



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NANOMALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİĞİNE SAHİP POLİMER KOMPOZİT
ÜRETİLMESİ**

ALİ MURAT SÜRÜCÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NANOMALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİĞİNE SAHİP POLİMER KOMPOZİT
ÜRETİLMESİ

Ali Murat SÜRÜCÜ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 25/08/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

25 Ağustos 2021

Ali Murat SÜRÜCÜ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü sabır, destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'ya en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hammadde kaynaklarını kullanarak tez çalışmama çok değerli katkılar sağlayan SÜPERLİT A.Ő. 'ye ve Sayın Neslihan GÖKÇE'ye teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca yardımlarını aldığım değerli İnşaat Mühendisi Furkan KARAMAN'a ve saygıdeğer hocam Öğr. Gör. Azime SUBAŞI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu'nda yapılan radyasyon zırhlama testlerinde çok değerli katkılar sağlayan Doç. Dr. Recep BIYIK ve Dr. Enis KAPDAN'a, Düzce Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan mekanik test ve karakterizasyon analizinde yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. İrfan AKGÜL ve Öğr. Gör. Mesut YILDIZ'a, deneysel kısımda bilgilerinden istifade ettiğim değerli hocam Prof. Dr. Osman GENÇEL'e teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, hayatımın her anında yanımda olduklarını hissettiğim annem Sabahat SÜRÜCÜ ve babam Sadi SÜRÜCÜ'ye sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

25 Ağustos 2021

Ali Murat SÜRÜCÜ

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ŞEKİL LİSTESİ..... | vii |
| ÇİZELGE LİSTESİ | x |
| KISALTMALAR..... | xii |
| SİMGELER..... | xiii |
| ÖZET | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER..... | 3 |
| 2.1. RADYASYON | 3 |
| 2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon..... | 4 |
| 2.1.1.1. Dalga (Elektromanyetik) Tipi Radyasyon..... | 4 |
| 2.1.1.2. Parçacık Tipi Radyasyon..... | 6 |
| 2.2. NÖTRON PARÇACIKLARININ KEŞFİ VE ÖZELLİKLERİ..... | 8 |
| 2.2.1. Nötron Kaynakları | 8 |
| 2.3. RADYASYON BİRİMLERİ | 10 |
| 2.3.1. Aktivite Birimi..... | 10 |
| 2.3.2. Işınlama Birimi..... | 10 |
| 2.3.3. Soğurulmuş Doz..... | 10 |
| 2.3.4. Eşdeğer Doz..... | 11 |
| 2.3.5. Etkin Doz | 11 |
| 2.4. RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ..... | 11 |
| 2.4.1. Fotonların Etkileşim Mekanizmaları | 12 |
| 2.4.1.1. Fotoelektrik Olay | 12 |
| 2.4.1.2. Compton Saçılması..... | 13 |
| 2.4.1.3. Çift Oluşumu..... | 14 |
| 2.4.2. Nötronların Madde İle Etkileşimleri | 15 |
| 2.5. RADYASYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ | 16 |
| 2.5.1. Zaman Kuralı | 17 |
| 2.5.2. Mesafe Kuralı | 17 |
| 2.5.3. Zırhlama Kuralı | 17 |
| 2.6. RADYASYON ZIRHLAMA | 17 |
| 2.6.1. Gama Işınlarının Yavaşlatılması ve Soğurulması | 17 |
| 2.6.2. Nötron Parçacıklarının Yavaşlatılması ve Soğurulması | 19 |
| 2.7. RADYASYON ZIRHLAMADA KULLANILAN MALZEMELER..... | 20 |
| Kurşun, Beton, Kolemanit, Manyetit ve Barit | 20 |
| 2.8. POLİMER KOMPOZİTLER | 24 |
| 2.8.1. Matris Malzemeleri | 25 |
| 2.8.2. Takviye Malzemeleri | 25 |
| 2.9. NANOMALZEMELER | 26 |
| 2.10. RADYASYON ZIRHLAMA MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK LİTERATÜR ÖZETİ..... | 27 |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM | 33 |

| | |
|---|------------|
| 3.1. MALZEME..... | 33 |
| 3.1.1. Polyester Reçine ve Özellikleri..... | 33 |
| 3.1.2. Camelyaf ve Özellikleri..... | 34 |
| 3.1.3. SWCNT ve Özellikleri..... | 35 |
| 3.1.4. Dolgu Malzemeleri | 36 |
| 3.1.4.1. Barit ve Özellikleri | 36 |
| 3.1.4.2. Manyetit ve Özellikleri..... | 37 |
| 3.1.4.3. Kolemanit ve Özellikleri | 38 |
| 3.1.5. Kürleştirici Katkı Maddeleri | 39 |
| 3.2. YÖNTEM..... | 39 |
| 3.2.1. Deneysel Çalışma Planı | 39 |
| 3.2.3. Kompozit Plakaların Üretilmesi | 41 |
| 3.2.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması | 49 |
| 3.2.5. Viskozite Ölçümleri..... | 51 |
| 3.2.6. Çekme Dayanımı Deneyi..... | 52 |
| 3.2.7. Eğilme Dayanımı Deneyi..... | 54 |
| 3.2.8. Charpy Darbe Dayanımı Deneyi..... | 56 |
| 3.2.9. Termal İletkenlik Katsayısı Deneyi | 58 |
| 3.2.10. SEM Analizi..... | 58 |
| 3.2.11. Gama Radyasyonu Geçirgenlik Deneyi..... | 59 |
| 3.2.12. Nötron Radyasyonu Geçirgenlik Deneyi | 60 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA | 62 |
| 4.1. VİSKOZİTE DENEYİ SONUÇLARI..... | 62 |
| 4.2. ÇEKME DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI..... | 63 |
| 4.3. EĞİLME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME..... | 66 |
| 4.4. CHARPY DARBE DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME..... | 68 |
| 4.5. TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME..... | 70 |
| 4.6. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRME | 72 |
| 4.7. GAMA GEÇİRGENLİK DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME..... | 74 |
| 4.8. NÖTRON GEÇİRGENLİK DENEYİ SAYIM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME..... | 80 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 100 |
| 6. KAYNAKLAR | 103 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 109 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Şekil 1. Radyasyonun kullanım alanları a) Tıbbi görüntüleme cihazı, b) güvenlik kontrol sistemi, c) Endüstriyel test yöntemi ve d) Nükleer santral. | 2 |
| Şekil 2. 1. Radyasyonun sınıflandırılması. | 4 |
| Şekil 2. 2. Gama ışınması. | 5 |
| Şekil 2. 3. X-ışını tütünün şematik gösterimi. | 5 |
| Şekil 2. 4. Alfa bozunumu. | 6 |
| Şekil 2. 5. Beta bozunumu. | 7 |
| Şekil 2. 6. Radyasyonun madde ile etkileşim türleri. | 12 |
| Şekil 2. 7. Fotoelektrik olay. | 13 |
| Şekil 2. 8. Compton saçılması. | 13 |
| Şekil 2. 9. Çift oluşumu. | 14 |
| Şekil 2. 10. Esnek saçılma. | 15 |
| Şekil 2. 11. Esnek olmayan saçılma. | 15 |
| Şekil 2. 12. Işınımlı yakalama. | 16 |
| Şekil 2. 13. Radyasyondan korunma yöntemleri. | 17 |
| Şekil 2. 14. Fotonların azalma mekanizmaları. | 18 |
| Şekil 2. 15. Kurşun metalinin görünümü. | 20 |
| Şekil 2. 16. Bor mineralinin görünümü. | 23 |
| Şekil 2. 17. Manyetit cevherinin görünümü. | 23 |
| Şekil 2. 18. Barit mineralinin görünümü. | 24 |
| Şekil 2. 19. Polimer matrisli kompozit ürünler. | 25 |
| Şekil 2. 20. a) Tek duvarlı karbon nanotüp ve b) çok duvarlı karbon nanotüp. | 27 |
| Şekil 3. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan camlyafın görünümü. | 35 |
| Şekil 3. 2. Tuball Matrix-204 karbon nanotüp mikro görüntüleri 20 µm (a), 10 µm (b), 2 µm (c). | 35 |
| Şekil 3. 3. Barit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları. | 37 |
| Şekil 3. 4. Manyetit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları. | 38 |
| Şekil 3. 5. Kolemanit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları. | 39 |
| Şekil 3. 6. Camlyaf kesim işlemi ve kullanılan ekipman. | 41 |
| Şekil 3. 7. a) Çeneli kırıcı yardımıyla inceltelen manyetit cevheri, b) dolgu malzemelerinin geçirildiği 300 mesh elek ve c) hazır hale getirilen soldan sağa doğru barit, manyetit ve kolemanit örnekleri. | 42 |
| Şekil 3. 8. Petri kaplarında yapılan deneme dökümlerinden bazıları. | 43 |
| Şekil 3. 9. SWCNT'lerin hassas tartım işlemi. | 44 |
| Şekil 3. 10. a) kullanılmasında tavsiye edilen bıçak şekli ve b) karışım esnasında bıçağın kap içerisinde konumlandırılma limitleri ve oluşması beklenen karışım görüntüsü. | 45 |
| Şekil 3. 11. a) Dispersiyon işlemi esnasında oluşan görüntü. ve b) ultrasonik banyoda gaz giderme işlemi. | 45 |
| Şekil 3. 12. a) Cam çubuk testinin yapılışı, b) topaklanmaların görüldüğü başarısız dispersiyon örneği, c) homojen dağılımın görüldüğü başarılı dispersiyon örneği, e) deneysel çalışmalar sırasında yapılan cam çubuk testi. | 46 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3. 13. SWCNT disperse edilmiş reçineye dolgu malzemesinin katılması. | 47 |
| Şekil 3. 14. El yatırması yöntemiyle üretilen kurlenme sürecindeki kompozit plakalar. | 48 |
| Şekil 3. 15. Üretilen barit, manyetit ve CNT grubu plakalar. | 49 |
| Şekil 3. 16. Deney numunelerinin kesilmesinde kullanılan vakumlu CNC Router. | 50 |
| Şekil 3. 17. Farklı testler için kesilerek hazırlanan deney numuneleri. | 51 |
| Şekil 3. 18. Viskozite ölçümleri ve kullanılan test cihazı. | 52 |
| Şekil 3. 19. Çekme dayanımı testi uygulanan numunelerin ölçüleri. | 52 |
| Şekil 3. 20. Üretilen kompozit numunelerin çekme dayanımı testi. | 53 |
| Şekil 3. 21. Çekme dayanımı deneyi öncesi ve sonrası numune görselleri. | 53 |
| Şekil 3. 22. Eğilme dayanımı test numunelerinin ebatları. | 54 |
| Şekil 3. 23. Kompozitlerin eğilme dayanımı testi. | 55 |
| Şekil 3. 24. Eğilme dayanımı deneyi öncesi ve sonrası numune görselleri. | 55 |
| Şekil 3. 25. Charpy darbe dayanımı test numunelerinin ebatları. | 56 |
| Şekil 3. 26. Kompozit numunelere uygulanan Charpy darbe dayanımı testi. | 57 |
| Şekil 3. 27. Termal iletkenlik katsayı ölçüm cihazı. | 58 |
| Şekil 3. 28. Taramalı elektron mikroskopu (SEM). | 59 |
| Şekil 3. 29. Gama geçirgenlik deney düzeneği. | 59 |
| Şekil 3. 30. Gama ve Nötron geçirgenlik deneyleri için hazırlanan numuneler. | 60 |
| Şekil 3. 31. Nötron radyasyonu zırlama deneyinin şematik gösterimi. | 61 |
| Şekil 3. 32. Nötron radyasyonu zırlama deneyi. | 61 |
| Şekil 4. 1. Numunelerin çekme dayanım değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması. | 64 |
| Şekil 4. 2. Numunelerin elastik modül değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması. | 65 |
| Şekil 4. 3. Numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması. | 67 |
| Şekil 4. 4. Numunelerin charpy darbe dayanımı değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması. | 69 |
| Şekil 4. 5. Numunelerin termal iletkenlik katsayı test sonuçlarının bireysel ve grup bazında karşılaştırılması. | 71 |
| Şekil 4. 6. REF numunesine ait SEM görüntüleri a) 200 µm b) 50 µm c) 20 µm. | 72 |
| Şekil 4. 7. BC-05 numunesine ait SEM görüntüleri a) 200 µm b) 50 µm c) 20 µm. | 73 |
| Şekil 4. 8. MC-1 numunesinin SEM görüntüleri a) 100 µm b) 50 µm c) 20 µm. | 73 |
| Şekil 4. 9. KR numunesine ait SEM görüntüleri a) 100 µm b) 50 µm c) 20 µm. | 74 |
| Şekil 4. 10. CNT grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları. | 75 |
| Şekil 4. 11. Barit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları. | 76 |
| Şekil 4. 12. Manyetit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları. | 77 |
| Şekil 4. 13. Kolemanit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları. | 78 |
| Şekil 4. 14. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları. | 78 |
| Şekil 4. 15. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan yarı değer kalınlık (HVL) değerleri. | 79 |
| Şekil 4. 16. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan onda bir değer kalınlık (TVL) değerleri. | 79 |
| Şekil 4. 17. REF numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 82 |
| Şekil 4. 18. C-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 82 |
| Şekil 4. 19. C-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 83 |
| Şekil 4. 20. C-1 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 83 |
| Şekil 4. 21. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT gurubuna ait soğurma | |

| | |
|--|----|
| yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik. | 84 |
| Şekil 4. 22. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli CNT grubu malzeme kalınlık değerleri. | 85 |
| Şekil 4. 23. BR numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 86 |
| Şekil 4. 24. BC-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 86 |
| Şekil 4. 25. BC-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 87 |
| Şekil 4. 26. BC-1 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 87 |
| Şekil 4. 27. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Barit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik. | 88 |
| Şekil 4. 28. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Barit grubu malzeme kalınlık değerleri. | 89 |
| Şekil 4. 29. MR numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 90 |
| Şekil 4. 30. MC-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 90 |
| Şekil 4. 31. MC-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 91 |
| Şekil 4. 32. MC-1 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 91 |
| Şekil 4. 33. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Manyetit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik. | 92 |
| Şekil 4. 34. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Manyetit grubu malzeme kalınlık değerleri. | 93 |
| Şekil 4. 35. KR numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 94 |
| Şekil 4. 36. KR-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 94 |
| Şekil 4. 37. KR-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik. | 95 |
| Şekil 4. 38. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Kolemanit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik. | 96 |
| Şekil 4. 39. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Kolemanit grubu malzeme kalınlık değerleri. | 96 |
| Şekil 4. 40. 5 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı. | 97 |
| Şekil 4. 41. 7,5 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı. | 97 |
| Şekil 4. 42. 10 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı. | 98 |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

| | |
|---|----|
| Çizelge 2. 1. Nötron parçacıklarının sınıflandırılması (James) | 8 |
| Çizelge 2. 2. Temel radyasyon tiplerinin özellikleri. | 12 |
| Çizelge 2. 3. Betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması. | 21 |
| Çizelge 2. 4. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (2017). | 21 |
| Çizelge 2. 5. Kolemanit cevherinin kimyasal bileşimi. | 22 |
| Çizelge 3. 1. Sıvı haldeki reçinenin özellikleri. | 33 |
| Çizelge 3. 2. Sertleştirildikten sonra post-kür işlemine tabi tutulan saf reçinenin mekanik özellikleri. | 34 |
| Çizelge 3. 3. Kullanılan cam elyafın teknik özellikleri. | 34 |
| Çizelge 3. 4. Barit mineralinin fiziksel özellikleri. | 36 |
| Çizelge 3. 5. Manyetit mineralinin fiziksel özellikleri. | 37 |
| Çizelge 3. 6. Kolemanit mineralinin fiziksel özellikleri. | 38 |
| Çizelge 3. 7. Üretilecek kompozit plakaların ağırlıkça birleşim oranları. | 40 |
| Çizelge 3. 8. Deneme dökümleri sonucunda belirlenen oranlar ve jelleşme süreleri. | 43 |
| Çizelge 3. 9. Kullanım oranına göre SWCNT çözeltisinden alınacak malzeme miktarları. | 44 |
| Çizelge 3. 10. Üretilen numunelerin kodları. | 48 |
| Çizelge 3. 11. Gama radyasyonu ölçüm sistemine ait teknik bilgiler. | 59 |
| Çizelge 3. 12. Nötron radyasyonu ölçüm sistemine ait teknik bilgiler. | 60 |
| Çizelge 4. 1. Numunelerin viskozite ölçüm sonuçları. | 62 |
| Çizelge 4. 2. Çekme dayanımı test sonuçları. | 64 |
| Çizelge 4. 3. Üç nokta eğilme dayanımı test sonuçları. | 67 |
| Çizelge 4. 4. Charpy darbe dayanımı test sonuçları. | 68 |
| Çizelge 4. 5. Numunelerin termal iletkenlik katsayı ölçüm sonuçları. | 70 |
| Çizelge 4. 6. CNT grubu gama geçirgenlik testi sonuçları. | 75 |
| Çizelge 4. 7. Barit grubu gama geçirgenlik testi sonuçları. | 76 |
| Çizelge 4. 8. Manyetit grubu gama geçirgenlik testi sonuçları. | 77 |
| Çizelge 4. 9. Kolemanit grubu gama geçirgenlik testi sonuçları. | 77 |
| Çizelge 4. 10. Dedektör tarafından okunan boş sayımlar. | 80 |
| Çizelge 4. 11. CNT grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları. | 81 |
| Çizelge 4. 12. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri. | 84 |
| Çizelge 4. 13. Barit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları. | 85 |
| Çizelge 4. 14. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri. | 88 |
| Çizelge 4. 15. Manyetit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları. | 89 |
| Çizelge 4. 16. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri. | 92 |
| Çizelge 4. 17. Kolemanit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi | |

| | |
|--|----|
| ortalamları. | 93 |
| Çizelge 4. 18. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan kolemanit grubuna ait soğurma yüzdeleri. | 95 |



KISALTMALAR

| | |
|-------|---|
| ASTM | Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu |
| Ci | Curie |
| eV | Elektronvolt |
| HVL | Yarı değer kalınlığı |
| ISO | Uluslararası Standartlar Teşkilatı |
| MEK-P | Metil eter keton peroksit |
| MeV | Mega elektronvolt |
| MWCNT | Çok duvarlı karbon nanotüp |
| SEM | Taramalı elektron mikroskobu |
| SWCNT | Tek duvarlı karbon nanotüp |
| TS | Türk Standartları |
| TVL | Onda bir değer kalınlığı |



SİMGELER

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| α | Alfa ışınları |
| Z | Atom numarası |
| Bq | Becquerel |
| β | Beta ışınları |
| Cp | Centipoise |
| rpm | Dakikada bir devir |
| λ | Dalga boyu |
| ν | Fotonun frekansı |
| γ | Gama ışınları |
| Gray | Gray |
| c | Işık hızı |
| μ_m | Kütle zayıflatma katsayısı |
| μ | Lineer zayıflatma katsayısı |
| mPa | Megapaskal |
| m ² | Metrekare |
| mSv | Milisievert |
| N | Newton |
| n/m ² .s | Nötron akısı |
| n | Nötron ışınları |
| Q | Reaksiyon enerjisi |
| Rem | Roentgen equivalent of man |
| s | Saniye |
| °C | Santigrat derece |
| Sv | Sievert |
| W/m.K | Termal iletkenlik katsayısı |
| ρ | Yoğunluk |
| % | Yüzde |

ÖZET

NANOMALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİĞİNE SAHİP POLİMER KOMPOZİT ÜRETİLMESİ

Ali Murat SÜRÜCÜ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojisi Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Ağustos 2021, 108 sayfa

Bilim dünyasındaki gelişmeler radyasyonun birçok sektörde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Ancak radyasyonun sağladığı yararların yanında hayati öneme sahip zararları da gözler önüne serilmiştir. Bunun sonucunda radyasyondan faydalanırken zararlarını en aza indirme gereksinimi birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu tez çalışmasında polimer bağlayıcı kullanılarak radyasyon ışınlarını soğurma özelliğine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen kompozit numunelerde matris fazında polimer bağlayıcı olarak tereftalik polyester reçinesi, takviye fazında ise cam elyaf dokumalar kullanılmıştır. Takviye fazında ayrıca nanomateryal takviyesi olarak %0,01, %0,05 ve %0,1 oranlarında tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin radyasyon zırlama etkinliği arttırmak amacıyla kompozit malzeme üretiminde dolgu malzemesi olarak reçine ağırlığının %50'si oranında mikronize kolemanit, barit ve manyetit kullanılmıştır. Tüm dolgu grupları için referans numuneler de hazırlanarak toplamda 15 farklı tipte kompozit plaka üretilmiştir. El yatırması yöntemiyle üretilen kompozitlerin; mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, eğilme ve darbe dayanımı testleri, fiziksel özelliklerini belirlemek için ise termal iletkenlik ve yoğunluk testleri yapılmış, SEM analizi gerçekleştirilerek de malzeme karakterizasyonları belirlenmiştir. Numunelerin nötron radyasyonlarına karşı soğurma performansları 2 Ci aktiviteye sahip 4-5 MeV enerjili ^{241}Am - ^9Be nötron kaynağına sahip deney düzeneğinde test edilmiştir. Gama radyasyonu geçirgenlik testleri ise ortalama 1,233 MeV enerji değerine sahip ^{60}Co kaynağına sahip deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar analiz edilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan soğurma testlerine göre nötron parçacıklarını en yüksek zırlama performansı %94,09 oranındaki performansıyla 2,68 cm kalınlığa sahip %0.05 SWCNT takviyeli Kolemanit dolgulu kompozit plaka göstermiştir. Gama ışınlarına karşı en yüksek zırlama performansı ise lineer zayıflatma katsayısı (μ) ve yarı değer kalınlığı (HVL) sırasıyla $0,101\text{ cm}^{-1}$ ve $6,871\text{ cm}$ olarak hesaplanan %0,1 SWCNT barit dolgulu numunede (BC-1) elde edilmiştir. Sonuçlar; SWCNT takviyesinin nötron radyasyonuna karşı belirgin etkisinin olmadığını, gama radyasyonuna karşı ise kompozitlerin lineer zayıflatma katsayılarını en fazla %27 oranında arttırdığını göstermiştir.

Anahtar sözcükler: KNT, Kompozit malzemeler, Nanomalzemeler, Radyasyon zırlama.

ABSTRACT

PRODUCTION OF RADIATION SHIELDING POLYMER COMPOSITE REINFORCED WITH NANOMATERIALS

Ali Murat SURUCU

Düzce University

Graduate Education Institute, Department of Composite Materials Technology

Master's Thesis

Advisor: Prof. Dr. Serkan SUBASI

August 2021, 108 pages

Developments in the scientific world have made the use of radiation widespread in many sectors. However, besides the benefits of radiation, its vital harms have also been revealed. As a result, the need to minimize the damage while benefiting from radiation has been the subject of many researches. In this thesis, it is aimed to develop polymer composites with the ability to absorb radiation rays by using polymer binders. Terephthalic polyester resin was used as polymer binder in the matrix phase and glass fiber fabrics were used in the reinforcement phase in the composite samples produced. In the reinforcement phase, 0.01%, 0.05% and 0.1% single-walled carbon nanotube (SWCNT) was used as nanomaterial reinforcement. In order to increase the radiation shielding efficiency of the produced composites, 50% of the resin weight micronized colemanite, barite and magnetite were used as filling materials in the production of composite materials. A total of 15 different types of composite plates were produced by preparing reference samples for all filling groups. Composites produced by hand lay-up method; Tensile, bending and impact strength tests were carried out to determine the mechanical properties, thermal conductivity and density tests were performed to determine the physical properties, and material characterizations were determined by performing SEM analysis. The absorption performances of the samples against neutron radiations were tested in an experimental setup with a 2 Ci activity and a ^{241}Am - ^9Be neutron source with 4-5 MeV energy. Gamma radiation transmittance tests were carried out in an experimental setup with a ^{60}Co source with an average energy value of 1,233 MeV. The results from the experimental studies were analyzed and compared with each other. According to the absorption tests, the highest shielding performance of neutron particles was demonstrated by the 0.05% SWCNT reinforced Colemanite filled composite plate with a thickness of 2.68 cm with a performance of 94.09%. The highest shielding performance against gamma rays was obtained in the 0.1% SWCNT barite filled sample (BC-1), whose linear attenuation coefficient (μ) and half value thickness (HVL) were calculated as 0.101 cm^{-1} and 6.871 cm, respectively. Results; It has been shown that SWCNT reinforcement has no significant effect against neutron radiation, but increases the linear attenuation coefficients of composites by up to 27% against gamma radiation.

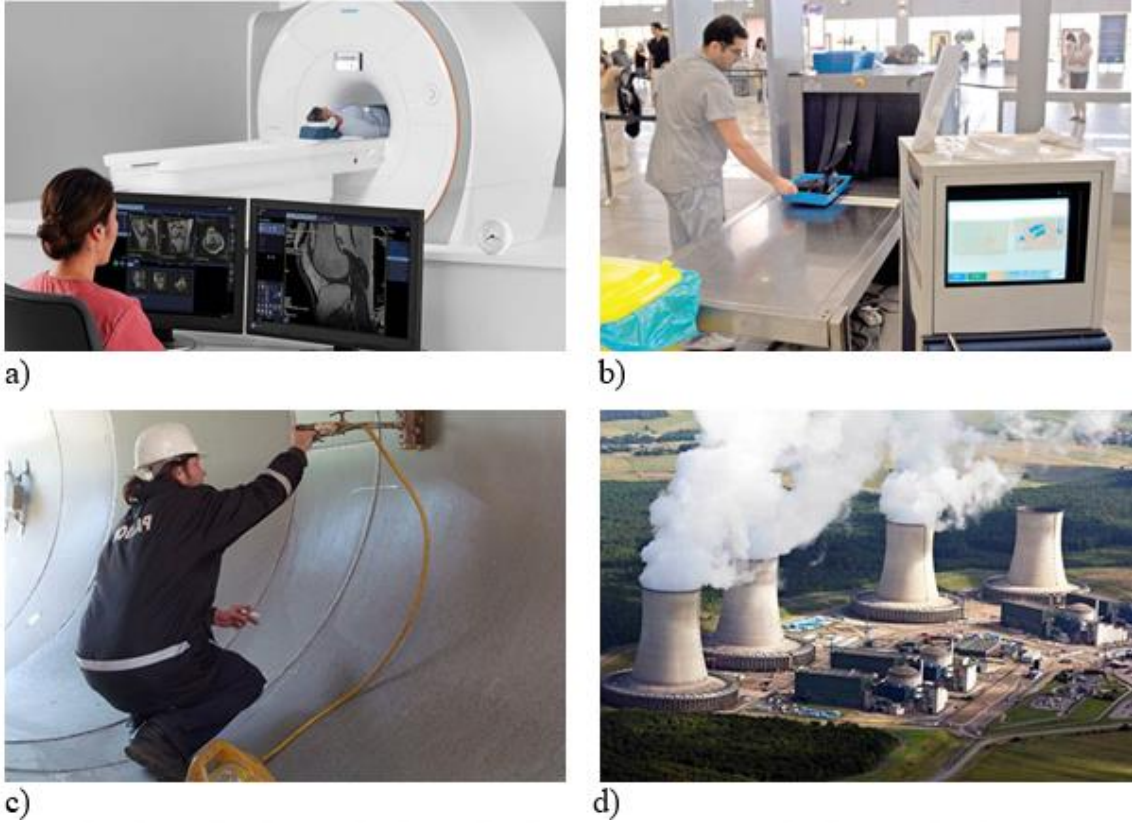
Keywords: CNT, Composite materials, Nanomaterials, Radiation shielding.

1. GİRİŞ

1890'lı yıllara kadar günlük yaşamdaki olaylar Newton'un kütle çekimi ve hareket yasalarıyla açıklanmıştır. Ancak klasik fizik kurallarının atomun yapısı gibi bazı konuları açıklamakta yetersiz kalışı klasik fiziğe olan güvenin temelini sarsmıştır. Daha sonra Wilhelm Röntgen tarafından 1895 yılında x ışınlarının icad edilmesiyle başlayan ve birçok bilim insanının katkılarıyla maddenin yapısını açıklayan bir keşifler serisi gerçekleşmiştir. X ışınlarının keşfinden hemen sonra Henri Becquerel radyoaktiviteyi keşfetmiş (1896) ve atomların yapı taşlarından oluştuğunu belirtmiştir. Becquerel'in doktora öğrencisi olan Marie Curie, eşi Pierre Curie'nin de çalışmalarına desteği ile uranyumla yaptığı deneylerle bu çalışmalara katkı sağlamış, daha sonra toryumun radyoaktifliğini bulmuş ve radyum elementini ayrıştırarak radyoloji biliminin temelini atmıştır. Bu çalışmaları takiben Rutherford, atomun pozitif yüklü küçük bir çekirdeğe sahip olması gerektiğini ortaya koyduğu alfa parçacıklarıyla yaptığı saçılma deneyi sonucunda, çekirdekli atom modelini ortaya koymuştur (1911). Rutherford'un doktora öğrencisi olan Niels Bohr ise Max Planck'ın hipotezini ve Rutherford'un çalışmalarındaki verileri kullanarak yeni bir atom modeli ortaya koymuştur (1913). Modern Fizik'in başlangıcını oluşturan bu gelişmeler ve elde edilen veriler, atomların küçük bilardo toplarına benzetilemeyeceği, daha karmaşık yapısının ve özelliklerinin olduğunu ortaya koyan daha büyük keşiflere yol açmıştır. Kâşiflerine ise Nobel ödülleri kazandıran tüm bu keşifler radyasyon biliminin temelini oluşturmuştur.

Radyasyon bilimindeki ilk keşifle beraber radyasyonun günlük hayatta kullanımı hemen başlamıştır. İlk olarak tıpta teşhis aracı olarak kullanılan radyasyon ışınları daha sonra nokta atışı şeklinde kullanılarak kanserli hücrelerin öldürülmesinde tedavi amacıyla kullanılmış ve sterilizasyon işlemleriyle de tıp alanında yaygın hale gelmiştir. İyonize radyasyonların diğer bir kullanım alanı da güvenlik kontrol sistemleridir. Tıbbi görüntüleme cihazlarının çalışma mantığına benzer şekilde havaalanı girişleri, alışveriş merkezleri ve kamu binalarının girişleri gibi yerlerdeki güvenlik kontrol sistemlerinde de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde elektrik üretiminde öne çıkan alternatiflerden biri olan nükleer santraller de, dünya üzerinde birçok ülke tarafından

tercih edilmektedir. Ayrıca endüstride üretilen bazı ürünlerin tahribatsız muayene işlemlerinde hata ve süreksizliklerin tespiti için radyasyon ışınlarından faydalanılmaktadır.



Şekil 1. Radyasyonun kullanım alanları a) Tıbbi görüntüleme cihazı, b) güvenlik kontrol sistemi, c) Endüstriyel test yöntemi ve d) Nükleer santral.

Radyasyonun kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda zararları henüz bilinmezken o yıllarda radyasyonla çalışan bilim insanları zamanla bazı hastalıklara yakalanmış ve bazıları ise hayatlarını kaybetmişlerdir. Ancak radyasyonun farklı sektörlerde kullanılmaya başlanmasından uzun zaman sonra ölümcül etkilere sahip olabileceği anlaşılmıştır. Radyasyonun insan sağlığı üzerinde yaratabileceği zararlı etkiler uzun zamandır bilinmektedir. Bu etkiler radyasyona bağlı yanıklar, yaşam süresinin kısalması, kanser ve genetik bozukluklardır. Üstelik yüksek miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınması halinde ani ölümlere bile rastlamak mümkündür [1]

2. KURAMSAL TEMELLER

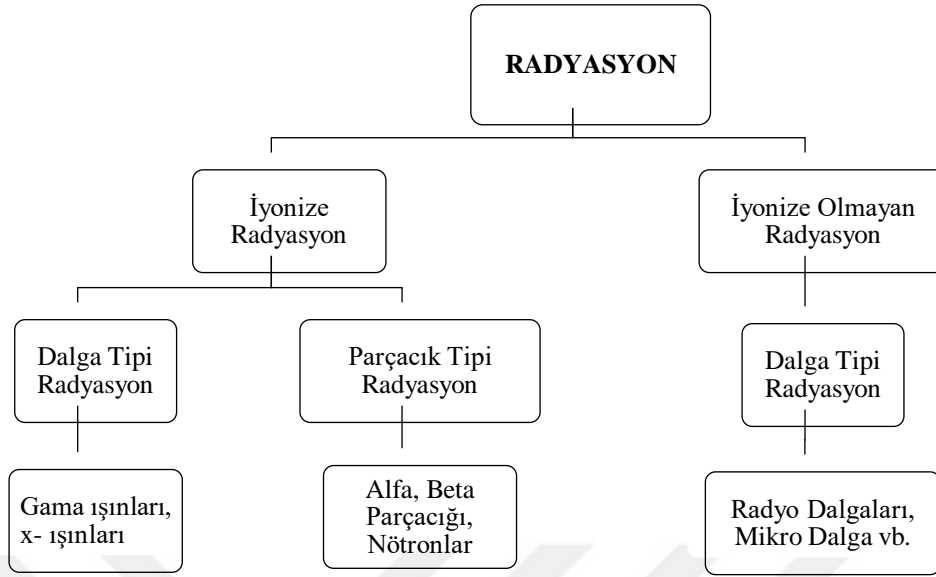
2.1. RADYASYON

Dünyada her şey atomlardan oluşmaktadır. Atomlar; hidrojen, karbon, oksijen, demir ve kurşun gibi elementlerin yapı taşlarıdır. Atomlar çekirdeğinde pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar ile birlikte çekirdeğin etrafındaki belli enerji düzeylerinde dolanan negatif yüklü elektronlardan oluşur. Bu pozitif yükler ile negatif yükler atomu dengede tutar.

Doğada kararlı çekirdeğe sahip atom sayısı oldukça azdır. Kararlılık esasen bir atomun bulundurduğu proton ve nötron sayıları arasındaki dengedir. Daha küçük kararlı atomlar eşit sayıda proton ve nötrona sahipken daha büyük kararlı atomlar ise protondan biraz fazla nötrona sahiptir. Çok fazla nötrona bulunan atomlar bir nötrona bir protona dönüştürerek kararlı yapıya geçme eğilimindedir ve beta bozunumu olarak bilinen bu süreç beta parçacığı olarak adlandırılan negatif yüklü bir elektronun salınımı ile sonuçlanır.

Çok sayıda protonu olan atomlar ise fazla protonlarını nötronlara dönüştürerek pozitif yüklü elektron olan pozitron salınımı yaparlar ve pozitif yüklerini kaybederek kararlı hale gelirler. Bu dönüşümlerde atom çekirdeği çoğu kez yüksüz ve kütesiz yüksek enerjili fotonlar yayarak fazla enerjilerini kaybederler. Atom çekirdeğinde kendiliğinden gerçekleşen bu dönüşüme radyoaktivite denir. Bu dönüşüm olayına ise bozunum adı verilir. Radyasyon veya ışınım, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar biçimindeki enerji yayımı ya da aktarımıdır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iyonize ve iyonize olmayan şekilde iki gruba ayrılır. İyonlaşma; atomlardan ve moleküllerden elektron koparılmasıdır. Enerji yüklü fotonlardan oluşan elektromanyetik dalga veya parçacıklar, çarptıkları cisimlerden elektron kopararak iyonlaşmalara yol açabilirler.

İyonlaştırıcı radyasyon kozmik ışınlar, x- ışınları ve radyoaktif maddelerden yayınlanan radyasyonu içerir. İyonize olmayan radyasyon ise kızılötesi ışık, radyant ısı, morötesi ışık, görünür ışık, radyo dalgaları ve mikro dalgaları içerir [2], [3].



Şekil 2. 1. Radyasyonun sınıflandırılması.

2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

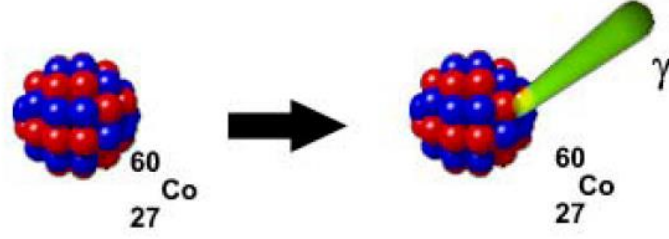
İyonlaştırıcı radyasyon, atomların yörüngelerinden elektron koparmak için yeterli enerjiye sahip herhangi bir elektromanyetik radyasyon türüne denir. İyonlaştırıcı radyasyonlar dalga (elektromanyetik) ve parçacık tipleri olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.1.1.1. Dalga (Elektromanyetik) Tipi Radyasyon

Bu tip radyasyonlar, enerjileri; Radyo dalgaları, Mikro dalgalar ve Kızılötesi dalgalar gibi diğer elektromanyetik dalgalara göre çok daha yüksek olan radyasyonlardır. Elektromanyetik spektrumda yüksek enerji bölgesinde bulunurlar ve enerjileri yüksek olduğundan etki ettikleri maddeler kazandıkları bu fazla enerjiyi dengeleyip kararlı olmak için iyonlaşmaya maruz kalırlar. Gama ve x-ışınları bu grupta yer almaktadır [4].

➔ Gama (γ) Işınması

Gama radyasyonu çekirdekteki bozunma tepkimelerinden yayınlanan elektromanyetik dalgalarıdır. Bu tepkimelerin öncesinde alfa veya beta bozunumu sonucunda oluşan çekirdek genelde kararlı halde bulunmamaktadır. Bu çekirdek kararlı hale geçebilmek için fazla enerjisini gama radyasyonu adı verilen elektromanyetik dalga şeklinde ortama yaymaktadır [5].

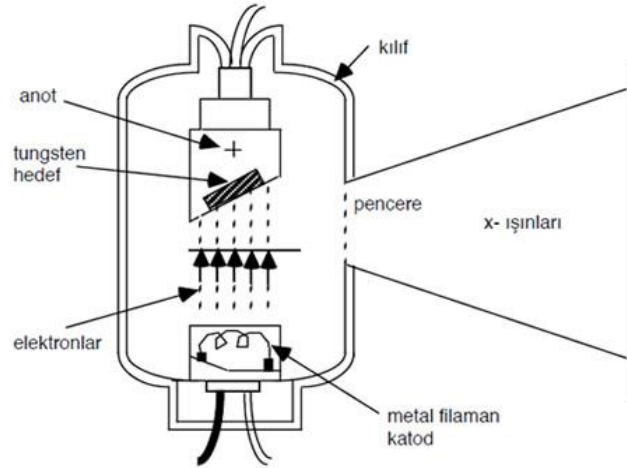


Şekil 2. 2. Gama ışınması.

Gama ışınları elektromanyetik radyasyon içerisinde yüksek giriciliğe sahip olan ışınlardır. Gama radyasyonu zırhlama maddesinden geçerken üstel olarak azalmaktadır. Bu nedenle teorik olarak zırh malzemesinin kalınlığı ne olursa olsun gama ışınları tamamıyla soğrulmamaktadır [6].

➔ X - Işınları

İlk olarak W.C. Roentgen tarafından 1895 yılında keşfedilen X-ışınları Crookes tüpü kullanılarak elde edilmektedir. Gama ışınlarının ardından giriciliği en yüksek olan iyonlaştırıcı radyasyon tipidir. Radyografi ve radyoskopi teknikleriyle tıpta ve güvenlik sistemlerinde en çok kullanılan radyasyon çeşitlerinden bir tanesi de X-ışınlarıdır [5]. X ışını tüpünün şematik gösterimi Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. X-ışını tüpünün şematik gösterimi.

X-ışınlarının üretimi, cam bir tüp içerisinde bulunan katot filamandan elektron formunda enerji yayılmasıyla başlamaktadır. Yayılan elektronlar tüpün diğer ucundaki tungsten metalinden açılı şekilde kesilerek yerleştirilmiş pozitif yüklü anot kısmına çarparak foton

formunda enerji yaymaktadır. Bu yüksek enerjili fotonlar tütün yalnızca pencere kısmından çıkarak x-ışınları üretilmektedir.

2.1.1.2. Parçacık Tipi Radyasyon

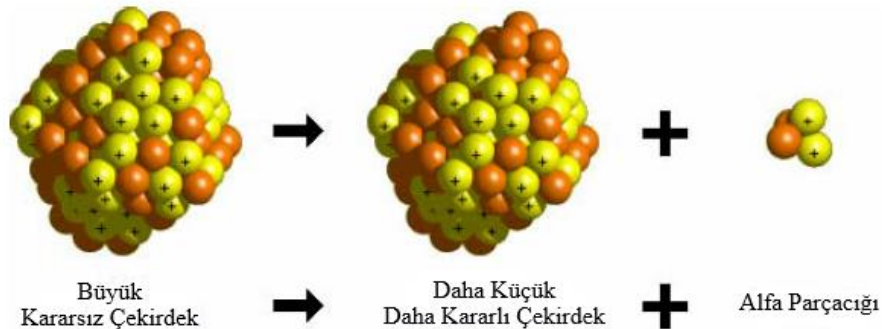
Parçacık tipi radyasyonunu alfa ve beta ışınları ile nötron parçacıkları oluşturmaktadır. Belli bir kütlesi ve enerjisi olan bu parçacıklar atomun çekirdeğinde meydana gelmekte ve çok hızlı hareket edebilmektedirler. He (Helyum) çekirdeği olarak adlandırılan alfa parçacıkları yükü ve kütlesinden dolayı madde içindeki giriciliği çok küçüktür. Alfa parçacığını kağıt parçasıyla bile durdurmak mümkündür.

Beta parçacığı hem artı hem de eksi yüklere sahiptir. Beta parçacıkları da belli bir yüke ve kütleyle sahiptir. Belirli bir yükü ve kütlesi olduğu için madde içerisinden geçerken iyonlaşmaya neden olurlar. Bu iyonlaşma, alfa parçacıklarının yarattığı iyonlaşmadan daha azdır. Çünkü beta parçacıkları alfa parçacıklarına göre daha hafif ve daha giricidirler. Beta parçacıkları ise metal bir levha tarafından durdurulabilmektedir.

Çekirdek reaksiyonlarının birçoğunu serbest nötron etkileşimleri oluşturmaktadır. Bunların bir kısmı fisyon adı verilen çekirdek bölünmeleridir. Bu sebeple nükleer reaktörler ve parçacık hızlandırıcılar nötron kaynağı olarak kabul edilmektedir. Nötronlar yüksüz parçacıklar oldukları için madde içinde kolayca ilerleyebilmelerine rağmen küçük çekirdeklerle etkileşime girdiklerinde yavaşlayabilmektedirler [7].

➔ Alfa (α) Bozunumu

Çekirdeğin kararsızlığı hem nötron hem de proton fazlalığından meydana geliyor ise; kararsız çekirdek Şekil 2.4'te görüldüğü gibi iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlayarak daha küçük ve kararlı bir çekirdeğe bozunur.

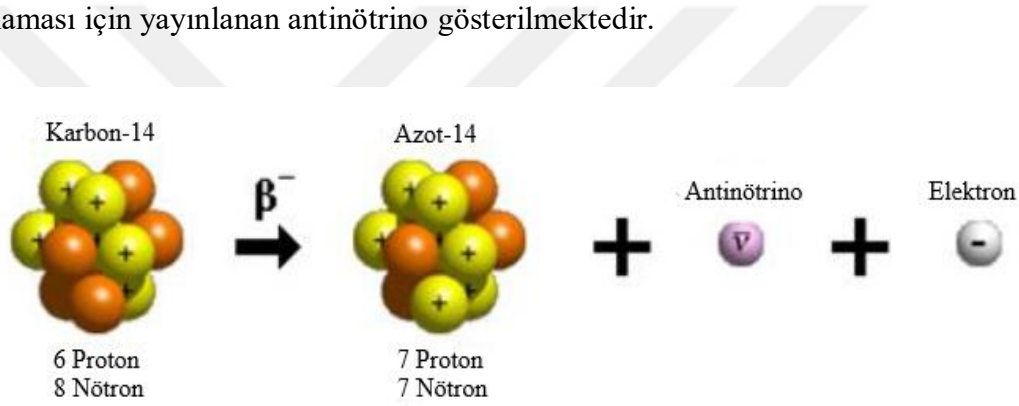


Şekil 2. 4. Alfa bozunumu.

Alfa parçacığı iki elektronunu kaybetmiş bir Helyum atomudur. Bozunum nedeniyle ortaya çıkan enerjinin büyük bir kısmını, momentumun korunumu kanununca küçük kütleyle sahip olan alfa parçacığı alır. Alfalar yüksek enerjiye sahip olsa da ağır kütlesi nedeniyle menzilleri çok kısadır. Fakat havada yoğun iyonlaşmaya sebep olurlar [8].

➔ Beta (β) Bozunumu

Kararsız çekirdekler fazla enerjilerinden kurtulmak ve kararlı hale geçebilmek için belli bir kütle ve enerjiye sahip elektron veya pozitron yayınlamaktadırlar (Şekil 2.3). Nötronun protona dönüşmesi veya protonun nötrona dönüşmesi sırasında beta parçacıkları yayınlanmaktadır. Şekil 2.5'te Karbon-14 çekirdeğindeki bir nötronun protona dönüşmesi sonucu ortaya çıkan beta (β^-) parçacığı ve momentumun korunmasını sağlaması için yayınlanan antinötrino gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Beta bozunumu.

Beta radyasyonu olarak bilinen parçacıklar alfa parçacıklarına göre daha küçüktür ve bu sebeple madde içerisine nüfuz edebilme kabiliyeti alfalara göre daha yüksektir. Havada birkaç metre yol alabilen bu parçacıklar enerjileri yüksek olduğunda göz ve deri için problem oluşturmaktadır. Kağıt ve deriden rahatça geçebilen beta parçacıkları ince bir alüminyum levha ya da plastik malzemeler kullanılarak durdurulabilmektedir [5].

➔ Serbest Nötronlar

Serbest nötronlar yüksüz parçacıklar oldukları için madde içerisinden kolayca geçebilmektedirler. İyonlaştırıcı özellikleri, temas ettikleri maddelerle etkileşimleri sırasında açığa çıkan α , β -parçacıkları, γ ve x-ışınları gibi radyasyonlar sayesinde oluşmaktadır.

2.2. NÖTRON PARÇACIKLARININ KEŞFİ VE ÖZELLİKLERİ

Nötronlar ilk kez 1930 yılında gözlenmiştir. W.Bothe ve Hebert Becker berilyumu α tanecikleri ile bombardıman ederek çok delici bir ışınım elde etmişler, bundan kısa bir süre sonra Curie ve Joliot, bu ışının parafinden geçerken yüksek enerjili bir proton yayımlandığını farketmişlerdir. Protonların parafin içindeki menziline kullanarak, enerjilerini 5,3 MeV olarak hesaplamışlardır. Hesapladıkları bu ışının γ ışını olmadığını, protonların parafinden Compton olayına benzer bir çarpışma ile koparılmadığından çıkarmışlardır. Compton saçılması formülünü kullanarak yaptıkları hesaplara göre, bu kadar yüksek enerjili proton koparabilecek “gama ışınlarının” enerjisinin en az 52 MeV olmaları gerektiğini sonucundan yola çıkarak; aradaki büyük enerji farkının elde edilen ışının gama ışını olmadığı sonucuna varmışlardır. Chadwick 1932’de doğru açıklamayı ortaya koyarak bu bilinmeyen ışının, kütlesi hemen hemen protonunki kadar olan nötr parçacık (dolayısıyla delici ve iyonlaştırmayan) olduğunu ileri sürmüştür. Chadwick nötronlarla başka saçılma deneyleri de yaparak hipotezini doğrulamış ve genellikle nötronu keşfeden kişi olarak kabul edilmiştir [9].

Çizelge 2. 1. Nötron parçacıklarının sınıflandırılması [10].

| | |
|-------------------|------------------------|
| Soğuk (T< 20 °C) | <0.0253 eV |
| Termal | 0.0253 eV |
| Epitermal | 0.0253-1 eV |
| Epikadmium | >1eV |
| Yavaş | 0.0253-100 eV |
| Orta Enerjili | 0.5-10 ⁴ eV |
| Hızlı | 0.01-10 MeV |
| Yüksek Enerjili | >10 MeV |

2.2.1. Nötron Kaynakları

➔ (alfa) - Berilyum kaynakları

Berilyumun kararlı izotopu olan ⁹Be, nispeten zayıf bağlı bir nötrona sahiptir. Radyoaktif bozunmadan çıkan bir α parçacığı bir ⁹Be çekirdeğine çarparsa bir nötron oluşur;



Bu tepkimenin Q değeri 5,7 MeV'tur. ^{226}Ra gibi uzun-ömürlü bir α yayınlayıcı madde bu tepkimeye kullanılırsa 13 MeV enerji değerlerine uzanan, düzgün bir nötron üretimi gerçekleşir. ^{226}Ra ve radyoaktif ürünlerinin yüksek enerjili γ ışını yayınlamalarından dolayı radyum-berilyum kaynakları yerine yaygın olarak ^{210}Po , ^{238}Pu ve ^{241}Am kaynakları kullanılmaktadır.

➤ Fotonötron kaynakları

Alfa-nötron kaynaklarına benzer bir yöntemle gama-nötron kaynakları da, nötron elde etmek için kullanılabilir. Fotonötron elde etmenin foton kaynağının tekenerjili olması durumunda nötronların da tekenerjili olmasıdır. Örneğin ^{24}Na izotopu tarafından yayımlanan 2,76 MeV'lik γ ışınlarının soğurulması ^9Be 'deki nötronların koparılmasını sağlayabilir;



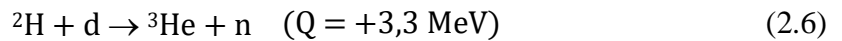
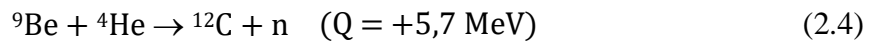
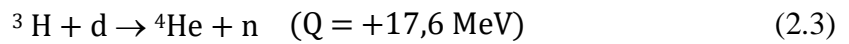
Bu kaynakların dezavantajı büyük γ ışını aktivitesine sahip kaynakların nötronları üretmek için kullanılmasıdır.

➤ Kendiliğinden fisyon

Kendiliğinden fisyon olayında nötronlar ^{252}Cf izotopunda olduğu gibi doğrudan çekirdek reaksiyonları sonucunda üretilirler. Parçalanma başına 4 nötronun elde edildiği bu reaksiyonların ortalama enerjisi 1-3 MeV arasında değişir. Gerçekleşen bozunmaların %3'lük kısmı fisyon, geri kalanı α bozunumudur. 1 gr ^{252}Cf başına $2,3 \times 10^{12}$ nötron/s düşer [9], [11].

➤ Nükleer reaksiyonlar

Nötronların elde edilebildiği birçok nükleer tepkime bulunmaktadır. Yüklü parçacık enerjisinin ve nötron yayımlanma açısının özenli seçimiyle neredeyse istenen her enerji değerinde ve tek enerjili nötron demeti elde edilebilmektedir. Nötron elde etmek için kullanılan bazı nükleer reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Nükleer tepkimelerin başlatılabilmesi için gerekli yüklü parçacıkların parçacık hızlandırıcılar vasıtasıyla elde edilmesinden dolayı diğer radyoaktif bozunma kaynakları kadar kullanışlı değildir.

➤ **Reaktörler**

İçerisinde sürekli ve kontrollü çekirdek bölünmelerinin olduğu yapılara nükleer reaktör adı verilir. Çekirdek tepkimeleri sonucunda açığa çıkan enerjinin genellikle suyu kaynatarak buhar haline getirdiği ve bu buharın yüksek basınçla türbinleri döndürerek hareket enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğü sistemlerdir. Bir nükleer reaktörde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda reaktör içinde kısa sürede çok fazla nötron parçacığı açığa çıkar. Bir fisyon reaktöründe, birim zamanda (s) birim yüzey alanından (m^2) yayılan nötron sayısı yaklaşık 10^{19} n/ m^2 s değerindedir. Bu yüksek bir nötron verimidir [4].

2.3. RADYASYON BİRİMLERİ

2.3.1. Aktivite Birimi

Belirli bir miktarda radyoaktif maddede kendiliğinden gerçekleşen dönüşümlerin hızı aktivite olarak bilinir. Aktivite becquerel birimi ile ifade edilir ve sembolü Bq'dir. 1 saniyede bir dönüşüme eşittir [2].

2.3.2. Işınlama Birimi

Özel birim olarak Röntgen, SI birim sisteminde ise Coulomb/kg kullanılır. Röntgen, normal şartlar altında (0 °C ve 760 mm Hg basınçta) 1 kg havada bulunan 2.58×10^{-4} C'luk elektrik yüküne karşılık gelen x ve gama ışını miktarıdır.

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.7)$$

3 MeV enerjiden düşük değerlerdeki x veya gama ışınları için Röntgen birimi kullanılmaktadır. Parçacık tipindeki radyasyon ışınları için Röntgen birimi kullanılmamaktadır. Bu değerler radyasyon hızından bağımsızdır [4], [12].

2.3.3. Soğurulmuş Doz

Radyasyonunu insan dokusu gibi herhangi bir maddenin birim kütlesine aktardığı enerji miktarı soğurulmuş doz olarak adlandırılır. SI birim sistemine göre birimi gray, sembolü ise Gy'dir. 1 Gy kilogram başına 1 joule'dür. Özel birimi Rad'dır. Işınlanan maddenin 1

kilogramına 10^{-4} Joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır. Klasik radyolojik tetkiklerde (Film çekimlerinde) alınan doz 0.001 Gy'den küçüktür. Yıllık doğal radyasyondan kaynaklanan doz düzeyi ise (Toprak, kozmik ışınlar, gıdalar, Radon,...) yaklaşık 0.0024 Gy'dir [2], [12].

2.3.4. Eşdeğer Doz

İyonize radyasyonların canlı dokular ile etkileşim mekanizmaları farklıdır. Aynı miktarda soğurulmuş dozlar aynı biyolojik etkiye sebep olmayabilir. İyonlaştırıcı radyasyonun farklı tiplerinin sahip olduğu hasar oluşturma potansiyelini aynı prensipleri esas alarak inceleyebilmek için yeni bir niceliğe gereksinim duyulmuştur. Bu nicelik eşdeğer doz olarak adlandırılır. SI birim sistemindeki karşılığı sievert'tir. 1 Gray'lik x ve γ ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır. Özel birimi ise Roentgen equivalent of man sözcüklerinin baş harflerini simgeleyen Rem'dir.

$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad (2.8)$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem} = 1 \text{ j/kg} \quad (2.9)$$

Sievert yüksek bir doz değeridir. Genellikle binde biri olan milisievert (mSv) kullanılır.

2.3.5. Etkin Doz

Etkin doz vücudumuzun tamamının doku veya organların aldığı dozu ifade etmektedir. Etkin doz eşdeğer dozlarının doku ağırlık faktörleri ile çarpımından elde edilir.

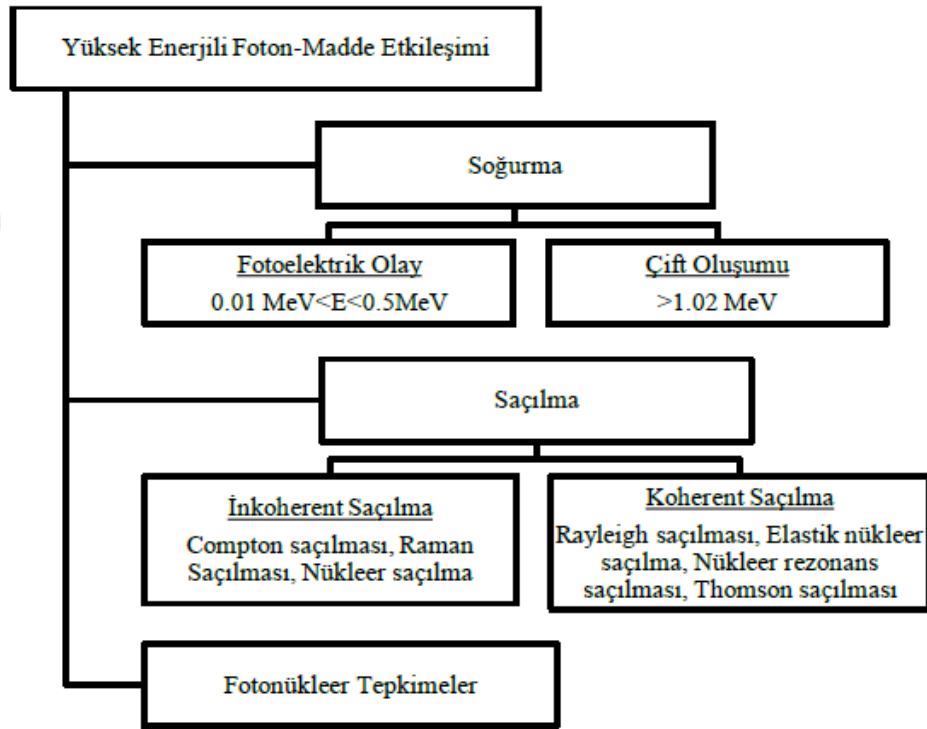
2.4. RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

Hangi tip olursa olsun radyasyon, yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere yol açar. Hedefteki enerji birikimi radyasyon dozu olarak tanımlanır ve eğer hedef canlı doku ise, sonuç çoğunlukla istenmeyen biyolojik değişimlerdir. İster parçacık ister elektromanyetik biçimde olsun, madde ile etkileşimine enerji, kütle, momentum ve yük özelliklerinin hepsinin katkısı vardır. Çeşitli soğurma ve saçılma etkileşimleri ortamın uyarılmasına veya iyonizasyonuna neden olurlar. Yüklü parçacıklar genelde önemli miktarda enerji kaybederken, fotonlar ve nötronlar, saçılma ve soğurma etkileşimleri ile enerji aktarırlar. Çizelge 2.2'de çeşitli tepkimeler sonucunda ortaya çıkan radyasyon tipleri ve bunların özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2. Temel radyasyon tipleri ve özellikleri.

| Radyasyon | Yük | Enerji | Havadaki Menzil | Sudaki Menzil |
|------------------------------------|---------|-------------|-----------------|-----------------------|
| α parçacıkları | +2 | 3-10 MeV | 2-10 cm | 20-125 μ m |
| β^+ , β^- parçacıkları | ± 1 | 0-3 MeV | 0-10 m | <1 cm |
| Nötronlar | 0 | 0-10 MeV | 0-100 m | 0-1 m |
| X-ışınları | 0 | 0.1-100 MeV | m-10 m | mm-cm |
| Gama Işınları | 0 | 0.01-10 MeV | cm-10 m | mm-10 cm mertebesinde |

Farklı tipteki radyasyonların soğurucu ortamla etkileşme mekanizmaları; depolanan enerjinin miktarı, soğurucu ortamın karakteristik özelliklerinin radyasyon aktivite ve dozunu nasıl değiştirdiği, radyasyon dedektör tasarımı gibi işlemler için esas teşkil eder. Şekil 2.6'da radyasyonun madde ile etkileşim türleri özetlenmiştir.

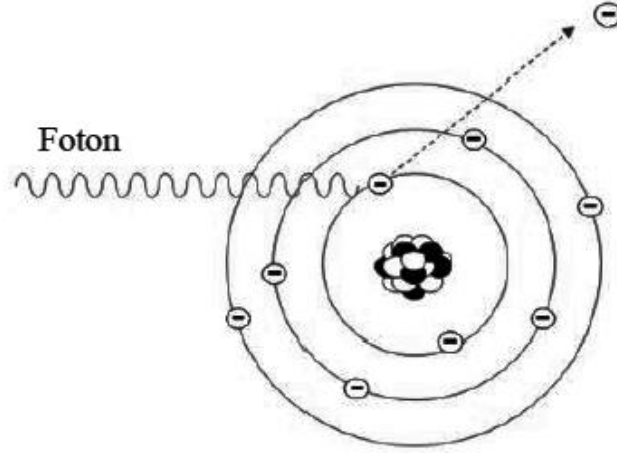


Şekil 2. 6. Radyasyonun madde ile etkileşim türleri.

2.4.1. Fotonların Etkileşim Mekanizmaları

2.4.1.1. Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili bir fotonun yörüngedeki bir elektronla çarpışarak onu atomdan ayırması olayı fotoelektrik olay olarak adlandırılır. Elektron, gelen fotonun enerjisi ile yörüngedeki elektronun bağlanma enerjisi arasındaki fark kadar bir enerjiyle atomdan ayrılır.

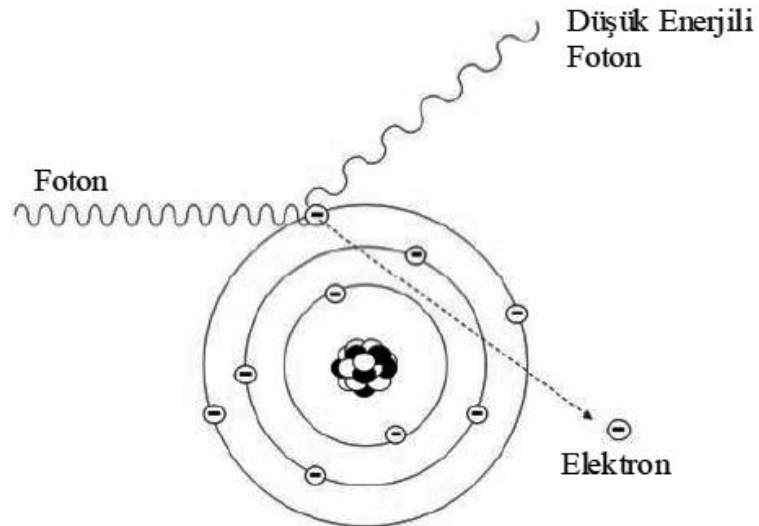


Şekil 2. 7. Fotoelektrik olay.

Elektronun fırlatılması sonucu yörüngede ortaya çıkan boşluk, devamındaki yörünge elektronu tarafından doldurulur. Bu esnada karakteristik x-ışını yayınlanır. Atomdan ayrılan elektronun kinetik enerjisi fotoelektrik olayının meydana geldiği ortamda soğrulur. Üretilen karakteristik x-ışınları ise aynı ortamda soğrulur. Fotoelektrik soğurma yüksek Z'ye (atom numarası) sahip malzemeler ve düşük enerjiye sahip fotonlarla (<0.5 MeV) gerçekleşir.

2.4.1.2. Compton Saçılması

Bu etkileşim türünde fotonlar serbest ya da çok zayıf bağlı elektronla çarpışarak meydana gelen mekanizmadır.



Şekil 2. 8. Compton saçılması.

Compton saçılmasına uğradıktan sonra geliş açısından farklı yöne doğru saçılan fotonun enerjisi azalır ve dalga boyu artar. Dalga boyundaki değişim;

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = 0.024264(1 - \cos\theta)\text{\AA} \quad (2.10)$$

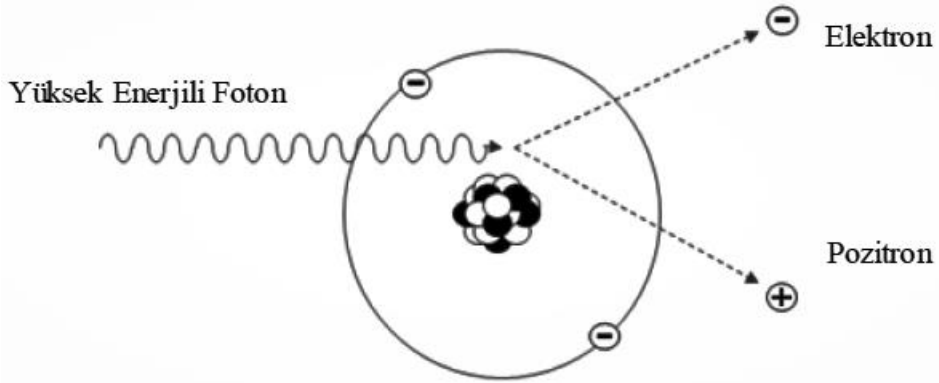
İle gösterilir. Burada h/m_0c olarak ifade edilen terim genellikle Compton dalgaboyu olarak adlandırılır ve sayısal değeri 2.4264×10^{-10} cm'dir. Campton saçılması özellikle orta enerji değerlerindeki (0.5-1 MeV) gama ışınları için önemlidir ve düşük Z'li malzemelerde 0.1 MeV'dan düşük enerjilerde de görülebilir.

2.4.1.3. Çift Oluşumu

Yüksek enerjilere çıkılması dâhilinde ışık hızında ilerleyen fotonun frekans ve dalga boyu ilişkisini gösteren eşitliğe göre artan enerjiyle dalgaboyunun küçülmesi ve atomdan daha küçük olan çekirdeğin radyasyonu ile etkileşimini tanımlamaktadır.

$$c = v\lambda \quad (2.11)$$

Burada, c fotonun hızı yani ışık hızı, v fotonun frekansı ve λ fotonun dalga boyunu göstermektedir. Yüksek enerjide gelen foton çekirdeğin mertebesinde dalga boyuna sahip olmasıyla birlikte enerjisi çekirdeğin bünyesindeki parçacıklara enerjisini aktararak kararsız hale getirir. Bunun sonucunda enerji biri eksi yüklü (elektron) ve diğeri artı yüklü pozitron olmak üzere bir elektron çifti oluşturur. Çift oluşumu çarpışmadaki enerji aktarımından sonra bir pozitron, bir negatron ve geri tepen elektron oluşturarak da gerçekleşebilmektedir.



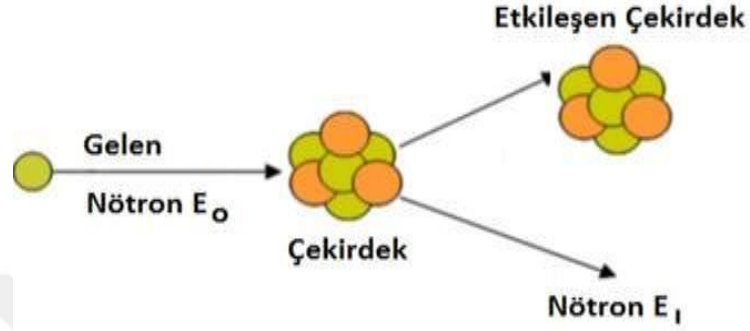
Şekil 2. 9. Çift oluşumu.

Enerji korunumundan dolayı pozitron ve elektron durgun kütle hacmindeki enerjiyi paylaşırlar. Çift oluşumu olayı yukarıda bahsedildiği gibi yüksek enerjili (> 1.022 MeV) fotonların madde ile etkileşiminde görülmektedir.

2.4.2. Nötronların Madde İle Etkileşimleri

2.4.2.1. Esnek Saçılma

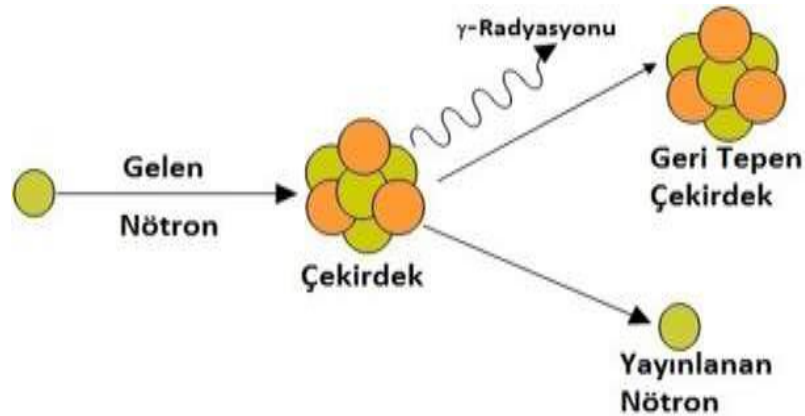
Taban düzeyinde çekirdeğe çarpan nötron yeniden ortaya çıkar ve çekirdek taban düzeyinde kalmaya devam eder. Bu durum nötronun çekirdek tarafından esnek saçılmaya uğratıldığı (n, n) etkileşim şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 2. 10. Esnek saçılma.

2.4.2.2. Esnek Olmayan Saçılma

Bu reaksiyon çekirdeğin uyarılmış düzeyde bırakılması hariç esnek saçılma ile benzemektedir ve (n, n') sembolüyle gösterilmektedir. Bu saçılmada nötronla çekirdek çok kısa bir süre bileşik bir çekirdek oluşturarak uyarılmış bir durumda bulunmakta ve nötron çekirdeği terk etmektedir. Ardından çekirdek bir gama ışını yayınımlı ile taban durumuna dönmektedir.

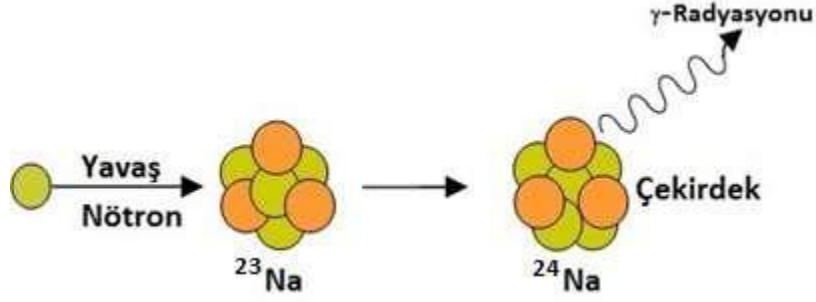


Şekil 2. 11. Esnek olmayan saçılma.

2.4.2.3. Işınlı Yakalama

Nötronun çekirdek tarafından yakalandığı ve γ ışın ya da ışınları yayımladığı tepkime çeşididir ve (n, γ) şeklinde gösterilmektedir. Orijinal nötron soğrulduğu için bu tepkimeler

soğurma tepkimeleri olarak bilinen sınıftadır.



Şekil 2. 12. Işınımlı yakalama.

2.4.2.4. Yüklü Parçacık Tepkimeleri

Nötronlar (n, α) ve (n, p) türü soğurma tepkimeleri sonucunda da kaybolabilir. Böylesi tepkimeler ya ekzotermik ya da endotermiktir.

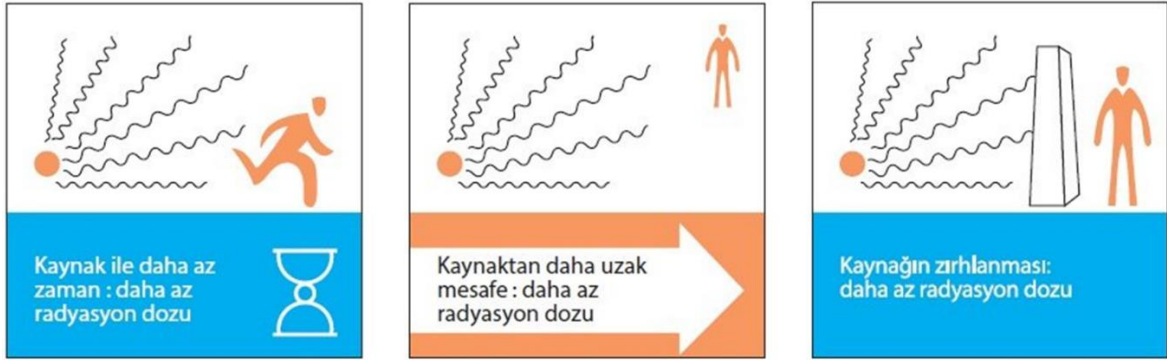
2.4.2.5. Filyon

Belirli çekirdeklerle çarpışan nötronlar çekirdeğin parçalara bölünmesine neden olur. Bölünme sonucunda kararsız çekirdekler ve nötron ışınlarının oluştuğu bu tür tepkimeler filyon tepkimeleri olarak adlandırılmaktadır.

Anılan tepkimelere bileşik bir çekirdek oluşumunu içeren iki aşamalı süreç olarak bakılabilir. Örneğin esnek ve esnek olmayan saçılma tepkimelerinde, atom numarası değişmeden kütle numarasının 1 arttığı; nötronun bir hedef çekirdek tarafından soğrulduğu işlem olarak düşünülebilir. Daha sonra özel sürece bağlı olarak bu çekirdek orijinal bir çekirdek ve bir nötron üretmek üzere nötron yaymak yoluyla bozunur. Ürün çekirdek, söz konusu saçılma tepkimesinin türüne göre, taban düzeyinde veya uyarılmış bir düzeyde bırakılır. Bu model filyon olayını anlamak açısından yararlıdır.

2.5. RADYASYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ

Radyasyonun geniş kullanım alanına karşın hayati öneme sahip zararlarından korunma konusunda radyasyondan korunmanın temelini oluşturan ALARA (As-Low-As-Reasonably Achievable) adı verilen prensip geliştirilmiştir. Bu prensibe göre radyasyondan korunmak için mümkün olan en düşük doza maruz kalmanın sağlanması gerekir. Radyasyon maruziyetinin azaltılabilmesi ise maruziyet süresinin düşük olması, radyasyon kaynağına olan mesafenin fazla olması ve kaynağın uygun malzeme ile zırhllanması esaslarına bağlıdır [13].



Şekil 2. 13. Radyasyondan korunma yöntemleri.

2.5.1. Zaman Kuralı

Radyasyondan korunma yöntemlerinin ilki olan zaman kuralıdır. Kaynağa maruz kalma süresinin kısa tutulmasıyla radyasyon zararlarından korunmayı amaçlamaktadır. Aşağıdaki eşitlikte basitçe gösterilmektedir:

$$Doz = (Doz \text{ Şiddeti}) \times Zaman \quad (2.12)$$

2.5.2. Mesafe Kuralı

Radyasyon ışınları havada yayılırken enerjilerini bir miktar kaybetmektedir. Bazı radyasyon türleri havada birkaç santimetre ilerleyip yok olurken bazıları ise uzun mesafeler ilerleyebilmektedir. Mesafe kuralı; radyasyon kaynağına olan mesafe ne kadar yüksek olursa radyasyonun zararlı etkilerinden korunmanın o derece mümkün olacağını ifade etmektedir.

2.5.3. Zırhlama Kuralı

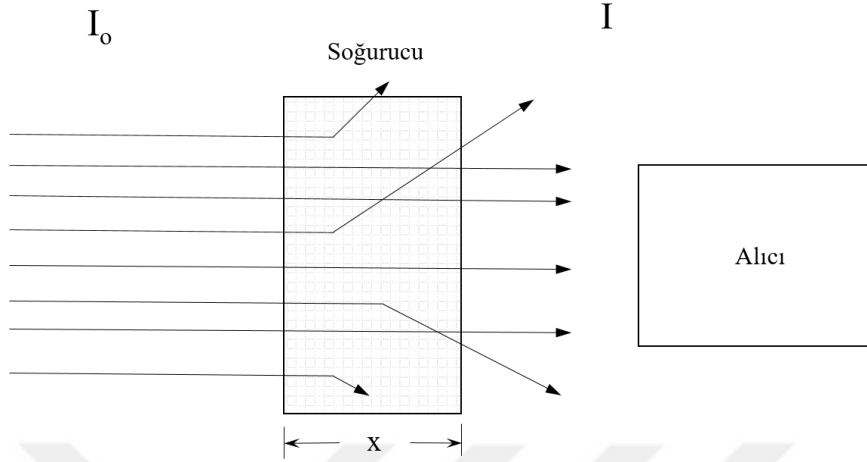
Radyasyon kaynağı ile kaynaktan yayılan radyasyon ışınlarının etki alanında bulunan kişiler arasına malzeme konularak radyasyon dozunu zararsız seviyede tutmayı amaçlayan kurala zırhlama kuralı denir. Zırhlama, foton veya parçacık radyasyonların doz seviyelerinin, zırhlama malzemesinin atomları arasından geçerken iyonizasyon yapmaları ve bu şekilde enerjilerini tamamen veya kısmen kaybederek canlılar için zararsız seviyelere getirilmeleri esasına dayanmaktadır.

2.6. RADYASYON ZIRHLAMA

2.6.1. Gama Işınlarnın Yavaşlatılması ve Soğrulması

Fotonların madde ile temas ettiklerinde bazılar soğrulur, bazıları saçılır bazıları ise

etkileşme olmaksızın yoluna devam eder. Fotonların madde ile etkileşim mekanizması şematik olarak Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2. 14. Fotonların azalma mekanizmaları.

Azalma mekanizmaları sonucunda fotonların enerjilerindeki değişimi matematiksel olarak Beer-Lambert (2.13) denklemiyle elde edilmektedir. Bu denkleme göre;

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (2.13)$$

Burada x kalınlığındaki soğurucu malzemeden geçen fotonların şiddeti $I(x)$ düzenlenerek integrali alındığında;

$$\int_{I_0}^{I(x)} \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx \quad (2.14)$$

$$\ln I(x) - \ln I_0 = -\mu x \quad (2.15)$$

İfadesi elde edilir. Logaritma özellikleri kullanılarak;

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Burada I_0 zırlama malzemesine gelen foton şiddeti; $I(x)$ x kalınlığındaki zırlama malzemesinden geçen foton şiddeti, μ ise lineer zayıflatma katsayısıdır. Bu üstel bağıntı, fotonların soğurucu malzeme tarafından asla tam olarak soğrulamayacağını ancak çok düşük değerlere indirebileceğinin bir ifadesidir. Lineer zayıflatma katsayısının yanında, malzemelerin radyasyon zırlama kabiliyetlerini anlamaya yarayan diğer bir ifade ise; lineer zayıflatma katsayısının malzeme yoğunluğuna oranını ifade eden ($\mu_m = \mu/\rho$) kütle zayıflatma katsayısıdır (μ_m).

Lineer zayıflatma katsayısının birimi cm^{-1} ve kütle zayıflatma katsayısının birimi ise cm^2/gr 'dir. Fotonların soğrulmasında kullanılan diğer faydalı tanımlar ise yarı değer kalınlığı (HVL) ve onda bir değer kalınlığı (TVL)'dir [10]. Yarı değer kalınlığı, soğurucu malzemeye gelen foton şiddetini yarıya indirmek için; onda bir değer kalınlığı ise gelen foton şiddetini onda bir değerine indirmek için gerekli olan soğurucu malzeme kalınlıklarıdır. Beer-Lambert denkleminde göre yarı değer kalınlığı için;

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}} \quad (2.17)$$

Şeklinde ifade edilir. $x_{1/2}$ çözümlerse;

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.18)$$

elde edilir. Benzer şekilde onda bir değer kalınlığı için (TVL) için ise;

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.19)$$

denklemleri elde edilir. HVL ve TVL farklı malzemelerin radyasyon zırhlama performanslarının karşılaştırılması ve zırh tasarımları için faydalı ifadelerdir.

2.6.2. Nötron Parçacıklarının Yavaşlatılması ve Soğrulması

Radyasyonun tüm çeşitleri, bir maddeden geçtikten sonra etkileşime uğrayarak zayıflamaktadır. Bu zayıflamanın büyüklüğü, radyasyonun enerjisine, hedef maddenin özelliklerine ve kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu tez çalışmasında üretilen kompozit plakaların radyasyon soğurma özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerde denklem 'de verilen yüzde zayıflatma oranı (%F) teriminden faydalanılmıştır.

$$\%F = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100 \quad (2.20)$$

Burada ifade edilen N_0 ; soğurucu maddeye gelen nötron parçacıklarının şiddeti, N ise soğurucu maddeyle etkileşimden sonra geçen parçacık şiddetini temsil etmektedir [14].

2.7. RADYASYON ZIRHLAMADA KULLANILAN MALZEMELER

Kurşun, Beton, Kolemanit, Manyetit ve Barit

➤ Kurşun

Yeryüzünden en fazla rastlanan 34. element olan kurşun metali beş oksitli bileşik oluşturur (PbO , Pb_2O_3 , PbO_4 , PbO_2 ve Pb_2O). Yoğunluğu $11,34 \text{ g/cm}^3$ olan kurşun metali kolay şekillendirilebilen ve korozyona dayanıklıdır fakat düşük çekme mukavemetinden dolayı gerilmenin ön planda olduğu alanlarda kullanımı kısıtlıdır. Buna rağmen kurşunun bileşik ya da alaşım haliyle bir çok kullanım alanı bulunmaktadır. Akü üretimi, kablo izolasyonu, mühimmat, çeşitli eşyalar, alaşımlar, kimyasal madde ve pigmentler ile radyasyon zırhlama uygulamaları bunlardan bazılarıdır [15].



Şekil 2. 15. Kurşun metalinin görünümü [15].

➤ Beton

Ana bileşenlerini çimento, kum, agrega ve suyun oluşturduğu, gerektiğinde ise farklı katkı maddelerinin katılarak elde edilen seramik matrisli kompozit yapılardır. Başlangıçta akışkan kıvamda olan beton kalıp yardımıyla şekillendirilir ve zamanla katılaşıp sertleşir. TS EN 206 [16] standartları gereği betonlar yoğunluklarına göre Çizelge 2.3'te belirtildiği gibi 3'e ayrılmaktadır.

Çizelge 2. 3. Betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.

| Beton Türü | Yoğunluk (kg/m ³) |
|--------------|----------------------------------|
| Hafif Beton | 800-2000 |
| Normal Beton | 2000-2600 |
| Ağır Beton | >2600 |

İnşaat mühendisliğinin en önemli yapı malzemesi olan betonlar Konutlar, kamu yapıları, altyapı inşaatları, liman ve deniz yapıları, yol, baraj, havaalanı, spor tesisleri, tüneller, sulama kanalları, maden galerileri, köprüler ve nükleer santraller gibi birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır [17], [18].

➔ Kolemanit

Dünyada en yaygın kullanım alanına sahip elementlerin başında bor gelmektedir. Bor elementi 100'den fazla mineral formuyla doğada bulunmaktadır. Bünyelerinde farklı oranlarda boroksit (B₂O₃) bulunan minerallerin en önemlileri kolemanit, tinkal ve üleksittir. Türkiye'de bulunan toplam bor rezervinin %64,4'ü Kolemanit, %31,8'i Tinkal ve %3,7'si üleksittir. Ülkemizde Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek'te bor rezervleri mevcuttur. Cam, seramik, temizlik-deterjan, tarım, ilaç ve kimya, metalürji, enerji depolama, su arıtma ve nükleer uygulamalar başta olmak üzere birçok alanda kullanıma sahip bor elementini ülkemiz için önemli kılan diğer bir önemli faktör ise dünyadaki toplam rezervinin %73,4'üne sahip olmamızdır. Dünya bor rezervlerinin dağılımı Çizelge 2.4'te gösterilmiştir [19]–[21].

Çizelge 2. 4. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (2017).

| Ülke | Toplam Rezerv (Bin ton B ₂ O ₃) | Toplam Rezerv (% B ₂ O ₃) |
|---------|---|---|
| Türkiye | 948.712 | 73,4 |
| Rusya | 100.000 | 7,7 |
| A.B.D. | 80.000 | 6,2 |

Çizelge 2. 5. (devam) Dünya bor rezervlerinin dağılımı (2017).

| | | |
|------------|-----------|-------|
| Şili | 41.000 | 3,2 |
| Çin | 36.000 | 2,8 |
| Peru | 22.000 | 1,7 |
| Sırbistan | 21.000 | 1,6 |
| Bolivya | 19.000 | 1,5 |
| Kazakistan | 15.000 | 1,2 |
| Arjantin | 9.000 | 0,7 |
| Toplam | 1.310.300 | 100,0 |

Türkiye'deki bor yataklarının esas cevheri olan kolemanit $\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$ formülüyle ifade edilmektedir. İçeriğinde %50,9 oranında B_2O_3 bulunan kolemanit mineralinin yoğunluğu $2,42 \text{ g/cm}^3$ ve Mohs sertlik değeri 4.5'tur. Cam ve seramik, metalürji, gübre, deterjan ve kozmetik endüstrisinde kullanımı oldukça yaygındır [19]–[21].

Çizelge 2. 6. Kolemanit cevherinin kimyasal bileşimi.

| Bileşen | İçerik (-45 Mikron) |
|-------------------------|---------------------|
| B_2O_3 | % $40 \pm 0,5$ |
| CaO | % 27 ± 1.0 |
| SiO_2 | % 4 - 6,5 |
| SO_4 | %0,6 * |
| As | 35 ppm * |
| Fe_2O_3 | % 0,08 * |
| Al_2O_3 | % 0,4 * |
| MgO | % 3 * |
| SrO | % 1,5 * |
| Na_2O | % 0,5* |
| Kızdırma Kaybı | %1 * |

* En yüksek değeri ifade etmektedir.



Şekil 2. 16. Bor mineralinin görünümü [19].

➔ Manyetit

Demir elementinin manyetik özellik gösteren bir minerali olan manyetit Fe_3O_4 formülüyle ifade edilmektedir. Yüksek oranda demir içeren bu mineralin (%78 Fe, %28 O) yoğunluğu 4,9-5,2 ve Mohs sertliği 5,5'tir. Çelik üretiminde toz cevher olarak, kömür yıkama ve zenginleştirme tesislerinde ise ağır ortam oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Ülkemizin en büyük demir cevheri işletmesi Sivas-Divriği'de bulunmaktadır. %54-55 Fe tenörlü manyetit cevherinin çeşitli zenginleştirme işlemlerinden sonra tenörü %66'ya çıkarılmaktadır [20], [22].



Şekil 2.17. Manyetit cevherinin görünümü [22].

➔ Barit

Baryum elementinin en fazla bilinen minerali Baryum Sülfat ($BaSO_4$) yani barittir. Metalik olmayan minerallerin en ağırlı olan baritin yoğunluğu $4,5 \text{ g/cm}^3$, Mohs sertliği ise 3-3,5 arasındadır. Yüksek ısı ve basınç altında kimyasal kararlılığını koruması, su ve asidik ortamlarda düşük çözünürlüğü, manyetik özellik göstermemesi ve düşük maliyetinden dolayı başta sondaj, boya, inşaat ve otomotiv olmak üzere endüstride hem maliyet azaltıcı hem de dolgu maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde Alanya-Gazipaşa, Konya-Isparta, Bitlis ve Muş yatakları başta olmak üzere Giresun, Kocaeli, ve Kütahya bölgelerinde de önemli sayılabilecek barit yatakları mevcuttur [23].



Şekil 2. 18. Barit mineralinin görünümü [23].

2.8. POLİMER KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemenin fiziksel birleşimle bir arada kullanılarak elde edilen üstün özellikli malzemelerdir. Matris ve takviye fazı olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Kullanım amaçlarına uygun olarak istenen özellikleri sağlaması amacıyla çeşitli dolgu maddeleri de katılabilmektedir. Polimer matrisli kompozitler ise matris malzemesi olarak polimer reçinelerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Düşük maliyetleri ve kolay üretimleri nedeniyle kompozitler arasında en yaygın kullanılan ve üretilen çeşitlerdir. Polimer matrisli kompozitler; havacılık, çeşitli deniz araçları, otomobil gövde ve panelleri, spor aletleri, rüzgâr türbin kanatları, korozyona dayanıklı ürünler vb. birçok kullanım alanına sahiptir.



Şekil 2.19. Polimer matrisli kompozit ürünler [24].

2.8.1. Matris Malzemeleri

Kompozit malzemelerde kuvvetlendirici takviye elemanlarını belli bir yapıda tutarak sürekliliği sağlayan malzemeler matris fazı olarak adlandırılmaktadır. Matris malzemesinin; kompozit yapıya şeklini verme, takviye malzemesini bir arada tutarak yüzeyini mekanik aşınma ve kimyasal reaksiyon gibi dış etkilerden koruma, dışarıdan uygulanan gerilmeyi takviye malzemesine iletme ve ana yapının bazı mekanik özelliklerini iyileştirmek gibi önemli görevleri bulunmaktadır. Polyester, vinilester ve epoksi reçineler en çok kullanılan polimer bağlayıcılardır. Polimer matrisli kompozitlerde oldukça yaygın kullanılan polyester reçineler, yapılarında karbon-karbon çifte bağ ($C=C$) içerdiklerinden dolayı doymamış polyester olarak adlandırılmaktadır. Sertleştiklerinde oluşan ağ yapısı sayesinde tekrar işlenmesi mümkün olmadığı için termoset polimerler grubunda yer almaktadır [24], [25].

2.8.2. Takviye Malzemeleri

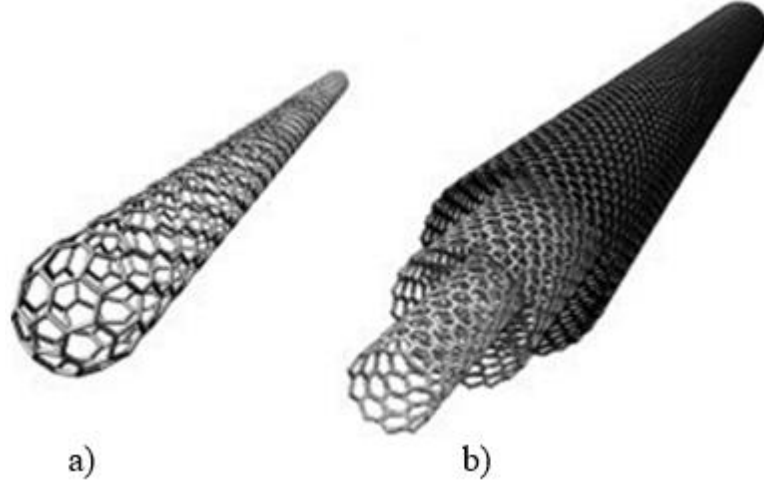
Takviye malzemesi, matrisle beraber kompozit yapıyı oluşturan en önemli iki fazdan biridir ve matris tarafından iletilen yükü taşıyarak matrisin rijitliğini ve dayanımını arttırmaktadır. Mühendislikte kullanılan takviye malzemelerinin çoğu çapları 5-20 μm arasında olan elyaflardır. Elyafın şekli, boyu, yönlendirilmeleri ve matrisle yeterli ara yüzey bağına sahip olmaları, üretilen kompozitin özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir.

2.9. NANOMALZEMELER

Boyutları 1-100 nm arasında olan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik davranışları ile bu malzemelerin gerçek hayatta kullanım alanlarını araştıran bilim dalı nanoteknoloji olarak adlandırılmaktadır. Nanoteknolojinin temel taşıını oluşturan nanomalzemeler bu ölçekte benzersiz optik, manyetik, mekanik, fiziksel ve elektriksel özellikler gösterirler. Nanoteknolojiyi bu kadar ilginç kılan unsur, malzemelerin makro boyuttaki davranışlarının nano boyuta geçildiğinde değişmesidir. Bu değişim; güç/ağırlık oranı, iletkenlik, optik ve manyetik gibi özelliklerde belirgin şekilde görülmektedir. Bu değişim sayesinde enerji sektöründe grafen bazlı pil üretimi, ilaç endüstrisinde ilacın iletimi ve bazı hastalıkların tedavisi, hafif ve yüksek dayanımı sayesinde karbon nanotüplerin yakıt tüketimini azaltarak mekanik özellikleri artırması, elektronik malzeme üretiminde altın ve silisyum nanopartiküller sayesinde daha hızlı ve uzun ömürlü cihazların üretilmesi mümkün hale gelmektedir. Endüstride kullanılan başlıca nanomalzemeler; nanopartiküler haldeki alüminyum oksit, selüloz, kobalt oksit, bakır, altın, gümüş, titanyum dioksit, kuantum noktaları, lipidler ve karbon nanotüplerdir.

➔ Karbon Nanotüpler

Nanomalzemelerin en bilinen çeşidi son yıllarda oldukça popüler hale gelen karbon nanotüplerdir. Tek duvarlı (Single Wall Carbon Nanotube–SWCNT) ve çok duvarlı (Multi Wall Carbon Nanotube-MWCNT) olmak üzere ikiye ayrılan karbonnanotüpler; grafen tüp şeklinde ve sadece karbon atomu içeren allotroplardır. Japon bilim insanı Iijima tarafından 1991 keşfedilen karbon nanotüplerin çapları 1-2 nm boyutlarında iken boyları mikron seviyelerinde olabilmektedir [26]. Çok basit bir yapı gibi görünmesine rağmen oldukça karmaşık bir nanomalzeme olan karbon nanotüpler, uzunluk, çap ve çeşitlerine göre katıldıkları malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini şaşırtıcı şekilde değiştirebilmektedir [13], [24].



Şekil 2. 20. Tek duvarlı karbon nanotüp a) ve çok duvarlı karbon nanotüp b).

2.10. RADYASYON ZIRHLAMA MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK LİTERATÜR ÖZETİ

Radyasyonun zararları anlaşıldıkça ondan korunma mekanizmaları da geliştirilmiştir. Radyasyon kaynağına olan güvenli mesafe, kaynakla geçirilen zamanın olabildiğince kısa tutulması ve kaynağın uygun malzeme ile zırhlanması olmak üzere üç mekanizma, radyasyondan korunmanın temelini oluşturmuştur. Diğer iki parametreyi doğrudan etkileyen kaynağın zırhlanması, gelişime açık ve üzerinde araştırmaların devam ettiği önemli bir konudur.

Zırhlama konusunda bilinen en kullanışlı malzeme kurşun (Pb)'dur. Kurşun, yüksek yoğunluğu ($11,34 \text{ g/cm}^3$) ve çok sayıda elektron nedeniyle, x-ışınları ve gama ışınlarının saçılması için çok uygundur. Bu ışınlar, temas ettiklerinde elektrona enerji veren bir tür bozon olan fotonları oluşturur. Ancak kurşunun esneklik gerektiren uygulamalarda kullanışsız olması ve toksik etkisi de zırhlama uygulamalarında kullanımı açısından büyük bir problem olarak karşımıza çıkar. Düşük maliyeti ve radyasyondan koruyucu özelliği nedeniyle geleneksel olarak levhalar, plakalar, folyolar, laminatlar, tuğlalar ve bloklar halinde kullanılmıştır [10],[27]. Ancak kurşunun esneklik gerektiren uygulamalarda kullanışsız olması ve toksik etkisi de zırhlama uygulamalarında kullanımı açısından büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. 8 Haziran 2011 tarih ve 2011/65/EU sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi, bazı tehlikeli maddelerin elektrikli ve elektronik cihazlarda kullanımının sınırlandırılmasına ilişkin direktifi (RoHS) ile tüm elektrik endüstrisi ve birçok elektrikli ürünün içeriği etkilenmiş ve

Çizelge 2.7’de belirtildiği gibi kurşunla birlikte bazı malzemelerin kullanımı belirlenen seviyelere göre kısıtlanmıştır [28].

Çizelge 2. 7. RoHS tarafından belirlenen kullanımı kısıtlanmış maddelerin tolere edilen maksimum konsantrasyon değerleri.

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

Zırhlama konusunda hafif, ekonomik, toksik etki göstermeyen ve yüksek zırhlama özelliğine sahip malzeme geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Araştırmacılar radyasyon zırhlama çalışmalarında geleneksel malzemelerden doğal minerallere, kompozit malzemelerden çeşitli yapı malzemelerine kadar birçok malzeme türünü, değişik radyasyon tiplerinin soğurulması deneylerinde kullanmışlardır.

Kurşun ve kurşun içeren numunelerle yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin farklı oranlarda kurşun monoksit (PbO) ile izo-ftalat bazlı doymamış polyester reçine kompozitler hazırlanmış ve bu numuneler ¹³⁷Cs kaynağından gama ışınları soğurma testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre %30’un üzerindeki PbO dolgulu kompozitlerin 0,662 MeV enerjideki gama ışınları için gümüş, bakır ve beton gibi zırh malzemelerinden daha yüksek performans gösterdikleri belirtilmiştir [27]. Dolgu maddeleri olarak karbon siyahı (CB) ve kurşun tungstat (PbWO₄) tozunun kullanıldığı bir çalışmada EPDM (etilen-propilen-dien monomer) matrisiyle üretilen kompozitlerin üç farklı gama kaynağında (¹⁵⁵Eu, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co) radyasyon zayıflatma performansları incelenmiş ve kauçukta artan PWO yüzdesinin gama ışınlarına karşı soğurma performansını etkili şekilde arttırdığı belirtilmiştir [29]. Doymamış polyester reçine matrise ağırlıkça %0,10,20,30 kurşun monoksit (PbO) ve ağırlıkça %5 nanokil katılarak üretilen kompozit numunelerin ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co gama kaynakları kullanılarak yapılan ölçümlerinde PbO içeriğinin artmasıyla zırhlama performansının arttığı ancak kompozitlerin düşük enerjilerde zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceği aktarılmıştır [30]. Nano bor (500

nm), bor karbür (700 nm) ve gadolinyum nanopartikül (700 nm) içeren yaklaşık 19 mm kalınlığındaki epoksi matrisli hibrid panellerin nötron radyasyonlarına karşı zırhlama veriminin ölçüldüğü bir çalışmada ise nötron parçacıklarına karşı %99 zırhlama verimliliği elde edilmiştir [31]. Bir diğer çalışmada ise vermikülit ve farklı oranlarda Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) minerali (%25-50) ile oluşturulan numunelerin radyasyon geçirgenliği incelenmiştir. ^{60}Co (Kobalt), ^{152}Eu (Europium) ve ^{226}Ra (Radyum) radyasyon kaynaklarını kullanılarak 0,186-1,728 MeV aralığındaki enerji değerlerinde kütle zayıflatma katsayılarının hesaplandığı deney sonuçlarına göre bor katkılı vermikülit numunesinin 1-3 MeV enerji değerlerinden kurşundan daha yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [5]. B_4C -SiC kompoziti ile TiB_2 katkılı B_4C -SiC kompozitleri basınç ve sıcaklık altında sinterleme yöntemiyle üretilerek ^{60}Co gama radyoizotopu karşısında ortalama 1.25 MeV enerjide soğurma performanslarını incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda B_4C -SiC kompozitlere TiB_2 katkısının, malzemelerin gama zırhlama performanslarını arttırdığı sonucuna varılmıştır [32]. Polyester Reçine + Vermikülit (%10, 20, 30, 40, 50, 60) + B_4C içeren 19 mm kalınlığında 6 numune üretilmiş, Am-Be nötron kaynağı ve BF_3 nötron dedektörü ile sayımlar alınarak nötron zırhlama performansları incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına göre en iyi zırhlama performansını %60 vermikülit içeren B_4C takviyeli numunenin gösterdiğini ve vermikülit takviyesinin artışıyla zırhlama kabiliyetinin arttığı belirtilmiştir [33]. Kolemanit, üleksit, tinkal ile bor içeren MgB_2 , NaBH_4 , KBH_4 , B_2O_3 ve H_3BO_3 bileşiklerin nötron zırhlama performansları incelenmiş, deney sonuçları ve simülasyon verilerine göre numuneler arasında zırhlama kabiliyeti açısından en iyileri, en yüksek bor oranına sahip olan MgB_2 ve en yüksek hidrojen konsantrasyonlu NaBH_4 bileşiklerinin olduğu belirtilmiştir [11]. Polimetilmetakrilat/kolemanit kompozitlerinin gama ve nötronlara karşı zırhlama performanslarını incelendiği çalışmada ağırlıkça %5-15-30-40 kolemanit içeren numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin radyasyon zırhlama özellikleri nötron radyasyonu için ^{239}Pu -Be kaynağında ve gama radyasyonu için ^{137}Cs kaynağında incelenmiş ve WinXCOM programı kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre artan kolemanit oranına bağlı olarak HVL (yarı değer kalınlığı) değerleri gama ışınları için %49,5 ve nötron parçacıkları için ise %29,4 düşüş sağlayarak kalınlık değerlerinde iyileşme gösterdiklerini belirtilmiştir [34]. Yapılan diğer bir çalışmada AISI316L çeliği Ekabor-3 tozuyla kaplanarak ^{137}Cs kaynağında 0,662 MeV ve ^{60}Co kaynağında 1,17 MeV ile 1,33 MeV enerji değerlerinde radyasyon zırhlama testine tabi tutulmuştur. Yapılan teorik ve deneysel hesaplama sonuçlarına göre kurşun metaline

göre daha düşük performans sergilemesine rağmen orta enerji değerlerinde kurşunla eşit zırlama performansı gösterdiğini belirtilmiştir [35]. Radyasyon zırhlayıcı malzeme olan kolemanit agregalı betonlarda fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışma sonuçlarına göre %10 ile %50 arasında kolemanit içeren betonların fiziksel ve mekanik özellikler bakımından olumsuz etkilerinin olduğu ve bu etkilerin %30 kolemanit oranına kadar kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [36]. Kolemanit ve epoksi bazlı nötron zırlama malzemesi geliştirmek amacıyla yapılan bir çalışmada nötron kaynağı olarak ^{252}Cf radyoizotopu kullanılmış ve deney sonuçlarına göre üretilen epoksi bazlı numunenin, %10 boroksit katkılı beton ve polietilene göre daha iyi zırlama performansı göstermesine rağmen üretilen malzemenin %200 kolemanit içerdiğini belirtmişlerdir [37]. Barit, kolemanit ve normal agregası gibi farklı dolgu maddeleri kullanılarak üretilen betonların ^{137}Cs kaynağında 0,663 MeV enerji değerinde gama ışınlarını soğurma özellikleri incelenmiş, deneysel çalışmalar sonucunda barit takviyesinin betonların gama radyasyon zırlama kabiliyetlerini arttırdığı ancak kolemanit takviyesinin azalttığı tespit edilmiştir [38]. Barit (Baryum Sülfat- BaSO_4) ve normal agregası kullanarak üretilen beton numunelerin radyasyon soğurma katsayıları ölçülmüş, farklı enerji değerlerinde ürettikleri numunelerin ölçümleri sonucu zayıflatma katsayıları ile numune yoğunlukları arasında orantılı sonuçlar elde edilmiş ve barit agregalı betonun kurşundan düşük, normal betondan daha iyi zırlama performans gösterdiğini ve böylece normal betonda göre daha az kesitli, ekonomik ve daha az maliyetli yapı elde edilebileceği ortaya koyulmuştur [39]. Polyester kompozitlere manyetit, ilmenit ve boron karbid ilavesinin radyasyon zırlama özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada nötron kaynağı olarak ^{252}Cf ve gama kaynağı olarak da ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynakları kullanılmış ve kompozit kalınlıklarının artmasıyla ışın yoğunluğunun üstel olarak azaldığı ve en iyi zırlama performansının yüksek yoğunluk ve demir içeriğinden dolayı manyetit içeren örneklerin gösterdiği belirtilmiştir [40]. Farklı oranlarda manyetit içeren betonların (%0-2,5-5-10-20) gama zayıflatma performanslarının incelendiği bir çalışmada üretilen numuneler 59,54 ve 80,99 keV enerji değerlerindeki gama ışınlarına karşı test edilmiş ve hem deneysel hem de WinXCOM programıyla hesaplanan lineer soğurma katsayılarının uyum içinde olduğu, artan manyetit oranının belirtilen enerji değerlerindeki radyasyon zırlama kabiliyetlerinde artış gösterdiği belirtilmiştir [41]. Polivinil alkol (PVA) ve manyetit (Fe_2O_3) nanopartikülleri içeren (6-11 nm) kompozitleri birlikte çökeltme yöntemiyle üretilmiş ve ^{60}Co , ^{137}Cs , ve ^{22}Na gama kaynaklarındaki performansları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda saf PVA numunesi kurşunun zayıflatma performansının

%8'ini, manyetit içeren kompozitlerin ise kurşunun %59 zırhlama performansını gösterdiklerini, bu kompozit filmin hafiflik ve esneklik avantajından dolayı kurşuna alternatif olabileceği belirtilmiştir [42]. Hummers yöntemini kullanılarak sentezlenen grafen oksidin yüzeyi kırmızı kurşunla (Pb₃O₄) modifiye edilmiş, daha sonra ağırlıkça %5-10 olarak 4 ve 6 mm kalınlıklarda Pb₃O₄-GO/Epoksi kompozitleri üretilmiş ve bu numunler 40, 60 ve 80 kVp enerjilerde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üretilen kompozitlerin x-ışınlarına karşı yüksek oranda koruyucu performans gösterdikleri görülmüştür [43]. Epoksi matrise eklenen %0.2, %1, %2 SWCNT ile %50 Grafit tozu + %10 Kadmiyum Sülfür içeren numunelerin üretildiği bir çalışmada numunelere 30 keV'a kadar (10-20-30 keV) olan enerji değerlerinde zayıflatma testleri yapılmıştır. Araştırma sonunda %50 grafit tozu içeren numunelerin zırhlama performanslarının, epoksi matrise sadece %2 SWCNT ilavesiyle elde edilebildiği vurgulanmıştır [44]. Fenolik matrise üç farklı boyut ve %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında GO/SiO₂ hibrid nanopartikül eklenerek üretilen kompozit köpüklerin X-bant aralığında (8-12 GHz) elektromanyetik radyasyona karşı zırhlama performansları incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına göre % 1,5 GO/SiO₂ ile modifiye edilmiş karbon köpüğün ~50 dB'ye koruyucu performans gösterdiği tespit edilmiştir [45]. Yapılan diğer bir çalışmada polidimetil siloksan (PDMS) içerisine disperse edilmiş tek SWCNT kompozitlerinin (PDMS/SWCNT) proton radyasyonlarına karşı performansları 63 ve 105 MeV enerji değerlerinde test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda SWCNT ilavesinin PDMS'e katılmasıyla radyasyon zırhlama özelliğini arttırdığı ve üretilen kompozitlerin 105 MeV enerji değerinde saf PDMS ve alüminyuma göre %3.11 ve %20.91 daha hafif olduğu sonucuna varılmıştır [46]. Yapılan diğer bir çalışmada ise bütül kauçuk-SWCNT (%0-%8) kompozitlerin X ve Ku bandı (8.2-18 GHz) frekans aralığında İEMR zırhlama özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda bütül kauçuğa SWCNT ilavesinin, radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirdiği ve BR-8SWCNT kompozitinin 9-13 dB aralığında koruyucu etki gösterdiği belirtilmiştir [47]. Başka bir çalışma kapsamında Er₂O₃ içeren bazalt fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit prepreg numuneleri hazırlanmış ve otoklavda üretilmiştir. Üretilen lamine kompozitleri 31 kEv ile 662 kEv arasındaki enerji değerlerinde test edilmiştir. Test sonuçlarına göre kompozitlerin 31-80 keV arasındaki enerji değerlerinde x ve gama ışınlarına karşı koruyucu özellik gösterdiğini belirtmişlerdir [48]. Farklı ağırlıklarda açık kalıplama tekniği kullanılarak (%0,5,10,20,30,40,50) Bizmut Trioksit (Bi₂O₃) ile doldurulmuş izofitalik reçine esaslı numunelerin ¹³⁷Cs kaynağında 0.622 MeV enerji değerinde gama geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda dolgu

malzemesinin %40 olduğu numunede maksimum mekanik özellik gösterdiği, radyasyon zırlama özelliklerinin ise dolgu malzemesinin artışıyla iyileşme gösterdiği ve geleneksel malzemelerle kıyaslanabilir düzeyde olduğunu belirtilmiştir [49]. EVA (Etilen Vinil Asetat) polimeri ile %50, 60, 70 oranlarında WC (Tungsten Karbür) bileşigi katılarak hazırlanan numunelerin ^{111}Am , ^{137}Cs ve ^{131}I gama kaynaklarına karşı durduruculuğu test edilmiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar 2mm kalınlığında %70 WC içeren disk numunenin ^{137}Cs kaynağında en yüksek zırlama verimine ulaştığını belirterek aynı kalınlık ve çapta kurşun numune ile kıyaslandığında 3 kat daha hafif olduğu ve soğurma performanslarının yakın olduğunu gözlemlemişlerdir [50].



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MALZEME

Çalışma kapsamında radyasyon zırhlama özelliğine sahip kompozit plakalar üretilmiştir. Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin uygun kombinasyonlarla bir araya getirilerek, tek başlarına sağlayamadıkları özellikleri gösteren üstün özellikli karma malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Çoğu zaman matris ve takviye olarak adlandırılan iki fazdan oluşmaktadır. Kullanım amaçlarına göre tasarımlarında dolgu ve ilave takviyeler de kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin en yaygın kullanılan çeşitleri polimer matrisli kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitlerde genellikle matris fazı olarak polyeester, epoksi ve vinilester reçineler; takviye fazı olarak da cam, karbon ve aramid elyaf kullanılmaktadır [13], [25]. Bu çalışmada üretilen kompozit plakalarda matris malzemesi polyeester reçine, dolu malzemeleri; kolemanit, barit ve manyetit, takviye malzemesi olarak çift yönlü dokunmuş camelyaf ve nanoboyutlu takviye malzemesi olarak da tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) kullanılmıştır.

3.1.1. Polyeester Reçine ve Özellikleri

Bu tez çalışmasında üretilen kompozit plakalarda matris malzemesi olarak Süperlit Boru San. Ve Tic. AŞ'den tedarik edilen Turkuaz Polyeester üretimi olan yüksek mekanik ve elyaf ıslatma kabiliyetine sahip TP 1984 model tereftalik polyeester reçine kullanılmıştır. Kullanılan reçinenin sıvı haldeki özellikleri Çizelge 3.1.'de ve saf haldeki mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Sıvı haldeki reçinenin özellikleri.

| Test | Metod | Standart Değer |
|-----------------------|------------|---------------------------------|
| Yoğunluk | ISO 1675 | $1,13 \pm 0,01 \text{ gr/cm}^3$ |
| Asit Değeri | ISO 2114 | < 20 mg KOH/gr |
| Vizkozite Brookfield* | ISO 2555 | 200 cp - 400 cp |
| Katı Madde Oranı | ISO 3251 | > % 55 |
| Parlama Noktası | ASTM D3278 | 34°C |
| Raf Ömrü | - | 4 Ay |

*25 °C'de 3 numaralı uç ve 20 rpm ile ölçülmüştür.

Çizelge 3. 2. Sertleştirildikten sonra post-kür işlemine tabi tutulan saf reçinenin mekanik özellikleri.

| Test | Metod | | Standart Değer |
|------------------------------|------------|-------|----------------|
| Çekme Dayanımı | ISO 527 | ± %10 | 70 MPa |
| Kopmadaki Uzama | ISO 527 | ± %10 | %3 |
| Çekme Modülü | ISO 527 | ± %10 | 3500 MPa |
| Eğilme Dayanımı | ISO 178 | ± %10 | 125 MPa |
| Eğilme Modülü | ISO 178 | ± %10 | 3600 MPa |
| Barcol Sertliği | ASTM D2583 | ± %10 | 40 |
| Yük Altında Eğilme Sıcaklığı | ISO 75 | ± %10 | 75° |

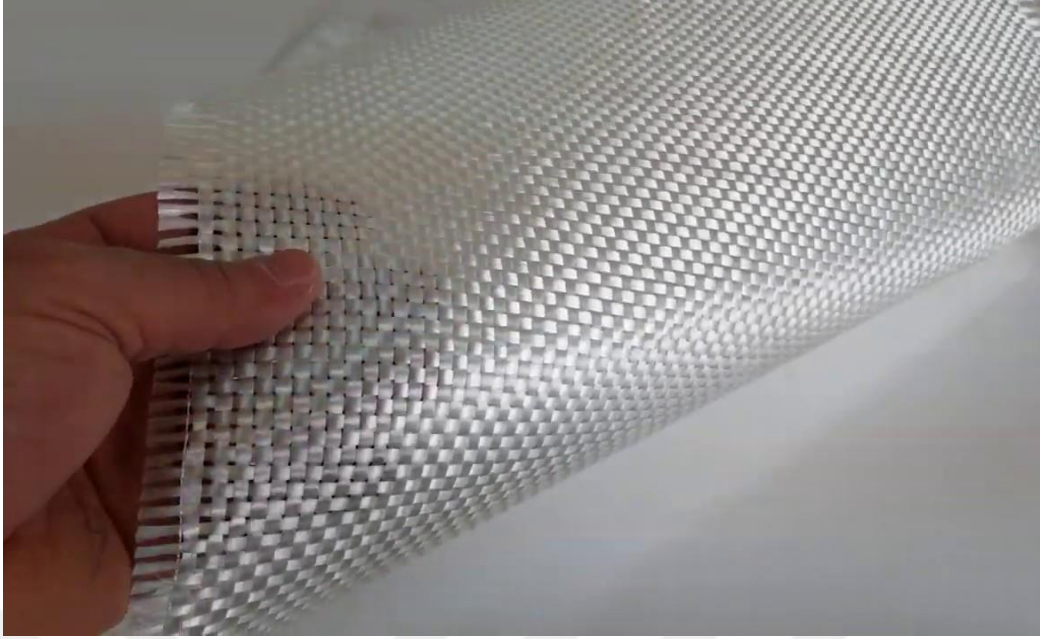
3.1.2. Camelyaf ve Özellikleri

Ana malzemesi olan SiO₂ ile birlikte belirli konsantrasyonlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşan camelyaf, kompozit malzeme üretiminde en yaygın kullanılan takviye malzemesidir. Camın potada eritilerek binlerce delikten hızlıca aşağı doğru demetler halinde çekilmesi ve bu esnada soğutularak sarılması ile üretilmektedir. Farklı formülasyonlardaki kaplama kimyasalları camelyafın tipini belirlemekle birlikte hepsi Silan içermektedir ve bu da matris malzemesi ile yapışmayı sağlamaktadır [51].

Çalışma kapsamında üretilen kompozit plakalarda takviye malzemesi olarak Süperlit Boru San. Ve Tic. AŞ'den tedarik edilen ve Şişecam üretimi olan WR 125-500 model E-tipi camelyaf kullanılmıştır. Kullanılan camelyafın teknik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Kullanılan cam elyafın teknik özellikleri.

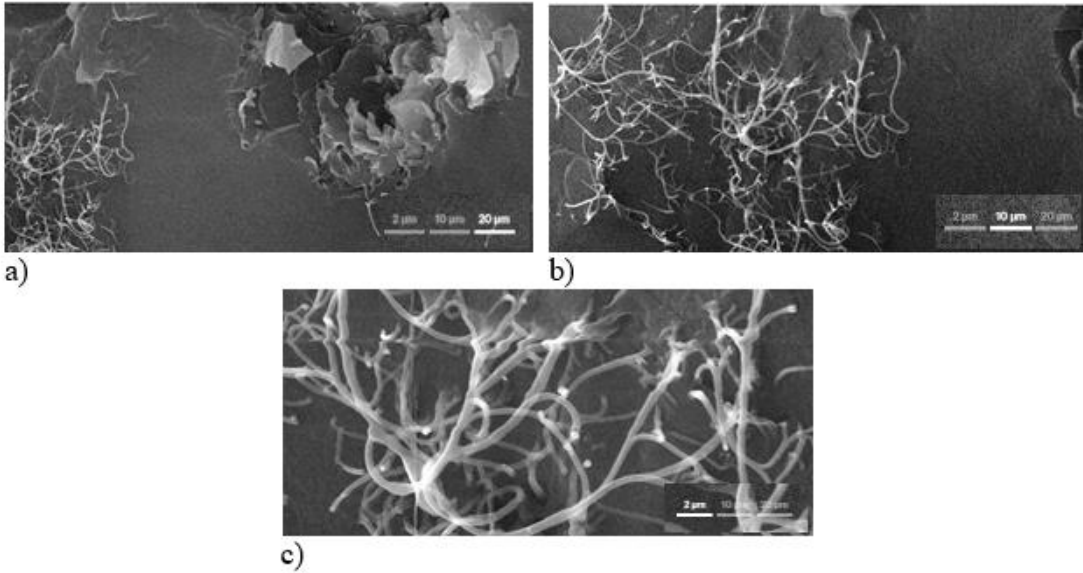
| | |
|--|-------------------------------|
| Birim Alan Başına Ağırlık (gr/m ²) | 500 |
| Kumaş Genişliği (cm) | 125 |
| İplik Sayısı (iplik/10 cm) | 19-22 (Atkı-Çözücü) |
| Dokuma Türü | Düz Dokuma |
| Reçine Uyumluluğu | Polyester, vinilester, epoksi |



Şekil 3. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan camleyafın görünümü.

3.1.3. SWCNT ve Özellikleri

Kompozit plakalarda nanotakviye fazı olarak Hayim Pinhas AŞ'den tedarik edilen OCSİAL üretimi Tuball Matrix-204 modeli SWCNT'ler kullanılmıştır.



Şekil 3. 2. Tuball Matrix-204 karbon nanotüp mikro görüntüleri 20 µm (a), 10 µm (b), 2 µm (c).

3.1.4. Dolgu Malzemeleri

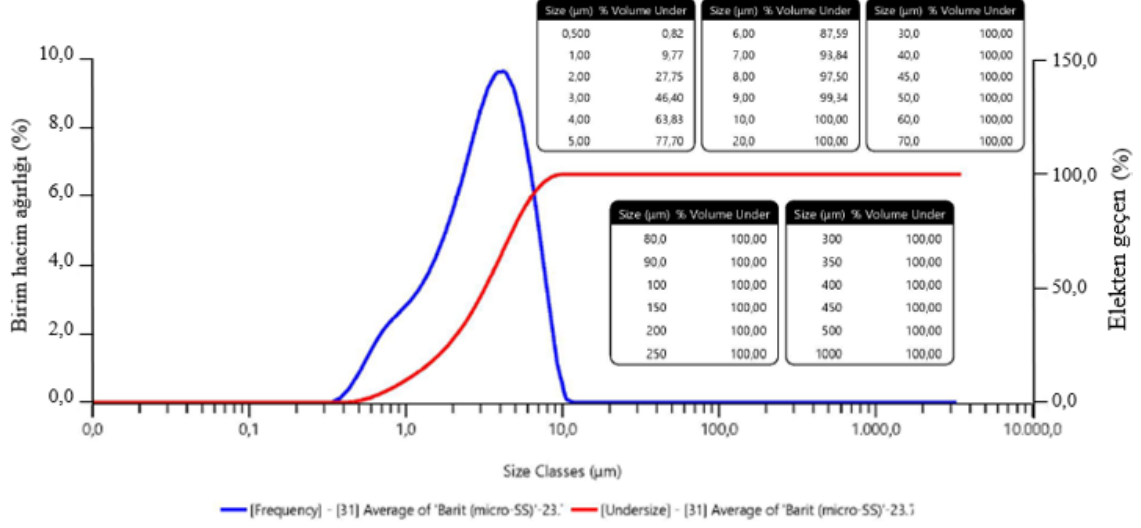
Dolgu maddeleri kompozit malzeme üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dolgu maddelerinin kullanım amacı matris ve takviye ile elde edilemeyen özelliklerin üretilen kompozit malzemeye kazandırılmasıdır. Dolgu kullanımının kompozit yapının mekanik özelliklerinde bir miktar düşmeye sebep olduğu bilinmesine rağmen kullanılan dolgu malzemesine göre su direnci, hava etkisiyle meydana gelen değişimler, yüzey özellikleri, sertlik, boyutsal kararlılık, ısı dayanımı, alev/duman geciktirme gibi özellikleri iyileştirdiği de bilinmektedir. Bu amaçla kompozit malzeme tasarımında kullanım amacına yönelik farklı dolgu malzemeleri kullanılmaktadır.

3.1.4.1. Barit ve Özellikleri

Kompozit plakalarda dolgu malzemesi olarak kullanılan barit minerali Aromel Kimya AŞ'den tedarik edilmiştir. Plakaların üretiminde kullanılan barit cevherinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te, tane boyut analizi ise Şekil 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 4. Barit mineralinin fiziksel özellikleri.

| | |
|--|--------------------------|
| Kimyasal Formül | BaSO ₄ |
| Suda Çözünen Alkaliler (Ca cinsinden) | 49 mg/kg |
| Görünüm | Beyaz Kristal |
| Safılık | % 97,36 |
| Yoğunluk | 4,43 g/cm ³ |
| Özgül Yüzey Alanı | 6119 cm ² /gr |



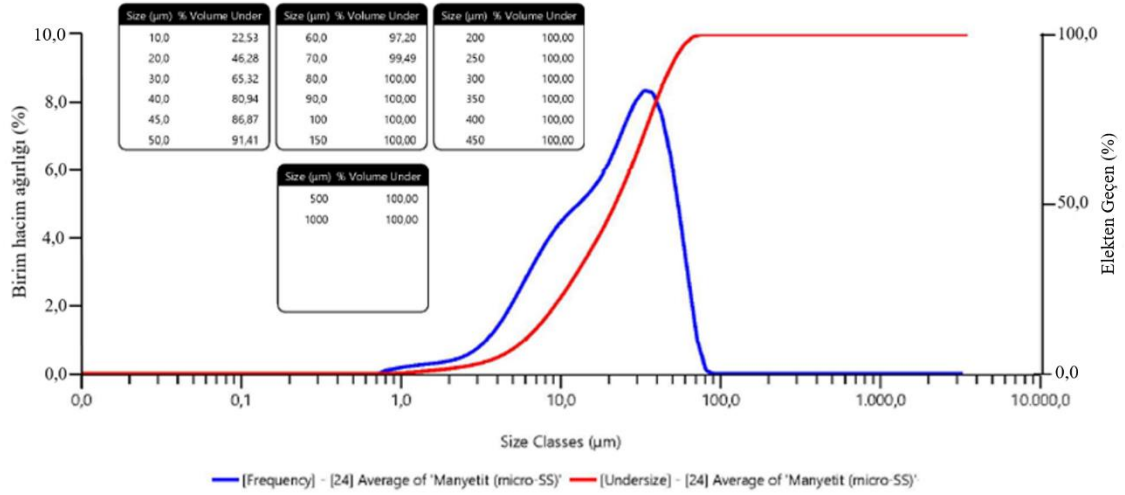
Şekil 3. 3. Barit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları.

3.1.4.2. Manyetit ve Özellikleri

Çalışma kapsamında kullanılan demir elementinin manyetik özellik gösteren bir minerali olan manyetit (Fe_2O_3) minerali Erdemir Madencilik Divriği işletmesinden tedarik edilmiştir. Manyetit mineraline ait teknik bilgiler Çizelge 3.5'te, tane boyut analizi ise Şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3. 5. Manyetit mineralinin fiziksel özellikleri.

| | |
|-------------------|------------------------------|
| Kimyasal Formül | Fe_3O_4 |
| Kristal Sistemi | Kübik |
| Görünüm | Demir siyahı, metalik parlak |
| Yoğunluk | 4,9-5,2 g/cm ³ |
| Özgül Yüzey Alanı | 1002 cm ² /gr |



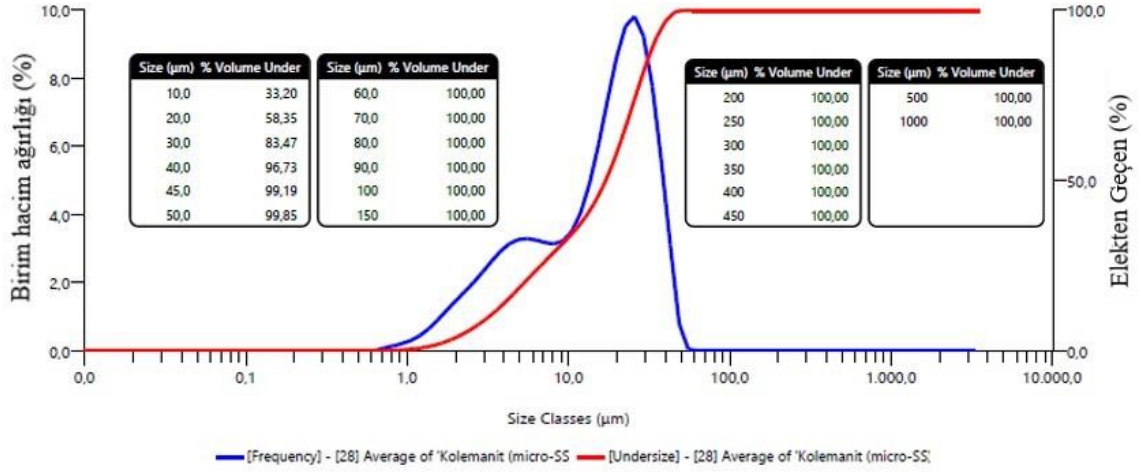
Şekil 3. 4. Manyetit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları.

3.1.4.3. Kolemanit ve Özellikleri

Tez çalışmasında üretilen kompozit plakalarda dolgu maddesi olarak kullanılan kolemanit, Eti Maden-Balıkesir işletmesinden tedarik edilmiştir. Kolemanit mineralinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.6'da, tane boyut analizi ise Şekil 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3. 6. Kolemanit mineralinin fiziksel özellikleri.

| | |
|----------------------|--|
| Kimyasal Formül | CaB ₃ O ₄ (OH) ₃ H ₂ O |
| Kristal Sistemi | Monoklinik |
| Yoğunluk | 2,42 g/cm ³ |
| Isıl İletkenlik | 0,526 W/mK |
| Görünüm | Renksiz-beyaz, şeffaf-yarı şeffaf |
| Spesifik Yüzey Alanı | 3116 cm ² /gr |



Şekil 3. 5. Kolemanit dolgu malzemesine ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları.

3.1.5. Kürleştirici Katkı Maddeleri

Doymamış polyester reçinelerin sertleştirilmesinde genellikle iki kimyasal katkı maddesi kullanılmaktadır. Bunlar polimerizasyon reaksiyonlarını başlatarak reçinenin sertleştirilmesini sağlayan ve piyasada başlatıcı olarak adlandırılan Metil Etil Keton Peroksit (MEK-P) ve hızlandırıcı olarak adlandırılan, sertleşme reaksiyonlarını hızlandırmak amacıyla kullanılan Kobalt Oktoat çözeltisidir. MEK-P, reçinenin içerisine genellikle %1-2 oranlarında katılır. İçeriğindeki kobalt miktarı %1-5-6-8-10 olan ve çözeltiler halinde piyasada bulunan hızlandırıcı maddesi ise genellikle reçine ağırlığının %1-2 oranında katılarak kompozit yapıda kullanılmaktadır.

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Deneysel Çalışma Planı

Yapılan deneysel çalışmalar reçine karışımlarının hazırlanması ile kompozit plakaların üretilmesi, deney numunelerinin hazırlanması ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Radyasyon zırlama özelliğine sahip olması hedeflenen kompozit plakaların matris, takviye, dolgu ve nanotakviye oranları teorik olarak Çizelge 3.7.'de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 3. 7. Üretilcek kompozit plakaların ağırlıkça birleşim oranları.

| | %0 SWCNT | % 0,01 SWCNT | % 0,05 SWCNT | % 0,1 SWCNT |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| %50 Barit | %25 Camelyaf %25 Reçine | %25 Camelyaf %24,99 Reçine | %25 Camelyaf %24,95 Reçine | %25 Camelyaf %24,9 Reçine |
| %50 Kolemanit | %25 Camelyaf %25 Reçine | %25 Camelyaf %24,99 Reçine | %25 Camelyaf %24,95 Reçine | %25 Camelyaf %24,9 Reçine |
| %50 Manyetit | %25 Camelyaf %25 Reçine | %25 Camelyaf %24,99 Reçine | %25 Camelyaf %24,95 Reçine | %25 Camelyaf %24,9 Reçine |
| Dolgunsuz Referans | %50 Camelyaf %50 Reçine | %50 Camelyaf %49,99 Reçine | %50 Camelyaf %49,95 Reçine | %50 Camelyaf %49,9 Reçine |

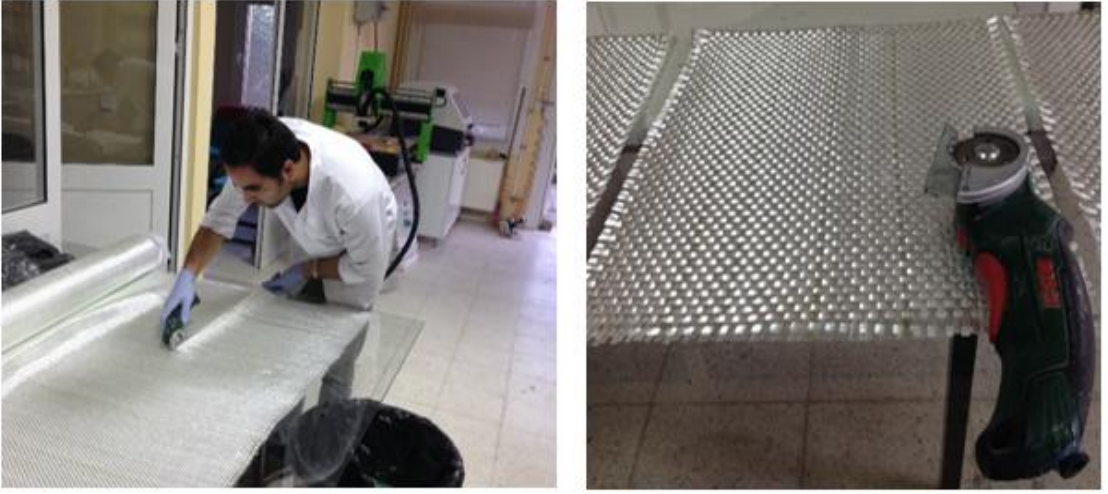
Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi 3 farklı dolgu türünün ve 3 farklı orandaki nanotakviye ilavesiyle üretilen kompozit numunelerinin yanı sıra dolgu ve nanotakviyelerin performanslarının karşılaştırılmasını sağlamak amacıyla referans numunelerin üretilmesi planlanmıştır. Toplam üretilcek kompozit plaka sayısı 16’dır. Kompozit plakaların boyutlarının ise 300x400 mm olarak üretilmesi kararlaştırılmıştır. Plakalar genel olarak 4 çeşitten oluşmaktadır;

- ➔ Camelyaf ve dolgu içeren kompozitler
- ➔ Camelyaf ve nanotakviye içeren kompozitler,
- ➔ Camelyaf, dolgu ve nanotakviye içeren kompozitler,
- ➔ Sadece camelyaf ve reçineden oluşan referans kompozit.

Üretim yöntemi olarak el yatırması yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem, başlatıcı ve hızlandırıcı ihtiva eden matris malzemesi ile takviye malzemesinin tabakalar halinde kalıba yerleştirildiği ve her tabakada matrisin takviye malzemesini iyice ıslatabilmesi için rulo, fırça vb. malzemelerin kullanıldığı, düşük maliyetli, oda sıcaklığında gerçekleştirilen ve tamamen manuel olan bir üretim yöntemidir. El yatırması yönteminde üretilen ürünün tek yüzeyi iyi çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında üretilen kompozit plakaların her iki yüzeyinin de iyi çıkması için alt ve üst kalıp malzemesi olarak cam kullanılmıştır. Reçinenin camelyafı daha iyi ıslatması, yapıda hava boşluğunun oluşmaması ve fazla reçinenin sistemden uzaklaştırılabilmesi için üst kalıbın üzerine 50 kg’lık ağırlık konularak kürleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

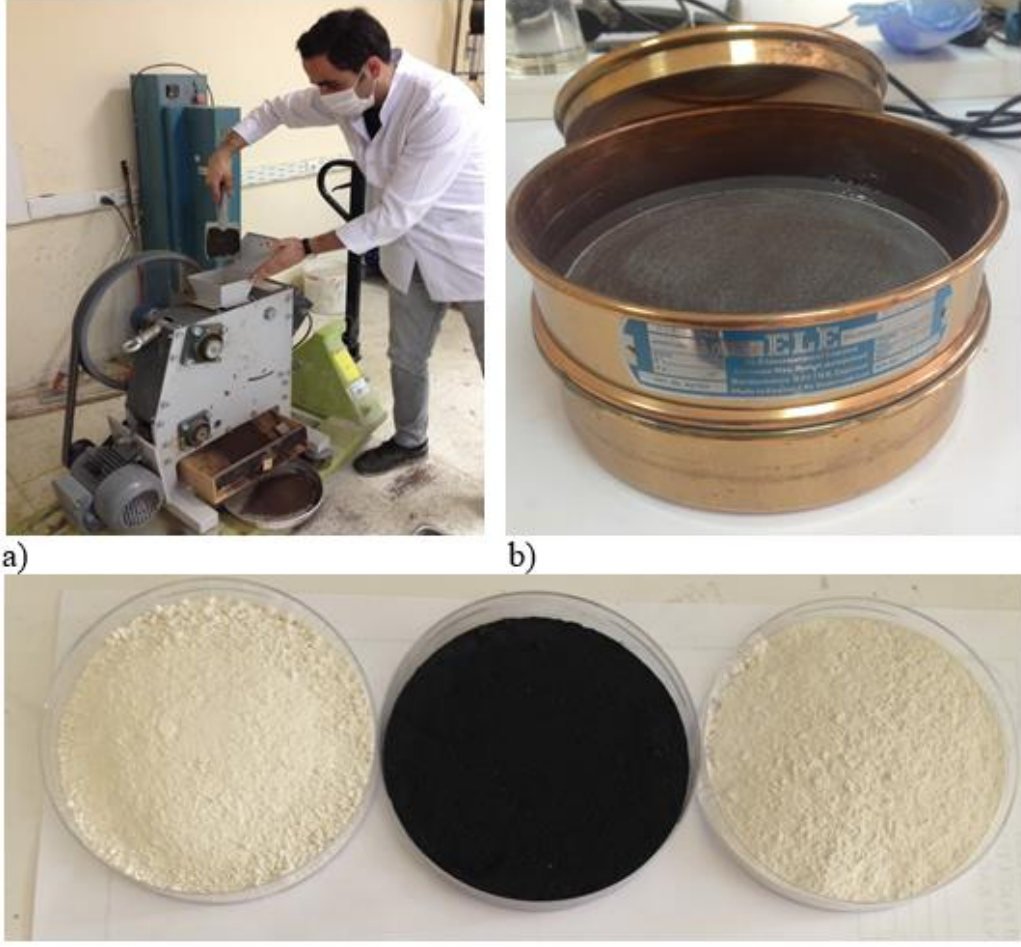
3.2.3. Kompozit Plakaların Üretilmesi

Üretimin ilk basamağını kompozit yapıda kullanılacak malzemelerin hazırlık süreci oluşturmaktadır. Hazırlık süreci ise tüm bileşenlerin üretimde kullanılabilir hale getirilmesiyle başlamıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan camelyaf 350 x 450 cm olacak şekilde, yönlenme doğrultusuna dikkat edilerek Bosch marka akülü elyaf kesme makası yardımıyla kesilmiştir. Camelyaflar her plakada 5 kat olacak şekilde 5x15 adet kesilmiştir. Kesilen camelyafların her 5 tanesinin toplam ağırlığı 480 gr olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. 6. Camelyaf kesim işlemi ve kullanılan ekipman.

Dolgu malzemeleri boyutsal olarak hazırlanmıştır. Tane boyutu olarak kalın halde bulunan manyetit cevheri çeneli kırıcı vasıtasıyla inceltilmiş ve tüm dolgu malzemeleri 300 Mesh elekten geçirilerek hazır hale getirilmiştir. Çizelge 3.7’de belirtildiği üzere %50 oranında dolgu malzemesi kullanabilmek için plakalarda 1000’er gr dolgu malzemesi katılmıştır.



Şekil 3. 7. a) Çeneli kırıcı yardımıyla inceltilen manyetit cevheri, b) dolgu malzemelerinin geçirildiği 300 mesh elek ve c) hazır hale getirilen soldan sağa doğru barit, manyetit ve kolemanit örnekleri.

Kompozit plakaların üretim esnasında erken veya geç kürlenme sorunu yaşamamak için; her bir dolgu malzemesinin üretiminde katılacak olan başlatıcı ve hızlandırıcı oranlarını belirlemek amacıyla 100 gr'lık deneme dökümleri yapılarak jelleşme süreleri tespit edilmiştir. Jelleşme sürelerinin tespiti oda sıcaklığında 25 °C'de TS EN ISO 2535 [52] standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneme dökümlerinin tamamında önce hızlandırıcı Kobalt Oktoat (%0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-1-1,5) maddesi katılarak 2-3 dk karıştırılmış, daha sonra başlatıcı MEK-P (%1-1,5-2) ilave edilerek 1 dk daha karıştırılmış ve petri kaplarına dökülerek jelleşme süreleri tespit edilmiştir. Karışım işlemi için ISOLAB Manyetik karıştırıcı cihazı kullanılmıştır. Petri kaplarında yapılan bazı dökümler ve tespit edilen jelleşme süresi ile kimyasal katkı maddelerinin oranları Şekil 3.8 ve Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Petri kaplarında yapılan deneme dökümlerinden bazıları.

Çizelge 3. 8. Deneme dökümleri sonucunda belirlenen oranlar ve jelleşme süreleri.

| Numune Tipi | MEK-P | Kobalt Oktoat | Jelleşme Süresi |
|-------------|-------|---------------|-----------------|
| Barit | % 1 | % 1,5 | 38 dk |
| Manyetit | % 1 | % 0,5 | 32 dk |
| Kolemanit | % 1 | % 0,1 | 26 dk |
| CNT | % 1 | % 0,2 | 43 dk |

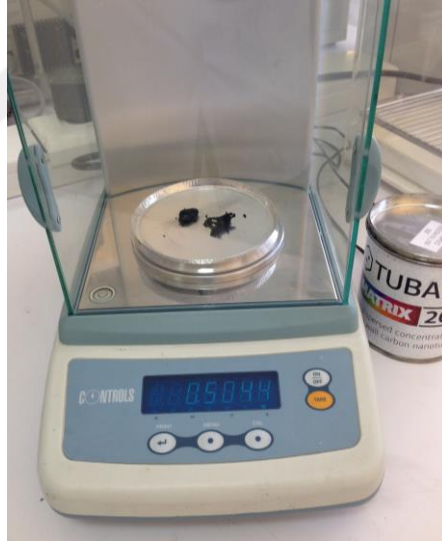
Hazırlık işleminin son aşamasını üretilecek kompozitin türüne göre reçinin hazırlanması oluşturmaktadır. Nanomalzeme içeren plakaların üretimi için; tek duvarlı karbon nanotüplerin reçine içerisinde disperse işlemi gerçekleştirilmiştir. SWCNT'ler, %10'luk trietilen glikol dimetakrilat çözeltisi şeklinde bulunmaktadır. Plakalardaki takviye oranlarına göre %10'luk çözeltiden alınması gereken miktarlar hesaplanarak Çizelge 3.9 oluşturulmuştur.

Çizelge 3. 9. Kullanım oranına göre SWCNT çözeltilisinden alınacak malzeme miktarları.

| Kompozitlerdeki SWCNT oranı | Orana göre Takviye Edilen Miktar* | %10'luk Çözeltiliden Alınan Malzeme Miktarı |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| %0,01 SWCNT | 0,05 gr | 0,5 gr |
| %0,05 SWCNT | 0,25 gr | 2,5 gr |
| %0,1 SWCNT | 0,5 gr | 5 gr |

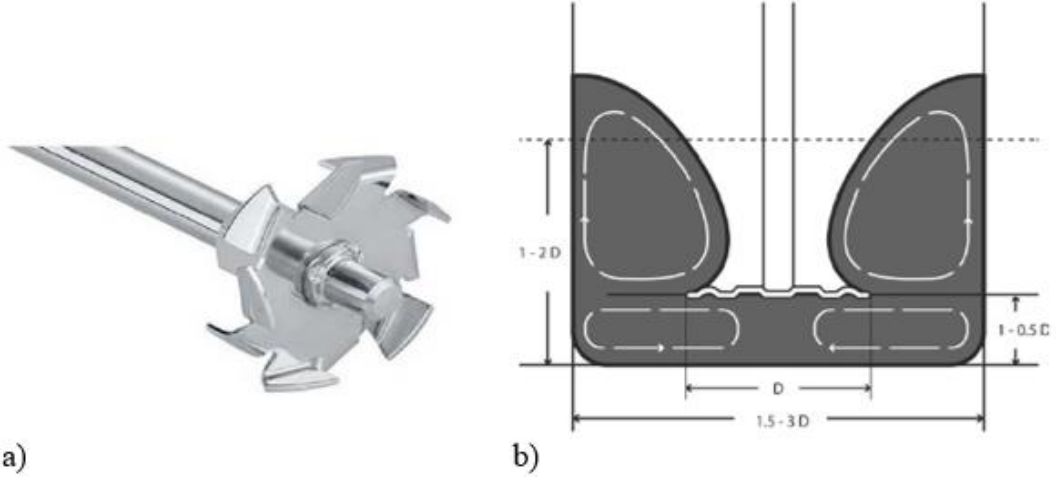
*Belirtilen SWCNT oranları 500 gr reçine için hesaplanmıştır.

Takviye oranları belirlendikten sonra CNT'lerin reçine içerisine dispersiyon işlemi başlamıştır. Üretimi yapılan kompozitlerin her birinin matris fazı 500 gr reçine içermektedir. Öncelikle Çizelge 3.9'da belirtildiği gibi %10'luk çözeltiliden alınması gereken CNT miktarları hassas terazide tartılarak alınmıştır.



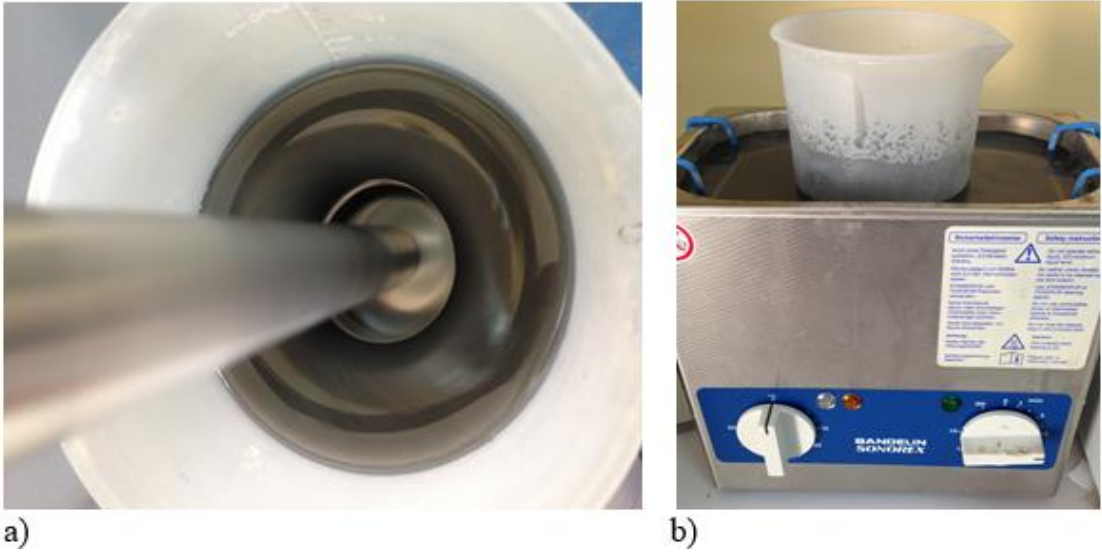
Şekil 3. 9. SWCNT'lerin hassas tartım işlemi.

Hazırlanan CNT'ler, içerisinde 500 gr reçine bulunan kaba konularak dispersiyon işlemine geçilmiştir. CNT üreticisi firma tarafından, dispersiyon işleminde kullanılan karıştırıcı bıçağın şekli, kabın çapı ile bıçak çapı arasındaki oran ve karıştırma esnasında oluşması gereken görüntü gibi tavsiyelere uyulmuştur.



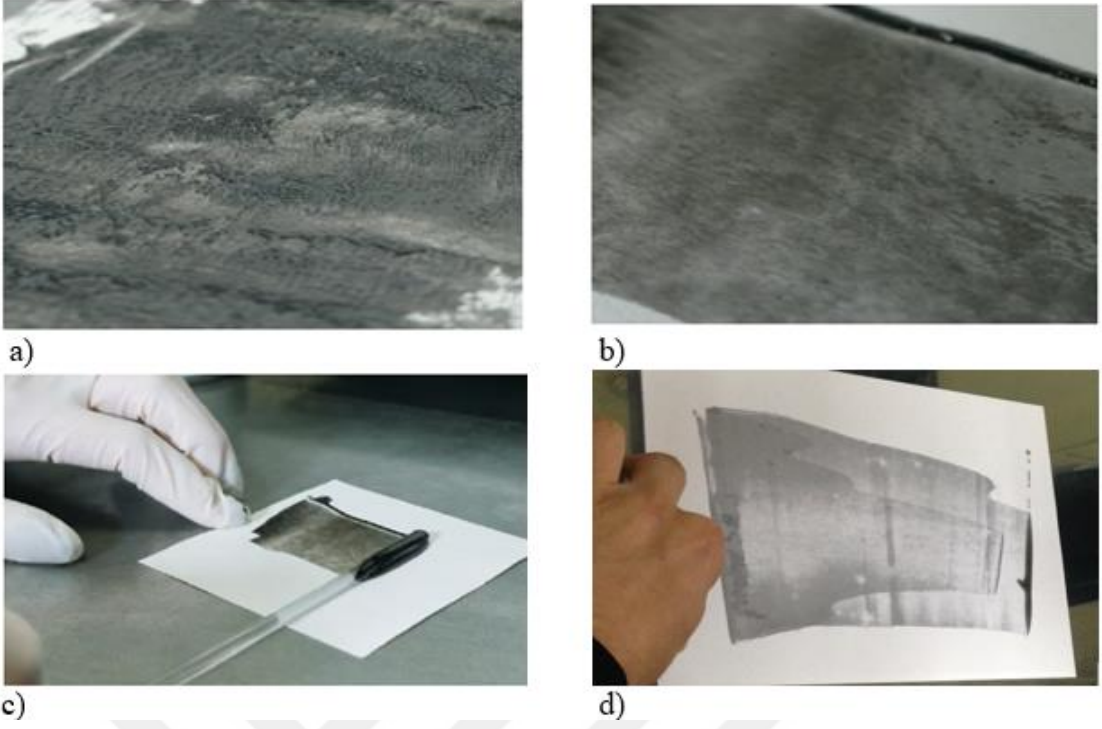
Şekil 3. 10. a) kullanılması tavsiye edilen bıçak şekli ve b) karışım esnasında bıçağın kap içerisinde konumlandırılma limitleri ve oluşması beklenen karışım görüntüsü.

Bosch PBD 40 marka tezgah tipi matkabın ucuna Şekil 3.9-a'daki bıçak takılarak dispersiyon işlemine başlanmıştır. 2500 rpm dönme hızında 20 dakika boyunca karıştırılarak karbon nanotüplerin reçine içerisine dispersiyon işlemi gerçekleştirilmiş, işlem sonrasında yükselen nanotakviyeli reçine sıcaklığının ve oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için tüm dispersiyon işlemlerinden sonra Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyoda 5'er dakikalık gaz giderme işlemi uygulanmıştır.



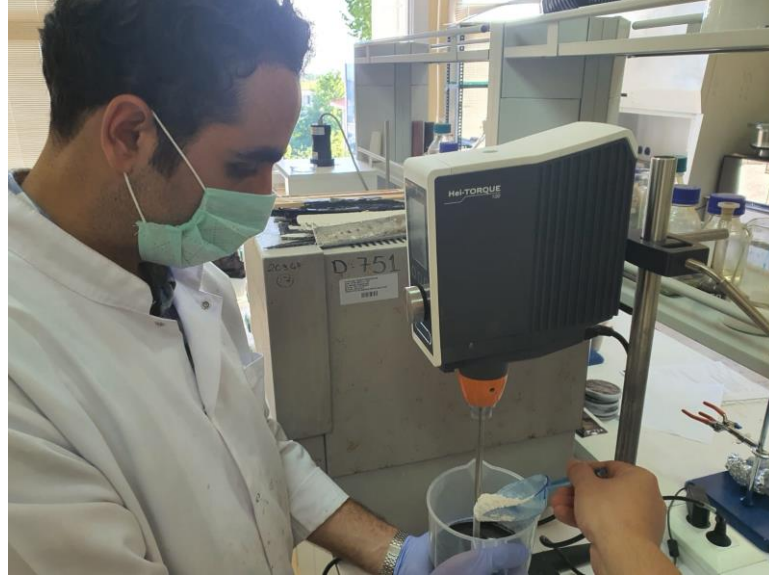
Şekil 3. 11. a) Dispersiyon işlemi esnasında oluşan görüntü. ve b) ultrasonik banyoda gaz giderme işlemi.

Reçine içerisine katılan nanomalzemenin dispersiyon kalitesi cam çubuk yardımıyla ölçülerek kalite kontrol skalasına göre karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 12. a) Cam çubuk testinin yapılışı, b) topaklanmaların görüldüğü başarısız dispersiyon örneği, c) homojen dağılımın görüldüğü başarılı dispersiyon örneği, e) deneysel çalışmalar sırasında yapılan cam çubuk testi.

Üretilen kompozit, dolgu malzemesi içeriyorsa, gaz giderme işleminden sonra laboratuvarında bulunan diğer mekanik karıştırıcıda 5 dk daha dolgu malzemesi ilave edilerek karıştırılmıştır. Böylece üretilen kompozitin çeşidine göre reçinelerin hazırlık işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 3. 13. SWCNT disperse edilmiş reçineye dolgu malzemesinin katılması.

El yatırması yöntemiyle yapılan üretim için öncelikle 10x20 mm'lik ahşap çıtalar, 400x500 mm dikdörtgen çerçeve oluşturacak şekilde birbirine yapıştırılmış ve çerçeveler cam tezgâha yapıştırılarak üretimin yapılacağı kalıp hazırlanmıştır. Daha sonra, 300x400 mm boyutlarında kesilerek önceden hazırlanan üst kalıp camı ile cam tezgah, Frekote 770-NC kalıp ayırıcı 15'er dakika kuruma süresi beklenecek şekilde 3 kez uygulanmıştır. Kalıp ayırıcı uygulamasından sonra, her bir plakada 5 kat camelyaf tabakası olacağından 6 katman için reçine tartılarak 6'ya bölünmüş ve her bir kata eşit derecede matris malzemesinin uygulanması amaçlanmıştır. İlk katman için matris malzemesi dökülüp yaydırıldıktan sonra camelyaf tabakası yerleştirilmiş ve üzerine matris malzemesi dökülerek alüminyum elyaf ezme rulosu yardımıyla elyafın matris tarafından tam olarak ıslanması sağlanmıştır. Bu uygulama işlem bitimine kadar tekrarlanmış ve en üst katman serildikten sonra üst kalıp camı, kalıp ayırıcı uygulanan yüzey malzeme üzerine gelecek şekilde kapatılarak üzerine 50 kg ağırlık tablaları yerleştirilmiş ve kütleme işlemi başlamıştır.



Şekil 3. 14. El yatırması yöntemiyle üretilen kurlenme sürecindeki kompozit plakalar.

Çizelge 3. 10. Üretilen numunelerin kodları.

| NUMUNE ÇEŞİDİ | KODU |
|-----------------------|-------|
| DOLGUSUZ REFERANS | REF |
| %0,01 CNT | C-01 |
| %0,05 CNT | C-05 |
| %0,1 CNT | C-1 |
| MANYETİT REFERANS | MR |
| MANYETİT + %0,01 CNT | MC-01 |
| MANYETİT + %0,05 CNT | MC-05 |
| MANYETİT + %0,1 CNT | MC-1 |
| BARİT REFERANS | BR |
| BARİT + %0,01 CNT | BC-01 |
| BARİT + %0,05 CNT | BC-05 |
| BARİT + %0,1 CNT | BC-1 |
| KOLEMANİT REFERANS | KR |
| KOLEMANİT + %0,01 CNT | KC-01 |
| KOLEMANİT + %0,05 CNT | KC-05 |

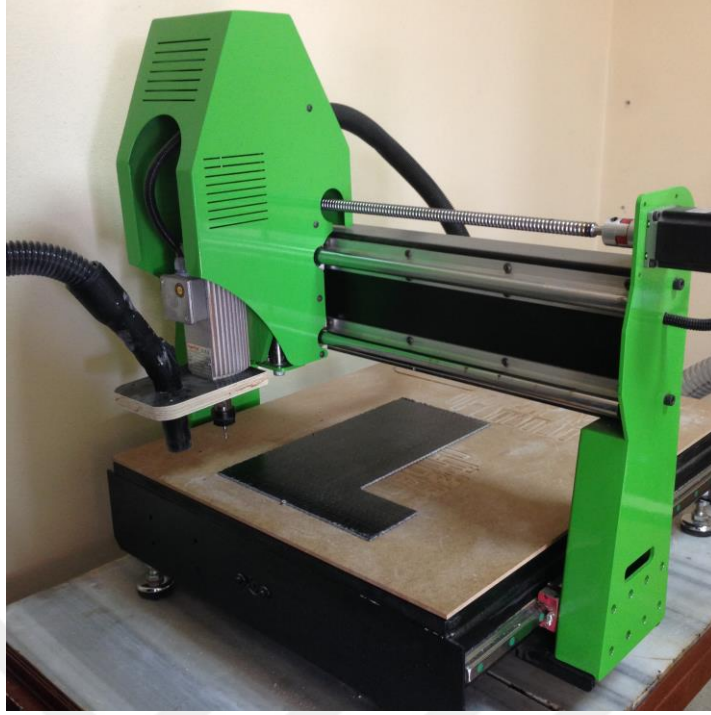


Şekil 3. 15. Üretilen barit, manyetit ve CNT grubu plakalar.

Üretilen tüm plakalar Çizelge 3.10'da gösterildiği gibi kodlanmıştır. Daha sonra plakaların 400x300 boyutları dışında kalan süreksiz-çapaklı kısımları tezgâh tipi testerede kesilerek deney numunelerinin hazırlanma işlemine geçilmiştir.

3.2.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Kompozit plakalar, yapılacak testlerin standartlarına göre kesilerek deney numuneleri elde edilmiştir. Kesim işlemi Kompozit Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan vakumlu CNC Router makinasında gerçekleştirilmiştir. CNC Router, işleme tezgâhının bilgisayar desteğiyle hassas bir şekilde kontrolünü sağlayan tam otomatik makine olarak tarif edilmektedir. Birçok malzemenin kesimi bu tezgâhlarda gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. 16. Deney numunelerinin kesilmesinde kullanılan vakumlu CNC Router.

Kesim işlemi için öncelikle AutoCad programında deney numuneleri standartlara uygun olarak çizilmiş ve çizimler, parçaların işlenmesini sağlayacak G-kodlarının oluşturulması amacıyla MasterCam x9 programına yüklenmiştir.

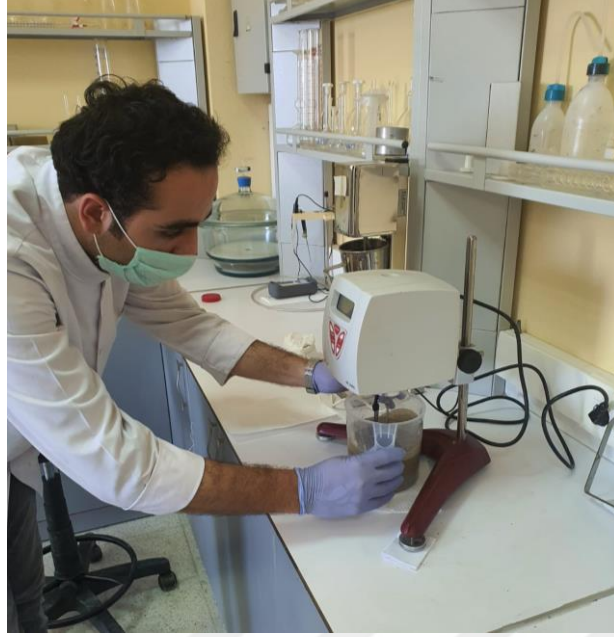
Kompozit plakaların deney numunelerinin çizimleri yerleştirilerek katı model oluşturulmuş ve parçaların işlenebilmesi için gerekli G-kodları oluşturularak NC dosyaları elde edilmiştir. Kodları içeren dosyalar CNC Router'ı çalıştıracak kontrol programı olan Mach 3 programına yüklenmiştir. Programa yüklenen kodlarla CNC router çalıştırılmış ve deney numuneleri elde edilerek deneysel çalışmalara başlanmıştır. Kesilen deney numuneleri Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 17. Farklı testler için kesilerek hazırlanan deney numuneleri.

3.2.5. Viskozite Ölçümleri

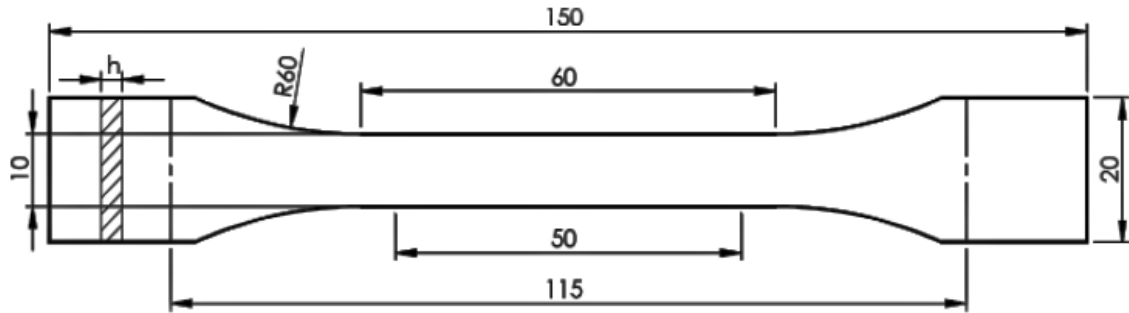
Kompozit plakaların üretimine başlamadan önce, plaka çeşitleri için hazırlanan tüm reçinelerin viskozite ölçümleri ISO 2555 [53] standardına uygun olarak, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi Brookfield Metod VISCOTECH VR 3000 marka dinamik viskozite test cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 3. 18. Viskozite ölçümleri ve kullanılan test cihazı.

3.2.6. Çekme Dayanımı Deneyi

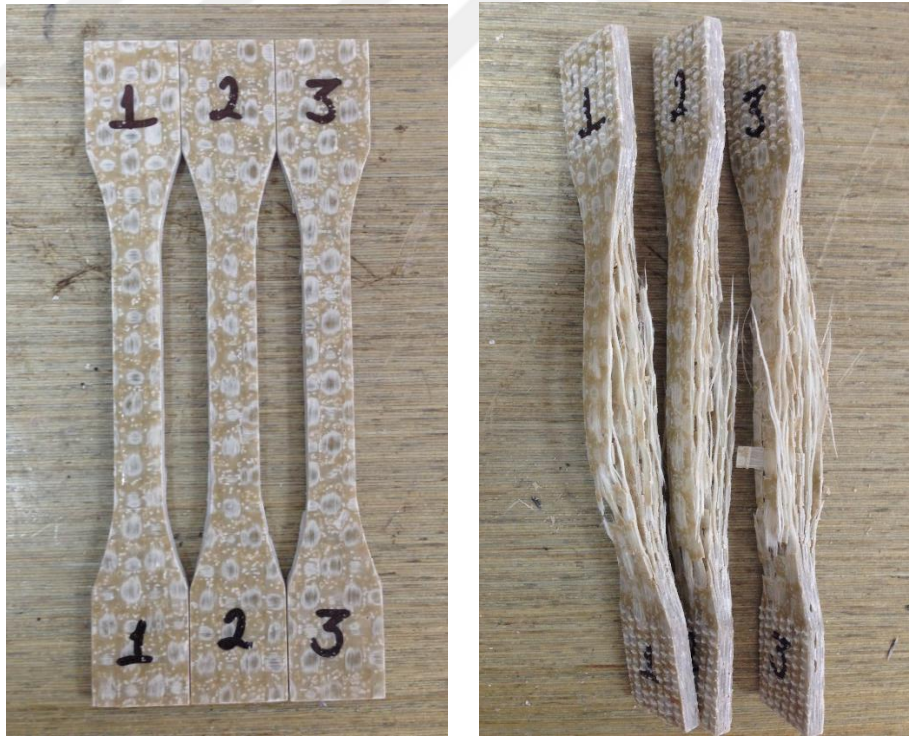
Hassas kesim işleminden sonra çekme dayanımı testi ISO 527-4 [54] standardına uygun olarak 1 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. 3'er adet kesilerek hazırlanan deney numunelerinin ölçüleri mm cinsinden Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 19. Çekme dayanımı testi uygulanan numunelerin ölçüleri.



Şekil 3. 20. Üretilen kompozit numunelerin çekme dayanımı testi.



Şekil 3. 21. Çekme dayanımı deneyi öncesi ve sonrası numune görselleri.

Çekme testi uygulanan tüm numunelerin uzunluk, genişlik ve boyları dijital kumpas yardımıyla ölçülerek kaydedilmiş ve test sonuçları gerçek boyutlara göre hesaplanmıştır.

Kompozit numunelerin çekme dayanımı hesaplanmasında denklem (3.1) ve çekme E-modülünün hesaplanmasında denklem (3.2) kullanılmıştır [54].

Formülde;

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.2)$$

σ_c : Çekme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

A: Alan (mm²),

E_c : Çekme E modülü (MPa),

ε_2 : Birim deformasyon (0,0025),

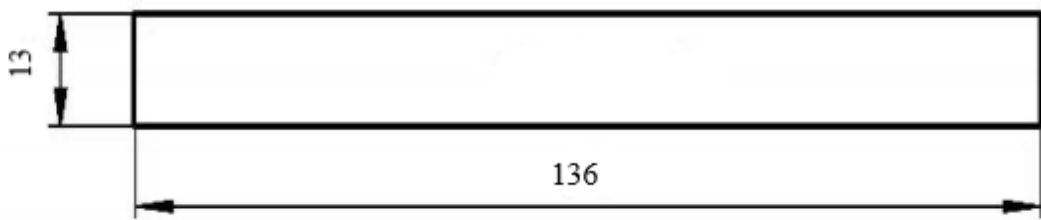
ε_1 : Birim deformasyon (0,0005),

σ_2 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_2 = 0,0025$ 'a karşılık gelen gerilme,

σ_1 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_1 = 0,0005$ 'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2.7. Eğilme Dayanımı Deneyi

Kompozit numunelerin eğilme dayanımı testleri ASTM D7264/D7264–21 [55] standardına uygun olarak Şekil 3.22'de belirtilen ölçülerde kesilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 22. Eğilme dayanımı test numunelerinin ebatları.

Eğilme dayanımı deneyinde standarda uygun olarak mesnetler arası mesafe 128 mm ve yükleme hızı 1 mm / dk olarak ayarlanmıştır. Tüm numunelerin uzunluk ve genişlikleri dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiş ve test sonuçları gerçek boyutlara göre hesaplanmıştır.



Şekil 3. 23. Kompozitlerin eğilme dayanımı testi.



Şekil 3. 24. Eğilme dayanımı deneyi öncesi ve sonrası numune görselleri.

Kompozit numunelerin eğilme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.3) ve eğilme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.4) kullanılmıştır [55].

$$\sigma_e = \frac{3xFxL}{2xbxh^2} \quad (3.3)$$

$$E_e = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

σ_e = Çekme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

L: Mesnet aralığı (mm),

E_e : Eğilme E modülü (MPa),

ε_2 : Birim deformasyon (0,0025),

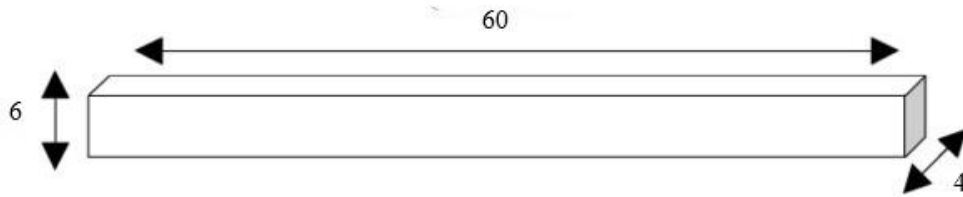
ε_1 : Birim deformasyon (0,0005),

σ_2 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_2=0,0025$ 'a karşılık gelen gerilme,

σ_1 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_1=0,0005$ 'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2.8. Charpy Darbe Dayanımı Deneyi

Kompozit numunelerin charpy darbe dayanımı deneyleri ISO 179 Tip D [56] standardına uygun olarak Şekil 3.25'de belirtilen ölçülerde kesilerek gerçekleştirilmiştir. Charpy darbe dayanımı deneyi Düzce Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır.



Şekil 3. 25. Charpy darbe dayanımı test numunelerinin ebatları.

Tüm numunelerin yükseklik, uzunluk ve genişlik değerleri dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiş ve test sonuçları gerçek boyutlara göre hesaplanmıştır.



Şekil 3. 26. Kompozit numunelere uygulanan Charpy darbe dayanımı testi.

Kompozit numunelerin Charpy darbe dayanımının hesaplanmasında denklem (3.5) kullanılmıştır [56].

Formülde;

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hxb} \times 10^3 \quad (3.5)$$

a_{cU} = Charpy darbe dayanımı (J/cm²),

h= Kalınlık (0,01 m),

b= Genişlik (0,015 m),

E_c = Test numunesinin kırılmasıyla emilen düzeltilmiş enerji (J),

L^1 = Mesnet aralığı (60 mm) ifade etmektedir.

3.2.9. Termal İletkenlik Katsayısı Deneyi

Üretilen tüm numunelerin termal iletkenlik katsayıları (k) Düzce Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan TCi – Thermal Conductivity Analyzer model cihaz ile ölçülmüştür. 20x20 mm olarak hazırlanan numunelerin ısı iletim katsayıları W/mK cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 3. 27. Termal iletkenlik katsayı ölçüm cihazı.

3.2.10. SEM Analizi

Üretilen tüm numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu vasıtasıyla taranarak görüntüler elde edilmiştir. SEM görüntüleri Düzce Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta FEG 250 model cihaz ile elde edilmiştir.



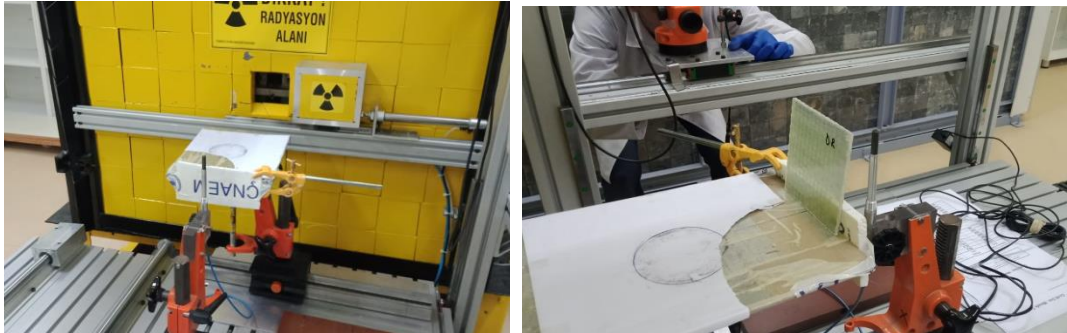
Şekil 3. 28. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.2.11. Gama Radyasyonu Geçirgenlik Deneyi

Kompozit plakaların gama zayıflatma performansları Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu bünyesinde bulunan laboratuvarında Şekil 3.29’da gösterilen deney düzeneği yardımıyla gerçekleştirilmiştir. ^{60}Co gama sahip ölçüm sistemi ile sayımlar alınmıştır. Ölçüm sistemine ait teknik bilgiler Çizelge 3.11’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 11. Gama radyasyonu ölçüm sistemine ait teknik bilgiler.

| Donanım | Niteliği / Markası |
|--------------------|--------------------|
| Gama Kaynağı | ^{60}Co |
| Aktivitesi | 800 Curie |
| İyon Odası | PTW Farmer 1418 |
| Referans Dozimetre | PTW Unidos Webline |
| Sayım Süresi | 30 sn |



Şekil 3. 29. Gama geçirgenlik deney düzeneği.

3.2.12. Nötron Radyasyonu Geçirgenlik Deneyi

Kompozit plakaların nötron zayıflatma performansları Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu bünyesinde bulunan laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ nötron kaynağı ve BF_3 gazlı dedektöre sahip ölçüm sistemi ile sayımlar alınmıştır. Ölçüm sistemine ait teknik veriler Çizelge 3.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 12. Nötron radyasyonu ölçüm sistemine ait teknik bilgiler.

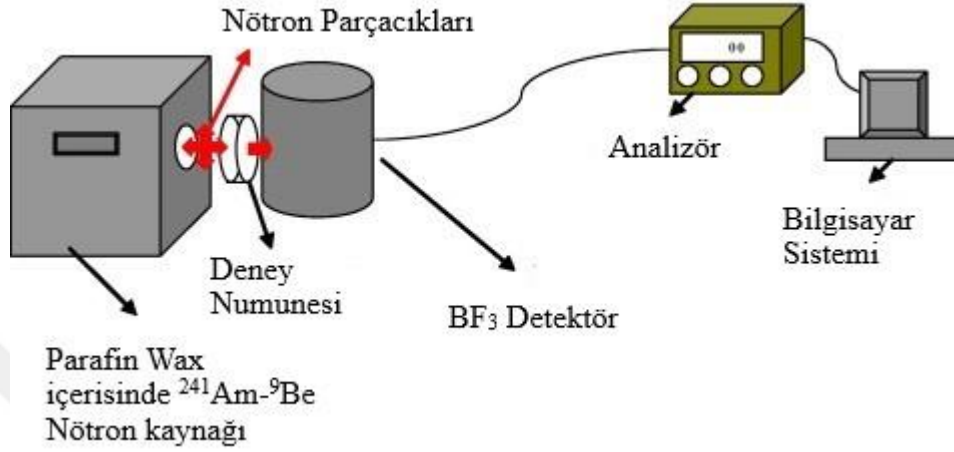
| Donanım | Niteliği / Markası |
|------------------------|--|
| Nötron Kaynağı | $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ |
| Aktivitesi | 2 Ci |
| Dedektör | Boron Trifluoride (BF_3) Nötron Dedektörü |
| Osiloskop | Hewlett Packard |
| Sayıcı | Ortec 875 |
| Zaman Ayarlayıcı & SCA | Ortec Model 420A |
| Preamplifikatör | Ortec |
| Amplifikatör | Ortec 571 |
| Güç Kaynağı | Canberra Model 3105 H.V. 0-5 kV |
| Sayım Süresi | 60 sn |

Üretilen tüm kompozitlerin nötron zayıflatma testleri için 100x100 mm boyutlarında kesilmiş ve her bir numuneden 3’er adet olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3. 30. Gama ve Nötron geçirgenlik deneyleri için hazırlanan numuneler.

Hazırlanan numunelerin geçirgenlik testleri için öncelikle boş sayımlar alınarak arka plan sayım değerleri belirlenmiştir. Daha sonra her bir numune çeşidi Şekil 3.32’de gösterilen sisteme yerleştirilerek üç kalınlık değerinde 5’er kez sayım alınmış ve toplamda 225 adet sayım alınarak sonuçlar kaydedilmiştir.



Şekil 3. 31. Nötron radyasyonu zırlama deneyinin şematik gösterimi.



Şekil 3. 32. Nötron radyasyonu zırlama deneyi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. VİSKOZİTE DENEYİ SONUÇLARI

Kompozit plakaların üretiminde kullanılan ve polyster reçine içerisine disperse edilen barit, manyetit, kolemanit, SWCNT içeren tüm matris çeşitlerinin viskozite deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1. Numunelerin viskozite ölçüm sonuçları.

| Numune Grubu | Numune Kodu | Spindle Numarası | Dönme Hızı (rpm) | Sıcaklık (°C) | Viskozite Değeri (mPa.s) |
|-----------------|---------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------------|
| CNT GRUBU | REF | R3 | 30 | 22 | 460 |
| | C-01 | R4 | 200 | 37,3 | 260 |
| | C-05 | R4 | 60 | 23,6 | 1390 |
| | C-1 ¹ | R4 | 60 | 23,8 | 2510 |
| | | R4 | 60 | 25,1 | 2350 |
| MANYETİT GRUBU | MR | R4 | 30 | 24 | 5120 |
| | MC-01 | R6 | 200 | 30,9 | 3800 |
| | MC-05 | R7 | 200 | 29,7 | 5900 |
| | MC-1 ¹ | R7 | 200 | 31 | 7300 |
| | | R7 | 200 | 33 | 5600 |
| BARİT GRUBU | BR | R4 | 60 | 27,2 | 2250 |
| | BC-01 | R6 | 200 | 36,1 | 3900 |
| | BC-05 | R7 | 200 | 32,1 | 4300 |
| | BC-1 | R7 | 200 | 30,4 | 4700 |
| KOLEMANİT GRUBU | KR ¹ | R7 | 200 | 44 | 12200 |
| | | R7 | 200 | 45 | 11100 |
| | KC-01 ^{1*} | - | - | - | - |
| | KC-05* | - | - | - | - |
| | KC-1* | - | - | - | - |

¹ %1 oranında (15 gr) viskozite düzenleyici eklenerek 4-5 dk karıştırılmış ve ölçüm tekrarlanmıştır.

* Ölçüm alınamamıştır.

Kolemanit içeren reçinelerin CNT oranı arttıkça viskozite değeri yüksek çıktığı için KR ve %0,01 ile %0,05 CNT katkılı plakaların reçinelerinin camelyafı yeterince ıslatamadığı için standart boyutta plakalar üretilmemiş, üretilen plakalardan ancak SEM analiz numunesi, termal iletkenlik katsayısı ve radyasyon geçirgenlik deney numuneleri alınabilmiştir. %0,1 CNT katkılı plaka ise viskozitesinin çok yüksek olması ve sıcaklığın dolgu ve CNT katkısıyla fazla yükselmesi sebebiyle üretilmemiştir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde numunelerin akışkanlık değerlerinin en düşük %0,01 CNT katkılı reçinede 260 mPa.s ve en yüksek değerin ise viskozite düzenleyici katılmadan alınan ölçümde KR numunesinin reçinesinde 12200 mPa.s ölçülerek geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. CNT ilavesinin manyetit ve kolemanit dolgulu reçinelerin viskozite değerlerinde bir miktar düşüş sağladığı (MC-01, C-01) ve ardından artan CNT takviyesiyle beraber viskozite değerlerinin yükseldiği, barit dolgulu reçinelerde ise doğrusal artış gösterdiği görülmektedir. Kolemanit içeren reçinelerde ise viskozite ölçümü alınmadığından bu değerlendirme yapılamamıştır. Öte yandan Çizelge 'de gösterildiği gibi %0,01 CNT ilavesi ile barit, manyetit ve dolgusuz reçinelerin viskozite sıcaklıkları ani yükselme göstermiş, artan CNT takviyesiyle beraber viskozite sıcaklıkları eser miktarda değişmiş ya da sabit değerler göstermiştir. Kolemanit içeren KR reçinesinin sıcaklıkları yüksek sıcaklıklar göstermiştir.

Viskozite ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır ancak ölçümden önce, üretilecek kompozitin çeşidine göre Çizelge 3.9.'da belirtilen oranlarda hızlandırıcı katılarak karıştırılmıştır. Dolgu malzemesi içeren numunelerin üretiminde ise; hızlandırıcı katıldıktan sonra dolgu malzemesi ilave edilerek 5 dk karıştırılmış ve viskozite ölçümleri alınmıştır. Bu sebeple cihazdan alınan sıcaklık ölçümleri anlık değerleri belirtmektedir.

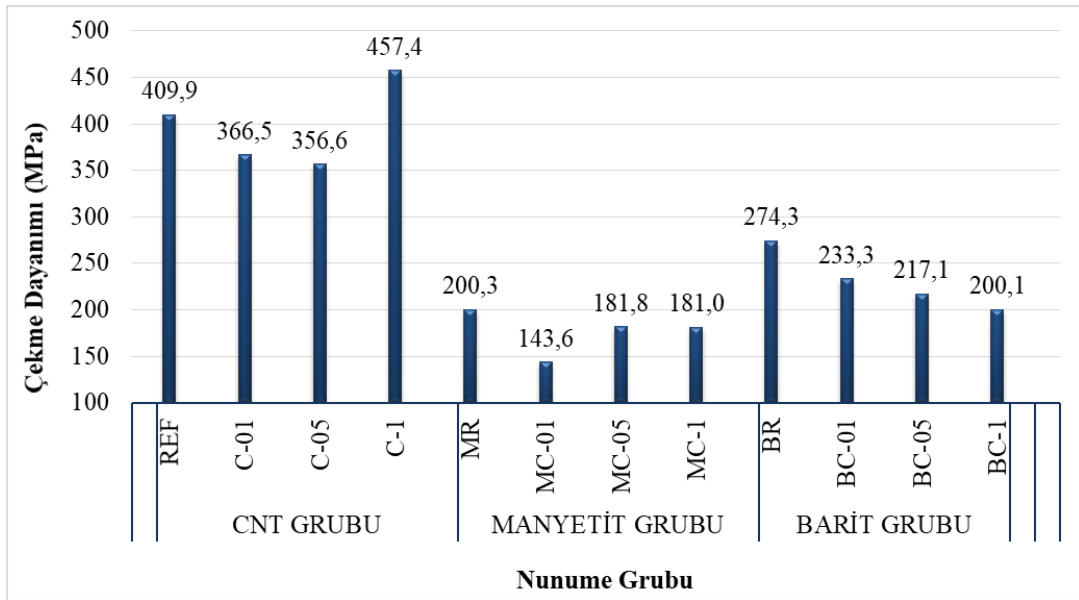
4.2. ÇEKME DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI

Çekme deneyi için 3'er adet kesilen plakaların çekme testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. Çekme dayanımı deneyi sonuçları.

| Numune Grubu | | Çekme Dayanımı Ort. (MPa) | Elastik Modül Ort. (Mpa) | Birim Uzama Ort. (%) |
|----------------|-------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| CNT Grubu | REF | 409,85 | 11737,03 | 14,93 |
| | C-01 | 366,48 | 10737,27 | 14,06 |
| | C-05 | 356,63 | 11399,67 | 14,21 |
| | C-1 | 457,36 | 10070,37 | 16,08 |
| Manyetit Grubu | MR | 200,29 | 8741,50 | 9,98 |
| | MC-01 | 143,60 | 5354,47 | 8,27 |
| | MC-05 | 181,79 | 7049,67 | 9,67 |
| | MC-1 | 181,02 | 6507,33 | 10,00 |
| Barit Grubu | BR | 274,25 | 6260,90 | 13,12 |
| | BC-01 | 233,28 | 6629,27 | 14,31 |
| | BC-05 | 217,15 | 7044,33 | 13,67 |
| | BC-1 | 200,14 | 7827,93 | 12,45 |

Numunelerin çekme dayanımı sonuçları grup karşılaştırmalarıyla beraber Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

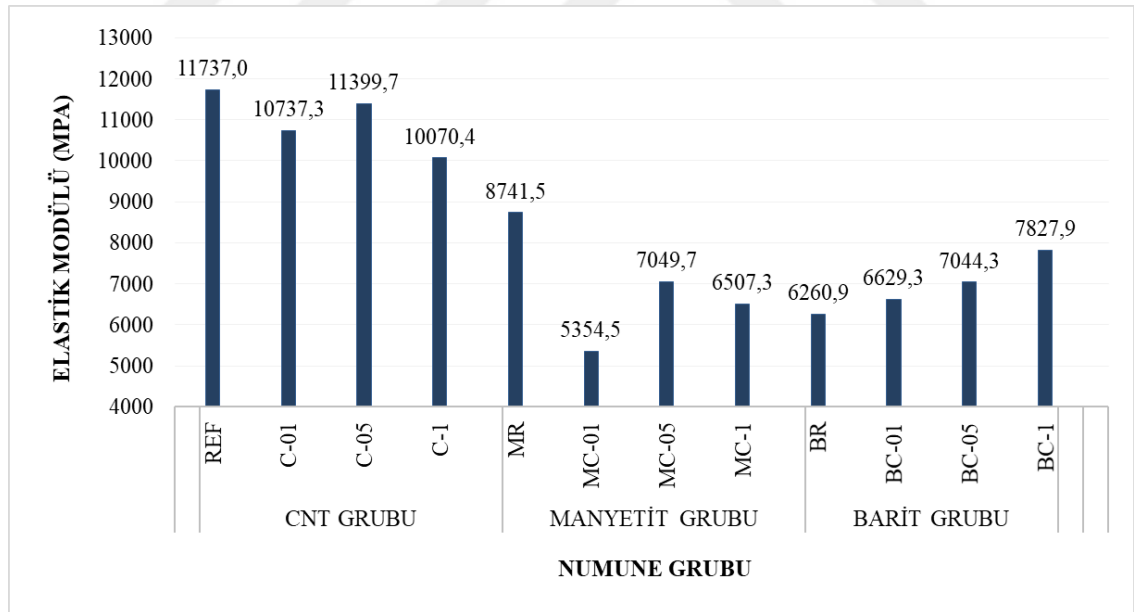


Şekil 4. 1. Numunelerin çekme dayanım değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması.

Kompozit numunelerinin çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımı 457,4 MPa değeriyle % 0,1 CNT içeren kompozit numunede elde edilmiştir.

CNT grubu numunelerinde referans numunesine %0,01 oranında eklenen SWCNT ilavesi ile dayanım değeri %10,5'lik düşüşle 366,5 MPa'a, %0,05 oranında eklenen SWCNT ilavesi ile de %13'lük düşüşle 356,6 MPa'a gerilemiş; ancak nanotakviye ilavesinin %0,1 değerine çıkarılmasıyla en düşük değere göre %22'lik bir artışla grubun en yüksek çekme dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Manyetit grubunda ise %0,01'lik nanotakviye ilavesiyle %28,3'lük bir düşüşle 143,6 MPa olduğu görülmüştür. %0,05 CNT ilavesiyle %21'lik bir artışla 181,8 MPa olarak ölçülmüş ancak nanotakviye ilavesinin %0,1'e çıkarılmasına rağmen kayda değer bir değişim gerçekleşmediği görülmüştür. Barit grubunda ise CNT takviyesinin çekme dayanımı değerlerini doğrusal olarak düşürdüğü görülmektedir. Başlangıçta 274,3 MPa olarak elde edilen dayanım değeri nanotakviye oranlarındaki artışla beraber sırasıyla %15,5, %20,85 ve %27'lik düşüş sonucu 200,1 MPa'a kadar gerilemiştir.

Grup bazında karşılaştırıldığında ise CNT grubu kompozitlerin en yüksek dayanım değerlerini gösteren grup olduğu görülmektedir. Manyetit grubu ise en düşük çekme performansını gösteren grup olmuştur.



Şekil 4. 2. Numunelerin elastik modül değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması

Kompozit numunelerin çekme testinden elde edilen elastik modül değerlerine göre REF numunesinin 11737 MPa değeriyle en yüksek, MC-01 numunesinin ise 5354,5 MPa değeriyle en düşük değeri sağladığı görülmüştür.

CNT grubuna ait test sonuçlarına göre REF ve % 0,05 CNT katkılı numuneler en yüksek elastik modül değerlerini sağlarken bu sonuçları %0,01 CNT katkılı numune ve % 0,1 CNT katkılı numuneler takip etmiştir. Grubun en düşük değerini REF numunesine göre %14,2'lik bir düşüşle 10070,4 MPa değeriyle % 0,1 CNT katkılı numune göstermiştir. Manyetit grubu numunelerinin test sonuçlarına göre, tüm numuneler arasında en yüksek düşüş değerinin (%38,7) gerçekleştiği %0,01 CNT katkılı numune göze çarpmaktadır. Nanotakviyenin % 0,05 değerine yükselmesiyle elastik modül değeri %24'lük bir artışla 7049,7 MPa'a yükselmiştir. Ancak CNT takviyesinin % 0,1 oranında katılmasıyla elastik modül değeri %7,6'lık bir düşüşle 6507,3 MPa olarak ölçülmüştür. Barit grubunda ise, çekme dayanım testilerindeki nanotakviye oranının artışıyla gerçekleşen doğrusal düşüşün tam tersi olarak; artan CNT oranı ile birlikte elastik modül değerlerinin doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Başlangıçtaki barit referans numunesinin 6260,9 MPa olarak belirlenen elastik modül değeri nanotakviye oranlarındaki artışla beraber sırasıyla %5,5, %11,12 ve %20'lik artış sonucu 7827,9 MPa'a yükseldiği tespit edilmiştir.

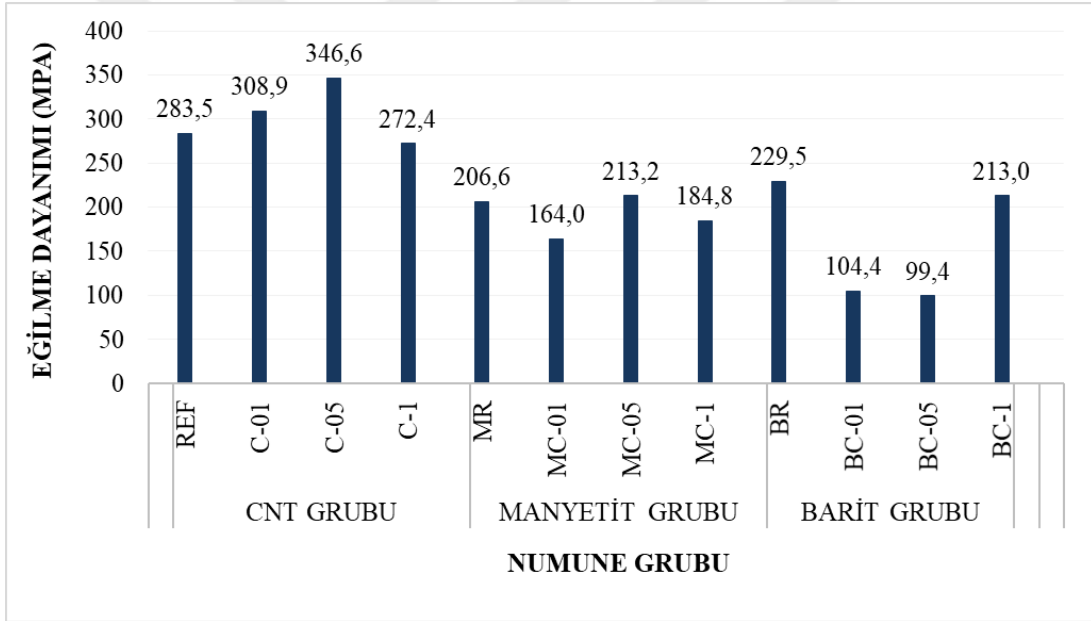
Grup bazında yapılan karşılaştırmaya göre CNT grubunun elastik modül değerlerinin diğer gruplara göre çok daha yüksek olduğu, bu grubu takiben doğrusal artışla barit grubunun ortalama olarak manyetit grubuna göre daha iyi performans gösterdikleri belirlenmiştir.

4.3. EĞİLME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında üretilen numunelere üç nokta eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Test sonuçları Çizelge 4.3.'te, grup bazında karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3. Üç nokta eğilme dayanımı test sonuçları.

| Numune Grubu | Eğilme Dayanımı Ort. (MPa) | |
|----------------|----------------------------|-------|
| CNT Grubu | REF | 283,5 |
| | C-01 | 308,9 |
| | C-05 | 346,6 |
| | C-1 | 272,4 |
| Manyetit Grubu | MR | 206,6 |
| | MC-01 | 164,0 |
| | MC-05 | 213,2 |
| | MC-1 | 184,8 |
| Barit Grubu | BR | 229,5 |
| | BC-01 | 104,4 |
| | BC-05 | 99,4 |
| | BC-1 | 213,0 |



Şekil 4. 3. Numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması

Üç nokta eğilme dayanımı testi yapılan kompozit numunelerde en yüksek eğilme dayanımı değeri 346,6 MPa'lık değeriyle %0,05 SWCNT katkılı dolgusuz reçine göstermiştir. %0,05 SWCNT katkılı barit dolgulu numune ise 99,4 MPa'lık değeriyle en düşük eğilme dayanımı performansını göstermiştir.

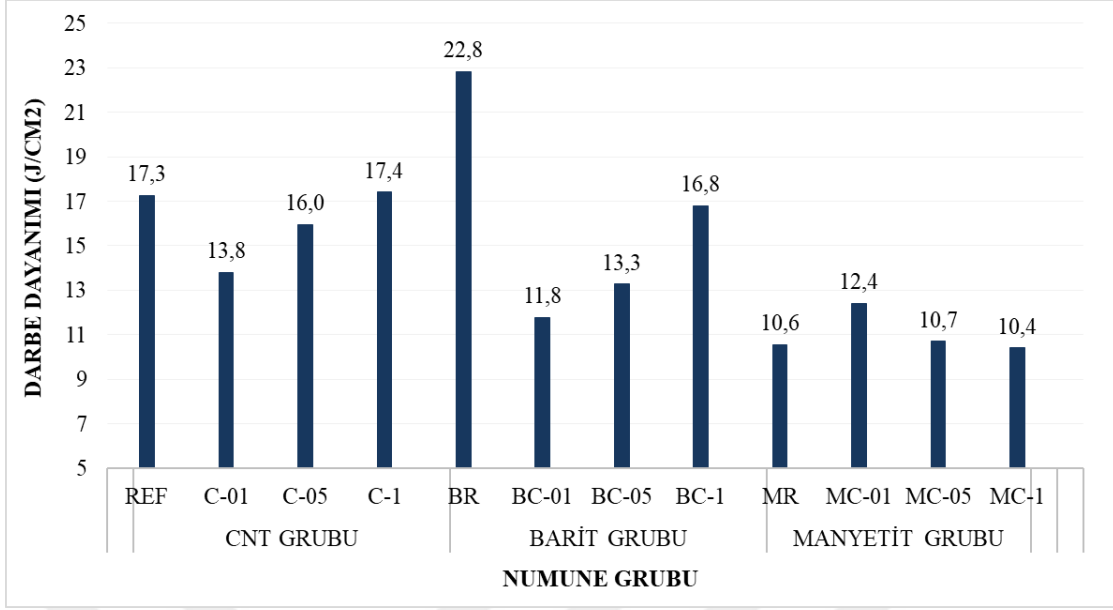
CNT grubunun, manyetit ve barit grubuna göre daha yüksek eğilme dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Dolgu ve nanotakviye malzemesi içermeyen referans numunesinin eğilme dayanım değeri 283,5 MPa olarak bulunmuş, %0,01 CNT ilavesiyle bu değer 308,9 MPa'a, CNT ilavesinin %0,05 oranındaki artışıyla da 346,6 MPa'a yükselmiştir. Bu artışın oransal ifadesi sırasıyla %8,2 ve %18,2'dir. Ardından %21,4'lük bir düşüşle 272,4 MPa değerine gerilemiştir. Manyetit grubunda 213,2 MPa'lık değeriyle en yüksek eğilme dayanımına sahip olan %0,05 CNT katkılı numuneyi 206,6 MPa'lık değeriyle nanotakviyesiz manyetit referans numune takip etmektedir. %0,01 ve %0,1 CNT takviyeli numunelerin eğilme dayanımları ise 164 MPa ve 184,4 MPa olarak ölçülmüştür. Barit grubunda ise 229,5 MPa'lık değeriyle en yüksek eğilme dayanım değerini gösteren BR, %0,01 CNT ilavesiyle %54,5'lik büyük bir düşüşle 104,4'e ve %0,05 CNT ilavesiyle eğilme testi kapsamındaki tüm numuneler arasında en düşük değer olan 99,4 MPa'a gerilemiştir. Son olarak CNT takviye oranının %0,1'e çıkarılmasıyla %53,3'lük bir artış göstererek 213 MPa olarak belirlenmiştir.

4.4. CHARPY DARBE DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Numuneler üzerinde charpy darbe dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan testin sonuçlarına göre numunelerin darbe dayanımı değerleri Çizelge 4.4'te, grup bazında karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4. Charpy darbe dayanımı test sonuçları.

| Numune Grubu | | Darbe Dayanımı (j/cm ²) |
|----------------|-------|--|
| CNT Grubu | REF | 17,2 |
| | C-01 | 13,8 |
| | C-05 | 15,9 |
| | C-1 | 17,4 |
| Barit Grubu | BR | 22,8 |
| | BC-01 | 11,7 |
| | BC-05 | 13,2 |
| | BC-1 | 16,8 |
| Manyetit Grubu | MR | 10,6 |
| | MC-01 | 12,4 |
| | MC-05 | 10,7 |
| | MC-1 | 10,4 |



Şekil 4. 4. Numunelerin charpy darbe dayanımı değerlerinin bireysel ve grup bazında karşılaştırılması.

Kompozit plakalardan kesilerek alınmış çentiksiz numunelere yapılan charpy darbe dayanımı test sonuçları incelendiğinde en yüksek darbe dayanımı 22,8 J/cm²'lük performansı ile barit dolgulu referans numunesinde, en düşük dayanım değeri ise 10,4 J/cm²'lük performansı ile %0,1 CNT takviyesine sahip manyetit dolgulu numune göstermiştir.

CNT grubu numunelerde; nanotakviyesiz REF numunelerinin darbe dayanımı ortalama değeri 17,3 J/cm² olarak ölçülmüştür. %0,01 CNT ilavesi, darbe dayanım değerinde %20,2'lik bir düşüşe yol açarak 13,8 J/cm² değerine gerilemiştir. Nanotakviye oranının %0,05 değerine yükselmesiyle birlikte darbe dayanımı önce %13,7'lik bir artışla 16,0 J/cm², CNT oranının %0,1 değerine yükselmesiyle de %20,5'lik bir artışla 17,4 J/cm² olduğu tespit edilmiştir. Bu artış, REF numunesinin %0,01'lik nanotakviye ilavesinden sonraki düşüşle eşdeğerdir. Test edilen kompozitler arasında en yüksek darbe dayanımı performansını gösteren BR numunesine %0,01 CNT ilavesi, numunenin darbe dayanımında %48,2 gibi yüksek bir düşüş yüzdesiyle 11,8 J/cm² olarak gerçekleşmiştir. Buna karşın CNT grubundaki darbe dayanım değerlerinde yükselişe benzer şekilde kademeli bir artış görülmüştür. %0,05 CNT ilavesi %11,2'lik, %0,1 CNT ilavesi ise %29,7'lik bir artış trendi göstermiştir. Bu numunelerin dayanım değerleri ise sırasıyla

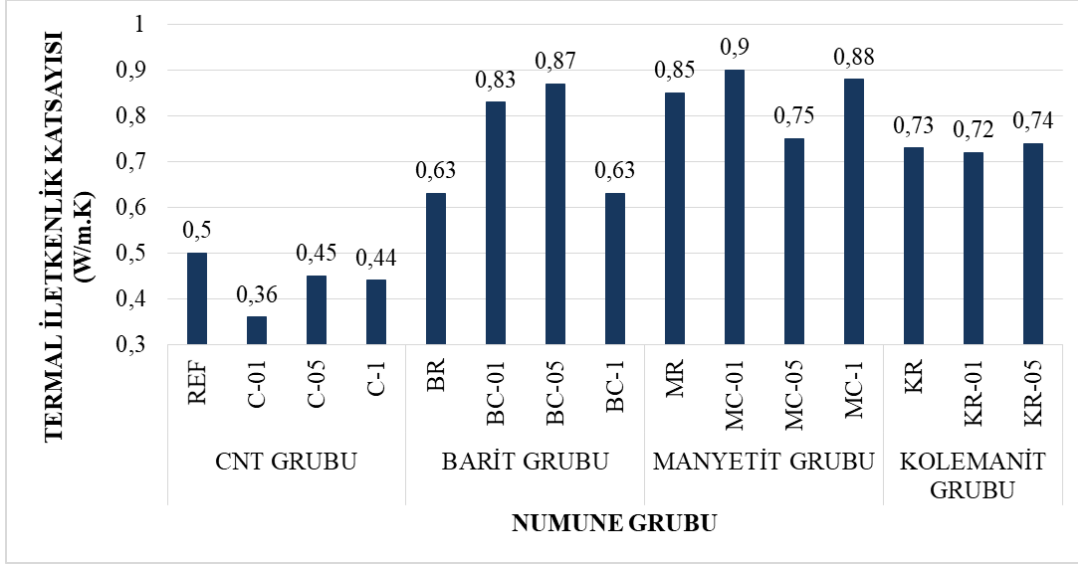
13,3 J/cm² ve 16,8 J/cm² olarak belirlenmiştir. Manyetit grubu numunelerinin dayanım değerleri incelendiğinde kayda değer tek değişim, 10,6 J/cm² olarak ölçülen MR numunesine %0,01'lik CNT ilavesinin %14,5'lik bir artışla MC-01 numunesinde gözlenmiştir. CNT ilavesinin %0,05 oranına çıkarılmasıyla bu kez %14,5'lik bir düşüş yaşanarak darbe dayanımı 10,7 J/cm² olarak ölçülmüş ve %0,1 CNT ilavesi de belirgin bir değişim göstermemiştir.

4.5. TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışması kapsamında üretilen kompozitlerin termal iletkenlik katsayılarının belirlendiği test sonuçları ve grup bazında karşılaştırılmaları Çizelge 4,5'te ve Şekil 4,5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 5. Numunelerin termal iletkenlik katsayı ölçüm sonuçları.

| Numune Grubu | | Termal İletkenlik Katsayısı (W/m.K) |
|-----------------|-------|-------------------------------------|
| CNT Grubu | REF | 0,50 |
| | C-01 | 0,36 |
| | C-05 | 0,45 |
| | C-1 | 0,44 |
| Barit Grubu | BR | 0,63 |
| | BC-01 | 0,83 |
| | BC-05 | 0,87 |
| | BC-1 | 0,63 |
| Manyetit Grubu | MR | 0,85 |
| | MC-01 | 0,90 |
| | MC-05 | 0,75 |
| | MC-1 | 0,88 |
| Kolemanit Grubu | KR | 0,73 |
| | KR-01 | 0,72 |
| | KR-05 | 0,74 |



Şekil 4. 5. Numunelerin termal iletkenlik katsayısı test sonuçlarının bireysel ve grup bazında karşılaştırılması.

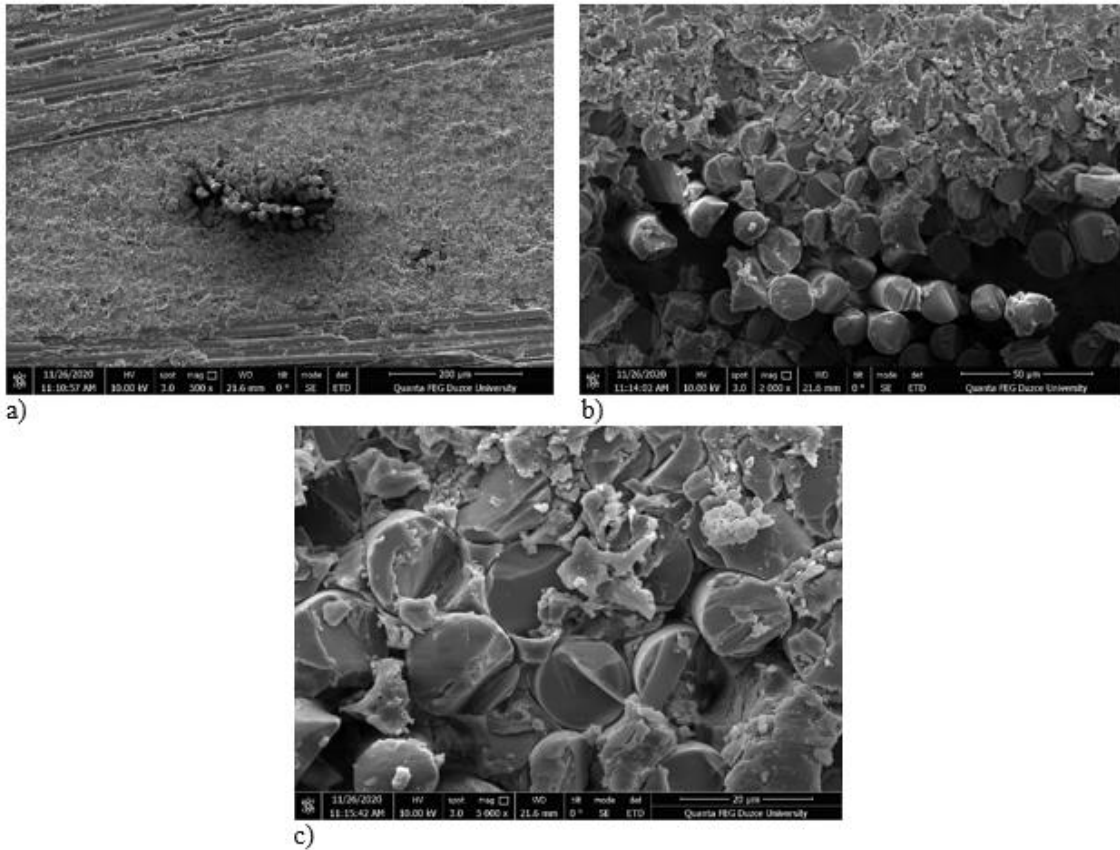
Numunelerin termal iletkenlik katsayılarının belirlendiği testin sonuçlarına göre en düşük termal iletkenlik katsayısı 0,36 W/m.K ile %0,01 CNT katkıli numunede, en yüksek termal iletkenlik katsayısı ise 0,9 W/m.K ile %0,01 CNT katkıli manyetit dolgulu numunede elde edilmiştir.

CNT grubunda nanotakviye içermeyen polyester reçine-camelyaf kompoziti REF numunesine ait termal iletkenlik katsayısı 0,5 W/m.K olarak ölçülmüş, %0,01 CNT takviyesiyle %28'lik bir düşüş göstererek 0,36 W/m.K olarak ölçülmüştür. CNT oranının %0,05 mertebesine çıkarılmasıyla bu değer %20'lik bir yükselişle 0,45 W/m.K değerine yükselmiş, nanotakviye oranının %0,1 mertebesine çıkarılmasıyla da %2'lik bir düşüş göstererek 0,44 W/m.K olarak ölçülmüştür. Barit grubunda sadece dolgu içeren BR numunesinin termal iletkenlik katsayısı 0,63 W/m.K olarak ölçülmüştür. Barit dolgusu içeren numuneye %0,01 CNT katkısı ile bu değer %24'lük bir artışla 0,83 W/m.K değerine çıkmış, ardından nanotakviye oranının %0,05 değerine yükseltilmesiyle %2,2'lik bir artış daha göstererek 0,87 W/m.K olarak ölçülmüştür. CNT oranının %0,1'e artırılmasıyla termal iletkenlik katsayısı %27,5'lik bir düşüş oranıyla 0,63 W/m.K değerine gerilemiştir. Manyetit grubunun referans numunesi olan MR numunesinin termal iletkenlik katsayısı 0,85 W/m.K olarak ölçülmüştür. Manyetit dolgulu reçineye ilave edilen %0,01'lik CNT takviyesi, termal iletkenlik değerini %5,5'lik bir artışla 0,9 W/m.K mertebesine yükseltmiştir. CNT ilavesinin %0,05 oranına yükseltilmesiyle %16,6'lık bir düşüşle 0,75 W/m.K olarak ölçülen bu değer, nanotakviyenin %0,1

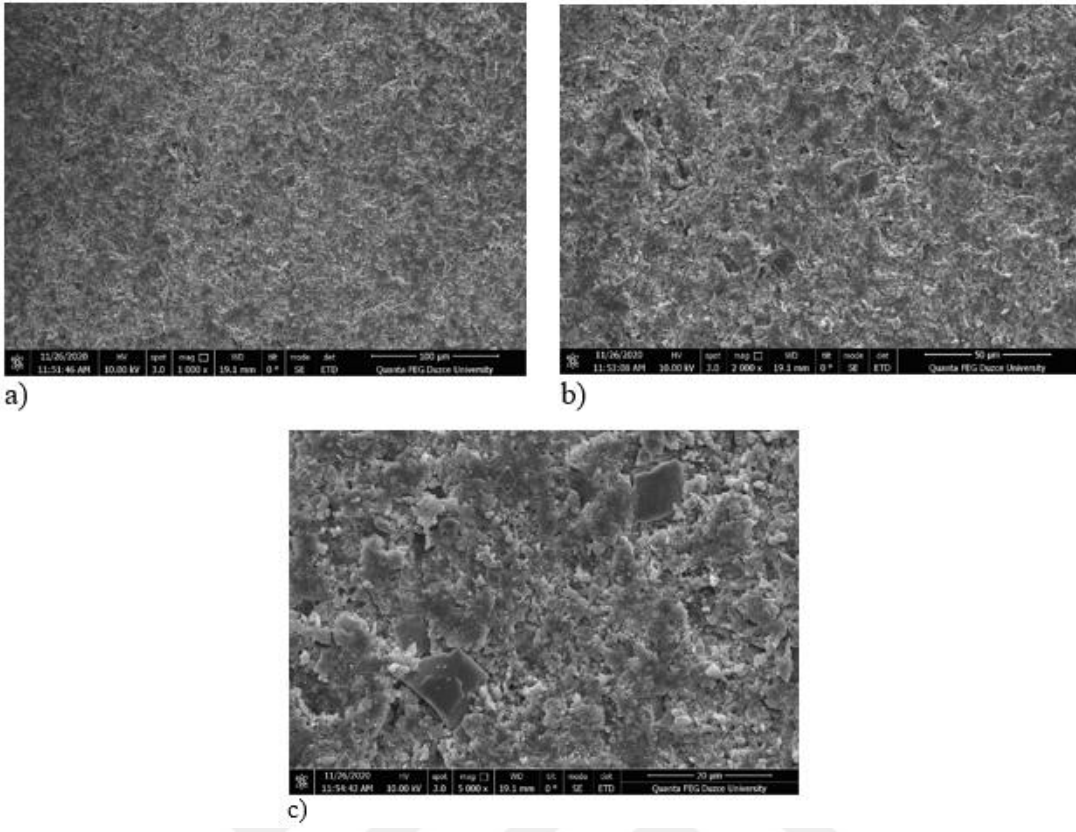
oranında ilave edilmesiyle %14,7'lik bir artış göstermiş ve 0,88 W/m.K olarak belirlenmiştir. Kolemanit içeren örneklere yapılan termal iletkenlik katsayısı ölçümlerinde referans numunesi KR'nin katsayı değeri 0,73 W/m.K olarak ölçülmüş, %0,01 CNT ilavesiyle bu değer %1,3'lük düşüğe 0,72 W/m.K, %0,05 CNT ilavesiyle de %2,7'lik bir artış sonucu 0,74 W/m.K olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları genel grup bazında değerlendirildiğinde termal iletkenlik katsayısının en düşük olduğu grubun dolgu içermeyen CNT grubunun olduğu, en yüksek termal iletkenlik katsayısı değerlerinin bulunduğu grubun ise Manyetit grubunun olduğu görülmüştür.

4.6. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRME

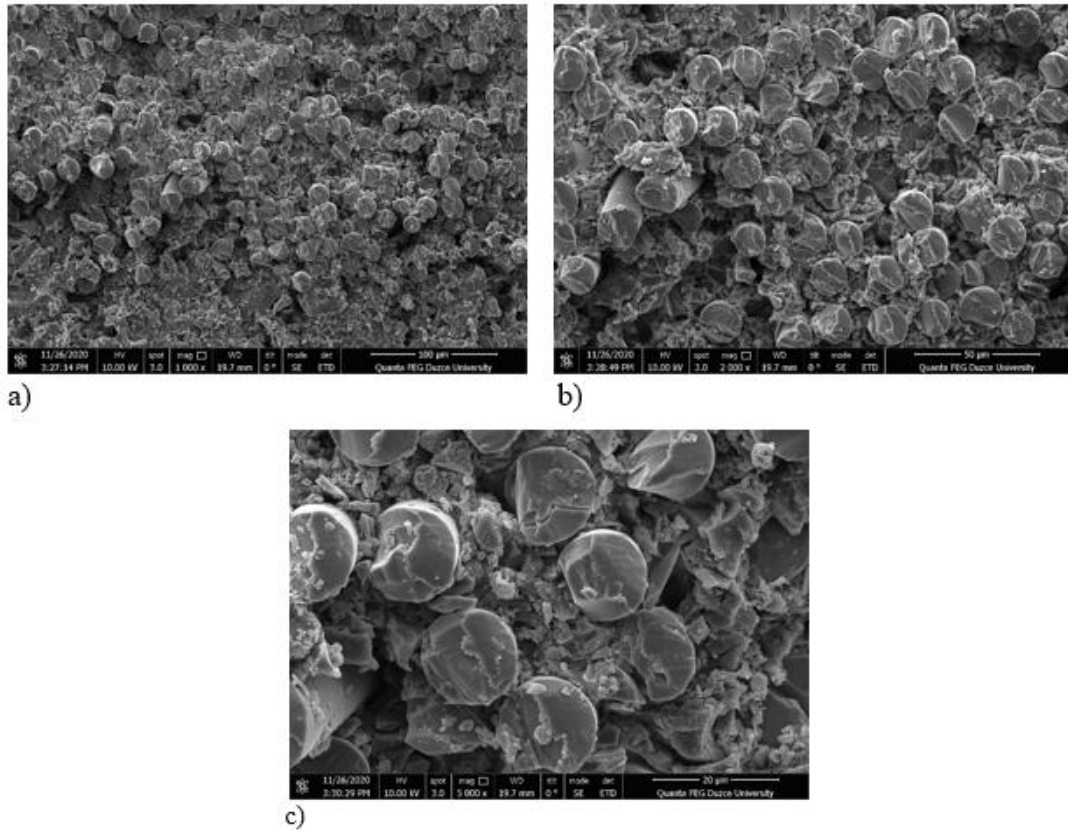
Çalışma kapsamında üretilen kompozit plakalardan alınan numunelerin kesit yüzeylerinin SEM görüntüleri çekilerek morfolojik analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



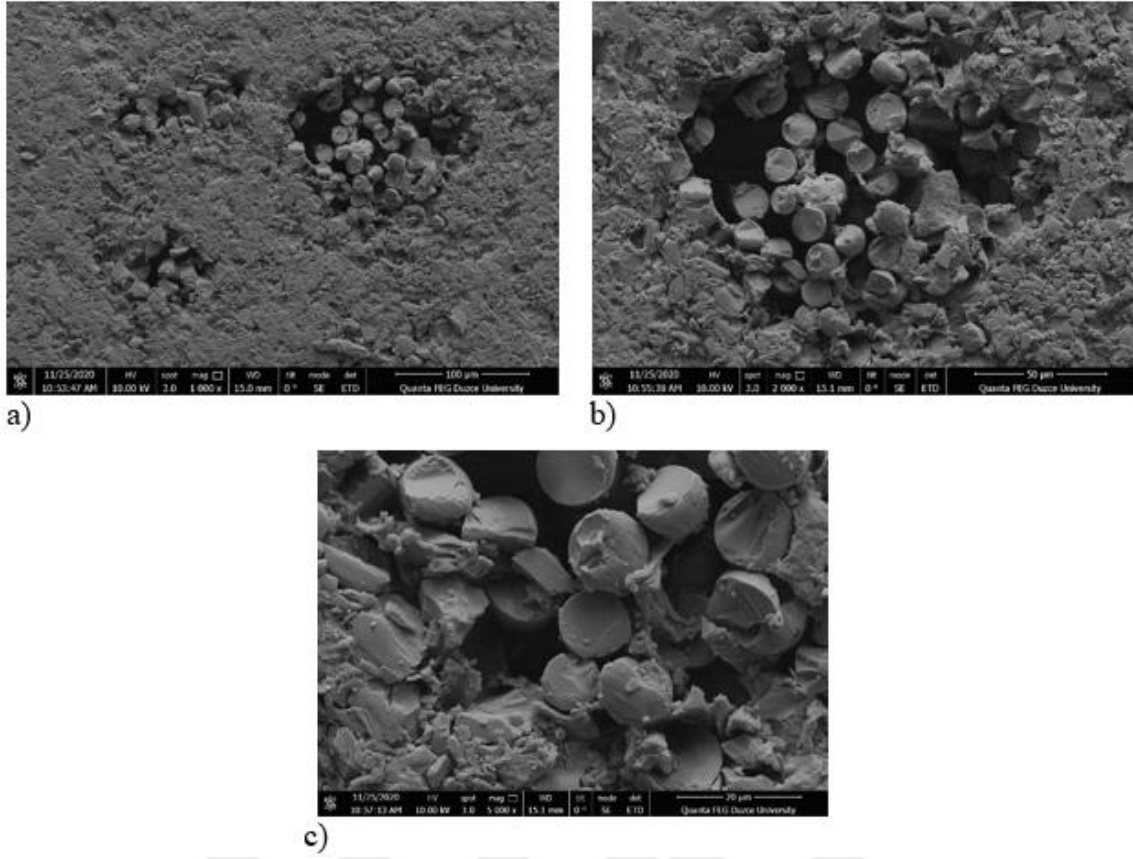
Şekil 4. 6. REF numunesine ait SEM görüntüleri a) 200 µm b) 50 µm c) 20 µm.



Şekil 4. 7. BC-05 numunesine ait SEM görüntüleri a) 200 μm b) 50 μm c) 20 μm.



Şekil 4. 8. MC-1 numunesinin SEM görüntüleri a) 100 μm b) 50 μm c) 20 μm.



Şekil 4. 9. KR numunesine ait SEM görüntüleri a) 100 µm b) 50 µm c) 20 µm.

Tüm numunelerin SEM görüntüleri, hazırlanan deney numunesinin yan kesitlerine dik olacak şekilde çekilmiştir. Görüntüler incelendiğinde dolgu malzemesi içermeyen numunelerde matris yapısının homojen olduğu ve camelyafı, dolgulu kompozitlerin matrislerine göre daha iyi ıslattığı ve daha iyi bir arayüz oluşturduğu görülmüştür. Özellikle kolemanit içeren numunelerin elyafı tam olarak ıslatamadığı ve bu kısımlarda boşlukların oluştuğu belirlenmiştir. Barit, manyetit ve kolemanit içeren kompozitlerin içinde en iyi arayüzün barit dolgulu numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir. Buna karşın incelenen tüm görüntülerde homojen dağılımın ve matris-takviye arayüzünün en başarılı olduğu numunenin ise REF numunesi olduğu görülmüştür.

4.7. GAMA GEÇİRGENLİK DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Kompozit numunelerin gama zırlama performanslarının belirlendiği gama geçirgenlik deneyi için, numunelerin iki farklı kalınlıkta ortalama 1,233 MeV enerji değerinde 30 saniye süresince sayımlar alınarak dedektör tarafından kaydedilmiştir. Elde edilen sayım sonuçlarına göre Bölüm 3.2.11’de belirtilen denklemler ışığında lineer zayıflatma

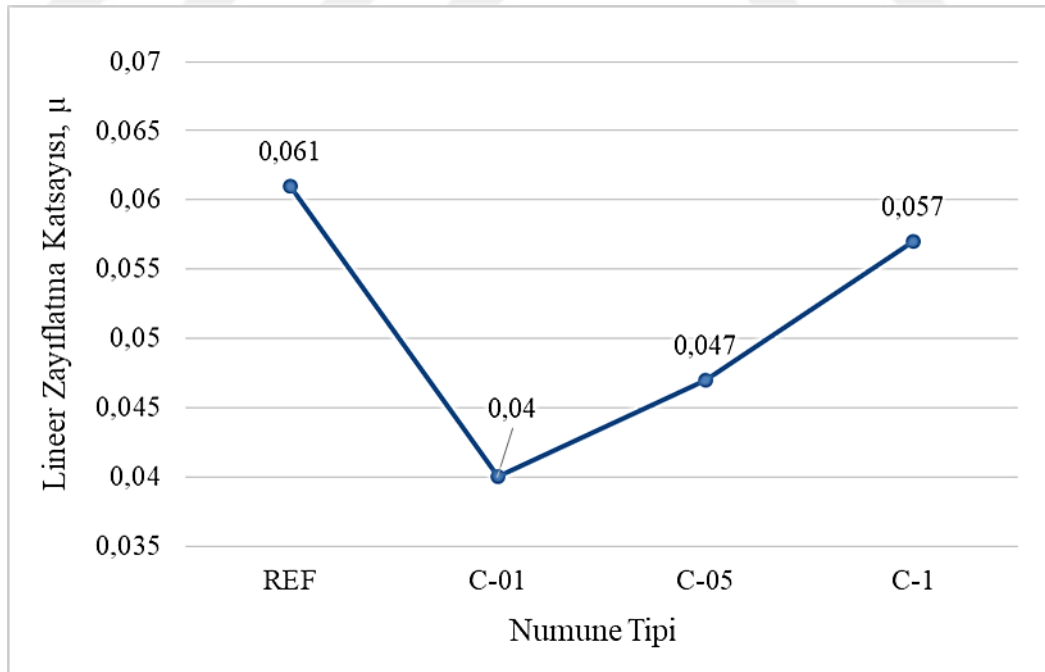
katsayıları (μ), kütle zayıflatma katsayıları (μ_m), yarı değer (HVL) ve onda bir değer kalınlıkları (HVL) grup bazında ayrı ayrı hesaplanmıştır.

➔ CNT Grubu Sonuçları

CNT grubu numunelerinin iki farklı kalınlık değerlerinde gerçekleştirilen gama geçirgenlik testi sonuçları Çizelge 4.6'da, numune tiplerine bağlı olarak lineer zayıflatma katsayılarındaki değişim ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4. 6. CNT grubu gama geçirgenlik deneyi sonuçları.

| Numune Tipi | Yoğunluk (gr/cm ³) | Lineer zayıflatma katsayısı, μ (cm ⁻¹) | Kütle zayıflatma katsayısı, μ_m (cm ² /gr) | HVL (cm) | TVL (cm) |
|-------------|--------------------------------|--|---|----------|----------|
| REF | 1,77 | 0,061 | 0,034 | 11,37 | 37,18 |
| C-01 | 1,6 | 0,04 | 0,025 | 17,38 | 57,74 |
| C-05 | 1,66 | 0,047 | 0,028 | 14,64 | 48,63 |
| C-1 | 1,73 | 0,057 | 0,032 | 12,05 | 40,05 |



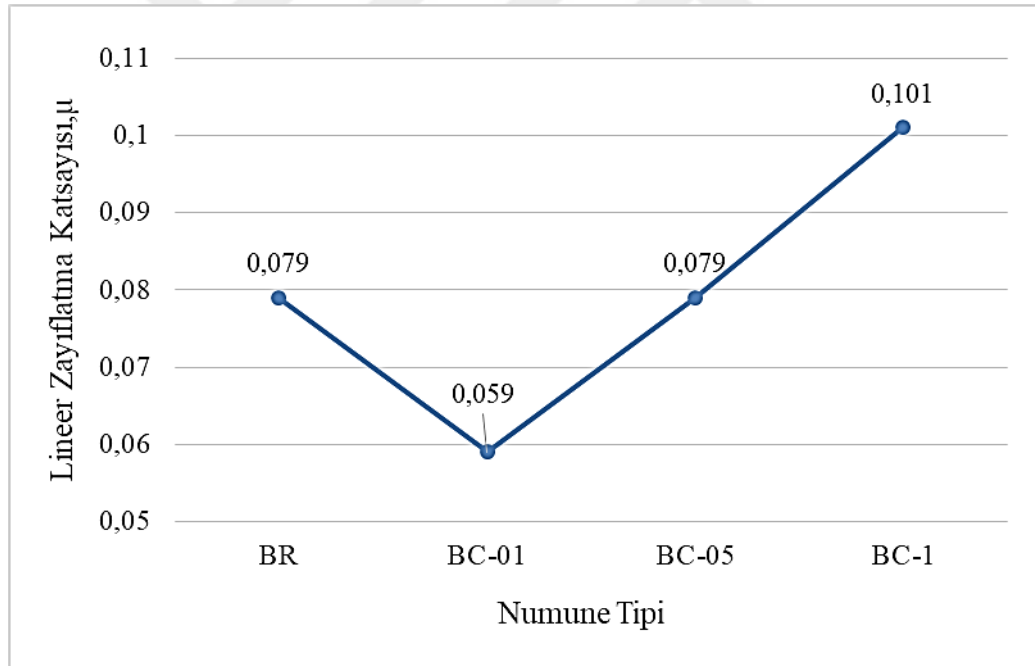
Şekil 4. 10. CNT grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları.

➤ Barit Grubu Sonuçları

Barit grubu numunelerinin iki farklı kalınlık değerlerinde gerçekleştirilen gama geçirgenlik deneyi sonuçları Çizelge 4.7’de, numune tiplerine bağlı olarak lineer zayıflatma katsayılarındaki değişim ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7. Barit grubu gama geçirgenlik deneyi sonuçları.

| Numune Tipi | Yoğunluk (gr/cm ³) | Lineer zayıflatma katsayısı, μ (cm ⁻¹) | Kütle zayıflatma katsayısı, μ_m (cm ² /gr) | HVL (cm) | TVL (cm) |
|-------------|--------------------------------|--|---|----------|----------|
| BR | 2,22 | 0,079 | 0,035 | 8,749 | 29,064 |
| BC-01 | 2,21 | 0,059 | 0,026 | 11,725 | 38,949 |
| BC-05 | 2,17 | 0,079 | 0,036 | 8,824 | 29,312 |
| BC-1 | 2,29 | 0,101 | 0,044 | 6,871 | 22,825 |



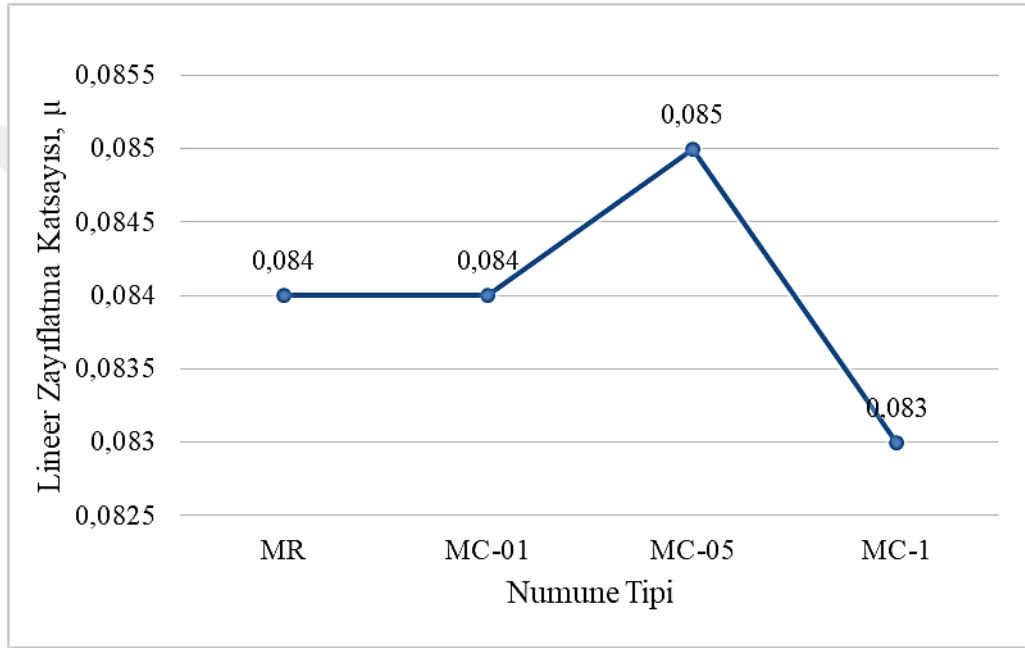
Şekil 4. 11. Barit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları.

➤ Manyetit Grubu Sonuçları

Manyetit grubu numunelerinin iki farklı kalınlık değerlerinde gerçekleştirilen gama geçirgenlik deneyi sonuçları Çizelge 4.8’de, numune tiplerine bağlı olarak lineer zayıflatma katsayılarındaki değişim ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8. Manyetit grubu gama geçirgenlik deneyi sonuçları.

| Numune Tipi | Yoğunluk (gr/cm ³) | Lineer zayıflatma katsayısı, μ (cm ⁻¹) | Kütle zayıflatma katsayısı, μ_m (cm ² /gr) | HVL (cm) | TVL (cm) |
|-------------|--------------------------------|--|---|----------|----------|
| MR | 2,38 | 0,084 | 0,035 | 8,239 | 27,369 |
| MC-01 | 2,34 | 0,084 | 0,035 | 8,244 | 27,387 |
| MC-05 | 2,36 | 0,085 | 0,036 | 8,131 | 27,011 |
| MC-1 | 2,17 | 0,083 | 0,038 | 8,351 | 27,740 |



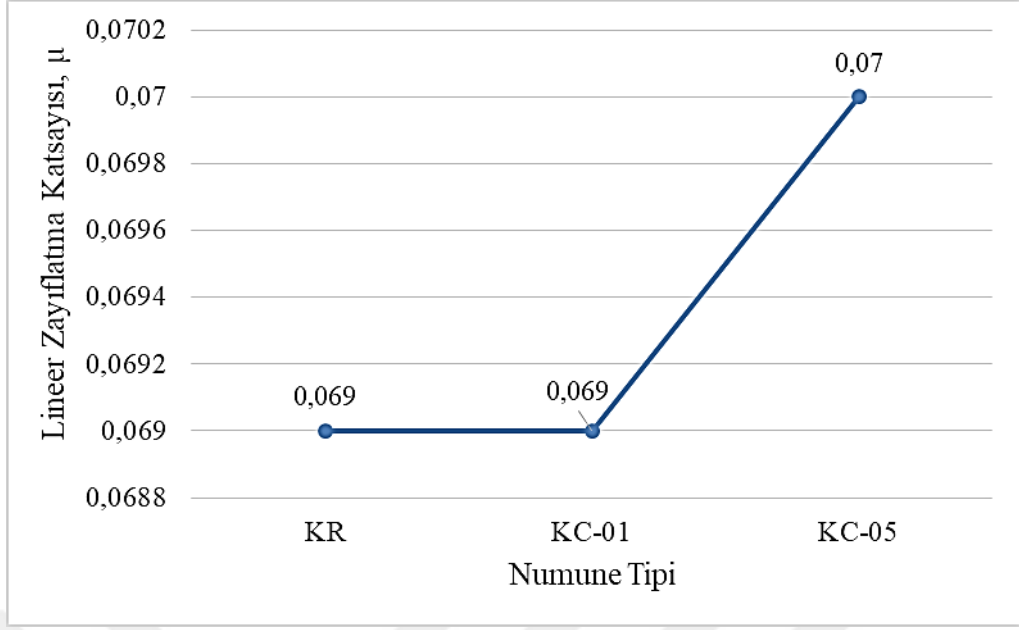
Şekil 4. 12. Manyetit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları.

➤ Kolemanit Grubu Sonuçları

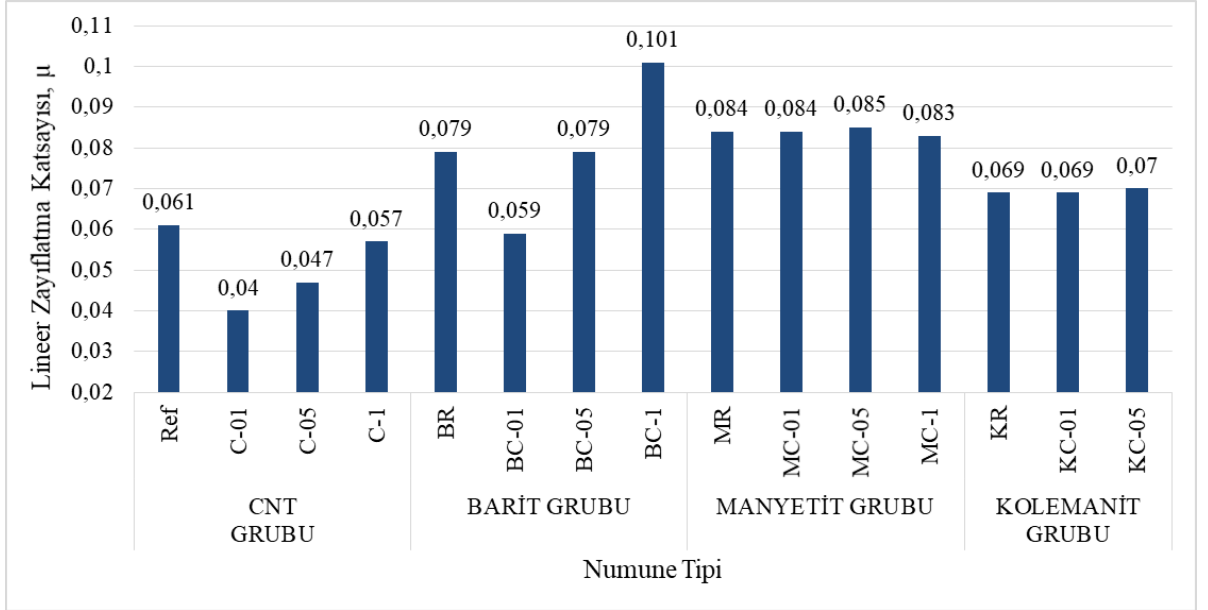
Kolemanit grubu numunelerinin iki farklı kalınlık değerlerinde gerçekleştirilen gama geçirgenlik deneyi sonuçları Çizelge 4,9’da, numune tiplerine bağlı olarak lineer zayıflatma katsayılarındaki değişim ise Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 9. Kolemanit grubu gama geçirgenlik deneyi sonuçları.

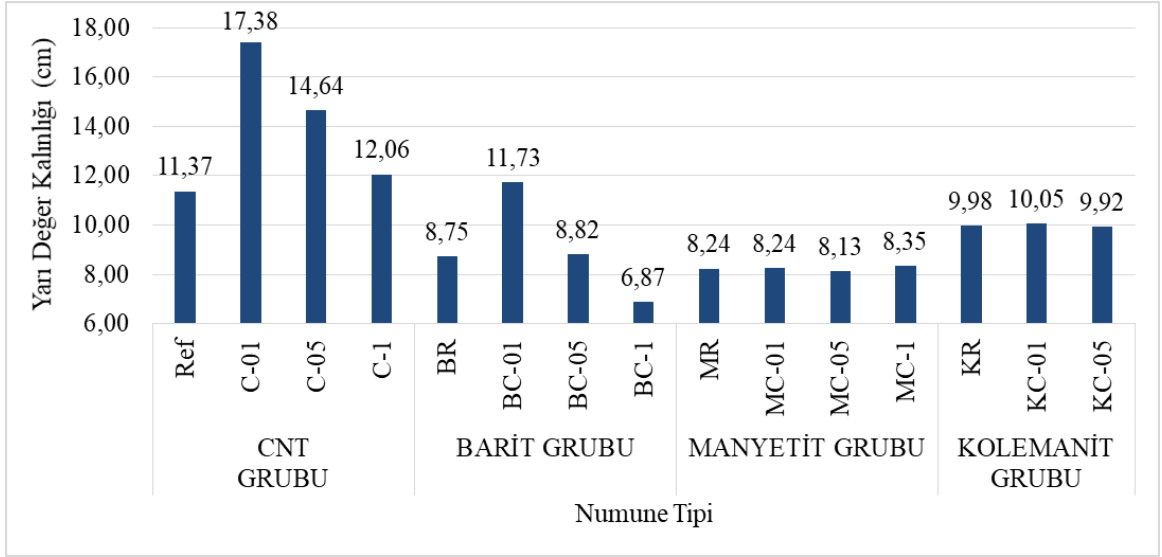
| Numune Tipi | Yoğunluk (gr/cm ³) | Lineer zayıflatma katsayısı, μ (cm ⁻¹) | Kütle zayıflatma katsayısı, μ_m (cm ² /gr) | HVL (cm) | TVL (cm) |
|-------------|--------------------------------|--|---|----------|----------|
| KR | 1,88 | 0,069 | 0,036 | 9,983 | 33,162 |
| KC-01 | 1,88 | 0,069 | 0,036 | 10,051 | 33,388 |
| KC-05 | 1,89 | 0,070 | 0,037 | 9,915 | 32,936 |



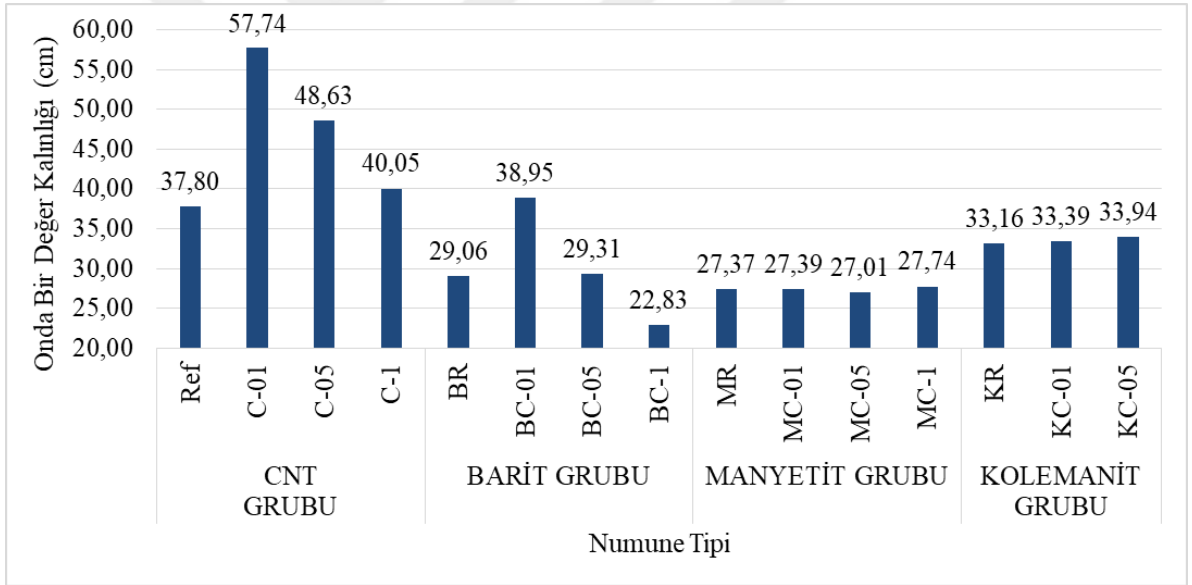
Şekil 4. 13. Kolemanit grubu numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları.



Şekil 4. 14. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları.



Şekil 4. 15. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan yarı değer kalınlık (HVL) değerleri.



Şekil 4. 16. Tüm numunelerin deneysel olarak hesaplanan onda bir değer kalınlık (TVL) değerleri.

Kompozit plakaların radyasyon zırhlama performanslarının tayini için gerçekleştirilen gama geçirgenlik testlerinde iki kalınlık değerinde yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan lineer zayıflatma katsayılarına göre en yüksek performans $0,101 \text{ cm}^{-1}$ 'lik değerle %0,1 SWCNT katkılı barit dolgululu BC-1 numunesinde, en düşük performans ise $0,04 \text{ cm}^{-1}$ 'lik değerle %0,01 SWCNT takviyeli dolgusuz numunede elde edilmiştir.

CNT grubu ölçümleri incelendiğinde lineer zayıflatma katsayısı en yüksek hesaplanan numunenin $0,061 \text{ cm}^{-1}$ 'lik değeriyle dolgunuz ve nanotakviyesiz REF numunesi olduğu, referans numunesine %0,01 oranında nanotakviye ilavesiyle lineer zayıflatma katsayısının $0,04 \text{ cm}^{-1}$ 'e düştüğü ve ardından sırasıyla %0,05 ve %0,1 SWCNT ilavesiyle zayıflatma katsayılarının $0,047 \text{ cm}^{-1}$ ve $0,057 \text{ cm}^{-1}$ mertebesine yükseldiği görülmüştür. Barit grubu ölçümleri incelendiğinde lineer zayıflatma katsayısı en yüksek hesaplanan numunenin $0,101 \text{ cm}^{-1}$ 'lik katsayı değeriyle barit dolgulu %0,1 SWCNT katkılı BC-1 numunesi olduğu, referans numunesine %0,01'lik SWCNT ilavesiyle lineer zayıflatma katsayısının $0,079 \text{ cm}^{-1}$ 'den $0,059 \text{ cm}^{-1}$ 'e düşmesine rağmen %0,05'lik SWCNT ilavesiyle tekrar $0,079 \text{ cm}^{-1}$ değerine ulaştığı görülmektedir. Manyetit grubu numunelerinden alınan sonuçları incelendiğinde lineer zayıflatma katsayıları arasında anlamlı bir farkın olmadığı ve gruba ait tüm kompozitlerin ortalama $0,084 \text{ cm}^{-1}$ lineer zayıflatma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Kolemanit grubu sonuçlarında ise manyetit grubuna benzer şekilde sonuçlar alınmış ve ortalama lineer zayıflatma katsayıları $0,069 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Lineer zayıflatma katsayıları hesaplandıktan sonra Bölüm 2.6.1'de belirtildiği şekilde HVL ve TVL değerleri de hesaplanarak Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'daki sütun grafikleri oluşturulmuştur.

4.8. NÖTRON GEÇİRGENLİK DENEYİ SAYIM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Kompozit plakaların nötron zayıflatma kabiliyetlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan geçirgenlik deneyi için öncelikle 10 adet boş sayım alınarak, sayımların ortalaması soğurma yüzdesi hesaplamasında kullanılmıştır. Dedektör tarafından okunan boş sayımlar Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4. 10. Dedektör tarafından okunan boş sayımlar.

| | Zırh Malzemesi Olmaksızın Alınan Boş sayımlar |
|----|--|
| 1. | 957 |
| 2. | 878 |
| 3. | 915 |
| 4. | 899 |
| 5. | 911 |

Çizelge 4. 10. (devam) Dedektör tarafından okunan boş sayımlar.

| | |
|----------|-------|
| 6. | 910 |
| 7. | 951 |
| 8. | 911 |
| 9. | 918 |
| 10 | 924 |
| Ortalama | 917,4 |

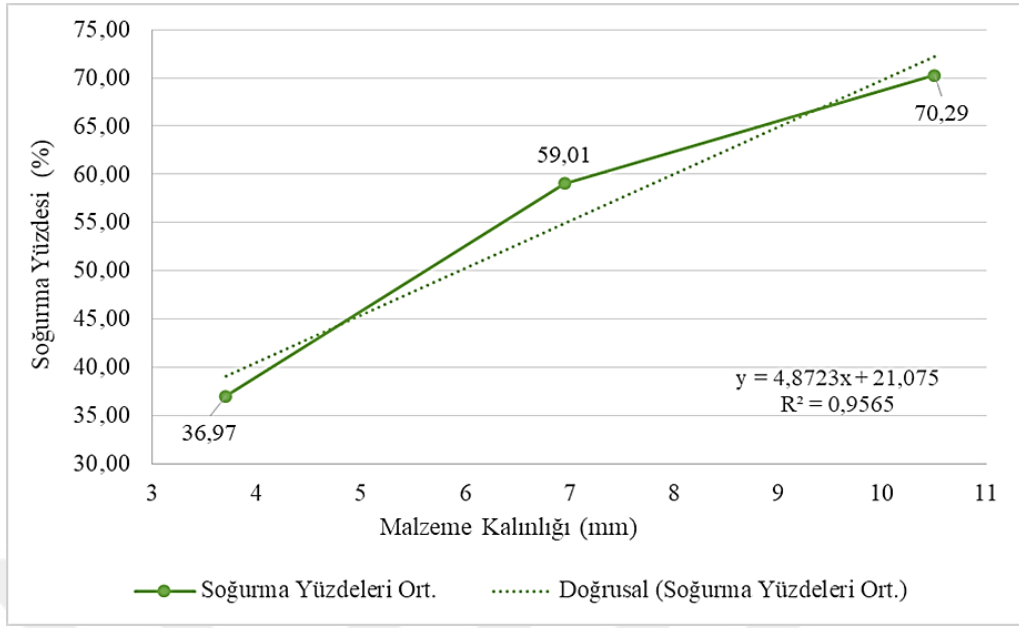
Daha sonra tüm numuneler deney düzeneğine yerleştirilmiş ve her bir numunenin üç farklı kalınlık değeri için 5'er sayım yapılarak radyasyon zırhlama performansları incelenmiştir. Zırhlama testi yapılan numunelerin dedektör tarafından tespit edilen sayım değerleri kayıt altına alınarak numuneler için ayrı ayrı soğurma yüzdeleri hesaplanmış ve soğurma yüzdelerinin ortalamaları alınarak grafikler oluşturulmuştur.

➔ CNT Grubu Sonuçları

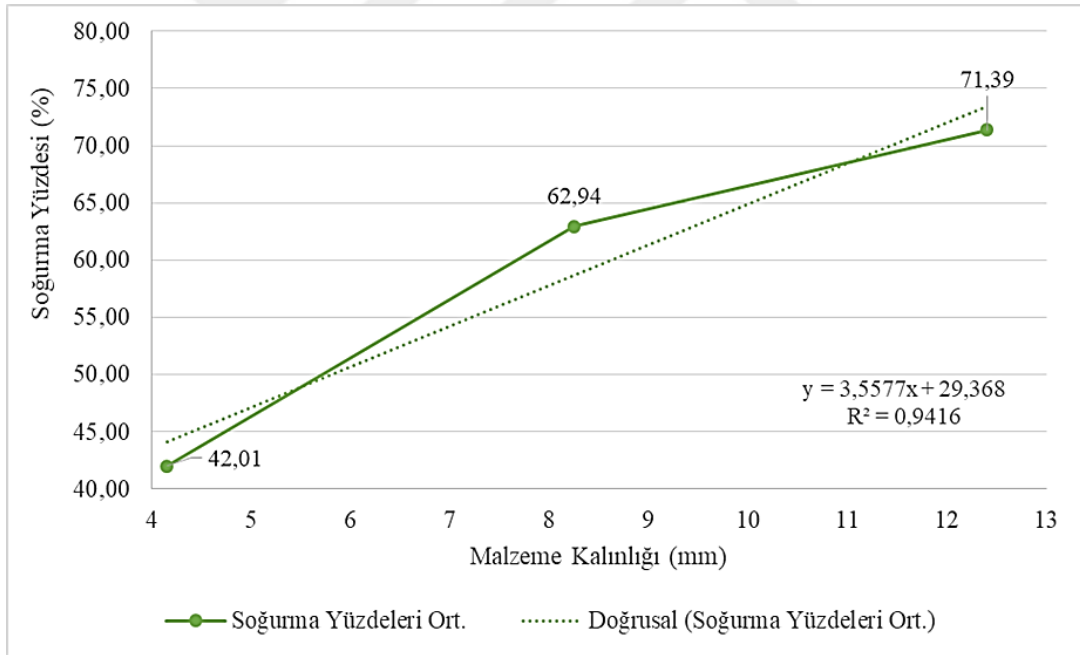
CNT grubu kompozit numunelere yapılan soğurma testinin sayım sonuçlarına göre hesaplanan test kalınlığına bağlı soğurma yüzdeleri Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 11. CNT grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları.

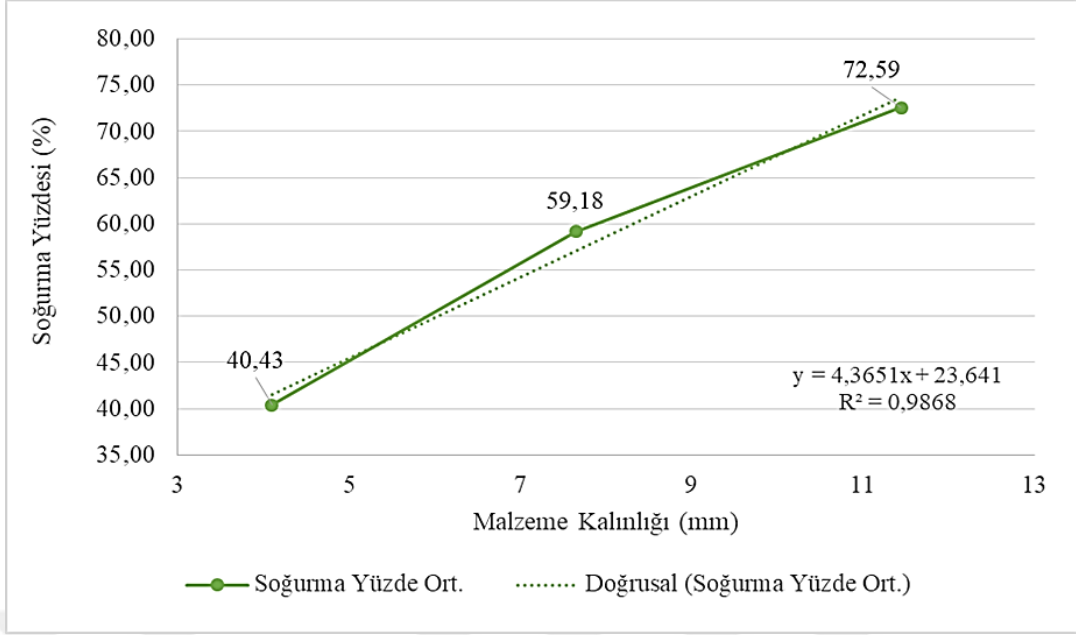
| Numune Tipi | Numune Kalınlığı (mm) | Soğurma Yüzdesi Ort. (%) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| REF | 3,7 | 36,97 |
| | 6,95 | 59,01 |
| | 10,5 | 70,29 |
| C-01 | 4,15 | 42,01 |
| | 8,25 | 62,94 |
| | 12,4 | 71,39 |
| C-05 | 4,1 | 40,43 |
| | 7,65 | 59,18 |
| | 11,45 | 72,59 |
| C-1 | 3,7 | 38,58 |
| | 7,6 | 60,65 |
| | 11,3 | 71,11 |



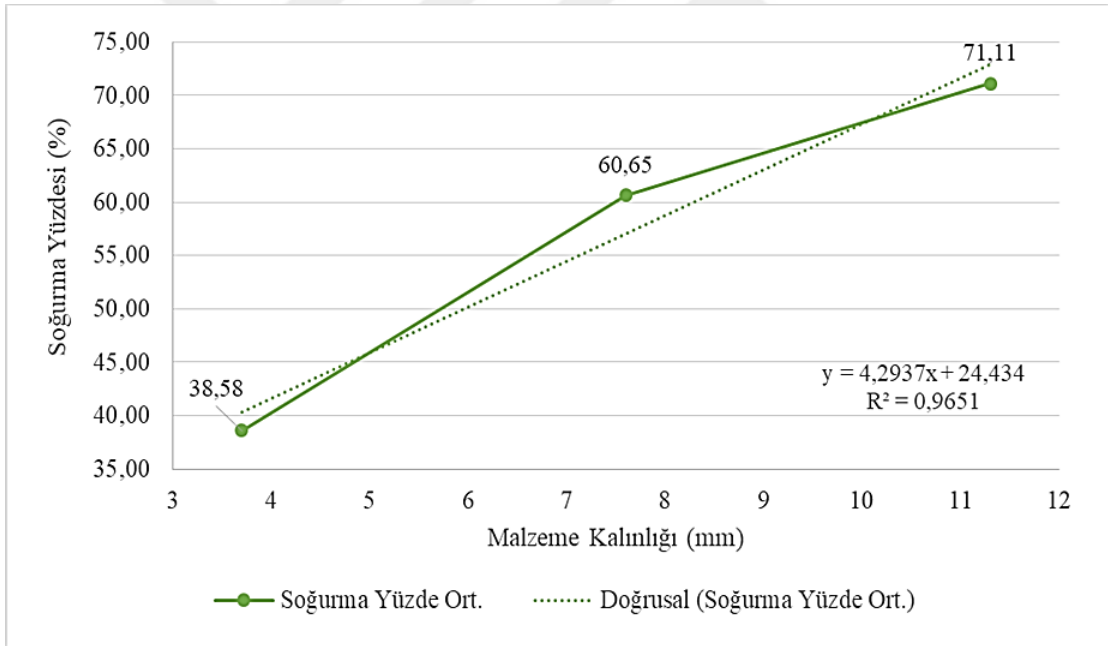
Şekil 4. 17. REF numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 18. C-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 19. C-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.

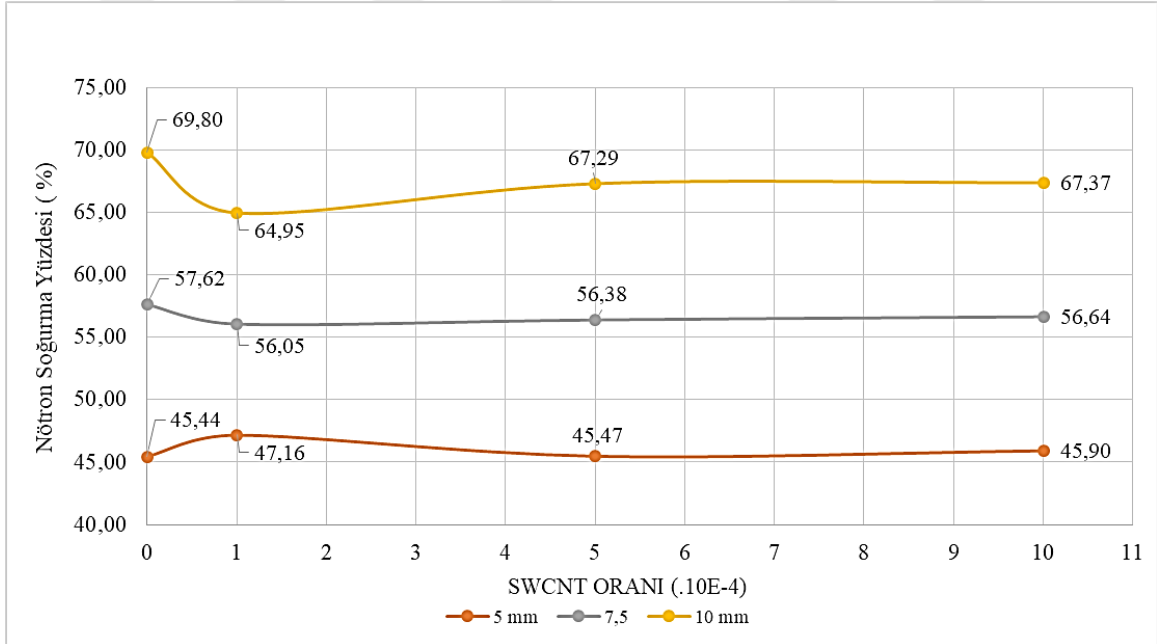


Şekil 4. 20. C-1 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.

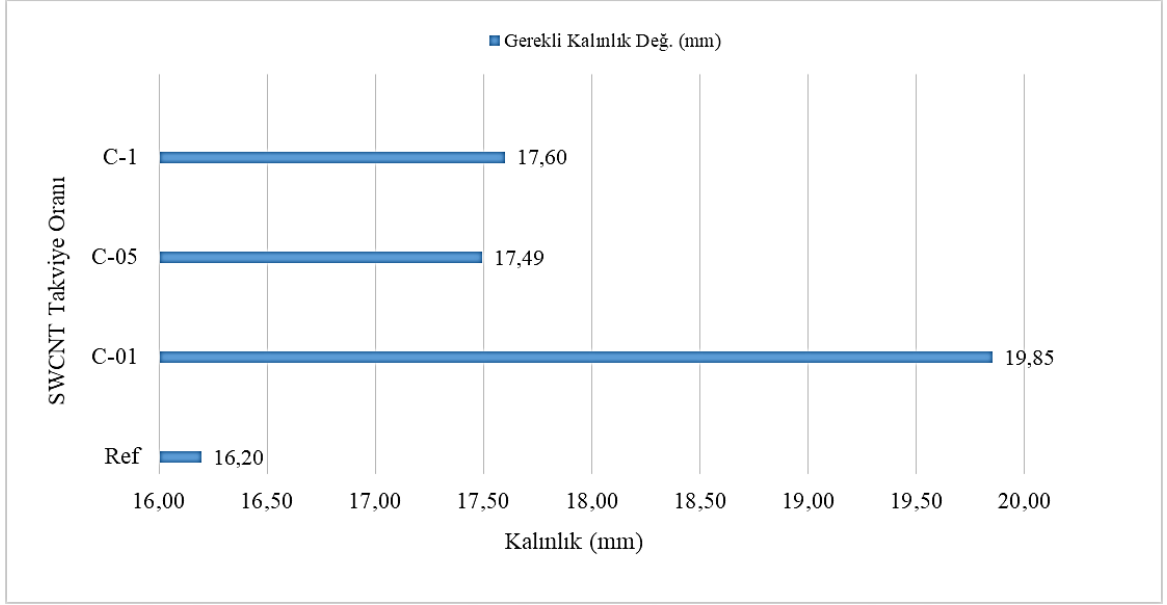
Numunelerin nötron soğurma yüzdelerini gösteren grafiklerdeki ilgili denklemler yardımıyla tüm numunelerin zırlama performanslarının ve CNT takviyesinin etkisini görebilmek adına her bir numune için 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm kalınlık değerleri için soğurma yüzdeleri teorik olarak hesaplanmış; sonuçlar ve karşılaştırma ise Çizelge 4.12 ve Şekil 4.21’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin %100 soğurma için gerekli malzeme kalınlıkları da teorik olarak hesaplanmış ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 12. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri.

| MALZEME GRUBU | Denklem Sabitleri | | Kalınlık (mm) | Soğurma Yüzdesi (%) |
|---------------|-------------------|--------|---------------|---------------------|
| | 4,8723 | 21,075 | | |
| REF | 4,8723 | 21,075 | 5 | 45,43 |
| | 4,8723 | 21,075 | 7,5 | 57,61 |
| | 4,8723 | 21,075 | 10 | 69,79 |
| C-01 | 3,5577 | 29,368 | 5 | 47,15 |
| | 3,5577 | 29,368 | 7,5 | 56,05 |
| | 3,5577 | 29,368 | 10 | 64,94 |
| C-05 | 4,3651 | 23,641 | 5 | 45,46 |
| | 4,3651 | 23,641 | 7,5 | 56,37 |
| | 4,3651 | 23,641 | 10 | 67,29 |
| C-1 | 4,2937 | 24,434 | 5 | 45,90 |
| | 4,2937 | 24,434 | 7,5 | 56,63 |
| | 4,2937 | 24,434 | 10 | 67,37 |



Şekil 4. 21. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik.



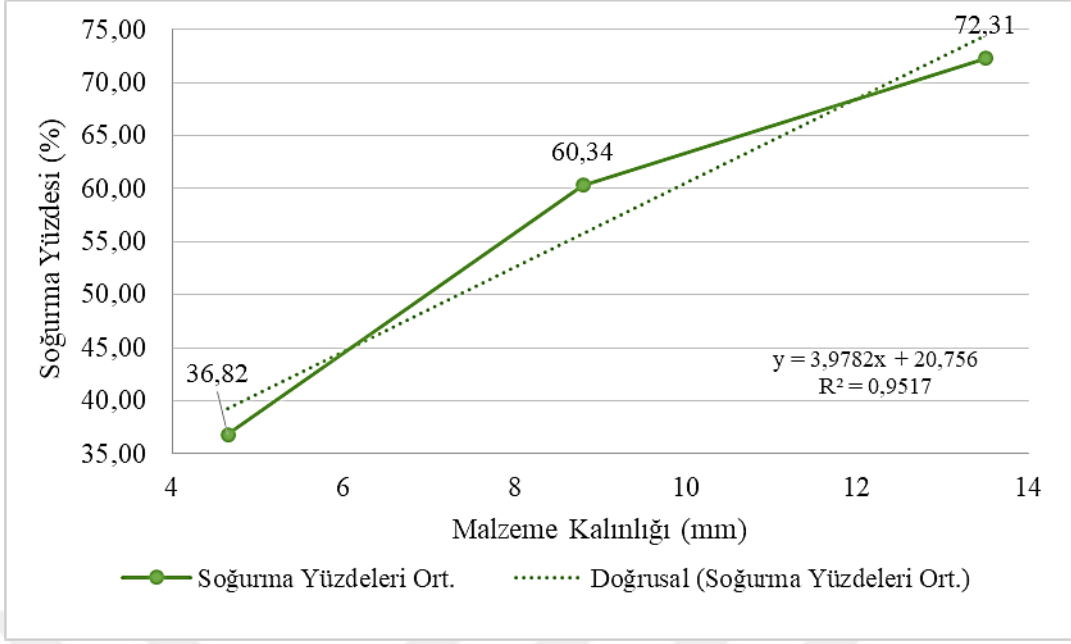
Şekil 4. 22. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli CNT grubu malzeme kalınlık değerleri.

➤ Barit Grubu Sonuçları

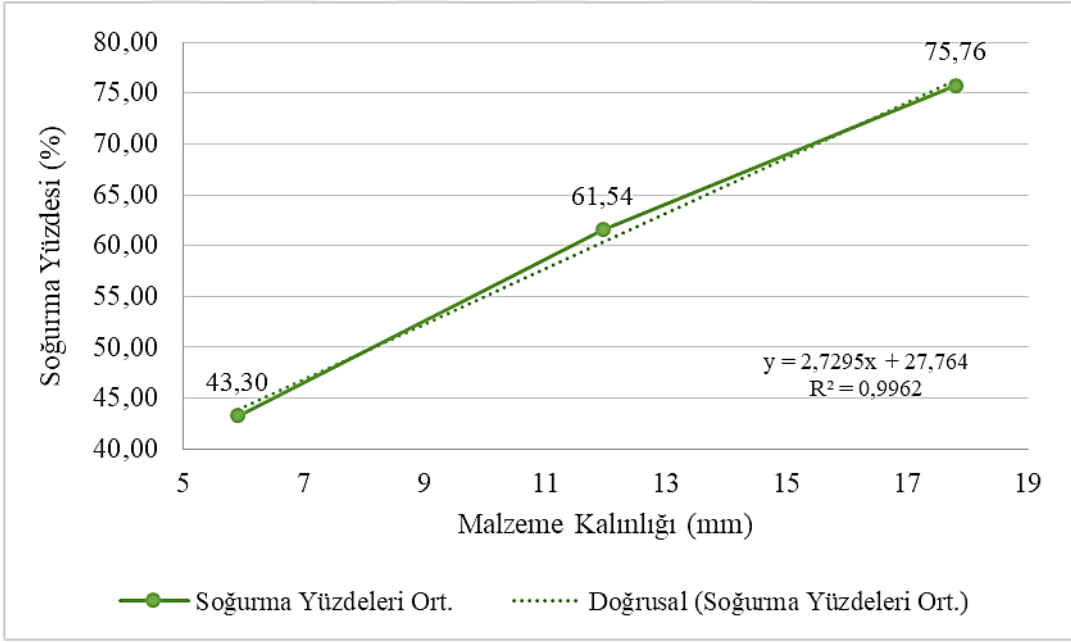
Barit grubu kompozit numunelere yapılan soğurma deneyinin sayım sonuçlarına göre hesaplanan test kalınlığına bağlı soğurma yüzdeleri Çizelge 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 13. Barit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları.

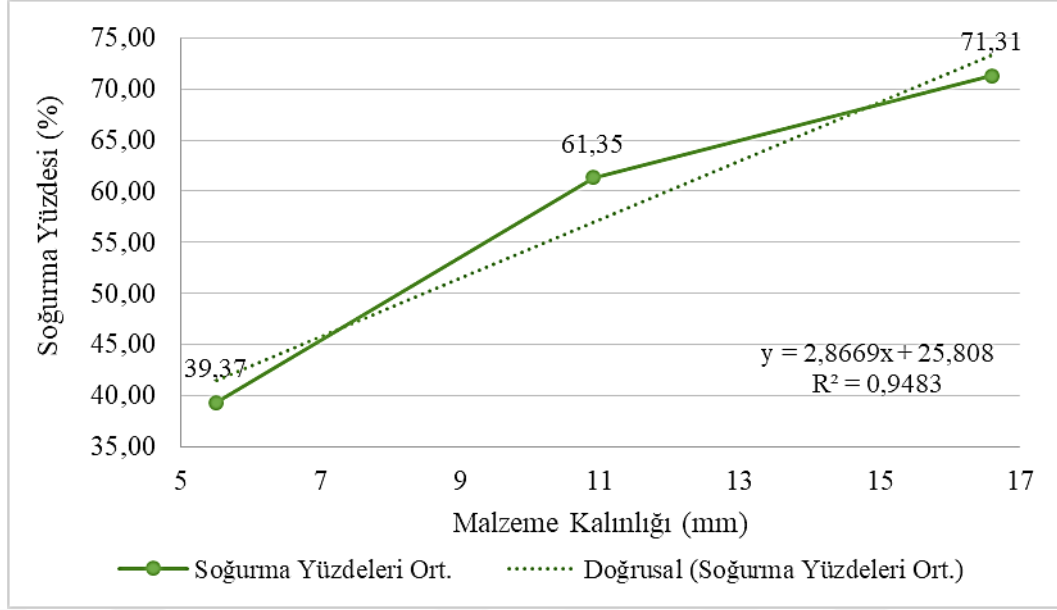
| Numune Tipi | Numune Kalınlığı (mm) | Soğurma Yüzdesi Ort. (%) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| BR | 4,65 | 36,82 |
| | 8,8 | 60,34 |
| | 13,5 | 72,31 |
| BC-01 | 5,9 | 43,3 |
| | 11,95 | 61,54 |
| | 17,8 | 75,76 |
| BC-05 | 5,5 | 39,37 |
| | 10,9 | 61,35 |
| | 16,6 | 71,31 |
| BC-1 | 4,6 | 37,10 |
| | 9,3 | 58,06 |
| | 14,9 | 72,03 |



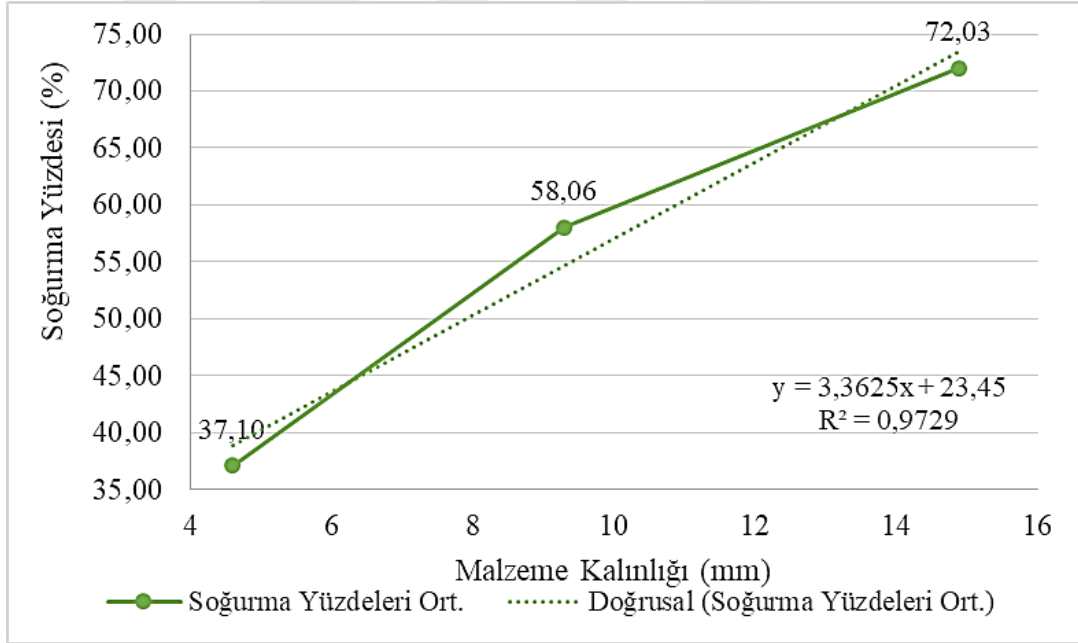
Şekil 4. 23. BR numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 24. BC-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 25. BC-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.

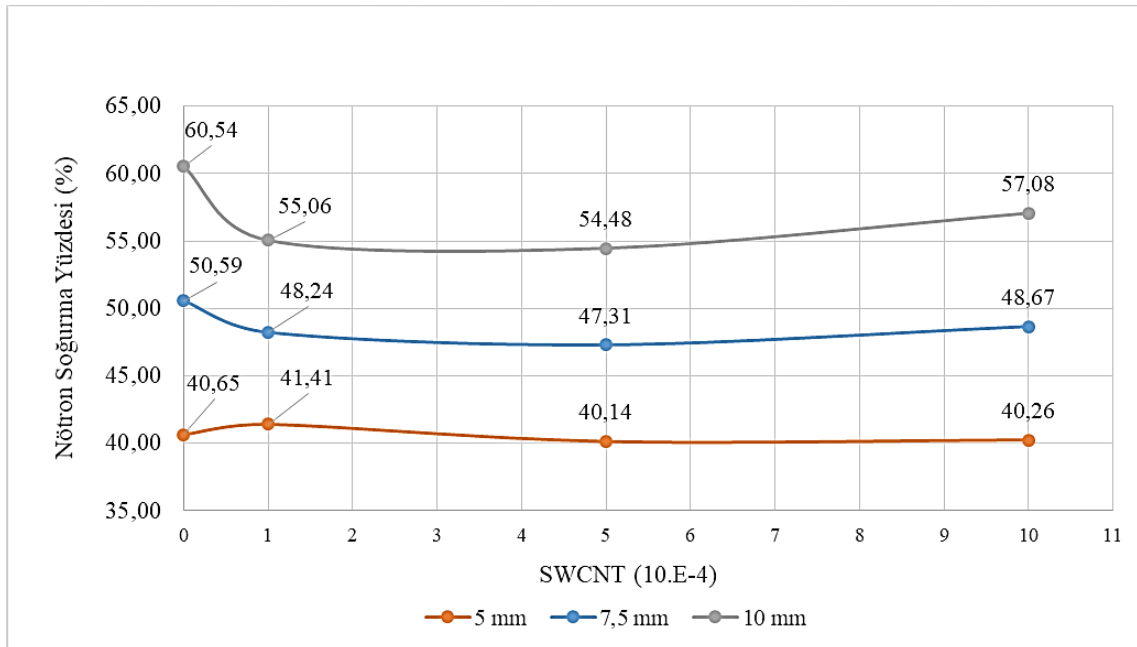


Şekil 4. 26. BC-1 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.

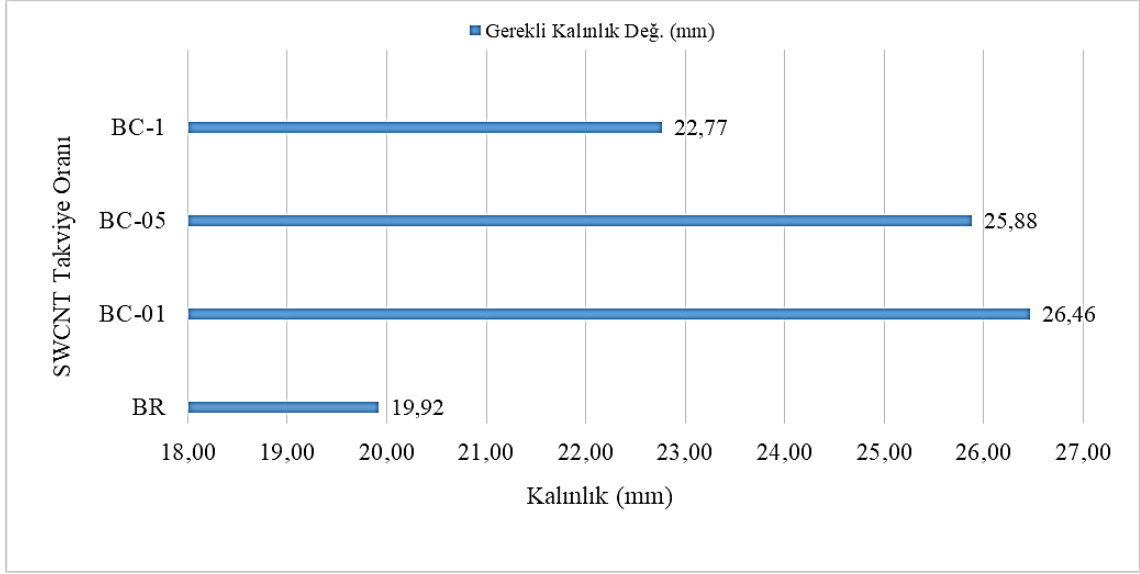
Barit dolgulu numunelerin nötron soğurma yüzdelerini gösteren grafiklerdeki ilgili denklemler yardımıyla tüm numunelerin zırhlama performanslarının ve CNT takviyesinin etkisini görebilmek adına her bir numune için 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm kalınlık değerleri için soğurma yüzdeleri teorik olarak hesaplanarak sonuçlar ve karşılaştırma Çizelge 4.14 ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin %100 soğurma için gerekli malzeme kalınlıkları da teorik olarak hesaplanmış ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri.

| MALZEME GRUBU | Denklem Sabitleri | | Kalınlık (mm) | Soğurma Yüzdesi (%) |
|---------------|-------------------|--------|---------------|---------------------|
| BR | 3,9782 | 20,756 | 5 | 40,64 |
| | 3,9782 | 20,756 | 7,5 | 50,59 |
| | 3,9782 | 20,756 | 10 | 60,53 |
| BC-01 | 2,7295 | 27,764 | 5 | 41,41 |
| | 2,7295 | 27,764 | 7,5 | 48,23 |
| | 2,7295 | 27,764 | 10 | 55,05 |
| BC-05 | 2,8669 | 25,808 | 5 | 40,14 |
| | 2,8669 | 25,808 | 7,5 | 47,30 |
| | 2,8669 | 25,808 | 10 | 54,47 |
| BC-1 | 3,3625 | 23,45 | 5 | 40,26 |
| | 3,3625 | 23,45 | 7,5 | 48,66 |
| | 3,3625 | 23,45 | 10 | 57,07 |



Şekil 4. 27. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Barit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik.



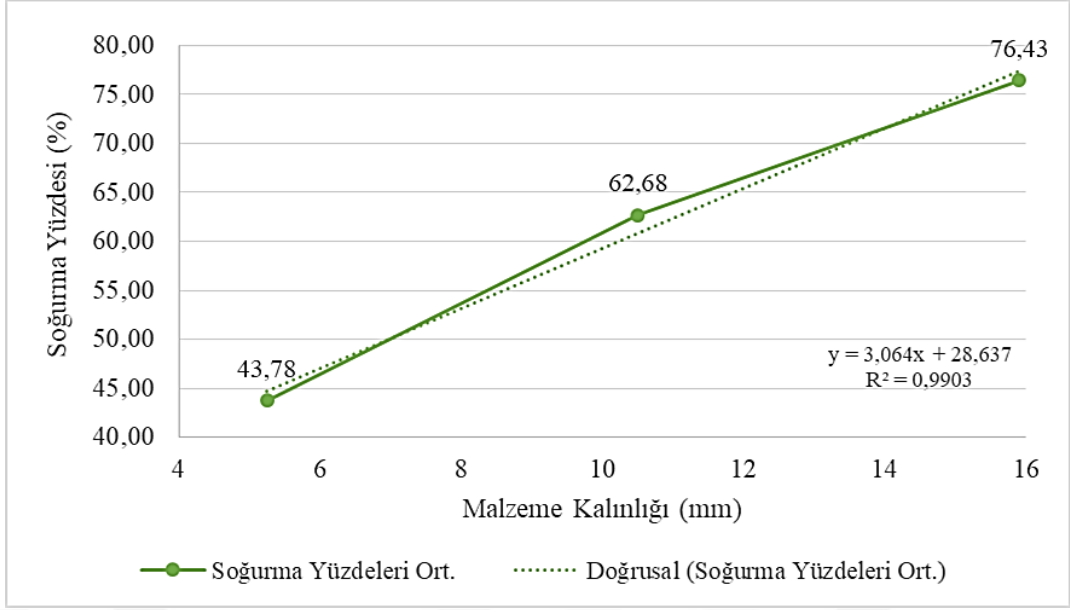
Şekil 4. 28. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Barit grubu malzeme kalınlık değerleri.

➤ Manyetit Grubu Sonuçları

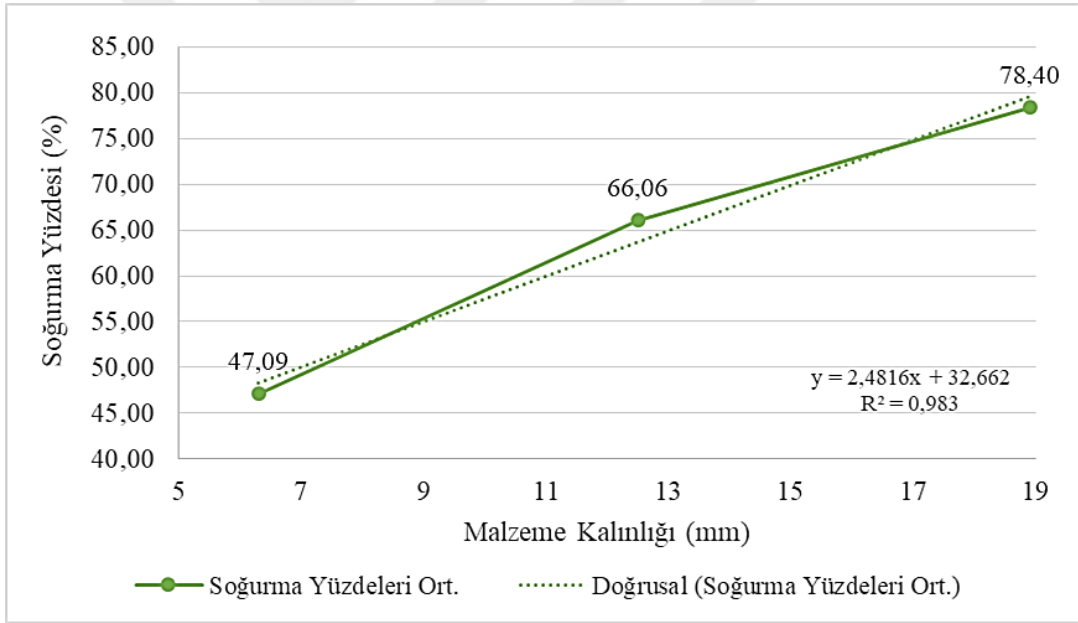
Manyetit dolgulu olarak üretilen numune grubuna yapılan soğurma deneyinin sayım sonuçlarına göre hesaplanan test kalınlığına bağlı soğurma yüzdeleri Çizelge 4.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Manyetit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları.

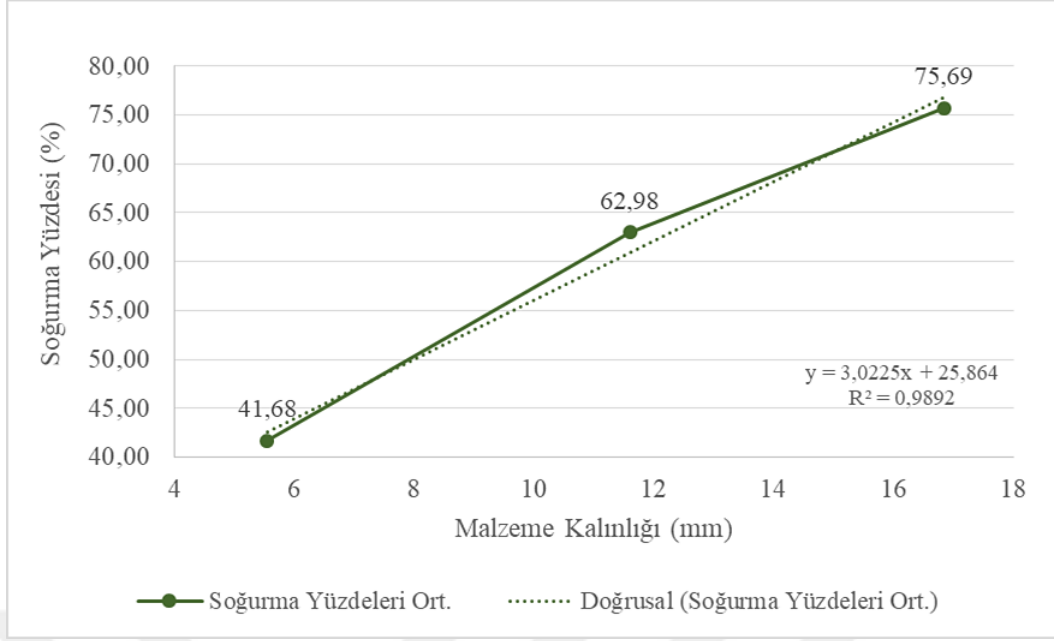
| Numune Tipi | Numune Kalınlığı (mm) | Soğurma Yüzdesi Ort. (%) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| MR | 5,25 | 43,78 |
| | 10,5 | 62,68 |
| | 15,9 | 76,3 |
| MC-01 | 6,3 | 47,09 |
| | 12,5 | 66,06 |
| | 18,9 | 78,40 |
| MC-05 | 5,55 | 41,68 |
| | 11,6 | 62,98 |
| | 16,85 | 75,69 |
| MC-1 | 5,35 | 43,41 |
| | 10,6 | 64,66 |
| | 16,5 | 75,45 |



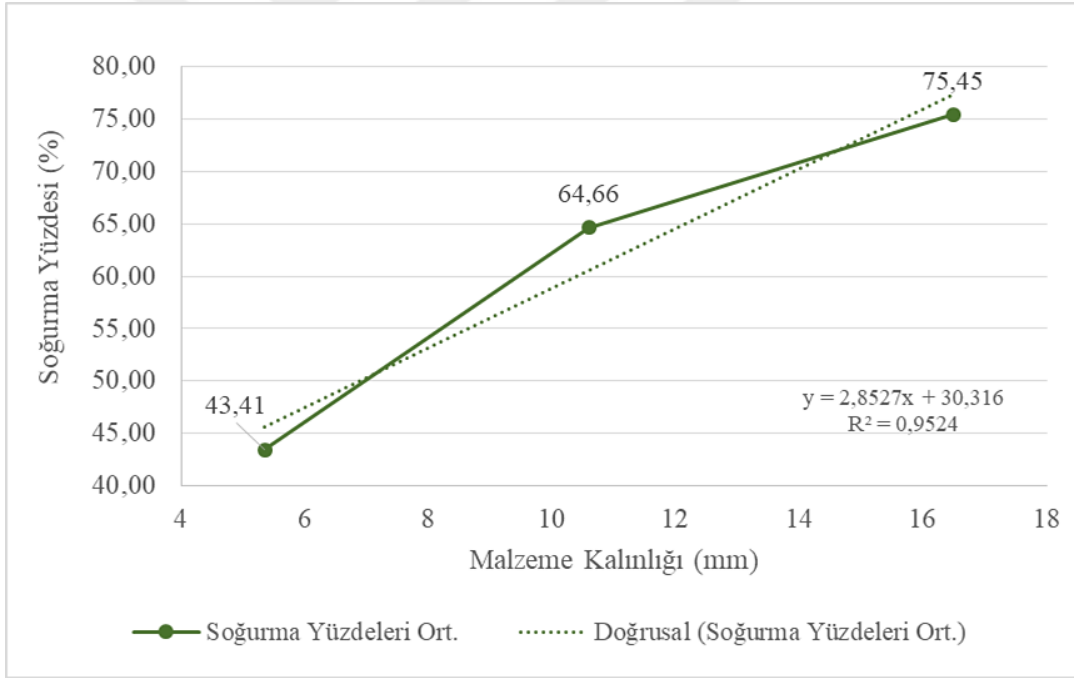
Şekil 4. 29. MR numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 30. MC-01 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.



Şekil 4. 31. MC-05 numunesine ait soğurma yüzdeleri gösteren grafik.



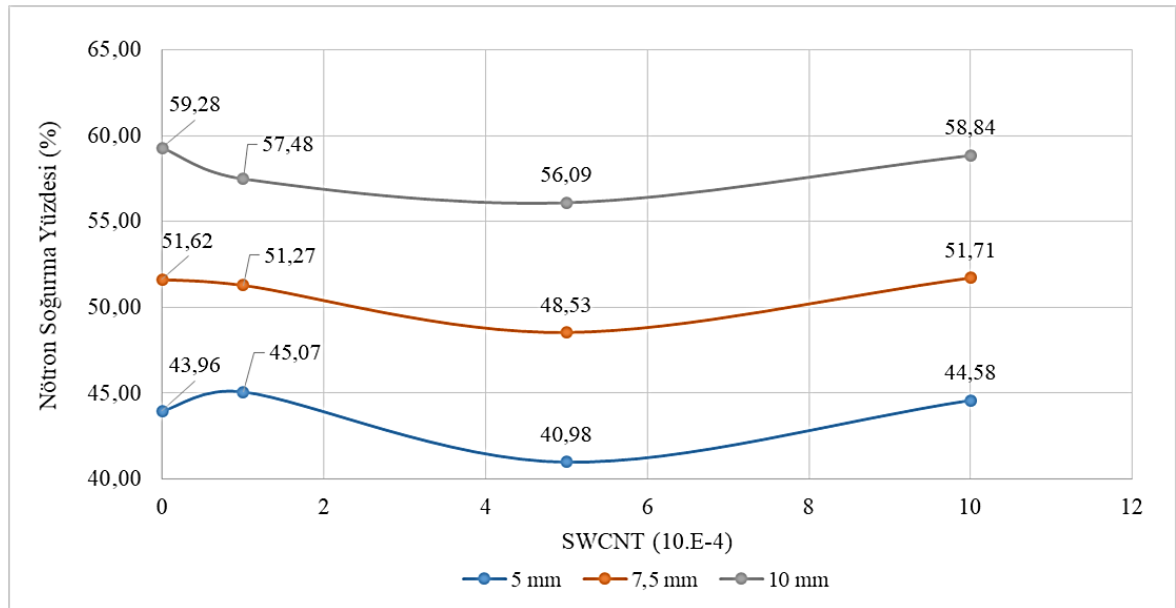
Şekil 4. 32. MC-1 numunesine ait soğurma yüzdeleri gösteren grafik.

Manyetit dolgusu içeren kompozitlerin nötron soğurma yüzdeleri gösteren grafiklerdeki ilgili denklemler yardımıyla tüm numunelerin zırlama performanslarının ve CNT takviyesinin etkisini görebilmek adına her bir numune için 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm kalınlık değerleri için soğurma yüzdeleri teorik olarak hesaplanmış; sonuçlar ve karşılaştırma Çizelge 4.16 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. Ayrıca numunelerin %100

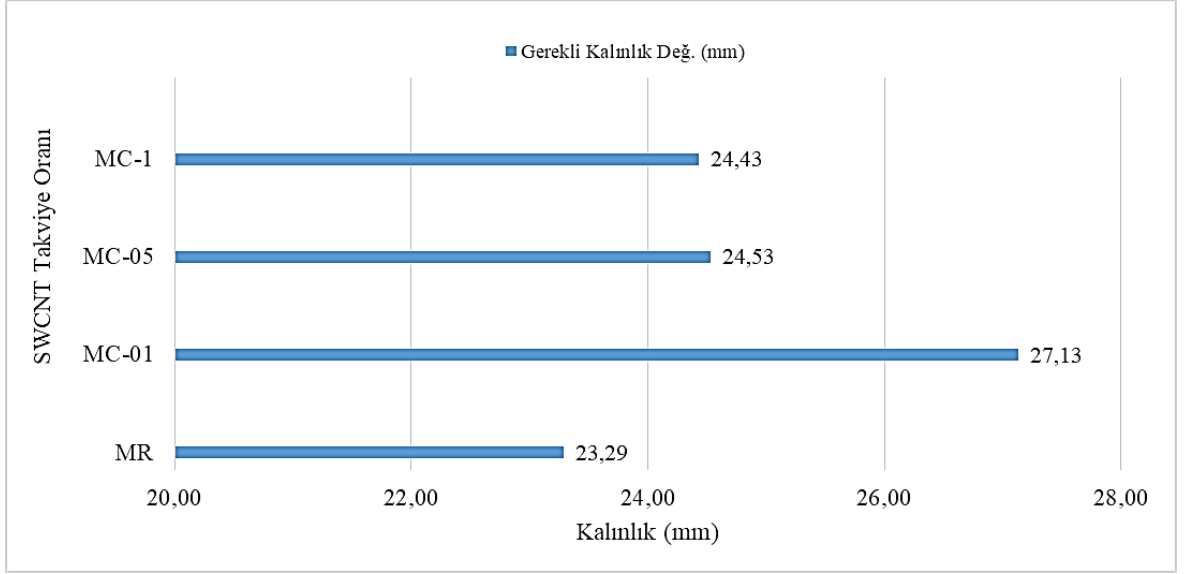
soğurma için gerekli malzeme kalınlıkları da teorik olarak hesaplanmış ve Şekil 4.34'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan CNT grubuna ait soğurma yüzdeleri.

| Malzeme GRUBU | Denklem Sabitleri | | Kalınlık (mm) | Soğurma Yüzdesi (%) |
|---------------|-------------------|--------|---------------|---------------------|
| MR | 3,064 | 28,637 | 5 | 43,95 |
| | 3,064 | 28,637 | 7,5 | 51,61 |
| | 3,064 | 28,637 | 10 | 59,27 |
| MC-01 | 2,4816 | 32,662 | 5 | 45,07 |
| | 2,4816 | 32,662 | 7,5 | 51,27 |
| | 2,4816 | 32,662 | 10 | 57,47 |
| MC-05 | 3,0225 | 25,864 | 5 | 40,97 |
| | 3,0225 | 25,864 | 7,5 | 48,53 |
| | 3,0225 | 25,864 | 10 | 56,08 |
| MC-1 | 2,8527 | 30,316 | 5 | 44,57 |
| | 2,8527 | 30,316 | 7,5 | 51,71 |
| | 2,8527 | 30,316 | 10 | 58,84 |



Şekil 4. 33. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Manyetit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik.



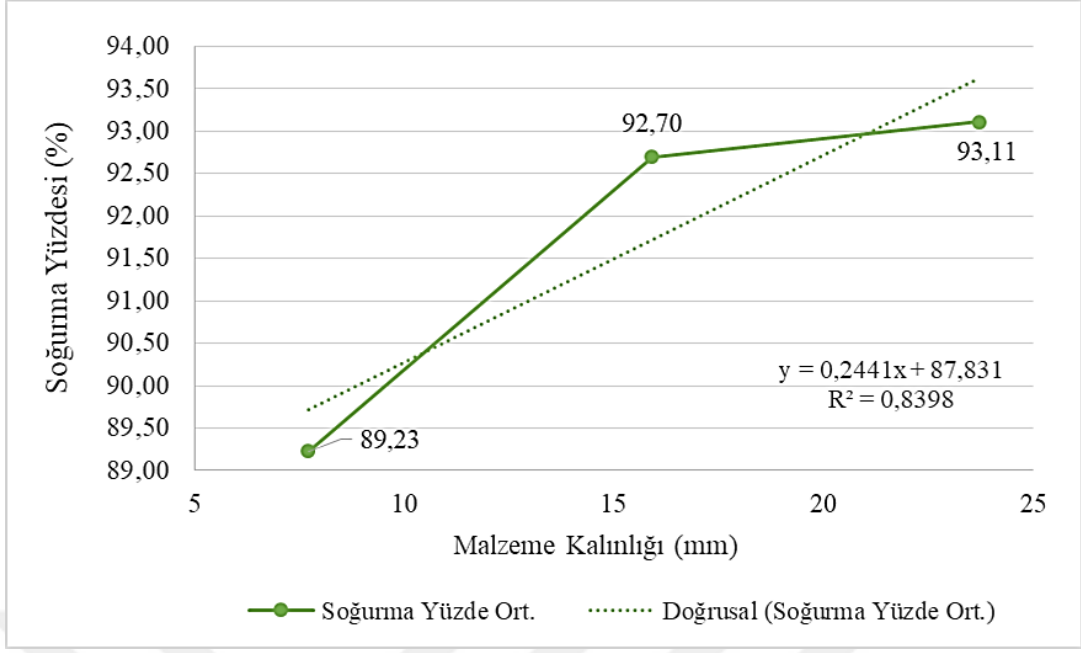
Şekil 4. 34. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Manyetit grubu malzeme kalınlık değerleri.

➔ Kolemanit Grubu Sonuçları

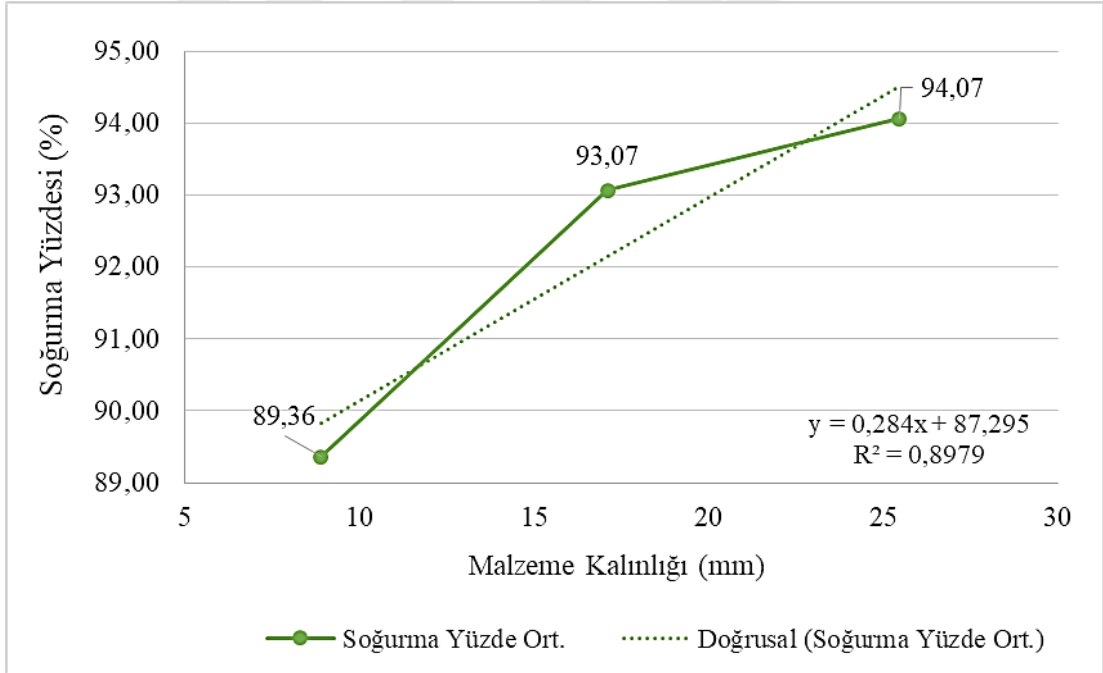
Kolemanit içeren kompozit numune grubuna yapılan soğurma deneyinin sayım sonuçlarına göre hesaplanan test kalınlığına bağlı soğurma yüzdeleri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Kolemanit grubuna ait numune test kalınlığı ve soğurma yüzdesi ortalamaları.

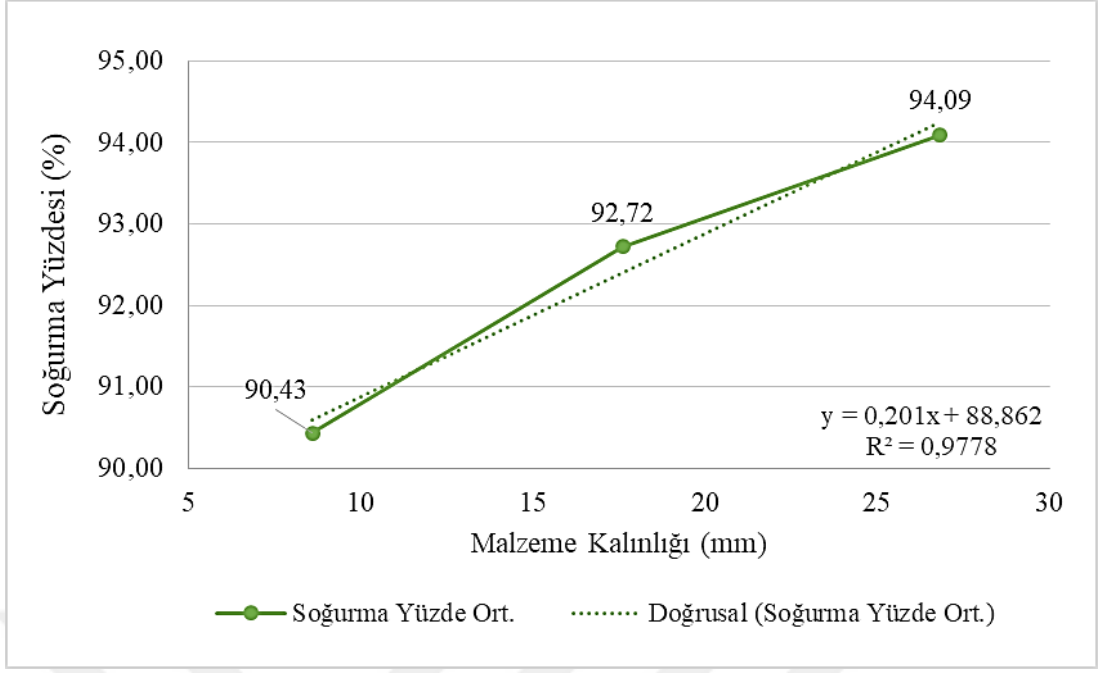
| Numune Tipi | Numune Kalınlığı (mm) | Soğurma Yüzdesi Ort. (%) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| KR | 7,7 | 89,23 |
| | 15,9 | 92,7 |
| | 23,7 | 93,11 |
| KC-01 | 8,9 | 89,36 |
| | 17,1 | 93,07 |
| | 25,45 | 94,07 |
| KC-05 | 8,6 | 90,43 |
| | 17,6 | 92,72 |
| | 26,8 | 94,09 |



Şekil 4. 35. KR numunesine ait soğurma yüzdeleri gösteren grafik.



Şekil 4. 36. KR-01 numunesine ait soğurma yüzdeleri gösteren grafik.

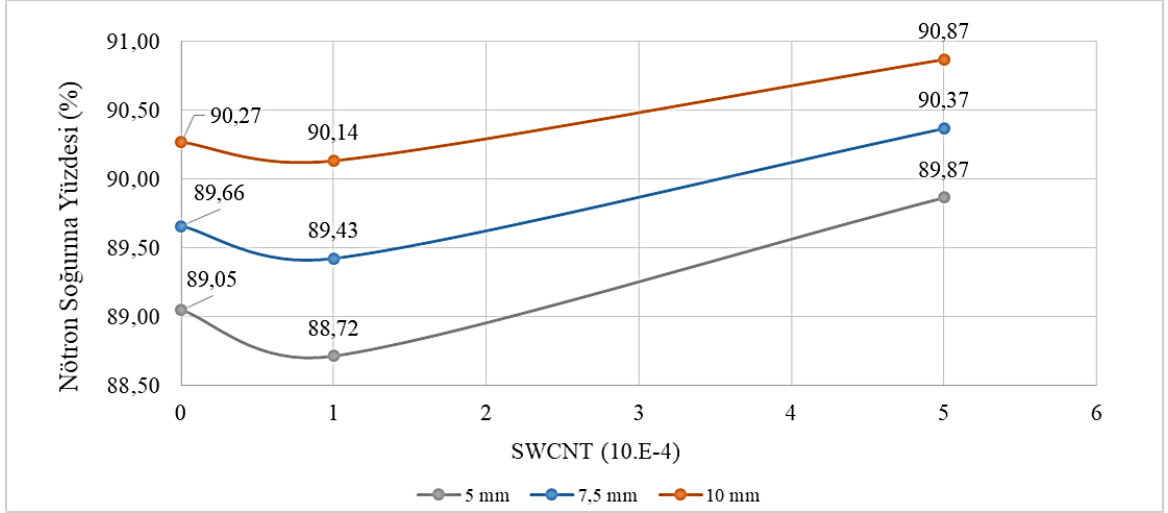


Şekil 4. 37. KR-05 numunesine ait soğurma yüzdelerini gösteren grafik.

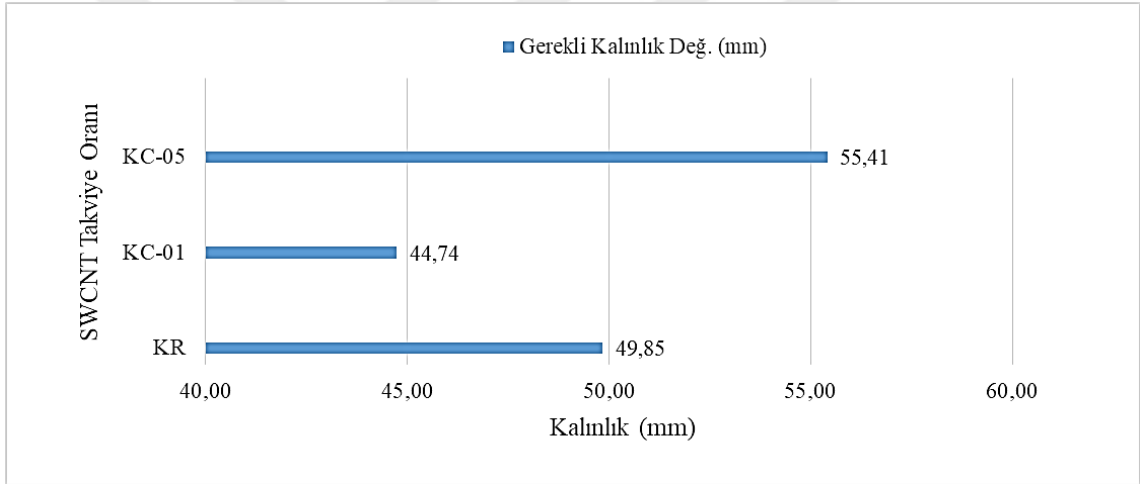
Kolemanit dolgulu kompozitlerin nötron soğurma yüzdelerini gösteren grafiklerdeki ilgili denklemler yardımıyla tüm numunelerin zırhlama performanslarının ve CNT takviyesinin etkisini görebilmek adına her bir numune için 5 mm, 7,5 mm ve 10 mm kalınlık değerleri için soğurma yüzdeleri teorik olarak hesaplanarak sonuçlar ve karşılaştırma Çizelge 4.18 ve Şekil 4.38’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin %100 soğurma için gerekli malzeme kalınlıkları da teorik olarak hesaplanmış ve Şekil 4.39’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan kolemanit grubuna ait soğurma yüzdeleri.

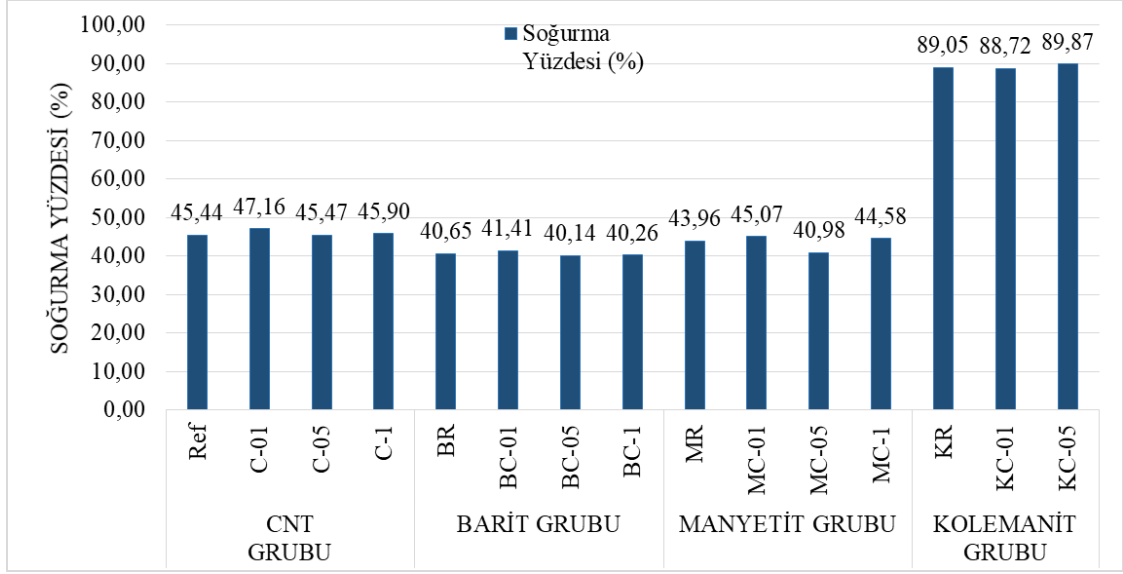
| Malzeme Grubu | Denklem Sabitleri | | Kalınlık (mm) | Soğurma Yüzdesi (%) |
|---------------|-------------------|--------|---------------|---------------------|
| KR | 0,2441 | 87,831 | 5 | 89,05 |
| | 0,2441 | 87,831 | 7,5 | 89,66 |
| | 0,2441 | 87,831 | 10 | 90,27 |
| KC-01 | 0,284 | 87,295 | 5 | 88,72 |
| | 0,284 | 87,295 | 7,5 | 89,43 |
| | 0,284 | 87,295 | 10 | 90,14 |
| KC-05 | 0,201 | 88,862 | 5 | 89,87 |
| | 0,201 | 88,862 | 7,5 | 90,37 |
| | 0,201 | 88,862 | 10 | 90,87 |



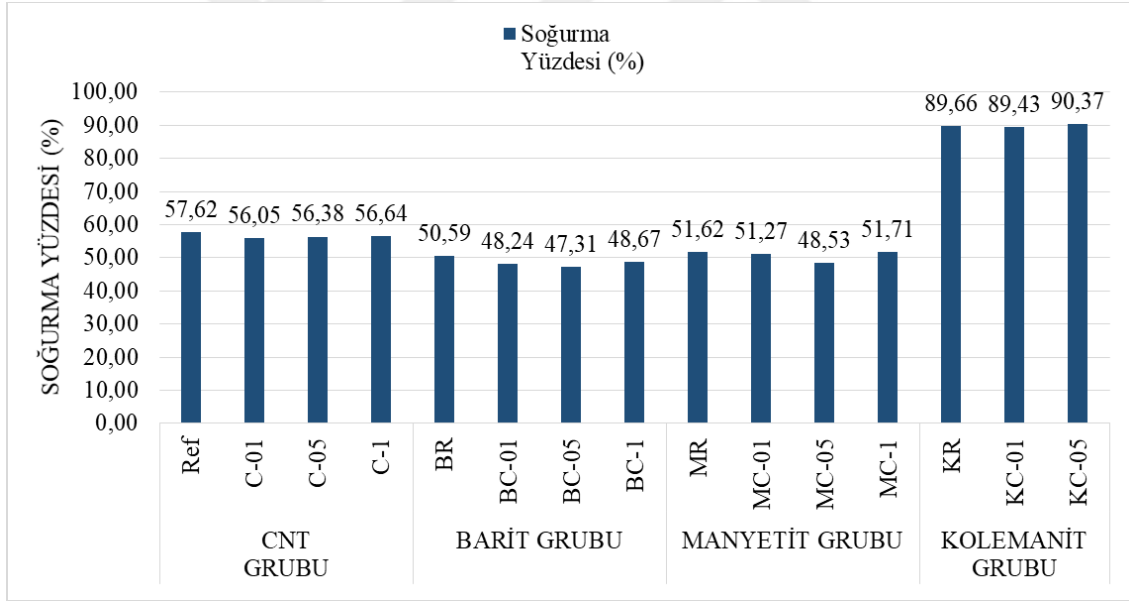
Şekil 4. 38. Belirli kalınlık değerleri için hesaplanan Kolemanit grubuna ait soğurma yüzdeleri ile farklı SWCNT oranlarının ilişkisini gösteren grafik.



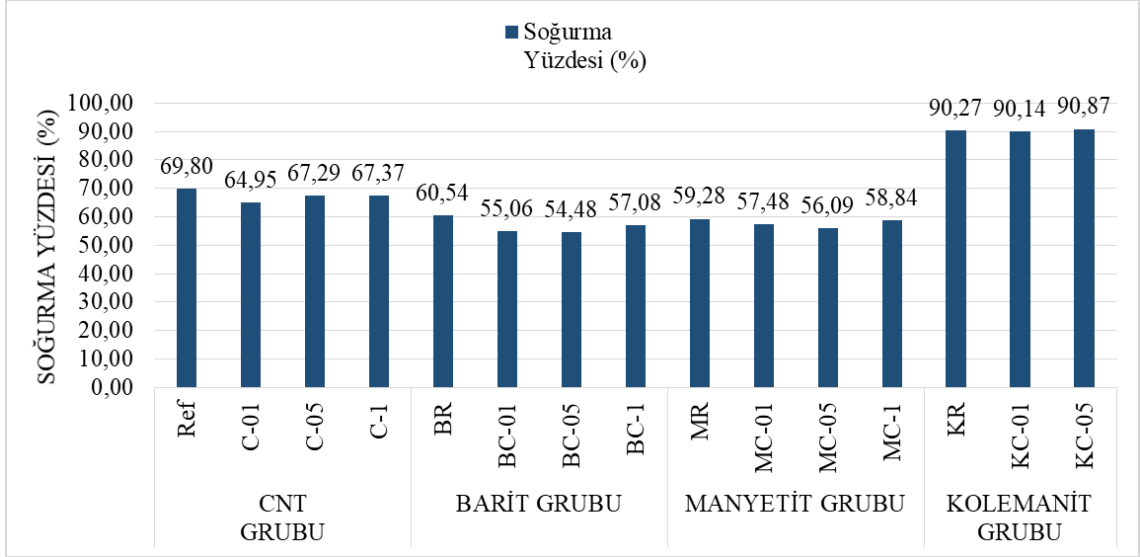
Şekil 4. 39. Teorik olarak hesaplanan %100 soğurma için gerekli Kolemanit grubu malzeme kalınlık değerleri.



Şekil 4. 40. 5 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı.



Şekil 4. 41. 7,5 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı.



Şekil 4. 42. 10 mm kalınlık değeri için teorik olarak hesaplanan tüm deney numunelerinin gösterdiği zırlama performansı.

Kompozit plakaların radyasyon zırlama performanslarının tayini için gerçekleştirilen nötron zırlama testlerinde ham plaka kalınlık değerleri arasında en yüksek zırlama performansını %90,43'lük soğurma yüzdesiyle 8,6 mm kalınlığa sahip % 0,05 SWCNT takviyeli, kolemanit dolgu içeren KC-05 numunesi; en düşük zırlama performansı ise %36,87'lik soğurma yüzdesiyle 4,65 mm kalınlığa sahip barit dolgulu BR kompoziti göstermiştir.

CNT grubu ölçümlerinde üretilen plakaların ham kalınlık değerleri arasındaki ölçümler dikkate alındığında %0,01 CNT içeren C-01 numunesi %42'lik soğurma yüzdesiyle öne çıksa da, diğer numunelerin zırlama performansları da buna yakın değerler göstermiştir. Örneğin REF numunesinin nötron soğurma performansı %36,97 iken, C-1 numunesinin %38,59, C-05 numunesinin soğurma performansı %40,43 olarak hesaplanmıştır. Ham kalınlıkların 2 ve 3 katmanlı ölçümlerinde ise Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de görüldüğü gibi soğurma performansları kalınlıktaki artışa bağlı olarak doğrusal olarak artmış; bu grubun en yüksek soğurma performansı ise %72,59'luk değeriyle 11,45 mm kalınlığa sahip C-05 numunesinde elde edilmiştir. Barit grubu kompozitlerinin ham kalınlık değerleri baz alınarak yapılan ölçüm değerlendirmesine göre; 5,9 mm kalınlığa sahip BC-01 numunesinin %43,3'lük soğurma performansı ile en yüksek değeri sağladığı görülmektedir. Numunelerin arka arkaya konularak kalınlıklarının artırıldığı ve deney düzeneğine yerleştirildiği diğer ölçüm sonuçlarına göre ise %75,76'lık soğurma yüzdesiyle grubun en yüksek performansı bu kez 17,8 mm kalınlığa sahip BC-01

numunesinde tespit edilmiştir. 3 aynı tip numunenin arka arkaya koyulmasıyla elde edilen bu kalınlık değeri barit grubunda yapılan testlerde ölçülen en yüksek kalınlık değeridir. 3 numuneli kalınlık değerlerinde ölçülen soğurma yüzdelerinde en büyük fark %4,45 olarak tespit edilmiştir (BC-01 %75,76 ve BC-05 %71,31). Soğurma testlerinin yapıldığı diğer bir grup olan manyetit dolgulu numunelerde ise ham plaka kalınlıkları arasında en yüksek soğurma yüzdesine sahip kompozitin, %47,09 zırhlama performansı ile 6,3 mm kalınlığa sahip MC-01 plakasının olduğu görülmüştür. Kalınlık değerleri artırılarak yapılan manyetit grubu numunelerinin ölçüm sonuçlarına göre en yüksek zırhlama performansının %78,40 oranıyla yine MC-01 plakasının gösterdiği ve deney numunesinin kalınlığının da 18,9 mm olarak ölçüldüğü görülmüştür. Kolemanit grubu numunelerine yapılan testlerde ise çarpıcı sonuçlar elde edilmiştir. Kolemanit dolgulu numunelerin ve 3'er kalınlık değeri oluşturularak yapılan testlerin sonuçlarına göre tüm numunelerin %89'un üzerinde soğurma yüzdelerine sahip oldukları görülmüştür. Ham plaka kalınlığında yapılan testlerde en yüksek performansı %90,43'lük soğurma yüzdesiyle 8,6 mm kalınlığa sahip olan KC-05 numunesi göstermiştir.

Dolgunsuz CNT grubu ile barit ve manyetit grubu sonuçları incelendiğinde bu grupların %0,01 SWCNT içeren numunelerinin grup içerisinde hem plaka kalınlığında hem de 3'er numuneli ölçümlerinde en yüksek soğurma performanslarını gösterdikleri tespit edilmiştir. Tüm grupların ölçüm sonuçları ile oluşturulan soğurma yüzdesi grafiklerinden elde edilen denklemler ışığında, numunelerin belirli kalınlık değerleri (5mm, 7,5 mm ve 10 mm) için gösterdikleri soğurma performansları da teorik olarak hesaplanarak Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'deki sütun grafikleri oluşturulmuştur. Anılan grafikler incelendiğinde CNT, Barit ve Manyetit gruplarında kalınlığa bağlı olarak soğurma yüzdelerinde belirgin artışların olduğu, ancak kolemanit grubu numunelerinde kalınlığa bağlı soğurma yüzdelerindeki artışın %1'in altında olduğu görülmektedir. Teorik olarak incelenen diğer bir parametre ise ilgili denklemler yardımıyla hesaplanan %100 soğurma için gerekli malzeme kalınlığının hesaplandığı grafiklerdir. Şekil 4.22, Şekil 4.28, Şekil 4.34 ve 4.39'deki veriler incelendiğinde tam soğurma için gerekli minimum teorik kalınlık değerleri CNT grubu REF numunesi için 16,7 mm, barit grubunda BR numunesi için 19,92 mm, manyetit grubu MR numunesi için 23,29 mm ve kolemanit grubu KC-01 numunesi için de 44,74 mm olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında iyonize radyasyonların zırhlanması amacıyla polimer matrisli kompozit plakalar üretilmiştir. Tüm çeşitlerinde matris fazını polyeşter reşinenin, takviye fazını da düz dokuma camelyafın oluşturduğu kompozit plakalarda nanomalzeme olarak %0,01-0,05 ve 0,1 oranlarında SWCNT, dolgu malzemesi olarak da %50 oranında barit, manyetit ve kolemanit mineralleri kullanılmıştır. Ayrıca bu plakaların referans numunelerinin üretildiği çalışma kapsamında toplam 15 çeşit kompozit plaka, el yatırması yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit plakaların üretiminden hemen önce tüm matrislere viskozite ölçümleri yapılmış, daha sonra üretilen plakalardan gerekli numuneler hassas şekilde kesilerek çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı testleri yapılmış, termal iletkenlik katsayıları belirlendikten sonra SEM görüntüleri incelenmiştir. Daha sonra numunelerin ⁶⁰Co kaynağıyla gama, 4-5 MeV enerjili nötron parçacıklarına karşı ise nötron geçirgenlik testleri yapılmıştır. Yapılan tüm deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre;

- ➔ CNT grubu numunelerinin diğer gruplara göre viskozite değerlerinin daha düşük olduğu, reşinelere SWCNT ilavesinin tüm gruplarda viskozite değerini arttırdığı ve kullanılan dolgu malzemeleri arasında en düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen (2,42 g/cm³) kolemanit içeren reşinenin en yüksek viskozite değerini (12.200 mPa.s) gösterdiği,
- ➔ SWCNT ilavesinin numunelerin çekme dayanımı değerlerinde farklı gruplar için farklı etkiler gösterdiği, barit grubunda artan SWCNT yüzdesinin numunelerin çekme dayanımını doğrusal olarak düşürdüğu, en düşük çekme dayanımının 143,6 MPa'lık değerıyla %0,01 SWCNT katkılı manyetit dolgulu MC-01 numunesinde elde edilmesine karşın en yüksek çekme dayanımının 457,4 MPa'lık değerıyla %0,1 SWCNT takviyeli C-1 numunesinde elde edildiği ve CNT grubu numunelerinin çekme dayanımlarının dolgu içeren numuneler göre oldukça yüksek değerler gösterdiği,
- ➔ Numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde grup bazında en yüksek sonuçların CNT grubunda alındığı, tüm numuneler arasında %0,05 SWCNT katkılı C-05

numunesinin 366,6 MPa'lık değerle en yüksek; %0,05 SWCNT katlı BC-05 numunesinin 99,4 MPa'lık değerle en düşük eğilme dayanımına sahip olduğu ancak buna karşın CNT katlısı ile deney sonuçları arasında anlamlı bir ilişkinin kurulamadığı,

- ➔ Darbe dayanımı değerlerinin karşılaştırıldığında en yüksek değeri 22,8 j/cm² ile barit dolgulu referans numunesinin (BR), en düşük değeri ise 10,4 j/cm² ile %0,1 SWCNT katlı manyetit numunesinin (MC-1) gösterdiği, CNT ve Barit grubu için SWCNT ilavesinin başlangıç darbe dayanımı değerlerini düşürmesine rağmen kademeli olarak artırdığı ancak manyetit grubunda ise belirgin değişikliğe sebep olmadığı,
- ➔ CNT grubu numunelerin termal iletkenlik katsayılarının 0,36-0,5 W/m.K değerleri arasında değiştiği ve bu grubun tüm gruplar arasında en düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olduğu, en yüksek termal iletkenlik katsayısının 0,9 W/m.K değeri ile %0,01 SWCNT içeren MC-01 numunesinde ölçüldüğü, kolemanit dolgulu kompozitlerin ise 0,7 W/m.K mertebesinde ölçüldüğü,
- ➔ SEM görüntüleri incelendiğinde dolgu malzemelerinin reçine içerisinde homojen dağılım gösterdiği, dolgu içeren kompozitler arasında en iyi arayüzün barit dolgulu numunelerde görüldüğü, tüm numuneler arasında yapılan değerlendirmelere göre homojen dağılımın ve matris-takviye arayüzünün en başarılı olduğu numunenin ise REF numunesi olduğu,
- ➔ Gama kaynağında yapılan geçirgenlik testleri incelendiğinde grup bazında lineer zayıflatma katsayısı en yüksek ölçülen grubun 0,083-0,085 cm⁻¹ arasında değişen değerlerle Manyetit Grubuna ait olmasına rağmen tüm numuneler arasında en yüksek zayıflatma katsayısının 0,101 cm⁻¹'lik değerle %0,1 SWCNT katlı barit dolgulu BC-1 numunesinde ölçüldüğü, en düşük zayıflatma performansının ise 0,04-0,061 cm⁻¹ arasında değişen değerlerle dolgusuz CNT grubunda ölçüldüğü görülmüştür. CNT ve Barit grubunda %0,01 SWCNT katlısının numunelerin zayıflatma performanslarını bir miktar düşürmesine rağmen artan (%0,05 ve %0,1) SWCNT takviyesiyle beraber zayıflatma performanslarının doğrusal olarak arttığı ve en fazla %27 olarak gerçekleştiği, Manyetit ve Kolemanit grubu için SWCNT takviyesinin anlamlı bir etkisinin olmadığı,

- Nötron radyasyonlarına karşı soğurma performansı en yüksek olan grubun kolemanit dolgu içeren grup olduğu ve minimum soğurma yüzdelерinin %89,23 olduğu, kalınlığa bağılı radyasyon soğurma yüzdesindeki artışın CNT, Barit ve Manyetit grubunda belirgin olarak gerçekleştiğı (CNT grubu; ortalama 3,91 mm kalınlıkta %39,5 iken 11,41 mm kalınlıkta %71 soğurma, Barit grubu; ortalama 5,16 mm kalınlıkta %39,14 iken 15,7 mm kalınlıkta %72,85 soğurma, Manyetit grubu; ortalama 5,61 mm kalınlıkta %43,4 iken 17 mm kalınlıkta 76,46 soğurma), CNT ilavesinin etkisini görebilmek adına teorik olarak belirli kalınlık değerlerine göre hesaplanan soğurma yüzdelерinde anlamlı etkinin (artış) sadece kolemanit dolgulu numunelerde ancak düşük yüzdelerde gerçekleştiğı görülmüştür.

Yapılan test sonuçları göz önüne alındığında verilerin genellikle birbirini destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Örneğın viskozite ölçümlerinde en düşük viskozite değerine sahip olan CNT grubu numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde matris-takviye arayüzünün çok iyi görüldüğü anlaşılmış, yine aynı grup numunelerinin çekme, eğilme ve darbe dayanımı değerlerinin diğер gruplara göre çok daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Buna karşın viskozite ölçümlerinde KR numunesinden sonra en yüksek viskozite değerleri gösteren manyetit dolgulu numunelerin, yapılan çekme ve darbe dayanımı testlerinde en düşük performansları gösterdikleri görülmüştür.

Radyasyon zırlama özelliğine sahip polimer kompozit üretilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda nötron parçacıklarına karşı tüm numunelerde %70,29 ile %94,09 arasında değışen oranlarda soğurma performansları deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen soğurma yüzdelерinin yanı sıra asıl avantajın kalınlık değerleri olduğu görülmektedir. Öyle ki %70,29 soğurma yüzdesi gösteren numunenin kalınlığı 1,05 cm, %94,09 soğurma yüzdesi gösteren numunenin kalınlığı ise yalnızca 2,68 cm olarak ölçülmüştür. Gama ışınlarını onda bir şiddetine düşürmek gerekli minimum kalınlığın (TVL) 22,82 cm olduğu hesaplanmıştır. Numunelerin gama ışınlarına karşı performansları literatürdeki diğер çalışmalara benzer sonuçlar göstermiştir.

İyonize radyasyonların türüne, çeşidine ve şiddetine bağılı olarak radyasyon zırlama malzemesinin tasarım parametreleri değışkenlik göstermektedir. Gelecek çalışmalarda mevcut çalışma ve üretim optimizasyonları geliştirilip numunelerin x- ışınlarına karşı soğurma performanslarının da araştırılarak bulguların karşılaştırılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Anonim. (2021, 26 Mayıs). *Radyasyon ve Biz* [Online] Erişim: https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/bolum4_04.html
- [2] J.Ford, *Radiation, People And The Environment*, 1. baskı, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, Division of Public Information, 2004, ss.6-17.
- [3] Anonim. (2021, 15 Eylül). *Radyasyon* [Online] Erişim: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Radyasyon>
- [4] M.C. Yerlikan, "Elementlerin kristal yapılarının nötron zırhlama üzerine etkilerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2013.
- [5] H. Gülbiçim, "Saf ve bor katkılı vermikülit'in gama radyasyon geçirgenliğinin belirlenmesi", Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2015.
- [6] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, New York, USA: John Wiley and Sons Ltd, 1979.
- [7] A. Canel, "Güncel nükleer uygulamalara yönelik yeni nesil epoksi tabanlı nötron zırhlarının geliştirmesi", Yüksek lisans tezi, Disiplinlerarası Nükleer Enerji Ve Nükleer Enerji Sistemleri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sinop Üniversitesi, Sinop, Türkiye, 2018.
- [8] A. Kaçar, "Yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi", Yüksek lisans tezi, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2006.
- [9] K. S. Krane, *Nuclear Physics*, 2. baskı, Toronto, Canada: John Wiley and Sons

Ltd, 1998, böl. 12, ss. 444-451.

- [10] J. E. Martin, *Physics for Radiation Protection*, 2.baskı, Weinheim, Federal Republic of Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2013, ss. 307-606.
- [11] T. Korkut, “Deneysel ve Cern Fluka Monte Carlo simülasyon kodu yöntemleri kullanılarak 4,5 MeV enerjili hızlı nötronların borlu bileşik ve cevherler tarafından yavaşlatılmasına ilişkin parametrelerin belirlenmesi”, Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2010.
- [12] S. Cebesoy. (2021, 2 Şubat). *Radyasyon Aktivitesi Birimleri* [Online]. Erişim: [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25556/mod_resource/content/0/4.pdf#:~:text=bozunma%20miktar%C4%B1d%C4%B1r.Radyasyon%20aktivitesinin%20birimleri,%2C%20Curie%20eski%20birim'dir.&text=g%C3%B6steren%20maddenin%20aktivitesidir.&text=Bequerel\(Bq\)%3A%20Bir%20saniyede,say%C4%B1s%C4%B1d%C4%B1r\(s%2D1\)](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25556/mod_resource/content/0/4.pdf#:~:text=bozunma%20miktar%C4%B1d%C4%B1r.Radyasyon%20aktivitesinin%20birimleri,%2C%20Curie%20eski%20birim'dir.&text=g%C3%B6steren%20maddenin%20aktivitesidir.&text=Bequerel(Bq)%3A%20Bir%20saniyede,say%C4%B1s%C4%B1d%C4%B1r(s%2D1))
- [13] A. M. Sürücü ve S. Subaşı, “Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 8, sayı. 1, ss. 182-194, 2021.
- [14] E. E. Belgin, “Elektromanyetik radyasyon zırhlama uygulamaları için farklı metal tuz takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi”, Doktora tezi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye, 2017.
- [15] Anonim. (2021, 22 Mart). *Kurşun* [Online]. Erişim: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kursun>
- [16] *Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk*, Türk Standartları Enstitüsü TS 206+A2, 2021.
- [17] M. Maraşlı, “Cam lifli takviyeli betonlarda olgunluk indeksi yöntemi ile eğilme ve basınç dayanımlarının tahmin modelinin geliştirilmesi”, Yüksek lisans tezi, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.

- [18] V. Özdal, “Karma puzolanların kullanıldığı yüksek performanslı nano beton üretimi” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [19] Anonim. (2021, 22 Mart). *Kolemanit* [Online]. Erişim: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kolemanit>
- [20] B. Oto, “Barit, manyetit, bazı bor mineralleri ve atıklarını içeren beton numunelerinin gama radyasyon soğurganlıkları ve nötron tutma kapasitelerinin araştırılması”, Doktora tezi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye, 2012.
- [21] Anonim. (2021, 17 Mart). *Türkiye'de Bor* [Online]. Erişim: <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor>
- [22] Anonim. (2021, 22 Mart). *Manyetit* [Online]. Erişim: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/manyet>
- [23] Anonim. (2021, 22 Mart). *Barit* [Online]. Erişim: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/barit>
- [24] S. Subaşı, Kompozit Malzemeler, *Ders Notları*, Düzce, 2015.
- [25] W. D. Callister ve D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 8.baskı, Versailles, USA: John Wiley and Sons Ltd, 2010, ss. 358-765.
- [26] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon”, *Nature*, c. 354, ss. 56–58, 1991.
- [27] V. Harish, N. Nagaiah, T. N. Prabhu, ve K. T. Varughese, “Thermo-mechanical analysis of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composite radiation shields,” *Journal of Applied Polymer Science*, c. 117, sayı 6, ss. 3623–3629, 2010.
- [28] Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast), *European Parliament and of the Council*, Sayı: 2011/65/EU, 8 Haziran 2011.

- [29] W. Huang, W. Yang, Q. Ma, J. Wu, J. Fan, ve K. Zhang, "Preparation and characterization of γ -ray radiation shielding PbWO₄/EPDM composite," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, c. 309, sayı 3, ss. 1097–1103, 2016.
- [30] K. Bagheri, S. M. Razavi, S. J. Ahmadi, M. Kosari, ve H. Abolghasemi, "Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated polyester/nanoclay/PbO composites," *Radiation Physics and Chemistry*, c. 146, sayı 2017, ss. 5–10, 2018.
- [31] N. A. Galehdari, V. Mani, ve A. D. Kelkar, "Fabrication of Nanoengineered Radiation Shielding Multifunctional Polymeric Sandwich Composites," *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, c. 10, sayı 3, ss. 316–319, 2016.
- [32] B. Büyük ve B. A. Tuğrul, "Investigation on the Behaviours of TiB₂ Reinforced B₄C-SiC Composites Against Co-60 Gamma Radioisotope Source," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 21, sayı 1, ss. 24–29, 2015.
- [33] S. Aydın ve T. Tuna, "Nötron Radyasyonu Zırhlama Malzemesi Olarak Polyester Matrisli Vermikülit Takviyeli Numune Hazırlanması ve Zırhlama Kabiliyetinin Araştırılması," yayımlanmamış rapor.
- [34] T. Bel, C. Arslan, ve N. Baydoğan, "Radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate) / colemanite composite for the use in mixed irradiation fields of neutrons and gamma rays," *Material Chemistry and Physics*, c. 221, sayı. September 2018, ss. 58–67, 2019.
- [35] A. Çalık, H. Akyıldırım, ve İ. Akkurt, "Borun radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, ss. 1–2, Karabük, 2009.
- [36] O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, ve M. Filiz, "An investigation on the concrete properties containing colemanite," *International Journal of Physical Science.*, c. 5, sayı. 3, ss. 216–225, 2010.
- [37] K. Okuno, "Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin," *Radiation Protection Dosimetry*, c. 115, sayı 1–4, ss. 258–261, 2005.

- [38] F. Demir, G. Budak, R. Sahin, A. Karabulut, M. Oltulu, ve A. Un, “Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV γ -rays,” *Annals of Nuclear Energy*, c. 38, sayı 6, ss. 1274–1278, 2011.
- [39] Ş. Kılınçarslan, C. Başığit, ve İ. Akkurt, “Barit agregali ağır betonların radyasyon zırhlama amacıyla kullanımının araştırılması,” *Journal of the Faculty Engineering and Architecture Gazi University.*, c. 22, sayı 2, ss. 393–399, 2007.
- [40] M. A. El-Sarraf ve A. El-Sayed Abdo, “Influence of magnetite, ilmenite and boron carbide on radiation attenuation of polyester composites,” *Radiation Physics and Chemistry*, c. 88, ss. 21–26, 2013.
- [41] B. Oto ve A. Gür, “Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate,” *International Journal of Physical Science*, c. 8, sayı 8, ss. 310–314, 2013.
- [42] S. M. Badawy ve A.A. Abd El-Latif, “Synthesis and Characterizations of Magnetite Nanocomposite Films for Radiation Shielding,” *Polymers and Polymer Composites*, c. 38, sayı 5, ss. 974–980, 2015.
- [43] S. A. Hashemi, S. M. Mousavi, R. Faghihi, M. Arjmand, S. Sina, ve A. M. Amani, “Lead oxide-decorated graphene oxide/epoxy composite towards X-Ray radiation shielding,” *Radiation Physics and Chemistry*, c. 146, sayı July 2017, ss. 77–85, 2018.
- [44] R. Pastore, D. Micheli, M. Marchetti, ve E. Angelini, “X-Ray Attenuation Properties of Carbon Nanotubes Filled Composite Materials,” in *IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, ss. 619–623, 2016.
- [45] Y. Zeng, X. Luo, K. Yu, ve K. Qian, “EMI shielding performance of phenolic-based carbon foam modified with GO/SiO₂ hybrid nanomaterials,” *Chemical Physics Letters*, c. 715, sayı September 2018, ss. 166–172, 2019.
- [46] Z. Li, S. Nambiar, W. Zheng, ve J. T. W. Yeow, “PDMS/single-walled carbon nanotube composite for proton radiation shielding in space applications,” *Materials Letters*, c. 108, ss. 79–83, 2013.

- [47] N. Joseph, C. Janardhanan, ve M. T. Sebastian, “Electromagnetic interference shielding properties of butyl rubber-single walled carbon nanotube composites,” *Composites Science and Technology*, c. 101, ss. 139–144, 2014.
- [48] R. Li, Y. Gu, G. Zhang, Z. Yang, M. Li, ve Z. Zhang, “Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide,” *Composites Science and Technology*, c. 143, ss. 67–74, 2017.
- [49] M. R. Ambika, “Preparation and characterisation of Isophthalic-Bi₂O₃ polymer composite gamma radiation shields,” *Radiation Physics and Chemistry*, c. 130, sayı August 2016, ss. 351–358, 2017.
- [50] H. M. Soylu, “Radyasyon Zırhlanmasında Polimer-Tungsten Bileşik Kompozitlerin Etkinliğinin Test Edilmesi,” Yüksek lisans tezi, Biyomedikal Teknolojiler Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2014.
- [51] Yusuf Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2006, böl. 2, ss. 62-71.
- [52] *Plastikler- Doymamış poliester reçineler- 25 c’da jelleşme süresinin ölçülmesi*, TS EN ISO 2535, 2006.
- [53] *Plastikler - Sıvı halde veya emülsiyon veya dispersiyon halinde reçineler - Tek silindir tipli bir döner viskometre yöntemiyle görünür viskozitenin belirlenmesi*, TS EN ISO 2555, 2018.
- [54] *Plâstikler - Çekme özelliklerinin tayini - Bölüm 4: İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları*, TS EN ISO 527-4, 2007.
- [55] *Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Eğilme Özellikleri için Standart Test Yöntemi*, ASTM D7264 / D7264M-21, 2021.
- [56] *Plastikler - Charpy darbe özelliklerinin tayini-Bölüm 1: Ölçü aletsiz darbe deneyi*, TS EN ISO 179-1, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :ALİ MURAT SÜRÜCÜ

Yabancı Dili :İNGİLİZCE

ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|---------------|-----------------------------------|----------------------|----------------|
| Yüksek Lisans | Kompozit Malzeme Teknolojisi | Düzce ÜNİVERSİTESİ | 2021 |
| Lisans | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Bartın ÜNİVERSİTESİ | 2015 |
| Lise | Sayısal | Düzce Anadolu Lisesi | 2011 |