



İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

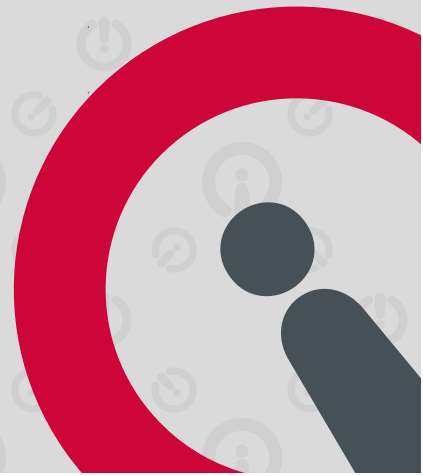
**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**FARKLI POLİETİLEN
GLİKOL (PEG-300)
KONSANTRASYONLARINA
SAHİP NÖTRON ZIRHI
MALZEMELERİN
ÜRETİMİ VE NÖTRON SOĞURMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Erhan Emre ERDOĞMUŞ

**KİMYASAL, BİYOLOJİK, RADYOLOJİK,
NÜKLEER TEHDİTLER YÖNETİMİ
ANABİLİM DALI**

TEMMUZ 2022





**FARKLI POLİETİLEN GLİKOL (PEG-300) KONSANTRASYONLARINA
SAHİP NÖTRON ZIRHI MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE NÖTRON
SOĞURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Erhan Emre ERDOĞMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KBRN TEHDİTLERİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

Erhan Emre ERDOĞMUŞ tarafından hazırlanan “FARKLI POLİETİLEN GLİKOL (PEG-300) KONSANTRASYONLARINA SAHİP NÖTRON ZIRHI MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE NÖTRON SOĞURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi KBRN Tehditleri Yönetimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman:Dr. Öğr. Üyesi Nuray KÜP AYLIKCI

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Başkan:Prof. Dr. Mehmet Lütfi YOLA

Beslenme ve Diyetetik Anabilim Dalı, Hasan Kalyoncu Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye:Dr. Öğr. Üyesi Ergin YALÇIN

KBRN Tehditleri Yönetimi Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 04/07/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Erhan Emre ERDOĞMUŞ

04/07/2022

FARKLI POLİETİLEN GLİKOL (PEG-300) KONSANTRASYONLARINA SAHİP
NÖTRON ZIRHI MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE NÖTRON SOĞURMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Erhan Emre ERDOĞMUŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

İyonlaştırıcı radyasyonun çevre ve insan yaşamı için zararlı etkileri olduğu bilinmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonun bu zararlı etkilerinden korunmak için radyasyon zırhı malzemeler en iyi seçim olabilir ve radyasyon zırhı malzemelerin kullanım amacı gelen radyasyon şiddetinin daha güvenilir seviyeye ulaştırılmasıdır. Ağır beton, çelik ve alüminyum nükleer teknolojiye kullanılan zırh malzemeleridir ve zamanla oluşan mikro-çatlaklar, korozyon ve düşük termal dayanım gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Özellikle, yaygın olarak kullanılan zırh malzemeleri yüksek maliyet ve toksik etkilerinden dolayı uygun değildir. Son yıllarda, nötron soğurucu malzeme olarak yeni nesil polimer kompozit malzemeler üstün mekanik ve termal özelliklerinden dolayı dikkat çekmektedir. Bu çalışmada ilk olarak nötron etkileşimlerinin karmaşıklığından dolayı, farklı PEG-300 konsantrasyonlarına sahip poliüretan köpüklerin nötron soğurma özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Polietilen glikol, nötron soğurma, polimer kompozitler

Sayfa Adedi : 65

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nuray KÜP AYLIKCI

PRODUCTION OF NEUTRON SHIELDING MATERIALS WITH DIFFERENT
POLYETHYLENE GLYCOL (PEG-300) CONCENTRATIONS AND INVESTIGATION OF
THE NEUTRON ABSORPTION PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Erhan Emre ERDOĞMUŞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

July 2022

ABSTRACT

It is generally known that the ionizing radiation has a harmful effect on human-being and environmental life. To avoid from the harmful effects of ionizing radiation, the radiation shielding materials may be the best choice and the aim of the radiation shielding materials is to attenuate the radiation flux to a safety level. In nuclear technology, the shielding materials are heavy concrete, steel and aluminum and these have some disadvantages stated as micro-cracks, corrosion and lower thermal resistance. Especially, commonly radiation shielding materials are inconvenient due to its high cost and toxic property. In recent years, novel type of polymer composites gains more attention as a neutron absorber material owing to its superior mechanical and thermal properties. In this study, the neutron absorption capability of polyurethane foams with different PEG-300 concentrations were investigated at first due to the complexity of neutron interactions.

Key Words : Polyethylene glycol, neutron absorption, polymer composites

Page Number : 65

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nuray KÜP AYLIKCI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada emeklerini ve zamanını üzerimde harcamaktan imtina etmeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Nuray KÜP AYLIKCI'ya, KBRN yüksek lisans programı kapsamında aldığım derslerle bilgi dağarcığımı artıran, başta Doç. Dr. Volkan AYLIKCI olmak üzere diğer tüm ders hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bugüne kadar eğitim konusunda hep arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, annem Zeliha ERDOĞMUŞ'a ve babam Mehmet ERDOĞMUŞ'a; ayrıca her zaman her hususta desteğim olan kardeşim Gamze ERDOĞMUŞ ARSLANHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez İskenderun Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2020YP-04 kodlu proje ile desteklenmiştir.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2.GENEL BİLGİLER	8
2.1.Radyasyon Kaynakları	8
2.1.1. Hızlı elektron kaynakları.....	9
2.1.2. Ağır yüklü parçacıklar	11
2.1.3. Elektromanyetik radyasyon kaynakları.....	12
2.1.4. Nötron kaynakları	14
2.2.Radyasyon Etkileşimleri	15
2.2.1. Ağır yüklü parçacıkların etkileşimleri	16
2.2.2. Hızlı elektronların etkileşimleri	19
2.2.3. Gama ışınlarının etkileşimleri.....	20
2.2.4. Nötronların etkileşimleri	24
2.2.5. Maruz kalınan radyasyon dozu	26
2.3.Nötron ve Gama Radyasyondan Korunma Yöntemleri	27
2.3.1. Korunma malzemeleri.....	27

	Sayfa
2.3.2. Nötron zırlama	29
2.4. Poliüretan Köpükler	30
2.4.1. Esnek poliüretan köpükler	30
2.4.2. Sert poliüretan köpükler	32
2.5. Polimer Köpüklerin Yapısal Özellikleri	33
2.6. Polimerik Köpük Üretimi ve Köpük Oluşum Süreci	34
2.6.1. Hücre oluşumu	38
2.7. Köpürtme Yöntemleri	38
3. YÖNTEM	42
3.1. Poliüretan Köpük Malzemelerin Üretimi	42
3.2. Poliüretan Köpüklerin Nötron Geçirgenlik Deneyleri	42
4. BULGULAR VE YORUM	44
4.1. Nötron Geçirgenlik Deneylerinden Elde Edilen Veriler	44
4.2. SEM Görüntülerinden Elde Edilen Veriler	48
4.3. Basma Testlerinden Elde Edilen Veriler	50
4.4. FTIR Sonuçları	52
4.5. TGA Sonuçları	53
5. TARTIŞMA	58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	60

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Nötron kaynakları	15
Çizelge 2.1. Enerjilerine göre nötronlar.....	25
Çizelge 3.1. Poliüretan köpüklerin içerik değerleri (pphr)	42
Çizelge 4.1. Poliüretan köpük malzemesinin karakteristik FTIR soğurma gurupları	53



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Nükleer kararlılık eğrisi	9
Şekil 2.2. ²³⁸ Pu'in bozunumundan üretilen alfa parçacıkları	11
Şekil 2.3. Nükleer zincir reaksiyonu	14
Şekil 2.4. Radyasyonun sınıflandırılması	16
Şekil 2.5. 121 MeV proton enerjisinin suyun içindeki derinliğe bağlı doz dağılımı	18
Şekil 2.6. Polietilen içinde alfa parçacıklarının durdurma gücünün enerjiye bağlı değişimi	19
Şekil 2.7. Fotoelektrik olay	21
Şekil 2.8. Compton etkileşme mekanizması	22
Şekil 2.9. Saçılan foton enerjilerinin saçılma açısına bağlı değişimi	23
Şekil 2.10. Çift oluşum mekanizması	24
Şekil 2.11. Nötron-çekirdek etkileşim mekanizmaları	25
Şekil 2.12. Polimer köpüklerde farklı gözenek türleri	34
Şekil 2.13. Kabartıcı (köpürtücü) ajanların sınıflandırılması	36
Şekil 2.14. Köpük oluşum sürecinin şematik gösterimi	37
Şekil 2.15. Mekanik köpürtme işleminin şematik gösterimi	39
Şekil 2.16. Fiziksel köpürtme işleminin şematik diyagramı	40
Şekil 2.17. Kimyasal köpürtme sürecinin şematik diyagramı	41
Şekil 4.1. Farklı köpük kalınlıklarına göre termal nötron geçirgenlik değerleri	45
Şekil 4.2. Köpüklerin termal nötronlar için toplam makroskopik kütle kesit değerleri .	46
Şekil 4.3. Köpüklerin HVL, TVL ve MFP değerleri	47
Şekil 4.4. Köpüklerin radyasyondan korunma verim değerleri	47
Şekil 4.5. Poliüretan köpüklerin yer değiştirme-kuvvet grafiği	51
Şekil 4.6. K5 poliüretan köpüğüne ait FTIR spektrumu	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7 K1 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi	54
Şekil 4.8. K2 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi	54
Şekil 4.9. K3 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi	55
Şekil 4.10. K4 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi	55
Şekil 4.11. K5 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi	56



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. K1 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü	48
Resim 4.2. K2 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü	49
Resim 4.3. K3 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü	49
Resim 4.4. K4 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü	50
Resim 4.5. K5 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü	50



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m	Metre
Ci	Curie
eV	Elektronvolt
Bq	Becquerel
C	Coulomb
R	Röntgen
Gy	Grey
kg	Kilogram
Sv	Sievert
g	Gram
A_v	Avagadro sayısı
λ	Bozunma sabiti / İletkenlik
A	Kütle numarası
Z	Atom numarası
α	Alfa bozunumu
β⁻	Beta bozunumu
γ	Gama ışınması
N	Nötron/Foton sayısı
μ	Soğurma katsayısı
h	Planck sabiti
L	Lineer enerji transferi
H	Doz eşdeğeri
D	Doz
Q	Kalite faktörü
H_e	Etkin doz
I	İyonizasyon potansiyeli / Radyasyon Şiddeti/ Nötron akısı şiddeti

Kısaltmalar**Açıklamalar****PEG**

Polietilen glikol

MOX

Mixed oxide (Karışık oksit)

B₄C

Bor karbür

PbO

Kurşun monoksit

Al(OH)₃

Alüminyum hidroksit

Ra

Radyum

U

Uranyum

Pu

Plütonyum

Cf

Kaliforniyum

K

Potasyum

Am

Amerikyum

Ba

Baryum

Co

Kobalt

Cs

Sezyum

H

Hidrojen

O

Oksijen

C

Karbon

Fe

Demir

B

Bor

PUR

Poliüretan

ILD

Girinti yük sapması

TDI

Toluendiizosiyanat

VE

Viskoelastik

HVL

Yarı değer kalınlığı

TVL

Onda bir değer kalınlığı

MFP

Ortalama serbest yol

EA

Enerji Soğurucu

FTIR

Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi

TGA

Termogravimetrik analiz

DTA

Diferansiyel termal anal

1. GİRİŞ

Çağımızda, her geçen yıla oranla katlanarak artan elektrik ihtiyacını karşılamak için nükleer enerjiyi kullanmak zaruri hale gelmiştir. Kullanım alanlarına bakılacak olursa, nükleer enerji; sağlık, endüstri, tarım sektörlerinde, bilimsel çalışmalarda ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nükleer teknoloji, getirdiği büyük faydalar ile ortaya çıkan nükleer radyasyonun canlı dokular üzerinde yapacağı zararı önlemek için birtakım tedbirlerin alınmasını da zorunlu kılmaktadır. Radyasyondan korunmanın en önemli kuralı radyasyon seviyesini mümkün olabildiğince minimum seviyelere çekmektir. Fonksiyonel bakış açısıyla radyasyon seviyesi, uzaklık, süre ve zırhlamaya bağlı olarak değişmektedir.

Uzaklık ve süre radyasyonun biyolojik etkilerini yok etmekte tek baslarına ise yaramazlar. İnsan sağlığını koruma ve çevre kirliliğine müsaade etmeme bakımından radyasyonun (radyasyon kaynağının) çok iyi şekilde zırhlanması şarttır. Nükleer tesislerde ortaya çıkan α (alfa) ve β (beta) parçacıklarının malzeme içerisinde aldıkları yollar kısa olduğundan hesaplama yapılırken genelde ihmal edilirler. Zırh tasarlarken nötron ve γ (gama) ışınları göz önüne alınmaktadır.

İyonlaştırıcı radyasyon pek çok alanda kaçınılmaz olarak kullanılmaktadır. Özellikle nükleer teknolojinin gelişmesiyle birlikte nükleer ışınımlardan korunmak amacıyla radyasyon soğurucu malzemelerin geliştirilmesi büyük önem kazanmaktadır. Nükleer güç santrallerinin yanısıra iyonlaştırıcı radyasyon medikal uygulamalar ve endüstriyel gıda ürünlerin muhafaza edilmesi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Fakat bu zararlı ışınların canlı yaşamına olumsuz etkileri vardır. Herhangi bir canlının radyasyona maruz kaldığında gördüğü zarar, radyasyona maruz kalınan süreye ve ayrıca radyasyonun enerjisine bağlıdır. Radyasyon kaynağının bulunduğu ortamlarda güvenli çalışma koşullarının oluşturulması gerekmektedir ve bu koşulların iyileştirilmesinde radyasyon soğurucu malzemelerin önemi daha da ön plana çıkmaktadır.

X-ışınları ile gama ışınları dalga tipli iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanırken, alfa, beta ve nötron salınımı parçacık tipli iyonlaştırıcı radyasyon sınıfında yer almaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon özellikle canlı dokuların sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Geçmiş

yıllarda yaşanan nükleer kazalar ve sonrasında yaşananlar insanoğlunun, temiz enerji sağlayan nükleer enerjiye karşı olumsuz görüşlere sahip olmasına yol açmaktadır. Nükleer enerjiye karşı görüşlerin oluşmasındaki bir diğer etken ise uranyumun kullanımı neticesinde açığa çıkan atık yakıtların depolanması sürecidir. Bazı ülkeler kullanılmış atık yakıtları MOX yakıt olarak değerlendirse de, atık yakıtların geri kazanımı maliyeti artırdığından pek çok ülke tarafından tercih edilmemektedir. Açık yakıt çevrimini benimseyen ülkelerde atık yakıtlar, yeraltı nihai depolama tesislerinde depolanmaktadır. Ancak burada karşılabilecek sorun ise insanoğlu için hayati önem taşıyan yer altı sularına radyoaktif madde karışabileceği ihtimalidir. Bir diğer ihtimal ise tektonik depremlerin atık yakıtların depolandığı tesislere zarar verebilmesidir. Belirtilen tüm hususlar göz önüne alındığında mekanik ve termal dayanımı yüksek radyasyon zırhı malzemelerin geliştirilmesi ve teknolojik uygulamalarda kullanılması gerektiği düşünülmektedir.

Nükleer teknolojilerde genel olarak alüminyum, ağır beton ve çelik zırh malzemeleri kullanılmış olup, bu tür malzemeler mikro-çatlak oluşumu, düşük korozyon direnci ve düşük ısı dayanımı gibi pek çok olumsuz özelliklere sahiptir. Ayrıca, kurşun gibi pek çok radyasyon zırhı malzemelerin kullanımı, maliyetli oluşu ve toksik etkilerinden dolayı uygun görülmemektedir. Bu nedenle az maliyetli, termal ve mekanik dayanımı yüksek, insan ve çevre sağlığı için tehdit oluşturmayacak yeni nesil zırh malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Katı ve esnek polimer kompozit malzemeler hem hafif oluşu hem de çevre dostu bir malzeme oluşundan dolayı geleceğin radyasyon zırhı malzemesi olarak yaygın kullanılan eşdeğerlerine alternatif olabilir. Bilinmektedir ki nötronlar yüksüz olduklarından dolayı doğrudan atomun çekirdeği ile etkileşirler ve nötronların madde ile etkileşimi gama ışınlarının madde ile etkileşimine kıyasla daha karmaşıktır. Bu sebepten ötürü, nötronların madde ile etkileşim mekanizması göz önüne alındığında, nötron soğurucu malzeme tasarlanırken önce moderatör olarak hızlı nötronların soğurulabileceği sonrasında da oluşan termal nötronların zırhlaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Çoğunlukla düşük atom numaralı elementler moderatör malzemesi olarak kullanılmaktadır ve nötron soğurucu malzeme üretilirken moderatör işlevi görececek atomların ilavesi gerekmektedir. Sonrasında oluşan termal nötronlar ile dolgu malzemesi aracılığıyla soğurularak yeni nesil nötron soğurucu malzemeler geliştirilmesi mümkündür.

Radyasyon zırhı malzemelerin geliştirilmesi aşamasında, ne tür radyasyona karşı koruma sağlayacağı öncelikle belirlenmelidir. Çünkü elektromanyetik radyasyon sadece nükleer ışınımlardan ibaret değildir. Elektromanyetik radyasyonun soğurulmasında etkin olan mekanizma, malzemelerin radyasyon ile etkileşmesi sonucu gerçekleşen olaylardır. Etkin soğurucu özelliğinin yanı sıra zırh malzemesinin iç ve dış parametreleri de göz önüne alınarak malzeme üretimi yapılmalıdır. Soğurulacak radyasyonun enerjisi, ışınım maruz kalma süresi, alev geciktirici özelliği, düşük yanma hızı, ikincil radyasyon etkileri, nükleer ısıtma ve dayanıklılık malzemenin iç özellikleri ile ilgili iken sıcaklık, aşınma direnci ve basınç dış veya çevresel parametreler olarak tanımlanmaktadır [1-4]. Ayrıca polimer kompozit malzemelerin bir diğer avantajı ise yüksek atom numaralı elementlerin kolaylıkla katkılanabilir olmasıdır. Böylece yüksek atom numaralı elementlerin ilavesi ile nötron reaksiyonu ile açığa çıkabilecek gama ışınlarının da soğurulması mümkün olabilecektir ve geniş soğurma spektrumuna sahip bir malzeme üretilmiş olacaktır [5].

Radyasyon soğurucu bir malzeme üretilirken, malzemenin hem nötron gibi parçacık tipli hem de X veya gama ışını gibi dalga tipli iyonlaştırıcı radyasyon türlerini soğurması da göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat nötron soğurucu zırh malzemesinin üretimi gama soğurucu malzemelerin üretimine nazaran daha karmaşıktır. Çünkü nötron enerjileri gama ışınlarından ayrı olarak farklı enerji değerleri alabilir. Bu duruma örnek olarak uzay, havacılık, taşınabilir nükleer cihazların kullanıldığı alanlarda nötron zırhı olarak ağır metallere katkılanmış polimer kompozit olarak tanımlanan esnek ve hafif malzemelerin kullanımı daha uygun iken nükleer enerji ve tıbbi bakım alanlarında ağır metal katkılanmış betonlar zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat her bir zırh malzemesinin kendi içerisinde dahi bazı sınırlamaları mevcuttur. Bu duruma örnek olarak kurşun ve betonun yüksek sıcaklık koşulları için uygun olmaması ve kurşunun zehirli etkilerinden dolayı bu malzemelere eşdeğer yeni nesil radyasyon zırh malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Nötron soğurucu malzemelerin geliştirilmesinde en önemli unsur termal nötronlardan ziyade yüksek enerjili nötronların soğurulmasıdır. Yüksek enerjili nötronların soğurulup termal nötron enerjisine yavaşlatılmasında hidrojen içerikli malzemeler etkindir. Daha sonra termal nötronların soğurulmasında kullanılacak olan malzeme geliştirilmelidir ki buradan da anlaşılacağı üzere hızlı nötronların soğurulması pek kolay bir süreç değildir. Bu karmaşık sürecin sebebi hem yüksek enerjili nötron kaynağından hem de soğurucu

malzemenin çekirdeğindeki nötron etkileşmelerinden yayınlanan gama ışınlarının zırh malzemesi içinde soğurulması gerektiğindedir.

Kurşun monoksitin değişen konsantrasyonlarında ve %5 nanokil içeren doymamış polyester kompozitleri üretilmiştir ve elde edilen malzemenin sadece düşük enerjili gama radyasyonunu soğurmada elverişli olduğu rapor edilmiştir [6]. Yine bir benzer çalışma Epoxy ve kil kullanılarak oluşturulan ve ECPNCs olarak adlandırılan nano-kompozit malzemenin gama ışınlarını soğurma kabiliyeti incelenmiştir [7]. Boraks ve borik asitin üretim hammaddesi olan değişken miktarda Szaibelyite ve epoksiresin kullanılarak yeni nötron soğurucu kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Szaibelyite maddesi içeriğinde bor, oksijen, magnezyum ve silisyum barındırır. Kırık yüzeylerin mikroyapıları SEM kullanılarak, nötron soğurma özellikleri ise Am-Be nötron kaynağı kullanılarak incelenmiştir. Yapılan araştırmada nötron soğurma mekanizması, ilk önce H, O, C, Fe ve B-11 izotopu ile yavaşlatılan nötronların B-10 izotopu tarafından soğurulması süreçleri ile açıklanmıştır ve nötron soğurma özelliklerinin Szaibelyite mineralinin miktarının artmasıyla iyileştirildiği tespit edilmiştir [8]. Elastomer tabanlı ve bozunma sıcaklığı 300 dereceden büyük, makroskopik nötron tesir kesiti bor katkılı polietilene nazaran %5 oranında daha da iyileştirilmiş bir malzeme geliştirilmiştir. Polietilen ve poliamide kıyasla daha düşük oranlarda hidrojenin yapıya dâhil olması, demir ve gadolinyum, samaryum gibi yüksek nötron soğurma kapasitesine sahip elementlerin ilavesiyle istenen soğurma özelliklerine sahip malzeme geliştirilmiştir [9]. Yüksek yoğunluklu polietilenin polimer kompozitleri toz formdaki kurşun oksit nano-partikülleri ve kütle formundaki kurşun oksit kullanılarak doldurulmuş malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemeler ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs ve ^{60}Co gibi nokta kaynakların radyoaktif ışınlarına maruz bırakılmış ve gama soğurma özellikleri incelenmiştir. Yapılan araştırmalarda polimer yapının kurşunun ağırlığını azalttığı fakat dolgu malzemesi olarak kullanılan kurşun oksitlerin esas olarak radyasyon soğurucu madde olarak işlev gördüğü belirtilmiştir. Yapılan morfolojik analiz sonuçlarına göre, dolgu malzemesi olarak kullanılan kurşun oksit nanopartikül ve kütle formundaki bileşiklerin polimer matris içinde homojen dağıldığı tespit edilmiş ve kurşun zırh malzemesine nazaran radyasyonu soğuran fakat kurşuna göre daha hafif bir malzeme olduğu rapor edilmiştir [10].

Radyasyon seviyesinin daha güvenilir seviyeye getirilmesinde en önemli parametrelerden bir tanesi radyasyon azalım katsayısıdır ve parçacık kaynaklı etkileşimler için elastik ve

inelastik çarpışmalar hesaba katılarak tanımlanır [11]. Malzeme geliştirilirken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise radyasyon soğurma kapasitesinin, radyasyon soğurucu malzemelerin geliştirilmesinde tek başına belirleyici bir parametre olmamasıdır. Soğurma özelliklerinin yanı sıra malzemenin mekanik dayanımı, termal iletkenliği ve ikincil radyasyonu soğurma gibi ilave parametrelerin de incelenmesi gerekmektedir.

Nükleer enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılan radyasyon zırh malzemesi genellikle ağır beton, çelik ve alüminyum olarak bilinmektedir fakat malzemelerde zamanla oluşabilecek mikro-çatlaklar, korozyon ve malzemelerin düşük termal dayanımı gibi olumsuz özellikleri ile yüksek maliyet ve insan sağlığına zararlı toksik etkilerden dolayı yeni nesil zırh malzemelerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Rijit ve esnek polimer kompozitler geleneksel olarak kullanılan zırh malzemelerine nazaran toksik olmayan, pratik yollarla üretilebilen, ucuz ve hafif malzemeler olarak ifade edilir. Radyasyon zırh malzemelerin geliştirilmesinde dikkate alınması gereken bir diğer husus ise ne tür radyasyonun soğurulacağına belirlenmesidir. Özellikle parçacık tipli radyasyon olarak ifade edilen nötronlar yüksüz olduklarından dolayı atomun elektronları ile değil doğrudan çekirdeği ile etkileşmektedir ve bu nedenle nötron radyasyonunun zırhlama işlemi farklı nötron enerjileri de göz önüne alındığında gama radyasyonuna nazaran daha karmaşıktır [12]. Farklı nötron enerjilerinin soğurulması için nötron zırh malzemelerin önce hızlı nötronlarla etkileştikten sonra moderatör malzeme gibi davranıp sonrasında yavaşlatılan termal nötronların soğurulacağı şekilde tasarlanması gerekmektedir ve termal nötronların soğurulmasında dolgu malzemelerinin kullanılmasıyla mümkündür ve polimer kompozit malzemeler hem hızlı hem de termal nötronların soğurulmasında elverişli malzemeler sınıfına dâhil edilmektedir [13]. Ancak dolgu malzemeleri sadece termal nötronların soğurulmasında değil malzemenin diğer fiziksel özelliklerinin geliştirilmesinde önemlidir. Esnek ve alev geciktirici özelliğe sahip nötron soğurucu malzeme, bor karbür, çinko borat ve içi boş küre materyalleri gibi farklı dolgu malzemeleri kullanılarak geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada malzemelerin alev geciktirici özelliği ile ısı yalıtım özellikleri geliştirilmeye çalışılmış olup, çekme, uzama ve yırtılma mukavemet değerlerinin dolgu malzemelerinin miktarı ile orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir [14]. Dolgu malzemeleri olarak B_4C , PbO ve $Al(OH)_3$ 'ün kullanıldığı epoksinano-kompozitler ultrasonik dispersiyon yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, dolgu malzemelerinin radyasyon soğurma, alev geciktiricilik, termal bozunma ve mekanik dayanım gibi kompozit malzemelerin fiziksel özelliklerinde iyileşme gözlemlendiği belirtilmiştir [15].

Radyasyon soğurucu malzeme olarak polimer kompozitler alternatif malzemelere nazaran daha avantajlıdır. Avantajlı olarak belirtilen durumlardan bir tanesi, farklı tür radyasyonların soğurulmasında yüksek atom numaralı elementlerle polimerlerin kolaylıkla katkılanabilir olmasıdır [16]. Polimer kompozitlerin bu avantajlı özelliği sayesinde malzemelerin radyasyon soğurma özelliği ile birlikte diğer fiziksel özelliklerinin de iyileştirilmesi mümkündür. Polimer kompozitlerin bir diğer avantajlı özelliği ise hammaddelerin yenilenebilir kaynaklardan üretilebilmesidir [17].

Bor katkılanmış yeni nesil polimer kompozitlerin nötron soğurma özelliklerinin, bor elementinin termal nötronlarla etkileşme tesir kesit değerlerinin oldukça yüksek olmasından ötürü iyi olduğu belirtilmektedir [18-26]. Ancak polimer kompozitlere nötronlarla etkileşme tesir kesitlerinin büyük olduğu elementlerin ilavesi malzemenin soğurma özelliklerinin iyileştirilmesinde tek başına yeterli olmayabilir. Örnek verilecek olunursa, çok katmanlı ekstrüzyon sistemi kullanılarak, yüksek yoğunluklu polietilen ile bor nitür ve baryum sülfat katkılanarak elde edilen malzemenin soğurma özelliklerinde çapraz bağı etkileyen tabakaların artışıyla birlikte iyileşme gözlemlendiği tespit edilmiştir [27].

Radyasyon zırhı malzemeler sadece dünyadaki uygulamalarla sınırlı olmayıp uzay istasyonlarında kullanılan elektronik cihazları uzay radyasyonuna karşı korumada da kullanılmaktadır ve yaygın olarak kullanılan malzeme alüminyumdur. Alüminyum malzemesine nazaran daha hafif zırh malzemesi (parçacık radyasyonuna karşı) düşük atom numaralı elementlerin kullanımı ile mümkündür. Polietilen ve poliüretan kompozitler üstün mekanik özelliklere sahip hafif zırh malzemeleri olarak bilinmektedir. Epoksi reçine kullanılarak da daha hafif soğurucu malzeme üretimi mümkündür [28-30]. Alüminyum malzemesine göre daha hafif soğuruculardan bir diğeri de köpük kompozitlerdir ve bu tür malzemeler farklı radyasyon türlerini soğuracak ayrıca üstün mekanik özelliklere sahip olacak şekilde kolaylıkla üretilebilmektedir [31]. Özellikle köpük polimer kompozitler üstün mekanik ve termal özelliklerinden ötürü son zamanlarda yapılan çalışmalarda önem kazanmaya başlamıştır. Bunu sebebi olarak yaygın bir şekilde kullanılan alev geciktirici materyallerin çevre dostu olmaması gösterilmektedir. Ayrıca poliüretan köpük, petrokimyasal türevleri içeren polistiren, pliolefin ve fenolik köpüklere nazaran daha farklı özelliklere sahiptir. Polietilen glikol içeren poliüretan köpükler yüksek ergime ısısı (300 dereceden büyük), faz değişiminin tekrarlanabilirliği, kimyasal kararlılık, korozif olmayan davranış ve düşük maliyet ile belirtilmiş üstün özellikleri sayesinde özellikle binalarda

enerji verimliliğinin artışında yalıtım malzemesi olarak kullanımı uygun görülmektedir[32].

Tez çalışması kapsamında termal ve mekanik dayanımı yüksek, farklı PEG-300 konsantrasyonlarına sahip nötron zırh malzemesi geliştirilmiştir. Yüksek atom numaralı elementlerin gama ışınlarını kolaylıkla soğurabileceği göz önüne alındığından ve nötron etkileşimlerinin karmaşık yapısından dolayı çalışma boyunca öncelikle iyi bir nötron soğurucu malzemenin üretilmesi esas alınmıştır. Ayrıca PEG-300 metallerle koordinasyon yeteneğine sahiptir [33] ve böylece dolgu malzemeleri kullanılarak nötron etkileşimleri neticesinde oluşan ikincil radyasyonların soğurulduğu yeni malzemeler geliştirilebilir. Tez çalışması kapsamında farklı PEG-300 içeriklerine sahip poliüretan köpük malzemeleri geliştirilmiş malzemelerin termal nötronları soğurma özellikleri ile mekanik dayanımı incelenmiştir. Yapılan literatür araştırmalarından yola çıkılarak PEG-300 gibi düşük atom numaralı elementlerin var olduğu malzemelerin ilavesi ile soğurma özelliklerinde iyileşme gözleneceği tahmin edilmiştir. Ancak elde edilen verilere göre soğurucu malzemelerin nötron soğurma özellikleri ile mekanik dayanımlarının malzemenin sahip olduğu köpük yapı ile bağlantılı olduğu tespit edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyasyon Kaynakları

Bir radyoizotop kaynağının aktivitesi bozunma hızı olarak ifade edilmektedir ve bozunmanın temel kanunu;

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

Eşitliğiyle verilmektedir ve burada N radyoaktif çekirdeklerin sayısını, λ ise bozunma sabitini tanımlar. Tarihsel aktivite birimi Curie (Ci) birim saniye başına $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma olarak bilinmektedir ve 1 gram saf ^{226}Ra 'nın aktivitesinden yola çıkarak tanımlanmıştır. Laboratuvar ölçekli radyoaktif kaynaklar için milicurie (mCi) veya mikrocurie (μCi) birimleri kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen SI birim sistemindeki aktivite birimi Becquerel (Bq) olarak ifade edilmektedir. Saniyede bir parçalanma olarak tanımlanan Bq birimi $2,703 \times 10^{-11}\text{Ci}$ birimine eşdeğerdir. Laboratuvar ölçeğinde ise kilobecquerel (kBq) veya megabecquerel (MBq) birimleri kullanılmaktadır. Genel olarak belirli bir radyasyon türü bozunma zincirinin yalnızca belirli kısmında yayımlanır ve bu nedenle aktivite kullanılarak belirli bir emisyon oranı çıkarmak için kullanılan izotopun radyoaktif bozunma şeması hakkında bilgi edinilmelidir. Radyoaktif herhangi bir kaynağın kendine özgü aktivitesi birim kütle başına bozunma olarak yazılabilir. Başka bir radyoaktif çekirdekle karıştırılmamış ve taşıyıcı içermeyen radyoaktif bir madde için birim kütle başına bozunma olarak tanımlanan spesifik aktivite;

$$\text{spesifik aktivite} = \text{aktivite/kütle} = (\lambda A_v)/M \quad (2.2)$$

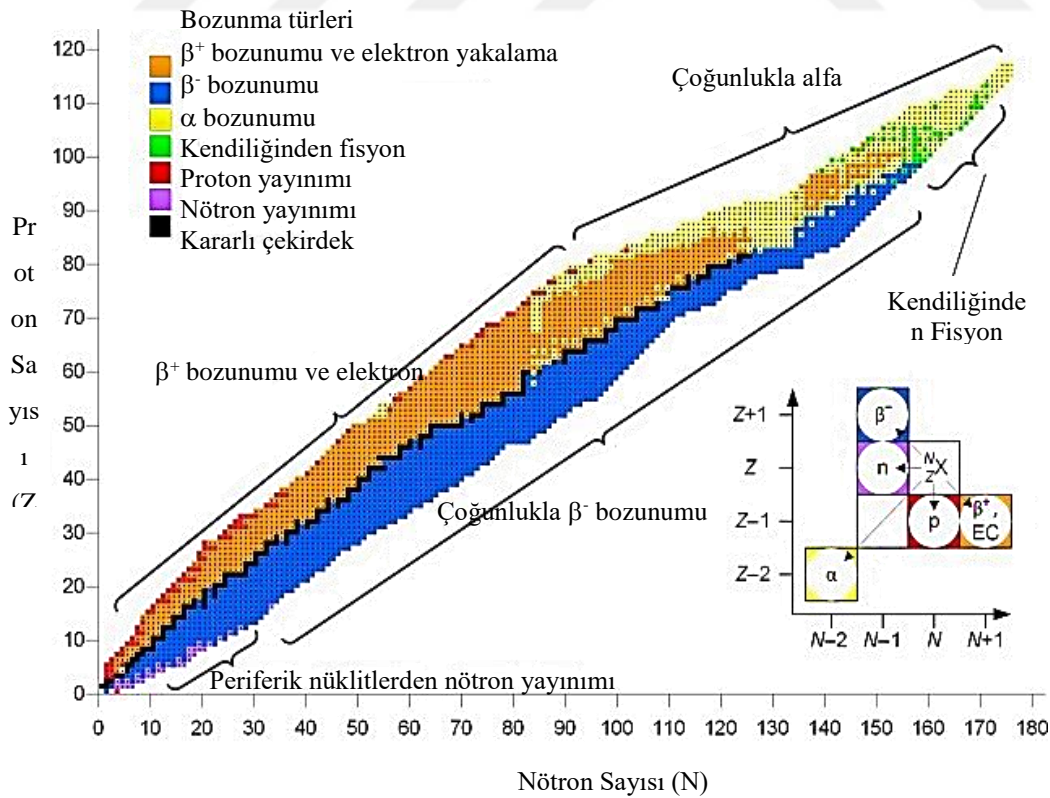
olarak yazılabilir. Eş. 2.2'de M malzemenin moleküler ağırlığını, A_v avagadro sayısını ve λ ise radyoaktif bozunma sabitini temsil etmektedir.

Enerji ölçüm birimi olarak elektronvolt (eV) kullanılmaktadır ve elektronun 1 voltluk gerilim altında ivmelenmesi sonucu kazanmış olduğu kinetik enerji miktarı olarak

tanımlanmaktadır. Enerji biriminin katları olan kiloelektronvolt (keV) ve megaelektronvolt(MeV) birimleri daha çok iyonlaştırıcı radyasyonların enerjilerinin ölçümleri için daha uygundur[34].

2.1.1. Hızlı elektron kaynakları

Beta bozunumu, iç dönüşüm ve Auger elektronları hızlı elektron kaynakları kategorisine dâhil edilmektedir. Radyasyon ölçümlerinde, yaygın olarak en hızlı elektron kaynağı beta bozunumundan elde edilmektedir. Beta bozunumu, çekirdekteki bir protonun bir nötrona veya tam tersi olarak bir nötronun protona dönüşmesi esasına dayanmaktadır. Bozunma esnasında kütle numarası (A) değişmeyecek olup, ana çekirdek ile kız çekirdek izobar çekirdek olarak ifade edilmektedir. Beta bozunumu hem hafif hem de göreceli olarak ağır çekirdekler için gerçekleşebilir. Fakat çekirdeklerin hangi beta bozunma tipini gerçekleştireceği yapısında bulundurduğu proton ve nötron sayısına bağlı olarak değişmektedir [35]. Şekil 2.1, çekirdeklerin sahip olduğu proton ve nötron sayısına bağlı olarak hangi bozunmaların gerçekleşeceğini göstermektedir.



Şekil 2.1. Nükleer kararlılık eğrisi [36]

Şekilde gösterilen siyah bölge kararlı çekirdeklerin yani ışımaya yapmayan çekirdeklerin olduğu bölgeyi göstermektedir. Düşük atom numaralı elementlerde kararlı elementler $N=Z$ eğrisi üzerinde yer almaktadır.

İç dönüşüm elektronlarının oluşumu ise beta bozunumu (β^-) neticesinde ürün çekirdeğin uyarılmış seviyede kalması ile tetiklenmektedir. Uyarılmış haldeki çekirdek çoğunlukla gama ışını fotonu yayımlayarak kararlı hale gelmektedir. Fakat bazı durumlarda çekirdek gama ışını fotonu yayımlamak yerine, atomik orbitallerde bulunan elektronlar ile elektromanyetik etkileşime girerek taban durumuna gelmektedir. Bu süreç iç dönüşüm olarak ifade edilmektedir. Süreç sonunda elektronların serbest hale geçmesi için, geçişin meydana geldiği seviye farkı kadar enerjinin elektronlara aktarılması gerekmektedir. İç dönüşüm elektronlarının serbest haldeki enerjisi;

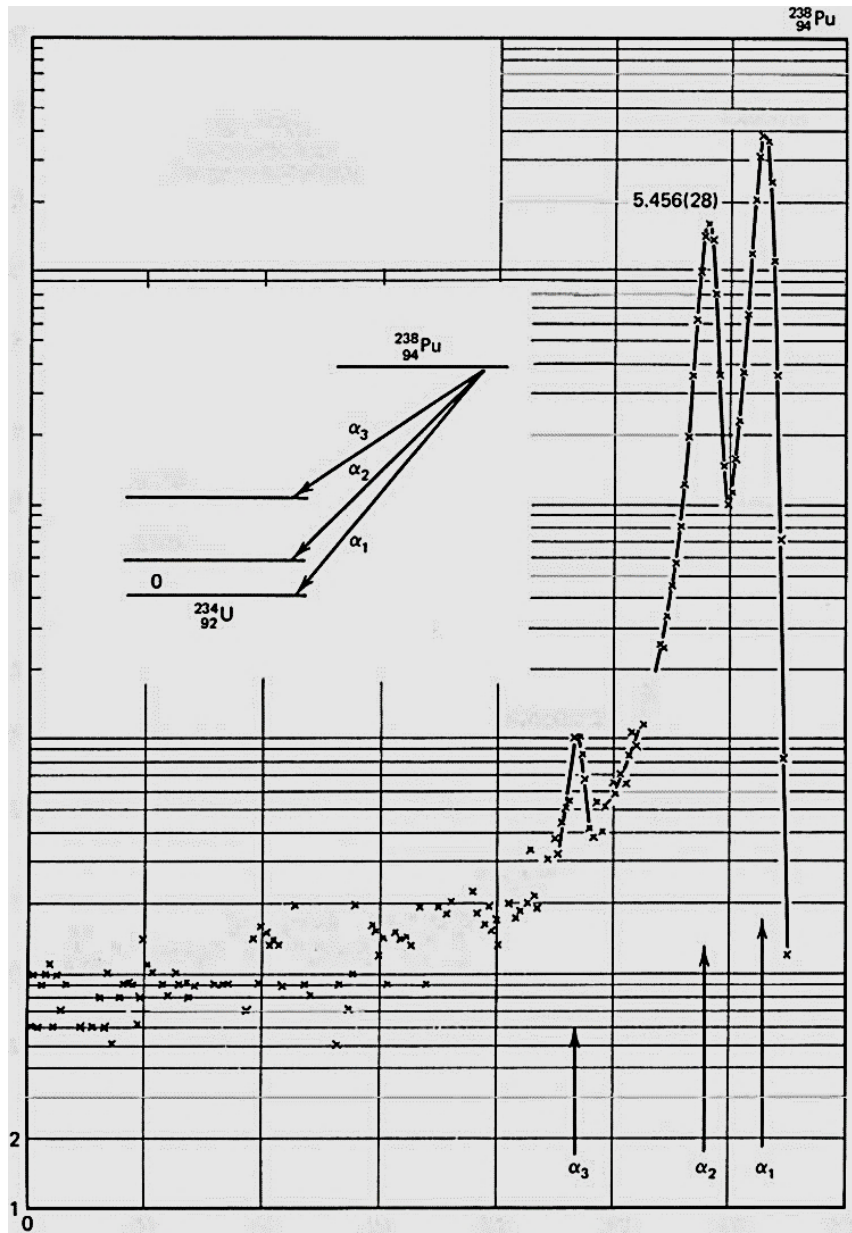
$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilmektedir ve bu bağıntıda E_b elektronun bağlanma enerjisi, E_γ uyarılma enerjisi, son olarak E_e ise elektronun enerjisini belirtmektedir. Süreç sonunda proton ve nötron sayıları toplamı değişmediğinden dolayı çekirdeğin başka bir çekirdeğe dönüşmemektedir. Ayrıca iç dönüşüm elektronlarının enerji spektrumları beta bozunumundaki elektronların sahip olduğu spektruma nazaran daha keskin yapıya sahip olduklarından dolayı nükleer uygulamalar için elverişlidir [37].

Auger elektronları ise, şayet uyarılma enerjisi çekirdekten ziyade atomdan karşılanıyorsa iç dönüşüm elektronlarının benzeri olarak ifade edilmektedir. Elektron yakalama süreci gibi atomda bir boşluk meydana getirecek olayların neticesinde, atomda oluşturulan bir boşluk üst seviyelerde bulunan bir elektron tarafından doldurulur ve neticede karakteristik X-ışını fotonu yayımlanır. Yayımlanan karakteristik X-ışını fotonu doğrudan dış kabuk elektronlarından birisi ile etkileşerek, elektronun atomdan fırlatılmasına yol açabilir. Bu durumda atomdan fırlatılan elektron Auger elektronu olarak adlandırılır ve enerjisi, elektronun bulunduğu seviyedeki bağlanma enerjisi ile uyarılma enerjisi arasındaki farka eşittir. Auger elektronları baskın olarak düşük atom numaralı elementlerde görüldüğünden dolayı, göreceli olarak enerjileri beta ve iç dönüşüm elektronlarına nazaran daha düşüktür.

2.1.2. Ağır yüklü parçacıklar

Ağır yüklü parçacık kaynakları alfa bozunumu ve kendiliğinden fisyon olayları ile elde edilmektedir. Alfa bozunumunda çekirdek kararsızlığı, hem proton hem de nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, böyle durumlarda çekirdek bir alfa parçacığı (ya da Helyum) yayımlayarak bozunma olayını gerçekleştirir. Böylece bozunan çekirdeğin kütle numarası 4 atom numarası 2 azalır. Şekil 2.2 ^{238}Pu elementinin alfa bozunumunda yayımlanması mümkün alfa parçacıklarının enerji spektrumları ile birlikte göstermektedir.



Şekil 2.2. ^{238}Pu 'un bozunumundan üretilen alfa parçacıkları[38]

Alfa parçacıkları tek enerjili olan bir ya da daha fazla enerji paketleri halinde ortaya çıkabilir. Başlangıç ve sonuç çekirdeklerin enerji seviyeleri arasındaki her bir enerji farkı ya da Q değeri bozunmayı karakterize etmektedir. Bu enerji alfa parçacığı ile bozunma sonrası geri tepen çekirdek arasında paylaşılmaktadır ve bu nedenle her alfa parçacığı $Q(A-4)/A$ enerjisine sahip olmaktadır. Ana çekirdeğin yarı ömrü ile alfa parçacığı enerjisi birbiri ile ilişkilidir ve en kısa yarı ömürlü izotoplar en yüksek enerjiye sahiptir[38].

Kütlesi alfa parçacığına kıyasla oldukça büyük olan ağır yüklü parçacıkların kaynağı genellikle fisyon süreçleridir. Bu özelliğinden dolayı, fisyon ürünleri ağır iyon ölçümlerinin kullanıldığı detektörlerin test edilmesinde ve kalibrasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. ^{252}Cf gibi yeterince ağır olan çekirdeklerde fisyon olayı kendiliğinden gerçekleşmektedir ve çekirdeklerin atom numarası arttıkça kendiliğinden fisyon yapma ihtimaliyetleri de artmaktadır. Kendiliğinden oluşan ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan fisyon tepkimelerinde oluşan daha hafif kütleli çekirdeklerin nötron sayılarının proton sayılarına oranı dengede değildir ve bu nedenle beta ve gama bozunumu yaparak daha kararlı yapıya geçerler [39].

2.1.3. Elektromanyetik radyasyon kaynakları

Elektromanyetik radyasyon kaynakları hem elektrik hem de manyetik alan bileşenlerine sahip parçacık veya foton olarak yayımlanan enerji türleri arasında yer almaktadır. Bu tür radyasyonların enerji aralığı TV ve radyo dalgaları ile kozmik ışınlar kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. TV, radyo dalgaları, mikrodalgalar, infrared ışınım, görünür bölge, ultraviyole ışınım, gama ve X-ışınları elektromanyetik radyasyon sınıfı kapsamında incelenmektedir.

Gama radyasyonu, uyarılmış çekirdeklerin taban durumu enerjisine geçişi sırasında yayımlanan bir elektromanyetik radyasyon türüdür. Pratik uygulamaların çoğunda, laboratuvar ortamında uyarılmış nükleer durumlar ana çekirdeğin bozunmasıyla oluşturulmaktadır. Özellikle art arda beta bozunumuna uğrayan bir çekirdek yavru çekirdekte uyarılmış durumların popülasyonuna yol açar. Beta bozunumu yavaş bir süreç olduğundan yarı ömür daha uzun karakterize edilmektedir ancak uyarılmış durumların yarı ömürleri çok kısadır. Taban durumuna gelirken yayımlanan gama ışını enerjisi çekirdeğin ilk ve son nükleer durumları arasındaki enerji farkına eşittir. Bu sebepten ötürü gama

ışınları ana beta bozunumunun yarı ömür özelliğiyle fakat yavru çekirdeğin enerji düzeyi yapısını yansıtacaktır. Beta bozunumu sonrası yayımlanan gama ışınları yaklaşık olarak 2,8 MeV'in altındaki enerjilerle sınırlıdır. Zırhlama kalınlığının genellikle ana çekirdeğin bozunumundan açığa çıkan parçacık radyasyonunu durduracak büyüklükte belirlenmesi gerekmektedir ve yayımlanan tek birincil radyasyon yavru çekirdeğin taban durumuna gelirken yayımlanan gama ışını fotonlarıdır. Bunun yanı sıra yok olma radyasyonu ile bremsstrahlung gibi ikincil radyasyonlar da göz önüne alınmalıdır.

Bazı durumlarda yüksek enerjili gama radyasyonuna ihtiyaç duyulabilir. Bu süreç beta-aktif izotoplardan yüksek nükleer durumların popülasyonu neticesinde elde edilebilir. Gama ışınlarının yayımlandığı bir diğer süreç ise termal nötronların soğurulmasıyla gerçekleşen nükleer reaksiyonlardır. Gama ışınlarının üretiminde kullanılan termal nötron kaynaklarının enerjileri 0,025 eV olarak belirtilmiştir ve çoğunlukla nükleer santrallerde çekirdek fisyonunu başlatan unsurdur.

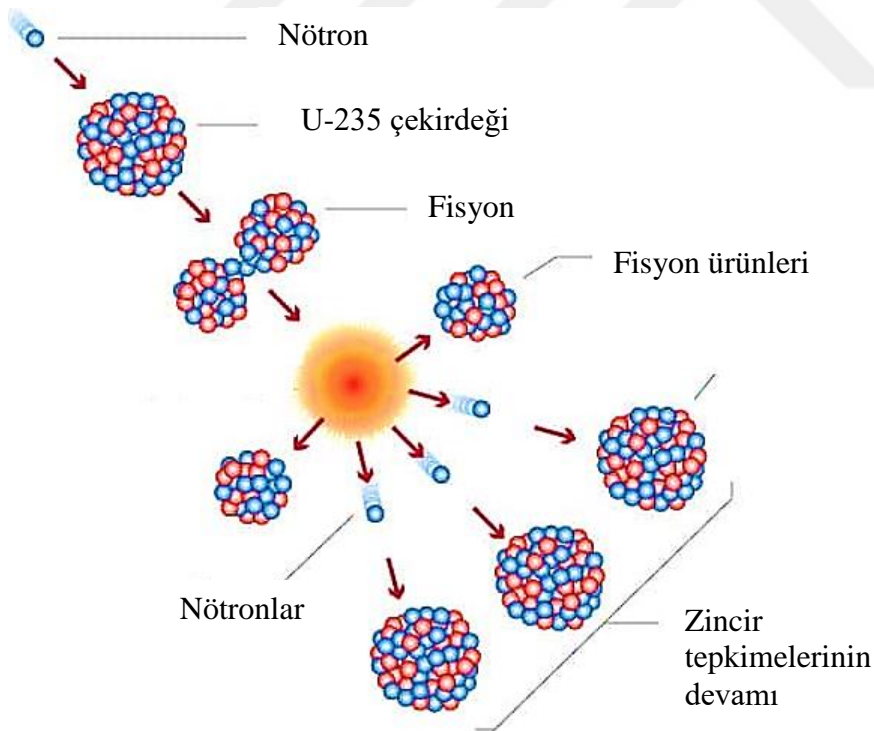
Elektromanyetik radyasyonun bir diğer türü ise hızlı elektronların madde ile etkileşimi neticesinde ortaya çıkan Bremsstrahlung (frenleme) ışınımıdır. Çoğunlukla X-ışını tüplerinden elde edilmektedir. Elektron enerjisinin frenleme ışınımına dönüştürülen kesri elektronun sahip olduğu enerji ile birlikte artmaktadır ve yüksek atom numaralı elementler için en büyük değere sahiptir. Frenleme ışınımına ilave olarak hızlı elektronlar soğurucu bir ortamdan geçerken ortamda var olan atomlarla da etkileşerek karakteristik X-ışınlarının oluşumunu sağlayabilir. Böyle durumlarda gözlenen X-ışını spektrumlarında sürekli spektrum olarak gözlenen frenleme ışınımının üzerinde karakteristik X-ışını pikleri de gözlenebilmektedir [38].

Karakteristik X-ışınları, atomun yörüngesinde bulunan elektronların bir uyarma işlemiyle normal konfigürasyonlardan uzaklaşmasıyla elde edilir. Katı bir malzemede bulunan elektronların uyarma neticesinde yeniden taban durumuna geçme eğilimleri mevcuttur ve birkaç nanosaniye ya da daha kısa sürede uyarılan seviyeler yeniden düzenlenir. Uyarılmış durumdan taban durumuna geçişte serbest kalan enerji, başlangıç ve son durumlar arasındaki enerji farkına eşit olup karakteristik X-ışını olarak yayımlanmaktadır. Örnek verilerek açıklanacak olursa, bir atomun K tabakasında oluşturulan bir boşluk üst seviyelerdeki elektronlar tarafından doldurulursa karakteristik K X-ışınları yayımlanır. Eğer burada oluşturulan boşluk L kabuğundan elektron ile doldurulursa K_{α} fotonu üretilir.

K kabuğunda oluşturulan boşluk M kabuğundan elektronlarla doldurulursa K_{β} fotonu üretilir ve bu böyle devam eder [38].

2.1.4. Nötron kaynakları

Genel olarak nötron kaynakları, nötron emisyonu sağlayan çekirdek ya da cihazlara verilen genel bir kavram olarak ifade edilmektedir ve mühendislik araştırmaları, sağlık sektörü, yer altı zenginliklerinin keşfi, temel bilimler ve nükleer santraller olarak belirtilen pek çok uygulama alanına sahiptir. Bir nötron kaynağının karakterize edilebilmesi için pek çok faktörün göz önüne alınması gerekmektedir. Göz önüne alınması gereken faktörler; kaynağın kendisi, şiddeti, yayımlanan nötron akısının açı ve enerji dağılımı ile yayılım modu olarak belirtilmiştir[40]. Özellikle nükleer reaktörlerde art arda gerçekleşen zincir tepkimeleri nötronlar vasıtasıyla gerçekleştirilir ve açığa çıkan enerji santrallerde suyun ısıtılmasında kullanılarak enerji üretimi sağlanmaktadır.



Şekil 2.3. Nükleer zincir reaksiyonu

Uranyum radyoizotoplarından U-235 izotopu sadece yüzde birden daha küçük oranda bulunur ve nükleer santrallerde güç üretmede kullanılan radyoizotoptur. Bilindiği üzere U-235 izotopu kolaylıkla Şekil 2.3'te görüldüğü gibi termal nötronlarla fisyon reaksiyonu gerçekleştirebildiği için özellikle nükleer santrallerde kullanılmak üzere çıkarılan uranyum cevheri pek çok aşamalardan geçirilerek zenginleştirme işlemi neticesinde yakıt çubuklarına dönüştürülmektedir. Nükleer santrallerde gerçekleşen fisyon tepkimesinden elde edilen nötronlardan farklı olarak diğer nötron kaynakları Çizelge2.1'de sunulmuştur.

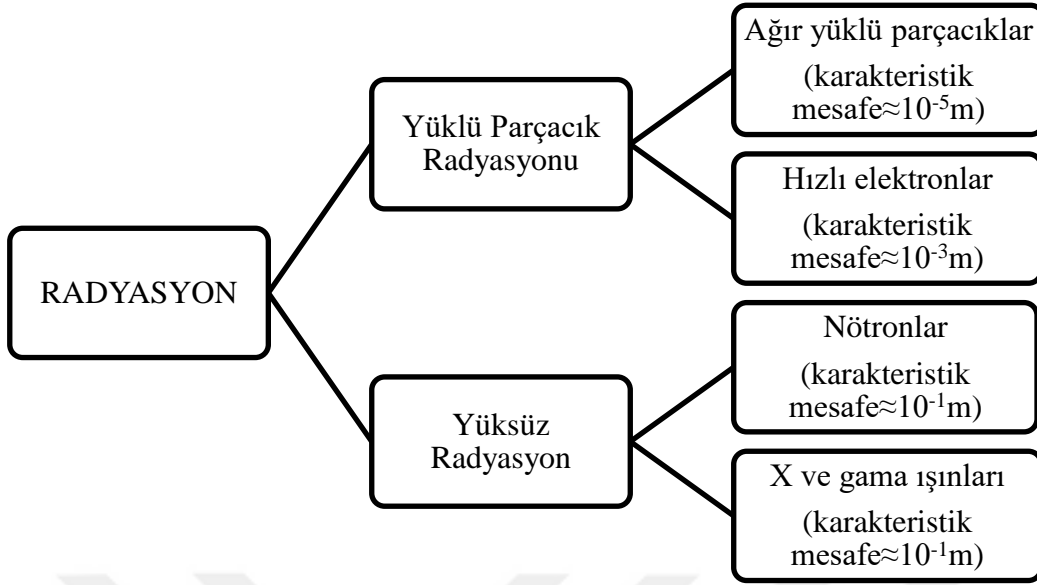
Çizelge2.1 Nötron kaynakları [40]

Nötron Kaynakları	Nötron Verimi	Yayımlanan enerji MeV / nötron
(α,n) reaksiyonları	$8 \times 10^{-5} / \alpha$	6 600 000
(D,T) füzyon reaksiyonu	$4 \times 10^{-5} / \text{döteron}$	10 000
Elektron Bremsstrahlung/ Foto-fisyon	$5 \times 10^{-2} / \text{elektron}$	2000
Fisyon	1 / fisyon	180
Parçalanma	30 / proton	55

2.2.Radyasyon Etkileşimleri

Genel olarak kullanılan radyasyon tespit cihazlarının çalışma prensibi gelen radyasyonun dedektör malzemesi ile etkileşim mekanizmasına bağlıdır. Ancak etkileşim mekanizması madde içinde radyasyonun nasıl yol aldığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örnek verilecek olursa, nötronlar ile gama ışını fotonlarının madde içindeki hareketi yolu üzerinde bulunan atomların atom numaralarına bağlı olarak açıklanmaktadır.

Radyasyon etkileşimlerinden bahsetmeden önce radyasyonun dört ana kategoride sınıflandırılarak madde ile etkileşimleri daha açık ifade edilebilmektedir. Şekil 2.4'te radyasyonun sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.4. Radyasyonun sınıflandırılması[38]

Yüklü parçacıklar, madde ortamından geçerken sahip oldukları elektrik yükü nedeniyle ortamda var olan elektronlarla Coulomb etkileşimi neticesinde radyasyon salınımını gerçekleştirmektedirler. Yüksüz parçacıkların ise ortamda var olan elektronlarla Coulomb etkileşimi mümkün olmadığından, yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesindeki gibi sürekli bir etkileşimden bahsetmek mümkün değildir. Bu tür radyasyon türleri için etkileşim gelen radyasyon enerjisinin atomun elektronlarına ve çekirdeğine aktarılmasıyla gerçekleşir[38].

2.2.1. Ağır yüklü parçacıkların etkileşimleri

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesi neticesinde ortaya çıkan enerji kaybı inelastik çarpışmaların sonucudur ve bu tür çarpışmalar soğurucu atomun elektronları ile yüklü parçacıklar arasında gerçekleşmektedir. Özellikle proton, döteron ve alfa parçacıkları gibi ağır yüklü parçacıkların soğurucu ortamda bulunan yörünge elektronları ile kendi pozitif yükleri arasında Coulomb etkileşimi neticesinde bir enerji kaybı meydana gelmektedir. Esnek olmayan çarpışma olarak tanımlanan bu etkileşmelerde gelen parçacığın kinetik enerjisi atomun iyonlaşma enerjisinden yeterince büyük ise, enerjisini yolu üzerinde bulunan atomları iyonlaştırmada kullanır [41].

Yüklü parçacıklar madde ortamının bir ucundan diğer ucuna geçerken, elektronlarla gerçekleştirdiği çarpışmalar neticesinde enerjisinin çoğunu kaybetmektedir. Gerçekleşen

her bir etkileşimde kaybedilen enerji değeri çok küçüktür. Toplam enerjiye nazaran kaybedilen enerji çok küçük olacağından, gelen parçacık madde ortamında pek çok etkileşimde bulunacaktır. Bu etkileşimler binlerce iyon çiftinin oluşumunu sağlamaktadır. Soğurucu madde ortamından kopan elektron negatif iyonu, geriye kalan atom ise pozitif iyonu meydana getirmektedir. Pozitif ve negatif iyonların oluşumu yüklü parçacığın enerjisi tükeninceye kadar devam eder ve ayrıca meydana gelen negatif iyonlar tekrar ikincil bir iyonlaşma meydana getirebilir ki bu tür ışınlar delta ışınları olarak isimlendirilir[38].

Yüklü parçacıkların madde içinde etkileşimi esnasında birim uzunluk başına kaybettiği kinetik enerji miktarının sayısal olarak ifadesi durdurma gücü ile tanımlanmaktadır ve lineer durdurma gücü ile kütle durdurma gücü olmak üzere iki farklı kavram kullanılmaktadır. Birim uzunluk başına enerji kaybı oranı $-dE/dx$ olarak belirtilen lineer durdurma gücü olarak tanımlanırken, lineer durdurma gücünün madde yoğunluğuna bölünmesi ile kütle durdurma gücü elde edilir [42]. Durdurma gücü her bir maddeye ait karakteristik bir özelliktir ve belirli bir yüke sahip parçacıklar için parçacık hızı azaldıkça durdurma gücü artar. Bu durum enerji kaybının klasik açıklamasının yapıldığı Bethe formülü ile ifade edilmektedir.

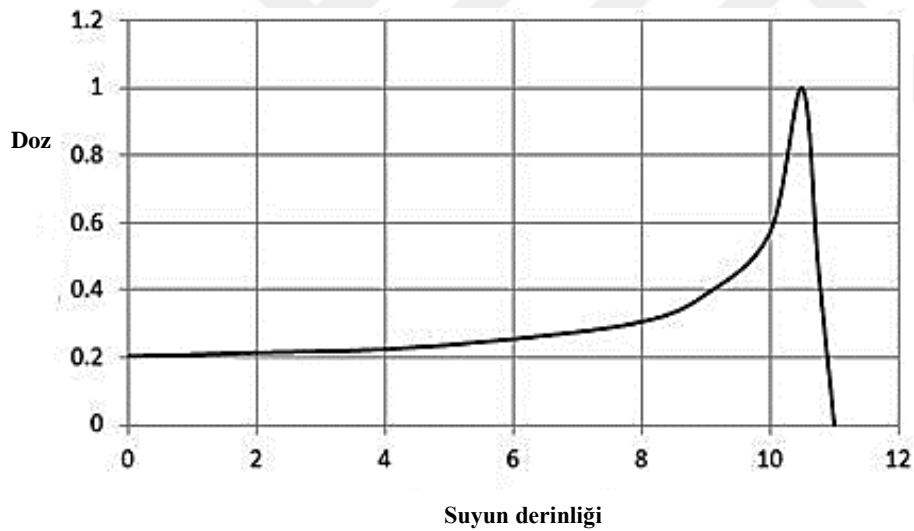
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (2.4)$$

$$B \equiv Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.5)$$

Yukarıda ifade edilen eşitliklerde parçacığın hızını ve ze ise parçacığın yükünü temsil etmektedir. Soğurucu atomun yoğunluk sayısı N ve atom numarası Z sembolleri ile gösterilmektedir. Elektronun durgun kütlesi m_0 ve elektronun yükü ise e ile belirtilmiştir. Eş.2.5'te gösterilen ve soğurucunun ortalama uyarma ve iyonizasyon potansiyelini belirten parametre I olarak temsil edilmiştir. I parametresi her bir element için deneysel olarak türetilebilir. Rölativistik olmayan parçacıklar için B değerinin sadece ilk terimi önemlidir, diğer terimler ihmal edilebilir. Eş.2.4 genel olarak, parçacık hızının soğurucu materyalin atomlarının yörüngesinde bulunan elektron hızına kıyasla daha büyük olduğu durumlar

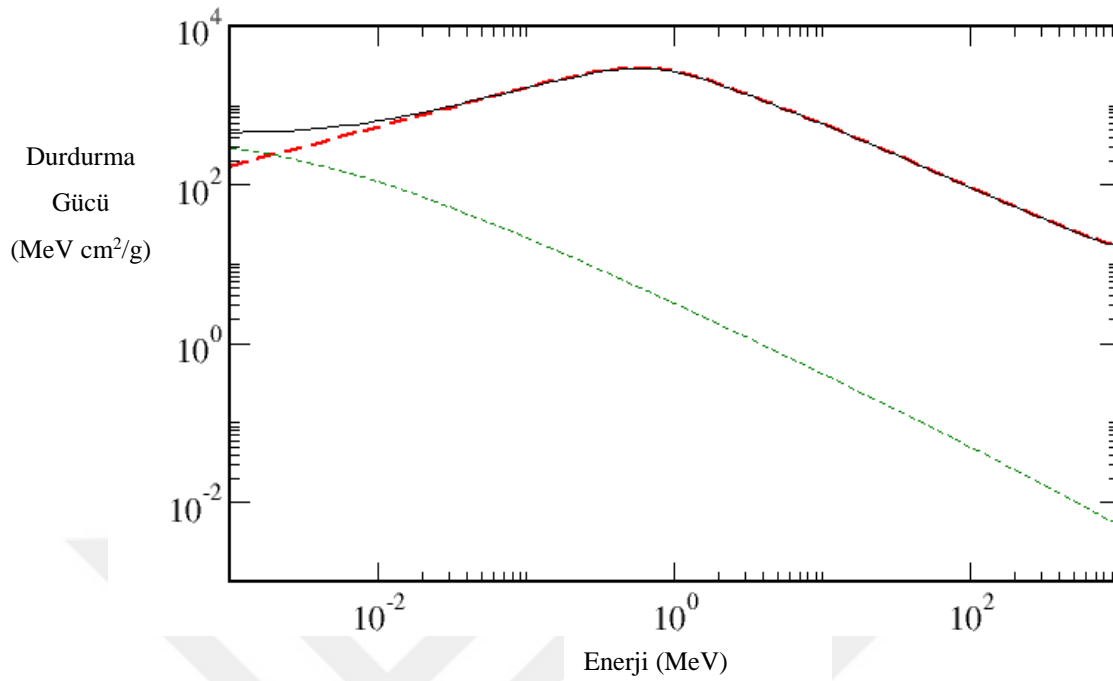
için geçerlidir. B terimi parçacık enerjisine bağlı olarak yavaşça değişmektedir. Rölativistik olmayan parçacıklar için lineer durdurma gücü hızın karesi ya da parçacığın kinetik enerjisi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Eşitlikteki NZ çarpanı soğurucunun elektron yoğunluğunu göstermektedir ve yüksek atom numaralı, yoğunluğu yüksek malzemeler için daha büyük durdurma gücü değerleri elde edilmektedir. Bethe formülü, soğurucu ile parçacık arasındaki yük değiş tokuşunun ihmal edilemediği durumda geçersiz olmaya başlar [38].

Yüklü bir parçacığın yolu boyunca kaybettiği özgül enerji miktarı Bragg eğrisi ile karakterize edilmektedir ve bir örneği Şekil 2.5'te verilmektedir. Şekilde yüklü parçacığın yolu boyunca kaybettiği enerji miktarı dağılımı gösterilmektedir ve madde içinde hareket ederken yüklü parçacığın enerjisinin azaldığı, dolayısıyla özgül iyonizasyonun arttığı niteliksel olarak açıktır[43].



Şekil 2.5. 121 MeV proton enerjisinin suyun içindeki derinliğe bağlı doz dağılımı[43]

Elektron, proton ve alfa parçacıklarının farklı ortamlar içinde hareket ederken 0,001 MeV ile 10000 MeV arasındaki enerji değerlerinde durdurma gücü ve mesafesi NİST ESTAR, PSTAR ve ASTAR programları kullanılarak hesaplanabilir ve Şekil 2.6 polietilen malzemesinde alfa parçacıklarının durdurma gücünün enerjiye bağlı dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.6. Polietilen içinde alfa parçacıklarının durdurma gücünün enerjiye bağlı değişimi [44]

2.2.2. Hızlı elektronların etkileşimleri

Hızlı elektronların madde ile etkileşme mekanizmaları birkaç farklı mekanizma ile gerçekleşir ancak etkileşme mekanizmalarından sıklıkla belirtilen dört tanesi inelastik çarpışmalar, elastik saçılmalar, ışımalı çarpışmalar ve ikincil elektron üretimidir. Ağır yüklü parçacıklara nazaran, etkileşme esnasında az miktarda enerji kaybı meydana gelir malzeme içinde aldığı yol oldukça dolambaçlıdır. Aynı zamanda yine ağır yüklü parçacıklardan farklı olarak Coulomb etkileşmeleri neticesinde ışımalı olaylarla da enerjilerini kaybedebilirler. Etkileşmeler neticesinde oluşan enerji kaybı frenleme ışınımı olarak adlandırılan Bremsstrahlung ya da elektromanyetik radyasyon biçiminde yayımlanır. Bu nedenle hızlı elektronlar için de Bethe, elektronlar için toplam durdurucu güç ifadesini türetmiştir. Bu ifadeye göre çarpışma ve ışıma kayıplarının toplamı olarak durdurucu güç;

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_c + \left(\frac{dE}{dx} \right)_r \quad (2.6)$$

Özgül enerji kayıplarının ifadesi ise aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c} \cong \frac{EZ}{700} \quad (2.7)$$

Burada E, MeV mertebesinde olup, beta parçacıkları veya gama ışını etkileşimlerinden ikincil elektronlar gibi elektronlar için enerjiler birkaç MeV'den azdır. İyonlaşma ve uyarılma mekanizmalarından ötürü ışınım kayıpları her zaman iyonlaşma ve uyarılma nedeniyle enerji kayıplarının küçük bir kısmıdır ve sadece yüksek atom numaralı soğurucu malzemeler için bu değer önem arz etmektedir. Tek enerjili elektronların spektral dağılımına nazaran beta parçacıklarının enerjilerindeki dağılım süreklilik arz eder. Beta parçacıklarının zayıflatma eğrisi incelendiğinde ilk eğimin daha büyük oluşu düşük enerjili beta parçacıklarının düşük kalınlıklarda bile soğurulabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Soğurucu malzemenin kalınlığı t, I₀ soğurucunun olmadığı durumdaki radyasyon şiddeti ve I soğurucu maddeyi geçen şiddet olarak ifade edilirse, soğurma oranı;

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (2.8)$$

olarak verilir ve μ lineer soğurma katsayısı olarak adlandırılır. Elektronların yolu boyunca gözlenen geniş açılı sapmalar geri saçılma olgusunun bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Geri saçılmanın yaygın olarak gözlemlendiği durumlar elektron enerjisinin düşük ve yüksek atom numarasına sahip soğurucuların söz konusu olduğu durumdur. Coulomb kuvvetleri hem elektronlar hem de ağır yüklü parçacıklar için enerji kayıp mekanizmasını oluşturmaktadır. Etkileşim sonucu ortaya çıkan enerji aktarımı yüklerine bakılmaksızın eşit kütleli parçacıklar için aynıdır. Bu sebepten ötürü soğurucu bir ortamdaki pozitronun izleri, negatif elektronların izlediği yol ile benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda başlangıç enerjileri aynı olan elektron ve pozitronun özgül enerji kayıpları ve menzilleri de yaklaşık olarak aynıdır [38].

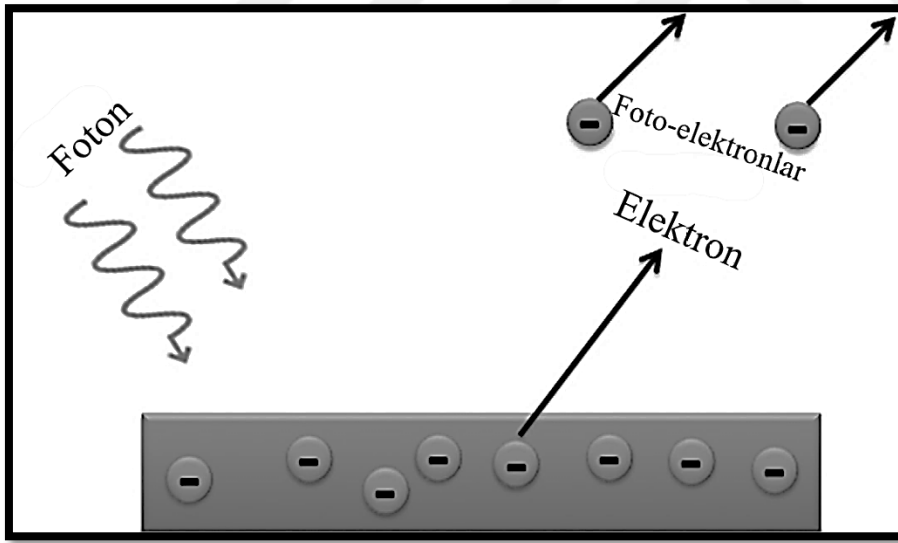
2.2.3. Gama ışınlarının etkileşimleri

Gama ışınlarının madde ile etkileşmesi esnasında soğurulma ve saçılma mekanizmaları olarak bilinen pek çok etkileşim söz konusudur. Ancak bu etkileşimlerden en önemli olanları fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Bu süreçlerde gama ışını elektrona tamamen ya da kısmen aktarılmaktadır.

Metal yüzeyine düşen fotonun yüzeyden elektron koparması fotoelektrik olay olarak tanımlanır ve bu olay sonucu kopan elektron fotoelektron olarak adlandırılır. Fotoelektrik olayda foton tamamen kaybolarak soğurucu atom ile etkileşmektedir. Soğurucu atomun bağlı kabuklarından foto-elektron fırlatılmaktadır ve etkileşim tamamen bağlı elektronlarla gerçekleşir. Söz konusu olay Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Etkileşim sonunda foto-elektronun sahip olduğu enerji;

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.9)$$

şeklinde yazılmaktadır. Elektronun bulunduğu seviyeye bağlanma enerjisi E_b ve gelen fotonun enerjisi ise $h\nu$ ile temsil edilmektedir. Foto-elektronun oluşturulması ile oluşan boşluk ya ortamdan serbest bir elektronun yakalanması ile ya da diğer kabuklardan elektronların yeniden düzenlenmesiyle hızla doldurulur ve çok sayıda karakteristik X-ışını fotonu üretilebilir.



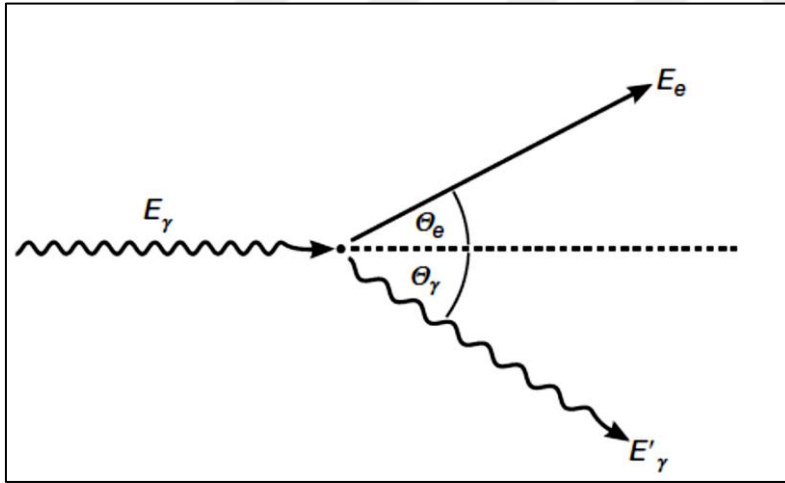
Şekil 2.7. Fotoelektrik olay [45]

Fotonun madde ile etkileşimi neticesinde fotoelektrik etkileşim tesir kesiti;

$$\sigma_{photo}(K) = \left(\frac{32}{\epsilon_\gamma} \right)^{1/2} \alpha^4 Z^5 \sigma_{th} \quad (2.10)$$

formülü ile ifade edilir. Burada ε_γ indirgenmiş foton enerjisini, α ince yapı sabitini, Z soğurucu malzemenin atom numarasını ve σ_{th}^e fotonların elektronlarla elastik saçılması için Thomson tesir kesitini göstermektedir. Eş. 2.10, fotoelektrik etkileşim tesir kesitinin soğurucu malzemenin atom numarasının beşinci kuvvetine bağlı olarak değişimini açıklamaktadır. Buradan kurşun gibi yüksek atom numaralı soğurucu malzemelerin yüksek fotoelektrik soğurma tesir kesitine sahip olduğu anlaşılabilir[46].

Compton saçılması ise foton ile atomun zayıf bağlı elektronları arasında gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için, saçılan elektronun gelen fotonun enerjisini tamamen soğurmaması gerekmektedir. Böylece gelen foton enerjisinin bir kısmı elektrona aktarılır ve saçılarak soğurucu madde içinde yoluna devam eder. Foton ile zayıf bağlı elektronlar arasındaki etkileşme esnek çarpışma şeklinde gerçekleşir. Eğer elektronun bağlanma enerjisi gelen foton enerjisine kıyasla oldukça büyükse Compton saçılması meydana gelmez [47]. Şekil 2.8 Compton etkileşme mekanizmasını göstermektedir.

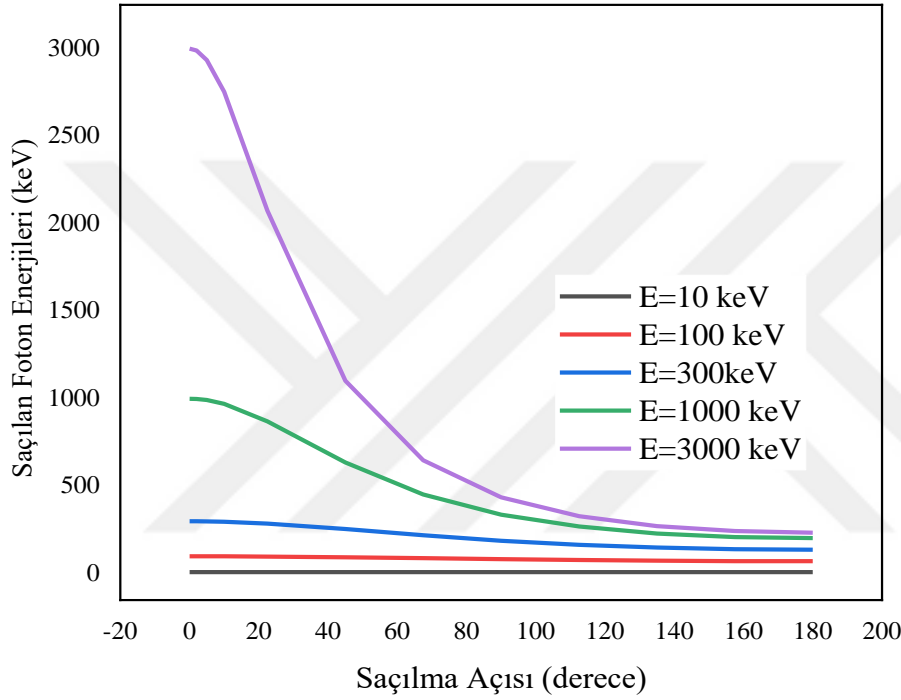


Şekil 2.8. Compton etkileşme mekanizması [46]

Compton saçılmasında gelen ve saçılan fotonun dalga boyları arasında;

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta_\gamma) \quad (2.11)$$

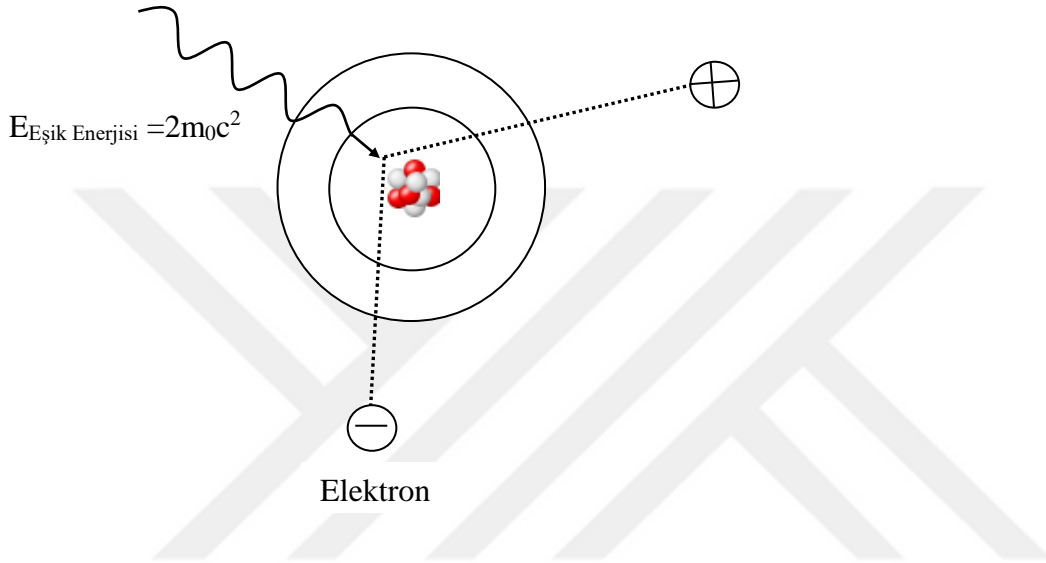
bağıntısı mevcuttur. Fotonun çok küçük saçılma açılarında saçılan elektronun enerjisi sıfıra yaklaşır ve oluşan ikincil fotonun enerjisi gelen foton ile yaklaşık olarak aynı enerjiye sahip olur. Fotonun çok büyük saçılma açılarında ise gelen foton enerjisinin tamamına yakını elektrona aktarılarak minimum foton enerjisi elde edilir. Gelen foton enerjisinin değerine bağlı olarak saçılan foton enerjisinin saçılma açısına bağlı değişimi Şekil 2.9'da çizilmiştir.



Şekil 2.9. Saçılan foton enerjilerinin saçılma açısına bağlı değişimi

Foton, sadece soğurucu atomun elektronları ile değil aynı zamanda çekirdeği ile de etkileşmektedir ve fotonun çekirdek ile etkileşim mekanizması çift oluşumu olayı ile açıklanır. Etkileşmenin sonunda çekirdeğin Coulomb alanında foton kaybolarak bir elektron ve pozitron çiftine dönüşmektedir. Çift oluşumunda atomun çekirdeğinde herhangi bir değişim meydana gelmez [48-49]. Enerjinin korunumundan yola çıkarak çift oluşumu için, gelen foton enerjisinin minimum elektronun durgun kütle enerjisinin iki katına yani 1,022 MeV değerine sahip olması gerekmektedir. Atomun çekirdeği ile etkileşen fotonun enerjisinin 1,022 MeV'den farkı olarak kalan enerji pozitron ve elektronun kinetik enerjileri olarak ortaya çıkmaktadır. Çift oluşum mekanizmasında meydana gelen elektron ve pozitron soğurucu maddenin komşu atomları tarafından

yavaşlatılır ve pozitron en son bir elektronla reaksiyona girerek yok olur. Pozitronun enerjisinin tamamen harcandığı durumda süreç sonunda iki adet 0,511 MeV enerjili iki foton açığa çıkacaktır. Ayrıca momentumun korunumu gereği bu iki foton zıt yönlerde yayımlanacaktır. Gelen foton enerjisinin 1,02 MeV'den düşük olduğu durumlar için çift oluşum mekanizmasının gerçekleşmesi mümkün değildir. Şekil 2.10 çift oluşum mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 2.10. Çift oluşum mekanizması

2.2.4. Nötronların etkileşimleri

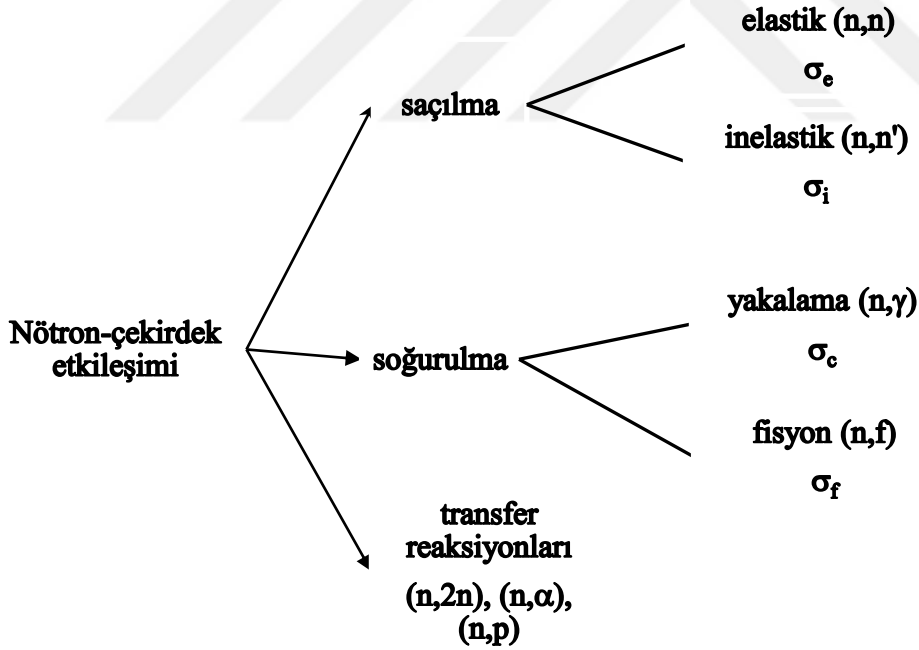
Gama ışınlarında olduğu gibi nötronlar da yüksüz parçacıklardır ancak gama ışını soğurucu atomun elektronları ile etkileşebilirken nötron atomun sadece çekirdeği ile etkileşmektedir. Ayrıca nötron etkileşimleri neticesinde elde edilen ikincil radyasyonlar çoğunlukla ağır yüklü parçacıklardır. Bu parçacıklar nükleer reaksiyonlar sonucu açığa çıkan nötronlar ya da enerji kazanmış soğurucu malzemenin çekirdeği olabilir.

Energilerine göre nötronlar farklı sınıflandırılmaktadır ve Çizelge 2.2 belirli enerji aralıkları için nötronların nasıl adlandırıldığını göstermektedir.

Çizelge2.2. Enerjilerine göre nötronlar [50]

Nötronlar	Enerji Aralığı	Dalga boyu(Å)	Hız (m/s)
Ultra-soğuk	≤ 300 neV	≥ 500	≤ 8
Çok soğuk	300 neV–0,12 meV	52,2–26,1	7,5–152
Soğuk	0,12–12 meV	26,1–2,6	152–1515
Termal	12–100 meV	2,6–0,9	1515–4374
Epitermal	100 meV–1 eV	0,9–0,28	4374–13,8x10 ³
Orta düzey	1 eV–0,8 MeV		
Hızlı	$>0,8$ MeV		

Nötronların madde ile etkileşmesinde gerçekleşen olaylar elastik saçılma, inelastik saçılma, nötron soğurma, ışımali yakalama, nötron yayılımı ve yüklü parçacıkların fırlatılması olarak belirtilir. Şekil 2.11, mümkün nötron-çekirdek etkileşim mekanizmalarını göstermektedir.



Şekil 2.11. Nötron-çekirdek etkileşim mekanizmaları[51]

Yavaş nötronlar için etkileşimler, soğurucu çekirdeklerle elastik saçılmayı ve büyük bir nötron kaynaklı nükleer reaksiyonları içerir. Küçük kinetik enerji değerlerine sahip olmalarından dolayı elastik saçılmada çok az enerji çekirdeğe aktarılır. Yavaş nötron reaksiyonları genellikle ikincil radyasyon oluşturabilecek nötron kaynakları olarak

tanımlanmaktadır. Detektörlerde potansiyel olarak nötron kaynaklı reaksiyonların olasılığı, artan nötron enerjisi ile birlikte hızlıca düşer ancak saçılma ihtimaliyeti daha büyüktür. Böyle durumlarda nötron kayda değer miktarda enerji aktarabilir. Böyle durumlarda ise ikincil radyasyonlar nötron çarpışmalarından algılanabilecek miktarda enerji toplayan geri tepme çekirdekleridir. Her saçılmada nötron enerjisini kaybetmektedir ve neticede yavaşlatılmış nötronlar elde edilmektedir. Hidrojen en verimli moderatör olarak bilinir ve nötron bir hidrojen çekirdeği ile tek bir çarpışmada bile tüm enerjisini kaybedebilir. Daha ağır çekirdekler için gelen nötron enerjisinin sadece belirli bir miktarı transfer edilebilir. Hızlı nötronların enerjisi yeterince yüksekse, geri tepme çekirdeğinin çarpışma sırasında uyarılmış durumlarından birine yükseldiği çekirdeklerle esnek olmayan saçılma meydana gelebilir. Neticede çekirdek gama ışını emisyonu yaparak uyarılmış olur ve nötron eşdeğer bir esnek çarpışmaya nazaran olduğundan daha fazla enerjiyi kaybeder [51].

2.2.5. Maruz kalınan radyasyon dozu

Radyasyon üreten tesislerde personelin korunmasında ve radyasyonun tıbbi uygulamalarında sıklıkla radyasyona maruz kalma ve doz kavramları önem arz etmektedir. Radyasyondan korunma amacıyla maruz kalınan doz miktarları için kesin tanımlamaların yapılması gerekmektedir. Bilindiği üzere iyonlaştırıcı radyasyon sadece özel aygıtlarla tespit edilebilir. Radyasyon tespit cihazları genel olarak radyasyonun madde ortamından geçerken oluşturduğu iyonizasyon potansiyeli prensibine göre çalışmaktadır [52].

Maruz kalınan radyasyon miktarının belirlenmesi ve gerekli tedbirlerin alınmasında temel radyasyon doz birimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilindiği üzere birim zamanda parçalanmış çekirdek sayısı aktivite olarak tanımlanmaktadır ve birimi SI birim sisteminde Becquerel'dir. Eski birimi Curie olup saniyede $3,7 \times 10^{10}$ parçalanmaya eşittir. Aktiviteden başka ışınlama dozu soğurulmuş doz, eşdeğer doz ve etkin doz kavramları da maruz kalınan radyasyon dozu miktarlarının belirlenmesinde önemlidir.

Yalnızca X veya gama ışını kaynakları için tanımlanan, sabit bir kaynağı çevreleyen uzayda her noktada sabit bir maruz kalma oranı mevcuttur. Gama ışını maruziyetinin temel birimi belirlenirken, havada sonsuz küçük hacim içinde oluşan ikincil elektronlar tarafından meydana gelen iyonizasyonun tanımlanması gerekmektedir. Gama veya X-ışını maruziyet birimi Röntgen olup X-ışınlarının havada yaratacağı etkinin büyüklüğü ışınlama

dozudur ve eski birimi Röntgen olup uluslararası birim sistemine göre birimi Coulomb/kilogram'dır. Birim kütle başına bir maddenin soğurduğu radyasyon enerjisi miktarı soğurulmuş dozu ifade etmektedir ve birimi Gray'dir. Eşdeğer doz ise belirli bir radyasyon türünün oluşturacağı biyolojik etkiyi temsil eder ve Sievert birimi kullanılır. Alınan radyasyon dozunun tüm vücutta doku ve organ için yüklenen risk düzeyi ise etkin doz kavramı ile açıklanabilir [53-55].

Belirli bir radyasyon türü için doz eşdeğeri H, dokuda bir noktada soğurulan D dozunun o noktadaki Q kalite faktörünün çarpımına eşittir. Ayrıca beta parçacıkları ve diğer hızlı elektronlar için doz eşdeğeri soğurulan doza eşittir. Enerjileri hızlı ikincil elektronlarla iletildiğinden dolayı X ve gama ışınları için de aynı durum söz konusudur. Ancak ağır yüklü parçacıklar için, beta parçacıklarına nazaran çok daha yüksek lineer enerji transferine sahip olduklarından dolayı doz eşdeğeri soğurulan dozdan büyüktür. Nötronlar ise enerjilerinin büyük bir kısmını ağır yüklü parçacık şeklinde iletmektedirler.

2.3.Nötron ve Gama Radyasyondan Korunma Yöntemleri

2.3.1. Korunma malzemeleri

Radyasyon madde içinde ilerlerken soğurulma ve saçılma mekanizmaları aracılığıyla bir miktar enerjisini kaybeder. İnsanoğlu ve diğer canlı yaşamının güvenliği açısından radyasyon seviyesinin güvenilir bir düzeye getirilmesinde radyasyondan koruyucu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Kurşun:

Yüksek yoğunluğu ve atom numarası nedeniyle kurşun, detektör kalkanlarının yapımında en yaygın kullanılan malzemedir. Yüksek yoğunluğu nedeniyle, birkaç santimetre kalınlığındaki kurşun, gama ışını detektörlerinin arka planında büyük bir azalma sağlayacaktır. Kurşun, kozmik ışın bileşenlerinin çoğunu ortadan kaldırmada etkilidir, ancak yaklaşık 10 cm'nin üzerindeki kalınlıklar içindeki kozmik etkileşimlerden kaynaklanan ikincil radyasyonların birikmesi nedeniyle ortaya çıkan sayım hızında artmaya neden olabilir.

Kurşun, gama ışını zırhlama yapımında "kurşun tuğlalar" şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tuğlalar arasındaki çatlaklardan kaynaklanan olası problemler, kalkını çok katmanlı olarak inşa ederek veya birbirine geçmeli yüzeylere sahip özel şekillendirilmiş tuğlalar kullanarak aşılabılır. Kurşun kolay bir şekilde katı şekillere dökülür, ancak katılaşmış zırhlarda gözenek veya boşlukları önlemek için döküm işleminde dikkatli davranılması gerekir. Kurşun püskürtme yöntemi kullanılarak uygun boyut ve şekillerdeki kap düşük yoğunluklu bir zırh haline getirilebilir. Sıradan kurşun normalde düşük seviyeli kirleticilerin neden olduğu doğal aktivite içerir ve bu nedenle zırhlama yapımında özel olarak rafine edilmiş veya çok eski kaynaklardan geri kazanılmış kurşun tercih edilir.

Çelik:

Kurşun malzemesinin gama ışını koruyucusu olarak kullanılmasının maliyetli olması durumunda demir veya çelik gama ışını zırh malzemesi olarak kullanılabilir. 1950'den sonra üretilen çelik, savaş öncesi çeliğe göre gözle görülür şekilde daha yüksek aktiviteye sahiptir (İkinci Dünya Savaşı donanma gemilerinden kurtarılan çelik, önemli sayıda zırh yapımında kullanılmıştır.) Hem atom numarası hem de yoğunluğu kurşunkinden oldukça düşük olduğundan, çok düşük arka plan uygulamaları için uygun kalınlığa ihtiyaç vardır (en az 10 cm üzeri).

Tungsten:

Yüksek atom numarası ve 19 g/cm^3 'ün üzerindeki yüksek yoğunluğu ile tungsten, küçük zırhlar veya kolimatörler için dikkate alınması gereken bir malzemedir. Saf tungsten metalinin dökülmesi veya işlenmesi zordur, ancak toz metalurjisi işlemleri ile sinterlenmiş (parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine yol açan ısıtma işlemi) bir tungsten formu üretebilir. Yoğunluğu saf metalin yoğunluğuna kıyasla biraz altındadır ve işlenebilir özelliğe sahiptir. Diğer olasılıklar arasında, saf tungsten yoğunluğunun %86 ila 97'sini koruyan, aynı zamanda mükemmel işlenebilirliğe sahip olan nikel/demir veya nikel/bakır ile tungsten alaşımları yer alır. Tungstenin toksik özellikleri nedeniyle işlenmesinde önemli güvenlik sorunları vardır.

Beton:

Büyük hacimli zırhların yapımında düşük maliyeti sebebiyle beton sıklıkla kullanılır. Bununla birlikte, malzemenin doğal radyoaktivitesi, ^{40}K , uranyum ve toryum içeriği nedeniyle önemli olabilir. Betonun aktivitesi oldukça değişkendir ve büyük ölçüde özel formülündeki ağır element konsantrasyonunun doğasına bağlıdır. En büyük konsantrasyona sahip (barit betonu) bu betonlar, koruyucu malzeme olarak en iyi gama ışını soğurma özelliğine sahiptir, ancak aynı zamanda arka plana katkıda bulunabilecek en yüksek içsel radyoaktiviteye sahiptir. Bu nedenle, laboratuvarlar bazen düşük barit konsantrasyonu olan beton kullanılarak inşa edilir veya betondaki radyoaktivitenin etkisini azaltmak için iç yüzey çelik veya kurşunla kaplanabilmektedir.

2.3.2. Nötron zırhlama

Gama ışınları için olanlarla karşılaştırıldığında, nötron koruyucu malzemelerin seçiminde tamamen farklı ilkeler geçerlidir. Yüksek enerjili nötronların, termal enerji bölgesine yavaşlatılabilmesi için yüksek soğurma kapasitesine sahip malzemelerin seçimi önemlidir. Bu tür malzemeler moderatör malzemeler olarak ifade edilmekte olup, en etkili moderatörler düşük atom numaralı elementlerdir. Bu nedenle hidrojen içeren malzemeler, çoğu nötron zırhlarının ana bileşenini oluşturmaktadır. Geniş bir soğurma spektrumu elde etmede su, beton ve parafin toplu zırhlama için ucuz kaynaklardır. Bu tür malzemelerde hızlı nötronların ortalama serbest yolları dikkate alındığında, hızlı nötronların etkin bir şekilde kontrol altına alınması için 1 metre veya daha fazla kalınlık gereklidir ki maliyeti artıran faktörler arasında yer alır. Hem maliyeti düşürmek hem de daha ince kalınlıklarda zırhlama işleminin gerçekleştirilmesi için yüksek yoğunluklu polietilen malzemeler önerilmektedir [38].

Nötron bir kez zırhlandıktan sonra uygun bir yakalama reaksiyonu ile tamamen zırhlama gerçekleşebilir. Ayrıca, hidrojende yakalama, yüksek enerjisi nedeniyle birçok dedektör tipinde özellikle istenmeyen bir 2,22 MeV gama ışınının serbest kalmasına yol açar. Bu nedenle, nötron zırhlarında normal olarak ikinci bir bileşen kullanılır, ya moderatör ile homojen olarak karıştırılır ya da iç yüzeyine yakın bir soğurucu katman olarak bulunur. Bu katkı maddesi, yüksek bir nötron yakalama kesitine sahip olacak şekilde seçilmiştir, böylece nötronlar bu malzeme içinde soğurulacaktır [38].

Termal nötronların ve akabinde oluşacak ikincil gama ışınlarının soğurulmasında kadmiyum malzemesi yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak kadmiyumun zırh uygulamasını engelleyebilecek en önemli sorun yüksek zehirleyici etkiye sahip olmasıdır.

2.4. Poliüretan Köpükler

Poliüretan köpüklere üretan köpükler de denir ve PUR kısaltması, poliüretan için yaygın olarak kullanılır. Esnek ve sert olmak üzere poliüretan köpükler iki ana kategori altında incelenmektedir. PUR köpüklerin iskeletini polyol ve poli-izosiyanat oluşturmaktadır. Yapı taşları olarak polyol, birleştirme maddesi olarak poli-izosiyanatlar kabul edilebilir. Bu nedenle poliüretan köpükler pek çok malzemenin yapı taşını oluşturmaktadır. Doğru polyol ve izosiyanat seçimi ile istenen özelliklere sahip işlevsel poliüretan köpük hazırlanabilmektedir. Geri kazanımı olmayan yarı sert köpükler ise sert köpük sınıfına dâhil edilmektedir.

Poliüretan köpükler için temel hammaddeler poli-izosiyanat, köpürtme ajanı, katalizör ve yüzey aktif maddedir. Önceleri, poli-izosiyanatbazlı poliüretan köpükler polyester olmakla birlikte 1960'lardan sonra polieterpolyol bazlı köpükler hem esnek hem de sert köpüklerin en önemli temsilcileri olmuşlardır.

2.4.1. Esnek poliüretan köpükler

Esnek poliüretan köpükler, polieter köpükler ve polyester köpükler olarak sınıflandırılır. Ayrıca, süreç bazında slabstock köpükleri ve kalıplanmış köpükler olarak sınıflandırılabilirler. Fiziksel özellikler veya köpürme işlemleri ile aşağıdaki gibi alt sınıflara ayrılabilirler.

Levha formundaki slabstock köpükler; geleneksel polieter köpük, yüksek dirençli (HR) köpük, viskoelastik köpük, süper yumuşak köpük, enerji soğurucu köpük, yarı esnek köpük ve esnek polyester köpük içermektedir. Kalıplanmış köpükler ise sıcak ve soğuk kalıplanmış köpükler olmak üzere iki alt grupta incelenmektedir [56].

Köpük endüstrisi, köpük sertliğini çeşitli farklı testlerle ölçer. Bunlardan birisi konfor indeksi olarak da adlandırılan girinti yükü sapması (ILD) olup esnek köpüklerde etkileyici destek katsayısı (sag faktör veya konfor faktörü) ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$DestekKatsayı = \frac{\%65ILD}{\%25ILD} \quad (2.12)$$

Esnek köpükler ayrıca konfor faktörüne göre de sınıflandırılır. Esnek polyester köpük için destek katsayısı (sag faktörü)1,2-1,4, esnek polieter köpük için 1,6-2,0 ve son olarak yüksek esnek köpük için 2,4-3,0'dır.

Sıvı köpürtme karışımının hareketli bir taşıyıcı üzerine sürekli olarak dökülmesiyle yapılan sürekli köpük somunu, slabstock köpük olarak adlandırılır. Slabstock köpük işlemi hem polieter hem de polyester köpüklerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kalıplanmış esnek poliüretan köpükler, otomotiv koltukları, çocuk koltukları, koltuk başlıkları, otomobiller için titreşim sönümleme, kolçaklar, mobilya minderleri ve şilteler gibi karmaşık şekilli ürünlerin sıcak ya da soğuk kalıplama işlemiyle üretiminde kullanılmaktadır. Sıcak ve soğuk kalıplanmış esnek köpükler olarak iki kısma ayrılırlar. Sıcak kalıplanmış köpükler, toluendiizosiyanat (TDI) ile polieterpolyollerden oluşan bir işlem kullanılarak üretilir. Soğuk kalıplanmış esnek poliüretan köpük ise düşük kalıp sıcaklıklarında (60-70°C gibi) 10 dakikalık kalıp tutma süresinde hazırlanır, ardından ayrı bir fırında veya oda sıcaklığında sonradan sertleştirilir. Sıcak kalıplanmış köpükler otomotiv koltukları, nemli ve eskimiş kompresyon setlerinde soğuk kalıplanmış köpüğe kıyasla oldukça avantajlıdır. Yüksek esnek köpükler, geleneksel esnek köpüklerden daha yüksek esnekliğe sahiptir ve destek katsayısı 2,4-3,0 arasında değişir.

Visko-elastik (VE) köpükler, sıkıştırma işleminden sonra yavaş toparlanma ile karakterize edilebilmektedir. Bu tür yapıya sahip köpükler ayrıca düşük dirençli köpük, yavaş toparlanan köpük, ergonomik köpük ve sıcaklığa duyarlı köpük olarak da adlandırılır. Visko-elastik köpükler NASA tarafından 1960'ların başında kullanılmasına rağmen son yıllarda popülerite kazanmıştır.

Yumuşak veya süper yumuşak slabstock köpükler, ağırlıkça 6000-12000 mol gibi yüksek moleküler ağırlığa sahip polietertrioller kullanılarak üretilir. Uygun bir poliizosiyanat, toluendiizosiyanattır. Kabartıcı ajan olarak kullanılacak madde, tek başına su veya sulu fiziksel bir şişirici maddenin birlikte kullanımı olabilir. Süper yumuşak köpükler genel olarak düşük çapraz bağ yoğunluğuna sahip olup köpük yoğunluğu ise 20-30 kg/m³değerleri arasında değişkenlik göstermektedir.

Yarı esnek slabstock köpüğü ve kalıplanmış köpükler, yüksek mekanik dayanım ve enerji soğurma kapasitelerine sahiptir. Tampon göbekleri, yan darbe emici kapı panelleri ve otomotiv çatısının altındaki tavan döşemeleri gibi pek çok uygulamalarda bu tür köpükler kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek enerji soğurma özellikleri ile karakterize edildiklerinden dolayı enerji soğurucu (EA) köpük olarak da adlandırılır.

Ağsı köpükler, hücre zarı içermeyen %100 açık hücreli iskeletlere sahiptir. Entegre yüzey köpüğü ise self yüzey köpüğü olarak da bilinir. Bu tür köpükler yüksek yoğunluklu cilt köpüğü ile düşük yoğunluklu çekirdek köpüğü olmak üzere sandviç yapı ile tanımlanmaktadır. Hem esnek hem de sert olan entegre yüzey köpükler açık kalıp işlemiyle ya da reaksiyon enjeksiyonu işlemiyle hazırlanabilir. Diğer bir köpük türü olan mikroselüler üretilen elastomerlere köpüklü üretilen elastomerler de denir. Yoğunlukları yaklaşık 320-960 kg/m³ aralığındadır.

2.4.2. Sert poliüretan köpükler

Sert poliüretan köpükler, yüksek oranda kapalı hücrelerden oluşur ve ilave ısı gerektirmeden ortam sıcaklıklarında hazırlanmaktadır. Ayrıca bu tür köpükler çelik, ahşap, ısı ile sertleşen reçineler ve lifler gibi pek çok malzemeye yapışmaktadır. Köpük yoğunluğu, 20 ile 3000 kg/m³ arasında geniş bir aralığa sahip olup, petrol ürünleri ve diğer polar olmayan çözücülere karşı oldukça dayanıklıdır. Düşük yoğunluklu köpükler, yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Püskürterek köpürtme, yerinde dökerek köpürtme, havadaki nemle köpürtme gibi yöntemlerle ile yapılabilirler.

Sert poliüretan köpükler, buzdolapları, dondurucular, soğutucu kamyonlar, soğutucu konteynerler, soğutucu depolar, bina ve inşaat, kimya-petrokimya tesisleri, su ısıtıcıları, portatif buz kutuları ve termos şişeleri gibi birçok ısı yalıtım ürünüde uygulanmaktadır.

Sert poliüretan köpükler, yeryüzündeki enerji tasarrufuna önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Genel olarak poliüretan malzemeler yapılarına, kaynaklarına, termal dayanımlarına, yapısal özellik ve uygulama alanlarına göre farklı kategoriler altında incelenir. Yapılarına göre lineer ve çapraz bağlı polimerler olarak iki gruba ayrılır. Kullanılan kaynağa göre ise petrol kaynaklı ya da biyolojik kaynaklı polimerler mevcuttur. Yapısal özellikleri ve uygulama alanları göz önüne alındığında; köpük polimerler, termoplastik elastomer, yapıştırıcı, reçine, elastomer, iyonomer ve fiber malzemeler bu kategoriye dâhil edilir. Termal özelliklerine göre ise termoset ve termoplastik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir [57].

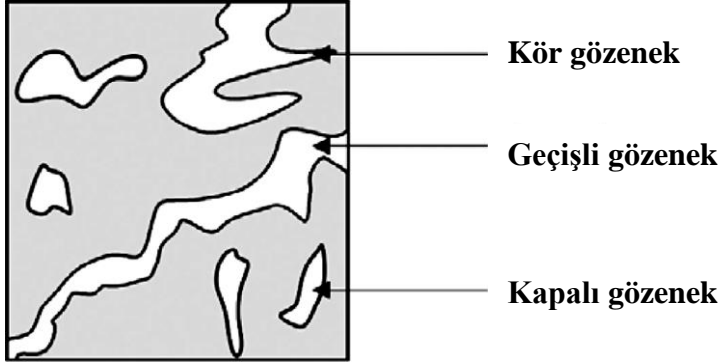
2.5.Polimer Köpüklerin Yapısal Özellikleri

Polimer köpükler, polimer matrislerin karakteristik özellikleri ile üretimde oluşan gaz baloncuklarının oluşumundan etkilenen fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahip yegâne malzemelerdir. Kullanılan polimer matris ile üretimde oluşan gaz çıkışının, polimer köpüğün mekanik, termal ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişki oluşan köpük hücre yapısını ve buna bağlı olarak köpük yoğunluğunu ve genişleme oranını etkilemektedir. Belirtilen bu özelliklere bağlı olarak polimer köpükler köpük yapılarına, ortalama hücre boyutlarına ve yoğunluklarına (ya da gözenekliliklerine) göre de sınıflandırılabilir.

Polimer köpüklerin yoğunlukları sahip olduğu gözenekli yapıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Gözeneklilik oranı, gözenek hacminin köpük malzemesinin toplam hacmine oranı olarak ifade edilmektedir ve polimer köpüklerin yapılarını karakterize etmede kullanılır. Özellikle köpük oluşum sürecinin homojen dağılımı ile köpük malzemenin mekanik özellikleri hakkında tamamlayıcı bilgiler verir. Şayet köpük malzemesinin gerçek hacmi bilinmiyorsa, farklı görüntüleme teknolojileri kullanılarak enine kesitin iki boyutlu görüntüleri kullanılarak gözenek türü gibi morfolojik özellikler belirlenebilir [58].

Polimer köpüklerde gözenekler aynı zamanda hücre olarak da ifade edilir ve üç ana kategoriye ayrılmıştır. Şekil 2.12 polimer köpüklerde meydana gelebilecek farklı köpük türlerini göstermektedir. Kapalı gözenekler tamamen malzeme yüzeyinden ayrılmış olup

kör gözeneklere yüzeyden erişilebilir fakat diğer ucu malzeme içinde son bulur. Geçişli gözeneklerde ise malzemelerin iç ve dış yüzeyleri arasında bağlantı sağlanır.



Şekil 2.12. Polimer köpüklerde farklı gözenek türleri [58]

Gözenek türlerine göre sınıflandırıldığında, polimer köpüklerin farklı uygulama alanlarına sahip olduğu görülebilir. Özellikle kapalı hücre yapısına sahip polimer köpükler diğer hücre yapısına sahip polimer köpüklere nazaran daha iyi yalıtım özellikleri göstermektedir. Ayrıca yüksek yoğunluğa sahip oldukları için ürünün ticari fiyatını artıran polimer hammaddenin yüksek oranda kullanımını gerektirir. Bir diğer sınıflandırma işlemi polimerlerin tane boyutu göz önüne alınarak da yapılabilmektedir.

2.6. Polimerik Köpük Üretimi ve Köpük Oluşum Süreci

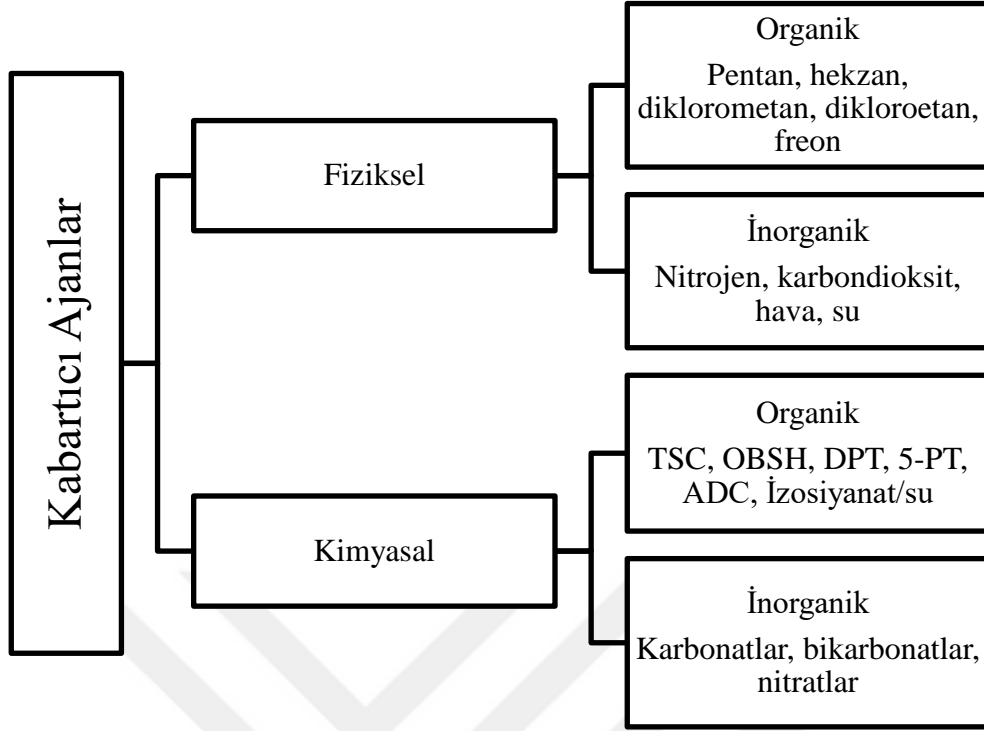
Polimerik köpük malzemelerin üretimi mekanik, fiziksel ya da kimyasal yöntemler kullanılarak mümkün olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler ise şu şekilde sıralanabilir.

- Kimyasal kabartıcı ajanların, ya polimerizasyon esnasında açığa çıkan ekzotermik reaksiyon ısısının sonucu olarak ya da dışarıdan ısı enerjisinin verilmesiyle nitrojen ya da karbondioksit gazı veya her ikisini de üreterek termal ayrışması
- Gaz baloncuklarının polimer matris içinde hapsedilmesi ya da polimer sistemin gaz kullanarak köpürtülmesi
- Polimer kütlesi içinde var olan florokarbonlar veya metilen klorür gibi düşük kaynama noktasına sahip sıvıların ya ekzotermik reaksiyon sonucu olarak ya da dışarıdan ısı verilerek uçurulması.

- d. İzosiyanatın karbondioksit oluşturmak üzere su ile reaksiyonu sonucu meydana gelen olaylara benzer olarak polimerleşme esnasında reaksiyonun ekzotermik ısısı tarafından üretilen gazların buharlaşması.
- e. Sistemdeki basıncın düşürülmesi ile birlikte polimer malzemesi içinde çözünmüş gazın genleşmesi
- f. İçi boş mikro kürelerin polimerik malzemeye dâhil edilmesi (mikro küreler içi boş cam veya içi boş plastik boncuklar olabilir)
- g. Gazla doldurulmuş boncukların ya ısı uygulanmasıyla ya da reaksiyon ısısı ile polimer kütlesi içinde genleşmesi (polistiren boncukların bir poliüretan veya epoksi reçine sisteminde genleşmesi)

Polimer köpük malzemesinin üretiminde, önce sıvı bir ortamda gaz kabarcıklarının oluşumu, ardından sıvı polimerin viskozitesi arttıkça bu kabarcıkların büyümesi ve son olarak sistemin stabilizasyonu işlemleri gerçekleşmektedir. Hücresel reçine matrisinin katılmasıyla süreç tamamlanmaktadır [59].

Polimer köpüklerin üretiminde pek çok köpürtme ajanı kullanılmaktadır ve polimer köpüklerin bilinen türleri poliüretan köpük, polistren ve polyolefin olmak üzere üç ana kategoride incelenir. Poliüretan köpükler ise esnek ve rijit poliüretan köpükler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.13 köpürtücü (kabartıcı) ajan türlerini göstermektedir.



Şekil 2.13. Kabartıcı (köpürtücü) ajanların sınıflandırılması[60]

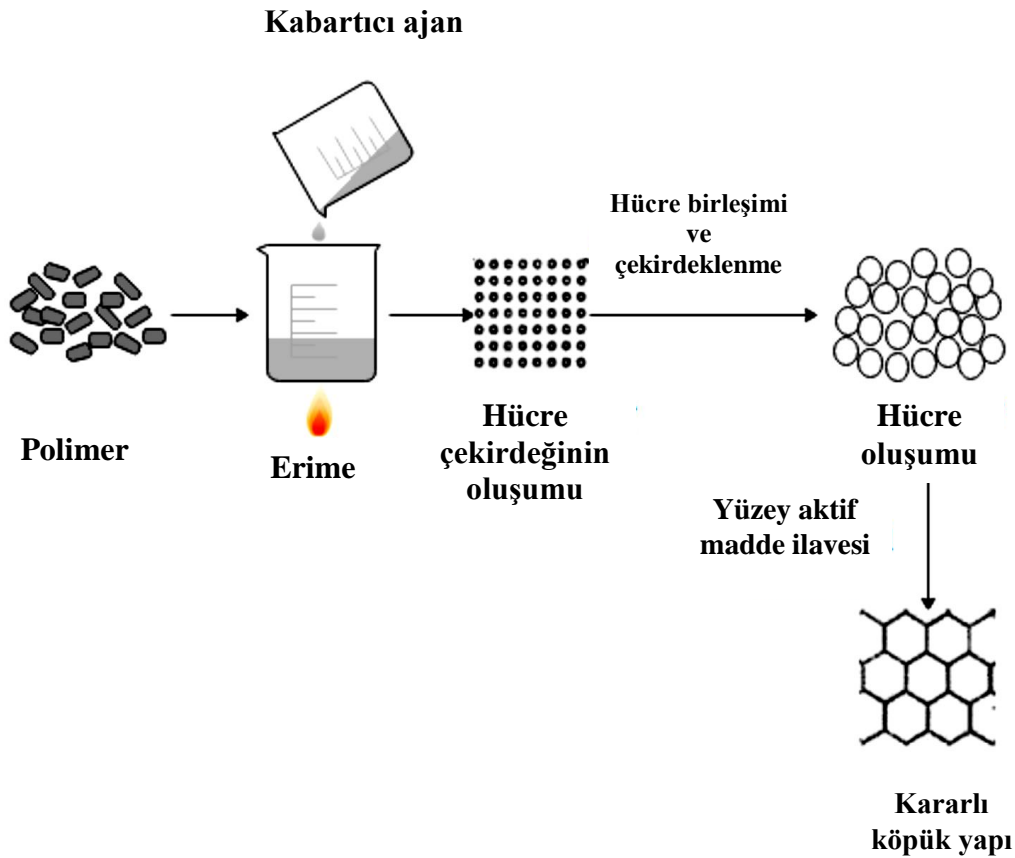
İyi bir köpürtücü ajan, toksik olmayan, yanmaya dayanıklı, kokusuz, yüksek buhar basıncına ve çözünürlüğe sahip olmalıdır. Ayrıca termal olarak kararlı, kimyasal olarak inert olmalı ve kauçuk matrisin yapısal özelliklerini etkilememelidir. Bu tür fiziksel kabartıcı ajanlar köpük oluşumunda fiziksel durumlarını değiştirerek gaz üretirler. Öte yandan bir miktar sıkıştırılmış gaz yüksek basınç altında matrise enjekte edilebilir.

Kimyasal kabartıcı ajanlar ise elastomer köpükler üretmek için kullanılmaktadır. Çoğunlukla amonyum, sodyum ve potasyum karbonatlar, bikarbonatlar ve nitratlar gibi inorganik kimyasal kabartıcı ajanlar açık hücre oluşumunu sağlarlar. Genellikle ısı ve asitlerin etkisi altında karbondioksit ve su açığa çıkarılırlar[60].

Polimer köpüklerin köpürme süreci çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kimyasal köpürme ajanının bozunumu veya fiziksel ajanın enjeksiyonundan sonra çekirdeklenme adımı olarak tanımlanan yeni bir faz (kabarcık fazı) ortaya çıkmaktadır. Büyüme fazında kabarcık çekirdekleri son şeklini alana kadar hacmini artırır. Her iki aşama, viskozite, çözünürlük, yayılma yüzey gerilimi ve camsı geçiş sıcaklığı gibi fiziksel parametrelerden etkilenmektedir. Fakat hem kürlenme hem de köpürme işlemleri

aynı anda gerçekleştiriliyorsa çekirdeklenme ve büyüme süreçlerini kontrol etmek oldukça karmaşık olacaktır. Özellikle tek başına köpürme işlemi, bazı termodinamik olayları içeren oldukça karmaşık bir süreçtir. Hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi, oluşacak köpük yapılarını ve kalitesini etkileyen ana faktörler olduğundan dolayı bu iki mekanizmanın daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Çekirdeklenme aşamasında çok az miktarda gaz molekülü kullanıldığından dolayı yüksek hücre yoğunluğuna ve tek tip hücre morfolojisine sahip bir ürün elde etmek oldukça zordur. Bu nedenle üretilen gazın çoğu hücrenin büyümesinde kullanılır. Ayrıca kauçuk köpürtmede matrisin viskoelastik davranışında da önemli bir rol oynar. Düşük viskozite hücre çökmesine ve sonuç olarak hücre birleşmesine yol açarken yüksek elastikiyet kabarcıkların çekirdeklenmesini ve büyümesini kısıtlamaktadır [58].

Polimerin köpüklerin oluşum mekanizmasında son adım oluşan köpüğün kararlı hale gelmesiyle mümkündür. Şekil 2.14 polimer köpüklerin oluşum sürecini aşamalı olarak göstermektedir.



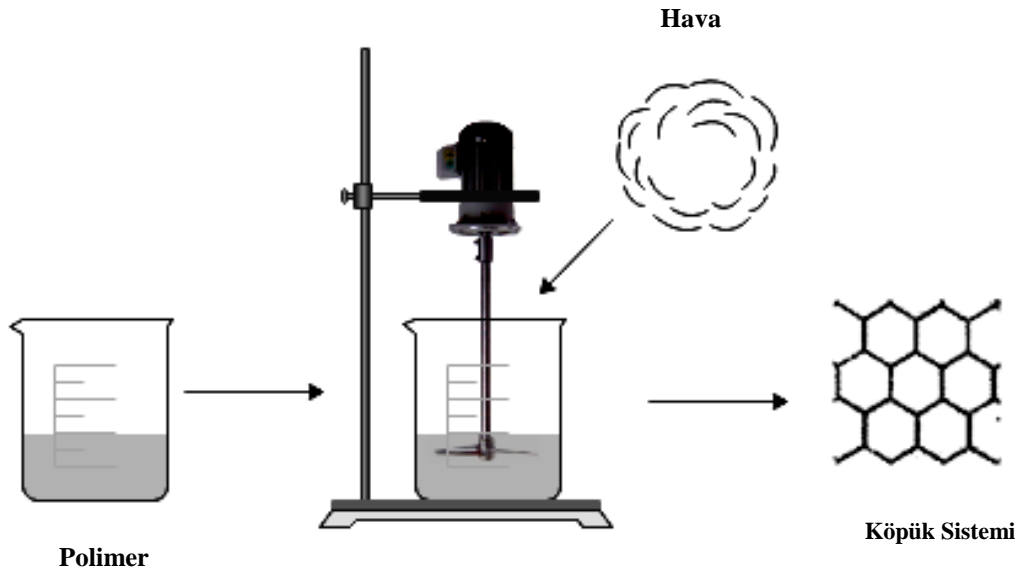
Şekil 2.14. Köpük oluşum sürecinin şematik gösterimi[58]

2.6.1. Hücre oluşumu

Köpürtücü ajan veya gaz belirli koşullar altında eriyik formdaki polimere ilave edildiğinde polimer-gaz çözeltisi oluşumundan kaynaklı büyük miktarda gaz açığa çıkar. Gaz miktarı aşamalı olarak arttığında çözelti aşırı doymuş hale gelecek ve çözeltiden gaz uzaklaşacaktır. Uzaklaşan bu gazlar çekirdeklenme vasıtasıyla hücre çekirdeğini oluşturur. Hücre çekirdeğinin oluşumundan sonra hücre içindeki gaz basıncı hücrenin çapı ile ters orantılıdır. Böylece daha küçük hücrelerin içindeki gaz basıncı daha büyüktür. Farklı boyutlara sahip iki hücre birbirine yaklaştığı zaman küçük hücreden büyük hücreye doğru gaz yayılımı gerçekleştiğinden dolayı hücreler birleşmektedir. Çekirdeklenmenin bir sonucu olarak hücre sayısı artar ve hücre boşluklarının çapı artarak hücre büyümesini sağlar. Çok sayıda hücrenin oluşumu ve büyümesi sebebiyle köpük malzemenin hacmi ve yüzey alanı sürekli olarak artar ve hücre duvarı incelmeye başlar. Bu durumda köpük sistem kararsız hale gelir ve malzemeyi kararlı yapıya ulaştırmak için ya soğutma işlemi ya da yüzey aktif madde ilavesi gerekmektedir [58].

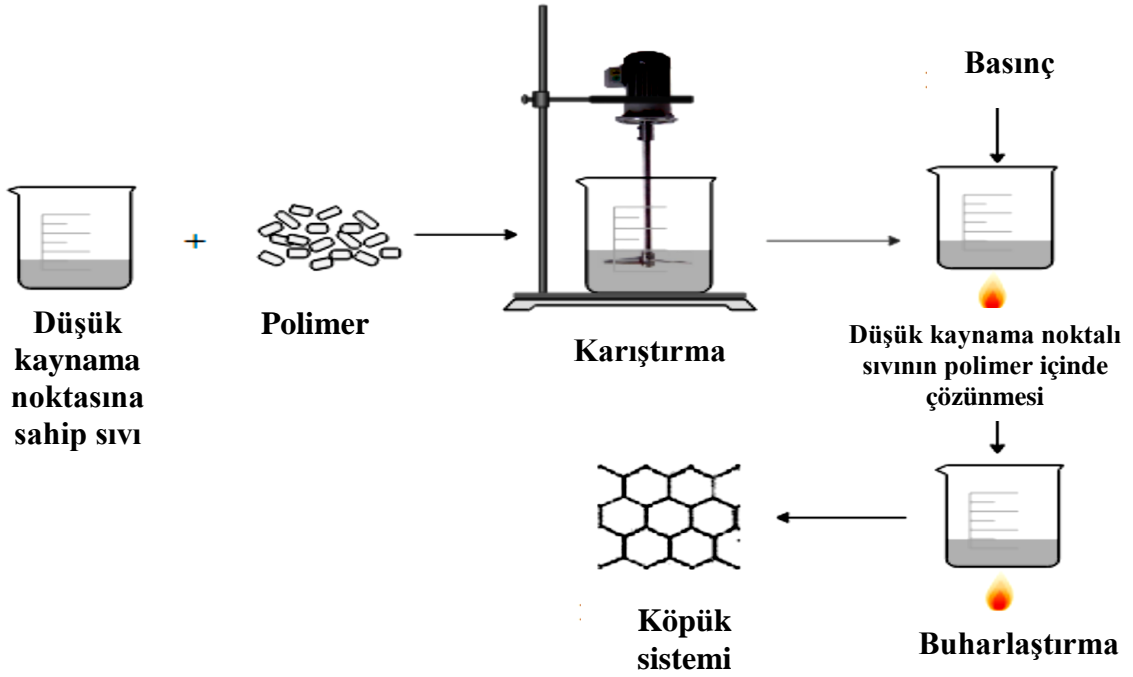
2.7. Köpürtme Yöntemleri

Polimer köpüklerin üretilmesi yaygın köpürtme yöntemleri arasında mekanik, fiziksel ve kimyasal köpürtme yer almaktadır. Mekanik köpürtmede köpürtücü ajan kullanılmamaktadır. Deney düzeneğinin kolay kurulumu, güvenilir olması, düşük maliyet ve yüksek verimden dolayı tercih edilen yöntemler arasında bulunmaktadır. Şekil 2.15 bu çalışma kapsamında da kullanılan mekanik köpürtme sistemini göstermektedir.



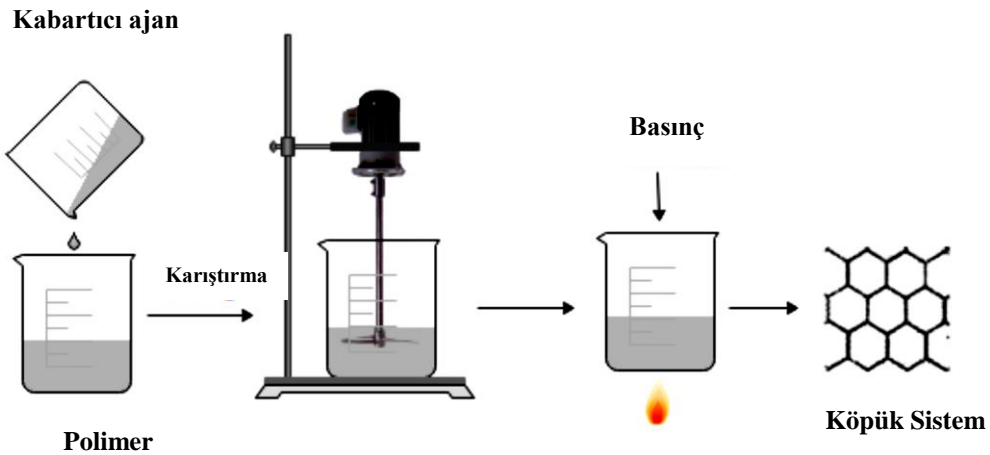
Şekil 2.15. Mekanik köpürtme işleminin şematik gösterimi [58]

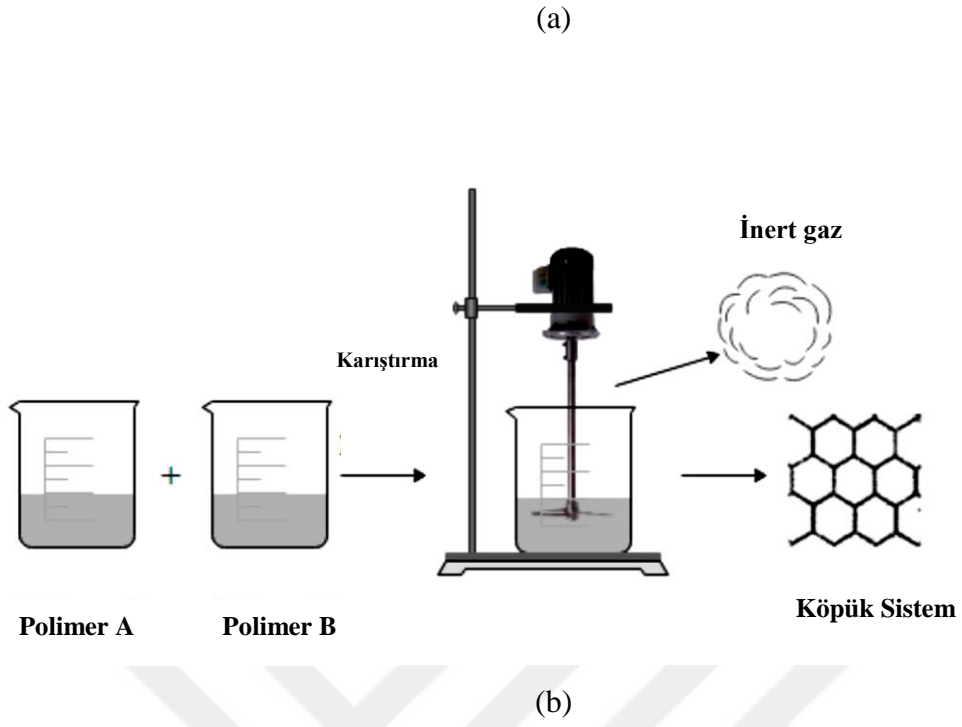
Fiziksel köpürtme yönteminde kaynama noktası düşük sıvı ile bir polimer karıştırılır ve sonrasında Şekil 2.16'da gösterildiği gibi ısıtma ve basınç yoluyla köpürtme işlemi gerçekleştirilir. Fiziksel köpürtme işlemi, karbon dioksit ve nitrojene kıyasla köpürtme süreci oldukça ucuzdur. Ancak "injection molding" gibi özel cihazlara gerek duyulduğundan dolayı bu yöntem mekanik köpürtme yöntemine göre dezavantaj içermektedir.



Şekil 2.16. Fiziksel köpürtme işleminin şematik diyagramı [58]

Kimyasal köpürtme işlemi iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Birinci yöntemde köpürtücü ajan eriyik polimere ilave edilir ve gaz yayararak ayrıştırılır. Sonrasında polimer Şekil 2.17a'da görüldüğü gibi basınç ya da ısı yoluyla köpürtülür. İkinci yöntemde ise Şekil 2.17b'de gösterildiği gibi inert gaz oluşacak şekilde iki polimer arasındaki kimyasal reaksiyonla köpürtme işlemi gerçekleştirilir.





Şekil 2.17. Kimyasal köpürtme sürecinin şematik diyagramı [58]

3. YÖNTEM

3.1.Poliüretan Köpük Malzemelerin Üretimi

Poliüretan köpüklerin üretiminde hidroksil numarası 160 olan hint yağı bazlı polyol (Kısan Agro ürünü) ile SET Chemical'dan %31 NCO içeren difenilmetan 4,4'-diizosiyant temin edilmiştir. Yüzey enerjisini azaltarak ince ve küçük bir hücre elde etmek için kullanılan silikon yüzey aktif madde (Niax L-626) ile jelleştirici katalizör (Dabco-33-LV) Air Products (Dallas, TX, ABD) tarafından sağlanmış ve alındığı gibi kullanılmıştır. Zincir uzatıcı olarak PEG-300 (hidroksil numarası = 356-394, Mn = 280-320 g/mol) ve gliserin (Mn = 92,09 g/mol) sırasıyla Tekkim (İstanbul, Türkiye) ve Evyap (İstanbul, Türkiye) tarafından sağlanmıştır. Polyol, yüzey aktif madde, jelleştirici katalizör ve isteğe bağlı katkı maddeleri, 1 litrelik bir HDPE kap içinde tartılmış ve IsoLab mekanik karıştırıcı kullanılarak 2200 rpm'de 15 saniye karıştırılmıştır. Önceden tartılmış olan MDI ilave edilmiş, karışım 10 saniye daha 2200 rpm'de tekrar karıştırılmış, reaksiyona giren poliüretan (PU) daha sonra reaksiyon kabına aktarılmış ve oda sıcaklığında 48 saat kürlenmesi için bekletilmiştir. NCO endeksi 1.00 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çeşitli PEG-300 ve gliserin içeriklerine sahip beş çeşit esnek PU numunesi hazırlanmış ve sentezlenmiştir. Esnek poliüretan köpüklere ait malzeme içerikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Poliüretan köpüklerin içerik değerleri (pphr)

	Castoroil	PEG 300	Dabco-33LV	Niax L-626	Glycerine
K1	100	2,5	0,3	1	-
K2	100	5	0,3	1	-
K3	100	7,5	0,3	1	-
K4	100	10	0,3	1	-
K5	100	-	0,3	1	2,5

3.2.Poliüretan Köpüklerin Nötron Geçirgenlik Deneyleri

Poliüretan köpükler için nötron geçirgenlik deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Nötron kaynağı olarak 2 Ci'lik aktiviteye sahip, ²³⁹Pu-Be Nötron

Howitzer kullanılmıştır. Üretilen poliüretan köpüklerin termal nötronları soğurma oranının incelenmesi için hızlı nötronlar öncelikle parafin ile termal nötronlara yavaşlatılmıştır. Malzemeyi geçen termal nötronların oranı PM1401K model He-3 dedektörü ile tespit edilmiştir.

Geçirgenlik oranlarının belirlenmesi için malzemeye gelen nötron akısının şiddeti (I_0) belirlenmiş ve sonrasında farklı kalınlıklara sahip malzemeleri geçen nötron akısının şiddeti (I) tespit edilmiştir. Ölçümlerin doğruluğu için nötron geçirgenlik ölçümleri üç kere tekrar edilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Nötron geçirgenlik deneyleri poliüretan köpüklerin termal nötronları soğurma kapasitelerinin belirlenmesinde önemlidir. Malzemeyi geçen nötron akısı şiddetinin malzemenin kalınlığı ile olan bağıntısı Eş. 3.1 ile verilen Lambert Beer yasası ile izah edilmektedir.

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t x} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda I_0 ve I sırasıyla gelen ve malzemeyi geçen nötron akısının şiddetini temsil etmektedir. I/I_0 olarak belirlenen nötron geçirgenlik oranı farklı kalınlıklara (x) sahip poliüretan köpük malzemeleri için Origin programında çizilmiş ve grafikten toplam makroskopik etkileşim tesiri kesiti değerleri (Σ_t) hesaplanmıştır. Üretilen poliüretan köpüklerin soğurma kapasiteleri hakkında daha net bilgilere erişilebilmesi için geçirgenlik deneylerinden elde edilen yarı değer kalınlığı onda bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol parametrelerinin de hesaplanması gerekmektedir. Yarı değer kalınlığı, onda bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol terimlerin İngilizce karşılığının baş harflerinin kısaltması olarak sırasıyla HVL, TVL ve MFP ile ifade edilmektedir ve Eş. 3.2, 3.3, 3.4 ile hesaplanmaktadır. HVL değeri gelen nötron akısının yarısının malzeme tarafından soğurulduğu kalınlık değerini, TVL gelen nötron akısının onda bir değerine düştüğü andaki kalınlık değerini ve son olarak MFP nötronun madde içinde ilerlerken çarpışmadan alacağı maksimum yol uzunluğunu belirtmektedir.

$$HVL = \ln 2 / \Sigma_t \quad (3.2)$$

$$TVL = \ln 10 / \Sigma_t \quad (3.3)$$

$$MFP = 1 / \Sigma_t \quad (3.4)$$

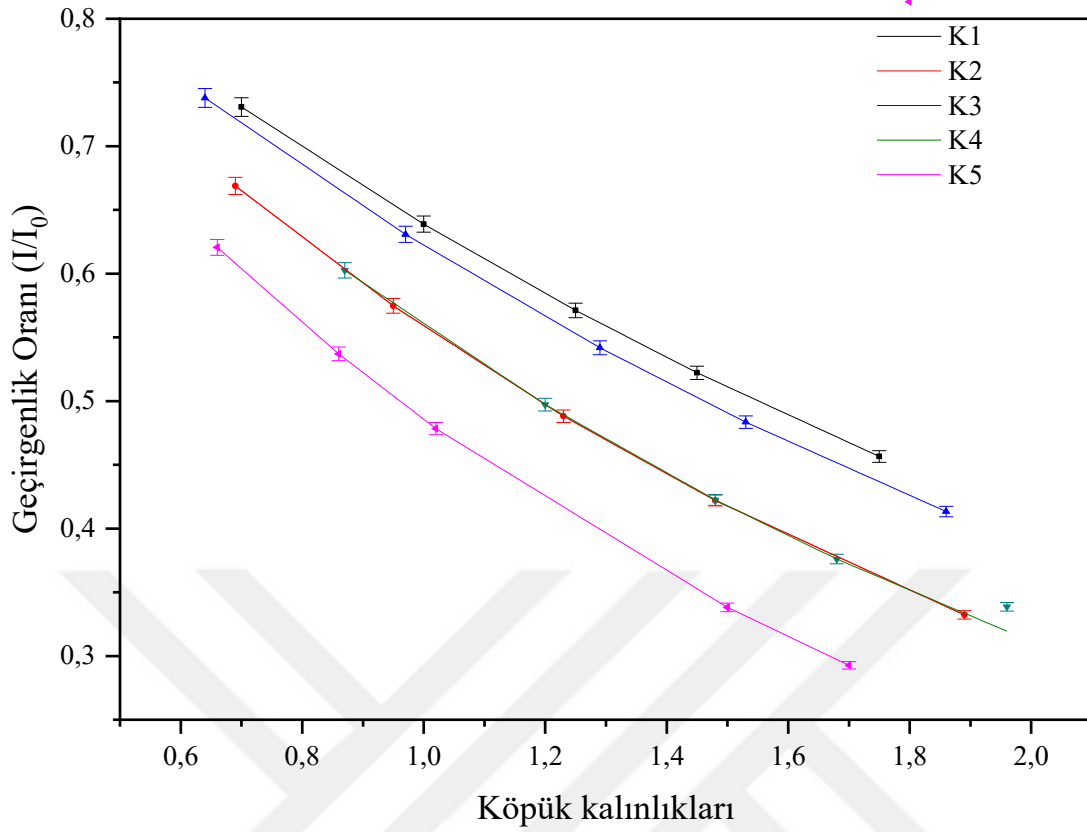
4. BULGULAR VE YORUM

Esnek poliüretan köpüklerin termal nötronları soğurma özelliklerinin incelendiği tez çalışması kapsamında toplam makroskopik etkileşme tesir kesitleri, geçirgenlik oranı olarak tanımlanan I/I_0 değerlerinin üretilen poliüretan köpüklerin kalınlığına bağlı olarak çizilen grafikten hesaplanmıştır. Köpüklerin farklı yoğunlukları nedeniyle toplam makroskopik etkileşim tesir kesit değerleri üretilen köpüklerin nötron absorpsiyon özelliğini açıklamak için külçe halindeki malzemeler için yeterli olmamaktadır. Farklı PEG konsantrasyonuna sahip köpüklerin termal nötronları soğurma özelliklerinin kıyaslanması için toplam makroskopik kütle etkileşim tesir kesit değerleri belirlenmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında sadece nötron soğurma özelliklerinin incelenmesi ile sınırlı kalmamış yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi için FTIR ve SEM sonuçları farklı alt başlıklar altında açıklanmıştır.

4.1. Nötron Geçirgenlik Deneylerinden Elde Edilen Veriler

Nötron geçirgenlik deneylerinden elde edilen veriler Şekil 4.1’de sunulmaktadır. Belirtilen şekil farklı köpük kalınlıklarına karşı nötron geçirgenlik oranlarını göstermektedir. Tablo 3.1’de görüldüğü gibi, PEG-300 değerleri kademeli olarak artırılarak poliüretan köpükler üretilmiş ve PEG-300 dışında gliserin maddesinin köpük malzemesinde meydana getireceği nötron soğurma kapasitesinin incelenmesi için K1’deki aynı PEG-300 miktarına sahip gliserin eklenerek K5 köpük malzemesi üretilmiştir. Şekil 4.1’den K2 ile K4’ün aynı toplam makroskopik tesir kesitlerine sahip olduğu kolaylıkla görülebilir.

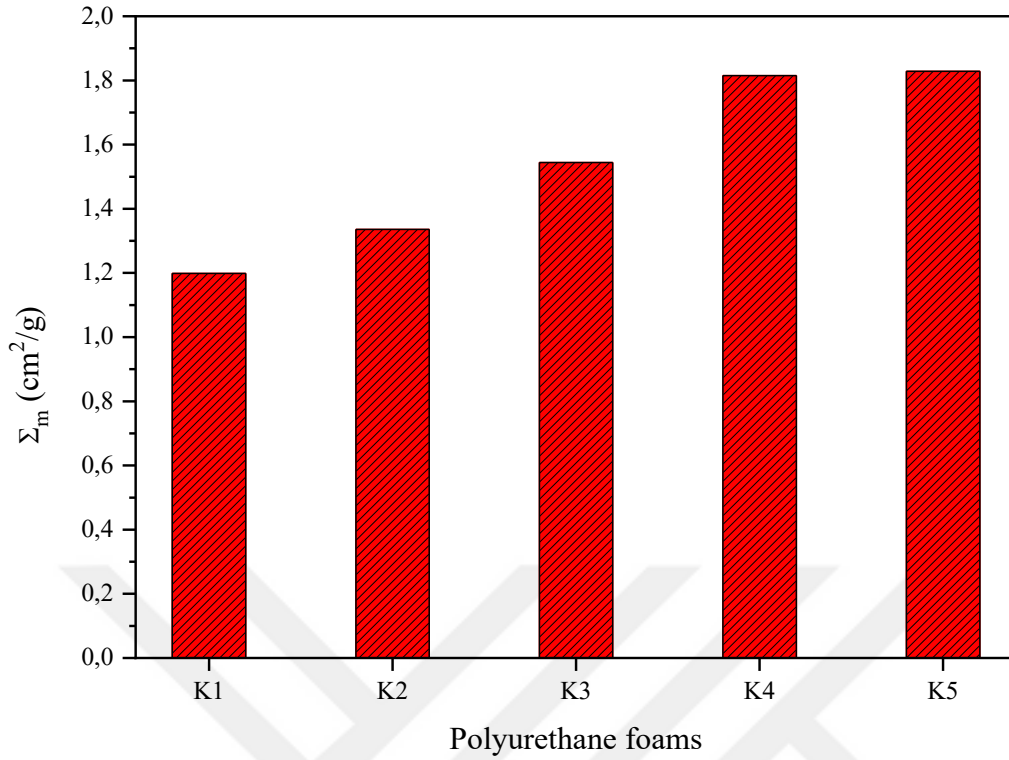
Şekil 4.1’in çizilmesi için öncelikle her bir köpük için kalınlık değerleri artırılarak her bir kalınlık için I ve I_0 değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneyler üçer kez tekrar edilmiş ve verilerin aritmetik ortalaması alınmıştır. I/I_0 değerleri her bir poliüretan köpük için ayrı ayrı çizilmiş ve elde edilen fit eşitliğinden toplam mikroskopik tesir kesiti (Σ_t) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı köpük kalınlıklarına göre termal nötron geçirgenlik değerleri

Farklı yoğunluk değerlerine sahip poliüretan köpüklerin nötron soğurma özelliklerini incelemek için, toplam makroskopik kesit değerleri köpüklerin yoğunluğuna (ρ) bölünerek toplam makroskopik kütle tesir kesit değerleri belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde köpüklerin yoğunluğu K1 için $0,3738 \text{ gr/cm}^3$, K2 için $0,4364 \text{ gr/cm}^3$, K3 için $0,3076 \text{ gr/cm}^3$, K4 için $0,3207 \text{ gr/cm}^3$ ve K5 için $0,3952 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.

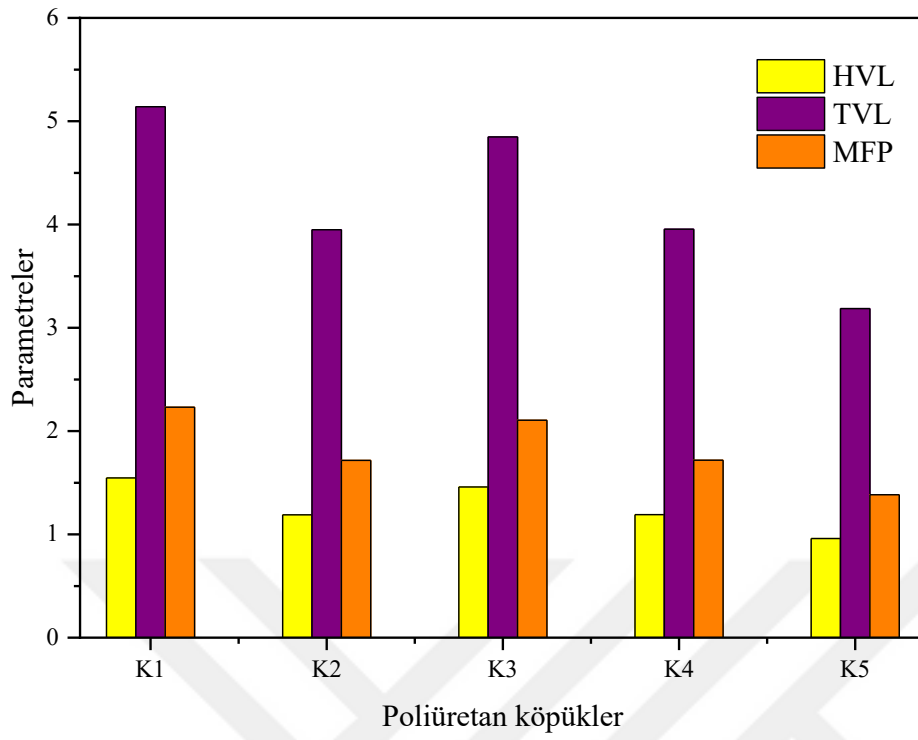
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, toplam makroskopik etkileşim kütle tesir kesitleri, PEG-300 konsantrasyonunun artmasıyla artmaktadır. Ayrıca K1 köpüğünde var olan PEG-300 ile aynı miktarda gliserin içeren K5 poliüretan köpük malzemesi, K4 ile hemen hemen aynı toplam makroskopik etkileşim kütle tesir kesit değerine sahiptir. Tüm poliüretan köpük malzemelerinde hint yağı (castoroil), yüzey aktif madde ve jelleştirici katalizör miktarları sabit tutulmuştur. Fakat K5 köpüğü PEG-300 içermeyip onun yerine K1'deki PEG-300 ile aynı miktara sahip gliserin içermektedir. Elde edilen sonuçlara göre termal nötronlar için toplam makroskopik kütle etkileşim tesir kesiti değerinin artışında gliserinin daha etkin olduğu belirlenmiştir.



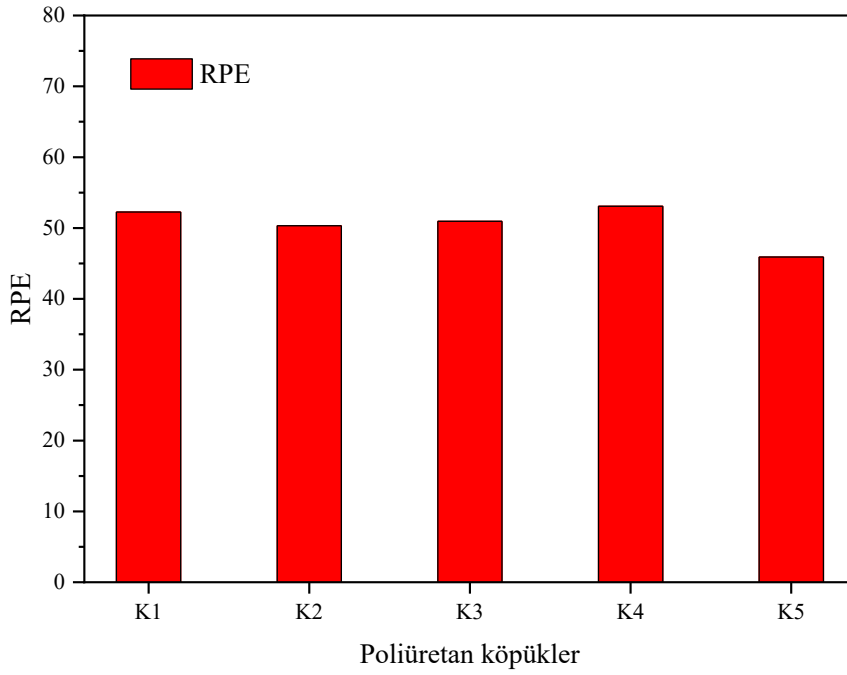
Şekil 4.2. Köpüklerin termal nötronlar için toplam makroskopik kütle kesit değerleri

Çalışmalardan elde edilen bir diğer ilginç sonuç ise yarı değer kalınlık, onda bir değer kalınlık, ortalama serbest yol ve nötron soğurma verimliliğinin PEG-300 konsantrasyonuna bağlı olarak düzenli bir değişimin gözlenememesidir. Daha küçük yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol ve onda bir değer kalınlık değerleri, gelen nötron akısı ile poliüretan köpük malzemeleri arasında daha fazla etkileşimin meydana geldiği ve köpüklerin daha yoğun olduğu anlamına gelmektedir. Nötron geçirgenliğinin daha düşük olduğu durumlarda daha yüksek oranda radyasyon koruma ya da radyasyon soğurma verimliliği değeri elde edilmektedir.

Şekil 4.3 ve 4.4'te K1'in içerdiği PEG-300 değerinde gliserin ilave edilen K5'in en düşük HVL, TVL ve MFP değerine ve en düşük RPE değerine sahip olduğu görülmektedir. Nötronlar ve köpükler arasındaki daha fazla etkileşim, daha yüksek RPE değeri vermelidir. Bu durumda K1-K5'in köpük tipi yapısı araştırılmalıdır.



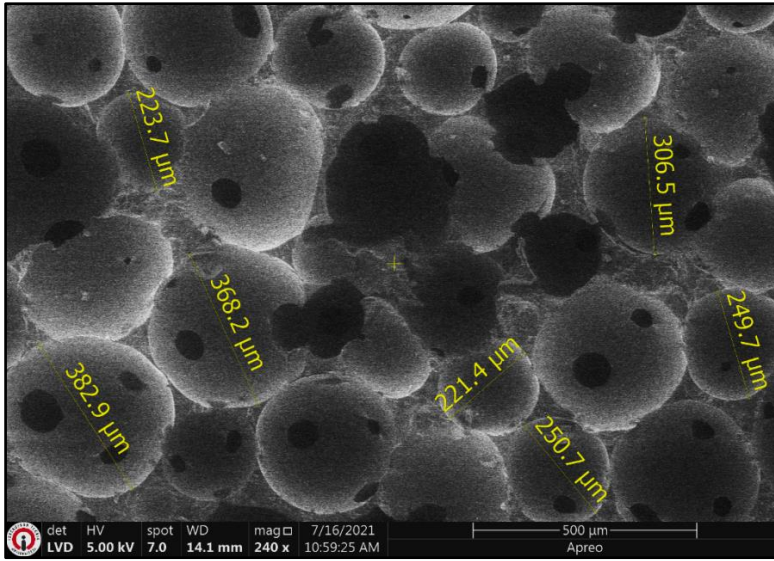
Şekil 4.3. Köpüklerin HVL, TVL ve MFP değerleri



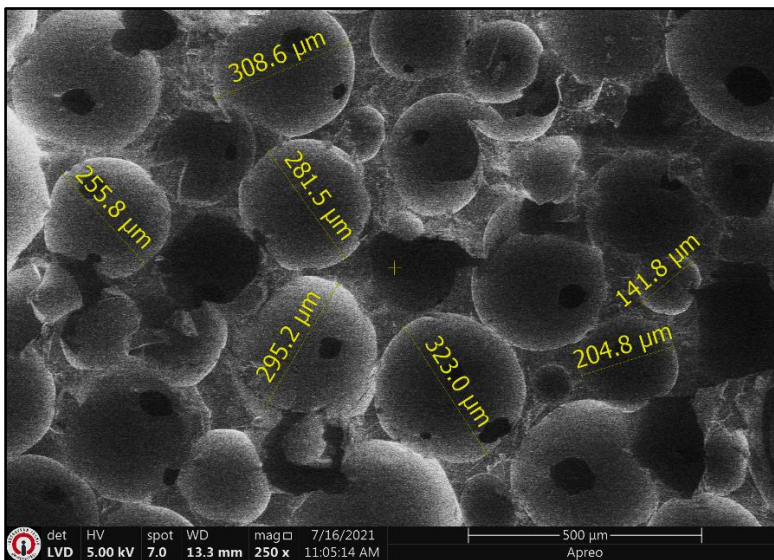
Şekil 4.4. Köpüklerin radyasyondan korunma verim değerleri

4.2.SEM Görüntülerinden Elde Edilen Veriler

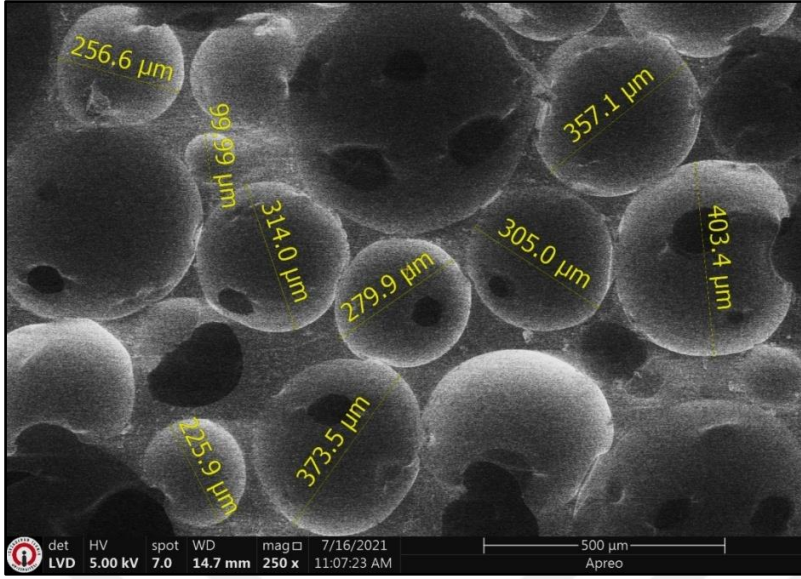
Farklı poliüretan köpüklerin enine kesitlerinin SEM (ThermoFisherScientific (FEI) Apreo S LoVac) görüntülerinin sonuçları, Resim 4.1'den Resim 4.5'e kadar gösterilmiştir. Koyu gri alanlar kesme işleminden kaynaklanmıştır. Ayrıca SEM görüntülerinde gözlenen siyah noktalar, poliüretan köpük oluşumu sürecinde açığa çıkan CO₂ emisyonu neticesinde oluşmuştur.



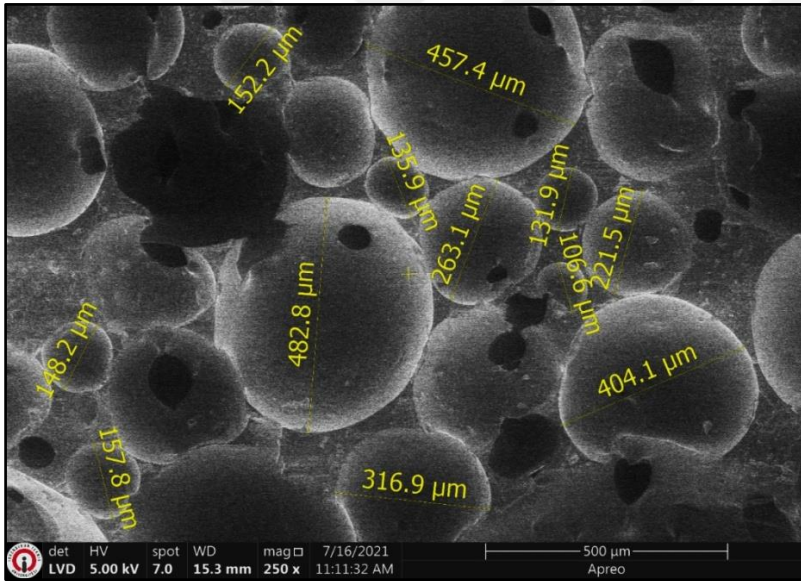
Resim4.1. K1 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü



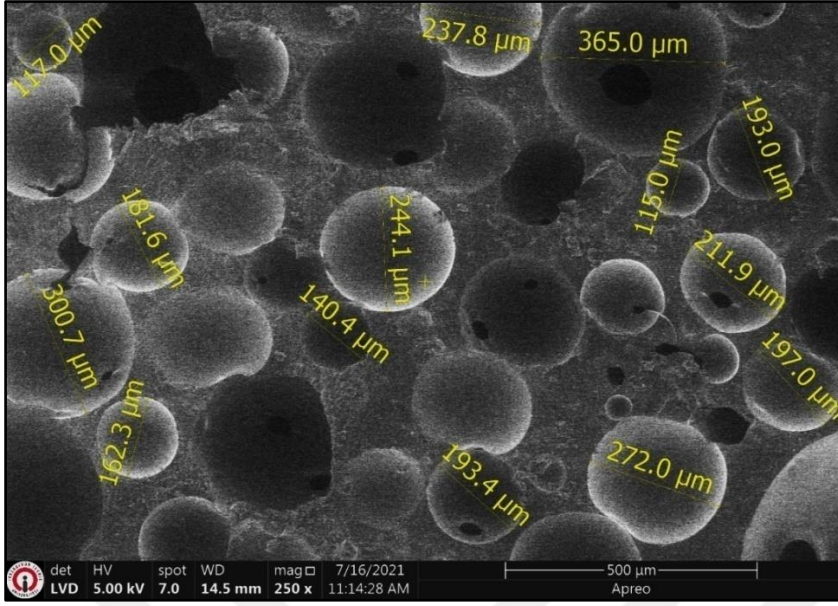
Resim4.2. K2 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü



Resim4.3. K3 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü



Resim4.4.K4 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü



Resim4.5. K5 kodlu poliüretan köpüğe ait SEM görüntüsü

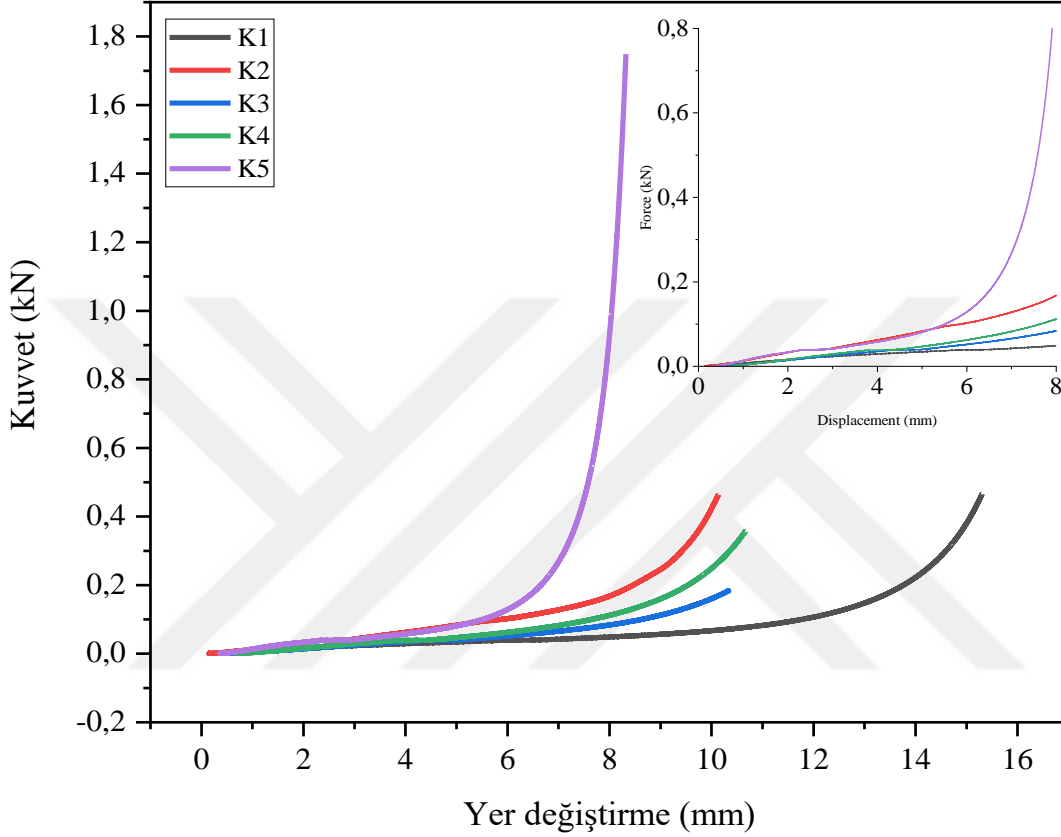
SEM görüntülerinden elde edilen görüntülerde köpük veya hücre boyutu (d) rahatlıkla görülmektedir. K1 köpüğü için hücre boyutu 221,4 ile 382,9 μm arasında değişmektedir. Bu değer K2 için 141,8 ile 323,0 μm , K3 için $d=99,9-403,4 \mu\text{m}$, K4 için $d=131,9-482,8 \mu\text{m}$ ve son olarak K5 için $d=115,0-365,0\mu\text{m}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen bir diğer sonuç ise köpüklerin ahududu benzeri bir yapıya sahip olduğudur. Bu çalışmada herhangi bir çekirdeklenme ajanı kullanılmamıştır. Nötronların, üretilen köpük poliüretan malzemeleri ile etkileşiminin, köpüklerin hücre boyutu ve dağılımından etkilendiği söylenebilir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün artması, çekirdeklenme verimliliği artırır ve böylece çoklu hücre çekirdeklenmesi olayları gözlemlenebilir. Bu durum ise nötron etkileşme ihtimaliyetlerini etkileyebilir.

Bu çalışmada ise poliüretan köpüklerin köpük yapısına göre radyasyondan korunma verimleri değişmektedir. Daha yoğun köpük yapısının gözlemlendiği durumlarda daha yüksek radyasyon koruma değerinin elde edilebileceği söylenebilir.

4.3.Basma Testlerinden Elde Edilen Veriler

Tez çalışması kapsamında üretilen poliüretan köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basma testlerinden elde edilen sonuçlardan basınç dayanımı (ya da basınç mukavemeti) ASTM D1621-00 ve ISO 844 standartları göz önüne alınarak belirlenmiştir

[61-62]. Bunun için malzemeler dikdörtgenler prizması şeklinde kesilerek basma testlerine tabi tutulmuştur ve basma testleri için Instron 5969 çekme cihazı kullanılmıştır. Poliüretan köpükler için kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.

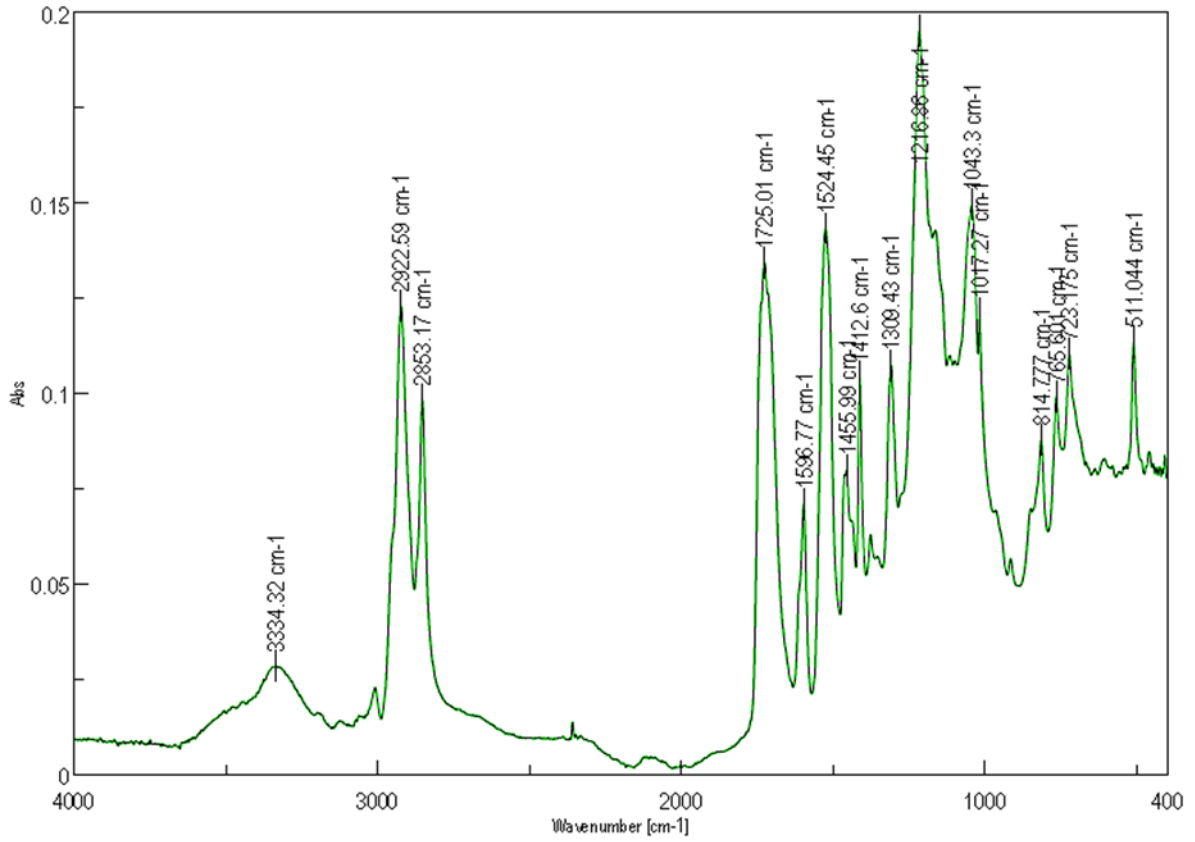


Şekil 4.5. Poliüretan köpüklerin yer değiştirme-kuvvet grafiği

Radyasyon zırh malzemelerinde önemli hususlardan bir diğeri de malzemelerin mekanik dayanım özelliklerinin belirlenmesidir. Şekil 4.5'te K1'in PEG-300 miktarı ile aynı değerde gliserin eklenerek üretilmiş K5 poliüretan köpüğün mekanik dayanımının diğer PEG-300 katkılı köpüklere kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Hem nötron soğurma özelliklerindeki değişim hem de mekanik özelliklerdeki farklılıklar üretilen malzemelerin köpük yoğunlukları ilişkilendirilebilir. Ancak köpük yoğunluklarının belirlenmesi araştırma kapsamımızın dışında olduğundan hesaplanmamıştır. Mekanik özellikleri etkileyen bir başka husus ise dolgu malzemesinin polimer matris içinde düzgün dağılımıdır. Aksi durumda aglomerasyondan ötürü mekanik dayanımda azalma gözlenebilmektedir.

4.4.FTIR Sonuçları

Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi (FTIR) temel olarak kızılötesi radyasyonun madde ile etkileşmesi prensibine göre çalışmaktadır. Soğurulma mekanizması ile birlikte moleküllerdeki bağların titreşimi ve dönüşleri için gerekli miktarda dalga enerjisinin cihaz tarafından elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinden gönderilmesiyle gerçekleşir. K5 poliüretan köpük malzemesine ait FTIR spektrumu Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. K5 poliüretan köpüğüne ait FTIR spektrumu

Poliüretanın FTIR spektrumu için karakteristik amit soğurmaları;

- Amit I modu ($1600-1800 \text{ cm}^{-1}$: C=O gerilmesi, C-N gerilmesi ve C-C-N deformasyonu),
- Amit II modu ($1620-1650 \text{ cm}^{-1}$: N-H bending, C-N gerilmesi, C-C gerilme titreşimleri),
- Amit III modu ($1200-1400 \text{ cm}^{-1}$: C-N gerilme titreşimi) ve

- d. Amit IV, V, VI ($400-800\text{ cm}^{-1}$: NH out-of-planedeformation) olarak gözlenmiştir. [63-64].

Çizelge 4.1 en önemli karakteristik soğurma gruplarını özetlemektedir. Ayrıca poliüretan köpük malzemesinin üretiminin gerçekleştiği, $2200-2300\text{cm}^{-1}$ 'deki izosiyanat gerilme bandının yokluğu ile doğrulanmıştır. 1725cm^{-1} 'deki karbonil gurubunun gerilme piki ise çapraz bağların artışı ile birlikte daha fazla etkileşimlerin göstergesi olarak yorumlanabilir. [65].

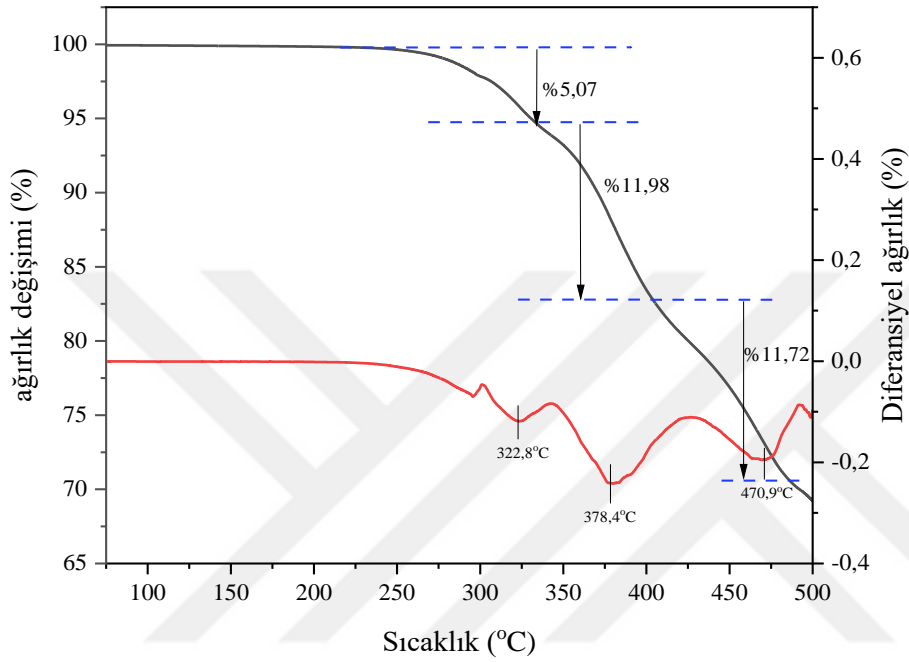
Çizelge 4.1. Poliüretan köpük malzemesinin karakteristik FTIR soğurma grupları [63-65]

Bağlar	Dalga sayıları/ cm^{-1}
N-H (üretan ve üre)	3334
C-H gerilmesi (simetrik ve asimetrik)	2853-2922
C=O gerilmesi (üretan ve üre karbonil) (Amit I)	1725
C=C gerilme titreşimi (Amit II)	1596
C-N-H (üretan) (C-N gerilmesi; N-H simetrik bükülme) (Amit II)	1524
C-N-H (üre) (C-N gerilmesi; N-H simetrik bükülme) (Amit II)	1411-1455
C-O-C asimetrik gerilme (N-H bükülme; C-N gerilme) (Amit III)	1017 – 1043-1217
N-H bükülme (Amit IV, V ve VI)	800-400

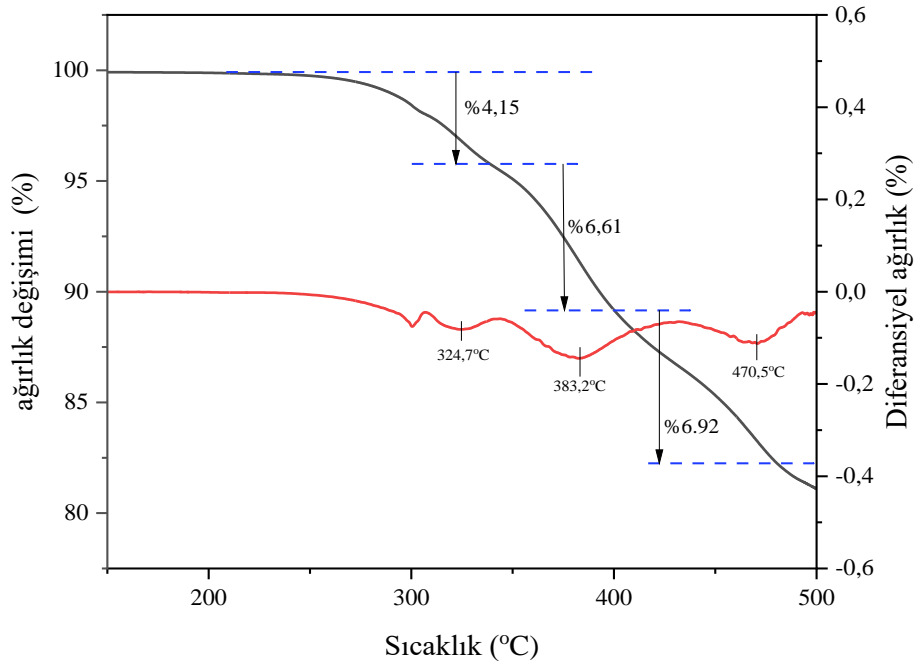
4.5.TGA Sonuçları

Termal analizler analizi yapılacak malzemeye kontrollü sıcaklık uygulandığında malzemenin ya da reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin fiziksel özelliklerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldüğü teknikler olarak ifade edilmektedir. Bu tür analizler genellikle hem endüstriyel alanda kullanılan pek çok malzemenin kalite kontrolünde hem de araştırma çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan termal analiz yöntemleri, termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termomekanik analiz (TMA) olarak bilinmektedir. Tez çalışmaları kapsamında termogravimetrik analiz için polimer köpük malzemesinin artan sıcaklık sonucu meydana gelen ağırlık değişimleri kantitatif olarak ölçülmüş ve sıcaklığa bağlı değişim grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.7-4.11). Ağırlık değişimleri yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması sonucu meydana gelmektedir. TGA'da polimer köpük malzemelerinin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık aralıkları saptanabilmektedir. Ağırlık kaybının olduğu bölge hangi malzemenin bozunduğunu ya da

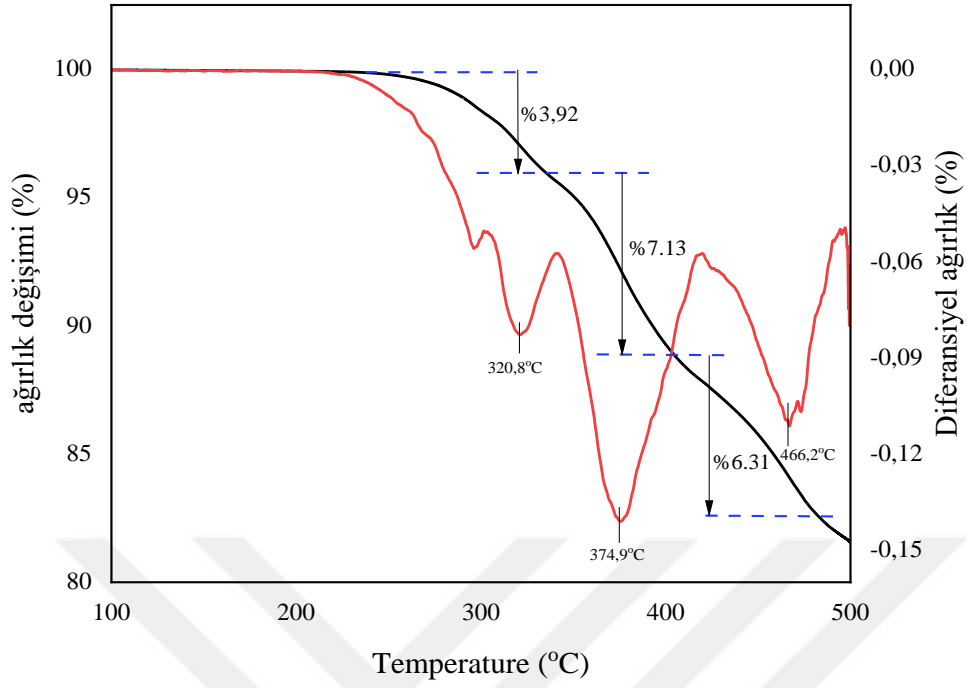
buharlaştığını göstermektedir. Ayrıca polimer köpük malzemesinin kaç aşamada bozunduğu TGA eğrilerinde kolaylıkla gözlenebilmektedir. Şekil 4.7'den Şekil 4.11'e kadar çizilen termal bozunma eğrilerinde ağırlık kaybının olmadığı sıcaklık aralıkları ise polimer köpük malzemesinin kararlı olduğu sıcaklık aralıklarını göstermektedir.



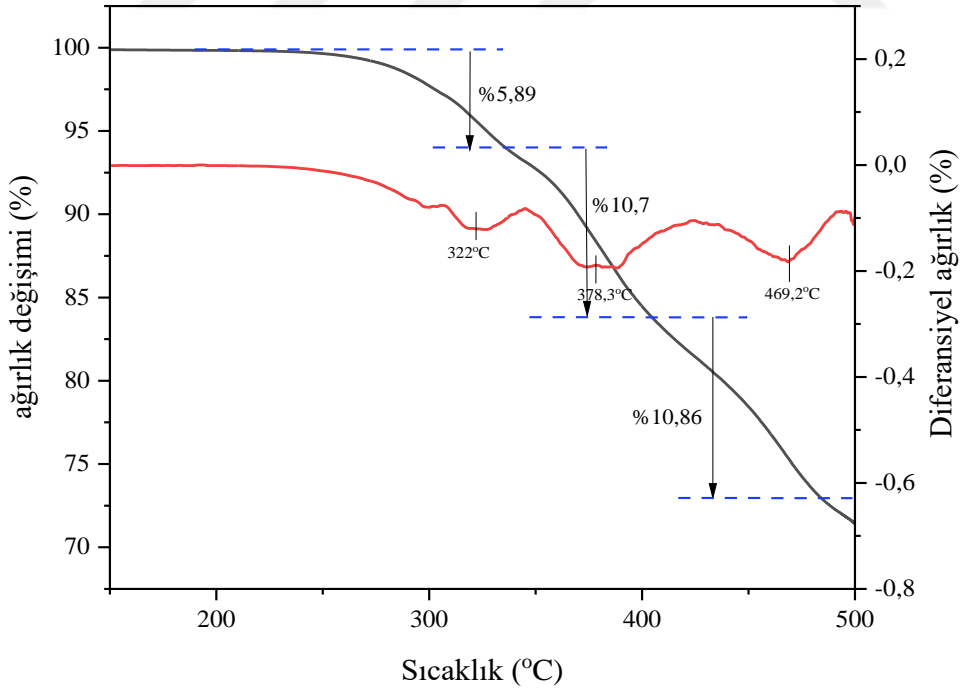
Şekil 4.7. K1 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi



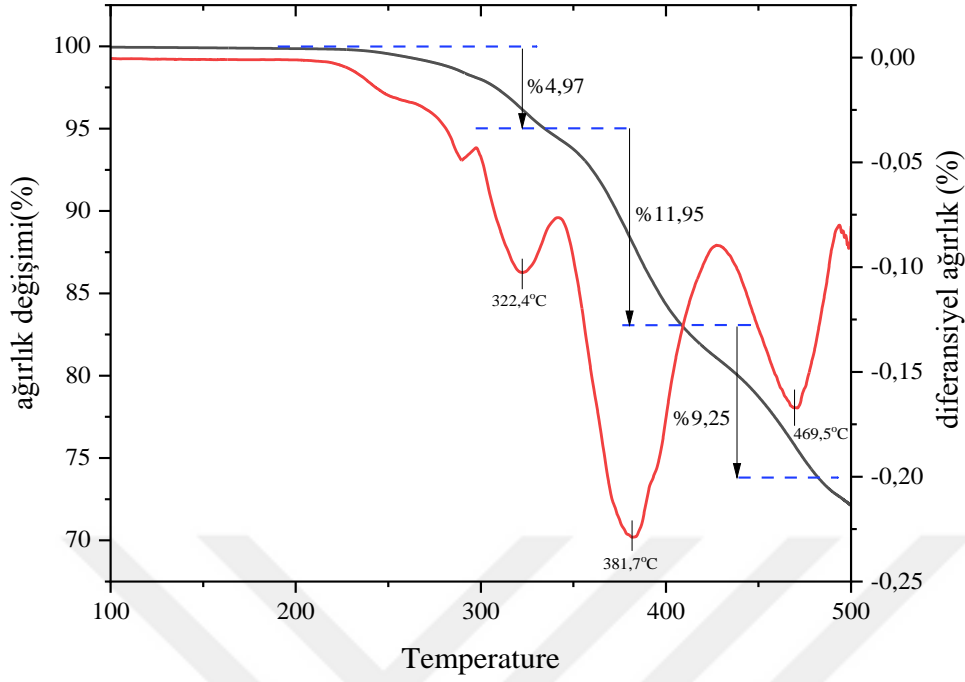
Şekil 4.8. K2 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi



Şekil 4.9.K3 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi



Şekil 4.10. K4 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi



Şekil 4.11. K5 poliüretan köpüğüne ait TGA ve DTA eğrisi

Termogravimetrik analiz yönteminde ağırlık değişimlerinin sıcaklığa bağlı değişimi ile birlikte diferansiyel ağırlığın sıcaklığa bağlı değişimi de elde edilebilir (dW/dT). Bu yöntem diferansiyel termogravimetrik analiz (DTA) yöntemi olarak tanımlanır. DTA'da ağırlık kaybı hızı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Bu yöntemin amacı ise hangi sıcaklıkta ağırlık kaybının daha fazla olduğunu tespit edebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında üretilen poliüretan köpük malzemelerine ait TGA ve DTA eğrileri incelendiğin 100°C'nin altında çok küçük kütle değişimlerinin olduğu gözlenebilir. Bu değişimler malzemenin nemini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Bilinmesi gereken bir diğer husus ise, çoğunlukla 200-320°C aralığındaki bozunma oranlarının %4 ile %6 arasında değiştiği kütle azalmalarının, suyun buharlaşması ve diğer gaz bileşenlerinin yayımı kaynaklı olmasıdır. Fakat gaz yayımını her üç bozunma aşamasında gözlenebilmektedir. Ayrıca yaklaşık olarak %7 ile %12 arasında değişen ikinci bozunma oranları malzemede var olan üretan bağlarının (hard segment) bozunmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerde gözlenen üçüncü ve son değişim ise polyol bozunmasından ileri gelmektedir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen diğer sonuç ise PEG-300 ve gliserin miktarına bağlı olarak malzemenin bozunma hızındaki değişimdir. Elde edilen sonuçlara göre üretilen poliüretan köpük malzemelerin bozunma hızının içerdiği PEG-300 miktarındaki değişim ile ilişkili olmadığıdır. Çünkü artan PEG-300 değerlerindeki artışa bağlı olarak bozunma hızlarındaki değişimin K2 ve K3 köpüğü için daha yavaş olduğu söylenebilir. Ancak hem iyi bir termal nötron soğurucu, iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahip ve termal bozunma sıcaklığı yüksek bir malzeme önerilecek olursa PEG-300 yerine gliserin kullanılarak üretilen K5 köpük malzemesi, üretilen poliüretan köpük malzemeleri arasında en uygun olanıdır. Elde edilen tüm veriler değerlendirildiğin K5 köpük malzemesi diğer poliüretan köpük malzemelere nazaran iyi bir termal nötron soğurucu, mekanik dayanımı yüksek ve iyi termal özelliklere sahip zırh malzemesi olarak önerilebilir ve çalışmalar bu yönde ilerletilebilir.

5. TARTIŞMA

Nötron soğurucu malzemeler çoğunlukla nükleer atıkların depolanmasında kullanılmaktadır ve soğurucu malzeme olarak ağır betonlar, çelik ve alüminyum gibi malzemeler kullanılır. Fakat günümüzde kullanılan soğurucu malzemelerde mikro-çatlaklar, düşük korozyon ve aşınma direnci ve termal dayanım gibi malzemenin radyasyon zırhı olarak kullanılmasını engelleyecek olumsuzluklar söz konusudur. Özellikle nükleer atık depolamada kullanılan ağır betonlarda zamanla oluşacak olan çatlaklardan kaçan radyoaktif sızıntılar canlı ve çevre hayatını tehdit edecektir. İçeriğinde bulundurduğu düşük atom numaralı elementlerden ötürü poliüretan köpük malzemeler iyi bir nötron soğurucu malzeme olarak tanımlanabilir. Tez çalışması kapsamında polietilen glikol katkısının (PEG-300) değişimi ile nötron soğurma özelliklerinde iyileştirme hedeflenmiştir ve yapılan nötron geçirgenlik deneylerinden elde edilen verilere göre hesaplanan toplam makroskopik termal nötron etkileşme tesir kesit değerleri (Σ_m) incelendiğinde PEG-300 artışına bağlı olarak Σ_m değerlerinde artış gözlenmiştir. Ancak benzer değişim HVL, TVL ve MFP değerlerinde tespit edilememiştir. Bu nedenle köpük malzemelerin köpük yapıları incelenmiş ve PEG-300 miktarının artışına bağlı olarak HVL, TVL ve MFP değerlerindeki düzensiz değişimin köpük morfolojisi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Köpük morfolojisinin detaylı incelenmesi bu çalışmanın devamı olarak yapılacaktır.

Çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise K1 malzemesinin içerdiği PEG-300 kadar gliserin ilavesi ile üretilen K5 poliüretan köpüğü ile ilgilidir. Nötron geçirgenlik deneylerine göre en düşük TVL, HVL ve MFP değerlerine sahip K5 poliüretan köpük malzemesinin en yüksek basma dayanımına sahip olmasıdır. Bozunma sıcaklığına bakıldığında ise K1 malzemesinin içerdiği PEG-300 ile aynı miktarda gliserin ilave edilerek üretilen K5 köpük malzemesi için 470°C'lik bozunma sıcaklığı elde edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasından elde edilen verilere göre PEG-300'e nazaran gliserin ilavesinin polimer köpük malzemelerinin termal nötronları soğurma kapasitesini artırdığı söylenebilir. Bu verilerden yola çıkarak sadece termal nötronları değil diğer radyasyon türlerinin soğurulmasını sağlayan geniş soğurma spektrumuna sahip polimer matrisli kompozitler geliştirilebilir. Polimer kompozit malzeme geliştirilirken;

1. Köpük oluşum mekanizması ile köpük morfolojisinin de detaylı incelenmesi
2. Geniş soğurma spektrumuna sahip, ekonomik, sürdürülebilir ve çevreye zarar vermeyen yeni nesil bir malzeme özelliğine sahip olması
3. İyi bir soğurma spektrumuna sahip olmanın yanı sıra termal ve mekanik dayanımı yüksek bir malzeme olması

hususlarına dikkat edilmelidir. Tez çalışmasının desteklendiği proje kapsamında baryum sülfat ilave edilerek yeni nesil kompozit malzeme geliştirilmiş ancak dolgu malzemesi olarak kullanılan baryum sülfat ilavesinin artışının malzemenin mekanik dayanımında kötüleşmeye sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi dolgu malzemesinin malzeme içinde düzgün dağılmayıp aglomerasyona yol açması olarak açıklanmıştır [66]. Geliştirilecek yeni nesil kompozit malzeme için geniş soğurma spektrumuna sahip olmasının yanı sıra malzemenin mekanik ve termal dayanımlarının da iyileştirilmesi esas alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]Chen, S., Bourham, M., Rabiei, A. (2015). Neutrons attenuations on composite metal foams and hybrid open-cell Al foam. *Radiation Physics and Chemistry*, 109, 27-39.
- [2]Erdem, M., Baykara, O., Doğru, M., Kuluöztürk, F. (2010). A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray. *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 917-922.
- [3]Kim, J., Lee, B.C., Uhm, Y.R., Miller, W.H. (2014). Enhancement of thermal neutron attenuation of nano-B₄C, -BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites. *Journal of Nuclear Materials*, 453, 48-53.
- [4]Sukegawa, A.M., Anayama, Y., Okuno, K., Sakurai, S., Kaminaga, A. (2011). Flexible heat resistant neutron shielding resin. *Journal of Nuclear Materials*, 417, 850-853.
- [5]More, C.V., Alsayed, Z., Badawi, M.S., Thabet, A.A., Pawar, P.P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2057-2090.
- [6]Bagheri, K., Razavi, S.M., Ahmadi, S.J., Kosari, M., Abolghasemi, H. (2018). Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated polyester/nanoclay/PbO composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 146, 5-10.
- [7]Kiani, M.A., Ahmadi, S.J., Outokesh, M., Adeli, R., Kiani, H. (2019). Study on physico-mechanical and gamma-ray shielding characteristics of new ternary nanocomposites. *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 141-148.
- [8]Dong, M., Xue, X., Li, Z., Yang, H., Sayyed, M.I., Elbashir, B.O. (2018). Preparation, shielding properties and mechanism of a novel neutronshielding material made from natural Szaibelyite resource. *Progress in Nuclear Energy*, 106, 140-145.
- [9]Castley, D., Goodwin, C., Liu, J. (2019). Computati on a land experimental comparison of boroncarbide, gadoliniumoxide, samariumoxide, and grapheneplatelets as additives for a neutron shield. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108435.
- [10]Mahmoud, M.E., El-Khatib, A.M., Badawi, M.S., Rashad, A.R., El-Sharkawy, R.M., Thabet, A.A. (2018). Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 160-173.
- [11]Emmanuel, A.,&Raghavan, J. (2015). Influence of structure on radiation shielding effectiveness of graphite fiber reinforced polyethylene composite. *Advances in Space Research*, 56(7), 1288–1296.
- [12]İrim, G., Wis, A. A., Keskin, M. A., Baykara, O., Ozkoc, G., Avcı, A., Doğru, M., & Karakoç, M. (2018). Physical, mechanical and neutron shielding properties of

- h-BN/Gd₂O₃/HDPE ternarynanocomposites. *RadiationPhysicsandChemistry*, 144(October), 434–443.
- [13]Umm-e-Kulsoom, Gursal, S. A.,Khurshid, M. S., Saif-ur-Rehman, M., Minhas, A. S., Yasin, T., Mehboob, N., &Mehmood, M. S. (2020). Investigating the effect of adding CdO nanoparticles on neutron shielding efficacy of HDPE. *Radiation Physics and Chemistry*, 177(July), 109145.
- [14]Chai, H.,Tang, X., Ni, M., Chen, F., Zhang, Y., Chen, D., &Qiu, Y. (2015). Preparation and properties of flexibleflame-retardant neutron shielding material based on methylvinylsiliconerubber. *Journal of Nuclear Materials*, 464, 210–215.
- [15]Lee, M. K., Lee, J. K., Kim, J. W., & Lee, G. J. (2014). Properties of B₄C-PbO-Al(OH)₃-Epoxy nanocomposite prepared by ultrasonic dispersion approach for hightemperature neutron shields. *Journal of Nuclear Materials*, 445(1–3), 63–71.
- [16]More, C. V.,Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., &Pawar, P. P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. In *Environmental Chemistry Letters*(Vol. 19, Issue 3). Springer International Publishing.
- [17]Cataldo, F.,&Prata, M. (2019). New composites for neutron radiation shielding. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 320(3), 831–839.
- [18]Labouriau, A.,Robison, T., Shonrock, C., Simmonds, S., Cox, B., Pacheco, A., &Cady, C. (2018). Boron filled siloxane polymers for radiation shielding. *Radiation Physicsand Chemistry*, 144(April 2017), 288–294.
- [19]Özdemir, T.,& Yılmaz, S. N. (2018). Mixed radiation shielding via 3-layered polydimethylsiloxanerubber composite containing hexagonalboronnitride, boron (III) oxide, bismuth (III) oxideforeachlayer. *Radiation Physics and Chemistry*, 152(December 2017), 17–22.
- [20]Adeli, R.,Shirmardi, S. P., &Ahmadi, S. J. (2016). Neutron irradiation tests on B₄C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay. *Radiation Physics and Chemistry*, 127, 140–146.
- [21]Kiani, M. A.,Ahmadi, S. J., Outokesh, M., Adeli, R., &Mohammadi, A. (2017). Preparation and characteristics of epoxy/clay/B₄C nanocomposite at high concentration of boroncarbide for neutron shielding application. *Radiation Physics and Chemistry*, 141(June), 223–228.
- [22]Özdemir, T., Güngör, A., &Reyhancan, A. (2017). Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with borontrioxide: Mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests. *Radiation Physics and Chemistry*, 131(July 2016), 7–12.
- [23]Özdemir, T., Yılmaz, S. N. (2018). Hexagonal boronnitride and polydimethylsiloxane: A ceramic rubber composite material for neutron shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 152(July), 93–99.

- [24]Uddin, Z., Yasin, T., Shafiq, M., Raza, A., Zahur, A. (2020). On the physical, chemical, and neutron shielding properties of polyethylene/boroncarbide composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 166(July 2019), 108450. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108450>
- [25]Güngör, A., Akbay, I. K., Özdemir, T. (2019). EPDM Rubber with hexagonal BoronNitride: A Thermal Neutron Shielding Composite. *Radiation Physics and Chemistry*, 165(July), 108391.
- [26]Tuna, T., Eker, A. A., Kam, E. (2021). Neutron shielding characteristics of polymer composites with boroncarbide. *Journal of the Korean Physical Society*, 78(7), 566–573.
- [27]Zhang, X., Yang, M., Zhang, X., Wu, H., Guo, S., Wang, Y. (2017). Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure. *Composites Science and Technology*, 150, 16–23.
- [28]Hu, C., Zhai, Y. T., Song, L. L., Mao, X. D. (2020). Structure-thermal activity relationship in a novel polymer/MOF-based neutron-shielding material. *Polymer Composites*, 41(4), 1418–1427.
- [29]Wei, C., Pan, W., Sun, S., Liu, H. (2012). Irradiation effects on a glycidylamine epoxy resin system for insulation in fusion reactor. *Journal of Nuclear Materials*, 429(1–3), 113–117.
- [30]Diao, F., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., & Luan, W. (2016). γ -Ray irradiation stability and damage mechanism of glycidylamine epoxy resin. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 383, 227–233.
- [31]Zhang, Y., Chen, F., Tang, X., Huang, H., Ni, M., & Chen, T. (2018). Preparation and characterization of paraffin/nickel foam composites as neutron-shielding materials. *Journal of Composite Materials*, 52(7), 953–962.
- [32]Sarier, N., & Onder, E. (2008). Thermal insulation capability of PEG-containing polyurethane foams. *Thermochimica Acta*, 475(1–2), 15–21.
- [33]Kairytė, A., Kirpluks, M., Ivdre, A., Cabulis, U., Vaitkus, S., & Pundienė, I. (2018). Cleaner production of polyurethane foam: Replacement of conventional raw materials, assessment of fire resistance and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 183(2018), 760–771.
- [34]Knoll, G. (2009). *Radiation Detection and Measurement* (Cilt Third Edition, s. 29-63). Michigan, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [35]Küçük, L. (2019). Kütle Numarası 47-63 Aralığındaki Egzotik PF-Kabuk Çekirdeklerinin Beta Bozunumlarının İncelenmesi. Yayımlanmamış Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- [36]Murray, R.,Holbert, K. (2020). Nuclear Energy:An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of NuclearProcesses. U.S.:Elsevier.
- [37]Çelik, A. (2017).HPGe Gama Dedektörlerinde Soğurma Parametrelerinin ve Kristal Kalınlığının Belirlenmesi.Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- [38]Knoll, G. (2010). Radiation Interactions. G. Knoll içinde, Radiation Detection and Measurement (Cilt Fourth Edition, s. 29-63). Michigan, United States of America: John Wiley&Sons, Inc.
- [39]Yalçınkaya, M. (2002). $^{14}\text{N} + ^{235}\text{U}$ Filyon-Füzyon Reaksiyonu ile Oluşan Nötron-Zengin Çekirdeklerin İncelenmesi, Yayımlanmamış Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [40]URL-1. (2021, 12 22). Neutron sources. 2021 tarihinde Nuclear-Power: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/neutron-sources/> adresinden alındı
- [41]Gülmen, M. (2011). Medikal Alanda Kullanılan LiF:Mg, Ti (TLD-100)'nin Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi. Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- [42]Şekerci, M. (2018). Nükleer Reaktör Kontrol Çubuklarında Kullanılan Bazı Malzemeler için Farklı Reaksiyon ve Enerjilerde Parçacık Yayınlanma Spektrumu, Durdurma Gücü, Gircilik Mesafesi ve Tesir Kesiti Hesaplamaları.Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- [43]Obodovski, I. (2019). *Radiation-Fundamentals, Applications, Risks, and Safety*. United States of America: Elsevier.
- [44]Berger, M.J., Coursey, J.S., Zucker, M.A., and Chang, J. (2005), ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/Star> [2021, December 28]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [45]Marghany, M. (2020). Chapter 3. Quantization of Maxwell's equations. M. Marghany içinde, Synthetic Aperture Radar Imaging Mechanism for Oil Spills (s. 41-60). ELSEVIER: Gulf Professional Publishing.
- [46]Schafers, K., Bolwin, K., Büther, F., Hermann, S., Jacobs, A., Kösters, T.,v.d. 1.10 - High-Resolution Small Animal Imaging. A. Brahme içinde, Comprehensive Biomedical Physics (s. 181-211). Stockholm, Sweden: ELSEVIER.
- [47]Özge, Ö. (2019). Kurşun Alaşımının Kütle Azaltma Katsayısının Co-60 Radyoaktif Kaynağı ve Geant4 Simülasyon Programı ile Belirlenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

- [48]Küp Aylıkçı, N. (2014). Fe, Co, Ni, Zn ve Mo Elementlerinin Oluşturduğu Alaşımların K X ışını Floresans Parametreleri Üzerine Alaşım, Glisin ve pH Etkisi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [49]Tsoulfanidis, N., Landsberger, S. (2015). Measurement and Detection of Radiation (Dördüncü baskı). United States of America: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- [50]Joseph, A. (2020). Neutron spectroscopy techniques. S. Abdurrahman, S. Thomas, & Z. Ahmad içinde, Micro and Nanostructured Composite Materials for Neutron Shielding Applications (s. 355-378). Woodhead Publishing: Elsevier.
- [51]URL-2. (2014, 11 21). Neutron Cross-Section. Nuclear Power: <https://www.nuclearpower.com/neutron-cross-section/> adresinden alındı.
- [52]Çimen, B., Erdoğan, M., Oğul, R. (2017). İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. *S.Ü. Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 43(2), 139-147.
- [53]Gökharman, F.D., Aydın, S., Koşar, P.N. (2016). Radyasyon Güvenliğinde Mesleki Olarak Bilmeniz Gerekenler. *SDÜ Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 35-40.
- [54]Akgül, H.M., Dağıstan, S., Horarlı, A. (2003). Radyasyon ve Toplum. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 13(1), 44-56.
- [55]Zeyrek, C.T. (2013). İyonize Radyasyon Uygulamaları İçin Güvenlik ve Korunmaya Yönelik Genel Kavramlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 1-9.
- [56]Aydoğan, B., Usta, N. (2017). Rijit poliüretan köpük malzemelere kabaran alev geciktirici ilavesinin yanma direnci ve zararlı emisyon oluşumuna etkilerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 984-989.
- [57]Karak, N. (2017). Biobased Hyperbranched Polyurethane. N. Karak içinde, Biobased Smart Polyurethane Nanocomposites: From Synthesis to Applications (s. 1-40). Royal Society of Chemistry.
- [58]Jin, F.-L., Zhao, M., Park, M., Park, S.-J. (2019). Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers*, 11, 953.
- [59]Okoroafor, O., & Frisch, K. (1995). Introduction to Foams and Foam Formation. A. Landrock içinde, Handbook of Plastic Foams: Types, Properties, Manufacture and Applications (s. 1-10). New Jersey, United States of America: William Andrew Applied Science Publishers.
- [60]Esmail, E., Vahidifar, A., Esmizadeh, E., Rodrigue, D. (2021). Chemistry, Processing, Properties, and Applications of Rubber Foams. *Polymers*, 13, 1565.

- [61]ASTM Standard D1621 – 16, 2016, “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics1,” ASTM International, 100 BarrHarbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- [62]International Organisation for Standardization. (2007). Rigid cellular plastics - Determination of compression properties, (ISO Standard No. 844:2007).
- [63]Delpech, M. C., & Miranda, G. S. (2012). Waterborne polyurethanes: Influence of chain extender in FTIR spectra profiles. *Central European Journal of Engineering*, 2(2), 231–238. <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0060-3>.
- [64]Tan, C., Tirri, T., & Wilen, C.-E. (2017). Investigation on the Influence of Chain Extenders on the Performance of One-Component Moisture-Curable Polyurethane Adhesives. *Polymers*, 9(12), 184. <https://doi.org/10.3390/polym9050184>.
- [65]Oprea, S., & Oprea V. (2008). Properties of polyurethane elastomers obtained with various chain extenders. *Materiale Plastice*, 45(4), 345–350.
- [66]Aylıkçı, V.,Aylıkçı, N., Oruç, Ö., Kahoul, A., &Depci, T. (2021). Investigation of The Neutron Absorption Characteristics of New Type Compositesby Using Barium Sulfate. 9TH INTERNATIONAL ADVANCED TECHNOLOGIES SYMPOSIUM (s. 90-99). Elazığ: Fırat Üniversitesi.

DİZİN

A

Abstract · vi, vii
Alfa · xiv, xv, 1, 11, 12, 16, 18, 19
Araştırma · vi, 4, 14, 51, 53

B

Beta · xv, 1, 9, 10, 12, 13, 20, 27, 62
Bozunum · xiv, xv, 9, 10, 11, 12, 13, 36, 62
Bulgular · 43

Ç

Çekirdek · xiv, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 23, 25, 26, 32, 36, 37, 38, 50, 62
Çizelge · iv, 15, 24

D

Dizin · 65

E

Elektromanyetik · 3, 10, 12, 13, 19

F

Formül · 17, 18, 20, 22, 29

G

Gama · 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12, 13, 15, 20, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 62
Genel Bilgiler · 8
Giriş · 1
Grafik · 42, 43, 52

K

Kaynak · 58
Kompozit · iv, 2, 3, 4, 5, 6
Köpük · 6, 7, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 56
Köpürtme · 30, 31, 32, 35, 39, 40

N

Nötron zırhı · 3, 5

Ö

Öneriler · 58
Özet · iv

P

PEG-300 · 7, 41, 43, 44, 45, 50
Poliüretan · 30, 32, 35, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 62

S

Sonuç · 58

Ş

Şekil · 6, 9, 11, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56

T

Tartışma · 57
Teşekkür · vi

Y

Yorum · 43
Yöntem · 41

Z

Zırhlama · 1, 5, 13, 27, 29



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

