçanın çalışma fonksiyonları kaybetmesidir. Hasar mekanizması ise genellikle malzeme hasarını belirtir. Polimer malzemelerde hasar konusu ise polimerin kullanım amacını belirleyen birçok mekanik özellikler ile atomların kristal düzeninden kaynaklanmaktadır. Polimer zincirleri; sıcaklık, radyasyon, oksijen, ozon etkisi veya hidroliz sonucu bozunmaya uğrayabilirler. Bozunma, ana zincir üzerinde olabileceği gibi yan gruplar üzerinden de gerçekleşebilir [58]. Polimer yapılarda radyasyona bağlı hasar mekanizmasını polimerin yapısının değişmesi olarak tanımlayabiliriz. Radyasyona bağlı olarak kırılan bağlar, ışınlama sonrasında kendi aralarında yeniden bağ kurarak moleküler düzeyde değişiklik göstermektedir.

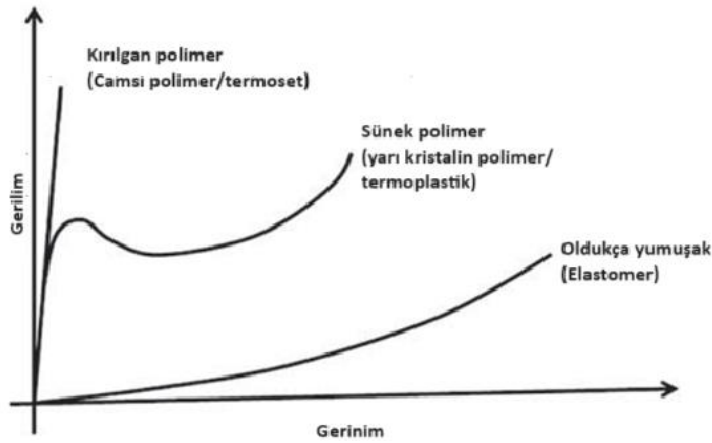
Polimerler arası bağ kaybının oluşturduğu moleküler bozunma kütle kaybına sebep olmaktadır. Kütle kaybının hızı ve kapsamından yola çıkılarak, aromatik grup ve/veya çapraz bağ içeren polimerler, içermeyenlere göre ışınlamada kütle kaybına daha dirençlidir [59].

1.4.1 Polimer malzemelerin mekanik özellikleri

Polimer malzemelerin mekanik özellikleri, metaller ve diğer kristal malzemelerde olduğu gibi elastisite modülü, akma ve çekme mukavemeti gibi mukavemet ölçümleri ile karakterize edilmektedir.

Molekül ağırlığının artması ile polimerin gerilme mukavemeti artar. Düşük moleküler ağırlık değerlerinde, polimer zincirleri zayıf moleküller arası Van der Waals etkileşimleri ile gevşek bir şekilde birbirine bağlanırken, büyük moleküler ağırlığa sahip polimerlerde zincir hacimli hale gelir ve birbirine dolanarak polimer için yüksek mukavemet değerleri üretilmektedir. Polimer yapısı içinde çapraz bağlı bir morfolojinin varlığı, zincirlerin görelî hareketini engeller ve bu durum polimerin güçlenmesini sağlamaktadır [60-62].

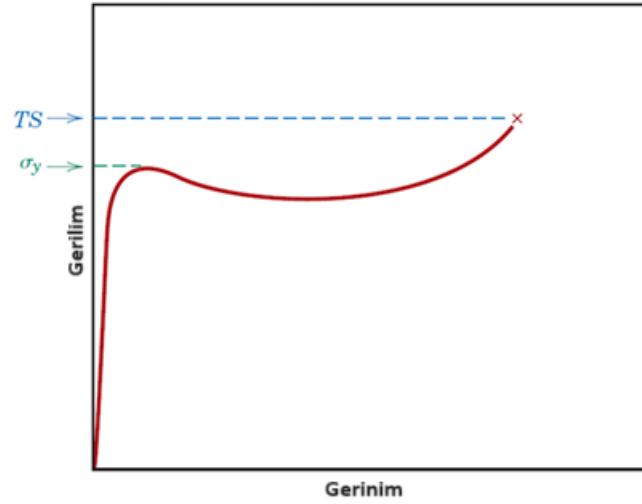
Birçok polimer malzemenin genel mekanik özellikleri, stres kaynaklı mekanik deformasyon ve yükleme etkileri altında tepkilerini görselleştirmenin en basit yolu Şekil 1.20 ve Şekil 1.21’de örneği verilen gerilim-gerinim eğrisidir.



Şekil 1.20 : Gerilim-Gerinim eğrisi ve polimerin elastik özellikleri [63].

Bu tür mekanik tepki özellikleri, deformasyon hızı, malzeme sıcaklığı ve hatta çevrede bulunan ek kimyasalların mevcudiyeti gibi çok sayıda dış faktöre karşı hassasiyet göstermektedir.

Kırılğan polimerler gerilime (stress) ve buna bağlı elastik sıkıştırmaya maruz kaldıklarında kırılırken, yüksek elastik özellik gösteren polimerler şekil değiştirirler. Sünek polimerlerde ise elastik deformasyon ve plastik akış arasındaki fark mekanik özellikleri de değiştirir. Bu iki özellikler arasındaki gerilim noktası malzemenin akma dayanımı veya elastik sınırı olarak bilinir ve σ_y olarak sembolize edilmektedir [64-65].

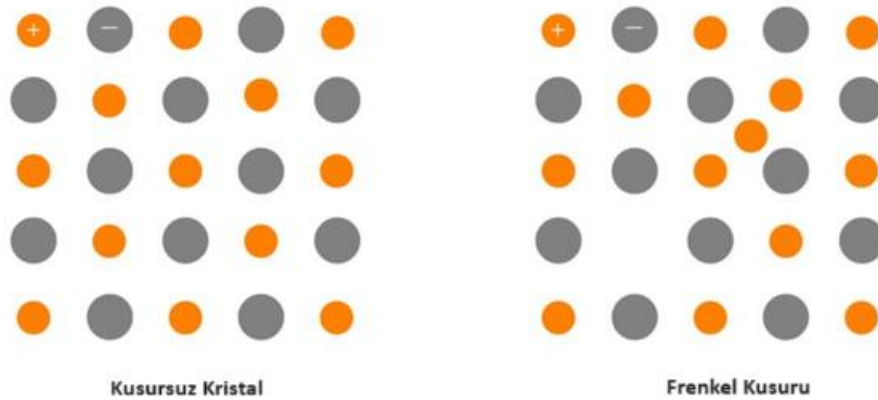


Şekil 1.21 : Gerilim-Gerinim eğrisinde çekme mukavemeti [66].

Polimer malzeme üzerinde gerilim arttıkça, malzeme çekme mukavemetine (TS) ulaşacaktır. Bu noktada malzemenin toplam çatlama ve kırılması meydana gelir.

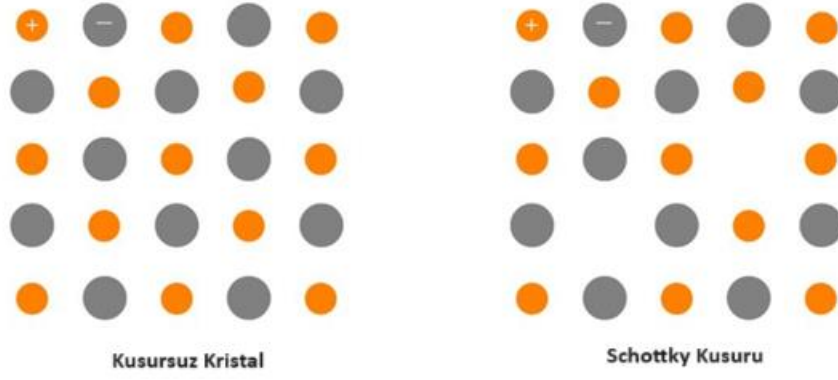
1.4.2 Frenkel ve Schottky kusuru

Frenkel kusuru, bir atomun veya iyonun orijinal kafes bölgesinden ayrıldığı aynı kristal üzerinde bir arayer pozisyonu (Şekil 1.22) işgal ettiği bir tür nokta kusurudur. Frenkel kusuru ayrıca anyon boyutunun katyon boyutundan önemli ölçüde büyük olduğu iyonik katılarda gözlemlenir [67,71].



Şekil 1.22 : Frenkel kusuru [68].

Schottky kusuru ise, zıt yüklü atomlar karşılıklı gelen kafes yapılarını terk edip bir çift boşluk kusuru (Şekil 1.23) meydana gelir. Kristalin genel elektriksel nötrlüğü korunsa da boşluklar nedeniyle yoğunluk azılır. Schottky kusuru ayrıca anyon boyutunun katyon boyutuyla hemen hemen aynı olduğu iyonik kristallerde meydana gelir [69,71].



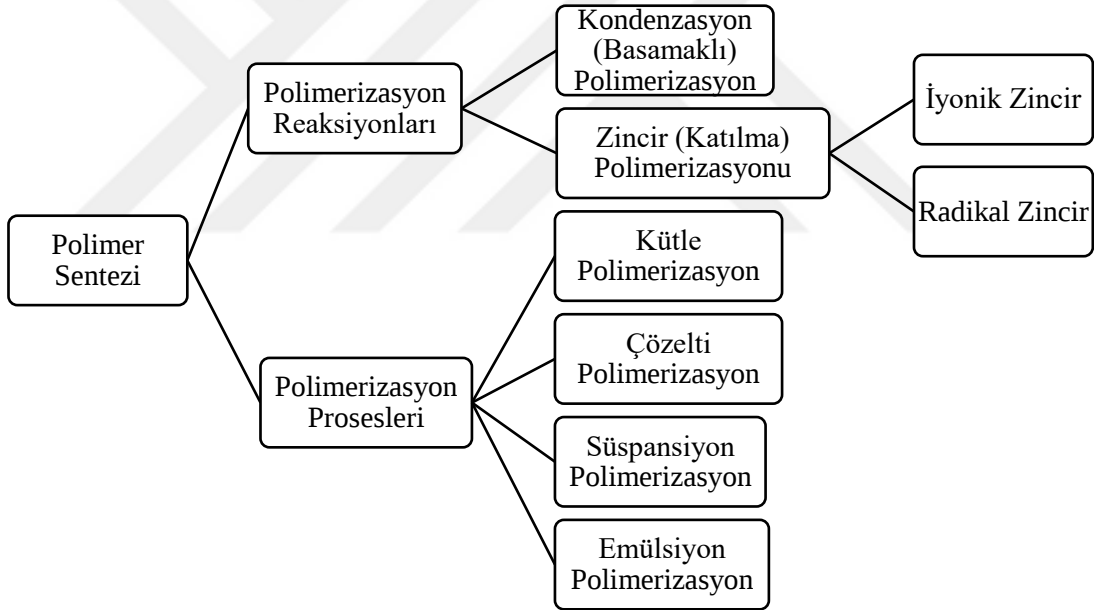
Şekil 1.23 : Schottky kusuru [70].



2. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER

2.1 Polimerlerin Sentezi

Monomerik yapıların bir araya gelerek polimerik yapılar oluşturmaya polimerizasyon ismi verilmektedir. Polimerlerin sentezlenmesinde polimerizasyon yöntemleri önemli rol oynamaktadır. Farklı polimerizasyon reaksiyonları ile bağlanan monomerler, polimer malzemelerin birbirlerinden farklı özellikler göstermesine neden olmaktadır. Polimerik malzemelerin sentezi Şekil 2.1’den de görüldüğü üzere reaksiyonlarına göre ve üretim süreçlerine göre ayrı ayrı değerlendirilebilir.



Şekil 2.1: Polimer sentezi yöntemleri.

2.1.1 Polimerizasyon prosesleri

Polimerik malzemelerin monomerlerden fiziksel olarak elde edilmesinde kullanılan fiziksel yöntemlere polimerizasyon prosesleri denir. Polimerizasyon prosesleri yöntem olarak dört başlık altında toplanmıştır [72].

2.1.1.1 Kütle polimerizasyon

Monomerlerin ısı, ışın gibi polimerizasyon başlatıcı malzeme ve zincir transferi taşıyıcısı gibi takviye maddelerinin bulunduğu polimerizasyon yöntemidir. Monomer yaklaşık olarak %10-20 oranında polimerleştiğinde viskoz sıvı oluşur ve reaksiyonun devamı halinde polimerin kaptan uzaklaştırılması güçleşebilir [72,73]. şekil 2.2’de yer alan dezavantajları içerisinden en önemlisi sıcaklık kontrolünün güçlüğüdür.

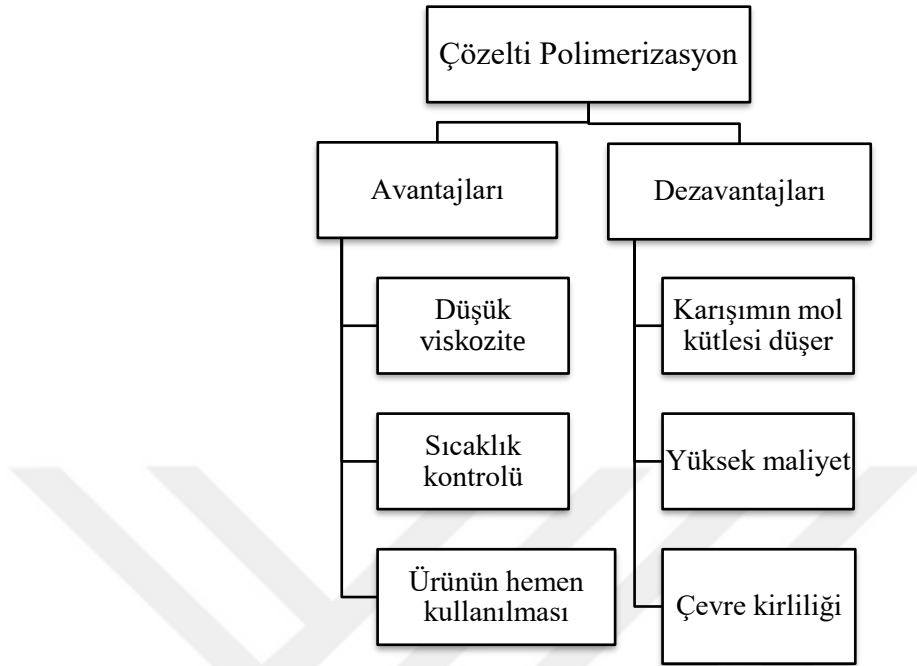


şekil 2.2 : Kütle polimerizasyon yönteminin avantajları ve dezavantajları [74].

2.1.1.2 Çözelti polimerizasyon

Çözelti polimerizasyonunda ortamda monomer,   z c  ve başlatıcı bulunmaktadır. Bu polimerizasyon yönteminde monomerik yapı, reaksiyona dahil olmayan bir çözücü içerisinde polimerleşmektedir. Çözelti polimerizasyon yönteminde kütle polimerizasyonda ortaya çıkan ve en önemli dezavantaj olan sıcaklık kontrolü zorluğu ortadan kaldırılmaktadır. Genel olarak monomerin kendisi seyreltici gibi davranarak sıcaklık kontrolünü sağlamaya yardımcı olmaktadır. şekil 2.3’te avantaj ve dezavantajları yer almaktadır. Kullanılan   z c  hem monomerik yapıyı hem de başlatıcı malzemeti   zerse, bu duruma homojen çözelti polimerizasyonu; yalnızca

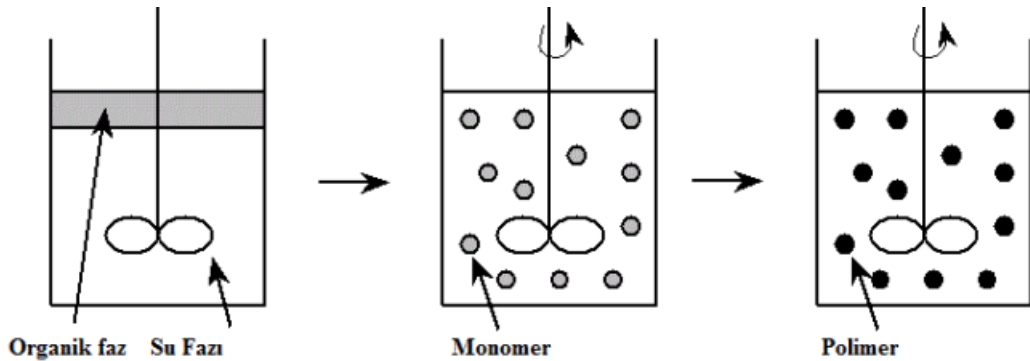
monomeri çözerse ortamda çözünmeyen toz ve/veya partikül halinde polimer kalacağından heterojen çözelti polimerizasyonu adını alır [72-74].



Şekil 2.3 : Çözelti polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [74].

2.1.1.3 Süspansiyon polimerizasyonu

Süspansiyon polimerizasyonu, monomerik yapı ile karışım oluşturmeyen bir sıvı faz içerisinde monomerin dağılıp askıda tutulması esnasında oluşmaktadır. Şekil 2.4'te örneklenen bu proseste su en fazla tercih edilen sıvıdır ve polimer, sulu faz içerisinde damlalar halinde dağıtılmak suretiyle monomerin süspansiyonu yapılmaktadır [72,73,75].



Şekil 2.4 : Süspansiyon polimerizasyonu [73].

Polimerizasyonun başlatması için organik yapıda (monomerde) çözünebilen başlatıcı tercih edilmektedir. Süspansiyonun kararlı yapıda olması ve oluşan polimerik partiküllerinin yapışmamasını sağlamak için stabilizatör adı verilen suda çözünmeyen inorganik kimyasal bileşikler kullanılmaktadır. Mekanik karıştırma aracılığı ile damlaların yapışması önlenir. Filtrasyon ve sprey kurutucu gibi aşamalar ile polimer parçacıkları ayrılır [72,73,75]. Şekil 2.5'te avantajları ve dezavantajları yer almaktadır.



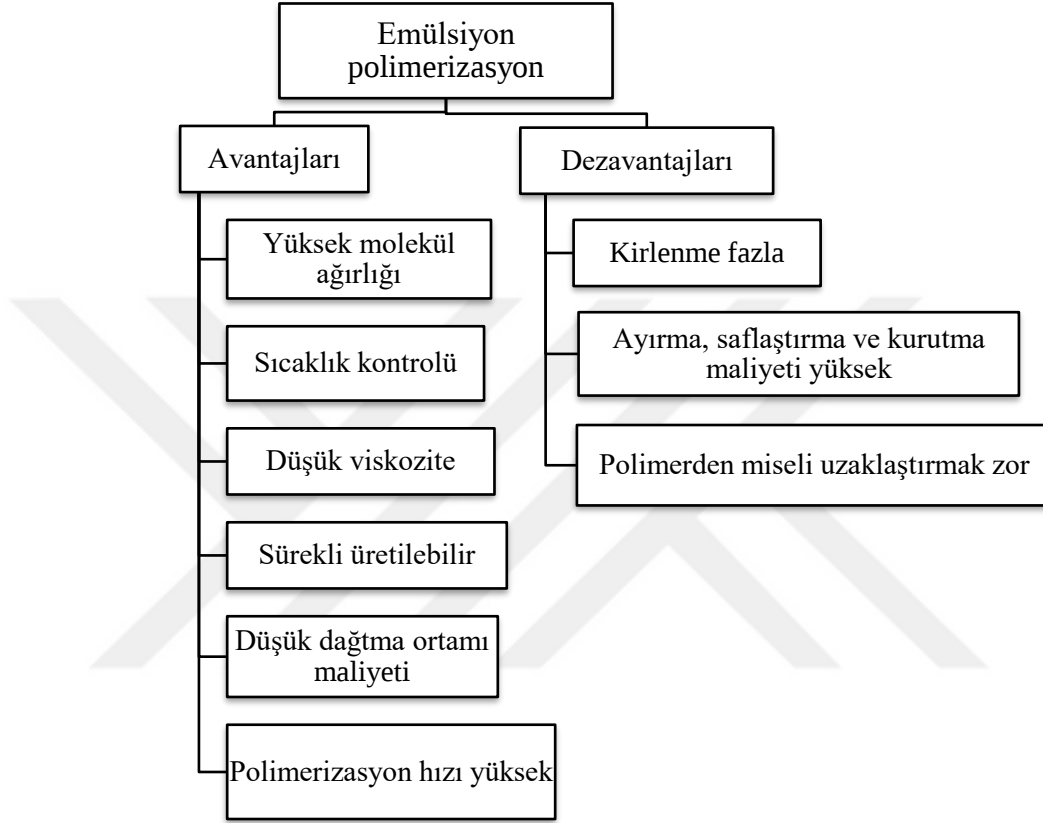
Şekil 2.5 : Süspansiyon polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [75].

2.1.1.4 Emülsiyon polimerizasyon

Emülsiyon polimerizasyon yönteminde ortamda; monomer, su, misel yapıcı ve başlatıcılar bir arada bulunmaktadır. Su fazlı ortamda, suda çözünen başlatıcı ve yüzey aktif (sürfaktan) madde bulunurken, monomerler misel ile ortama dağılmıştır. Monomer, sürfaktan bir madde ile kararlı hale getirilmektedir ve oluşan damlacık yapılara misel ismi verilir [72,73,75].

Emülsiyon polimerizasyonunun ilk evresinde misel yapıcı ile su karıştırılır ve karışım içerisinde yer alan misel damlacıklar, bir kısmı suda çözünürken bir kısmı da bir araya gelerek küre miselleri oluşturmaktadır. Misellerin bir yönü hidrofobik diğer yönü hidrofiliktir. Bu uçlar kendi içlerinde bir toplanma gösterdiğinde monomer-su arasında kararlı emülsiyon oluşumunu desteklemektedir. Su ortamı içerisindeki misellere

çözünmeyi takiben karıştırılarak monomer eklenmektedir. Bu durumda monomerin bir kısmı suda çözünürken bir kısmı da misellerin içine girerek onları şişirmektedir. Diğer bir kısmı ise monomerik damlalar halinde suda dağılır. Emülsiyon yapıcı miselin monomerlere tutunmasıyla polimerizasyon gerçekleştirilmektedir [72,73,75]. Şekil 2.6'da avantaj ve dezavantajları yer almaktadır.



Şekil 2.6 : Emülsiyon polimerizasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [73].

2.1.2 Kondenzasyon (basamaklı) polimerizasyon

İki ve/veya daha çok farklı türden monomerin eklenmesi ile oluşan polimerizasyon yöntemine aynı zamanda kondensasyon polimerizasyonu ya da adım büyütme polimerizasyonu da denir. Monomerler içerdikleri reaktif fonksiyonlu grupları sayesinde tepkimeye girerek daha büyük molekülleri oluştururlar. Tepkime başlatıcıya ihtiyaç duymadan sentezlenen bu polimerizasyon yönteminde genellikle su molekülü gibi küçük moleküllerin ayrıldığı görülmektedir [76].

Kondenzasyon polimerizasyonunda monomerler dimerleri, dimerler trimeleri oluşturmakta ve polimerin zincir boyu uzamaktadır. Bu özellik kondenzasyon polimerizasyonunu zincir polimerizasyonundan ayıran önemli bir farktır [77].

2.1.3 Radikal zincir büyütme polimerizasyonu

Radikal zincir büyütme polimerizasyonu yönteminde aşırı sayıda doymamış moleküller birleşerek büyük bir molekül meydana gelir. Doymamış, bağ yapmaya hazır moleküllerin polimerizasyonu, zincirin büyümesinde rol oynayan aktif merkezin, çok sayıda monomerin katılması esnasında bir tek polimer molekülüne sınırlı kalmasıyla gerçekleşmektedir. Böylece reaksiyon içerisinde ağırlıkça yüksek polimer molekülleri dışında herhangi bir ara molekül bulunmamaktadır [78].

Serbest radikal polimerizasyonu başlama, çoğalma ve sonlanma evrelerinden oluşur. Serbest radikaller monomerlerin bulunduğu ortamda üretilirse, radikaller çift bağ ile reaksiyona girerek yeni radikal oluştururlar. Başlama evresinde oluşan radikal zincir, monomerlerin katılması ile büyümektedir ve çoğalma evresinde onbinlerce monomer zincire katılabilmektedir. Radikallerin birbirleri ile reaksiyona girerek radikal aktifliğini kaybetmeleri ve polimer zincirinin çoğalmasının durması sonlanma basamağına aittir. Sonlanma aynı zamanda, radikallerin birbirlerini yok etmesi olarak da tanımlanabilir [79].

2.1.4 İyonik zincir katılma polimerizasyonu

Zincir reaksiyonları genellendiğinde aktif merkezlerin serbest radikal, anyon veya kation özellikleri göstermektedir. İyonik polimerizasyonun kinetiği ve mekanizması serbest radikal polimerizasyonları kadar net değildir. Çok hızlı ilerleyen iyonik polimerizasyonlar sistem içerisinde çok az konstantrasyondaki katalizör ve diğer safsızlıklardan önemli ölçüde etkilenebilirler. İyonik polimerizasyonda başlama ve sonlanma basamakları radikal polimerizasyondan farklı ilerler. Büyümekte olan polimer zincirinin sonlanması büyüyen zincirin bir monomoleküler bir reaksiyonu ya da monomer veya çözücüye transfer olması ile gerçekleşmektedir [80].

Zincir polimerizasyon yöntemlerinin en önemli müşterek özelliği, polimer zincirinin oldukça kısa süreler içerisinde yüksek molekül ağırlığına (10^7 gibi) ulaşmasıdır [81].

2.1.5 Kopolimerizasyon

İki ve/veya daha fazla monomerik yapının yüksek polimer içinde bağlanmasına kopolimerizasyon denir. Bu reaksiyon ile elde edilen yapıya kopolimer adı verilir. Basamaklı polimerizasyonda iki farklı monomer kullanılmasından dolayı zincir boyunca iki farklı yapı oluşacaktır. Buna rağmen zincir reaksiyonları ile oluşan

polimerlerde sadece bir monomerin reaksiyona girmesi yeterlidir. Kopolimerlerde ise moleküler yapının değişik bölgelerinde monomer birim sayılarının birbirlerine oranı aynı olmak zorunda değildir. Bu özelliği sebebiyle, kopolimerizasyon reaksiyonları ile istenen özelliklere sahip polimerik ürün daha geniş bir hareket yelpazesinde tasarlanabilir ve hazırlanabilir [82].

2.1.6 Halka-açılması polimerizasyonu

Halkalı yapıdaki monomerler, halka-açılma polimerizasyon yöntemi ile polimerik ürünlere dönüştürülebilirler. Halka-açılma polimerizasyon yöntemi ile oluşturulan polimerik yapılar, zincirlerinde yer alan eter, amid bağları gibi fonksiyonel grupları sebebiyle kondensasyon polimeri olarak nitelendirilebilirler. Ancak halka-açılması polimerizasyonunda çoğalma basamağı, zincir polimerizasyonu ile benzerlik göstermektedir.

Halkalı monomerlerin polimerleşme eğimi, halkada yer alan fonksiyonel grubun reaksiyona girme yatkınlığı ile kullanılan katalizöre ve halkanın büyüklüğüne bağlı olmakla birlikte halka-açılması polimerizasyonlarının kinetiği, molekül ağırlığının zamanla büyümesi hem zincir hem basamaklı polimerizasyonlarından birinin kinetik bağıntısına uyabilir. Bu nedenle, polimerizasyonu açıklayan deneysel kinetik yasaya ve deneysel verilere bakılmaktadır [83].

2.1.7 Stereospesifik polimerizasyon

İzomerler, aynı oranda ve aynı elementlerden oluşan ancak element molekülleri arasındaki atomik bağları farklı olan monomerlerdir. Polimer moleküllerinde farklı izomer seçeneği yer almaktadır. İzomerik monomerlerin polimerizasyon tepkimesi ile zincir yapısı birbirinden çeşitli ve bağımsız birçok polimer elde edilebilir. Stereospesifik polimerik malzemede kendisini oluşturan atomlar belirli bir düzene sahiptir ve bu polimer kristalimsi bir yapıya sebep olan polimerizasyon yöntemi ile elde edilir [84]. Stereospesifikliğin oluşması monomer ve katalizör sistemine bağlıdır. Koordinasyon katalizörleri polimerizasyonu başlatıcı görevi dışında önemli bir koordinasyon etkisi bulunmaktadır. Katalizör, büyümekte olan zincir sonu ile yeni gelen monomer arasında koordinasyon sağlayarak, gelen monomerin stereospesifik katılmasını sağlamaktadır. Stereospesifikliğe yol açan koordinasyon katalizörlerine Ziegler-Natta katalizörleri de denir [85].

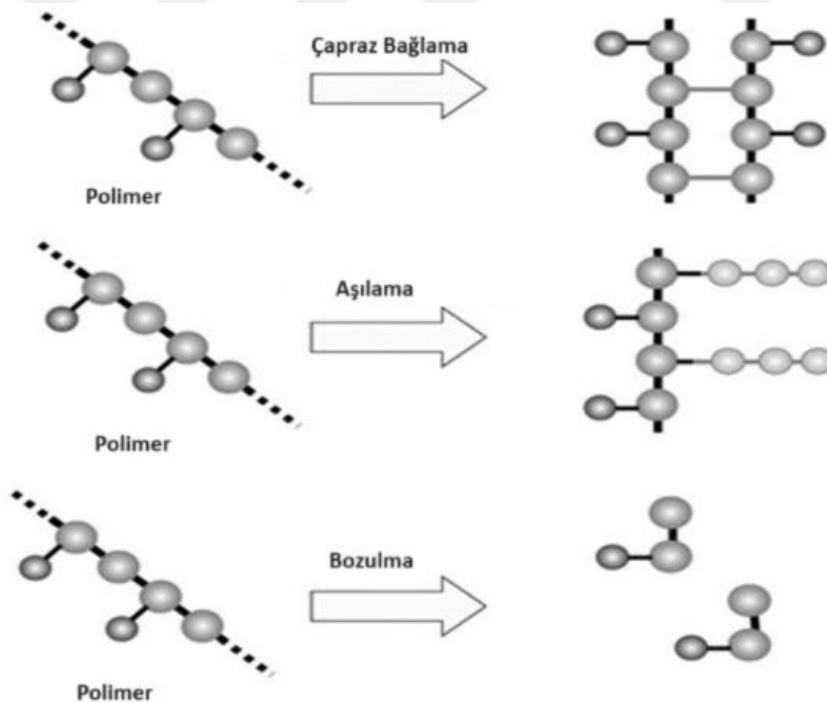
2.1.8 Radyasyon polimerizasyonu

Radyasyon kaynakları birçok alanda kullanıldığı gibi polimerizasyon ve polimer malzemelerin modifikasyonu için de kullanılmaktadır. Radyasyon polimerizasyonu radikal ve iyonik polimerizasyon mekanizmaları ile ilerler. En etkili başlatıcı olarak beta parçacıkları ve gama ışınları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Serbest radikal polimerizasyonuna uğrayabilen tüm monomerik birimler, gama ışınları polimerize edilebilirler ve monomerin radyoliziyle üretilen serbest radikaller polimerizasyonu başlatabileceğinden dolayı bir katalizöre ihtiyaç bulunmamaktadır.

Katyonik iyonizasyona uğrayabilen monomerler, özellikle su izlerinden arındırılmak üzere safsızlıkların uzaklaştırıldığı bir sistemde, gama ışınları ile ışınlanarak katyonik mekanizma ile polimerize olmaktadır.

Şekil 2.7'de de belirtildiği üzere yüksek enerjili radyasyonlar aynı zamanda aşı kopolimeri oluşturmak üzere de kullanılmaktadırlar. Radyasyon aşılama, polimerik malzemelerin yüzey modifikasyonlarında katalizöre ihtiyaç duymaksızın kullanılmaktadır. Hidrofilik gruplar (-COOH, -OH vb.) içeren monomerler, hidrofobik polimer yapının yüzeyine aşılandığında hidrofilik yüzeyler oluşturulur [86].



Şekil 2.7 : Radyasyon polimerizasyonu [87].

2.2 Kompozit Polimer Malzemeler

Kompozit malzemeler genel olarak iki farklı malzemenin birleşmesi ile daha dayanıklı ve verimli yapılar elde etmek amacıyla uygulama alanlarında uygun nitelikler taşıyacak standartlarda üretilmektedir. Kompozit malzemeler alaşım değildir ve bileşenler arasında atom alışverişi bulunmamaktadır. Bileşenler kimyasal olarak birbirinden etkilenmemektedir. Kompozit malzemeler, yapıda taşıma görevi üstlenen takviye elemanlarından ve yapıyı bir arada tutmaya yarayan matris bileşenlerinden oluşmaktadır. Matris bileşen, kompozit parçaya şeklini verip takviye elemanlarını çevresel faktörlerden korurken, takviye elemanı kompozit malzemeye dayanım, rijitlik ve diğer mekanik özellikleri sağlamaktadır [88-89].

Kompozit yapılar ve polimer tabanlı kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, ısı kararlılık korozyona karşı direnç gibi özellikleri ile pek çok avantaj sağlar. Farklı mekanik özellikler elde etmek amacıyla çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirilen malzemelerden çeşitli kompozit malzeme oluşturulabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle çeşitli kullanım ve uygulama alanı imkanı sunan kompozit polimer malzemeler, pazarda geniş bir ürün yelpazesine sahip olmaktadır [89].

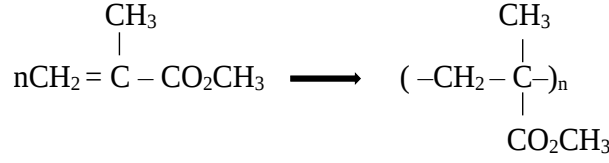
Üretim kolaylığı ve maliyetinin görece düşük olması sebebi ile endüstriyel malzeme üretiminde en çok kullanılan kompozit türleri polimer esaslı kompozitlerdir. Polimerik reçine türevlerinden oluşan matrisler, sahip oldukları bağa göre termoset veya termoplastik olabilirler. Polimer esaslı kompozit malzemeler, elle serme, püskürtme, filaman sarma, basınçlı kalıplama, enjeksiyon, vakum torbalama gibi yöntemler ile üretilmektedir [90].

2.2.1 Poli (metil metakrilat) yapının özellikleri

Poli (metil metakrilat) kısaca PMMA, termoplastik polimerler içerisinde yer alan, mor ötesi ışıklara ve çeşitli hava ve iklim koşullarına karşı gösterdiği direnç ile performans açısından diğer termoplastik malzemelerin önüne geçmektedir. Yüksek ışık geçirgenliği, yüksek yüzey sertliği ve kolay ısıl şekillendirme ve gibi özellikleri gibi avantajları bulunmaktadır.

Avantajlarının sağlamış olduğu etkinlik sebebiyle, tıbbi teknolojilerde, diş hekimliğinde protezlerde, savunma ve uzay-uçak teknolojilerinde sıklıkla kullanılmaktadır [91].

PMMA, metil metakrilat (MMA) monomerinin polimerizasyonu, Şekil 2.8, ile sentezlenmektedir. PMMA, hafif bir malzeme olmasının yanısıra camın sahip olduğu geçirgenlik değerlerine yakın değerler gösterir. $(C_5H_8O_2)_n$ şeklinde formüle edilir [92].



Şekil 2.8 : PMMA'nın metilmetakrilat monomeri ile polimerizasyonu.

2.2.1.1 Mekanik özellikler

Yüksek elastisite modülüne (Young Modülü) sahip PMMA kırılğan bir yapıya sahip olmasına rağmen mekanik özellikleri bakımından dayanıklıdır. PMMA esnemeye karşı dirençli olması yine yüksek Young modülünden kaynaklanan bir diğer mekanik özelliğidir. Ayrıca yoğunluğunun, suyun yoğunluğuna yakın olması sebebiyle hafif zırh ya da kaplama malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır [92]. Çizelge 2.1'de mekanik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1: Katkısız PMMA polimerinin mekanik özellikleri [93].

Mekanik Özellikleri	Değerler
Young Modülü	1800-3100 MPa
Gerilme Direnci	48-79 MPa
Kayma Modülü	1700 MPa
Poisson Oranı	0,34-0,4
Yoğunluk	1,18 g/cm ³

2.2.1.2 Optik özellikler

Optik özellikleri bakımından %92 gibi bir oranla yüksek ışık geçirgenliği gösteren poli(metil metakrilat) camdan daha yumuşak bir yapıya sahip olup cama göre daha kolay çizilebilir. Bu nedenle uçak camları gibi uygulamalarda doğrudan cam yerine kullanılmadan dayanıklılığı artıracak ölçülerde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. 380-400 nm aralığındaki görünür ışık ve kızılötesi ışımalarda dalga boyunun artması sebebiyle geçirgenliği bir miktar azalmaktadır [94].

2.2.1.3 Termal özellikler

Termoplastik polimerlerin ısı ile yumuşama ve şekil verebilme özelliklerine sahip olan PMMA, 95-100 °C sıcaklık aralığında deformasyona uğrarken, camsı geçiş sıcaklığı olan 110 °C civarında tamamen camsı özelliğini kaybederek vizkoz hale gelir [94]. Çizelge 2.2’de termal özellikleri yer almaktadır.

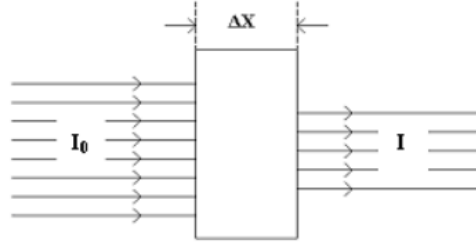
Çizelge 2.2: Katkısız PMMA polimerinin termal özellikleri [93].

Termal Özellikleri	Değerler
Yumuşama Sıcaklığı	90 °C
Termal İletkenlik	0.19 W/mK
Termal Genleşme	76 µm/mK
Camsı Geçiş Sıcaklığı	110 °C

2.2.1.4 Radyasyon zırlama özellikleri

Morötesi (UV) ışınlar karşı koruyuculuk özelliğinden sıklıkla söz ettiren PMMA’nın, ultraviyole ışınlar maruz bırakıldığında optik ve mekanik özelliklerinde bir miktar değişiklik gözlemlenir. Buna karşılık, yüksek enerjili radyasyona maruz kalan PMMA’nın moleküler yapısında farklılaşma ve zincir yapılarında bozulmalar başlamaktadır. Gama veya X-ışınlarının PMMA’nın iç yapısında bozulmalara sebep olmasının asıl sebebi PMMA’nın serbest radikal polimerizasyon yöntemi ile sentezlenmesidir. Gama ışınları ve nötron parçacıklarına karşı direnci zayıf olan PMMA’nın radyasyon zırlama amacıyla kullanılabilmesi için farklı türde takviyeler eklenerek kompozit polimer malzemeler elde edilmektedir [94].

Polimerik malzemeler dahil tüm malzemelerin radyasyon zırlama özelliklerinin bir ölçüsü olan lineer (doğrusal) zayıflatma katsayısı (μ), soğurucu malzemeye özel bir sabittir. Şekil 2.9’da yer alan I_0 radyasyon demetinin herhangi bir soğurucuyla karşılaşmamış şiddetinin yoğunluğunu temsil ederken, ΔX soğurucu malzeme kalınlığını ve I soğurucu malzemeden çıkan radyasyon şiddeti yoğunluğunu temsil etmektedir [95].



Şekil 2.9 : Radyasyon soğurucu levha.

Şekil 2.9'dan yola çıkılarak, I_0 şiddetinde bir radyasyon (gama ve beta) ΔX kalınlığındaki bir soğurucuda ΔI kadar azalırsa denklem 2.1'de yer alan ifade elde edilir;

$$\Delta I = -\mu I_0 \Delta X \quad (2.1)$$

Denklemin integrali alınırsa denklem 2.2 elde edilir.

$$I = I_0 \exp(-\mu \Delta x) \quad (2.2)$$

Lineer zayıflatma katsayısı, soğurucu malzemenin yoğunluğuna bölünerek, kütle zayıflatma katsayısı olan (μ_m) (denklem 2.3) elde edilir.

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2.3)$$

Gelen radyasyon şiddeti yoğunluğu ile ilgili diğer terimler onuncu levha kalınlığı ile yarı levha kalınlığıdır. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere onuncu levha kalınlığı (TVL), gelen radyasyon şiddetini onda birine düşürürken; yarı levha kalınlığı (HVL) gelen radyasyon şiddetini yarisına düşürmektedir. Denklem 2.4 ve denklem 2.5, denklem 2.2'den elde edilmiştir.

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.4)$$

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (2.5)$$

Nötronlarda ise lineer zayıflatma katsayısı yerine total makroskopik tesir kesiti (Σ_T) kullanılmaktadır. Makroskopik tesir kesiti, malzemenin hacminde yer alan tüm çekirdeklerin etkin alanını temsil etmektedir ve birimi (cm^{-1})'dir. Esasında hareket eden nötronların santimetre başına nötron-çekirdek etkileşim olasılığıdır.

Şekil 2.9'da yer alan radyasyon soğurucu malzemenin radyasyon geçirgenliği nötron parçacıkları için değerlendirildiğinde denklem 2.6 elde edilir.

$$\Delta I = -\Sigma_T I_0 \Delta X \quad (2.6)$$

Denklemin integrali alındığında ise denklem 2.7 elde edilir.

$$I = I_0 \exp(-\Sigma_T \Delta x) \quad (2.7)$$

Buradan yapılan hesaplamalar ile makroskopik tesir kesiti bulunmaktadır.

2.3 Sodyum Metaborat Dekahidrat Özellikleri

Sodyum Metaborat Dekahidrat, endüstride Tinkal veya Boraks Dekahidrat olarak da bilinen ve ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak formülüne edilen tetraborik asidin sodyum tuzudur ve sudaki çözeltisi bazik reaksiyon gösterir. Genel olarak kimya sanayiinde deterjan gibi temizlik malzemelerinde kullanılan Boraks, polimer malzemeler, nanoteknolojiler, nükleer uygulamalar, cam ürünleri, seramik, otomotiv ve enerji sektörü gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır [92].

Doğada tinkal olarak bulunan ve piyasa adı boraks olan Sodyum Metaborat Dekahidrat 50°C 'de ısıtıldığında boraks pentahidratı dönüşürken Boraks pentahidrat 160 ila 170°C arasında boraks dihidrata dönüşür, 190 ila 299°C 'de boraks monohidrata ve 400 ila 500°C 'de ise susuz boraksa dönüşmektedir. Çizelge 2.3'te boraks mineralinin özellikleri yer almaktadır.

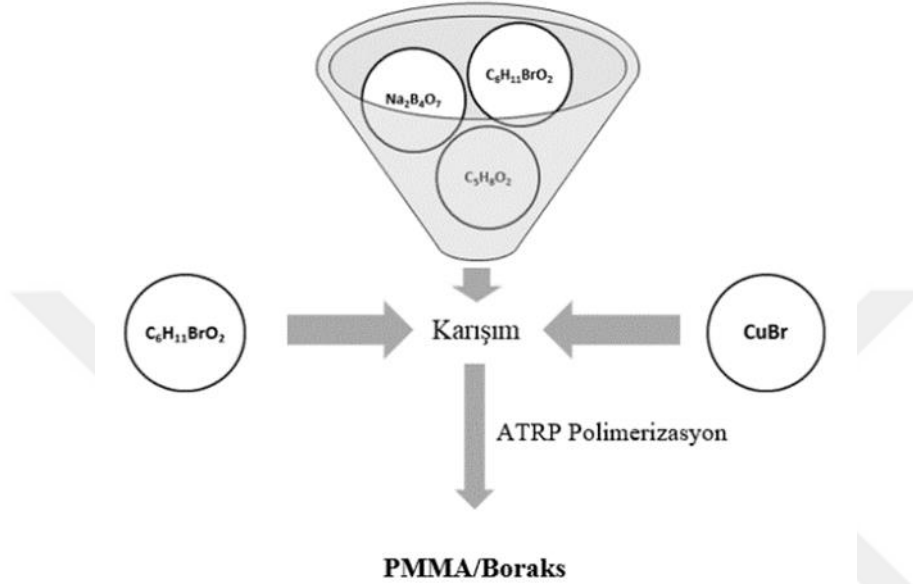
Çizelge 2.3: Boraks mineralinin özellikleri.

Boraks Minerali	Değerler
Kimyasal formülü	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Özgül ağırlık	1,715
Sertlik	2-2,5
Kristal yapısı	Kısa prizma

2.4 PMMA/Boraks Kompoziti Sentezi ve Özellikleri

Poli(metil metakrilat) polimerinin içerisinde Boraks takviyesiyle elde edilen PMMA/Boraks kompozit polimerinin yüzey sertliği artmaktadır. Ayrıca uzay ve uçak teknolojilerinde gereken düşük ve yüksek sıcaklığa dayanım, gama, beta parçacıkları, nötron ve X-ışınlarına karşı radyasyon dayanımı özellikleri ile kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliği arttırılmaktadır. PMMA/Boraks kompozit polimeri Atom Transfer Radikal Polimerizasyon (ATRP) tekniği ile sentezlenmiş olup, ATRP yöntemi, bir zincir büyütme polimerizasyon tekniğidir. ATRP yöntemi ile polimer sentezleme işlemlerinde monomer, katalizör, başlatıcı, çözücü ve uygun sıcaklık gibi bileşenlerin bir araya getirilmesi gerekmektedir. PMMA/Boraks kompozit polimeri

ATRP yöntemi ile sentezlenmesi sürecinde katkı maddesi olarak Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), monomer olaran Metil Metakrilat ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) ve çözücü malzeme olarak Bromür (Bu_4NBr) bir arada buluşturularak karışım elde edilmiştir. Katalizör olarak Bakır Bromür (CuBr), başlatıcı olarak Etil 2-bromoizobütirat ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{BrO}_2$) kullanılmıştır. PMMA/Boraks kompozitini polimerizasyon şeması Şekil 2.10 'da verilmiştir [96].



Şekil 2.10 : PMMA/Boraks kompozitinin polimerizasyon şeması.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deney Düzeneği

Deney düzeneği, ölçüm sistemlerini kapsayan genel bir tanımlamayı belirtmekle birlikte her ölçüm yöntemi ve sistemine göre değişmektedir. Düzenek, ölçümün yapılacağı malzemeye özel farklılıklar gösterebilir. Örneğin; sıcaklık ölçmek için termometre, basınç ölçmek için barometre kullanılması gerekir. Amacına uygun ölçme/deney düzeneği ile test edilen malzeme ve elde edilen sonuçlar arasındaki neden-sonuç ilişkisini kurmak ve anlamlı değerlendirme yapmak amaçlanır.

Bu çalışma kapsamında da tıpkı örnekte belirtildiği gibi farklı radyasyon türüne karşılık gelen 3 farklı deney düzeneği hazırlanmıştır. Kullanılan radyoaktif kaynakların aktivitesi yaklaşık olarak denklem 3.1’de verilen aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (3.1)$$

Yapılan bu deneysel çalışmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi Radyasyon Uygulamaları Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiş olup, kullanılan radyoaktifler için, radyoaktif izin formu doldurulmuştur. Kişisel dozimetre kullanılarak çalışma ortamında alınan doz miktarı kayda alınmış olup, güvenli sınırlar içerisinde kalmıldığı kanıtlanmıştır.

3.1.1 Gama transmisyon yöntemi

Gama transmisyon yönteminde, gama fotonlarını oluşturma için öncelikli olarak bir gama kaynağına ihtiyaç bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, nükleer araştırma ve deneysel çalışmalarda sıklıkla kullanılmakta olan Cs-137 ve Co-60 radyoizotopları, bu tez çalışmasında da kullanılmıştır. Kullanılan kaynaklardan;

- Cs-137 gama kaynağının yarı ömrü 30 yıl olup ölçümlerin alındığı tarihteki aktivitesi 0.025 µCi olarak belirlenmiştir.

- Co-60 gama kaynağının yarı ömrü 5,271 yıl olup ölçümlerin alındığı tarihteki aktivitesi 0.003167 mCi olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.1’de görülen Canberra marka Ortec Digibase 14 pinli bir fotoçoğaltıcı tüp tabanıdır ve sintilasyon dedektörleri ile gama spektroskopisinde kullanılmaktadır [97].



Şekil 3.1 : Fotoçoğaltıcı tüp tabanı.

Gama fotonlarını belirli bir doğrultuda hedef dedektöre ulaşmasını sağlamak amacıyla kolimatör kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de, kaynağın ve çevre korunmasının olmadığı deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Gama transmisyon deney düzeneği.

Uygulama esnasında ve çalışmaların yürütüldüğü laboratuvar ortamında gerekli önlem ve korunma yöntemlerinin alınması amacıyla deney düzeneği kurşun bloklarla çevrelenmiştir. Şekil 3.3’te görüldüğü üzere güvenli bir çalışma ortamı oluşturularak hem insan sağlığı açısından hem de laboratuvar içerisinde yer alan diğer elektronik aletler açısından korunaklı bir alan oluşturulması amaçlanmıştır.



Şekil 3.3 : Gama radyasyonun korunma.

Gama transmisyon yönteminde deney düzeneğinin yanı sıra düzenekte kullanılan ekipmanların çalışma prensipleri de önem arz etmektedir. Bu çalışmada kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektöründen geçen fotonların, ön yükseltici, yüksek voltaj, güçlü dijital sinyal işleme gibi özellikleri bir arada bulunduran ve tüm bunları gama spektroskopisini görselleşebileceği bilgisayar ve yazılımı içeren bir dedeksiyon ekipmanı ile sayımı gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Beta transmisyon yöntemi

Beta transmisyon yönteminde sayım sonuçları alabilmek için öncelikli olarak beta kaynağının (Sr-90) tek başına bir beta sayımı vermediğini bilmek gerekir (anti nötrino ve gamalar). Bu nedenle beta ve gamaların önce birlikte sayıldığı sonrasında ise aynı yöntemle yalnızca gamaların sayıldığı bir dedeksiyon sistemi kurulmuştur. Kurulan düzeneğe gama transmisyonunda olduğu gibi kurşun bloklar ile etrafı çevrelenerek güvenli hale getirilmiştir. Şekil 3.4’te deney düzeneği bulunmaktadır.



Şekil 3.4 : Beta transmisyon deney düzeneği.

Beta transmisyon yönteminde kullanılan Sr-90 radyoizotopunun yarı ömrü 28.8 yıl olup ölçümlerin yapıldığı tarihteki aktivitesi 0.071 μCi olarak belirlenmiştir. Bremsstrahlung radyasyonunu (X-ray) en aza indirmek için kolimatör içerisinde beta kaynağını yükseltmek ve dedektöre gelen beta parçacığı sayısını artırmak için plastik malzeme kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere beta parçacıkları elektriksel olarak aktif olduklarından manyetik alandan daha cabuk etkilenmekte ve enerjilerini hızla kaybetmektedirler. Bu da onların menzillerinin kısa olmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3.5'te görülen Polimaster marka PM1045 Model ölçüm aletinin arka kapağı açıkken beta ve gama radyasyonunun aynı anda ölçülmesini sağlarken, kapağı kapalıyken yalnızca gamaların ölçülmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.5 : Beta transmisyon ölçüm örneği.

3.1.3 Nötron transmisyon yöntemi

Nötronları tek yönde yayan, Pu-Be içeren Nötron Howitzer (NH_3) nötron kaynağı (α, n) olarak kullanılmıştır. Kolimatör, dedektör ve nötron zırhlama ekipmanları deney düzeneğinin ayrılmaz bir parçası olarak kullanılmıştır.

Pu-Be kaynağı, 5 Ci aktiviteye sahip olup ortalama 5 MeV nötron enerjisine sahiptir [98]. Nötron Howitzer'in nötron akısı 10^6 n/cm^3 'dir. Bağlantı noktasından çok az miktarda hızlı ve epitermal nötron alınıp termalize edilmiştir ve NH_3 parafin mumu içerisindeki hidrojen ve karbon içerikleri tarafından soğurulmuştur. Numuneler 0,025 eV enerjili termal yavaş nötronlar ile incelenmiştir.

Şekil 3.6 ve şekil 3.7'de Nötron Howitzer ve kullanılan deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 3.6 : Nötron Howitzer



Şekil 3.7 : Nötron Howitzer deney düzeneği.

3.2 Kullanılan PMMA ve PMMA/Boraks Örnekleri

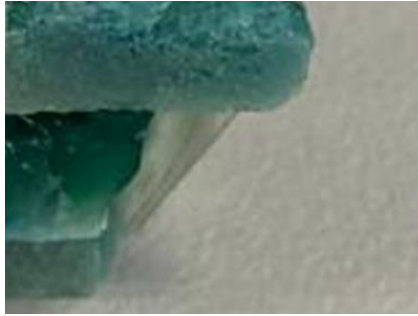
ATRP yöntemiyle sentezlenen PMMA ve PMMA/Boraks kompozit polimerlerinin bu çalışma esnasında kullanılan örnekleri Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10, ve Şekil 3.11'deki gibidir. Şekillerde yer alan PMMA ve PMMA/Boraks polimerik numunelerin İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde yer alan daha önceki çalışmalar esnasında üretimleri yapılmıştır [92].



Şekil 3.8 : Katkısız PMMA (base mat.) örnekleri.



Şekil 3.9 : %2,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.



Şekil 3.10 : %5,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.



Şekil 3.11 : %7,5 katkılı PMMA/Boraks örnekleri.

4. BULGULAR

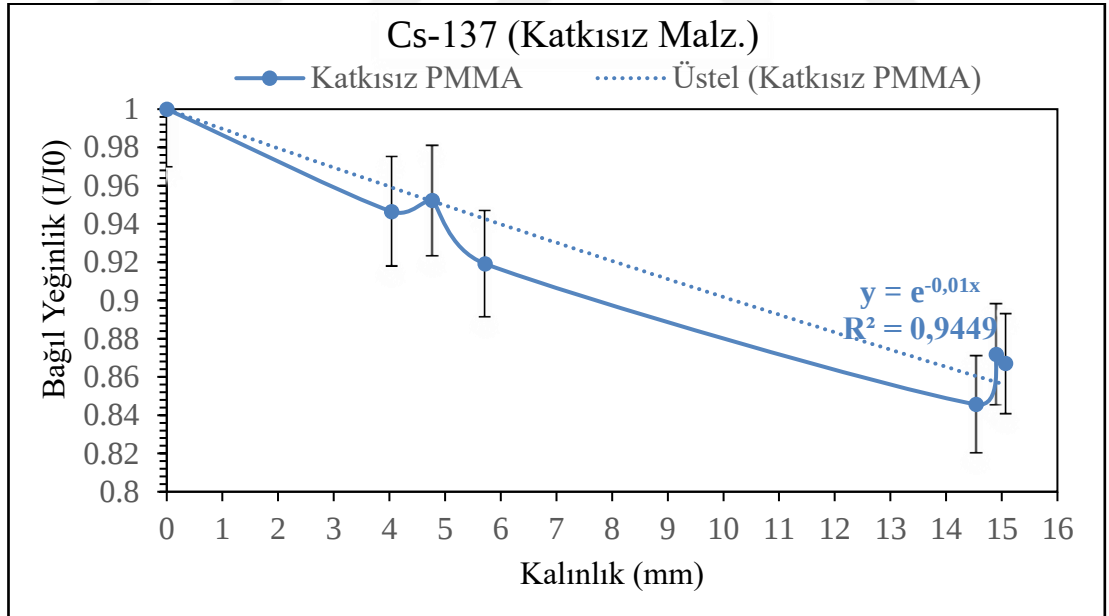
4.1 Gama Transmisyon Ölçümleri

4.1.1 Cs-137 Radyoizotopu bulguları

Cs-137 gama kaynağı kullanılarak yapılan ölçümler neticesinde elde edilen verilerin karşılaştırmalı tablo ve grafikleri aşağıda şekil 4.1 ve çizelge 4.1 ile şekil 4.2 ve çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.1.1.1 Katkısız PMMA örneklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.1’de yer alan grafikteki katkısız PMMA örneğinin çizelgesini incelediğimizde karşımıza çıkan beklenmedik artışlar, örnek malzemenin şekil ve iç kristal yapısındaki homojen olmayan yapısından kaynaklanan gama fotonlarının saçılma göstermesiyle açıklanmaktadır.



Şekil 4.1 : Cs-137 gama kaynağının katkısız PMMA örnekleri üzerindeki yeğİnliğı.

Şekil 3.8’den de görüleceğı üzere katkısız PMMA örnekleri üzerinde gözle görülen şekil hasarları ve ışık altında tespit edilebilen iç hasarları, gama radyasyonunun saçılmasına sebep olmaktadır. Çizelge 4.1’de yer alan sayım sonuçları birimi

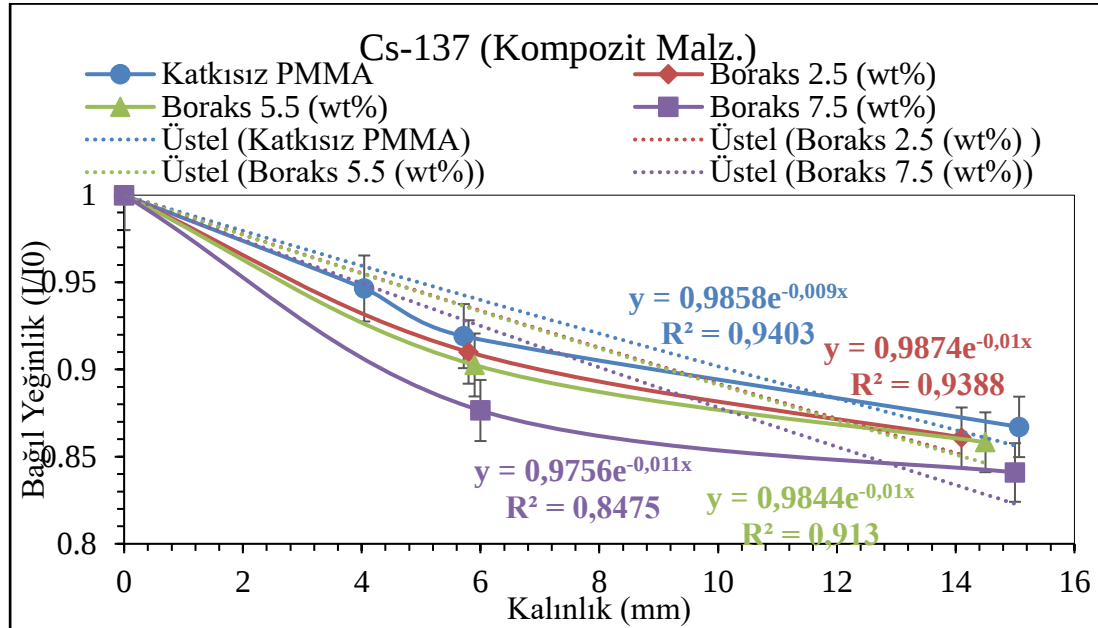
sayım/saniye (count/sec) olup, bağıl yeğirlik herhangi bir numunenin olmadığı (kalınlık = 0 mm) durumda 1 kabul edilerek grafiğı çizdirilmiştir. (Şekil 4.1, 4.2, 4.3 4.4, 4.5 ve 4.6.)

Çizelge 4.1 : Katkısız PMMA örneklerinin Cs-137 kaynağı ölçümleri.

KALINLIK (mm)	SAYIM 1	SAYIM 2	SAYIM 3	SAYIM 4	SAYIM 5	Art. Ortalama	Std. Sapma
0,00	268119	268300	268772	268250	268025	268293,20	258,24
4,04	253833	253810	253868	253411	253906	253765,60	180,25
4,77	254556	255257	255434	256163	255091	255300,20	521,88
5,72	246768	246138	247480	245684	246119	246437,80	625,29
14,54	226917	226274	226835	226431	227208	226733,00	338,16
14,9	234036	233212	233058	233695	234745	233749,20	607,15
15,07	232098	233534	232175	232329	232249	232477,00	534,04

4.1.1.2 PMMA/Boraks kompozit polimerinin karşılaştırılması

Şekil 4.2’de yer alan grafikten de görüleceğı üzere, %7.5 katkısı bulunan PMMA/Boraks kompozitinin katkısız ve/veya daha az katkılı örneklerle göre daha iyi zırlama sağladığı ve foton yoğunluğunun kalınlıkla birlikte azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.2 : PMMA/Boraks kompozitlerinin Cs-137 kaynağı karşısındaki yeğirliklerinin karşılaştırılması.

Buradan yola çıkarak PMMA/Boraks kompozit numunelerinin Cs-137 radyoizotopu karşısında radyasyon tutuculuk özelliği gösterdiğini ve bu çalışmanın amacına uygun bir kaplama malzemesi olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

Çizelge 4.2’de katkı miktarları değiştirilerek elde edilen sayım sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : PMMA/Boraks kompoziti ve katkısız PMMA polimerinin karşılaştırılması.

Katkı Oranı (%)	SAYIM 1	SAYIM 2	SAYIM 3	SAYIM 4	SAYIM 5	Art. Ortalama	Std. Sapma
0.0	268119	268300	268772	268250	268025	268293,20	235,74
2.5	231265	230576	230440	230300	229982	230512,60	387,76
5,5	230288	230168	230557	230652	231103	230553,60	297,42
7.5	202275	201703	201648	202165	201956	201949,40	225,13

4.1.1.3 Cs-137 ile HVL ve TVL değerlendirme

Cs-137 fotonları karşısında karşılaştırma yapılabilecek en uygun kalınlık 6 mm civarı olarak kabul edilmiştir ve Çizelge 4.3’te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 : 6 mm kalınlığından yarı levha ve onuncu levha kalınlığının tespiti.

Katkı (%)	Kalınlık (mm)	Bağıl yeğinlik (I/I ₀)	Hesaplanan μ	HVL (mm)	TVL (mm)
0,0	5,72	0,92	0,0149	46,66	155,00
2,5	5,8	0,91	0,0163	42,65	141,68
5,5	5,9	0,90	0,0174	39,90	132,55
7,5	6,0	0,88	0,0220	31,54	104,79

Denklem 4.1’den (Denklem 2.2’den elde edilmiştir.) yola çıkılarak önce μ değeri hesaplanır. Hesaplanan μ değeri daha önceki bölümlerde verilen HVL ve TVL denklemlerinde (Denklem 2.4 ve Denklem 2.5) yerine koyularak yarı levha ve onuncu levha kalınlığı hesaplanarak bulunmaktadır.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x) \quad (4.1)$$

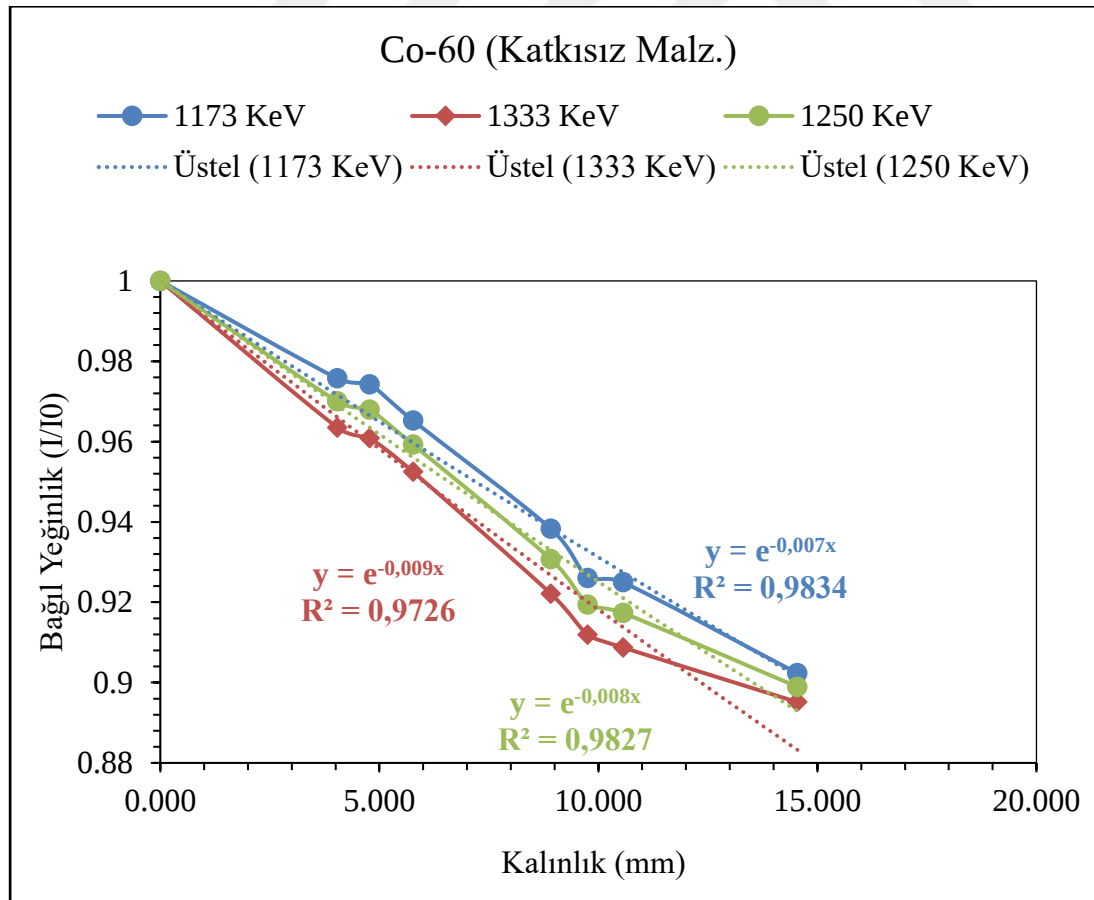
4.1.2 Co-60 Radyoizotopu bulguları

Co-60 radyoizotopu, iki ayrı enerjili fotonlar yayan bir gama kaynağı olup, 1173 KeV ve 1333 KeV enerjilerinde iki ana tepe pik noktasına sahiptir ve söz konusu radyoizotopun ortalama enerji tepe pik noktası 1250 KeV olarak kabul edilmektedir [99].

Deneylerde kullanılan PMMA/Boraks kompozit numuneleri ATRP yöntemi ile sentezlenirken, katalizör olarak kullanılan CuBr, içerdiği Cu atomlarının sağladığı avantaj ile gama fotonlarına karşı tutuculuğu artırdığı tespit edilmiştir.

4.1.2.1 Katkısız PMMA örneklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.3'te görülen grafikte enerjiler kendi içine uyumlu gelseler dahi ilk bakışta akıllara şu soruyu getiriyor: “Yüksek enerjide daha çok tutuculuk mu sağlamış?” Esasında bu bir tutuculuk göstergesi olmayıp, Co-60 radyoizotopunun malzeme ile etkileşmesi esnasında ortaya çıkan az sayıda çift-oluşum elektronlarının dedektörde oluşturduğu ikinci pikten kaynaklanmaktadır.

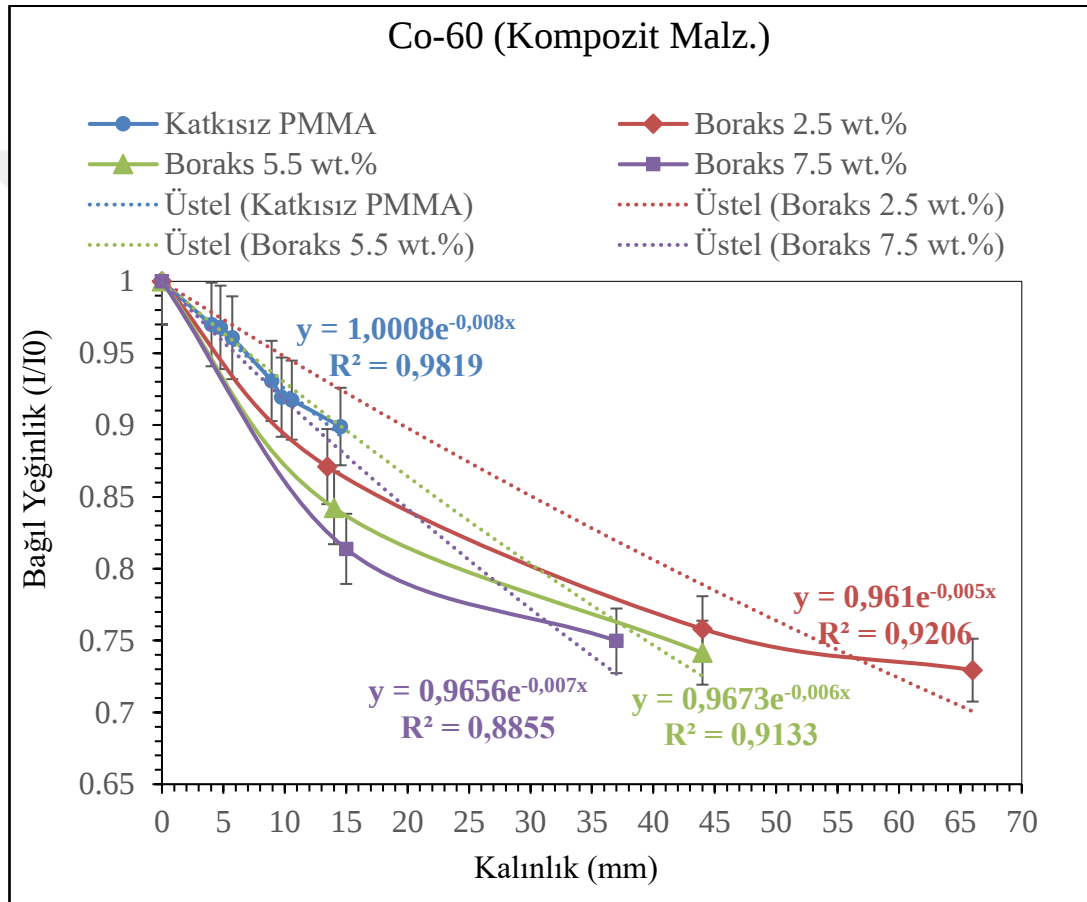


Şekil 4.3 : Co-60 gama kaynağının katkısız PMMA polimerleri üzerindeki yeğİnliğı.

Dolayısıyla bundan sonraki karşılaştırma grafiği de Co-60 kaynağı monoenerjetik kabul edilerek, 1250 KeV enerji piki dikkate alınarak gerçekleştirilecektir.

4.1.2.2 PMMA/Boraks kompozitleri ile katkısız PMMA karşılaştırılması

Şekil 4.4'te yer alan Co-60 monoenerjetik radyasyon kaynağının farklı kalınlık ve artan katkı oranları ile soğurucu malzemenin bağıl yeğİnliğinin karşılaştırılmasının yapıldığı grafik, %7,5 katkı oranı ile PMMA/Boraks kompozitinin diğerlerine göre daha iyi bir zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 4.4 : PMMA/Boraks kompozitlerinin Co-60 kaynağı karşısındaki yeğİnliklerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.4'te yer alan deney sayım sonuçlarından da tespit edildiği üzere her enerji piki kendi içinde değerlendirildiği takdirde monoenerjetik enerji ile aynı doğrultuda sonuçlar vermektedir. Buradan yola çıkılarak yapılan değerlendirme sonucunda Co-60 radyozitopu kullanılarak yapılan deneysel çalışmanın, soğurucu malzeme olan katkısız PMMA polimeri için oldukça tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Katkısız PMMA örneklerinin Co-60 radyoizotopu değerlendirme bulguları.

Kalınlık (mm)	Enerji (keV)	SAYIM 1	SAYIM 2	SAYIM 3	SAYIM 4	SAYIM 5	Art. Ortalama	Std. Sapma
0,00	1,17	331840	332200	331521	331956	331755	331854,4	224,056
	1,25	312901	312560	312850	313200	313010	312904,2	209,816
	1,33	293962	293837	294365	293713	293850	293945,4	224,143
4,04	1,17	323777	324334	323810	323256	323757	323786,8	341,379
	1,25	303771	303951	302990	303618	303219	303509,8	354,781
	1,33	283765	283568	282169	283980	282680	283232,4	691,543
4,77	1,17	323401	322182	323629	323109	324188	323301,8	662,325
	1,25	303429	302180	302525	303165	303096	302879,0	457,231
	1,33	283457	282178	281421	283221	282003	282456,0	766,935
5,72	1,17	321660	321288	323468	321838	320427	321736,2	992,994
	1,25	300843	301001	301485	299369	300413	300622,2	714,275
	1,33	280026	280713	279502	276900	280398	279507,8	1364,855
8,92	1,17	310564	311556	312345	311451	310889	311361,0	611,943
	1,25	290519	291651	291537	291050	291304	291212,1	403,352
	1,33	270474	271746	270728	270648	271719	271063,0	552,846
9,75	1,17	307875	306538	307540	306788	307723	307292,8	530,977
	1,25	287409	287541	287875	287438	288142	287681,0	283,827
	1,33	266943	268543	268209	268087	268561	268068,6	592,375
10,56	1,17	307095	307872	306239	306072	307387	306933,0	683,672
	1,25	286648	288040	286592	286851	287023	287030,5	527,131
	1,33	266200	268207	266945	267630	266658	267128,0	711,592
14,54	1,17	299838	299765	299625	299339	298562	299425,8	464,399
	1,25	281929	281644	280868	281496	280462	281279,8	536,511
	1,33	264020	263523	262111	263653	262362	263133,8	754,744

Şekil 4.4'ü incelediğimizde katkısız ve katkılı örnekleri karşılaştırmasını yapabileceğimiz en ideal kalınlığın 15 mm olduğu görülmektedir. Kullanılan örneklerin asıl üretim amacının hafif zırh malzemesi elde etmek olması sebebiyle 20-30 mm sonrasının ağır bir zırh malzemesi olarak kabul edilmesi daha ince kalınlıklarda karşılaştırma yapmanın uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tıpkı Cs-137 radyoizotopunda olduğu gibi Co-60 radyoizotopu karşısında da PMMA/Boraks kompozit numunelerinin katkı miktarı arttıkça daha iyi radyasyon tutuculuk özelliği gösterdiği görülmektedir. Çizelge 4.5'te verilen karşılaştırma bulgularına göre PMMA/Boraks kompozitinde yer alan katkı miktarlarının artışı ile %7.5 katkı miktarı ile her enerji düzeyinde en iyi sonucun elde edildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5 : PMMA/Boraks örneklerinin Co-60 radyoizotopu karşılaştırma bulguları.

Katkı (%)	ENERJİ (MeV)	SAYIM 1	SAYIM 2	SAYIM 3	SAYIM 4	SAYIM 5	Art. Ortalama	Std. Sapma
0,0	1,17	350434	351628	351203	351854	351746	351373,0	518,9
	1,25	328218	328940	328601	329419	329050	328845,3	408,4
	1,33	306001	306251	305998	306984	306354	306317,6	361,2
2,5	1,17	330632	330953	331522	331651	330859	331123,4	394,4
	1,25	309421	309843	309135	310076	309211	309536,9	364,9
	1,33	288210	288733	286747	288500	287562	287950,4	718,5
5,5	1,17	319628	320326	319857	319453	320451	319943,0	387,7
	1,25	299977	300771	300256	300126	300008	300227,1	288,9
	1,33	280325	281215	280654	280798	279564	280511,2	553,1
7,5	1,17	316546	315004	315420	316635	316756	316072,2	717,7
	1,25	295988	296327	296173	296719	296891	296419,3	337,0
	1,33	275429	277650	276925	276803	277025	276766,4	729,8

4.1.2.3 Co-60 ile HVL ve TVL değerlendirme

Co-60 ile elde edilen bulgular ve grafikler yeniden değerlendirildiğinde karşılaştırma yapmak için uygun kalınlığın 15 mm ve civarı olduğuna kanaat getirilmiştir. Çizelge 4.6’da HVL ve TVL değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 : 15 mm kalınlığından yarı levha ve onuncu levha kalınlığının tespiti.

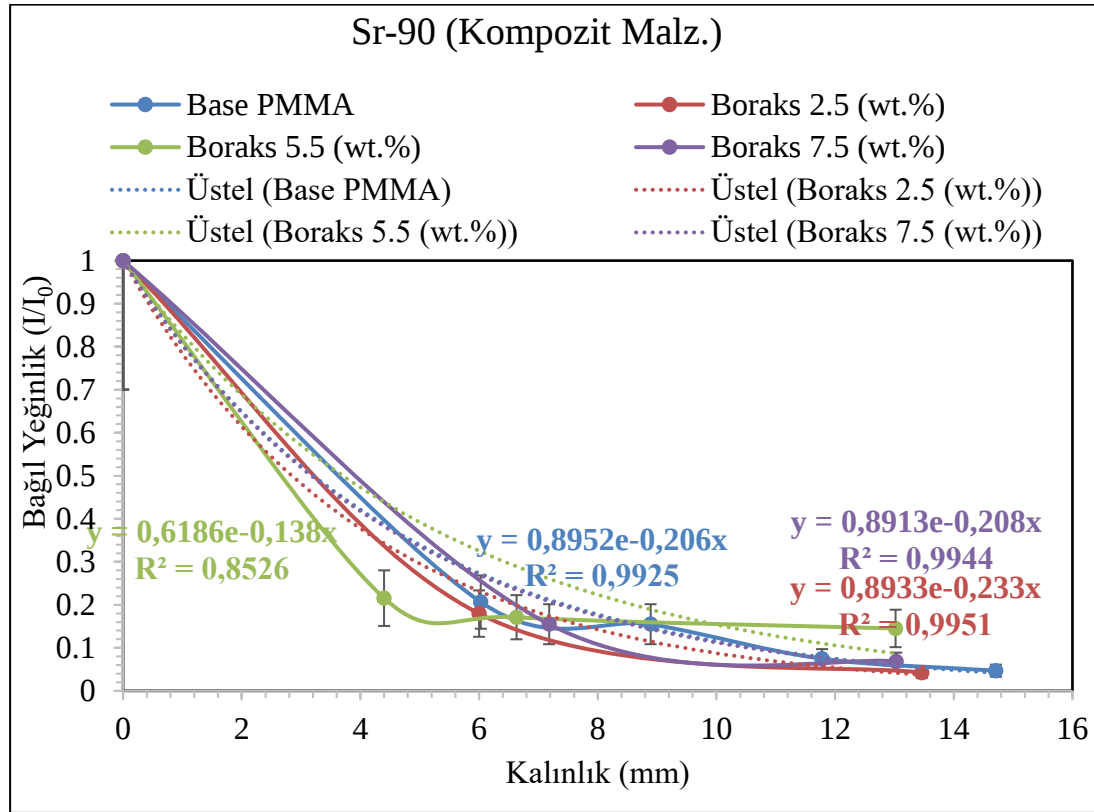
Katkı (%)	Kalınlık (mm)	Bağıl yeğlilik (I/I ₀)	Hesaplanan M	HVL (mm)	TVL (mm)
0,0	14,54	0,90	0,0073	94,95	315,42
2,5	13,46	0,87	0,0103	67,30	223,55
5,5	14,00	0,84	0,0125	55,45	184,21
7,5	15,00	0,81	0,0141	49,16	163,30

4.2 Beta Transmiyon Bulguları

Beta transmiyon tekniği genellikle kalınlık tayini gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise katkısız PMMA ve PMMA/Boraks örneklerinin beta radyasyonu tutuculuk performansı tespit edilmeye çalışılmıştır. Beta transmiyon ölçümleri için Sr-90 beta kaynağı kullanılmıştır ve yayımlanan beta parçacıklarının enerjisi 546 KeV’dir.

Şekil 4.5 incelendiğinde, polimer kompozitleri arasında beklenmedik dalgalanmalar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu dalgalanmaların sebebinin materyallerimizin şekil ve

yapısından kaynaklandığı kadar oluşan Bremss ışınları ve dedektöre ulaşmadan kaçan beta parçacıklarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.5 : Sr-90 beta kaynağının katkısız PMMA ve PMMA/Boraks kompozitlerinin yeğinliklerinin karşılaştırılması.

4.2.1 Sr-90 ile HVL ve TVL değerlendirme

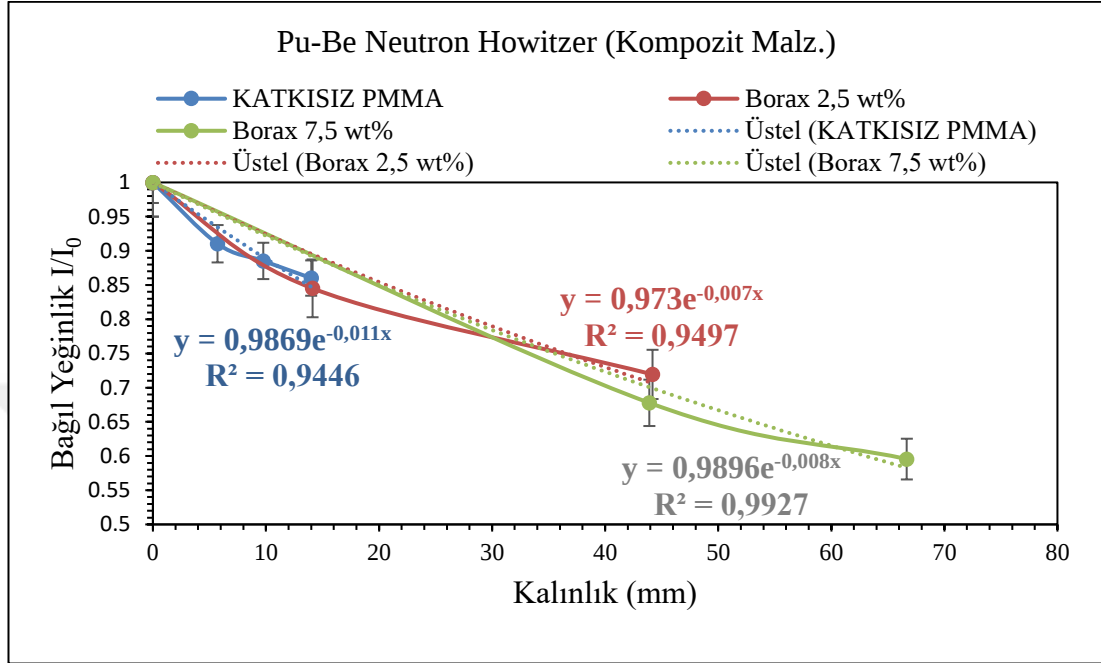
Sr-90 izotopunun karşılaştırmalı grafikleri incelendiğinde yarı levha ve onuncu levha kanlılığı için en uygun aralık 6-8 mm aralığı olarak tespit edilmiştir. Çizelge 4.7’de HVL ve TVL değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 : 6-8 mm aralığındaki kalınlıklardan yarı levha ve onuncu levha kalınlığı tespiti.

Katkı (%)	Kalınlık (mm)	Bağıl yeğinlik (I/I_0)	Hesaplanan μ	HVL (mm)	TVL (mm)
0,0	6,03	0,21	0,2588	2,68	8,90
2,5	6,00	0,18	0,2858	2,43	8,06
5,5	6,63	0,17	0,2673	2,59	8,61
7,5	7,18	0,15	0,2642	2,62	8,72

4.3 Nötron Transmisyon Bulguları

Şekil 4.6’da Pu-Be Nötron Howitzer kullanılarak gerçekleştirilen deney bulgularından elde edilen grafik yer almaktadır.



Şekil 4.6 : Pu-Be Nötron Howitzer (NH₃) ölçüm grafiği.

Nötron transmisyon yönteminde kullanılan nötron howitzerin kolimatör yapısı ile kullanılan katkısız PMMA ve PMMA/Boraks kompozit polimerlerinin birbiri ile uyumlu olmaması nedeniyle, diğer transmisyon yöntemlerinde kullanılan kalınlıklardaki örneklerin kullanılamamasından dolayı veri çeşitliliği oluşturulamamıştır. Buna rağmen elde edilen veri seti değerlendirildiğinde PMMA/Boraks kompozitinin nötron tutma performansının artan katkı miktarıyla gözle görülür derecede arttığı görülmüştür.

4.3.1 Pu-Be ile HVL ve TVL değerlendirme

Yapılan bu çalışmada sonuçlarını alabildiğimiz çok az sayıda data olması sebebiyle her katkı için en kalın ebatındaki, Denklem 4.2 kullanılarak, makroskopik tesir kesitine göre HVL ve TVL hesabı yapılmıştır ve Çizelge 4.8’de verilmiştir.

$$I = I_0 \exp(-\Sigma_T \Delta x) \quad (4.2)$$

Çizelge 4.8 : Çeşitli katkı ve kalınlıklar ile yarı levha ve onuncu levha kalınlığı tespiti.

Katkı (%)	Kalınlık (mm)	Bağıl yeğlilik (I/I_0)	Hesaplanan Σ_T	HVL (mm)	TVL (mm)
0,00	14,00	0,86	0,0108	64,18	213,20
2,50	44,19	0,72	0,0075	92,42	307,01
7,50	66,68	0,60	0,0078	88,87	295,20

4.4 Alınan Doz Eşdeğeri

Çizelge 4.9’da laboratuvarda geçirilen süreye karşılık gelen laboratuvarda kullanılan kişisel dozimetrimin vermiş olduğu sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 4.9 : Alınan doz eşdeğeri.

Ölçülen Süre (dk)	Alınan doz eşdeğeri (μSv)
75	0,17
101	0,27
129	0,32
133	0,38
136	0,40
146	0,42
171	0,51
185	0,55
221	0,60
252	0,75
255	0,72
304	0,85
314	0,88
355	0,98
440	1,23
449	1,42

Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği’ne göre radyasyon çalışanları için etkin doz ard arda 5 yılın ortalaması alındığında 20 mSv’i, herhangi bir yıl içerisinde ise toplamda 50 mSv’i geçmesi izin verilmez iken toplum üyesi kişiler için etkin doz bir yılda 1 mSv’i geçemez [100]. Yönetmelikçe belirtilen açıklamalar göre, çalışma esnasında alınan doz miliSievert mertebesine gelmediğinden çalışma ortamının yönetmeliğe uygunluğu tespit edilmiştir.

5. TARTIŞMA

Polimer esaslı kompozit malzemelerin radyasyon tutma performansı birçok araştırmaya konu olmuştur. Yapılan araştırmalar göstermektedirki; PMMA ve PMMA esaslı kompozitlerin, yapılarının geliştirilebilmeye açıklığı ve elverişli sonuçlar vermesi açısından endüstriyel anlamda birçok avantajı ile her gün gelişmekte olan malzeme bilim ve teknolojilerine daha fazla katkıda bulunması beklenmektedir.

Yine ATRP yöntemiyle sentezlenmiş olan bir PMMA esaslı PMMA/Kolemanit kompozitinin (%15, %30 ve %40 katkı) radyasyon geçirgenliği [98] ile bu çalışmada kullanılan PMMA/Boraks kompozitinin radyasyon geçirgenliği karşılaştırıldığında, gama kaynakları Cs-137 ve Co-60 için PMMA/Boraks kompozit örneklerinin daha az partikül takviyesiyle (%2,5, %5,5 ve %7,5) daha küçük yarı levha ve onuncu levha kalınlığı ile radyasyonun tutuculuğu sağladığı tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında yer alan beta ve nötron transmiyon yöntemlerinin daha gerçekçi sonuçlara yaklaşabilmesi için kullanılan kolimatörlerin ve elimizdeki örneklerin birbirleri ile uyumlu olmaları gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada yer alan sonuçlar, grafiklerinden de görüleceği üzere dalgalanmış ve/veya yeterli olmayan karşılaştırmalı bir veri seti ile değerlendirilmiştir. Ancak, tüm bunlara rağmen boraksın nötron tutuculuğu yadsınamaz bir gerçektir ve az miktarda dahi olsa PMMA ile olan kompozitinde ciddi bir nötron tutuculuğu sağlamaktadır. %7,5 katkısı Boraks katkısı neredeyse bağıl geçirgenliği 0,5 oranına yaklaştırıyor ki bu da nötronların dedektöre yalnızca yarısının ulaştığı anlamına gelmektedir.

Yapılan bu çalışma polimerin ve polimer kompozitlerinin ve bu çalışmanın kapsamı olan PMMA/Boraks kompozit polimerinin katkı miktarı arttıkça gösterdiği radyasyon tutma performansı, PMMA/Boraks kompozitinin özellikle uzak-uçak sektöründe kozmik radyasyonun etkilerinden korunmak üzere hem camsı özelliklerinden hem de kaplama malzemesi olarak kullanılmasının önünü açmıştır.

Ayrıca deneysel olarak test edilen numunelere göre, yarı levha kalınlığının oldukça düşük olması, boraksın kolemanite göre daha hafif ve kolay şekil verilebilir olması

gibi avantajları ile PMMA/Boraks kompozitinin aynı zamanda bir hafif zırhlama malzemesi olarak da kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu çalışmanın geliştirilerek, örneğin Boraks katkı miktarı artırılarak yeniden üretilmesi gibi bir durumda, tekrar aynı testler ve deneyler uygulandığında sonuçların daha kapsamlı ancak bu çalışma ile aynı doğrultuda gelmesi beklenmektedir.

Tüm bu olası senaryolar ve yapılan araştırmaların kapsamında PMMA'nın tek başına radyasyon zırhlama performansının hafif zırh malzemesi olarak kullanmaya yeterli olmadığı, ancak partikül takviyesine açık matrisi sayesinde çeşitli takviyeler ile güçlendirilerek daha efektif bir yapıya dönüştürülmesi gerektiği özellikle radyasyon zırhlama performansı açısından değerlendirilmiştir ve Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Literatür karşılaştırma.

Polimer	Yoğunluk (g/cm ³)	Gama (Cs-137) (0.662 MeV) μ (cm ⁻¹)	Gama (Co-60) (1,33 MeV) μ (cm ⁻¹)	Beta μ (cm ⁻¹)	Nötron Σ_T (cm ⁻¹)	HVL* (mm) *(Cs-137'ye göre)	TVL* (mm)
40% nano Al ₂ O ₃ katkılı Polydimethylsiloxane (PDMS) ^[101]	1.66±0.02	0,147	0,098	-	-	47,24	156,6
%50 nano-CeO ₂ katkılı Polydimethylsiloxane (PDMS) ^[102]	2,210 ± 0,008	0,195	0,125	-	-	35,54	118,1
%40 Kolemanit katkılı PMMA ^[103]	1,247	0,189	0,150	0,588	0,608	36,66	121,8
%45 nano-ZrO ₂ katkılı PMMA ^[104]	1.833±0.008	0,152	0,103	-	-	45,6	151,5
%7,5 Boraks katkılı PMMA	1,124 ^[105]	0,220	0,068	2,597	0,078	31,54	104,8

Literatürde benzer çalışmalar, her çalışmanın en yüksek katkı miktarı içeren polimerik yapısı ile karşılaştırıldığında Çizelge 5.1'de yer alan sonuçlar incelenerek, bu çalışmada kullanılan PMMA/Boraks kompozitinin hem katkı miktarının görece azlığı ve diğer polimerik yapılara göre daha yüksek radyasyon tutuculuğu sağlaması, kullanılan materyal PMMA/Boraks kompozitinin diğer polimerik yapılara göre daha üstün olduğunu kanıtlar niteliktedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ATRP yöntemi ile sentezlenmiş olan Poli(metil metakrilat) ile Sodyum Metaborat Dekahidrat (Boraks)'tan oluşan PMMA/Boraks kompozitlerinin farklı iyonizan radyasyon türlerine karşı davranışları incelenmiştir. Partikül takviyesi içermeyen PMMA ile ağırlıkça %2,5 %5,5 ve %7,5 oranlarında Boraks takviyesi içermekte olan PMMA/Boraks polimerik kompozit örnekleri karşılaştırılmıştır.

Gama, beta ve nötron transmiyon yöntemleri ile PMMA/Boraks kompozit polimerinin radyasyon zırhlama performansı karşılaştırılmış olup elde edilen sonuçlara göre PMMA'nın iyonizan radyasyonun zırhlamasına katkı sağlanmıştır. ATRP yöntemiyle sentez sırasında, katalist olarak kullanılan, CuBr'deki, Cu atomlarının kompozit yapıda bulunması, diğer polimerlere göre daha fazla gama radyasyonunu soğurma özelliği sağlamıştır. Nötronlara zırh özelliğinin geliştirilmesi amacıyla, Boraks miktarı artırılmasıyla, daha ince kalınlıklardaki kompozit yapının nötron soğurma özelliğinin geliştirildiği tespit edilmiştir ve PMMA yapıya Boraks takviyesiyle, daha hafif bir zırh malzemesi geliştirilmiştir.

Boraks takviyesiyle, yüzeylerle daha kolay uyum sağlayabilecek, daha kolay şekil alabilecek, radyasyon zırhlama özelliği geliştirilmiştir. Beta radyasyonu soğurma özelliği, optimum miktarda boraks miktarı artırılarak, PMMA yapının beta parçacıklarını zırhlama özelliğine katkı sağlanmıştır. PMMA/Boraks kompozit sentezi sırasında, homojen bir yapı oluşturulmasının, radyoaktif kaynaktan gelen gama fotonlarının, beta parçacıklarının ve nötronların yapı içinde saçılmasını minimize etmesi sonucunda daha yüksek radyasyon zırh özelliğinin gelişmesine katkı sağlanmıştır. Boraks PMMA'nın daha kolay şekil almasını sağlarken, (örneğin elektronik ekipmanları ve diğer kritik aksamı) iyonizan radyasyondan koruyabilecek bir zırh malzemesi oluşturulduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasının gelecekte yapılacak olan tüm malzeme/radyasyon ilişkisine sahip çalışmalara katkı sağlaması temenni edilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Campbell, J.** (2023). Poly(methyl methacrylate). *Salem Press Encyclopedia of Science*. Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,sso&db=ers&AN=89144949&authType=sso&custid=ns252343&lang=tr&site=eds-live&scope=site>
- [2] **Hışiroğlu Ayar, K.** (2021). Radyasyon ve Biyoinformatik Yaklaşımlar, *İvek Akademi*, Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://ivekakademi.org/blog/radyasyon-ve-biyoinformatik-yaklasimlar/#:~:text=D%C3%BCnyan%C4%B1n%20olu%C5%9Fumundan%20bu%20yana%20hem,in%20X%2D%C4%B1%C5%9F%C4%B1nlar%C4%B1yla%20beraber%20ke%C5%9Ffedilmi%C5%9Ftir>
- [3] **Radyasyon Nedir?** (t.y.). Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir>
- [4] **Turner, J. E.** (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 3rd completely rev. and enl. ed., Weinheim : Wiley-VCH, c2007
- [5] **Url-1** <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radiation/>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [6] **Islam, M. S., Pal, A., Noor, M. S., & Sazzad, I. U.** (2023). *Measurement and risk perception of non-ionizing radiation from base transceiver stations in Dhaka City of Bangladesh*. *Environmental Monitoring & Assessment*, 195(10), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11812-7>
- [7] **Url-2** <<https://www.akrad.org.tr/wp-content/uploads/2021/01/elektromanyetik-spektrum-nedir.gif>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [8] **Reeve, T.** (2018). *Ionizing Radiation: Advances in Research and Applications*. Nova Science Publishers, Inc
- [9] **Shultis, J. K., & Faw, R. E.** (2002). *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780203910351>
- [10] **Url-3** <https://radioactivity.eu.com/categories/phenomenon/radiation_effects>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [11] **Radyasyon “Radyasyon ve Biz”.** *Alfa Parçacıkları*, Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/r02.htm>
- [12] **İyonlaştırıcı Radyasyon.** (t.y.). Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://www.trkd.org.tr/yararli-bilgiler/iyonlastirici-radyasyon>
- [13] **Url-4** <<https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/images/image006.jpg>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [14] **Url-5** <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radiation/beta-radiation/>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.

- [15] **Ankara Üniversitesi, Fizik Bölümü.** (t.y.). *Nükleer Fizik Laboratuvarı*, [Power Point sunum]. Erişim: 24 Nisan, 2024, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/185246/mod_resource/content/0/Haz%C4%B1rl%C4%B1k%20Bilgileri-1.pdf
- [16] **Radyasyon “Radyasyon ve Biz”.** (t.y.). *Beta Parçacıkları*, Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/r02.htm>
- [17] **Url-6** <<https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/images/image007.jpg>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [18] **Url-7** <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radiation/ionizing-radiation/>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [19] **Ankara Üniversitesi.** (t.y.). *İyonizan Radyasyonun Madde ile Etkileşimi*. Erişim: 24 Nisan, 2024. https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Facikders.ankara.edu.tr%2Fpluginfile.php%2F168986%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F5.%2520%25C4%25B0yonizan%2520Radyasyonun%2520Madde%2520ile%2520Etkile%25C5%259Fimi.pptx&wdOrigin=BROWSELINK
- [20] **Url-8** <https://nuclear-power.com/wp-content/uploads/2015/04/Photoelectric_effect_2.jpg>, Erişim: 24 Nisan, 2024
- [21] **B. Barbiellini, A. Bansil,** (2024), Scattering techniques, Compton, Editor(s): Tapash Chakraborty, Encyclopedia of Condensed Matter Physics (Second Edition), Academic Press, Pages 173-186, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00107-4>.
- [22] **Url-9** <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/compeq.html>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [23] **Url-10** <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/pair-production/>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [24] **Url-11** <https://showme0-9071.kxcdn.com/files/186459/pictures/thumbs/724376/last_thumb1361505635.jpg>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [25] **Kessara, A.** (2021). *Nükleer Tıp Fiziği (s.5)*, Ankara Erişim: 24 Nisan, 2024, <https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/10/NUKLEER-TIP-FIZIGI.pdf>
- [26] **Url-12** <<https://www.nuclear-power.com/wp-content/uploads/2015/03/attenuation.png?ezimgfmt=ng:webp/ngcb52>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [27] **Url-13** <https://www.researchgate.net/profile/Slavica-Grdanovska/publication/309355490/figure/fig9/AS:669075910971403@1536531536819/9-Interactions-of-neutrons-with-matter-where-n-represents-a-neutron-p-represents-a_W640.jpg>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [28] **Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J.** (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*, (3rd ed.), Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- [29] **Url-14** <http://www.ncbj.edu.pl/nupex/E/without_frames/alpha_gamma_gr.png>, Erişim: 24 Nisan, 2024.

- [30] Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2002). *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780203910351>
- [31] Url-15 <https://storage.evrimagaci.org/old/content_media/46c2edcc99af0ac9327e6d9f90a70f91.jpg>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [32] Saak, M. (1998), *Polimer Kimyasına Giriş*, s. 1, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara
- [33] Young, R.J. & Lovell, P.A., (1991), *Introduction to Polymers*, 2nd Edition, United Kingdom.
- [34] **Environmentally Friendly Polymeric Blends from Renewable Sources.** (2021). MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2748-2>
- [35] Url-16 <<https://slideplayer.biz.tr/slide/6820216/21/images/3/KullanIm+alanlarI.jpg>>, Erişim: 24 Nisan, 2024.
- [36] Saçak, M. (1998), *Polimer Kimyasına Giriş*, s.2, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara.
- [37] Url-17 <<https://i0.wp.com/muhendishane.org/wp-content/uploads/2013/02/1bb08-oq31.png?resize=517%2C338>>, Erişim: 25 Nisan, 2024.
- [38] Url-18 <<https://www.researchgate.net/profile/Alina-Vashchuk/publication/326737703/figure/fig14/AS:654960110886913@1533166067755/Schematic-al-image-of-the-structure-of-thermoplastics-elastomers-and-thermosets.png>>, Erişim: 25 Nisan, 2024.
- [39] Saçak, M. (1998), *Polimer Kimyasına Giriş*, s.3, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara.
- [40] Kılınç, Ö., & Toplan, N. (2023). *Amorf Polimerler*. <https://doi.org/10.46740/alku.1299835>
- [41] Url-19 <https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgZTrwyLrnKCulkz0I36kiPzgVhIXVvx3mkx67nkKna5ERuHS_jpPz1ch96wduDOdCkrfEsVBjAJuHte3qCFSYHqR9htVxicalk4sAA_nGuTE1nXWEFRJ69xRMGctoIJSJRjmHUpXKPF0x-/s1600/yar%25C4%25B1+kristalin+2.jpg>, Erişim: 19 Mayıs, 2024.
- [42] Öztürk, E., (2008) *Farklı Kauçuk Karışımlarının Vulkanizasyonuna Hızlandırıcıların Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12619/81221/T03470.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [43] Url-20 <https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEhr7XGw-9rrffhnxXaXmtLgL6QVCMjSK2ce_etoizBqfe4ocBGKLHeH2yscTwGeZmimBgkxokF_-BEGDDayZ70OLysx9DW2mrjVbYsrWsnm87Gpc0L6SEoEhw2wT8RTaT65xG4zYPpYr1b/s1600/elastomerler.jpg>, Erişim: 25 Nisan, 2024.
- [44] Saçak, M. (1998), *Polimer Kimyasına Giriş*, s. 4, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara.

- [45] **Milli Eğitim Bakanlığı.** (2006). *Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Plastik Teknolojisi, Polimerlerin Fiziksel Özellikleri 2*, Ankara, Erişim: 25 Nisan, 2024, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerlerin%20Fiziksel%20%C3%96zellikleri%202.pdf
- [46] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, Genişletilmiş 2. Baskı, s.12, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [47] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, Genişletilmiş 2. Baskı, s. 13-14, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [48] **Fu, L.** (2021). Research Progress of Polymer Crystallization Process and Computer Simulation. 2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), 2021 Third International Conference On, 226-229. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA51532.2021.9544811>
- [49] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, Genişletilmiş 2. Baskı, s. 16, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [50] **Url-21** <https://xplic.x-mol.com/20180817/10.1021_acs.jpcc.8b03136.jpg>, Erişim: 2 Mayıs, 2024.
- [51] **Schnabel, W.** (2014). *Polymers and electromagnetic radiation : fundamentals and practical applications / by Wolfram Schnabel*. Wiley-VCH.
- [52] **Beşergil, B.** (t.y.). *Polimerler; Analiz Yöntemleri (analysis methods)*, Erişim: 2 Mayıs, 2024, https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/1_21.html
- [53] **Bunaciu, A. A., Udriştioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y.** (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. In *Critical Reviews in Analytical Chemistry* (Vol. 45, Issue 4, pp. 289–299). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- [54] **Url-22** <https://wiki.anton-paar.com/fileadmin/wiki/images/X-ray_Diffraction/Schematic-representation-of-the-Bragg-equation.jpg>, Erişim: 2 Mayıs, 2024.
- [55] **Url-23** <<https://wiki.anton-paar.com/cz-cs/rentgenova-difrakce-xrd/>>, Erişim: 2 Mayıs, 2024.
- [56] **Coffey, T., Urquhart, S. & Ade, H.** (2002). *Characterization of the effects of soft X-ray irradiation on polymers*. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 122(1), 65–78. [https://doi.org/10.1016/S0368-2048\(01\)00342-5](https://doi.org/10.1016/S0368-2048(01)00342-5)
- [57] **Schnabel, W.** (2014). *Polymers and electromagnetic radiation : fundamentals and practical applications / by Wolfram Schnabel*. Wiley-VCH.
- [58] **Saçak, M.** (1998), *Polimer Kimyasına Giriş*, s. 16, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara.

- [59] **International Atomic Energy Agency.** (1999), *Stability and stabilization of polymers under irradiation, Final report of a co-ordinated research Project (1994-1997)*, pp:41-63, IAES-TECDOC-1062, Vienna, Austria. Erişim: 5 Mayıs, 2024, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1062_prn.pdf
- [60] **Arıcioğlu, M.K., Mert, B. & Soydan, Y.** (2000), *Polimer Malzemelerin Mekanik Analiz Yöntemleri*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(1-2), 51-58. Erişim: 5 Mayıs, 2024, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/193013>
- [61] **Kılınç, Ö. & Toptan, N.** (2023), *Amorf polimerler*, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi ALKU Journal of Science, 5(3), 131-148. Erişim: 5 Mayıs, 2024, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3154391>
- [62] **International Atomic Energy Agency.** (1999), *Stability and stabilization of polymers under irradiation, Final report of a co-ordinated research Project (1994-1997)*, pp:41-63, IAES-TECDOC-1062, Vienna, Austria. Erişim: 5 Mayıs, 2024, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1062_prn.pdf
- [63] **Url-24** <https://www.materialsquare.com/wp-content/uploads/fig2-stress-strain_1631770452.png>, Erişim: 2 Mayıs, 2024.
- [64] **Young, R.J. & Lovell, P.A.,** (1991). *Introduction to Polymers, 2nd Edition*, United Kingdom.
- [65] **Mechanical properties of polymers.** (2021). Erişim: 2 Mayıs, 2024, <https://www.materialsquare.com/blog/mechanical-properties-of-polymers-en>
- [66] **Url-25** <https://www.materialsquare.com/wp-content/uploads/fig3-schematic-curve_1631770429.png>, Erişim: 2 Mayıs, 2024.
- [67] **Dubinko, V. I.** (2011). *Radiation damage and recovery of crystals: Frenkel vs. Schottky defect production*. Nova Science Publishers, Inc. Erişim: 3 Mayıs, 2024, <https://arxiv.org/abs/1406.4318>
- [68] **Url-26** <<https://www.difference.minaprem.com/wp-content/uploads/2017/11/Frenkel-Defect-Point-Defect-Defects-in-Ionic-Solid-768x370.jpg>>, Erişim: 5 Mayıs, 2024.
- [69] **Dubinko, V. I.** (2011). *Radiation damage and recovery of crystals: Frenkel vs. Schottky defect production*. Nova Science Publishers, Inc. Erişim: 3 Mayıs, 2024, <https://arxiv.org/abs/1406.4318>
- [70] **Url-27** <<https://www.difference.minaprem.com/wp-content/uploads/2017/11/Schottky-Defect-Point-Defect-Defects-in-Ionic-Solid-768x370.jpg>>, Erişim: 3 Mayıs, 2024.
- [71] **Difference between Schottky defect and Frenkel defect.** (t.y.). Erişim: 4 Mayıs, 2024, <https://www.difference.minaprem.com/materials-science/difference-between-schottky-defect-and-frenkel-defect/>
- [72] **Gezgin, M.** (2012). *Vinilen karbonat homo ve kopolimerlerinin kontrollü polimerleşme teknikleri ile elde edilmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), Erişim: 6 Mayıs, 2024, <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/f39fade1-b1ca-415a-9ae9-87c749abca2e/content>

- [73] **Milli Eğitim Bakanlığı.** (2006), *Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Plastik Teknolojisi, Polimerlerin Fiziksel Özellikleri 2*, Ankara, Erişim: 5 Mayıs, 2024, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerlerin%20Fiziksel%20%C3%96zellikleri%202.pdf
- [74] **Ankara Üniversitesi,** (t.y.). *Polimerizasyon Prosesleri.* (PowerPoint sunum 1), Erişim: 8 Mayıs, 2024, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99515/mod_resource/content/1/KYM%20445%20%20-Polimerimerizasyon%20Prosesleri%20%28Y%C4%B1%C4%9F%C4%B1n-%C3%87%C3%B6zelti%29-2018.pdf#:~:text=Dezavantajlar%C4%B1%20ise%3B&text=%C3%87%C3%B6z%C3%BCc%C3%BCye%20zincir%20aktar%C4%B1m%C4%B1%20sonucu%20molek%C3%BCl%20a%C4%9F%C4%B1rl%C4%B1%C4%9F%C4%B1nda%20%C3%B6nemli%20oranda%20d%C3%BCC%5%9Fme%20g%C3%B6zlenir.&text=%C3%87%C3%B6z%C3%BCc%C3%BCn%C3%BCn%20%C3%BCr%C3%BCnlerden%20ayr%C4%B1lmas%C4%B1%20i%C3%A7in%20yap%C4%B1lan%20i%C5%9Flemler%20maliyeti%20arttı%C4%B1rmaktadır%C4%B1r
- [75] **Ankara Üniversitesi,** (t.y.). *Polimerizasyon Prosesleri.* (PowerPoint sunum 2), Erişim: 8 Mayıs, 2024, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99516/mod_resource/content/1/KYM%20445%20%20-Polimerimerizasyon%20Prosesleri%20%28S%C3%BCspansiyon-Em%C3%BClsiyon%29-2018.pdf
- [76] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, s. 39, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [77] **Gezgin, M.** (2012). *Vinilen karbonat homo ve kopolimerlerinin kontrollü polimerleşme teknikleri ile elde edilmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), Erişim: 10 Mayıs, 2024, <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/f39fade1-b1ca-415a-9ae9-87c749abca2e/content>
- [78] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, s. 69, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [79] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, s. 79, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [80] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, s. 175, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [81] **Ankara Üniversitesi,** (t.y.). *Polimerlerin sentezi*, (PowerPoint sunum) Erişim: 10 Mayıs, 2024, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99512/mod_resource/content/1/KYM%20445%20Polimerlerin%20Sentezi%20%28Katılma%29%20-2018.pdf
- [82] **Akyüz, A.Ö.** (2003). *Suda çözünen kopolimerlerin reaktiflik oranlarının lineer ve nonlinear yöntemlerle belirlenmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, (Yüksek Lisans Tezi), Erişim: 10 Mayıs, 2024, <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/3c90c588-803b-455b-a689-d83ebc36e4d5/content>

- [83] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, sy. 231, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [84] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, sy. 269, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [85] **Baysal, B.** (1994), *Polimer Kimyası*, sy. 276, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [86] **Schnabel, W.** (2014). *Polymers and electromagnetic radiation : fundamentals and practical applications / by Wolfram Schnabel.* Wiley-VCH.
- [87] **Url-28** <<https://www.researchgate.net/profile/Khanh-Dang-Vu/publication/267153871/figure/fig15/AS:614131665223680@1523431807135/Major-modification-of-polymers-using-radiation-processing.png>>, Erişim: 18 Mayıs, 2024.
- [88] **Bartın Üniversitesi.** (t.y.). *Kompozit Malzemeler*, (PowerPoint sunum) Erişim: 17 Mayıs, 2024. <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/kompozitmalzemersunul/giris.pdf>
- [89] **Enşici, A.** (2004). *Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımı* kullanımları. Erişim: 12 Mayıs, 2024, <https://www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index.html>
- [90] **Cagar, P.** (2021). *Endüstriyel Ürünlerin Tasarımında Yaygın Yer Edinen Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri.* <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1846030>
- [91] **Ulu, Ç.** (t.y.). *Poli(metil metakrilat)(PMMA) kompozitlerinin endüstriyel uygulamaları*, Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Erişim: 10 Mayıs, 2024, https://kimya.balikesir.edu.tr/Seminerler/dokuman/201610105021CigdemUlu_1.pdf
- [92] **Gül, F. B.** (2022). *Sodyum metaborat dekahidrat (boraks) katkılı pmma polimer kompozitlerin mikrodalga özelliklerinin geliştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [93] **Url-29** <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polymethylmethacrylate-PMMA-Acrylic>>, Erişim: 15 Mayıs, 2024.
- [94] **Yiğit, Y.** (2020). *The effect of borax addition to poly(methyl methacrylate)*, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [95] **Başıyigit, C. & Kaçar, A.** (2006). *Bazı yapı malzemelerinin radyasyon tutuculuk özellikleri.* Süleyman demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10-2, 307-310. Erişim 18 Mayıs, 2024, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/193688>
- [96] **Yigit, Y., Gul, F. B., Macun, C. H., & Baydogan, N.** (2023). Optical development and density modification dependence in poly (methyl methacrylate) reinforced with borax microparticles. *Journal of Polymer Research*, 30(9). <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03746-y>
- [97] **Url-30** <<https://ergoffice.com/product/ortec-digibase>>, Erişim: 17 Mayıs, 2024.

- [98] **Mehranpour, S.** (2019). *Comparison of beta, neutron and gamma attenuation properties of PMMA/Colemanite composites*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [99] **Çakar, H.** (2016). *Gama transmisyon tekniği kullanılarak poli(metil metakrilat) malzemenin üretim aşamasında açığa çıkan gazın polimer yapıya etkisinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [100] **Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği.** (2000). **T.C. Resmî Gazete, 23999, 24 Mart 2000** Erişim: 17 Mayıs, 2024, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5272&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [101] **El-Khatib, A. M., Elesh, E., Hamada, M. S., Sabry, E. M., & Gouda, M. M.** (2024). Study Attenuation Parameters and Physical Properties of Silicone Rubber Reinforced with Nano- and Micro-Sized Aluminum Oxide Composites. *Silicon*, 16(6), 2621-2634. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02847-7>
- [102] **Almutairi, H. M., Al-Saleh, W. M., Abualsayed, M. I., & Elsafi, M.** (2023). Effect of Cerium (IV) Oxide Particle Size on Polydimethylsiloxane Polymer to Form Flexible Materials against Ionizing Radiation. *Polymers* (20734360), 15(13), 2883. <https://doi.org/10.3390/polym15132883>
- [103] **Mehranpour, S.** (2019). *Comparison of beta, neutron and gamma attenuation properties of PMMA/Colemanite composites*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [104] **Alabsy, M. T., Abbas, M. I., El-khatib, A. Y., & El-Khatib, A. M.** (2024). Attenuation properties of poly methyl methacrylate reinforced with micro/nano ZrO₂ as gamma-ray shields. *Scientific Reports*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51551-4>
- [105] **Gül, F. B.** (2022). *Sodyum metaborat dekahidrat (boraks) katkılı pmma polimer kompozitlerin mikrodalga özelliklerinin geliştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hilal MACUN ELMALI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Nükleer Enerji Mühendisliği
- **Lisans** : 2023, Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022-2024 yılları arasında Demma Demir Çelik Mamülleri Üretimi A.Ş. firmasında İş Geliştirme Uzman Yardımcısı/ERP Mühendisi olarak çalıştı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Macun Elmalı, H.**, Baydoğan, N. 2024. Evaluation Of The Usage Of Polymer Materials In Radiation Protection Against Ionizing Radiation Source. *1st International Conference on Smart Automation & Robotics for Future Industry (SMARTINDUSTRY)*, April 18-20, 2024.
- Yigit, Y., Gul, F. B., **Macun, C. H.**, & Baydogan, N. 2023. Optical development and density modification dependence in poly (methyl methacrylate) reinforced with borax microparticles. *Journal of Polymer Research*, 30(9). <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03746-y>