

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**PARÇACIK DOLGU TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLERİN MEKANİK,
TERMAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE GAMA IŞIMASININ ETKİLERİ**

Zeynep PEKCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yılmaz KISMET

TUNCELİ – 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PARÇACIK DOLGU TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLERİN MEKANİK,
TERMAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE GAMA IŞIMASININ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep PEKCAN

220077112

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yılmaz KISMET

TUNCELİ – 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PARÇACIK DOLGU TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLERİN MEKANİK,
TERMAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE GAMA IŞIMASININ ETKİLERİ**

Zeynep PEKCAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 26 / 03 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

Doç. Dr. Yılmaz KISMET
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza

Doç. Dr. Akar DOĞAN
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

İmza

Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR
(Dokuz Eylül Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

26/03/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin tarafıma ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgi sunumu dahil tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; çalışmanın hiçbir şekilde intihal içermediğini beyan ederim.

İlerleyen herhangi bir zamanda bu beyana aykırı bir durumun tespiti halinde doğabilecek tüm etik ve hukuki sorumlulukları kabul ettiğimi bildiririm.

Öğrenci

Zeynep PEKCAN

Danışman

Doç. Dr. Yılmaz KISMET

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince hem akademik anlamda hem de manevi olarak yanımda olan, katkı ve destekleriyle bu süreci benim için anlamlı ve değerli kılan herkese içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Öncelikle, çalışma sürecim boyunca bilimsel yaklaşımı, değerli görüşleri ve yönlendirici katkılarıyla bana rehberlik eden danışmanım sayın **Doç. Dr. Yılmaz Kısmet'e** akademik anlamda sunduğu tüm destek için saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu süreçte, yalnızca manevi değil aynı zamanda duygusal olarak da en büyük destekçim olan **sevgili eşim Burak Pekcan'a**, sabrına, anlayışına ve tüm koşulsuz desteğine gönülden teşekkür ederim. Onun varlığı, bu yolculuğu benim için daha güçlü ve anlamlı kılmıştır.

Başarı yolculuğumun en sessiz ama en güçlü destekçileri olan aileme; gösterdikleri sabır, anlayış ve sevgiden ötürü gönülden teşekkür ederim. Onların varlığına her zaman minnettarım. Ayrıca bu süreçte yanımda olan, fikir ve moral desteğiyle katkı sağlayan değerli arkadaşlarıma da teşekkür ederim. Varlıkları, çalışma azmimi her zaman yüksek tutmamı sağlamıştır.

Bu çalışma, yalnızca bireysel bir çabanın değil; aynı zamanda değerli insanların desteğiyle büyüyen bir emeğin ürünüdür.

Zeynep PEKCAN

TUNCELİ – 2025

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	II
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
RESİMLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
2. POLİMER MALZEMELER	3
2.1 Polimerlerin Sınıflandırılması	6
2.1.1 Kimyasal yapılarına göre polimerlerin sınıflandırılması	7
2.1.2 Fiziksel özelliklerine göre polimerlerin sınıflandırılması.....	8
2.1.3 Termosetler	8
2.1.4 Elastomerler (Kauçuklar).....	11
2.1.5 Termoplastikler.....	13
3. KOMPOZİT MALZEMELER	19
3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
3.1.1 Matris malzemesine göre sınıflandırma.....	23
3.1.2 Takviye malzemesine göre sınıflandırma	25
3.2 Polimerlerin Özellikleri	27
3.2.1 Mekanik özellikler	27
3.2.2 Termal özellikler.....	28
3.2.3 Morfolojik özellikler.....	28
4. TERMOPLASTİKLER VE GENEL BAKIŞ	29
4.1.1 Genel amaçlı termoplastikler	32
4.1.2 Mühendislik termoplastikleri.....	36
4.1.3 Ticari termoplastikler.....	39
4.1.4 Termoplastik malzemelerin üretim teknikleri.....	40
4.2 Gama Işınması	45
4.2.1 Polimerlerde gama ışımasının etkileri	46
4.2.2 Polimerlerde gama ışıması türleri	47
4.2.3 Polimerlerde gama ışıması uygulamaları.....	48
5. LİTERATÜR TARAMASI	50
6. METARYAL VE METOT	52
6.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Karakterizasyonu	52
6.2 Gama Işınması	55
6.3 Mekanik Testler	55
6.3.1 Çekme mukavemeti testi.....	56
6.3.1 Üç nokta eğilme mukavemeti testi	56
6.4 Termogravimetrik Analiz (TGA)	57
6.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS analizi.....	57
7. BULGULAR	58
7.1 Çekme Mukavemeti Sonuçları	58
7.2 Üç Nokta Eğilme Mukavemeti Sonuçları	73
7.3 Termogravimetrik (TGA) Analiz Sonuçları	86

7.4	Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları (SEM/EDS).....	91
8.	SONUÇLAR	101
9.	KAYNAKLAR	103
	EKLER	



ÖZET

Bu çalışmada, doğal ve sentetik dolgu maddeleriyle takviye edilen termoplastik matrisli kompozit numuneler gama ışımasına maruz bırakıldı ve daha sonra bu numunelerin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerindeki değişimleri araştırıldı. Elde edilen sonuçlar ışıma öncesi mevcut sonuçlar ile mukayese edilerek gama ışımasının matris ve takviye elemanının bağlanma mekanizması üzerindeki etkileri tartışıldı. Kompozitlerde, matris malzemesi olarak farklı yapısal özelliklere sahip alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi yaygın kullanılan termoplastikler tercih edilmiştir. Bu matris malzemelerine, doğal kaynaklı muz lifi, deniz yosunu ve saman ile sentetik kökenli toz boya atıkları farklı oranlarda ilave edilerek önce ekstrüzyon makinasında homojen hale getirilmiş ve daha sonra plastik enjeksiyon makinası ile kalıplanarak standart çekme numuneleri üretilmiştir.

Hazırlanan bu kompozit numuneler, 45 kGy dozunda gama ışınına maruz bırakılmış ve ardından mekanik performanslarını belirlemek üzere çekme ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Termal özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla termogravimetrik analiz (TGA) uygulanmış, yüzey morfolojileri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ile detaylı olarak incelenmiştir.

Yapılan bu kapsamlı analizler sonucunda, hem kullanılan dolgu türünün hem de gama ışını uygulamasının kompozit malzemelerin genel özellikleri üzerinde belirleyici rol oynadığı gözlemlenmiştir. Gama ışını sonrası elde edilen veriler, dolgu türü ile matris arasındaki bağlanma mekanizmalarında, yapısal bütünlükte değişimler meydana geldiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Termoplastikler, doğal dolgular, sentetik dolgular, gama ışıması, mekanik testler, termal analiz, morfolojik analiz

ABSTRACT

Effects of Gamma Radiation on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Particle Filling Reinforced Thermoplastics

In this study, thermoplastic matrix composite specimens reinforced with natural and synthetic fillers were exposed to gamma irradiation, and the changes in their mechanical, thermal, and morphological properties were subsequently investigated. The results obtained after irradiation were compared with the pre-irradiation values, and the effects of gamma rays on the bonding mechanism between the matrix and reinforcement elements were discussed. Commonly used thermoplastics with different structural characteristics such as low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) were selected as matrix materials in the composites. Natural fillers such as banana fiber, seaweed, and straw, as well as synthetic-origin powder coating waste, were added to these matrices in varying proportions. The mixtures were first homogenized using an extrusion machine and then molded into standard tensile specimens using an injection molding machine.

The prepared composite specimens were exposed to gamma radiation at a dose of 45 kGy and then subjected to tensile and flexural tests to assess their mechanical performance. Thermogravimetric analysis (TGA) was conducted to evaluate their thermal properties, while surface morphology was thoroughly examined using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS).

As a result of these comprehensive analyses, it was observed that both the type of filler used and the application of gamma radiation played a decisive role in the overall properties of the composite materials. The post-irradiation data indicated that gamma radiation caused alterations in the bonding mechanisms between the filler and the matrix, as well as in the structural integrity of the composites.

Keywords: Thermoplastics, natural fillers, synthetic fillers, gamma irradiation, mechanical tests, thermal analysis, morphological analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Propilen monomeri ve polipropilen (Ekşi, 2007).....	5
Şekil 2.2	Polietilen zincirinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007).....	5
Şekil 2.3	Vinil Klorür ve polivinil klorür zincirinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007)	5
Şekil 2.4	Termoplastiklerin polimer zincir yapıları (1), termosetlerin polimer zincir yapıları (2) (Ekşi, 2007)	10
Şekil 2.5	Gerilme etkisi altında polimer zincirlerinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007).....	11
Şekil 2.6	Elyaf, Kauçuk ve Plastik malzemenin Gerilme-Gerinim diyagramı gösterimi (Ekşi, 2007).....	12
Şekil 2.7	Polipropilen	17
Şekil 2.8	Polibutadin, polistiren (Onaran, 2003).....	18
Şekil 3.1	Kompozitlerin matris malzemesine göre sınıflandırılması (URL-2, 2014)	19
Şekil 4.1	Polietilenin yapısı (URL-5, 2021).....	30
Şekil 4.2	Polimer zincirlenmesi (Carragher, 2013).....	31
Şekil 4.3	Polivinil klorürün kimyasal bağ yapısı (URL-12, 2024)	34
Şekil 4.4	Polimetilmetakrilat'ın kimyasal gösterimi (URL-16, 2015).....	36
Şekil 4.5	Ekstrüzyon makinesi (Güner, 2012)	41
Şekil 4.6	Yarık kalıplı ekstrüzyon yönteminde kalıp ve malzeme akışı (Groover, 2002) ..	42
Şekil 4.7	Üfleli film ekstrüzyonu üretim yöntemi (Groover, 2002).....	42
Şekil 4.8	Haddeleme üretim yöntemi (Groover, 2002)	43
Şekil 4.9	Enjeksiyon makinesi (Kamber, 2008).....	44
Şekil 6.1	Standart deney örneği.....	52
Şekil 7.1	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış polietilenin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	59
Şekil 7.2	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış YYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	61
Şekil 7.3	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	63
Şekil 7.4	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	65
Şekil 7.5	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	67
Şekil 7.6	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim.....	69
Şekil 7.7	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PP'nin gama ışınına maruz bırakılması sonucunda çekme mukavemetinde gözlenen değişim	71
Şekil 7.8	Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışınına maruz bırakılması sonucunda üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	74
Şekil 7.9	Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak YYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	76
Şekil 7.10	Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak AYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	78
Şekil 7.11	Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak AYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	80
Şekil 7.12	Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PS'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	81

Şekil 7.13 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PS'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	83
Şekil 7.14 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PP'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim	85
Şekil 7.15 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi	86
Şekil 7.16 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışımasına maruz kalmış YYPE'nin TGA değişimi.....	87
Şekil 7.17 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi.....	88
Şekil 7.18 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi.....	89
Şekil 7.19 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımasına maruz kalmış PS'nin.....	90
Şekil 7.20 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımasına maruz kalmış PP'nin.....	91
Şekil 7.21 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin EDS analizi	92
Şekil 7.22 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışımasına maruz kalmış YYPE'nin EDS analizi.....	94
Şekil 7.23 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin EDS analizi.....	95
Şekil 7.24 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış.....	97
Şekil 7.25 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış PS'nin EDS analizi.....	98
Şekil 7.26 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış.....	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması (MEB, 2014).....	7
Tablo 2.2 Bazı termoset plastiklerin özellikleri (Kundu ve ark., 2004)	10
Tablo 2.3 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları (MEB, 2012)	10
Tablo 2.4 Elastomerlerin bazı tipik özellikleri ve kullanım alanları (URL-4, 2009)	12
Tablo 2.5 Bazı termoplastiklerin özellikleri (Kundu ve ark., 2004).....	13
Tablo 2.6 En çok kullanılan termoplastikler ve uygulama alanları (Goodship, 2004)	14
Tablo 2.7 Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin bazı özellikleri	15
Tablo 4.1 AYPE ve YYPE nin özellikleri (Carraher, 2013).....	31
Tablo 4.2 Genel amaçlı plastiklerin bazı özellikleri (Onaran 2003).....	33
Tablo 4.3 Bazı mühendislik termoplastiklerinin bazı temel özellikleri.....	37
Tablo 6.1 Gama ışımasına tabi tutulmuş standart çekme deney numunelerinin ağırlıkça içerdikleri polietilen, polipropilen, polistren ve dolgu malzemesi miktarları ve adetleri	54
Tablo 6.2 Gama ışımasına tabi tutulmuş standart üç nokta eğilme deney numunelerinin ağırlıkça içerdikleri polietilen, polipropilen, polistren ve dolgu malzemesi miktarları ve adetleri.....	55
Tablo 7.1 Gama ışınına tabi tutulmuş deniz yosunu takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	58
Tablo 7.2 Dolgu takviyesi yapılmış polietilenin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	59
Tablo 7.3 Gama ışınına tabi tutulmuş saman takviyeli YYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	60
Tablo 7.4 Dolgu takviyesi yapılmış YYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	61
Tablo 7.5 Gama ışınına tabi tutulmuş muz lifi takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	62
Tablo 7.6 Dolgu takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	63
Tablo 7.7 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	64
Tablo 7.8 Toz boya takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	65
Tablo 7.9 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PS numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları.....	66
Tablo 7.10 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	67
Tablo 7.11 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PS numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	68
Tablo 7.12 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	69
Tablo 7.13 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PP numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları	70
Tablo 7.14 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları	71
Tablo 7.15 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış polietilen numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	73

Tablo 7.16 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış YYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	75
Tablo 7.17 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış AYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	77
Tablo 7.18 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış AYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	79
Tablo 7.19 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PS numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	80
Tablo 7.20 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PS numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	82
Tablo 7.21 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PP numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları	84



RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1 Polimer malzeme (URL-1, 2025)	4
Resim 3.1 Elyaf takviyeli kompozit levha (Şahin, 2000).	26
Resim 4.1 Termoplastik şekillendirilmesi (MEB, 2013)	40
Resim 4.2 Gama ışınlama odası ve oda içindeki ışınlama kutuları (URL-18, 2022).....	46
Resim 6.1 Çekme deneyi.....	56
Resim 6.2 Üç nokta eğilme deneyi	57
Resim 7.1 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü.....	92
Resim 7.2 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışımasına maruz kalmış YYPE matrisli numunenin kesit görüntüsü.....	93
Resim 7.3 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü	94
Resim 7.4 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü	96
Resim 7.5 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış PS'nin kesit görüntüsü	97
Resim 7.6 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış PP'nin kesit görüntüsü	99

KISALTMALAR LİSTESİ

ABS	: Akrilonitril-Butadin-Stiren
AYPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
PE	: Polietilen
PS	: Polistiren
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PP	: Polipropilen
PPA	: Polifitalamid
PVC	: Polivinil Klorür
SAN	: Stiren-Akrilonitril
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
TBA	: Toz Boya Açık Siyah (Epoksi)
TBK	: Toz Boya Koyu Siyah (Polyester/Epoksi)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
MPa	: Mega Pascal

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve nitelikli ürüne yönelik artan talepler, değişen tüketim alışkanlıkları, hammadde tedarikinde yaşanan zorluklar ve artan maliyetler gibi faktörler, endüstrinin birçok alanında üreticileri alternatif malzemelere yönlendirmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin makro düzeyde fiziksel olarak birleşimiyle elde edilen yapılar olarak ön plana çıkmaktadır. Çoğunlukla polimer matrisli olarak üretilen bu kompozitlerde, kullanılan polimerler genellikle termoplastik veya termoset polimerlerdir. Termoplastik polimerler, düşük maliyetleri, kolay bulunabilirlikleri ve işlenebilirliklerinin avantajı ile yaygın olarak tercih edilmektedir. Termoplastiklerin iyileştirilmesi istenilen özelliklerini artırmak ya da maliyetlerini düşürmek amacıyla, doğal, sentetik, organik ve inorganik dolgu maddeleri kullanılmaktadır.

Son yıllarda, polimer matrisli kompozitler, üstün mekanik, termal ve morfolojik özellikleri sayesinde birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri, kullanılan matris ve takviye malzemelerinin türüne, oranına ve işlenme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Özellikle parçacık dolgu takviyeli termoplastikler, düşük maliyetleri, işlenebilirlikleri ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilebilmesi nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu malzemelerin performansını artırmak ve daha fonksiyonel hale getirmek amacıyla yapılan araştırmalar, dolgu malzemelerinin ve dış etmenlerin etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi gerekli kılmaktadır.

Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayan ve şekil alabilen, soğutulduklarında ise katı hale gelen plastik malzemelerdir. Bu özellikleri, onları birçok endüstriyel uygulama için uygun hale getirmektedir. Termoplastik malzemeler, hem doğal hem de sentetik dolgu malzemeleri ile takviye edilebilir. Doğal dolgu malzemeleri arasında selüloz, doğal elyaflar, deniz yosunu, kolza bitkisi, kenevir, ve midye tozu gibi organik içeriklere sahip maddeler yer alırken, sentetik dolgu malzemeleri arasında cam elyafları, karbon elyafları, sentetik boyalar, silika ve metal oksitler gibi maddeler bulunmaktadır. Doğal dolgular, çevre dostu olmaları ve biyolojik olarak parçalanabilir olmaları nedeniyle tercih edilirken, sentetik dolgular genellikle daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık özellikleri sunarak daha güçlü kompozitler elde edilmesini sağlar. Bu dolgu malzemeleri, termoplastiklerin mekanik,

termal ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için kullanılır ve malzemenin nihai performansını büyük ölçüde etkiler.

Gama ışıını ile polimerlerin özelliklerini değiştirmek, malzeme mühendisliğinde dikkat çeken bir araştırma alanı haline gelmiştir. Gama ışıını, polimerlerde çapraz bağlar oluşturarak, moleküler yapıyı modifiye etme kapasitesine sahiptir. Bu etkileşim, özellikle mekanik, termal ve morfolojik özelliklerde iyileşmeler sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda, gama ışıınına maruz bırakılan parçacık dolgu takviyeli termoplastiklerin özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar, malzemelerin dayanıklılık, sertlik, sıcaklık stabilitesi ve yapı özellikleri açısından önemli değişiklikler gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, parçacık dolgu takviyeli termoplastik matrisli kompozitlerin gama ışıması sonrası mekanik, termal ve morfolojik özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve bunlar ışıma öncesi mevcut sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Bu kapsamda, SEM (Scanning Electron Microscopy) ve EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analizleri ile malzeme yüzeyindeki morfolojik değişiklikler ve elementel bileşim incelenmiş, TGA (Thermogravimetric Analysis) ile malzemelerin erime sıcaklıkları ve kütle kayıpları belirlenmiştir. Ayrıca, çekme ve üç nokta eğilme testleri ile mekanik özelliklerdeki değişimler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu çalışmada, gama ışıını uygulamasının termoplastiklerin yapısal ve mekanik özelliklerine olan etkilerinin yanı sıra, dolgu malzemesinin kompozitin performansı üzerindeki rolü de ele alınmıştır. Ayrıca parçacık dolgu takviyeli termoplastiklerin gama ışıını ile modifikasyonu konusunda önemli veriler ortaya koyan bu çalışma, bu tür malzemelerin endüstriyel uygulamalarda nasıl daha verimli ve dayanıklı hale getirilebileceği hakkında yeni bir perspektif kazandırmayı hedeflemektedir.

2. POLİMER MALZEMELER

Polimerler, bir veya daha fazla monomerin tekrarlanan bir biçimde uzun zincirler oluşturacak şekilde birleşmesiyle meydana gelen makromoleküler yapılar olarak tanımlanabilir. Latince kökenli "poly" kelimesi "çok", "mer" kelimesi ise "parçacık" anlamına gelmektedir. Bu yapının oluşma süreci, polimerizasyon olarak adlandırılır (Brightworks Engineering. 2023; Kılınç, Ö., & Toplan, N. 2023). Polimerlerin, yüksek moleküler ağırlıkları nedeniyle diğer malzeme türlerinden belirgin şekilde farklılık gösterdiği söylenebilir.

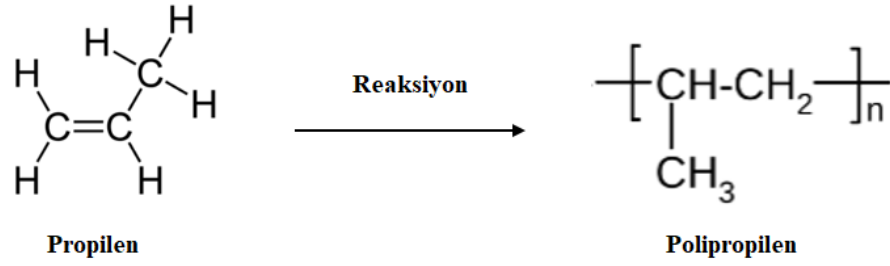
Polimerlerin boyutları, atomların çeşitli fazlarındaki davranışlarını etkiler. Küçük moleküllü bileşikler, maddenin katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç temel haline sahipken, polimerler bu hallerin ötesine geçebilir. Katı maddelerde parçacıklar birbirine yakın şekilde düzenlenmiş olup sınırlı bir hareketlilik gösterirler, sıvılarda ise parçacıklar daha gevşek bir düzende olup birbirleri arasında serbestçe hareket edebilirler. Gaz halindeki moleküller ise daha dağılmış olup, yüksek enerjilerle hareket ederler. Polimerler yalnızca katı hâlde var olmaz; aynı zamanda amorf (düzensiz yapılı) ve kristalin (düzenli yapılı) olmak üzere iki ana türde bulunurlar. Bazı polimerler, her iki yapıyı bir arada barındırarak kısmi kristalin yapılar oluşturabilirler (Mallard Creek Polymers. 2023; Kılınç, Ö., & Toplan, N. 2023). Tam kristalin yapıya sahip olmasalar da, bazı polimerler belirli koşullar altında tamamen amorf hale gelebilir. Ayrıca, amorf ve kristalin bölgeleri bir arada barındıran polimerler ise yarı kristalin özellikler gösterir (Pediaa. 2023; Kılınç, Ö., & Toplan, N. 2023)



Resim 2.1 Polimer malzeme (URL-1, 2025)

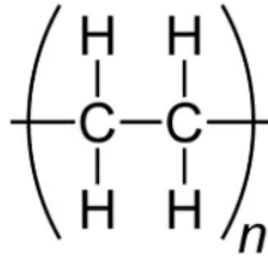
Polimerler, yüksek moleküler ağırlığa sahip, kendini tekrarlayan birimlerden oluşan kimyasal bileşiklerdir. Bu birimler polimerin yapısal bütünlüğünü sağlar. Polimerin yapısal özellikleri, zincir uzunluğu ve birim sayısına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerde farklılıklara yol açabilir. Örneğin, kısa zincirli polimerlerde erime noktası ve akışkanlık daha belirginken, uzun zincirli yapılar daha yüksek viskozite ve yoğunluğa sahiptir. Oligomerler, yalnızca birkaç birimden oluşan polimerlerdir ve bu tür polimerlerin özellikleri, çok daha büyük moleküllere sahip polimerlere göre farklılık gösterebilir. Genellikle plastiklerle ilişkilendirilen polimerler, aynı zamanda çok geniş bir uygulama alanına sahiptir ve doğal polimerler de dâhil olmak üzere biyolojik sistemlerde temel yapı taşlarını oluşturur (Savaşçı ve ark., 2002).

Polimer zincirlerindeki birim sayısının artması, genellikle akışkanlık özelliklerinde azalmaya neden olur. Zincir uzunluğu arttıkça, polimerin viskozitesi ve yoğunluğu da yükselir ve sonuç olarak daha sert ve dayanıklı hale gelir. Bu, polimerin fiziksel hali üzerinde etkili olur, çünkü belirli bir zincir uzunluğuna ulaşıldığında, polimer katı bir yapı kazanabilir.



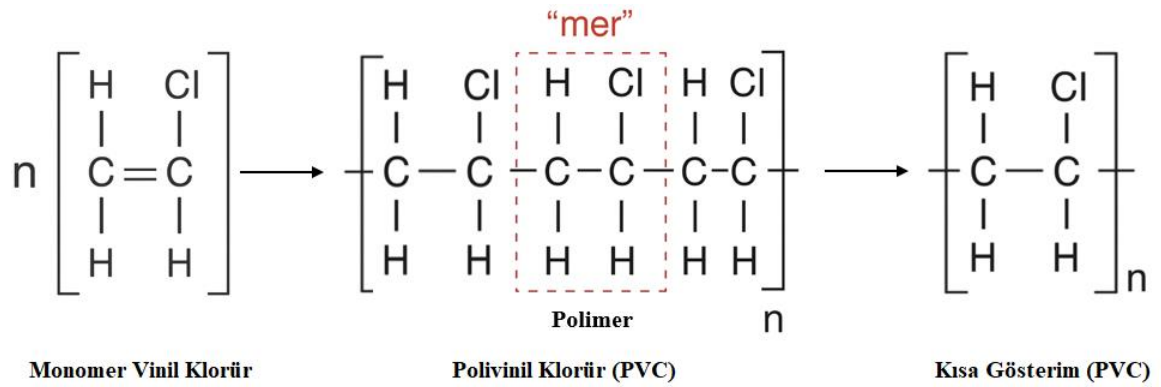
Şekil 2.1 Propilen monomeri ve polipropilen (Ekşi, 2007)

Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere, propilen monomerinin polimerizasyonu sonucu polipropilen elde edilmektedir.



Şekil 2.2 Polietilen zincirinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007)

Şekil 2.2'de, etilen monomerlerinin birleşerek oluşturduğu polietilen zincirinin yapısı gösterilmektedir. Bu bağlamda, polietilen, polimerlere bir örnek teşkil etmektedir. (Savaşçı ve ark., 2002).



Şekil 2.3 Vinil Klorür ve polivinil klorür zincirinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007)

Şekil 2.3'te, vinil klorür monomerlerinin birleşerek oluşturduğu polivinil klorür (PVC) zincirinin yapısı gösterilmektedir. Polivinil klorür, vinil klorür monomerlerinin

düzenli bir şekilde birbirine bağlanmasıyla elde edilen, yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimerdir.

Polimerlerin malzeme olarak kullanılabilmesi için belirli işleme yöntemleriyle şekillendirilmesi gerekmektedir. Polimerler genellikle saf bir malzeme olarak tek başına işlenemezler. Polimerlerin işlenmesi sırasında renklendiriciler, ultraviyole (UV) ışınlarına karşı koruyucular, kayganlaştırıcılar, plastikleştiriciler ve çeşitli dolgu maddeleri gibi katkı maddeleri kullanılabilir. Bu tür katkıların oluşturduğu karışımlar "komponent" olarak adlandırılmaktadır. Bu karışımlar, çeşitli üretim yöntemleriyle (plastik enjeksiyon, plastik şişirme, ekstrüzyon, kalıplama, ısıtıl şekillendirme vb.) şekillendirilerek nihai ürünler ve yarı ürünler elde edilmektedir. Yukarıda bahsedilen üretim yöntemleri ile son biçimlerini alan ürünler ise genellikle "plastik" olarak tanımlanır. Polimerlerin makromoleküler yapıları, içerdikleri bileşenlerle karşılaştırıldığında, çeşitli faydalı özelliklere sahip olmalarını sağlar (Savaşçı ve ark., 2002). Polimerlerin bu yapısal özellikleri, polimerlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tartışılabilmesi için moleküler ağırlıklar ve polimerleşme derecelerinin dikkate alınmasını gerektirir. (Yaşar, 2001).

Polimerleşme derecesi ile moleküler ağırlıklar arasında doğrudan bir ilişki vardır. Polimer zincirlerinin farklı uzunlukları ve yapıdaki varlıkları, moleküler ağırlıklarının heterojen olmasına yol açar. Bu nedenle, polimerlerin moleküler ağırlıkları genellikle tek bir molekülün ağırlığı yerine, ortalama moleküler ağırlıklar üzerinden ifade edilir. Polimerleşme derecesi ve moleküler ağırlıklar, polimerlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Düşük moleküler ağırlığa sahip polimerler genellikle sıvı formda bulunurken, moleküler ağırlık arttıkça ve polimerleşme derecesi yükseldikçe, polimerler katı forma dönüşür. Moleküler ağırlığı 600-1000 arasında olan polimerler genellikle katı formda olup, işlenebilir mekanik özelliklere sahip olurlar. Bu durum, polimerlerin fiziksel özelliklerinin ve işlenebilirliğinin, moleküler ağırlıklarına ve polimerleşme derecelerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Savaşçı ve ark., 2002).

2.1 Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerlerin sınıflandırılması, hem doğal hem de sentetik kaynaklardan elde edilme şekillerine, moleküler yapılarının özelliklerine ve işlevsel özelliklerine bağlı olarak çeşitli

kategorilere ayrılmaktadır. Tablo 2.1’de bu sınıflandırma, polimerlerin kullanım alanlarını, üretim yöntemlerini ve özelliklerini anlamada önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması (MEB, 2014)

Sınıflandırma Kriteri	Alt Gruplar	Açıklama
Kimyasal Yapılarına Göre	1. Organik Polimerler 2. İnorganik Polimerler	Organik polimerler , karbon içeren bileşiklerden oluşur ve genellikle karbon-karbon bağlarına sahip olan polimerlerdir (örneğin, polietilen, polipropilen). İnorganik polimerler , karbon içermeyen, genellikle silikon, fosfor, azot gibi elementleri içeren polimerlerdir (örneğin, silikontabanlı polimerler).
Fiziksel Özelliklerine Göre	1. Termoplastikler 2. Termosetler 3. Elastomerler	Termoplastikler , ısıtıldığında şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen polimerlerdir. Termosetler ise bir kez şekillendirildikten sonra tekrar şekillendirilmezler. Elastomerler ise esnek ve geri dönüştürülebilir polimerlerdir.
Moleküler Yapılarına Göre	1. Lineer Polimerler 2. Dallanmış Polimerler 3. Ağ Yapılı Polimerler	Lineer polimerler doğrusal zincirler şeklinde bağlanmış moleküllerden oluşur. Dallanmış polimerler , ana zincirden dalga yapılarla bağlantılar içerir. Ağ yapılı polimerler ise üç boyutlu ağ yapısına sahiptir ve kovalent bağlarla birbirine bağlanmıştır.
Kullanım Alanlarına Göre	1. Plastikler 2. Elastikler 3. Fiberler	Plastikler , genel olarak şekil verilebilir malzemelerdir ve birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. Elastikler , esnek özellikleriyle kauçuk gibi malzemelerdir. Fiberler , uzun ve ince yapılarıyla dokuma, halı, kumaş üretiminde kullanılır.
Termal Davranışlarına Göre	1. Sıcaklıkla Sertleşen Polimerler (Termosetler) 2. Sıcaklıkla Yumuşayan Polimerler (Termoplastikler)	Termoset polimerler , ısıtıldığında şekillendirilip, kalıcı bir sertlik kazanarak bir daha ısıtıldıklarında şekil almazlar. Termoplastik polimerler , ısıtıldığında yumuşar ve şekil alabilirler.
Oluşumlarına Göre	1. Doğal Polimerler 2. Sentetik Polimerler 3. Yarı Sentetik Polimerler	Doğal polimerler , doğada bulunan ve insanlar tarafından işlenmeyen polimerlerdir (örneğin, selüloz, nişasta, proteinler). Sentetik polimerler ise laboratuvar veya endüstriyel süreçlerle üretilir (örneğin, polietilen, polipropilen). Yarı sentetik polimerler , doğal polimerlerin kimyasal işlemlerle değiştirilmiş halidir (örneğin, selüloz asetat).

2.1.1 Kimyasal yapılarına göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler, kimyasal bileşimlerine göre organik ve inorganik olmak üzere iki ana gruba sınıflandırılmaktadır.

Organik Polimerler; hidrojen (H), karbon (C), oksijen (O), azot (N) ve halojen atomlarından oluşan bileşiklerdir. Bu polimerlerin ana zincirlerinde yer alacak atomların, en

az iki değerlikli olmaları gerekmektedir. Ayrıca, ana zincirlerdeki atomlar arasındaki bağ enerjilerinin yeterli seviyede olması da önemli bir koşuldur. C-C bağ enerjisi 80 kcal/mol, O-O bağ enerjisi ise 34 kcal/mol civarındayken, N-N bağ enerjisi 37 kcal/mol civarındadır. Bu bağlamda, karbon atomları en yüksek bağ enerjisine sahip atomlar olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, organik polimerlerin büyük bir kısmının ana zincirini karbon atomları oluşturur. (Heinzelman ve ark., 2015)

İnorganik Polimerler; ana zincirlerinde silisyum (Si), germanyum (Ge), bor (B) ve fosfor (P) gibi elementler barındıran polimerlerdir. Bu polimerlerde, ana zincirlerdeki atomlar arasındaki bağ enerjileri, organik polimerlerdeki atomlar arasındaki bağ enerjilerinden daha yüksek değerlere sahiptir. Organik polimerlerin geniş bir kullanım yelpazesi bulunmakla birlikte, inorganik polimerler daha üstün ısı dayanımı ve yüksek mekanik dayanım özellikleri sergilemektedir. Doğal ve sentetik zeolitler (alümina silikat) gibi örnekler, inorganik polimerler sınıfına dahil edilebilir (Gupta ve ark., 2019).

2.1.2 Fiziksel özelliklerine göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler, fiziksel yapılarına göre üç ana grupta sınıflandırılır: termosetler, termoplastikler ve elastomerler (Vahapoğlu, 2007).

2.1.3 Termosetler

Termoset plastikler, ısı işlemiyle şekillendirildikten sonra kimyasal reaksiyonlarla sertleşen ve bir daha şekil değiştiremeyen plastik türleridir. Polimer zincirleri arasında oluşan çapraz bağlar sayesinde yüksek sıcaklık, basınç ve kimyasallara karşı üstün dayanım gösterirler. Bu yapı, termosetleri termoplastiklere göre daha rijit ve stabil hale getirir. Sertleşme süreci genellikle iki aşamalıdır: İlk aşamada monomerler birleşerek uzun polimer zincirleri oluşturur; ikinci aşamada ise bu zincirler yüksek sıcaklık ve basınç altında çapraz bağlanarak kalıcı form kazanır. Bu işlem tamamlandıktan sonra termosetler yeniden ısıtıldığında yumuşamaz, şekil değiştirmez; tersine, aşırı sıcaklıklarda yapısal bozulmalar meydana gelebilir. (Yaşar, 2001)

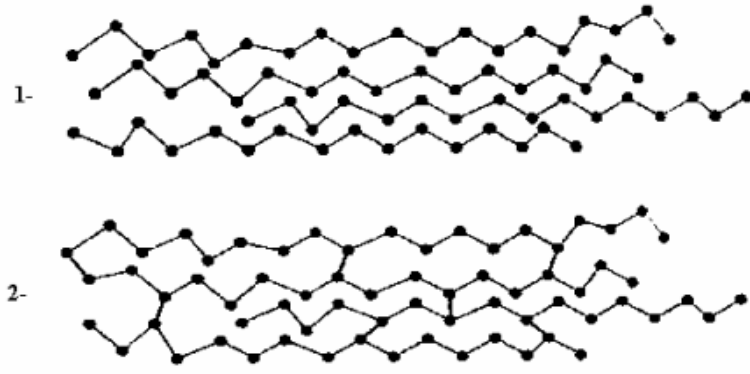
Bu nedenle termosetler, genellikle kısmen polimerleşmiş haldeyken kalıplanır. Kalıplama sırasında polimerleşme süreci devam eder ve çapraz bağlar oluşarak plastik malzeme akışkanlığını kaybeder. Bu özelliklerinden dolayı termoset plastikler “ısı sert” malzemeler olarak tanımlanır. Isıl sertlik, bu tür plastiklerin yalnızca yüksek sıcaklıklarda

şekil verilebilmesini ve sertleşme sonrası bu şekli kalıcı olarak koruyabilmelerini ifade eder. Buna rağmen bazı termosetler, oda sıcaklığında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla da sertleşebilir. Üretim süreci, reaktörlerde başlatılan polimerleşme ile başlar, kalıplama ise bu sürecin nihai aşamasını oluşturur. Termoset plastikler; epoksi, polyester, PVC ve asetat gibi çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Enşici, 2004).

Termoset malzemeler, günlük yaşamın birçok alanında yaygın olarak kullanılan ürünlerdir ve otomobil endüstrisi, ev eşyaları, ofisler ve fabrikalar gibi pek çok sektörde tercih edilmektedir. Bu malzemelerin kullanımını artıran en önemli etkenlerden biri, maliyetlerinin uygun olmasıdır. Termosetlerin tercih edilmesinde etkili diğer faktörler arasında, soğuk havada kırılğan hale gelmemeleri, yüksek sertlikleri, parlak yüzeyleri, üstün mekanik özellikleri, elektriksel izolasyon kabiliyetlerinin yüksek olması, 300°C'ye kadar dayanabilmeleri, yağlar ve çözücülere karşı direnç göstermeleri, boyutsal sabitlik sağlamaları, yanmazlık özellikleri ve hava koşullarına karşı dayanıklılıkları sayılabilir (Megep, 2006).

Termosetlerde, polimer zincirleri arasında güçlü bağlar oluşarak üç boyutlu bir ağ yapısı ortaya çıkar. Bu yapı, termosetleri termoplastiklere göre çok daha dayanıklı ve rijit kılar. Termosetlerin üretimi de polimerizasyon süreci ile gerçekleşir. Bu süreç genellikle iki aşamada ilerler. İlk aşamada, termoseti oluşturacak monomerler birleştirilir. İkinci aşama ise, kalıplama işleminde başlar ve burada polimer zincirleri yüksek sıcaklık ve basınç altında reaksiyona girerek oluşur. Sonuç olarak, reaksiyona girmemiş monomer birimleri bulunabilir. Sıcaklık ve basınç etkisiyle, polimer zincirleri arasında çapraz bağlar meydana gelir ve bu bağlar, termosetin dayanıklılığını artırır. Aşağıda verilen Şekil 2.4'te, termoset malzemeyi oluşturan polimer zincirleri arasındaki ağ yapısını ve bu bağların nasıl oluştuğunu göstermektedir (Saçak, 2006).

Termosetler kalıcı şekil değiştirme özellikleri ile yüksek dayanıklılık ve rijitliğe sahip plastiklerdir.



Şekil 2.4 Termoplastiklerin polimer zincir yapıları (1), termosetlerin polimer zincir yapıları (2) (Ekşi, 2007)

Tablo 2.2’de, termoset malzemelerin özelliklerine dair detaylı bilgiler sunan tablo yer almaktadır.

Tablo 2.2 Bazı termoset plastiklerin özellikleri (Kundu ve ark., 2004)

Malzeme	Erime sıcaklık (°C)	Elastite Modülü Mpa	Çekme Mukavemeti Mpa	Özgöl Ağırlık Kg/cm ³
Melaminler	345	7000-11200	35-70	1.50
Epoksiler	150	2800-3500	28-90	1.25
Polyesterler	260	2100-4600	45-95	1.28
Fenolikler	40.5	2800-9200	35-60	1.27

Tablo 2.3’te, en yaygın olarak tercih edilen termoset malzemeler ve bu malzemelerin kullanım alanları ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

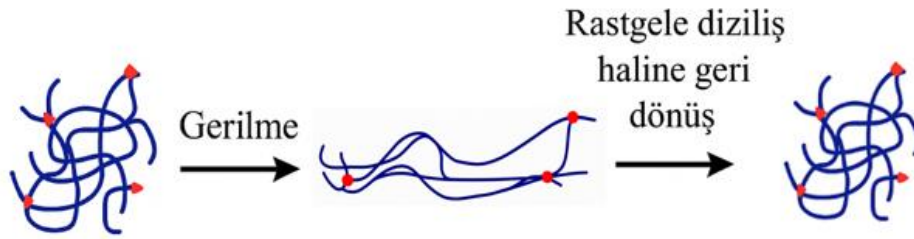
Tablo 2.3 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları (MEB, 2012)

Termoset Malzemeler	Uygulamalar
Doymamış Polyester	Ekmek kızartma makinesinin kenarları, duvarlar, uydu çanakları
Poliüretan	Döşemecilik amacı ile kullanılan esnek veya rijit köpük, yalıtım malzemesi
Fenoliks	Tencere/tava kulpu, ekmek kızartma makineleri, ütüler
Melamin	Mutfak tezgâhları ve ısıya dayanıklı tabakalı yüzeyler
Epoksi	Elektrik yalıtımları ve yapıştırıcılar

2.1.4 Elastomerler (Kauçuklar)

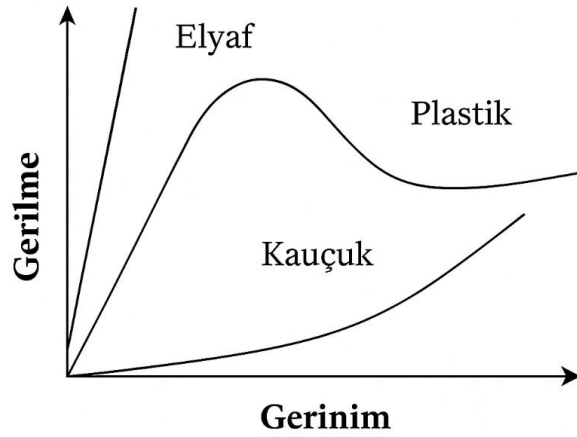
Elastomerler, yüksek çekme kuvvetlerine maruz kaldıklarında önemli ölçüde uzayabilen ve kuvvet ortadan kalktığında hızla orijinal boyutlarına dönebilen, çapraz bağlı kauçuk benzeri polimerlerdir. Bu yüksek elastik davranışları, moleküler yapılarında yer alan düşük yoğunluklu çapraz bağlara sahip ağ yapılarından kaynaklanır. Polimer zincirleri zayıf çapraz bağlarla birbirine bağlandığından, dış kuvvet uygulandığında zincirler kuvvet yönünde açılarak elastik deformasyona uğrar; kuvvet kaldırıldığında ise zincirler eski konumlarına geri döner. Bu özelliğin bir sonucu olarak elastomerler, yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip malzemelerdir (Saçak, 2006).

Termoset polimerlerde olduğu gibi elastomerler de çapraz bağlı yapıya sahiptir; ancak elastomerlerin ayırt edici özelliği, düşük gerilimler altında dahi büyük oranda elastik deformasyon gösterebilmeleridir. Bazı elastomer türleri, ilk uzunluklarının %500'üne kadar uzayabilir. Bu deformasyon kapasitesinin temelinde, zincirler arasındaki bağların zayıf çapraz bağlarla sağlanmış olması yatar. Dayanıklılık ve rijitliğin artırılması gerektiğinde, çapraz bağ yoğunluğu kontrollü şekilde artırılabilir. En yaygın elastomer örneği kauçuk olup; poliizopren (doğal kauçuk), poliizobütilen, poliüretan ve poliütadiyen gibi sentetik elastomerler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak elastomerlerin performansını artırmak amacıyla dolgu maddeleri de kullanılabilir (Martinez ve ark., 2013).



Şekil 2.5 Gerilme etkisi altında polimer zincirlerinin şematik gösterimi (Ekşi, 2007)

Elastomerler söz konusu olduğunda, polimer zincirlerinin başlangıçta doğal konumlarında oldukları gözlemlenir. Çekme kuvveti uygulandığında, bu zincirler gerilerek çekme kuvvetine paralel yönde açılarak deformasyona uğrar. Bu süreç elastik deformasyonlara yol açar. Gerilmenin ortadan kalkmasının ardından ise, polimer zincirlerinin eski konumlarına geri döndüğü ve orijinal düzenlerine yeniden kavuştuğu gözlemlenir. Bu özellik, Şekil 2.6'da elastomerlerin elastikiyetini ve şekil değiştirme kapasitesini belirleyen temel faktördür.



Şekil 2.6 Elyaf, Kauçuk ve Plastik malzemenin Gerilme-Gerinim diyagramı gösterimi (Ekşi, 2007)

Tipik elastomerlerin özellikleri ve kullanım alanları aşağıda sunulan Tablo 2.4'te ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Tablo 2.4 Elastomerlerin bazı tipik özellikleri ve kullanım alanları (URL-4, 2009)

Elastomerler	Özellikleri
Silikon Kauçukları	İnorganik yapıdaki polimerlerin organik türevleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Dimetilsilanol örnek olarak verilebilmektedir. Çok geniş sıcaklık aralıklarında, esnekliklerini ve kararlılıklarını koruyabilmektedirler. Kablo ve tel izolasyonu tipik kullanım alanlarına örnek verilebilmektedir. Aynı zamanda sayılan materyallerin izolasyonu içinde kullanılabilirler.
Üretan Elastomerler	Polieter ve üretan bloklar karışımı olarak kullanılmaktadır. Üretan bloklar malzemeye ısıya karşı dayanıklılık, kuvvet kazandırmaktadır. Polieter bloklar ise malzemeye elastiklik özellikleri sağlamaktadır. Yağlara karşı dirençli ve uzun ömürlü olmalarının yanı sıra kuvvetli ve sert elastomerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Yastıklardan uçak tekerlerine kadar geniş bir yelpaze içerisinde kullanımları sağlanmaktadır.
Etilen Propilen Kauçukları (RPDM)	Hava koşullarına ve özellikle güneş ışığına karşı çok dayanıklı bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Otomobil malzemeleri, elektrik izolasyonu için kullanılan malzemeler, ayakkabı ve hotum gibi tipik alanlar içerisinde kullanımları sağlanmaktadır.
Bütil Kauçukları	İzopren ve izobütilen (%1-2) kopolimeridir; aşınmaya karşı yüksek dirençleri bulunmaktadır. Elektrik kuvvetleri yüksek, gaz geçirgenlikleri ise düşük seviyelerde bulunmaktadır. Ağır iş şartları altında kullanımları mümkün olabilmektedir.
Akrilonitril ve Bütadien Kopolimerleri	Buna N, nitril elastomerleri (NBR); yağlara karşı çok dirençli oldukları gözlemlenmektedir. Esnek kaplinler, hortumlar, çamaşır makinesi parçaları tipik kullanım alanları arasında sayılabilmektedir.
Poliizopren (PI)	Bir tr sentetik kauçuk, doğal kauçuk ile özellikleri birbirlerine çok benzemektedir.
Polibütadien (PB)	Doğal kauçuk ile birbirine çok fazla benzeyen, genel amaçlar çerçevesinde kullanılmakta olan bir elastomer olarak karşımıza çıkmaktadır.
Stiren-bütadien kopolimerleri (Buna S ve SBR)	Kauçuklar, ilk üretimi sağlanan sentetiklerdir. Doğal kauçuk ile çok yakın özellikleri bulunmaktadır. Genel amaçlı sıkça kullanımı tercih edilen bir elastomer olarak karşımıza çıkmaktadır. İyi özelliklere sahip olmasının yanı sıra çok daha az maliyetlidir. Aktif olarak dış lastik üretimlerinde kullanılmaktadır.

2.1.5 Termoplastikler

Termoplastikler, doğrusal veya dallanmış yapıya sahip büyük moleküllerin (makromoleküller) fiziksel birleşimiyle oluşan polimer malzemelerdir. Bu tür yapılarda makromoleküller arasında kimyasal bağlar bulunmadığı için, ısıtıldıklarında yumuşar, basınçla şekillendirilebilir hale gelir ve soğutulduklarında tekrar sertleşirler. Bu döngü, kimyasal yapıda bir değişiklik olmaksızın defalarca tekrarlanabilir; bu da termoplastiklerin yeniden işlenebilirliğini ve geri dönüştürülebilirliğini mümkün kılar (Enşici, 2004).

Ayrıca, termoplastikler kimyasal çözücülerle çözünebilen bir yapıya sahiptir. Moleküler düzenlerine göre ikiye ayrılırlar: amorf termoplastikler, makromoleküllerin rastgele sıralandığı düzensiz yapıya sahipken; yarı kristal termoplastikler, belirli bölgelerde düzenli moleküler yapılar gösterir. Bu sınıflandırma, malzemenin mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkiler (Silva ve ark., 2015).

Termoplastiklerde, moleküller arasındaki kimyasal bağlar, bu malzemelerin birden fazla kez işlenebilmesine olanak tanır. Ayrıca, termoplastikler belirli kimyasal çözücülerle çözünebilmektedir. Bu malzemelerin dayanıklılığı, elastik modülü ve sünekliği, ortam sıcaklıklarına bağlı olarak değişim gösterir. Sıcaklık artışı ile birlikte, primer bağlar çözülmeye başlar ve moleküler zincirler parçalanır, bu süreçte düşük moleküllü maddelere dönüşürler. Termosetlere kıyasla, termoplastiklerin matris malzemesi olarak kullanımı genellikle daha pasif olmasına rağmen, geri dönüşüm özellikleri, uzun süre saklanabilme imkânı ve şekillendirme sürecinde organik çözücülere ihtiyaç duyulmaması gibi birçok avantaj sunar. Ayrıca, termoplastiklerin çarpma dayanıklılığı ve sertliği gibi özellikleri de oldukça yüksektir. Bu malzemelere ait bazı temel özellikler ve kullanım alanları aşağıda belirtilen Tablo 2.5'te sunulmaktadır (Silva ve ark., 2015).

Tablo 2.5 Bazı termoplastiklerin özellikleri (Kundu ve ark., 2004)

Malzeme	Erime sıcaklık (°C)	Elastite Modülü Mpa	Çekme Mukavemeti Mpa	Malzeme Özgül Ağırlık gr/cm ³
Sellülozikler	-	-	20-50	1.2-1.3
Naylon 6.6	250	2000-3500	60-100	1.06-1.15
Politetrafloretilen (teflon)	260	420-560	17-28	2.1-2.3
PMMA	160	2450-3150	50-90	1.11-1.20
ABS	105	-	42-50	1.05-1.07
PS	240	2660-3150	35-68	1.08-1.10
PP	160-164	1120-1500	50-70	0.90-0.91
PVC	180-200	2800-4200	40-60	1.50-1.58
HDPE	125-135	420-1260	20-37	0.95-0.96
LDPE	100-120	105-280	7-17	0.92-0.93

Günümüzde, geniş bir kullanım yelpazesi ve yüksek üretim hacmi ile dikkat çeken termoplastik malzemeler arasında poliolefin grubu önemli bir yer tutmaktadır. Bu gruptaki başlıca malzemeler, yüksek yoğunluğa sahip polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polikarbonat, polipropilen, polibütillen, selülozik malzemeler, poliüretan, ABS, poli(fenilen sülfid), poliakrilat ve naylon gibi çeşitlerden oluşmaktadır. Bu termoplastiklerin kullanım alanları ise oldukça çeşitlidir ve her biri farklı endüstriyel gereksinimleri karşılamak için tercih edilmektedir. Aşağıdaki Tablo 2.6’da, en yaygın kullanılan termoplastiklerin türleri ve bu malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı alanlar detaylı bir şekilde sunulmaktadır (Megep, 2006).

Tablo 2.6 En çok kullanılan termoplastikler ve uygulama alanları (Goodship, 2004)

Termoplastik Malzemeler	Uygulamalar
Polivinil Klorür (PVC)	Boru, ayakkabı, gıda paketleri, zemin
Polietilen Terafitalat (PET)	Saydam karbonlu içecek şişeleri
Polyamid (PA)	Yataklar, dişliler, paten tekerleri, civatalar
Polistiren (PS)	Fast-food köpük paketleri, yoğurt kapları, saydam parçalar, kasetler
Polipropilen (PP)	Şapkalar, halılar, bavullar, kovalar, yoğurt kapları, batarya kılıfları borular,
Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)	Sebze çantaları, paketlenme, oyuncak
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	Şişeler, paketlenme, borular, tanklar

Polietilen(PE);

Polietilen, saydam olup, renksizden beyaza doğru değişen bir görünüm sergileyen bir termoplastik malzeme olarak tanımlanabilir. Renklendiriciler eklenerek farklı renklerde ürünlerin üretilmesi mümkündür. Polietilen, genel olarak düşük yoğunluklu (AYPE) ve yüksek yoğunluklu (YYPE) formlarında bulunur. Düşük yoğunluklu polietilenin yapısı, dallanmış zincirlerden oluşurken, yüksek yoğunluklu polietilenin yapısı daha düzgün ve düzenlidir.

Düşük yoğunluklu polietilenin kristallik oranı ve yoğunluğu, zincirlerin dallanmış yapısı nedeniyle azalır. Dallanmış moleküller arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar, bu da düşük yoğunluklu polietilenin dayanımını düşürür. Diğer taraftan, yüksek yoğunluklu polietilenin zincirleri, daha az dallanma gösterir, bu da zincirler arasında daha güçlü bağların oluşmasına ve böylece dayanım ile kristallik oranının artmasına yol açar. Polietilenin en yaygın plastik malzeme olmasının başlıca nedeni, düşük maliyeti ve oda sıcaklığı veya daha düşük

sıcaklıklarda sağladığı yüksek tokluktur. Ayrıca, pek çok uygulama için yeterli dayanım sunması, bu malzemenin avantajları arasında sayılmaktadır. Polietilen, -73°C'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda bile eğilebilme özelliğine sahiptir. Yalıtım ve aşınma karşısında mükemmel performans gösterir ve koku ile tat taşımaz. Ayrıca, su buharını düşük miktarda geçirerek suya karşı dirençli bir yapı sergiler. Tablo 2.7' de, düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin bazı özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 2.7 Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin bazı özellikleri

Özellik	Yüksek Yoğunluk Polietilen	Çizgisel Düşük Yoğunluk Polietilen	Düşük Yoğunluk Polietilen
Kristalinite (%)	95	-	65
Uzama (%)	20-120	600-800	550-600
Çekme Dayanım (MPa)	20.0-37.2	12.4-20.0	6.2-17.2
Yoğunluk (g/ cm ³)	0.95-0.96	0.922-0.926	0.92-0.93

Polietilen, geniş bir kullanım yelpazesi sunan bir malzeme olup, elektrik yalıtımı için kullanılan materyaller, kimyasal madde taşıma tüpleri, üfleme kalıplama yöntemiyle üretilen şişeler ve çeşitli ev eşyaları gibi pek çok alanda tercih edilmektedir. Ayrıca, polietilen filmleri, paketleme sektöründe, çatı kaplama malzemelerinde ve su depolama sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Şahin, 2000).

Alçak Yoğunluklu Polietilen;

Düşük Yoğunluklu Polietilen (AYPE), polietilenin yaygın bir formu olup, özellikle esneklik ve düşük yoğunluk gibi özellikleri ile ön plana çıkar. AYPE, polimer zincirlerinin daha düzensiz ve dallanmış bir yapı sergilemesi sonucu düşük yoğunluğa sahip olur. Bu özellik, malzemenin yüksek esneklik ve düşük kristallik derecesi gibi avantajları beraberinde getirir. AYPE, özellikle film üretimi ve ambalaj sektörlerinde tercih edilmekte olup, ince film formunda üretilmesi, hafiflik ve esneklik gibi özellikler sunar (Fried, 2003).

AYPE'nin fiziksel özellikleri, üretim sürecinde uygulanan polimerizasyon koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Genellikle serbest radikal polimerizasyon yöntemiyle üretilen AYPE, bu süreçte zincirlerin birbirine karışık bir şekilde bağlanmasına neden olur. Bu bağlanma yapısı, malzemenin düşük yoğunluklu olmasını ve yüksek moleküler ağırlık kazanmasını sağlar, böylece AYPE daha yumuşak, elastik ve şekil alabilir

bir hale gelir. Ancak, düşük yoğunluk bu malzemenin kimyasal direnç ve mekanik dayanıklılık açısından bazı sınırlamaları olmasına yol açabilir (Oğian, 2004).

AYPE, özellikle ambalaj endüstrisinde, gıda ve tıbbi ürünlerin korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Esneklik, darbe dayanımı ve düşük sıcaklıklarda iyi performans gösterme özellikleri, AYPE'yi geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilen bir malzeme haline getirir. Ayrıca, düşük yoğunluklu polietilenin düşük maliyetli üretim süreçleri ve geri dönüştürölme kolaylığı gibi avantajları, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır (Carraher, 2013).

Yüksek Yoğunluklu Polietilen;

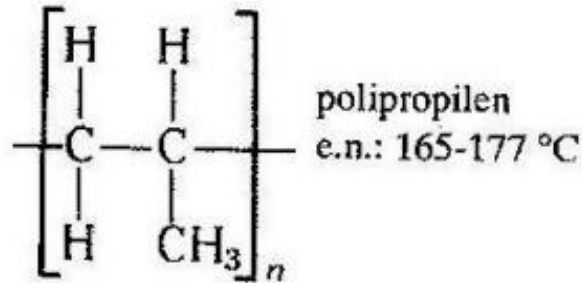
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE), polietilenin daha düzenli ve daha az dallanmış bir versiyonudur. YYPE'nin kristalin yapısı, yoğunluğunu artırırken, malzemenin sertliğini, dayanıklılığını ve kimyasal direncini yükseltir. Bu özellikler, YYPE'yi yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklı, aşındırıcı maddelere karşı direnç gösteren ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uygulamalar için ideal hale getirir. Bu nedenle, YYPE, inşaat, otomotiv ve boru hatları gibi endüstriyel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Fried, 2003).

YYPE'nin düzenli moleköler yapısı, polimerin kristalin yapısını ve yoğunluğunu önemli ölçüde iyileştirir, bu da mekanik özelliklerinde belirgin bir artış sağlar. Yüksek yoğunluk, malzemenin sert ve dayanıklı olmasına yol açarken, esneklik ve şekil alabilirlik gibi özelliklerde azalma meydana getirir. Bununla birlikte, YYPE'nin düşük sıcaklıklarda kırılma riski daha yüksek olup, bu durum malzemenin kullanım koşullarını sınırlayabilir (Fried, 2003).

Endüstriyel uygulamalarda, YYPE, dayanıklı, uzun ömürlü ve güçlü ürünler elde etmek için tercih edilmektedir. Bu malzeme, boru hatları, elektrik kabloları, otomotiv parçaları ve çöp torbaları gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, YYPE'nin çevre dostu özellikleri, geri dönüşüm kolaylığı ve yeniden kullanım potansiyeli, onu sürdürülebilir üretim süreçlerinde değerli bir malzeme haline getirmektedir (Carraher, 2013).

Polipropilen(PP);

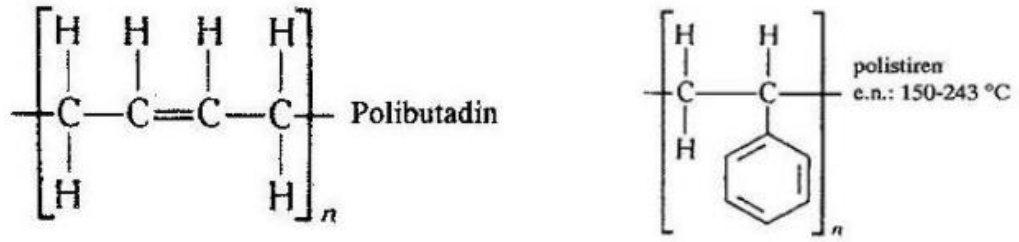
Polietilen, satış hacmi açısından dünyada en önemli üçüncü plastik malzeme olarak kabul edilmektedir. Petrokimyasal kökenli hammaddelerden üretilmesi nedeniyle, en düşük maliyetli plastikler arasında yer almaktadır. Polietilenden polipropilene geçiş sürecinde, polimer zincirlerindeki karbon atomlarından birinin üzerine bir metil grubunun eklenmesi, zincirin periyodik yapısını engellemektedir. Bu işlem sonucunda, daha dayanıklı ancak esneklikten yoksun bir malzeme elde edilmektedir. Metil gruplarının varlığı, aynı zamanda cam geçiş sıcaklıklarının yükselmesine de neden olmaktadır. Polipropilenin (PP) erime noktası 165-177°C arasında değişirken, 120°C'ye kadar şekil bozulmadan dayanıklılığını sürdürebilmektedir. PP, nem, ısı ve kimyasallara karşı gösterdiği yüksek dirençle dikkat çekmektedir. Ayrıca, düşük yoğunluğu ve iyi yüzey sertliği gibi özellikleri de onu cazip kılmaktadır. PP'nin bir başka önemli özelliği ise, menteşe uygulamalarında mükemmel bir bükülme ömrüne sahip olmasıdır. Monomerlerinin düşük maliyeti nedeniyle, PP sıkça tercih edilen bir termoplastik malzeme olarak öne çıkmaktadır. PP'nin kullanım alanları arasında ev eşyaları, mutfak gereçleri, paketleme malzemeleri ve laboratuvar ekipmanları yer almaktadır. Taşıma sektöründe, yüksek dayanıklılığından dolayı otomobil lastiklerinde de kullanımı yaygındır. Ayrıca, otomotiv parçalarında, özellikle çamurluk etekleri ve tamponlarda da PP tercih edilmektedir. Yüksek ısı direnç gösteren dolgu maddeleri içeren PP, otomobil sanayi, ısıtıcılar ve fan kanallarında da kullanılmaktadır. PP'nin uygulama alanlarından biri de, sanayi ürünlerinin taşınması için kullanılan torbalar ve film gibi ambalaj malzemeleridir. Ayrıca, yumuşak malzemelerin sarılması amacıyla film ve paketleme kutularının burğu kapaklarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Onaran, 2003).



Şekil 2.7 Polipropilen

Polistiren(PS);

Polistiren, kokusuz, saydam ve tatsız özelliklere sahip bir plastik malzeme olup, dış etkenlerden etkilenmediği sürece kırılğan bir yapıya sahiptir. Kristal propilen ile birlikte, genleşebilir özellik gösteren ve lastik takviyesi ile darbe dayanımını artırabilen önemli bir polipropilen türü olarak kabul edilmektedir. Polistirenin ana polimer zincirinde, karbon atomlarının aralarına yerleşen fenilen halkaları, polimerin oda sıcaklığında esnekliğini kaybetmesine ve kırılğan bir hale gelmesine yol açan üç boyutlu bir yapının oluşumuna neden olmaktadır. Bu türdeş polimer, işlenebilir olmasına rağmen sert ve saydamdır; ancak kırılğan bir özelliğe de sahiptir. Polistirenin darbe dayanımını ve kimyasal yapısını iyileştirmek amacıyla, polibutadin lastiği gibi materyallerle birleşmesi, malzemenin performansını önemli ölçüde artırabilmektedir.



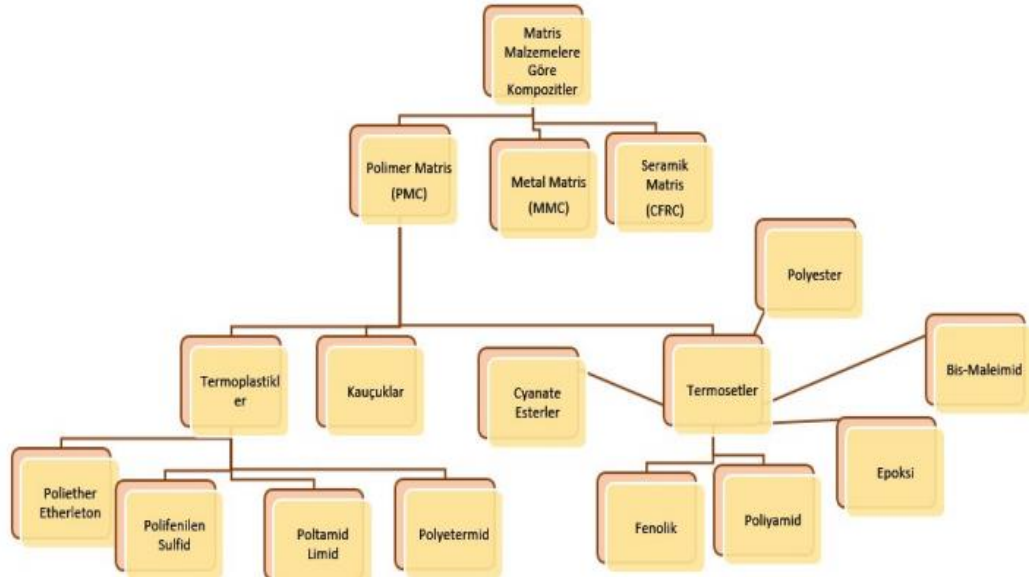
Şekil 2.8 Polibutadin, polistiren (Onaran, 2003)

Darbeye karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla, polistirene genellikle 2-12 arasındaki lastik oranlarında katkıları eklenmektedir. Ancak, polistirene lastik ilavesi yapıldığında, türdeş polimerlerin sertlikleri ve ısı dayanımları belirgin şekilde azalır. Polistirenin boyutsal kararlılığı genel olarak iyidir, fakat kalıp büzülmesi düşüktür. Ayrıca, düşük maliyetle kolayca şekil alabilmesi sağlanabilir. Bununla birlikte, atmosferik koşullara karşı dirençlerinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Organik çözücüler ve yağlarla temas halinde, polistirenler hızla etkilenebilir. Elektrik yalıtımı konusunda ise polistirenlerin iyi performans gösterdiği bilinmektedir. İşlenebilir sıcaklık aralıklarında mekanik dayanıklılıkları yeterli seviyede olup, bu özellikleri polistireni çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanışlı hale getirmektedir. Polistirenin kullanım alanları arasında, otomobil iç aksamaları, hortumlar, elektrik düğmeleri ve mutfak eşyaları öne çıkmaktadır (Onaran, 2003).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla farklı malzemenin bir araya gelmesiyle oluşur ve bu birleşim sonucunda elde edilen malzemenin, bileşenlerinden çok daha üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergilemesi beklenir. Bu malzemelerin yapısında, yük taşıma görevini üstlenen takviye elemanları, bu elemanları bir arada tutarak yükün takviye elemanları arasında düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayan matris malzemeleri ve matris ile takviye malzemeleri arasındaki yapışmayı sağlayan ara yüz fazları bulunur (Ekşi, 2007).

Kompozit malzemeler, geleneksel metalik malzemelere göre önemli avantajlara sahiptir. Bunların başında yüksek mukavemet/ağırlık oranı gelir. Takviye elemanlarının seçimi, mukavemet, hafiflik, elastiklik, elektriksel özellikler, ekonomik faktörler, ısı iletkenliği ve yorulma mukavemeti gibi kriterlere dayanır. Matris malzemesi seçiminde ise, lifler arasındaki kuvvet aktarımının etkinliği, liflerin oksidasyon, korozyon, darbe ve çevresel etkilere karşı korunması önemlidir. Ara yüzey fazı, uygulanan kuvvetin takviye fazına iletilmesini sağlar ve kompozit malzemenin dayanıklılığı üzerinde kritik bir etkiye sahip olabilir (Qu, 1993).



Şekil 3.1 Kompozitlerin matris malzemesine göre sınıflandırılması (URL-2, 2014)

Kompozit malzemeler, matris malzemeleri ve takviye elemanlarına göre çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir, bu sınıflandırma Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Kompozit malzemeler, basınç, sıcaklık gibi dışsal etkiler altında kimyasal ve mekanik bağlar aracılığıyla birleşirler. Sonuç olarak, her bir bileşenin kendine özgü avantajları, birleşik malzeme üzerinde üstün özellikler kazanır. Temelde, kompozit malzemeler üç ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler, aşağıda sıralanmıştır (Ay, 2007).

- Matris malzemesi
- Takviye elemanı
- Bağlayıcı eleman

Kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin bir araya gelerek, her bir bileşenin özelliklerini birleştiren ve yeni bir materyal oluşturan malzemelerdir. Bu malzemelerin elde edilmesi, genellikle basınç ve sıcaklık gibi dışsal etkiler altında gerçekleşen birleşim süreçleri ile sağlanır. Örneğin, çelikler içerisinde bulunan vanadyum ve krom, bir alaşım oluşturur ve bu durum, kompozit malzemeler arasında yer alabilir. Ancak alaşımlar, moleküler ve atomik düzeyde birleşim gösterdiği için, doğrudan kompozit malzeme olarak değerlendirilmemektedir. Kompozit malzemelerin özgün özellikleri, tek bir bileşenin sahip olamayacağı üstün niteliklerin farklı materyallerin birleşiminden elde edilmesi amacıyla tasarlanır. (Ay, 2007). Bu malzemelerde öne çıkan temel özellikler şunlardır:

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yorulmaya karşı dayanıklılık
- İyi aşınma direnci
- Isıya karşı yüksek direnç
- Korozyona karşı yüksek direnç
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği
- Düşük yoğunluk
- Estetik açıdan hoş bir görünüm ve iyi bir yüzey kalitesi

Bu özelliklerin birleşimi, kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip olmasına olanak tanımaktadır.

Kompozit malzemelerde, yukarıda belirtilen özelliklerin yanı sıra, farklı tasarım yaklaşımlarıyla da geliştirmeler yapılabilmektedir. Yeni malzemeler tasarlanırken, hedeflenen özelliklerin elde edilmesi amacıyla farklı matrisler veya takviye elemanları seçilebilir ve bunun sonucunda yenilikçi üretim yöntemleri belirlenebilir. Bu süreç, belirli ihtiyaçlara yönelik olarak yeni bir kompozit malzemenin oluşturulmasını sağlar. Ancak, kompozit malzemelerin avantajlarının yanı sıra, bazı durumlarda çeşitli dezavantajlarla da karşılaşılabilir. Bu dezavantajlar, üretim aşamasında karşılaşılan zorluklar, yüksek üretim maliyetleri, istenen ürün özelliklerinin tam anlamıyla elde edilememesi ve üretilen malzemelerin geri dönüşümünün zorluğu gibi unsurları içerebilir (Şahin, 2011).

Geliştirilmesi beklenen malzeme özellikleri doğrultusunda, pek çok iyileştirme yapılabilir. Yeni tasarlanması öngörülen malzemeler için hangi özelliklerin geliştirilmesi gerektiği ve hangi alanlarda iyileştirmeler yapılabileceği, malzeme matrisi ve takviye elemanlarının seçimi ile üretim yöntemlerinin belirlenmesini gerektirmektedir. Bu süreç sonucunda, kompozit malzemenin elde edilmesi sağlanır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemeler, genellikle üç ana grup altında sınıflandırılmaktadır (URL-9, 2008). Bu gruplar şu şekilde özetlenebilir:

- Metal esaslı malzemeler
- Polimer esaslı malzemeler
- Seramik esaslı malzemeler

Her bir malzeme grubunun kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak, bu malzemelerin kullanımı söz konusu olduğunda, en çok aranan özellikler arasında akma dayanımı, elastisite modülü, kırılma tokluğu, yoğunluk ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı gibi temel karakteristikler öne çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek veya orta yoğunluğa sahip olup, tokluk ve dayanım açısından en uygun özelliklerin gözlemlendiği metaller, özellikle metalurji ve makine mühendisliği alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (URL-9, 2008).

Metallerin saf hallerinde genellikle yumuşak ve düşük dayanımlı oldukları bilinmektedir. Ancak, bu malzemelerin alaşımları, soğuk şekillendirme ve ısıtma işlemleriyle dayanımının artırılabilir. Bu tür alaşımlar, ani yüklemelere karşı bile kırılmadan yükü tüm sistem üzerinde eşit şekilde dağıtarak güvenli bir yapı oluşturur. Örneğin, çelik, aşırı zorlamalara maruz kaldığında kırılmaz ve akma dayanımı aşıldığında

kalıcı deformasyona uğrar, ancak yükü tüm elemanlarına iletme yeteneği sayesinde sistemin güvenliği korunmuş olur. Ayrıca, metallere döküm ve plastik şekil verme gibi işlemler uygulanarak istenilen şekiller verilebilir. Karmaşık montajlar çerçevesinde, kaynak ve vida gibi yöntemlerle bu malzemeler birleştirilebilir (şahin, 2000).

Plastikler, yoğunlukları bakımından metallerden belirgin şekilde daha hafif olan bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Plastiklerin, karmaşık geometrilere ve şekillere sahip parçaların üretimi konusunda büyük avantajlar sunduğu gibi, talaşlı işleme işlemleri de oldukça kolaydır. Bununla birlikte, metallerin erime noktaları ile karşılaştırıldığında, plastiklerin ergime sıcaklıkları daha düşüktür. Ancak plastiklerin çevresel faktörlere karşı dirençleri sınırlıdır ve bu nedenle kullanımları bazı durumlarda tehlikeli olabilir. Ayrıca, mekanik özellikleri genellikle metaller ve seramiklere kıyasla daha zayıf seviyelerdedir (şahin, 2000).

Seramikler ise düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleriyle dikkat çeker. Bu malzemeler, üstün dayanıklılıklarına rağmen kırılgan bir yapıya sahiptir. Kimyasal ve termal etkilere karşı dirençli olmaları, onları belirli uygulamalarda cazip kılmakla birlikte, yüksek ergime sıcaklıkları ve sertlikleri nedeniyle işlenmeleri zordur. Ayrıca, seramikler genellikle yalıtkan özellikler gösterir. Kırılgan yapıları ve diğer malzeme türlerine kıyasla daha yüksek üretim maliyetleri, seramiklerin dezavantajlarını oluşturur. Bu sebeple, seramiklerin üretimi için tasarım ve üretim süreçleri büyük bir özenle planlanmalıdır (URL-9, 2008).

Metaller, seramikler ve polimerler arasında her biri için avantajlar ve zayıf yönler bulunmakta olup, spesifik uygulama ihtiyaçları doğrultusunda her bir malzemenin farklı özellikleri gerekebilir. Bir malzemenin, plastik kadar hafif, seramik kadar sert ve metal kadar tokluk gösteren özelliklere sahip olması günümüzde mümkün değildir. Ancak, bu malzemelerin karakteristik özelliklerine yakın performans sunabilen yeni malzemelerin üretilmesi artık mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin önemi giderek artmaktadır (şahin, 2000).

3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, şekil 3.1'de gösterildiği gibi, matris malzemelerine ve takviye elemanlarına göre farklı kategorilerde sınıflandırılabilir.

3.1.1 Matris malzemesine göre sınıflandırma

Kompozit malzemeler, üretim süreçlerinde kullanılan matris malzemelerine bağlı olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (URL-9, 2008):

- Metal Matrisli Kompozitler
- Yüksek Sıcaklık Matrisli Kompozitler
- Polimer Matrisli Kompozitler

Metal Matrisli Kompozitler;

Metal matrisli kompozitler, özellikle uzay, havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yüksek performans gereksinimi olan alanlarda kullanılmaktadır. Plastik matrislere kıyasla, bu kompozitlerin mukavemeti, tokluğu ve rijitliği önemli ölçüde daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu özellikler, kompozit malzemelerin daha sağlam ve dayanıklı hale gelmesine olanak tanımaktadır. Ancak, her tür elyaf ile ideal bir kompozit malzeme üretilmemesi, bu malzemelerin dezavantajlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu olumsuzluğun üstesinden gelmek amacıyla, boron elyafı gibi takviye malzemelerinin kullanımı tercih edilmektedir. Bununla birlikte, metal matrisli kompozitlerin üretimi, maliyetlerinin yüksek olması ve üretim sürecinin zorluğu nedeniyle bazı zorluklar içermektedir (Zor, 2016).

Metal matrisli kompozitlerde, matris malzemesi olarak magnezyum, dökme demir, bakır, çelik, alüminyum ve bronz gibi metaller kullanılmaktadır. Bu metallerin yanında, bazı durumlarda takviye elemanları kullanılmadan da kompozitler üretilabilmektedir. Takviye malzemesi olarak ise plastik, metal, ağaç tozu, seramik ve pudra gibi farklı materyaller tercih edilebilmektedir (Şahin, 2000). Alüminyum ve alaşımları ile yapılan kompozit üretimi, 450-550 °C sıcaklık aralığında sıcak pres yöntemi ile gerçekleşir. Bu kompozit malzemeler, 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilir ve elektrik iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılabilir.

Magnezyum, alüminyuma göre mukavemet açısından daha düşük bir performans sergilese de, daha düşük yoğunluğu sayesinde özgül mukavemeti alüminyumdan yüksektir. Ancak, magnezyumun korozyon direnci düşüktür, rijitliği ve yorulmaya karşı mukavemeti zayıftır, yüksek sıcaklıklarda aşınma ve sünme eğilimi gösterir. Çinko ve alaşımlarının

düşük ergime sıcaklıkları, ağır yüklemelere ve düşük devirlerde aşınmaya karşı yüksek direnç göstermeleri, yoğunluklarının düşük olması, oda sıcaklığındaki iyi yorulma dayanımları ancak düşük sıcaklıklarda gevrekleşmeleri gibi özellikler öne çıkmaktadır. Uzun süreli kullanımda ise sünekliklerinin arttığı ve dayanımlarının düştüğü gözlemlenmektedir. Titanyum, ısı genleşme katsayısının en düşük olduğu metallerden biridir ve alüminyuma göre çok daha yüksek rijitlik ve mukavemet özelliklerine sahiptir. Ayrıca, korozyona karşı oldukça dirençlidir. Titanyum ve alaşımlarıyla kompozit üretimi, 420-550 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilebilmektedir (URL-9, 2008).

Seramik Matrisli Kompozitler;

Seramikler, bir veya daha fazla metalin, metal olmayan malzemelerle birleşip sinterlenmesiyle elde edilen inorganik bileşiklerdir. Bu malzemeler, yüksek mukavemet seviyelerine sahip olmalarına rağmen, kırılgan bir yapıya sahiptirler. Isıl dayanımları ve ergime sıcaklıkları oldukça yüksektir; örneğin, silisin ergime sıcaklığı 1750°C, alüminatın ise 2050°C'dir. Bunun yanı sıra, seramikler elektriksel ve termal yalıtkan özellikler gösterir (Zor, 2016).

Seramik matrisli kompozitlerde, bağlayıcı eleman kullanılmadan da üretim yapılabilir. Ancak, metal seramik veya diğer bağlayıcıların kullanılması da mümkündür. Takviye malzemesi olarak seramik, plastik, metal veya ağaç tozu gibi farklı seçenekler tercih edilebilir (Şahin, 2000).

Polimer (Plastik) Matrisli Kompozitler;

Polimer matrisli kompozitlerde, bağlayıcı olarak diğer polimerler ve kimyasal maddeler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise ağaç tozu, pudra ve metal gibi çeşitli materyaller tercih edilebilir (Şahin, 2000).

Polimer esaslı matris malzemeler, maliyet açısından uygunlukları, kolay şekil alabilme yetenekleri ve amaca yönelik üretim kolaylıkları gibi avantajlar sunmaktadır. Polimerlerin kompozit malzemelerde %90 oranında bulunması nedeniyle, bu tür malzemelere "takviye edilmiş kompozit" denilmektedir.

3.1.2 Takviye malzemesine göre sınıflandırma

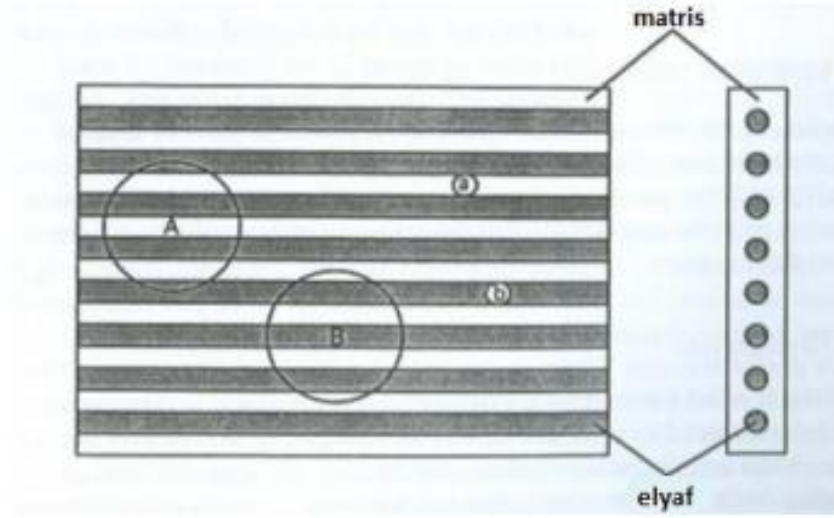
Takviye malzemelerine göre kompozitler, kullanılan elemanlara bağlı olarak farklı kategorilere ayrılır ve bu sınıflandırma, malzemenin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve performansını etkileyen dört ana gruba ayrılmaktadır (URL-2, 2014):

- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma (Hibrit) Yapılı Kompozitler

Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler;

Yüksek rijitlik ve bükülmezlik değerlerine sahip elyafların, elastisite modülü ve dayanımı düşük matris malzemeleriyle birleşmesiyle oluşan kompozitler, mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlar. Bu tür elyafların matris fazına eklenmesiyle, kompozitlerin çekme ve yorulma dayanımları, bükülmezlik ve rijitlik gibi özelliklerinde olumlu artışlar gözlemlenir. Elyaf oranındaki değişiklikler, kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Elyaf takviyeli malzemeler, yüklendiklerinde, yükün büyük bir kısmı matris malzemesi tarafından elyafa iletilir ve takviye malzemesi bu yükü karşılamakta rol oynar. Bu durum, kompozitin rijitlik ve dayanım özelliklerinin yanı sıra çalışma sıcaklıklarında da iyileşme sağlar. Elyafın kompozit içindeki yönelimi, malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Elyaf, şerit fitil, örme veya tabaka şeklinde yönlü olarak yerleştirilebilir ve sürekli ya da süreksiz elyaflar olarak iki gruba ayrılabilir. Ayrıca, cam, aramid, karbon, silisyum ve metal gibi malzemeler de elyaf olarak kullanılabilir (Şahin, 2000).

Elyaf takviyeli kompozit levhalar, Resim 3.1’de görüldüğü üzere takviye/elyaf ve matris malzemelerinin birleşiminden oluşur. Bu bileşenler, birbirine karışmaz ve çözünmez (Zor, 2016).



Resim 3.1 Elyaf takviyeli kompozit levha (Şahin, 2000)

Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler;

Bir malzemenin matris malzemesi içinde parçacıklar biçiminde bulunması, kompozit malzeme üretimi için yaygın bir yöntemdir. Bu tür malzemeler, tüm yönlerde aynı davranış sergileyen izotropik bir yapıya sahip olup, üretilecek kompozitin mukavemeti, matris içerisinde bulunan parçacıkların sertlik özelliklerine bağlı olarak şekillenir. Elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi, parçacık takviyeli kompozitlerde de matris ve partiküller birbirine çözünmez ve ayrı fazlar olarak kalır (URL-10, 2023)

En yaygın kullanılan plastik matrislerde, metal parçacıklar yer alır ve bu parçacıklar, malzemenin elektriksel ve ısı iletkenlik özelliklerini artırır. Metal matrislerde ise, seramik partiküller kullanıldığında, yüksek sıcaklık ve sertlik dayanımları önemli ölçüde yükselir. Nanometre boyutundaki partiküllere sahip malzemeler ise nanokompozit olarak adlandırılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, iki boyutlu veya tel şeklinde olan parçacıklar ya da sıfır boyutlu partiküllerin matrisle birleşmesiyle oluşturulmaktadır. (Zor, 2016).

Bu tür kompozitlerde, partikül boyutlarının genellikle 1µm'den büyük olduğu ve elyaf hacim oranının %25'ten fazla kullanılmadığı gözlemlenmektedir. En sık kullanılan parçacıklar, Al_2O_3 ve SiC gibi seramiklerden oluşmaktadır (Zor, 2016).

Karma (Hibrid) Kompozitler;

İki veya daha fazla farklı elyaf türünün bir arada kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemeler, hibrid kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Bu tür malzemelere örnek olarak, kevlar lifi verilebilir. Kevlar, ucuz ve dayanıklı bir elyaf olmakla birlikte, basma mukavemeti açısından düşük bir performans sergiler. Buna karşın, grafit lifi, pahalı bir malzeme olmasına rağmen, iyi bir basma mukavemeti sunmasına rağmen, tokluğu daha düşüktür. Kevlar ve grafit liflerinin birlikte kullanılmasıyla üretilen hibrid kompozitler, grafitten daha yüksek bir tokluk, kevlandan ise daha düşük maliyet ve daha yüksek basma kuvveti sunar (Zor, 2016).

3.2 Polimerlerin Özellikleri

Polimerlerin özellikleri, farklı kategorilerde ele alınarak incelenebilir ve her bir özellik, polimerlerin performansını, kullanım alanlarını ve uygulama biçimlerini doğrudan şekillendirir. Bu bağlamda, polimerlerin özellikleri; mekanik, termal, morfolojik gibi çeşitli açılardan değerlendirilebilir ve her bir özellik, malzemenin belirli bir amaca uygunluğunda önemli bir rol oynar.

3.2.1 Mekanik özellikler

Mekanik özellikler, polimerlerin belirli uygulama koşullarında nasıl performans göstereceğini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Çekme dayanımı, bir polimerin gerilme altında ne kadar kuvvet taşıyabileceğini ifade ederken, esneklik modülü, polimerin deformasyona karşı gösterdiği direnç seviyesini tanımlar. Uzama, polimerin çekme kuvvetine karşı ne kadar deformasyona uğrayabileceğini belirtirken, yorulma dayanımı, malzemenin sürekli stres altında uzun süreli aşınmalara karşı dayanıklılığını ölçer. Bu mekanik özellikler, polimerlerin dayanıklılığı, esnekliği ve uzun vadeli performansını değerlendirmek için kritik bilgiler sunar (Young ve Lovell, 2011).

Üç nokta eğilme dayanımı, polimer malzemelerin eğilme gerilmesi altında ne derece yük taşıyabileceğini gösteren önemli bir mekanik özelliktir. Bu test, polimerin rijitliğini ve eğilme momentine karşı gösterdiği direnci değerlendirir. Eğilme modülü, malzemenin elastik sınırlar dahilinde eğilme deformasyonuna karşı ne kadar direnç gösterdiğini ortaya koyar. Bu parametreler, özellikle yapısal uygulamalarda polimerin burkulma ve bükülme

davranışlarını öngörmek açısından kritik öneme sahiptir. (Callister, W.D. ve Rethwisch, D.G. 2018)

Darbe dayanımı, polimerlerin ani ve yüksek enerjili yüklemelere karşı kırılmadan önce ne kadar enerji absorbe edebileceğini ifade eder. Bu özellik, özellikle dinamik yüklerin bulunduğu uygulamalarda, malzemenin darbe altında gösterdiği performansın değerlendirilmesinde kullanılır. Charpy ve Izod gibi standart test yöntemleri ile ölçülen darbe dayanımı, polimerin tokluk seviyesini ve kırılma öncesi enerji yutma kapasitesini ortaya koyar. Bu bağlamda, darbe dayanımı, özellikle otomotiv, ambalaj ve koruyucu ekipman tasarımı gibi alanlarda malzeme seçimi için belirleyici bir kriterdir. (Strong, A.B. 2006)

3.2.2 Termal özellikler

Termal özellikler, polimerlerin ısıya karşı verdikleri tepkiyi belirleyen önemli faktörlerdir. Erime sıcaklığı, polimerin kristal yapısının bozulmaya başladığı noktayı işaret eder ve bu sıcaklık, polimerin işleme süreçlerinde kritik bir rol oynar. Camsı geçiş sıcaklığı malzemenin viskoz özellik kazanmaya başladığı sıcaklık olup, polimerin kullanım sıcaklık aralığını ve mekanik davranışını etkileyen temel bir parametredir. Termal genleşme, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak polimerlerin boyutlarında meydana gelen değişiklikleri yansıtırken, ısı iletkenliği, polimerin ısıyı iletme yeteneğini ortaya koyar. Bu termal özellikler, polimerlerin ısıya maruz kaldığında nasıl davranacağını ve hangi sıcaklık koşullarında kullanılabileceğini anlamada önemli bilgiler sunar (Young ve Lovell, 2011).

3.2.3 Morfolojik özellikler

Morfolojik özellikler, bir polimerin içyapısının ve düzeninin detaylı bir şekilde incelenmesidir. Polimerlerin kristalinlik oranı, yapısal birimlerin düzenli sıralanışına ve yoğunluğuna bağlı olarak belirlenir; kristalin yapılar, genellikle yüksek mukavemete sahip olup, özgül fiziksel özellikler sergiler. Amorf yapı ise, polimer zincirlerinin düzensiz bir biçimde sıralandığı ve genellikle esnek, şeffaf gibi karakteristik özellikler gösterdiği durumu ifade eder. Mikro yapı, polimerlerin mikroskopik seviyedeki yapısal düzenini, zincirlerin sıralanışı ve yönlenişi açısından değerlendiren bir özelliktir. Polimerlerin morfolojik yapıları, onları çeşitli endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda kullanılabilir kılan önemli bir faktördür. (Young ve Lovell, 2011).

4. TERMOPLASTİKLER VE GENEL BAKIŞ

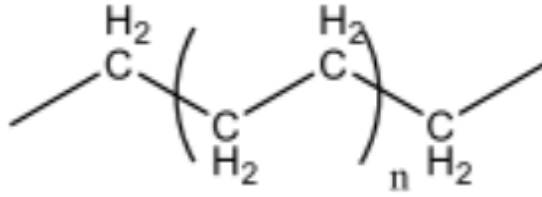
Termoplastik malzemeler, zincirler arasındaki kovalent bağların gerilemesiyle elastik bozulmalara yol açan esnek ve doğrusal yapılı zincirlerden oluşmaktadır. Bu özellikleri sayesinde termoplastik matrisler, termosetlere kıyasla çok daha düşük işlem maliyetleri, tasarımsal esneklik ve karmaşık yapıların kolayca şekillendirilmesi gibi avantajlar sunar. Ayrıca, termoplastik malzemelerin geri dönüştürülebilirliği, kompozit malzemelerin sürdürülebilirliği açısından önemli bir fırsat yaratmaktadır. Termoplastiklerin içyapısındaki kristal ve amorf bölümler, bu malzemelere hem esneklik hem de mukavemet kazandırmaktadır (Saheb, 1999).

Termoplastik elastomerler, mekanik özellikler açısından vulkanize kauçuk benzeri performans sergileyebilir. Bu malzemeler, belirli sıcaklık koşullarında şekillendirilebilir. Bu özellik, termoplastiklerin çok parçalı yapısına dayanmaktadır. Yumuşak segmentler, kauçuk yapıları bir matrisi oluştururken, sert segmentler, çift taraflı kimyasal ve fiziksel etkileşimlerle makro moleküller üzerinde çapraz bağlar oluşturur. Normal koşullarda, fiziksel çapraz bağlar, molekülleri birbirine kilitler. Ancak sıcaklık arttıkça, bu çapraz bağlar kırılmaya başlar ve malzeme sıvı hale geçer. Bu özellik, termoplastiklerin çeşitli işleme yöntemlerine uygun olmasını sağlar. Termoplastikler, mekanik dayanıklılığının yanı sıra ısı ve korozyon direnci nedeniyle, poliolefinler gibi malzemeler, yaygın olarak kullanılan termoplastik materyaller arasında yer almaktadır. (Engle, 1993).

Poliolefinler, olefinlerin polimerizasyonu yoluyla elde edilen sentetik reçineler sınıfına ait malzemelerdir. Olefinler, moleküllerinde bir çift bağla birbirine bağlı iki karbon atomu içeren hidrokarbonlardır. Genellikle, doğal gazlardan ya da petrolün düşük moleküler ağırlıklı bileşenlerinden türetilirler. Bu gruptaki en bilinen bileşiklerden biri propilendir. Bu iki bileşik, "düşük olefinler" olarak sınıflandırılır, zira her biri yalnızca bir çift karbon atomu içerir. Molekül başına iki veya daha fazla çift bağa sahip olan "yüksek olefinler" arasında ise bütün ve metilpenten bulunur. (URL-5, 2021).

Olefinler, polimerleştirilebilir ve bu özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan polimerlerden bazıları, polipropilen ve polietilendir. Bu plastikler, çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmakta olup, üretim miktarlarının yüksekliği nedeniyle "poliolefin" terimi genellikle polietilen ve polipropilen için kullanılmaktadır. Poliolefinler ailesinde polietilen, yaygın olarak tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (URL-6, 2020).

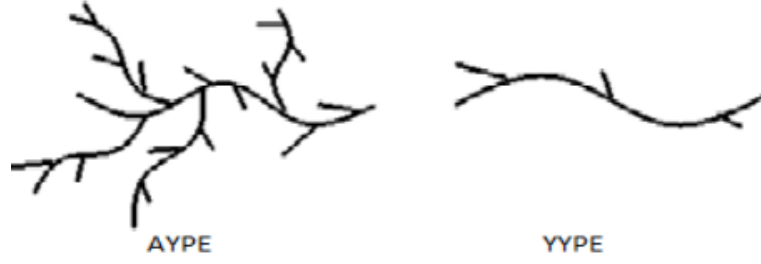
Polietilen, etilen (C_2H_4) monomerlerinin polimerizasyonu ile elde edilen uzun zincirli bir sentetik reçinedir. Temel yapısal düzeyde, polietilen molekülü, her karbon atomuna ($-CH_2-$) bağlı bir çift hidrojen atomu ile kovalent bağlarla bağlanmış karbon atomlarından oluşan zincirlerden meydana gelir. Bu zincirlerin uçları ise metil grupları ($-CH_3$) ile sonlandırılır (Peacock, 2000). Şekil 4.1’de polietilenin yapısı daha ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4.1 Polietilenin yapısı (URL-5, 2021)

Polietilen (PE), dünya genelinde sentezlenen reçine endüstrisinin en büyük üretim kapasitesine sahip olan ve en yaygın kullanılan polimerlerden biri olarak öne çıkmaktadır. PE, düşük modül ve sertlik, darbe direnci, yüksek kimyasal korozyon dayanımı, iyi düzeyde tokluk ve mükemmel işlenebilirlik gibi önemli özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, polietilenin çevresel stres çatlamlarına karşı zayıf direnç göstermesi ve yanıcı olması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, PE, 50 derecenin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli kullanım için uygun değildir (Strapasson ve ark., 2015). PE, yüksek tokluk, iyi kimyasal direnç, düşük nem emilimi, iyi elektriksel iletkenlik ve düşük sürtünme katsayıları gibi avantajlar sunarak işleme süreçlerinde kolaylık sağlamaktadır (Rosato, 2004).

Polietilenin yapısında sınırlı sayıda dallanma bulunması, polimer zincirlerinin birbirine daha yakın bir şekilde düzenlenmesine olanak tanır. Bu düzenleme, yüksek kristallik yapıya sahip, yoğun bir malzemenin ortaya çıkmasına yol açar. Polimer zincirlerinin farklı yoğunluk seviyelerine sahip formları, düşük yoğunluklu polietilen (AYPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) olarak farklılaşır. Bu iki tür polietilenin özellikleri, aşağıda verilen Tablo 4.1’de detaylı bir şekilde sunulmaktadır (Carraher, 2013).



Şekil 4.2 Polimer zincirlenmesi (Carraher, 2013)

Tablo 4.1 AYPE ve YYPE nin özellikleri (Carraher, 2013)

Özellikler	YYPE	AYPE
Elastik Modülü (Mpa)	960 – 1000	102 – 240
Darbe Direnci (J/m)	27 – 160	0.67 – 21
Uzama (%)	20 – 100	100 – 700
Dayanım (Mpa)	18	7 – 17
Erime Sıcaklığı (°C)	120 – 140	106 – 112
Yoğunluk (g/cm ³)	0.941 - 0.965	0.910 - 0.925

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE), astar yapılı bir polimer olarak tanımlanabilir ve yapısında birkaç kısa dal içermektedir. YYPE'nin kristalleşme oranı %80-90 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Yoğunluğu 0.941-0.965 g/cm³ arasında değişirken, üretim sıcaklıkları 180-230°C, erime sıcaklıkları ise 120-140°C arasında yer almaktadır. Bu özellikleri sayesinde düşük maliyetli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. YYPE, yüksek çekme dayanıklılığı, düşük su emme kapasitesi, iyi kimyasal direnç ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, işlenmesi oldukça kolaydır. YYPE, 100°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir. Ancak, bu malzeme kolayca deforme olabilmekte ve yanıcı bir özellik göstermektedir. UV ışınlarına ve ısıya karşı dirençleri ise sınırlıdır. Mekanik ve termal özellikleri, Düşük Yoğunluklu Polietilen (AYPE) ile karşılaştırıldığında çok daha iyidir, ancak esneklik, sertlik ve ölçeklenebilirlik açısından AYPE'den daha düşük performans sergiler. Bu nedenle, YYPE genellikle buz kutuları, ambalaj şişeleri, halatlar ve borular gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Li ve ark., 2019).

Düşük Yoğunluklu Polietilen (AYPE), toksik olmayan ve oldukça dallı bir polimer türüdür. AYPE'nin yoğunluğu 0.910-0.925 g/cm³ arasında değişmektedir. Bu malzeme, esneklik, düşük sıcaklıklarda yüksek darbe mukavemeti, iyi şeffaflık ve su geçirmezlik gibi

üstün özelliklere sahiptir. Ancak, UV ışınlarına karşı zayıf direnç, düşük sertlik ve dayanıklılık gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca, oldukça yanıcı bir malzeme olarak kabul edilmektedir. AYPE'nin erime sıcaklığı 105-115°C, işleme sıcaklığı ise 150-210°C arasında değişmektedir. AYPE, genellikle plastik filmler, sentetik ürünler ve çöp torbaları gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Zhongyang ve Shuangjun, 2011).

4.1.1 Genel amaçlı termoplastikler

Plastik malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki en belirgin avantajlarından biri, nispeten düşük yoğunluklara sahip olmalarıdır. Örneğin, demirin yoğunluğu 7.8 g/cm³ iken, genel amaçlı plastik malzemelerin yoğunluğu yaklaşık 1 g/cm³ civarındadır. (Strong, 2006). Bu özellik, plastiklerin hafiflik ve taşıma kolaylığı sağlama açısından önemli bir avantaj oluşturur.

Bununla birlikte, plastik malzemelerin çekme dayanımlarının metallerden çok daha düşük olması, bazı mühendislik uygulamalarında istenmeyen bir durum yaratabilir. Plastiklerin çekme dayanımları genellikle 70 MPa'nın altındadır. Plastik malzemelerin çekme dayanımları, metal malzemelerde olduğu gibi, özel cihazlar kullanılarak ölçülmektedir. Plastiklerin mekanik dayanıklılıklarını değerlendirmek için en yaygın kullanılan testlerden biri, çentikli sarkaç darbe deneyidir (Osswald & Menges, 2012).

Plastik malzemeler, elektriksel yalıtıcılık özellikleriyle de önemli bir rol oynamaktadır. Plastiklerin sağladığı dielektrik dayanımlar, elektriksel yalıtım dirençleri olarak tanımlanır ve genellikle volt-milimetre (V-mm) cinsinden ölçülür (Harper, 2002). Bu malzemeler, elektriksel izolasyon sağlayan ideal materyaller arasında yer alır.

Plastiklerin sıcaklık dayanımları, genellikle diğer malzemelere kıyasla daha düşük seviyelerdedir. Termoplastik malzemelerin çoğu, 50–150 °C arasında bir sıcaklık aralığında kullanılabilir. Ancak, bazı termoplastik malzemeler, örneğin teflon, 288 °C'ye kadar dayanım gösterebilir (Rosato & Rosato, 2004).

Bu özellikler ve plastik malzemelerin genel performansı hakkında daha ayrıntılı bilgi, aşağıdaki Tablo 4.2'de sunulmaktadır.

Tablo 4.2 Genel amaçlı plastiklerin bazı özellikleri (Onaran 2003)

Malzeme	Darbe Dayanımı (Izod, J/m)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Plitetrafloretilen	64.05-362.98	6.9-27.6	2.1-2.3
Selüloz, Asetat	133.45-213.52	20.7-55.2	1.2-1.3
Genel Maksatlı Akirilik	122.77	75.9	1.11-1.19
Genel Maksatlı (ABS)	320.28	40.7	1.05-1.07
Stiren Akirilonitril (SAN)	21.35- 26.69	69-82.8	1.08
Genel Maksatlı Polipropilen	21.35- 117.4	33-38	0.90-0.91
Bükülmez, Klorlanmış PVC	53.38- 298.9	51.7-62.1	1.49-1.58
Polietilen, (AYPE-YYPE)	21.35-747.3	6.2-17.2	0.92-0.93
		20-37.2	0.95-0.96

Genel amaçlı kullanımda en yaygın tercih edilen termoplastik malzemeler arasında polietilen, polipropilen, polistiren, polivinil klorür, poliakrilonitril, stiren-akrilonitril (SAN), polimetil metakrilat (PMMA), akrilonitril-butadien-stiren (ABS) ve floroplastikler öne çıkmaktadır (Onaran, 2003).

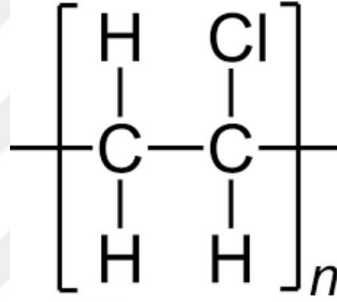
Polivinil klorür (PVC);

Polivinil Klorür (PVC), vinil klorür monomerinin polimerizasyonu yoluyla elde edilen ve dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan sentetik polimerlerden biridir. Üretim hacmi bakımından, polietilen ve polipropilenden sonra en fazla üretilen üçüncü plastik türü olan PVC, geniş uygulama alanlarıyla dikkat çekmektedir. Sert (rijit, RPVC) ve esnek olmak üzere iki temel formda üretilmektedir. Sert PVC; özellikle inşaat sektöründe boru, tesisat parçaları, pencere ve kapı profilleri gibi yapı malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yönüyle, geleneksel yapı malzemeleri olan ahşap, beton ve kilin yerini aldığı birçok uygulamada ön plana çıkmıştır. PVC'nin esnek formu ise, üretim sürecine ftalat gibi plastikleştiricilerin ilave edilmesiyle elde edilmektedir. Bu yumuşatılmış form, başta atık su boru sistemleri, kablo yalıtımları, yapay deri ürünleri, şişirilebilir nesneler ve kauçuk alternatifi olarak birçok farklı endüstride kullanılmaktadır. PVC, ayrıca şişe ve ambalaj ürünlerinden banka ve üyelik kartlarına kadar pek çok alanda da yer bulmaktadır (URL-11, 2022)

Son 50 yılda, PVC'nin sağlık sektöründeki kullanımı da önemli ölçüde artmıştır. Kan torbaları, infüzyon setleri, kateter, dren, stoma ürünleri gibi birçok tıbbi sarf malzemesi, PVC'nin kimyasal kararlılığı, işlenebilirliği ve biyolojik uyumluluğu sayesinde üretilmektedir. PVC'nin üretiminde kullanılan vinil klorür monomeri (VCM), yalnızca bu polimerin sentezi için kullanılmakta olup toksik yapısı nedeniyle diğer alanlarda doğrudan

kullanılmamaktadır. Buna rağmen, polimer hâlindeki PVC, oldukça kararlı bir yapı sergilemekte, uzun süreli depolamaya uygun olmakta ve toksik özellik göstermemektedir. Tarihsel olarak, 1970’li yıllara kadar vinil klorür aerosol spreylerde itici gaz olarak ve kısa süreli anestezi olarak da kullanılmış, ancak toksik etkileri nedeniyle bu uygulamalardan vazgeçilmiştir. (Vikipedi, 2024).

Günümüzde PVC, yaklaşık 40 milyon tonluk yıllık küresel üretim hacmiyle en önemli termoplastik reçinelerden biridir. Bu üretimin büyük kısmı, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin tarafından gerçekleştirilmekte olup, özellikle ABD düşük maliyetli klor ve etilen üretim kapasitesi sayesinde başlıca üretim bölgelerinden biri konumundadır. Çin ise hem büyük bir üretici hem de en büyük tüketici ülkeler arasında yer almaktadır. (Vikipedi, 2024).



Şekil 4.3 Polivinil klorürün kimyasal bağ yapısı (URL-12, 2024)

Stiren-Akrilonitril (SAN);

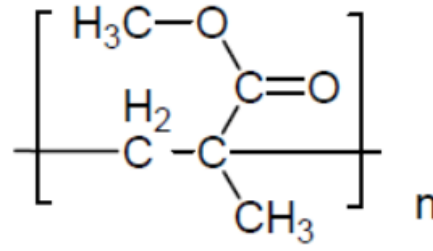
Yüksek performanslı termoplastikler arasında yer alan SAN (styrend-akrilonitril) reçineleri, stiren ve akrilonitrilin rastgele bir biçimde birleşerek amorf bir polimer yapısı oluşturmasıyla meydana gelir. Bu polimerizasyon sürecinde, polimer zincirleri arasında oluşan hidrojen bağları, çekme kuvvetlerini artırarak kutuplanmayı teşvik eder. Bu etkileşimler sonucunda, SAN reçineleri, polistirene kıyasla üstün kimyasal direnç, yüksek ısıl dayanım, mükemmel yük taşıma kapasitesi ve yüksek tokluk değerleri sergiler. SAN termoplastikleri, işlenmesi kolay olmalarının yanı sıra, yüksek parlaklık ve saydamlık özellikleriyle de dikkat çeker. Aynı zamanda, sert yapıları ile tanınır. SAN reçinelerinin başlıca uygulama alanları arasında otomotiv sektöründe gösterge panelleri, ön paneller, çamurluk parçaları; ev eşyalarında mutfak düğmeleri ve karıştırıcı kapları; tıbbi cihazlarda ise şırıngalar ve bardaklar bulunmaktadır. (URL-13, 2024).

Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS);

Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) polimeri, akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinin birleşimiyle elde edilen bir termoplastik malzemedir. Bu malzeme, üstün darbe dayanımı, kolay işlenebilirlik ve iyi mekanik özellikler sunmasıyla dikkat çeker. ABS'nin geniş mühendislik uygulama alanlarındaki başarısı, her bir bileşenin malzemenin genel özelliklerine sağladığı katkılardan kaynaklanmaktadır. Akrilonitril, kimyasal ve ısı direnç ile tokluk özellikleri sağlarken, bütadien darbelere karşı dayanıklılık ve düşük sıcaklıklarda performansını koruma yeteneği kazandırır. Stiren ise, sertlik, işlenebilirlik ve yüzey parlaklığını artıran özellikleriyle katkı sağlar. ABS'nin darbe dayanımının, içerdiği lastik oranı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, lastik miktarındaki artış, malzemenin ısı direnç ve çekme dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. ABS'nin başlıca uygulama alanları arasında boru bağlantıları ve borular yer almakta olup, özellikle pis su ve havalandırma boruları gibi inşaat sektöründe yoğun kullanım alanlarına sahiptir. Ayrıca, otomotiv endüstrisinde araç parçaları, beyaz eşya sektöründe buzdolabı kapakları ve iç astarları, ofis ekipmanlarında ise daktilo, telefon ve bilgisayar bileşenleri gibi çok çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Elektronik sektöründe ise elektro mıknatısların girişim ve radyo frekans kalkanları olarak kullanılmaktadır (URL-14, 2014).

Polimetilmetakrilat (PMMA);

Polimetil metakrilat (PMMA), sert ve saydam özelliklere sahip bir termoplastik malzemedir. Atmosferik koşullara karşı gösterdiği yüksek dayanıklılık ve darbe mukavemeti ile dikkat çeker; bu özellikleri, camlara kıyasla çok daha üstündür. Ticari olarak plexiglass veya lucite adıyla bilinen bu malzeme, akrilik grubu termoplastiklerin en önemli ve yaygın türünü oluşturur. PMMA'nın ana karbon zincirlerinde metakrilat ve metil gruplarının belirli aralıklarla yerleşmesi, moleküler yapısında üç boyutlu düzen engelleri oluşturarak malzemeyi sert ve nispeten daha dayanıklı hale getirir. Karbon atomlarının rasgele dizilimi, malzemenin amorf yapısını güçlendirirken, görünür ışığı tam olarak geçirmesine olanak tanır. Bunun sonucunda, PMMA mükemmel optik şeffaflık sergileyen bir yapıya sahip olur. Ayrıca, dış ortam koşullarına karşı gösterdiği direnç, malzemenin uzun ömürlü kullanımını destekler. PMMA'nın başlıca uygulama alanları arasında deniz ve hava taşıtlarının pencereleri, dış mekan aydınlatma elemanları, otomobil arka lambaları, reklam panoları, koruyucu gözlükler, düğmeler ve kol parçaları yer almaktadır (URL-15, 2020).



Şekil 4.4 Polimetilmetakrilat'ın kimyasal gösterimi (URL-16, 2015)

Floroplastikler;

Flor içeren monomerlerden türetilen polimerler veya plastikler, floroplastikler olarak adlandırılmaktadır. Bu malzemeler, mühendislik uygulamaları için ideal özellik birleşimlerine sahip olup, zararlı kimyasal ortamlara karşı yüksek direnç ve mükemmel yalıtkanlık özellikleri sunar. Floroplastikler, yüksek oranda flor içeren bileşiklerin düşük sürtünme katsayıları sayesinde kendi kendine yağlama ve yapışmama özelliklerine sahip olurlar. Bu özellik, özellikle zorlayıcı koşullarda performans göstermelerini sağlar. Politetrafloroetilen (PTFE) ve poliklorotrifloroetilen (PCTFE), en yaygın kullanılan floroplastik malzemeler arasında yer alır. Floroplastiklerin başlıca kullanım alanları arasında, kimyasal dayanıklılığa sahip boru ve pompa parçalarının üretimi, yüksek sıcaklıkta çalışan kabloların yalıtımı, kalıplama ile üretilen elektriksel bileşenler, yapışmaz kaplama malzemeleri, kimyasal işlem cihazları, elektrik sanayi uygulamaları ve conta üretimi bulunmaktadır (URL-17, 2024).

4.1.2 Mühendislik termoplastikleri

Tablo 4.3'den elde edilen verilere göre, mühendislik termoplastiklerinin yoğunlukları genellikle 1.06 ile 1.42 g/cm³ arasında değişmektedir. Düşük yoğunluk, bu malzemelerin pek çok mühendislik uygulamasında avantajlı bir özellik olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin çoğunda çekme dayanımının düşük olduğu, 55 ile 83 MPa arasında değişen değerlerle ölçüldüğü görülmektedir. Düşük çekme dayanımı, mühendislik açısından genellikle istenmeyen bir özellik olarak kabul edilmektedir. Polikarbonatların yüksek darbe dayanımına sahip olmasının bir sonucu olarak, mühendislik

uygulamalarında kullanılan termoplastiklerin de darbe dayanımları oldukça yüksektir ve bu değerler 640 ile 854 J/m arasında değişmektedir. (Yalçın ve Gürü, 2002).

Mühendislik termoplastiklerinin elektrik yalıtım özellikleri, diğer plastik malzemelere göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu malzemelerin kullanım sıcaklık aralığı ise 82°C ile 260°C arasında değişmektedir. En yüksek kullanım sıcaklığına sahip termoplastik malzeme ise 260°C ile polifenilen sülfürdür. Mühendislik termoplastiklerinin polimerleşme reaksiyonları sırasında şekil alması, bitmiş ya da bitmişe yakın bir halde daha kolay gerçekleştirilebilen bir süreçtir. Ayrıca, mühendislik termoplastikleri, çeşitli ortamlarda iyi bir aşınma direncine sahip olup, bazı durumlarda kimyasal etkilere karşı aşınma dayanımları, diğer polimer malzemelere göre daha yüksek seviyelerdedir. (Yalçın ve Gürü, 2002).

Mühendislik alanlarında en yaygın kullanılan termoplastik malzemeler arasında poliamidler, polikarbonatlar, polifitalamid, fenilen oksit esaslı reçineler, asetaller, termoplastik polyesterler, polifenilen sülfür, polisülfonlar, polieterimit ve polimer alaşımları yer almaktadır. Bu malzemeler genel olarak yüksek darbe dayanımı, iyi elektriksel ve kimyasal özellikler, düşük sürtünme katsayıları, kolay işlenebilirlik ve düşük su emilimi gibi avantajlar sunmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2002).

Tablo 4.3 Bazı mühendislik termoplastiklerinin bazı temel özellikleri

Malzeme	Darbe Dayanımı (Izod, J/m)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Polifenilen sülfür	64.01	69	1.34
Polisülfon	64.05	70.3	1.24
Polifenilen oksit	266.9	53.8-66.2	1.06-1.10
Polyester	71.7-55.2-56.5	42.7-64.05-69.39	1.37-1.31
PET			
PBT			
Polikarbonat	640.56-854.08	640.56-854.08	1.2
Poliasetal	74.73	69	1.42
Naylon 6,6	106.76	62.1-82.8	1.13-1.15

Poliamidler (Naylonlar);

Poliamidler, amid bağlarıyla birbirine bağlanmış monomerlerden oluşan polimerlerdir. Doğal türleri ipek ve yün gibi protein yapılı lifleri, sentetik türleri ise naylon ve keklar gibi malzemeleri içerir. Yüksek mekanik dayanım ve kimyasal dirençleri sayesinde sentetik poliamidler tekstil, otomotiv ve mutfak eşyalarında yaygın olarak kullanılır (Vikipedi, 2024).

Polifitalamidler (PPA);

Polifitalamid (PPA), poliamid (nylon) ailesine ait, yüksek sıcaklık dayanımına sahip bir termoplastiktir. Zincir yapısında aromatik diasitlerin bulunması, malzemenin ısı ve kimyasal direncini artırır. Bu özellikleri sayesinde PPA esaslı reçineler, otomotiv ve elektrik-elektronik gibi alanlarda metal yerine tercih edilmektedir (Vikipedi, 2024).

Polikarbonat;

Polikarbonatlar, karbonat gruplarıyla bağlanan uzun polimer zincirleri sayesinde yüksek dayanıklılık ve şeffaflık sunan, kolay işlenebilen termoplastiklerdir. En yaygın türü, Bisfenol A ve karbonat gruplarından oluşur. Kurşun geçirmez cam ve gözlük camı gibi yüksek optik ve mekanik performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Vikipedi, 2024).

Polifenilenoksit;

Poli(p-fenilen oksit) (PPO), poli(p-fenilen eter) (PPE) **veya** poli(oksi-2,6-dimetil-1,4-fenilen) adlarıyla da bilinen, genel formülü $(C_8H_8O)_n$ olan yüksek sıcaklık dayanımına sahip bir termoplastiktir. Genellikle sadece *polifenilen oksit* olarak anılan bu polimer, işlenmesindeki zorluklar nedeniyle saf hâliyle nadiren kullanılır. Ticari ve teknik uygulamalarda PPO, genellikle polistiren, yüksek darbeli stiren-bütadien kopolimerleri ya da poliamidlerle karıştırılarak kullanılır (Vikipedi, 2024).

Asetaller;

Asetaller, $R_2C(OR')_2$ genel formülüne sahip, merkezi karbonu dört bağlı ve tetrahedral geometriye sahip fonksiyonel gruplardır. Aldehit veya ketonlardan türetilirler ve kimyasal olarak daha kararlıdır. İki OR' grubu aynıysa simetrik, farklıysa karışık asetal olarak adlandırılır. Ketonlardan türeyen yapılara genellikle ketal, R' gruplarından biri hidrojen olduğunda ise hemiasetal adı verilir (Vikipedi, 2024).

Polisülfonlar;

Polisülfonlar, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılığıyla bilinen yüksek performanslı termoplastiklerdir. PSU, PESU ve PPSU olmak üzere üç ana türü bulunan bu polimerler, -100 °C ila +200 °C arasında kullanılabilir ve genellikle polikarbonatlara alternatif olarak tercih edilir. Elektrikli ekipmanlar, otomotiv ve medikal alanlarda kullanılır; ısı, oksidasyon ve hidrolize karşı yüksek direnç gösterirler (Vikipedi, 2024).

Polifenilen Sülfür (PPS);

Polifenilen sülfür (PPS), sülfür köprüleriyle bağlanmış aromatik halkalardan oluşan, yüksek kimyasal ve termal dirence sahip bir mühendislik termoplastik polimeridir. Elektrik yalıtımı, filtre kumaşları, contalar ve özel membranlar gibi birçok endüstriyel alanda kullanılır. 218 °C'ye kadar dayanım gösterir, sıkı toleranslarla kalıplanabilir ve oksidasyonla yarı iletken özellik kazanabilir (Vikipedi, 2024).

Polieterimid;

Polieterimid (PEI), PEEK'e benzer özellikler gösteren, amorf ve yarı şeffaf bir termoplastiktir. PEEK'e göre daha ekonomik olmakla birlikte, darbe dayanımı ve sıcaklık toleransı daha düşüktür. 1982 yılında General Electric tarafından Ultem adıyla piyasaya sunulmuştur. Yapışkanlığı ve kimyasal kararlılığı sayesinde FFF tipi 3D yazıcılarda yatak malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılır (Vikipedi, 2024).

4.1.3 Ticari termoplastikler

Ticari termoplastikler, maliyet etkinlikleri ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilen polimer malzemelerdir. Bu grubun başlıca örnekleri arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC) ve polistiren (PS) yer almakta olup, bu polimerler toplam termoplastik tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. (Tayfun, Yılmaz ve Arslan, 2023)

Polietilen ve polipropilen, poliolefinler grubunda yer almakta ve özellikle nem emiliminin olmaması, düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı ve mükemmel yalıtkanlık özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır. Örneğin alçak yoğunluklu polietilen (AYPE),

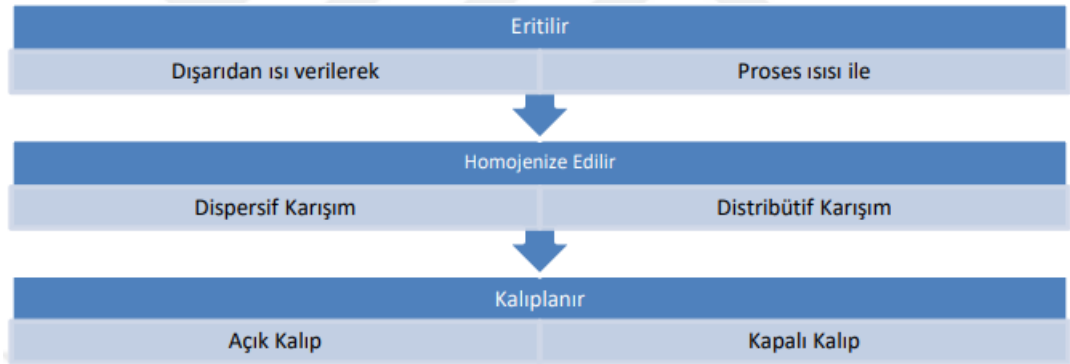
esnekliği ve kırılmaya karşı yüksek direnciyle farklı yoğunluklarda üretilebilmekte ve birçok mühendislik uygulamasında kullanılabilmektedir. (Kısmet & Güray, 2023).

Polipropilen ise düşük maliyeti, yüksek işlenebilirliği ve mekanik özellikleri nedeniyle eklemeli imalat da dahil olmak üzere birçok teknik uygulamada yarı kristal yapıdaki temel malzeme olarak öne çıkmaktadır. Aynı zamanda, kopolimerizasyon ve dolgu maddeleri ile performansının artırılabilmesi, polipropileni daha geniş bir uygulama yelpazesinde cazip kılmaktadır. (Tayfun, Yılmaz ve Arslan, 2023)

Bu özellikler doğrultusunda, ticari termoplastikler hem geleneksel imalat yöntemlerinde hem de eklemeli imalat teknolojilerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

4.1.4 Termoplastik malzemelerin üretim teknikleri

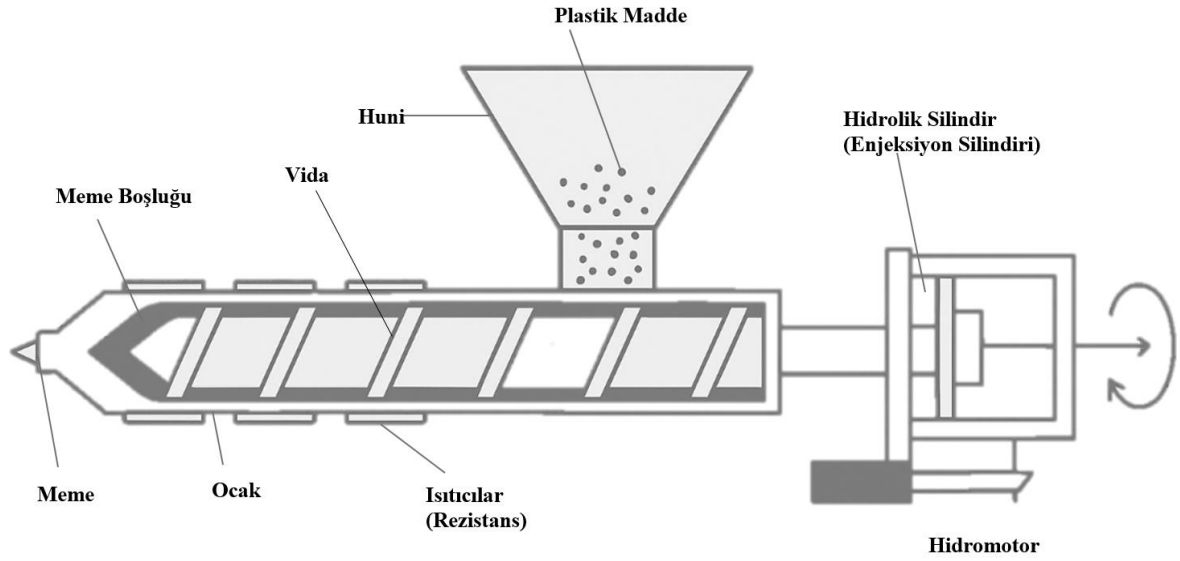
Termoplastiklerin üretimi, genellikle aşağıda Resim 4.1 ‘de ki süreçleri izleyerek gerçekleştirilir.



Resim 4.1 Termoplastik şekillendirilmesi (MEB, 2013)

Plastik Ekstrüzyon Yöntemi;

Kovanlar içinde yerleştirilen bir ıstampa, ekstrüzyon işleminde metal bloğun itişini sağlayan bir bileşen olarak işlev görmektedir. Bu bileşen, yüksek basınç altında matris malzeme içerisinden geçirilerek şekillendirme sürecine olanak tanır (URL-7, 2016).



Şekil 4.5 Ekstrüzyon makinesi (Güner, 2012)

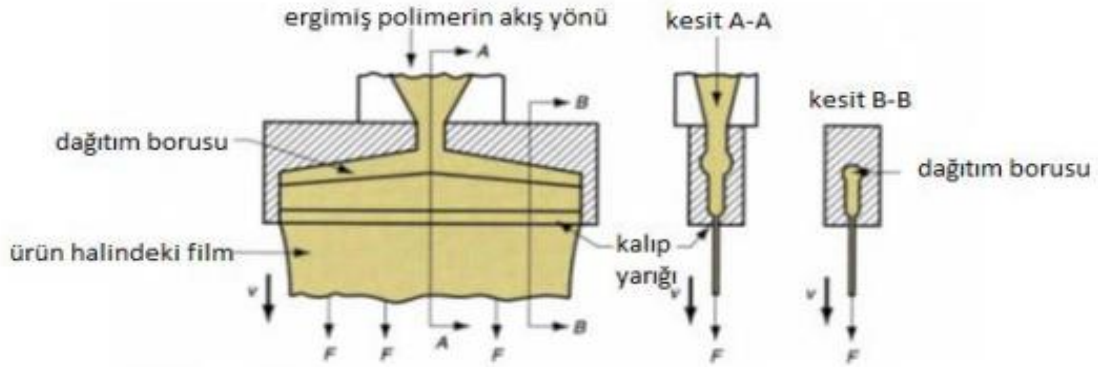
Bu yöntem, sürekli bir proses olup, kullanılan üretim teknikleri, işlemin türüne özgüdür. Kalıp tasarımı genellikle açık kalıp şeklinde olup, işlem sırasında kullanılan kalıpların maliyetleri oldukça yüksek olabilir. Termoplastiklerin işlenmesinde yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Termoplastik polimerler, yumuşak yapıya sahip olup, eski hallerine dönme eğilimindedir. Kalıptan çıkarıldığında, moleküllerin yeniden oryante olduğu gözlemlenmektedir. Kalıp duvarlarının sınırlamaları ortadan kalktığında, moleküllerin kıvrımlı yapılar oluşturma eğilimi gözlemlenmektedir. (Dönüşüm, G., ve Bakım, K. V., 2011) Bu durumu engellemek için şu yöntemler uygulanabilir:

- Ekstrüzyon veriminin düşürülmesi,
- Erime sıcaklığının artırılması,
- Kalıp paralel uzunluklarının kısaltılması,
- Çekme hızlarının artırılması.

Ekstrüzyon yöntemiyle termoplastik malzemelerin üretiminde kullanılan bazı teknikler ise şunlardır:

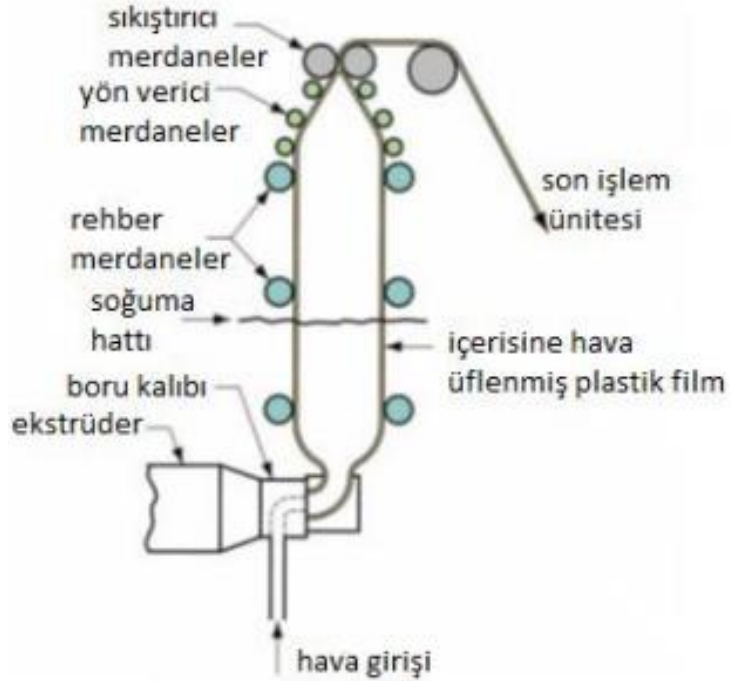
- Yarık Kalıplı Ekstrüzyon (Slit-Die),
- Üfleli Film Ekstrüzyon,
- Haddeleme.

Aşağıda verilen Şekil 4.6’da, yarık kalıplı ekstrüzyon yönteminde, ince yarıklar içeren kalıpların kullanılarak film ya da levhaların üretildiğini göstermektedir (Groover, 2002).



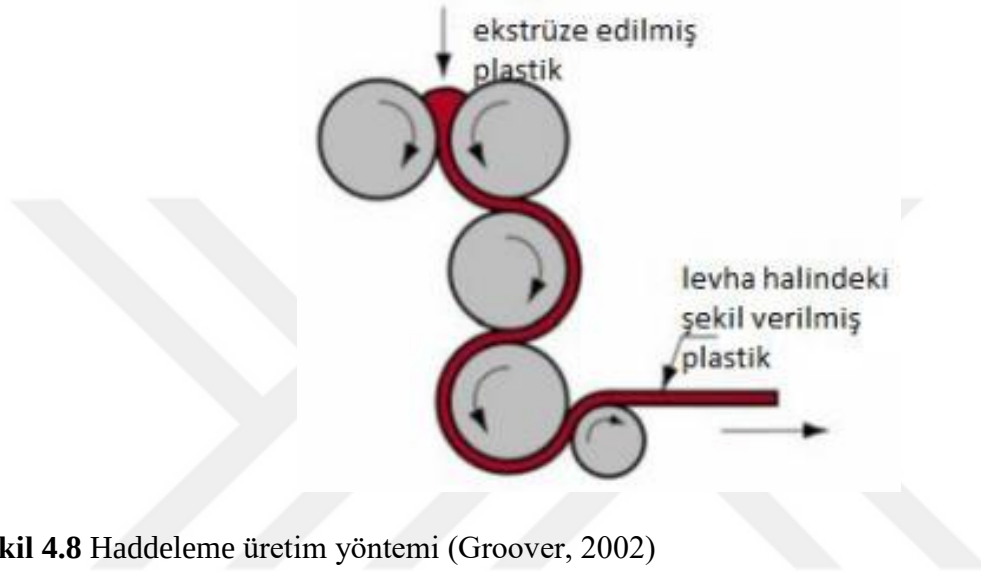
Şekil 4.6 Yarık kalıplı ekstrüzyon yönteminde kalıp ve malzeme akışı (Groover, 2002)

Aşağıda sunulan Şekil 4.7’da, üflemlı film ekstrüzyon yöntemini açıklamaktadır. Bu teknikte, boru şeklinde ekstrüzyon işleminden sonra malzemenin katılaşmasına izin verilmeden, içeriye hava üflenir ve bu şekilde malzeme kalıptan geçirilerek şekillendirilir (Groover, 2002).



Şekil 4.7 Üflemlı film ekstrüzyonu üretim yöntemi (Groover, 2002)

Aşağıda verilen Şekil 4.8’de içerisinde haddeleme üretim yöntemi resmedilmektedir. Sözü edilen üretim yönteminde ekstrüze edilmiş olan malzeme belirli bir sıcaklığın altında, merdane tipi yapıların arasında geçirilerek istenilmekte olan kalınlığın ayarlanması sağlanmaktadır. Üretim hızı diğer yöntemlere göre hızlı olsa da maliyeti de aynı doğrultuda fazladır. Elde edilmekte olan kompozit içerisinde yüzey hassasiyetinin ve boyut kararlılığının fazla olduğu gözlemlenmektedir (Groover, 2002).



Şekil 4.8 Haddeleme üretim yöntemi (Groover, 2002)

Plastik Enjeksiyon Yöntemi;

Plastik parçaların istenilen boyut ve şekillerde üretilmesi için enjeksiyon kalıplama yöntemi tercih edilmektedir. Bir enjeksiyon kalıplama makinesi, dört ana bileşenden oluşmaktadır (Harper, 2000).

Bu bileşenler şunlardır:

- Enjeksiyon Ünitesi
- Kontrol Sistemleri
- Tahrik Sistemleri
- Bağlama Ünitesi

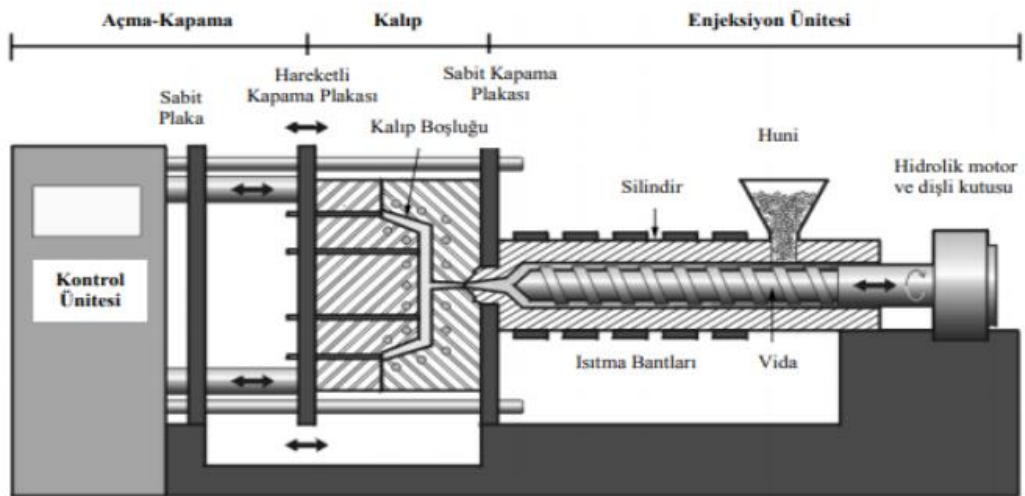
Plastik parçalar, genellikle granül veya toz formunda olan plastik reçinenin eritilmesi, kalıp boşluklarına doldurulması ve ardından kalıptan çıkarılması aşamalarıyla üretilir. Plastik reçine, besleme hunisi adı verilen bölüm aracılığıyla, bu bölmenin titreşim

hareketi ve vidanın dönmesi ile enjeksiyon makinesine beslenir. Sonraki aşamalarda, ısıtma, vidanın eksenine etrafında dönerken oluşan sürtünme ısı ve uygulanan basınçla reçine eritilir ve kovanın çıkışına iletilir. Eriyik reçine, vidanın ani ileri hareketiyle, kalıpların yer aldığı silindirin çıkışlarına yönlendirilir. Bu aşamada malzeme sıvı formdadır. Kalıp, kapama gücü ile 50-260 MPa arası yüksek basınç altında 15-20 saniye süreyle tutularak soğutulur. Soğuma işlemi sonrasında, kalıbın açılmasıyla, hareketli bölüm ve itici pimler yardımıyla ürün dışarı alınır. Kalıbın açılması sırasında vida geri çekilir. Aynı üretim sürecinin devamı için kalıp yeniden kapatılır ve besleme hunisinden tekrar plastik reçine eklenir. Bu işlem sürekli bir döngü içinde devam eder. Bazı sistemlerde vida yerine piston kullanılabildiği de gözlemlenmektedir. Sonsuz vidalı sistemler, daha homojen bir ısıtma sağladığı için yaygın olarak tercih edilmektedir (Turaçlı, 1999).

Plastik enjeksiyon üretiminin sağladığı başlıca avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- Çok büyük hacimlerde üretim yapılabilir.
- Yüksek boyut hassasiyeti sağlanabilir.
- Karmaşık yapıya sahip kompozitlerin üretimi daha kolay gerçekleştirilebilir.

Plastik parça üretiminde karşılaşılan kalıplama problemlerinin çözülmesi için, enjeksiyon makinesi içinde kalıpların optimum çalışma koşullarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Kamber, 2008). Temel bir enjeksiyon kalıplama makinesinin bölümleri ve şeması, aşağıda Şekil 4.9’da temsili olarak verilmiştir.



Şekil 4.9 Enjeksiyon makinesi (Kamber, 2008)

Diğer Üretim Yöntemleri;

Termoplastik malzemelerin kalıp kullanılarak şekillendirilmesi ve istenilen formun elde edilmesi genellikle plastik ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle yapılmaktadır. Ancak, bu süreçlerin yanı sıra çok daha çeşitli üretim yöntemleri de mevcuttur. Aşağıda, bu yöntemlere örnek olarak sıklıkla kullanılan başlıca teknikler sıralanmıştır (URL-8, 2021):

- Şişirme,
- Vakumlu Kalıplama,
- Rotasyonel Kalıplama,
- Sıkıştırma,
- Köpürme.

4.2 Gama Işınması

Gama ışını, atom çekirdeğinin radyoaktif bozunumu sonucunda yayılan elektromanyetik bir radyasyon türüdür ve genellikle gama radyasyonu olarak adlandırılmaktadır. Polimer sanayisinde elektromanyetik bir ışınma olarak kabul edilmesine rağmen, aktif bir şekilde yaygın kullanım alanı bulunmamaktadır. Ancak, belirli sektörlerde, özellikle sağlık sektöründe, gama ışını önemli bir rol oynamaktadır. Sağlık sektöründe, çeşitli malzemelerin sterilizasyonunda gama ışını kullanılmakta olup, bu süreçler, moleküler bozulmaların oluşmasına engel olacak şekilde, mümkün olan en düşük dozlarda gerçekleştirilir. Ayrıca, polimer kompozitlerin bağlanma güçlerini artırma amacıyla da gama ışını kullanımı gözlemlenmektedir (Olguner ve Özer, 2000).

Polimer kompozitlerin güçlendirilmesi sırasında, sterilizasyon işlemine göre çok daha yüksek dozda gama ışını kullanımı söz konusu olmaktadır. Bu işlemlerde, kullanılan gama ışını dozunun ortalama 30-150 kGy arasında değiştiği belirtilmiştir. (Amer, 2011). Bu yüksek doz, kompozit malzemeyi oluşturan matris bileşenleri arasındaki moleküler bağları güçlendirerek, herhangi bir bozunum meydana gelmeden yapının dayanıklılığını artırmaktadır. Moleküler yapıları itibarıyla polipropilen ve polietilen gibi polimerler, radikal ağ yapıları sergileyebilmektedir. Bu ağ yapılarını güçlendirmek amacıyla, gama ışını uygulaması için yaklaşık 40-100 kGy arası bir doz gereklidir. Polimer kompozitlerin

güçlendirilmesi için ise gama ışını kullanımı, 10-100 kGy arasında değişen dozlar ile sağlanabilmektedir. (Naki, 2003; Amer, 2011).

Polimer malzemeler, gama ışını uygulamaları sırasında ışının dışarıya yayılmasını engellemek için ışının büyük kısmını kendi bünyelerinde absorbe etmektedirler. Bu nedenle, gama ışınının polipropilen ve polietilen kompozitlerin mekanik, ısı ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde gelişim sağladığı gözlemlenmiştir (Naki, 2003).

Işınlama, polimer modifikasyonu, tıbbi cihazların ve kullanılan aletlerin sterilizasyonu, gıda sterilizasyonu, hayvan yemlerinin hijyeninin sağlanması, hastane diyetlerinde kullanılacak yemeklerin sterilizasyonu, baharatların ve gıdaların pastörizasyonu gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır (Kilcast, 1995).

Gıda ışınlama tesislerinin kurulabilmesi için özel bir sistem tasarımı gerekmektedir. Resim 4.2’de görüldüğü gibi bu tesislerin dış yapısı, mal kabul ve depolama birimlerinden oluşurken, ikinci bölümde taşıma sistemleri yer almaktadır. Işınlama kaynağı ise kalın duvarlarla ayrılmış tesisin en iç kısmında bulunmakta olup, ışınlama işlemi sırasında güvenli bir şekilde su dolu bir havuz içerisinde muhafaza edilmektedir (Diehl, 1999).



Resim 4.2 Gama ışınlama odası ve oda içindeki ışınlama kutuları (URL-18, 2022)

4.2.1 Polimerlerde gama ışınlamasının etkileri

Gama ışınları, yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon olarak, polimerler üzerinde önemli değişikliklere yol açabilen bir etkiye sahiptir. Bu ışınlar, polimerlerin kimyasal yapısını değiştirerek, fiziksel ve mekanik özelliklerinde belirgin dönüşümlere sebep olabilir. Gama ışınlamalarının polimerlerde yaratabileceği başlıca etkiler arasında zincir kırılmaları, çapraz bağlanma (crosslinking) ve oksidasyon reaksiyonları yer alır. Bu süreçler,

polimerlerin mekanik dayanıklılığını, esneklik düzeyini, sertlik özelliklerini ve kimyasal dirençlerini önemli ölçüde etkileyebilir. (Carraher, 2013)

Zincir Kırılması: Gama ışınlarının polimer zincirlerindeki bağları kırması, serbest radikallerin oluşumuna yol açar. Bu serbest radikaller, polimerin moleküler yapısını bozar ve sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde zayıflamalar görülebilir (McKeown, 2000).

Çapraz Bağlanma: Gama ışınları, polimer molekülleri arasında yeni bağların oluşmasına sebep olabilir. Bu çapraz bağlanma, polimerin mekanik dayanımını artırırken, sıcaklık direncini de yükseltir. Ancak, çapraz bağlanma olayı polimerin elastikiyetinde azalmaya yol açabilir ve malzemenin daha sert hale gelmesine neden olabilir (Carraher, 2013).

Oksidasyon ve Bozulma: Gama ışınları, polimerlerde oksidasyon süreçlerini başlatabilir. Oksidasyon, polimerin kimyasal yapısında bozulmalara yol açarak, malzemenin ömrünü kısaltabilir ve fiziksel özelliklerinde kayıplara neden olabilir (Carraher, 2013).

Bu etkileşimler, polimerlerin kullanım ömrünü, performansını ve dayanıklılığını etkileyebilecek önemli değişimlere yol açmaktadır.

4.2.2 Polimerlerde gama ışıması türleri

Gama ışınları, farklı enerji seviyelerine ve etki mekanizmalarına sahip çeşitli türlerde olabilir. Polimerler üzerindeki gama ışını etkisi, ışının enerjisi, polimerin kimyasal yapısı ve ışınlama süresi gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Genel olarak yüksek enerjili fotonlar olarak tanımlanan gama ışınları, çeşitli etki biçimlerine yol açabilir ve bu etkiler, polimerlerin özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Gama ışınlarının polimerler üzerindeki etkisi üç ana kategoride incelenebilir:

Dozlanmış Gama Işınları: Polimerlerin belirli bir dozda gama ışınına maruz bırakılması, polimer yapısında değişimlere yol açar. Bu tür ışınlamalar, özellikle polimerlerin çapraz bağlanma oranını artırmak veya bozulma süreçlerini düzenlemek amacıyla kullanılır. Dozlanmış ışınlamalar, polimerlerin dayanıklılığını artırma veya özelliklerini iyileştirme hedefi güder (McKeown, 2000).

Kısa Süreli Gama Işınları: Gama ışınının polimerlere kısa süreli etkisi, polimerlerin yapısal değişiklikler geçirmesine neden olabilir. Bu tür ışınlamalar, genellikle polimerlerin hızla modifiye edilmesi gereken uygulamalarda tercih edilir. Kısa süreli ışımaya tabi

tutulma, malzemenin istenen özelliklere hızlı bir şekilde ulaşmasını sağlar (McKeown, 2000).

Uzun Süreli Gama Işınlari: Polimerlerin uzun süreli gama ışınına maruz kalması, kalıcı yapısal değişikliklerin meydana gelmesine yol açar. Bu tür ışınlamalar, polimerlerin dayanıklılığını artırmak ve malzeme özelliklerini stabilize etmek amacıyla uygulanır. Uzun süreli ışınlamalar, polimerlerin uzun vadeli performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir (Carraher, 2013).

Farklı gama ışını türleri, polimerlerin kullanım amacına ve ihtiyaç duyulan özelliklere göre spesifik olarak seçilmektedir. Işın türü ve maruz kalma süresi, polimerin özellikleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasına olanak tanır.

4.2.3 Polimerlerde gama ışıması uygulamaları

Gama ışınları, polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek ve yeni fonksiyonel malzemeler üretmek amacıyla geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Gama ışını işlemleri, malzeme mühendisliği ve endüstriyel alanlarda önemli fırsatlar sunar ve bu ışınların polimerler üzerindeki etkileri, çeşitli sektörel uygulamalarda değerli sonuçlar doğurur. Polimerlerde gama ışını kullanımına yönelik başlıca uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

Sterilizasyon: Gama ışınları, biyomedikal sektöründe sıklıkla sterilizasyon işlemleri için tercih edilmektedir. Özellikle tıbbi cihazlar, tek kullanımlık cerrahi enstrümanlar ve biyolojik materyallerin sterilizasyonu için etkili bir yöntem sunar. Gama ışınları, mikrobiyal kontaminasyonu ortadan kaldırırken, polimerlerin kimyasal yapısını minimum düzeyde değiştirir, bu da malzemenin fonksiyonel özelliklerini korumasını sağlar (McKeown, 2000).

Polimer Çapraz Bağlama: Gama ışınları, polimer molekülleri arasında çapraz bağların oluşmasına neden olarak, malzemelerin mekanik dayanımını artırabilir. Bu çapraz bağlanma, özellikle otomotiv ve inşaat endüstrilerinde kullanılan polimer esaslı kompozit malzemelerde yaygın olarak uygulanan bir tekniktir. Çapraz bağlı polimerler, yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç gerektiren koşullarda daha dayanıklı ve stabil hale gelir (McKeown, 2000).

Yaşlanma ve Bozunma Testleri: Gama ışınları, polimerlerin çevresel faktörlere karşı dirençlerini değerlendirmek için kullanılan önemli bir test aracıdır. Bu testler, malzemenin uzun vadeli performansını ve dayanıklılığını öngörmek için kritik öneme

sahiptir. Özellikle dış ortamda kullanılan polimerlerin yaşlanma süreçleri, gama ışınları ile hızlandırılarak, polimerlerin ömrü ve çevresel etmenlere karşı dayanıklılığı hakkında değerli bilgiler elde edilebilir (Carragher, 2013).

Fonksiyonelleştirme: Polimerlerin yüzeylerine gama ışınları kullanılarak fonksiyonel gruplar eklenebilir. Bu yöntem, polimerlerin yüzey özelliklerini modifiye etmek, yapısal değişiklikler sağlamak ya da polimerlerin biyolojik ve kimyasal tepkilerini değiştirmek amacıyla kullanılır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda, polimer yüzeyine eklenen fonksiyonel gruplar, biyoyumluluğu artırmak ve malzemenin performansını optimize etmek için tercih edilir (McKeown, 2000).

Gama ışınlarının polimerler üzerindeki kullanımı, ileri düzey mühendislik malzemelerinin tasarımında ve geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalar, polimerlerin mekanik ve kimyasal özelliklerini geliştirirken, aynı zamanda çevresel şartlara ve endüstriyel gereksinimlere uyum sağlamalarına olanak tanır.

5. LİTERATÜR TARAMASI

Kılıç (2017), yaptığı tez çalışmasında elektrostatik toz boya takviyeli termoplastiklerin mekanik ve fiziksel özelliklerini gama ışınlarının etkisiyle incelemiştir. Çalışmasında, polietilen ve polipropilen matrisli, elektrostatik toz boya ile takviye edilen numunelerin gama ışınına maruz kaldıktan sonra mekanik özelliklerinde artış olduğunu tespit etmiştir.

Özbek (2022), ise yüksek ve alçak yoğunluklu polietilen matrisleri üzerinde yaptığı çalışmada, poliolefin grubu termoplastiklerin yaygın kullanımını ele almıştır. Çalışmada, polietilenin midye tozu ile güçlendirilerek mekanik özellikler üzerinde etkili bir iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır. Üretim parametrelerinin modellenebilmesi için regresyon analizleri yapılmış ve bağımlı değişkenler ile birincil ve ikincil basınç, soğuma süreleri ve deniz kabuğu gibi kukla değişkenler kullanılmıştır. Çalışma, polimerlerin mekanik davranışlarını etkileyen parametreleri inceleyerek, bu parametrelerin maksimum kuvvet ve maksimum gerileme üzerindeki etkilerini matematiksel olarak modellemiştir.

Karakaya (2007), farklı dolgu malzemelerinin, termoplastik elastomerlerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çalışma, termoplastik elastomerlerin pişmiş karışımlar yerine kullanımlarının, malzeme özellikleri üzerinde nasıl bir etki oluşturduğunu incelemiştir. Polipropilen ve yağ içeren farklı miktarlarda karışımlar hazırlanmış ve SEBS, yağ ve polipropilen içerikli ana karışım belirlenmiştir. Fiziksel ve mekanik testlerle, karışımların özellikleri üzerine yapılan araştırmalar sonucunda, silika ve kalsit gibi dolgu malzemelerinin kullanımı ile malzemenin özelliklerinde gözle görülür değişiklikler olduğu tespit edilmiştir.

Sanbur (2020), ise doğal elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, sıcak presleme yöntemiyle üretilen doğal elyaf takviyeli kompozitler, poliamid, polietilen film ve dokusuz polipropilen kumaşlar gibi matris malzemeleriyle üretilmiştir. Ayrıca, kumaşların yüzey özelliklerini iyileştirmek için alkali işlemler uygulanmıştır. Poliamidin nem tutma özelliği nedeniyle ilk denemelerde başarılı bir üretim sağlanamamış, ancak yüksek yoğunluklu polietilen film ve dokusuz polipropilen kumaşlar kullanılarak ikinci denemede başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri, üç nokta eğilme, darbe ve çekme testleri ile değerlendirilmiştir.

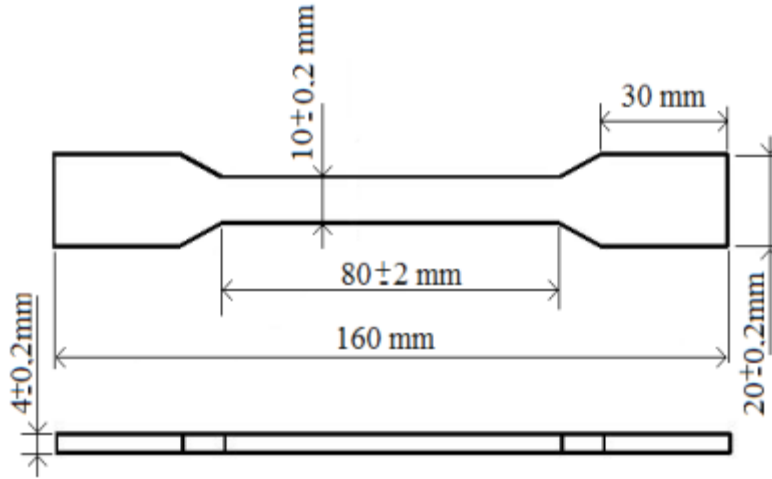
Kısmet (2015), çalışmasında kolza bitkisi ile takviyelenmiş polipropilen matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Kolza içeren numuneler, ekstrüzyon ve plastik enjeksiyon teknikleriyle üretilmiş ve gama ışınına tabi tutulmuştur. Gama ışını işlemi, dolgu malzemesi ile matris arasındaki bağlanma mekanizmasını güçlendirmeyi amaçlamıştır. Yapılan testlerde, izod darbe ve çekme mukavemetlerinin, takviye oranı arttıkça azalma gösterdiği, ancak eğilme mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Gama ışınına maruz bırakılan numunelerin mekanik özellikleri, ışını almamış numunelere kıyasla önemli artışlar göstermiştir.

Doğan ve Kısmet (2021), kolza bitkisi takviyeli polimerlerin mekanik özelliklerinin gama ışınına maruz bırakılmasının ardından gösterdiği değişimleri incelemişlerdir. Düşük yoğunluklu polietilen matrisli numuneler, %10, %20 ve %30 oranlarında kolza bitkisi içerecek şekilde hazırlanmış ve 45 kGry'lık gama ışınına 12 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Bu işlemin ardından, numunelere uygulanan mekanik testler (çekme, üç nokta eğilme ve darbe testleri) sonucunda gama ışınının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli değişikliklere yol açtığı gözlemlenmiştir.

6. METARYAL VE METOT

6.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Karakterizasyonu

Şekil 6.1'de yer alan ve deneysel çalışmalarda kullanılan standart numuneler, farklı polimer matris malzemeleriyle hazırlanmıştır. Bu malzemelerden I22-10T ürün kodlu düşük yoğunluklu polietilen (AYPE), I668 ürün kodlu yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve EH-102 ürün kodlu polipropilen (PP) PETKİM firmasına ait termoplastiklerdir. Deneylerde kullanılan tek amorf karakterli termoplastik ise polistiren (PS) dir. Her bir matris malzemesinin içeriğinde farklı dolgu maddeleri kullanılmıştır. AYPE matrisli numunelerde dolgu maddesi olarak deniz yosunu, muz lifi ve elektrostatik toz boya atığı, YYPE matrisli numunelerde ise saman dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. PS matrisli numunelerde ve PP matrisli numunelerde ise dolgu maddesi olarak yine elektrostatik toz boya atığı kullanılarak, her bir dolgu maddesinin etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu şekilde, her bir malzeme kombinasyonu bağımsız olarak test edilerek, malzemenin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerinin gama ışıması sonrasında dolgu maddesi türüne bağlı olarak nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1 Standart deney örneği

Çalışma kapsamında, plastik enjeksiyon makinesi ile hazırlanan numuneler, 45kGy gama ışını dozu ile maruz bırakılmış ve bu numunelerin özellikleri çok yönlü bir şekilde değerlendirilmiştir. Gama ışını, polimer yapılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Gama ışınının, özellikle

polimerlerin iç yapılarında meydana getirdiği değişiklikler, mekanik, termal ve morfolojik analizlerle ayrıntılı bir biçimde ortaya konmuştur.

Deneysel testlerde, her bir numune için çekme ve eğilme testleri gerçekleştirilmiş, böylece polimerlerin mekanik dayanıklılıkları ve elastikiyet modülleri hakkında kapsamlı veriler elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, numunelerin termal davranışları, termogravimetrik analiz (TGA) yöntemleri ile incelenmiştir. Bu analizler, polimerlerin ısıl stabiliteleri yani termal özellikleri hakkında bilgi sağlamıştır.

Morfolojik analizler, numunelerin iç yapılarını ve dolgu maddelerinin dağılımını daha iyi anlayabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak numunelerin kesit görüntüleri alınmış ve bu görüntüler üzerinde yapılan detaylı incelemeler, dolgu maddelerinin matrisle etkileşimleri ve gama ışınına maruz kalmanın polimer yapısındaki değişimleri gözler önüne sermiştir. Özellikle dolgu maddelerinin polimer matrisi içindeki dağılımı ve etkileşim düzeyleri, malzemelerin mekanik ve termal özellikleriyle nasıl bir ilişki gösterdiği konusunda önemli ipuçları sağlamıştır.

Çalışmanın nihai aşamasında, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, grafikler ve tablolar aracılığıyla sunulmuş, malzeme kombinasyonlarının özellikleri arasındaki ilişkiler açıklığa kavuşturulmuştur. Bu yorumlar ışığında, gama ışını uygulamanın, dolgu maddesi türlerinin ve matris malzemelerinin mekanik, termal ve morfolojik özellikler üzerindeki etkileri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve tezin son bölümü oluşturulmuştur.

Plastik enjeksiyon makinesiyle üretilen ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında dolgu maddesi içeren standart deney numuneleri, çekme ve eğilme testleri için hazırlanmış olup, bu numunelerin özellikleri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de yer verilmiştir.

Tablo 6.1 Gama ışımasına tabi tutulmuş standart çekme deney numunelerinin ağırlıkça içerdikleri polietilen, polipropilen, polistren ve dolgu malzemesi miktarları ve adetleri

Açıklama	Matris - Takviyeleri	Cinsi	Adet	Numune Kodu	Çekme Testi Numune Adedi
AYPE + Deniz Yosunu	AYPE + %5 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 1	3 adet
	AYPE + %10 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 2	3 adet
	AYPE + %20 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 3	3 adet
	AYPE + %30 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 4	3 adet
YYPE + Saman	%5 SAMAN- YYPE	Çubuk	5 adet	YYPE 1	3 adet
	%10 SAMAN- YYPE	Çubuk	5 adet	YYPE 2	3 adet
AYPE + Muz Lifi	%5 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 1-1	5 adet
	%10 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 2-1	5 adet
	%15 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 3	3 adet
AYPE + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	AYPE + %10 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Koyu 1	3 adet
	AYPE + %20 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Koyu 2	3 adet
AYPE + Epoksi/Polyester (Toz Boya Açık Siyah)	AYPE + %20 Açık Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Açık 1	3 adet
PS + Epoksi/Polyester (Toz Boya Açık Siyah)	PS Saf	Çubuk	5 adet	PS Saf 1 Çubuk	2 adet
	PS + %5 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 3 Açık Siyah	3 adet
	PS + %10 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 1 Açık Siyah	3 adet
	PS + %20 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 2 Açık Siyah	3 adet
PS + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	PS + %10 Toz Boya Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PS 4 Koyu Siyah	3 adet
	PS + %20 Toz Boya Koyu Siyah	Çubuk	4 adet	PS 5 Koyu Siyah	2 adet
PP + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	PP + %5 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 1	3 adet
	PP + %30 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 2	3 adet
	PP + %20 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 3	3 adet

Tablo 6.2 Gama ışımasına tabi tutulmuş standart üç nokta eğilme deney numunelerinin ağırlıkça içerdikleri polietilen, polipropilen, polistren ve dolgu malzemesi miktarları ve adetleri

Açıklama	Matris - Takviyeleri	Cinsi	Adet	Numune Kodu	Eğilme Testi Numune Adedi
AYPE + Deniz Yosunu	AYPE + %5 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 1	2 adet
	AYPE + %10 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 2	2 adet
	AYPE + %20 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 3	2 adet
	AYPE + %30 Deniz Yosunu	Çubuk	5 adet	YOSUN 4	2 adet
YYPE + Saman	%5 SAMAN- YYPE	Çubuk	5 adet	YYPE 1	2 adet
	%10 SAMAN- YYPE	Çubuk	5 adet	YYPE 2	2 adet
AYPE + Muz Lifi	%5 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 1-1	2 adet
	%5 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 1-2	2 adet
	%10 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 2-1	2 adet
	%10 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 2-2	2 adet
	%15 ML-AYPE	Çubuk	5 adet	AYPE 3	2 adet
AYPE + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	AYPE + %10 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Koyu 1	2 adet
	AYPE + %20 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Koyu 2	2 adet
AYPE + Epoksi/Polyester (Toz Boya Açık Siyah)	AYPE + %20 Açık Siyah	Çubuk	5 adet	AYPE Açık 1	2 adet
PS + Epoksi/Polyester (Toz Boya Açık Siyah)	PS Saf	Çubuk	5 adet	PS Saf 1 Çubuk	2 adet
	PS + %5 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 3 Açık Siyah	2 adet
	PS + %10 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 1 Açık Siyah	2 adet
	PS + %20 Toz Boya Açık Siyah	Çubuk	5 adet	PS 2 Açık Siyah	2 adet
PS + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	PS + %10 Toz Boya Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PS 4 Koyu Siyah	2 adet
	PS + %20 Toz Boya Koyu Siyah	Çubuk	4 adet	PS 5 Koyu Siyah	2 adet
PP + Hibrit (Toz Boya Koyu Siyah)	PP + %5 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 1	2 adet
	PP + %30 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 2	2 adet
	PP + %20 Koyu Siyah	Çubuk	5 adet	PP Toz 3	2 adet

6.2 Gama Işıması

Yapılan çalışmada Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de yer alan toplam 104 adet standart deney numuneleri, 24 saat süreyle 45 kGy'lık gama ışımasına maruz bırakılmıştır. Işıma sonrası numuneler için mekanik, termal ve morfolojik analizler gerçekleştirilerek ışıma öncesi mevcut sonuçlar ile karşılaştırılarak gama ışımasının etkileri araştırılmıştır.

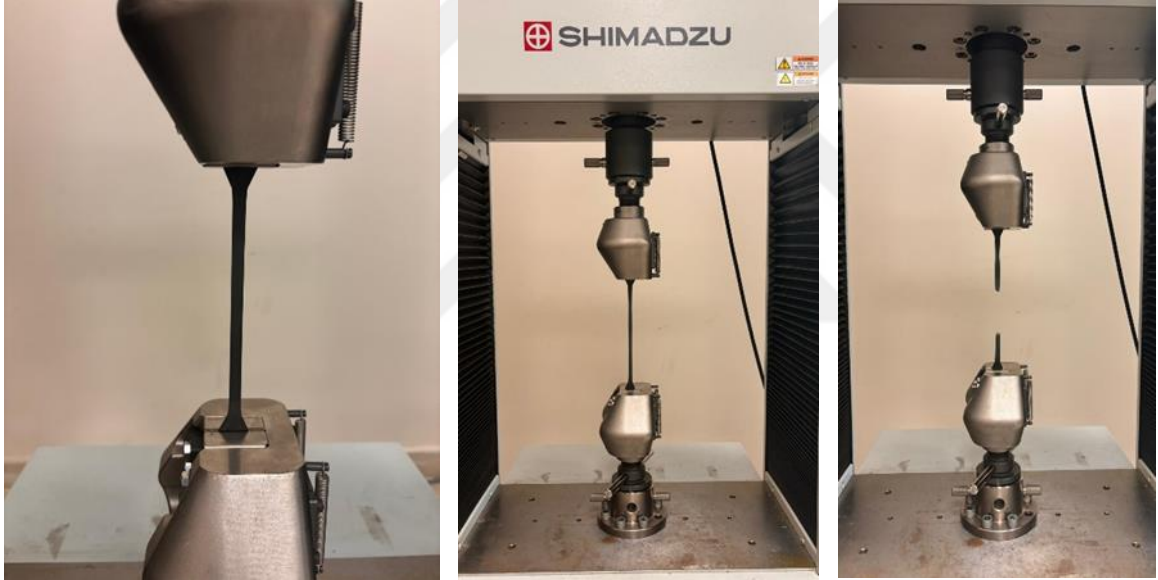
6.3 Mekanik Testler

Yapılan mekanik testler sonucunda, numunelerin çekme mukavemeti ve üç nokta eğilme mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Farklı dolgu türleri ve oranlarına sahip numuneler, her bir mekanik analiz için ayrı ayrı seçilmiş ve her bir numune tipinden çekme testi için 3'er adet test çubuğu ve üç nokta eğilme için 2'ser adet test çubuğu kullanılarak

analizler yapılmıştır. Bu şekilde, her bir dolgu maddesinin ve oranının, malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi daha güvenilir sonuçlarla incelenmiştir.

6.3.1 Çekme mukavemeti testi

Çekme gerilmesi testleri, Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan "Shimadzu" marka "Ag-x 10t" model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM D 638 (DIN ISO 527) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Resim 4.1'de gösterildiği üzere, cihazın çenelerine yerleştirilen çekme çubukları, AYPE ve YYPE numuneleri 50 mm/dak. hızla, PS ve PP numuneleri ise 10 mm/dak. hızla eksenel yönde çekilmeye tabi tutulmuştur.



Resim 6.1 Çekme deneyi

6.3.1 Üç nokta eğilme mukavemeti testi

Üç nokta eğilme gerilmesi testi, ASTM D 790 (DIN ISO 178) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Resim 4.1'de gösterildiği gibi, testler sırasında numunelerin boyutları 84 mm x 10 mm x 4 mm olarak belirlenmiş ve her bir numune, sabit bir eğilme hızı ile test edilmiştir. Eğilme testi, 10 mm/dak. hızla uygulanarak, numunelerin eğilme dayanıklılığı ve elastik modülü belirlenmiştir. Bu deneysel düzenek, numunelerin eğilme davranışlarını doğru bir şekilde analiz etmek amacıyla titizlikle uygulanmış ve elde edilen veriler, numunelerin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.



Resim 6.2 Üç nokta eğilme deneyi

6.4 Termogravimetrik Analiz (TGA)

Numunelerin kütle kayıplarını belirlemek için termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için Hamburg teknik Üniversitesi Polimer ve Kompozit Enstitüsünde bulunan “A TGAQ500” cihazı kullanılmıştır. Deneyler esnasında numuneler oda sıcaklığından 600 C’ye kadar 10K/dk. Hız ile ısıtıldı ve bütün deneyler azot atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir.

6.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS analizi

Üretilen numunelerin bağlanma mekanizmalarını belirlemek için, Munzur Üniversitesi Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında “HITACHI SU 3500” cihazı kullanılarak numunelerin kesit görüntüleri incelendi. Görüntülemeye önce, plastik deformasyonu önlemek için numuneler sıvı nitrojene batırılmış, ardından kırılma hale getirilmiştir. Yüzeyler daha sonra altın ile kaplanmıştır.

7. BULGULAR

Bu bölümde, araştırma sürecinde elde edilen verilerin analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucunda ortaya çıkan bulgular detaylı bir şekilde sunulmuştur. Verilerin incelenmesi, çalışmanın hipotezlerini test etmek ve belirlenen araştırma sorularına yanıtlar sağlamak amacıyla titizlikle yapılmış, sonuçlar grafikler, tablolar ve yorumlarla desteklenerek açıklanmıştır.

7.1 Çekme Mukavemeti Sonuçları

Farklı karışım oranlarına sahip ve gama ışını uygulanmış standart deney numuneleri için elde edilen çekme mukavemeti sonuçları, Tablo 6.1’de verilmiş olup, bu sonuçlar aşağıdaki grafiklerde görselleştirilmiştir. Tablo 7.1’de çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

Tablo 7.1 Gama ışınına tabi tutulmuş deniz yosunu takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

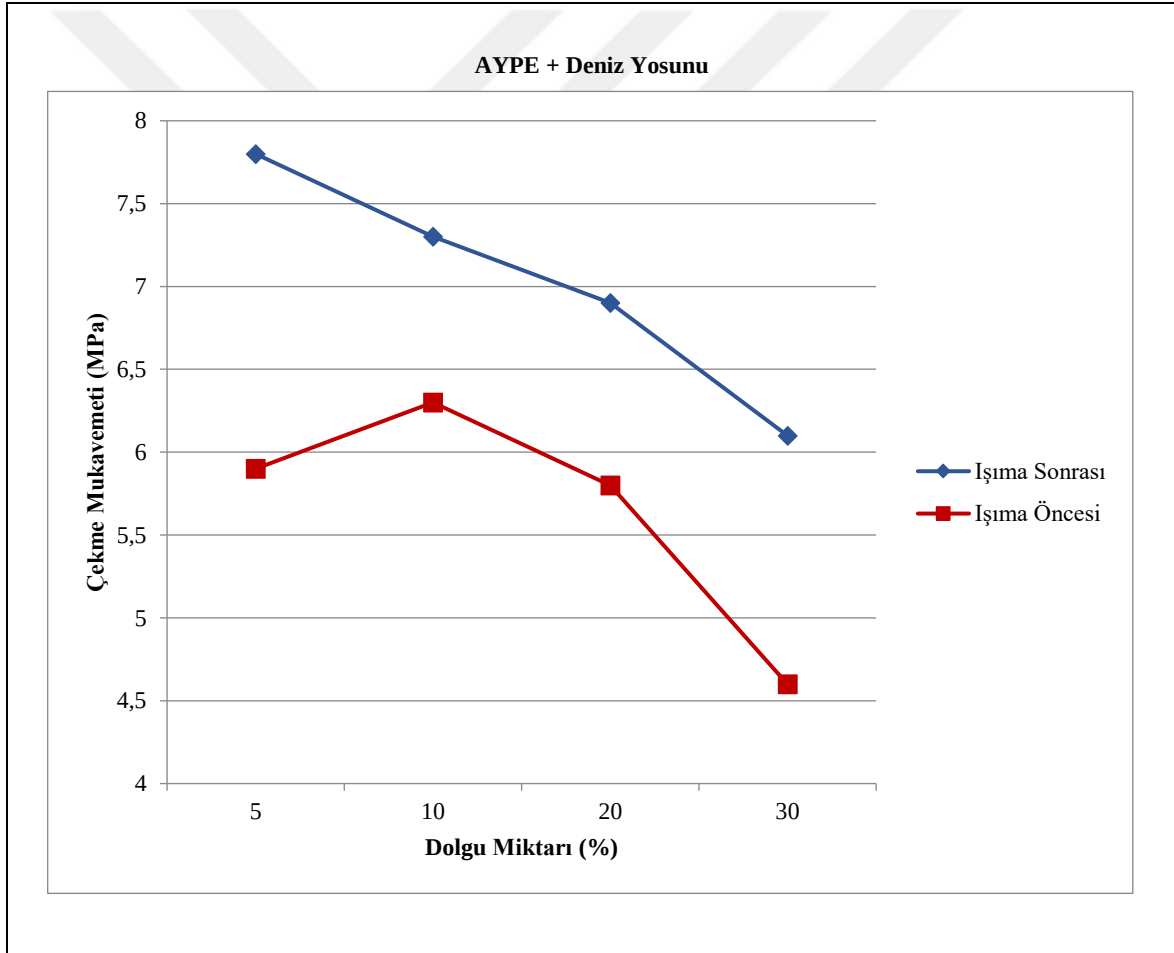
Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
AYPE saf	8,1	0,29402375	238,83	17,31456421
AYPE + 5% Deniz Yosunu	7,8	0,30067579	242,23	44,75857157
AYPE + 10% Deniz Yosunu	7,3	0,23066326	212,1	20,46192809
AYPE + 20% Deniz Yosunu	6,9	0,26927728	249,99	22,77611471
AYPE + 30% Deniz Yosunu	6,1	0,27459393	297,23	32,53920642

Tablo 7.1’de görüldüğü gibi ışıma sonrasında yapılan çekme analizi sonuçlarına göre AYPE içerisinde artan dolgu miktarına bağlı olarak numunelerin eksenel yüklemelere karşı dayanımları azalmıştır. Say AYPE’nin çekme dayanımı 8,1 MPa iken bu değer ağırlıkça %30 deniz yosunu içeren numunelerde 2 MPa azalarak 6,1 MPa değerine gerilemiştir. Buna karşın 238,83 MPa olan elastisite modülü ise 297,23 MPa değerine yükselmiş ve elastik bölge davranışının miktar değiştiği tespit edilmiştir. Dolgu miktarındaki artışa bağlı olarak

çekme gerilmesi her ne kadar azalma gösterse de bu değişim ısıma öncesi mevcut çekme gerilmesi sonuçları ile mukayese edildiğinde artmış olduğu Şekil 7.1’de görülmektedir.

Tablo 7.2 Dolgu takviyesi yapılmış polietilenin gama ışıını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE + 5% Deniz Yosunu	5,9	7,8
AYPE + 10% Deniz Yosunu	6,3	7,3
AYPE + 20% Deniz Yosunu	5,8	6,9
AYPE + 30% Deniz Yosunu	4,6	6,1



Şekil 7.1 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış polietilenin gama ışıını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim

Şekil 7.1 incelendiğinde ağırlıkça %5 deniz yosunu takviyesi ile hazırlanan numunelerde çekme mukavemeti değeri gama ışıması öncesinde 5,9 MPa iken, ısıma sonrasında bu değer 7,8 MPa’a yükselmiştir. Benzer şekilde, ağırlıkça %10 deniz yosunu

içeren numunelerde 6,3 MPa olan çekme mukavemeti, gama ışını sonrası 7,3 MPa olarak ölçülmüştür. %20 dolgu oranına sahip numunelerde bu değer 5,8 MPa'dan 6,9 MPa'a, ağırlıkça %30 dolgu oranına sahip numunelerde ise 4,6 MPa'dan 6,1 MPa'a çıkmıştır. Bu sonuçlar, gama ışını uygulamasının çekme mukavemeti üzerinde %20'ye varan oranlarda iyileşmeye neden olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, genel eğilim incelendiğinde, dolgu oranı arttıkça gama ışını uygulaması öncesinde gözlemlenen çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü, ancak gama ışını sonrasında bu düşüşün kısmen telafi edildiği görülmektedir. Örneğin, %30 oranında deniz yosunu içeren numunelerde gama ışını öncesi ve sonrası arasındaki fark 1,5 MPa olup, bu artışın diğer dolgu oranları ile tutarlı olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 7.3'de YYPE + Saman için yapılan çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

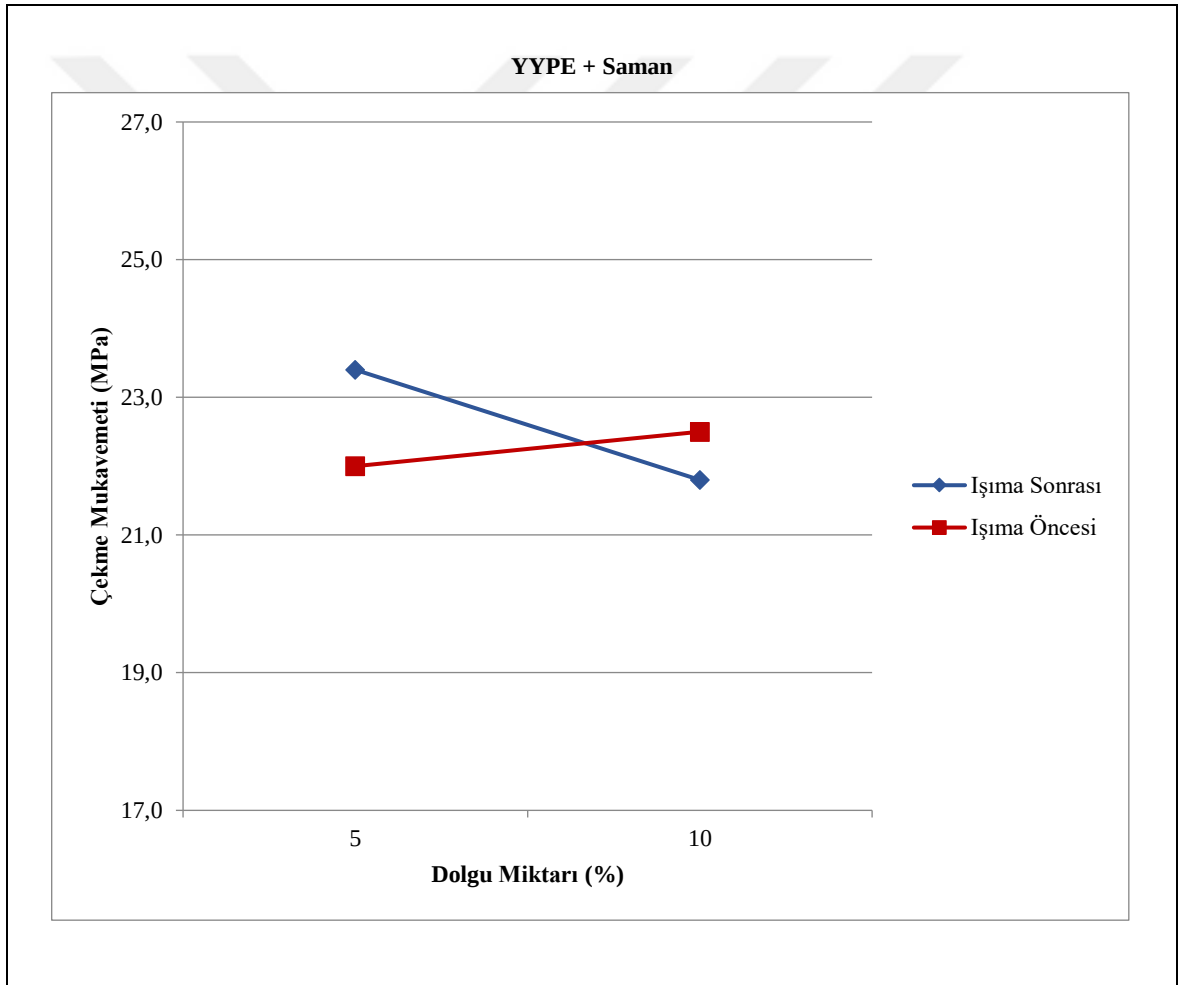
Tablo 7.3 Gama ışınına tabi tutulmuş saman takviyeli YYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
YYPE Saf	23,7	0,524672389	963,23	25,648284934
YYPE+Saman %5	23,4	0,211029437	755,08	32,6784721
YYPE+Saman %10	20,1	1,977662148	365,85	39,7286563

Tablo 7.3'te saman dolgu takviyeli YYPE numunelerinin gama ışınması sonrasında gerçekleştirilen çekme test sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre artan dolgu miktarına bağlı olarak YYPE'nin çekme dayanımı bir miktar azalmıştır. Saf YYPE'nin 23,7 MPa olan çekme gerilmesi ağırlıkça %5 saman takviyeli numunelerde ortalama 23,4 MPa ve ağırlıkça %10 saman takviyeli numunelerde 20,1 MPa değerine gerilemiştir. Benzer şekilde numunelerinde elastik özellikleri de azalarak elastisite modülleri saf numunelerde 963,23 MPa değerinden 365,85 MPa değerine bir azalma meydana gelmiştir.

Tablo 7.4 Dolgu takviyesi yapılmış YYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
YYPE+Saman %5	22	23,4
YYPE+Saman %10	22,5	21,8



Şekil 7.2 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış YYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim

Şekil 7.2'te yer alan verilere göre, gama ışınına maruz bırakılan YYPE numunelerinde çekme mukavemeti değerlerinde farklı eğilimler gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %5 oranında saman katkısı içeren numunelerde gama ışını uygulanmadan önce çekme

mukavemeti 22 MPa iken, gama ışıması sonrasında bu değer 23,4 MPa'a yükselmiştir. Bu artış, gama ışını uygulamasının düşük oranlı saman katkısı içeren YYPE numunelerinde çekme mukavemetini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Ancak, ağırlıkça %10 oranında saman katkısı içeren numunelerde çekme mukavemeti gama ışını öncesinde 22,5 MPa olarak ölçülmüşken, gama ışını sonrasında bu değer 21,8 MPa'a düşmüştür. Bu farklılığın numunelerin üretim esnasında ekstrüzyonda matris dolgu karışımlarının yeterince homojen gerçekleştirilememesi ile enjeksiyon ile kalıplama esnasında numune içerisinde oluşan hava boşluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 7.5'de AYPE + Muz Lifi için yapılan çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

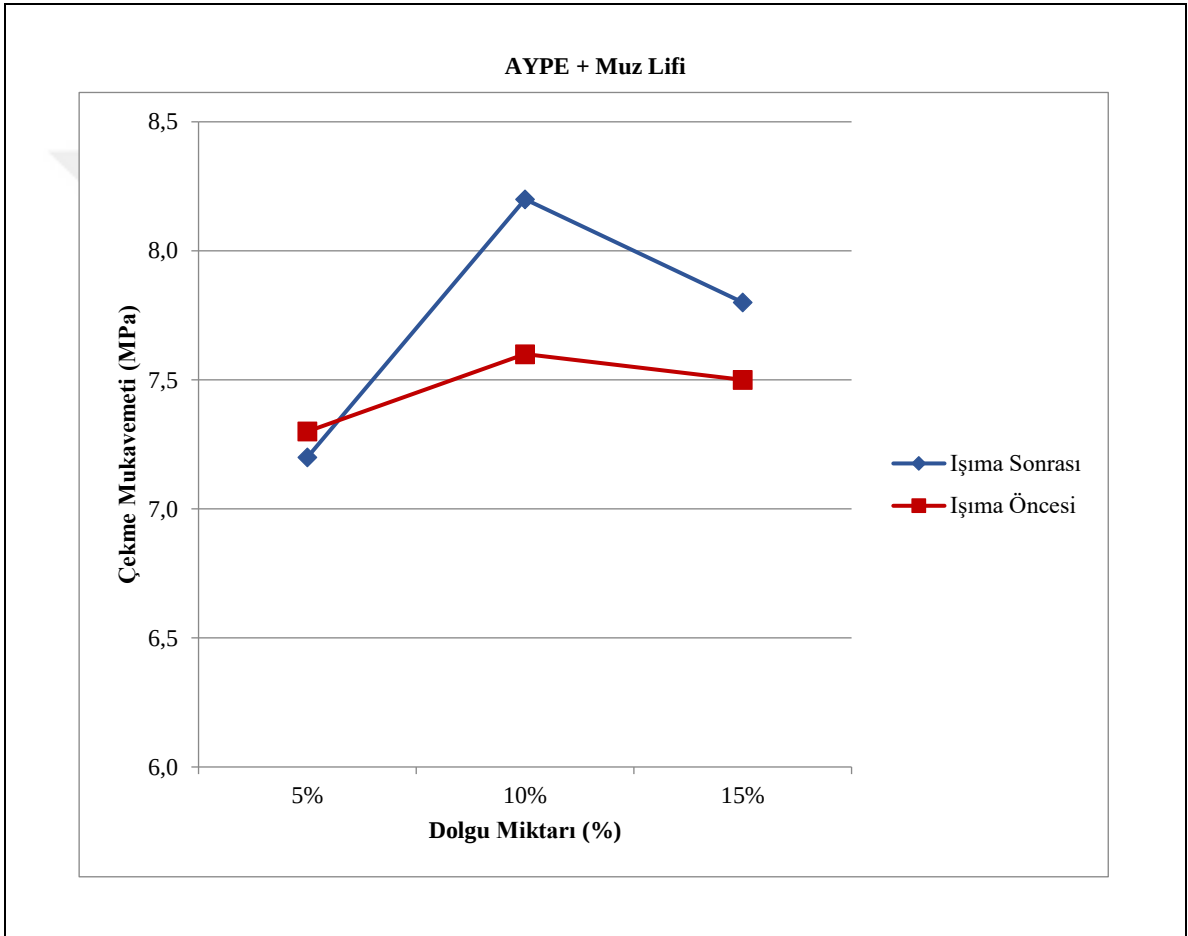
Tablo 7.5 Gama ışınına tabi tutulmuş muz lifi takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
AYPE saf	8,1	0,294023748	238,83	17,3145642
AYPE+Muz Lifi %5	7,2	0,252165552	246,18	7,95823199
AYPE+Muz Lifi %10	8,2	0,375916774	316,07	16,719097
AYPE+Muz Lifi %15	7,8	0,938887715	297,43	48,0150632

Tablo 7.5'de yer alan verilere göre, gama ışınına maruz bırakılan muz lifi takviyeli AYPE numunelerde çekme mukavemeti değerlerinde farklı oranlarda değişimler gözlemlenmiştir. Saf AYPE'nin çekme mukavemeti 8,1 MPa iken bu değer artan dolgu miktarına bağlı olarak ağırlıkça %10 dolgu takviyeli numunelerde 8,2 MPa değerine ulaşarak bir miktar artmış olmasına rağmen ağırlıkça %15 dolgu takviyeli numunelerde 7,8 MPa değerine gerilemiştir. Ağırlıkça %5 oranında muz lifi içeren numunelerde ise çekme mukavemeti 7,2 MPa ile en düşük değerine sahip olmuştur. Elastisite modülünde ise özellikle ağırlıkça %10 ve %15 dolgu içeren numunelerde artış gözlemlenmiştir.

Tablo 7.6 Dolgu takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE+Muz Lifi %5	7,3	7,2
AYPE+Muz Lifi %10	7,6	8,2
AYPE+Muz Lifi %15	7,5	7,8



Şekil 7.3 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim

Şekil 7.3'te yer alan verilere göre, gama ışınına maruz bırakılan AYPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen) kompozitlerinde çekme mukavemeti değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %5 oranında muz lifi katkısı içeren numunelerde gama ışını uygulanmadan önce çekme mukavemeti yaklaşık 7,3 MPa iken, gama ışını uygulaması sonrasında bu değer 7,2 MPa seviyesinde ölçülmüştür. %10 oranında dolgu

katkısı içeren numunelerde ise ışınlama öncesi çekme mukavemeti yaklaşık 7,6 MPa iken, gama ışını sonrası bu değer belirgin bir artışla 8,3 MPa seviyesine yükselmiştir. Bu durum, gama ışını uygulamasının belirli dolgu oranlarında çekme mukavemetini artırıcı bir etki yarattığını göstermektedir. Ancak dolgu oranı %15'e çıkarıldığında, gama ışını öncesi yaklaşık 7,5 MPa olan çekme mukavemeti, ışınlama sonrasında 7,8 MPa düzeyine ulaşsa da, %10 dolgu oranında elde edilen maksimum değer altında kalmıştır. Bu durum, yüksek dolgu oranlarının ışınlama ile birlikte çekme mukavemetine etkisinin sınırlı kaldığını ve yapısal düzensizliklerin veya dolgu-matris etkileşimindeki dengesizliklerin mukavemeti olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Tablo 7.7'da epoksi/polyester ve epoksi esaslı toz boya atıkları ile takviye edilen AYPE numunelerine ait çekme testi sonuçları sunulmuştur.

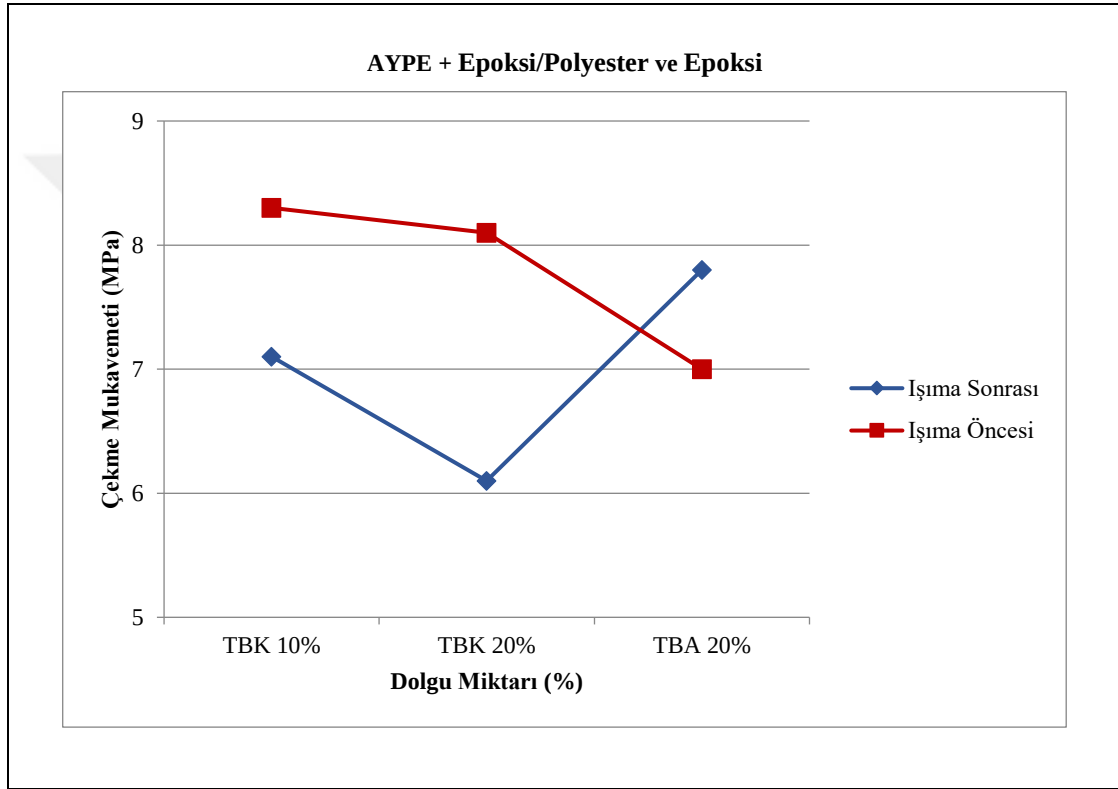
Tablo 7.7 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli AYPE numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
AYPE saf	8,1	0,29402375	238,83	17,31456421
AYPE + 10% epoksi/polyester	7,1	0,31054871	182,68	26,61827551
AYPE + 20% epoksi/polyester	6,1	0,3261223	242,12	20,76095684
AYPE + 20% epoksi	7,8	0,07912252	231,51	6,774959483

Tablo 7.7'de gama ışınına maruz bırakılan toz boya atığı takviyeli AYPE numunelerin çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında artan dolgu miktarı ile çekme gerilmesi değerleri bir miktar azalmıştır. Bu sonuçlara göre özellikle epoksi sisteme ait toz boya atığının olumsuz etkisinin çok fazla olmadığı ve ağırlıkça %20 dolgu katkılı epoksi/polyester (hinrit) sistem ait toz boya atığına göre numunelerin daha mukavim olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %20 hibrit sisteme ait dolgu içeren numunelerin çekme gerilmesi 6,1 MPa iken aynı oranda epoksi sisteme ait dolgu içeren numunelerin 7,8 MPa ölçülmüştür.

Tablo 7.8 Toz boya takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE + 10% epoksi/polyester	8,3	7,1
AYPE + 20% epoksi/polyester	8,1	6,1
AYPE + 20% epoksi	7	7,8



Şekil 7.4 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim

Şekil 7.4'de gama ışıması öncesi ve sonrasına ait çekme mukavemet sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre gama ışıması sade epoksi sisteme ait toz boya içeren numunelerde olum etki yarattığı görülmektedir. Işıma öncesi ağırlıkça %20 epoksi toz boya atığı içeren numunelerin çekme gerilmesi 7,0 MPa iken bu değer ışıma sonrası 7,8MPa değerine yükselerek numunelerin çekme mukavemeti artmıştır.

Tablo 7.9’te PS + Epoksi için yapılan çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

Tablo 7.9 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PS numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
PS Saf	41,4	1,507056683	2343,54	249,0712926
PS + 5% Epoksi	40,8	4,111421779	2463,38	51,20570509
PS + 10% Epoksi	39,1	3,52939048	2487,1	58,53413733
PS + 20% Epoksi	39,5	0,738650705	2656,39	54,90756627

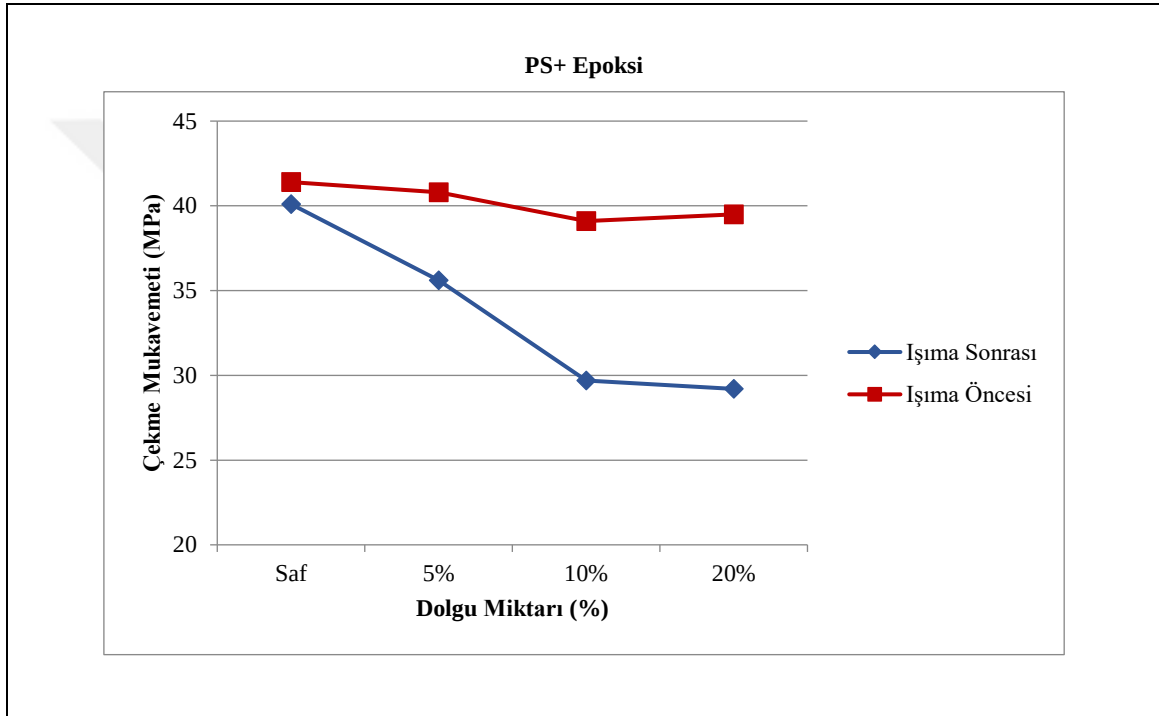
Tablo 7.9’da gama ışınına maruz bırakılan toz boya atığı takviyeli PS (Polistiren) numunelerine ait çekme mukavemeti ve E-Modül test sonuçları sunulmaktadır. Verilere göre, çekme mukavemeti değerleri saf PS numunesinde 41,4 MPa iken, epoksi bazlı toz boya atığı katkısı arttıkça bu değer kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %10 epoksi katkılı numunede çekme mukavemeti 39,1 MPa’ya kadar düşerken, %20 katkıda bu değer 39,5 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum, katkı oranının artışına rağmen gama ışını etkisiyle elde edilen bağ kuvvetinin belirli bir doygunluğa ulaştığını düşündürmektedir.

Öte yandan, E-Modül değerlerinde ise artış eğilimi dikkat çekmektedir. Saf PS’nin E-Modül değeri 2343,54 MPa iken, %20 epoksi katkısı ile bu değer 2656,39 MPa’ya ulaşmıştır. Bu da dolgu malzemesinin elastik özellikleri baskılayarak yapının rijitliğini artırdığını göstermektedir. Ayrıca standart sapma değerlerinin düşük olması, test sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, epoksi katkılı toz boya atıklarının çekme mukavemeti üzerinde sınırlı düzeyde azalmaya neden olduğu, ancak malzemenin sertlik ve rijitliğini artırarak yapısal bütünlüğe katkı sunduğu söylenebilir. Bu durum, dolgu katkı malzemelerinin türü ve oranının, malzeme performansı üzerinde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 7.10 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PS Saf	41,4	40,1
PS + 5% Epoksi	40,8	35,6
PS + 10% Epoksi	39,1	29,7
PS + 20% Epoksi	39,5	29,2



Şekil 7.5 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişim

Şekil 7.5'te sunulan verilere göre, gama ışını uygulamasının toz boya atığı ile takviye edilmiş PS (Polistiren) numunelerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkisi açıkça gözlemlenmektedir. Saf PS numunesinin gama ışını öncesi çekme mukavemeti 41,4 MPa iken, ışınlama sonrası bu değer 40,1 MPa'a düşmüştür. Bu azalma, gama ışını uygulamasının saf polistirenin moleküler yapısında hafif bir bozulmaya neden olduğunu göstermektedir.

Dolgu katkısı %5'e çıkarıldığında, ışınlama öncesi 40,8 MPa olan çekme mukavemeti, ışınlama sonrası 35,6 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, %10 dolgu katkılı numunelerde bu değerler sırasıyla 39,1 MPa ve 29,7 MPa; %20 katkılı numunelerde ise 39,5

MPa ve 29,2 MPa olarak gerçekleşmiştir. Dolgu oranı arttıkça, gama ışını sonrası çekme mukavemeti değerlerinde anlamlı bir düşüş gözlemlenmektedir.

Bu durum, yüksek dozda gama ışını uygulamasının özellikle epoksi sistemine ait toz boya atıkları ile takviye edilmiş PS numunelerinde moleküler zincirlerde kırılmalara ve dolgu-matris etkileşiminde zayıflamalara neden olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca, artan dolgu oranının numune içerisindeki homojen dağılımının zorlaşması ve ışınlama sonrası oluşabilecek mikro boşlukların, çekme mukavemetini olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, gama ışını uygulaması, dolgu oranı düşük numunelerde çekme mukavemetine nispeten sınırlı bir etki gösterirken; dolgu oranı arttıkça bu etki daha belirgin hale gelmektedir. Bu da, toz boya atığı katkılı PS kompozitlerinde ışınlama sonrası performansın dolgu oranına duyarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 7.11’de PS + Epoksi/Polyester için yapılan çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

Tablo 7.11 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PS numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
PS + 10%Epoksi/Polyester	39,3	0,662360644	2478,6	146,0674474
PS + 20% Epoksi/Polyester	34,5	0,715945616	2545,8	30,59651042

Tablo 7.11’de sunulan verilere göre, gama ışınına maruz bırakılan toz boya atığı takviyeli PS (Polistiren) numunelerinde çekme mukavemeti ve E-Modül değerlerinde dolgu oranına bağlı olarak farklılıklar gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %10 epoksi/polyester (hibrit) sistem katkılı numunelerde çekme mukavemeti 39,3 MPa olarak ölçülürken, %20 dolgu katkısına sahip numunelerde bu değer 34,5 MPa’a düşmüştür. Bu düşüş, artan dolgu oranının çekme performansı üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir.

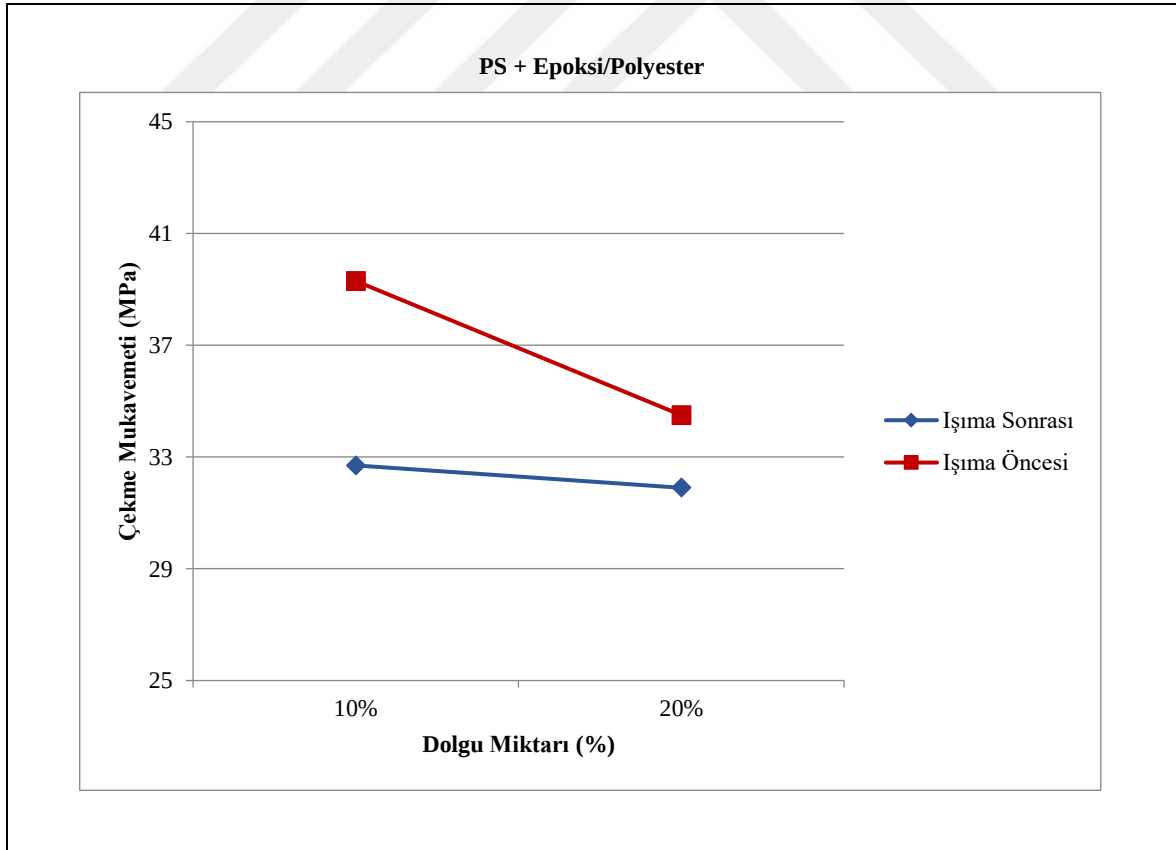
Bununla birlikte, E-Modül değerleri incelendiğinde, %10 dolgu katkılı numunede 2478,6 MPa olan değer, %20 katkıda 2545,8 MPa seviyesine yükselmiştir. Bu durum, yüksek dolgu oranının sertliği artırıcı bir etki oluşturduğunu, ancak aynı zamanda numunenin çekme dayanımını sınırladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bu veriler, hibrit

toz boya atığı katkısının artan oranlarda kullanıldığında matris-dolgu etkileşiminde homojenliğin azaldığını ve yapının çekme mukavemetini düşürdüğünü, fakat rijitliğin (sertlik) arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, gama ışını uygulanmış PS numunelerinde %10 epoksi/polyester katkısı optimum çekme mukavemeti sağlarken, daha yüksek oranlarda katkı kullanımında yapının daha rijit ancak daha az mukavim hale geldiği söylenebilir. Bu da hibrit katkı oranının dikkatle belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 7.12 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PS + 10% Epoksi/Polyester	39,3	32,7
PS + 20% Epoksi/Polyester	34,5	31,9



Şekil 7.6 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde gözlenen değişimi

Şekil 7.6’da sunulan verilere göre, gama ışınına maruz bırakılan PS (Polistiren) kompozitlerinde çekme mukavemeti değerlerinde dolgu oranına bağlı olarak azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %10 epoksi/polyester katkısı içeren numunelerde gama ışını uygulanmadan önce çekme mukavemeti yaklaşık 37,8 MPa iken, ışınlama sonrasında bu değer 32,9 MPa seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde, %20 dolgu katkısı içeren numunelerde ışınlama öncesi 34,5 MPa olan çekme mukavemeti, gama ışını sonrası 31,9 MPa seviyesinde ölçülmüştür.

Bu durum, gama ışını uygulamasının epoksi/polyester sistemine ait dolgu içeren PS kompozitlerinde çekme mukavemeti üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir. Özellikle dolgu oranı arttıkça bu olumsuz etkinin daha belirgin hale geldiği ve gama ışını sonrası yapının daha düşük mukavemet değerleri sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, dolgu malzemesi ile matris arasında ışınlama sonrası bağ bütünlüğünün zayıflaması ya da dolgu dağılımındaki düzensizliklerin mukavemeti negatif yönde etkilediğini düşündürmektedir.

Tablo 7.13’de PP + Epoksi/Polyester çekme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

Tablo 7.13 Gama ışınına tabi tutulmuş toz boya atığı takviyeli PP numunelerinin Çekme ve E-Modül test sonuçları

Matris + Dolgu [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti Standart Sapma	E-Modül [MPa]	E-Modül Standart Sapma
PP +5% Epoksi/Polyester	18,7	1,506141698	2014,06333	23,5033026
PP + 20% Epoksi/Polyester	24,5	0,108888062	1707,42667	27,0534662
PP + 30% Epoksi/Polyester	28,6	0,220643989	1597,17	33,3709889

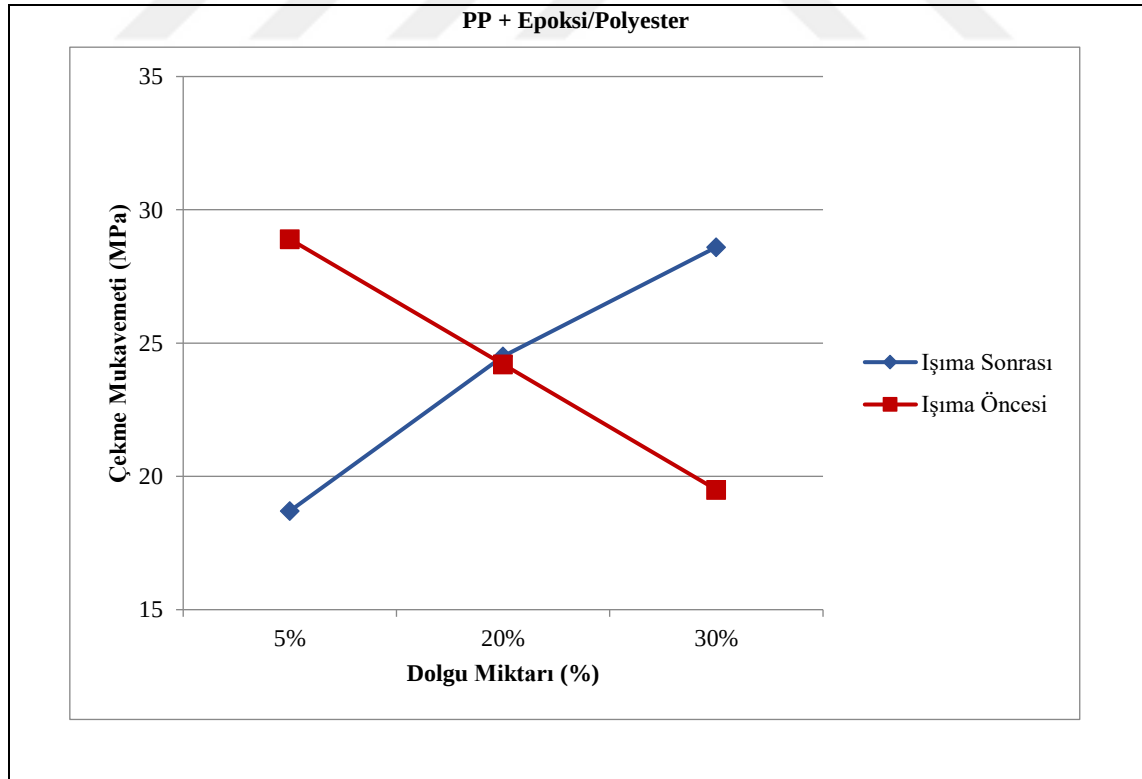
Tablo 7.13’te gama ışınına maruz bırakılan PP (Polipropilen) kompozit numunelerinde çekme mukavemeti değerlerinin dolgu oranına bağlı olarak önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Özellikle epoksi/polyester sisteme ait toz boya atığı ile takviye edilmiş numunelerde, dolgu oranı %5’ten %30’a çıkarıldığında çekme mukavemeti değerleri 18,7 MPa’dan 28,6 MPa’a yükselmiştir. Bu da yaklaşık %53’lük bir artış anlamına gelmektedir.

Bu sonuçlar, gama ışını uygulamasının yanı sıra, dolgu oranının artırılmasının da PP kompozitlerinin mekanik performansını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle hibrit toz boya atıklarının etkili bir şekilde dağıldığı ve matrisle iyi bir bağlanma sağladığı koşullarda, bu tür katkı maddeleri PP yapısının çekme mukavemetini artırıcı bir etki yaratmaktadır.

Ancak E-Modül değerlerine bakıldığında, dolgu oranı arttıkça modül değerlerinde dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, en yüksek çekme mukavemetinin elde edildiği %30 dolgu katkısında E-Modül değeri 1597,17 MPa ile en düşük seviyededir.

Tablo 7.14 Toz boya takviyesi yapılmış PS'nin gama ışını öncesi ve sonrasına ait çekme deneyi sonuçları

Çekme Gerilmesi Test Değerleri	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Çekme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PP +5% Epoksi/Polyester	18,7	28,9
PP + 20% Epoksi/Polyester	24,5	24,2
PP + 30% Epoksi/Polyester	28,6	19,5



Şekil 7.7 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış PP'nin gama ışınına maruz bırakılması sonucunda çekme mukavemetinde gözlenen değişim

Şekil 7.7’de yer alan verilere göre, gama ışını uygulamasının polipropilen (PP) kompozitlerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkisi, dolgu oranına ve ıslama durumuna göre farklılık göstermektedir. Ağırlıkça %5 epoksi/polyester takviyeli PP numunelerinde gama ışını uygulanmadan önce çekme mukavemeti 18,7 MPa iken, ıslama sonrasında bu değer 28,9 MPa’a yükselmiştir. Bu belirgin artış, gama ışını uygulamasının düşük oranlı dolgu katkısı içeren PP kompozitlerinde çekme dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Ancak dolgu oranı %20’ye çıkarıldığında, ıslama öncesi çekme mukavemeti 24,5 MPa iken, ıslama sonrası bu değer 24,2 MPa’a hafif bir azalma göstermiştir. Bu durum, orta düzeyde dolgu katkısının gama ışını etkisiyle çekme mukavemeti üzerinde daha sınırlı bir artış sağladığını işaret etmektedir.

Dolgu oranı %30’a ulaştığında ise, ıslama öncesi çekme mukavemeti 28,6 MPa iken, ıslama sonrasında bu değer önemli bir düşüşle 19,5 MPa seviyesine gerilemiştir. Bu azalma, yüksek oranda dolgu katkısı bulunan PP kompozitlerinde gama ışını uygulamasının çekme mukavemetine olumsuz etki ettiğini ve yapısal bozulmalara neden olabileceğini düşündürmektedir. Bu bağlamda, optimum dolgu oranının belirlenmesi, hem yapısal bütünlüğün korunması hem de mekanik performansın artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

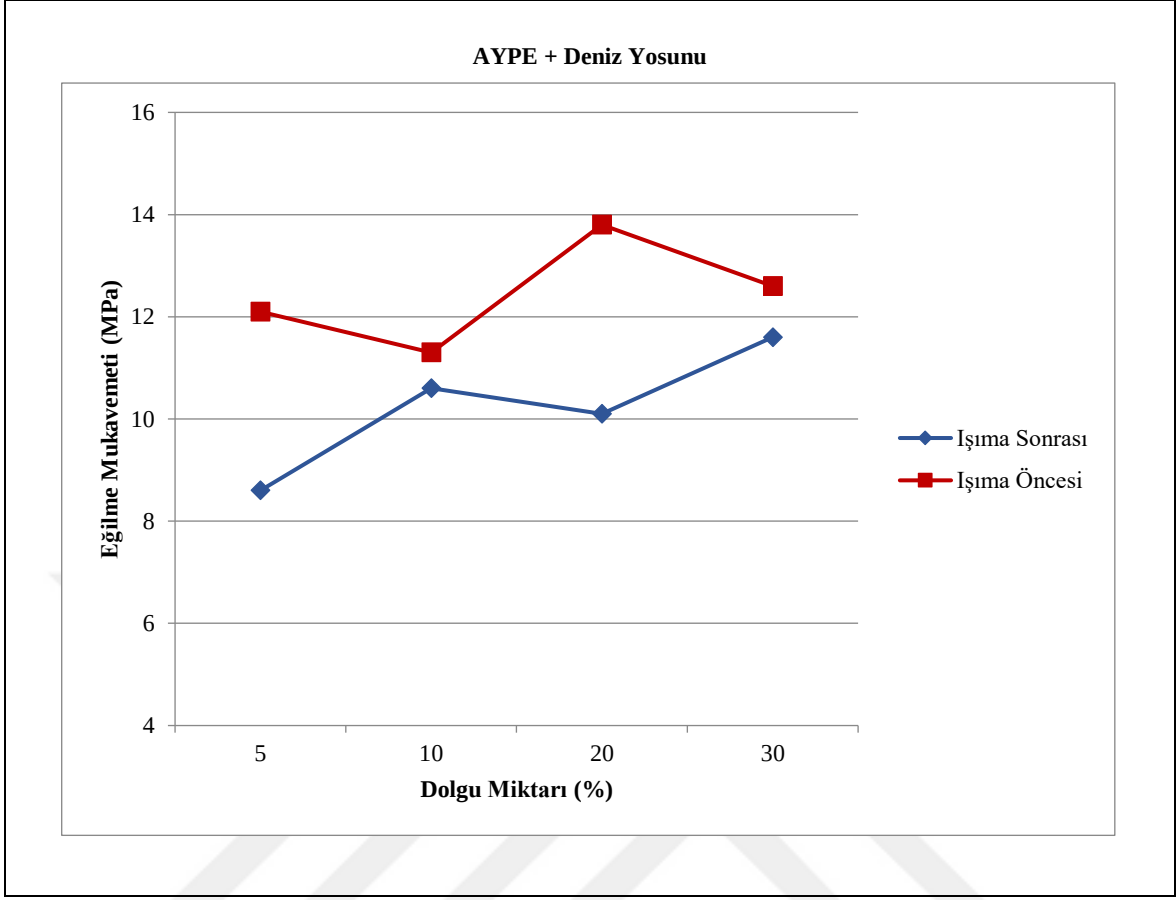
7.2 Üç Nokta Eğilme Mukavemeti Sonuçları

Farklı karışım oranlarına sahip ve gama ışını uygulanmış standart deney numuneleri için elde edilen üç nokta eğilme sonuçları, Tablo 6.2’de verilmiş olup, bu sonuçlar aşağıdaki grafiklerde görselleştirilmiştir. Tablo 7.15’de üç nokta eğilme testi sonucundan elde edilen bulgular sunulmuştur.

Tablo 7.15 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış polietilen numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE + 5% Deniz Yosunu	12,1	8,6
AYPE + 10% Deniz Yosunu	11,3	10,6
AYPE + 20% Deniz Yosunu	13,8	10,1
AYPE + 30% Deniz Yosunu	12,6	11,6

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan AYPE + deniz yosunu katkılı numunelerin düşey yüklemelere karşı eğilme dayanımlarında, gama ışıması öncesine kıyasla azalma gözlemlenmiştir. Özellikle %5 deniz yosunu katkılı AYPE numunesi, gama ışıması öncesinde 12,1 MPa olan eğilme mukavemetinin, ışımadan sonra 8,6 MPa’ya gerilediği görülmektedir. Benzer şekilde, %20 katkılı numunede bu değer 13,8 MPa’dan 10,1 MPa’ya, %30 katkı oranında ise 12,6 MPa’dan 11,6 MPa’ya düşmüştür. Bu veriler, gama ışını uygulamasının AYPE’ye belirli oranlarda deniz yosunu katkısı ilavesiyle eğilme dayanımını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Dikkat çeken bir diğer nokta ise, %10 katkı oranında eğilme dayanımının 11,3 MPa’dan 10,6 MPa’ya düşerek en düşük değişimi göstermesidir. Bu durum, katkı oranı ile ışımaya karşı dayanım arasında doğrusal bir ilişki olmadığını, karmaşık bir yapısal etkileşim bulunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.8 Dolgu malzemesi takviyesi yapılmış AYPE'nin gama ışınına maruz bırakılması sonucunda üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.8'de sunulan verilere göre, deniz yosunu ile takviye edilmiş AYPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen) kompozitlerinin çekme mukavemeti değerlerinde, gama ışını uygulaması öncesi ve sonrası arasında belirgin farklılıklar gözlenmektedir.

Gama ışını uygulanmadan önce, %5 dolgu oranında yaklaşık 12,2 MPa olan çekme mukavemeti, dolgu oranı %20'ye çıkarıldığında 14 MPa'a kadar yükselmiştir. Bu durum, dolgu oranının artırılmasıyla mekanik dayanımın iyileştiğini göstermektedir. Ancak, %30 dolgu seviyesinde mukavemet değeri 13 MPa'a düşerek, yüksek dolgu oranlarının çekme dayanımında sınırlı bir azalmaya yol açabileceğini işaret etmektedir.

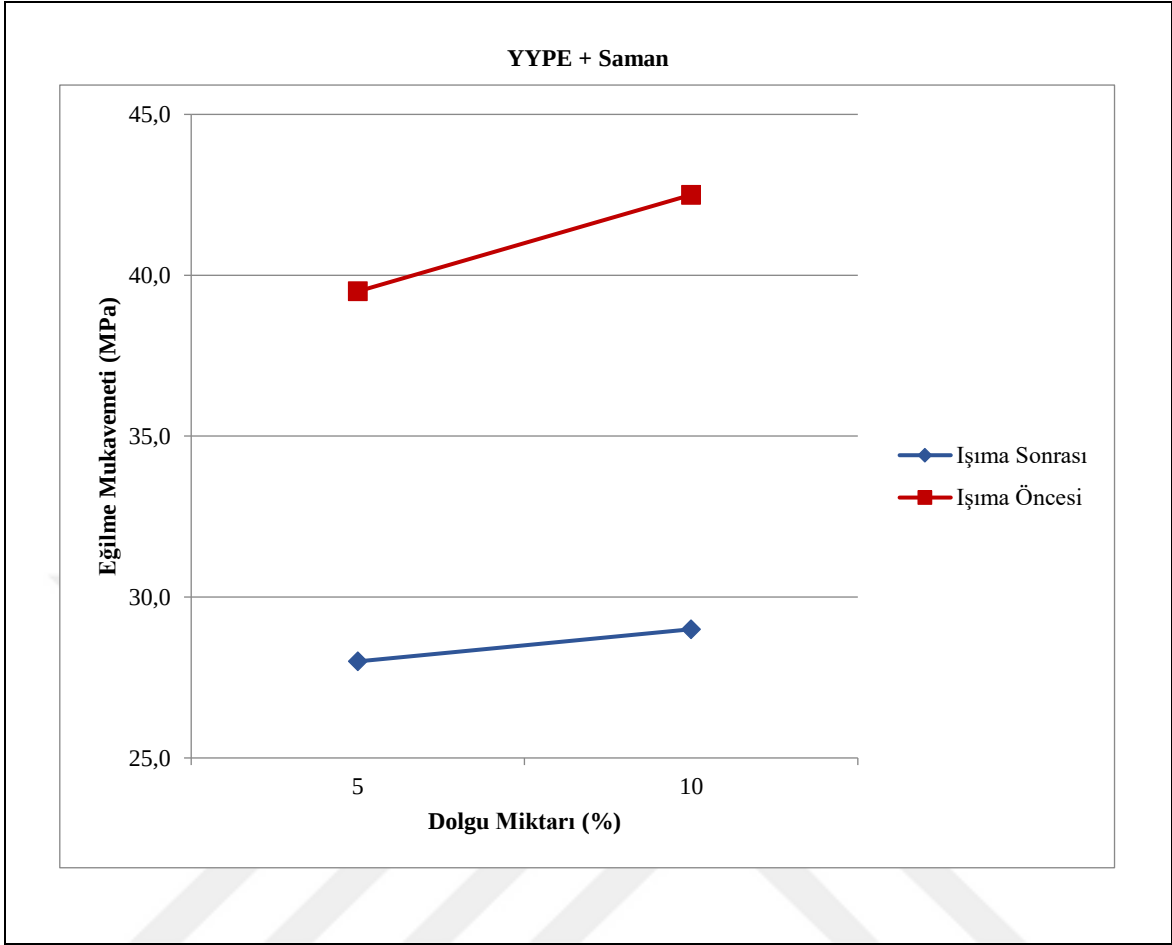
Gama ışını uygulaması sonrasında ise çekme mukavemeti tüm oranlarda daha düşük kalmış, ancak dolgu oranı %30'a ulaştığında 11,6 MPa'a çıkarak başlangıç seviyesinin üzerine geçmiştir. Bu bulgular, ışınlama sonrası yapıdaki bazı modifikasyonların özellikle yüksek dolgu oranlarında mukavemeti bir miktar iyileştirebildiğini göstermektedir. Genel

olarak, dolgu oranı ve gama ışını etkisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Tablo 7.16 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış YYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
YYPE + 5% Saman	39,5	28
YYPE + 5% Saman	42,5	29

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan YYPE + %5 saman katkılı numunelerin düşey yüklemelere karşı eğilme dayanımlarında, gama ışıması öncesine kıyasla azalma gözlemlenmiştir. İlk numunede, gama ışıması öncesi 39,5 MPa olan eğilme mukavemeti, ışımadan sonra 28 MPa'ya düşmüştür. İkinci numunede ise bu değer 42,5 MPa'dan 29 MPa'ya gerilemiştir. Her iki durumda da gama ışını uygulamasının, YYPE'nin eğilme mukavemetinde önemli bir azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, polimer matris içerisindeki lif takviyeli katkıların gama ışını karşısında mekanik dayanımı koruyamadığını, aksine zayıflattığını göstermektedir.



Şekil 7.9 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak YYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.9'daki verilere göre, saman takviyeli YYPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) kompozitlerinde dolgu miktarı arttıkça üç nokta eğilme mukavemeti hem gama ışını öncesinde hem sonrasında artış göstermiştir.

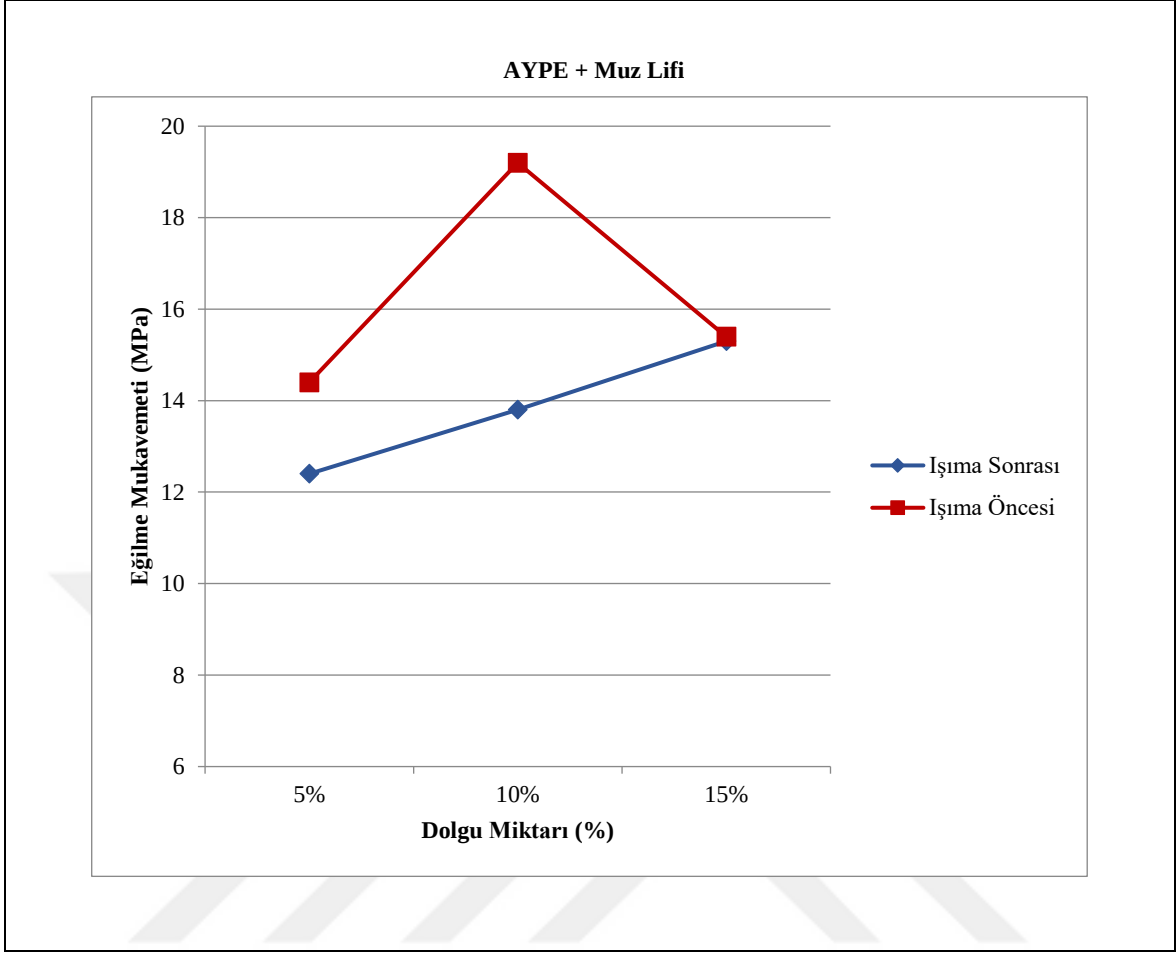
%5 dolgu oranında ışınlama öncesi eğilme mukavemeti yaklaşık 39,5 MPa iken, bu değer %10 dolgu ile yaklaşık 42,5 MPa'a yükselmiştir. Işınlama sonrasında ise değerler sırasıyla yaklaşık 27,5 MPa ve 29 MPa olarak ölçülmüştür.

Bu durum, gama ışını etkisinin eğilme mukavemetini azalttığını, ancak dolgu oranının artırılmasıyla bu olumsuz etkinin kısmen dengelenebildiğini göstermektedir. Özellikle ışınlama sonrası mukavemet değerlerinde dolgu oranına bağlı iyileşme eğilimi dikkat çekmektedir.

Tablo 7.17 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış AYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE + 5% Muz Lifi	14,4	12,4
AYPE + 10% Muz Lifi	19,2	13,8
AYPE + 15% Muz Lifi	15,4	15,3

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan AYPE + muz lifi katkılı numunelerin üç nokta eğilme mukavemeti değerlerinde, gama ışıması öncesine kıyasla hem artış hem de azalış eğilimleri gözlemlenmiştir. %5 oranında muz lifi katkısı içeren numunelerde eğilme mukavemeti, gama ışıması öncesi 14,4 MPa iken ışıma sonrası 12,4 MPa'ya düşmüştür. %10 katkı oranında, bu değer 19,2 MPa'dan 13,8 MPa'ya gerilemiş ve gama ışını etkisinin dayanım üzerinde belirgin bir azalma oluşturduğu gözlenmiştir. Buna karşın, %15 muz lifi katkılı numunede, gama ışıması öncesi 15,4 MPa olan eğilme dayanımı, ışımadan sonra 15,3 MPa ile neredeyse sabit kalmıştır. Bu bulgular, gama ışını uygulamasının katkı oranına bağlı olarak AYPE'nin eğilme dayanımını farklı şekillerde etkileyebildiğini ve bu etkinin doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.10 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak AYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.10'da verilen AYPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen) + muz lifi kompozitlerine ait üç nokta eğilme mukavemeti verilerine göre, dolgu miktarı arttıkça gama ışını öncesi ve sonrası değerlerde belirgin bir değişim gözlemlenmiştir.

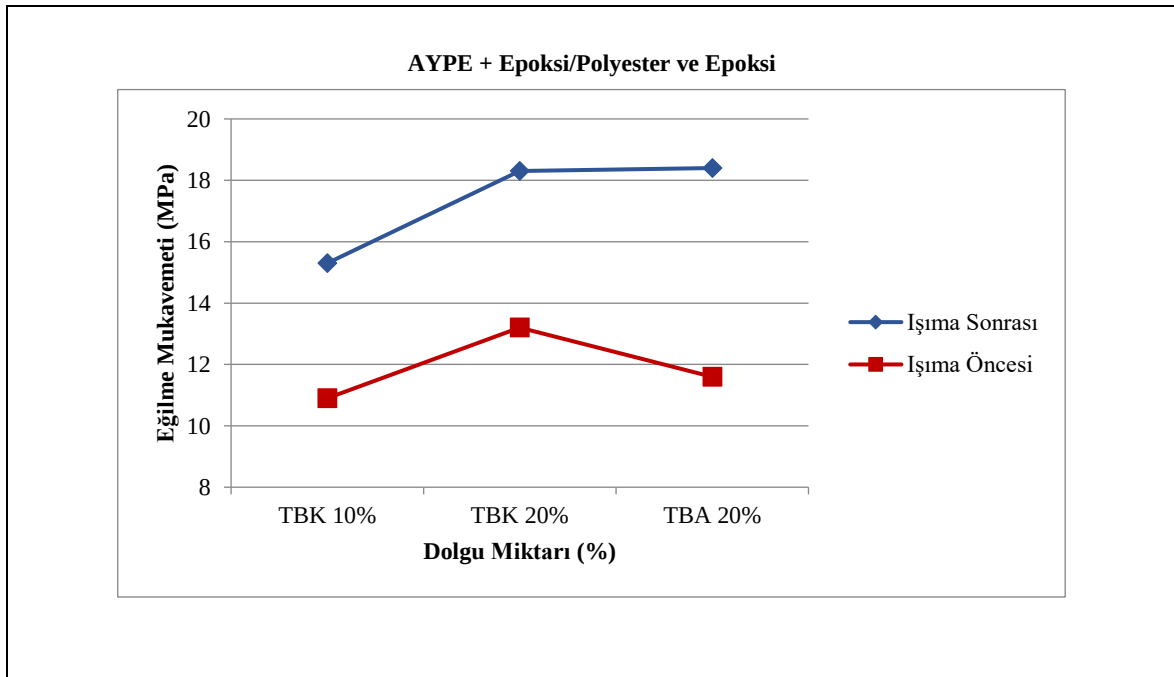
Gama ışını öncesinde eğilme mukavemeti %10 dolgu oranına kadar artmış (yaklaşık 19 MPa), ardından %15'te düşüş göstermiştir. Bu durum, optimum dolgu miktarının %10 civarında olduğunu ve bu oranın aşılmasıyla mukavemetin azaldığını göstermektedir.

Işınlama sonrasında ise tüm dolgu oranlarında eğilme mukavemeti değerleri daha düşük seyretmiş, ancak artış eğilimi %15'e kadar devam etmiştir. Bu sonuçlar, gama ışını uygulamasının yapısal bütünlük üzerinde kısmi olumsuz etkiler yarattığını; fakat dolgu oranının arttırılmasıyla bu etkinin sınırlı da olsa dengelenebileceğini göstermektedir.

Tablo 7.18 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış AYPE numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
AYPE + 10% Epoksi/Polyester	10,9	15,3
AYPE + 20% Epoksi/Polyester	13,2	18,3
AYPE + 20% Epoksi	11,6	18,4

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan AYPE + TB katkılı numunelerin düşey yüklemelere karşı eğilme dayanımlarında, gama ışıması öncesine kıyasla belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. %10 oranında (Epoksi/Polyester) içeren numunelerde eğilme mukavemeti, gama ışıması öncesinde 10,9 MPa iken ışımadan sonra 15,3 MPa'ya yükselmiştir. %20 katkı oranında, Epoksi/Polyester kombinasyonu kullanılan numunede bu değer 13,2 MPa'dan 18,3 MPa'ya, yalnızca Epoksi reçine kullanılan numunede ise 11,6 MPa'dan 18,4 MPa'ya yükselmiştir. Bu artışlar, gama ışını uygulamasının AYPE matrisine eklenen TB katkılarının mekanik performansa olan olumlu etkisini artırdığını göstermektedir. Özellikle hem epoksi hem polyester içeren reçinelerde, gama ışını sonrası oluşan çapraz bağlanmanın eğilme mukavemetine katkı sağladığı değerlendirilmektedir.



Şekil 7.11 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak AYPE'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.11'de AYPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen) kompozitlerine %10 ve %20 oranlarında epoksi ve epoksi/polyester sistemli toz boya atığı (TBA/TBK) takviyesiyle uygulanan gama ışını sonrasında eğilme mukavemetinde meydana gelen değişim gösterilmiştir.

Gama ışını öncesinde, %20 TBK katkılı numune en yüksek eğilme mukavemetine (yaklaşık 13 MPa) ulaşmıştır. %10 TBK ve %20 TBA katkılı numunelerde ise daha düşük değerler gözlemlenmiştir.

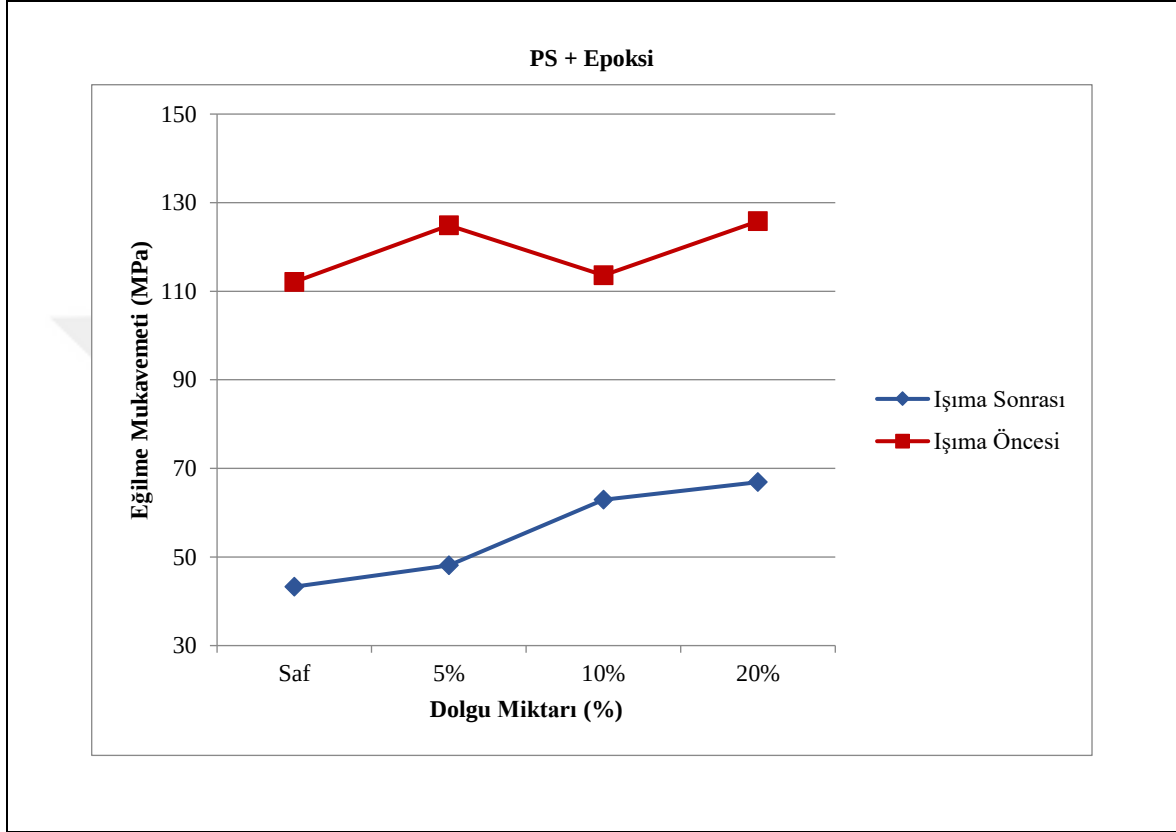
Gama ışını sonrasında ise tüm numunelerde eğilme mukavemeti önemli ölçüde artmıştır. Özellikle %20 TBK katkılı numune yaklaşık 18,5 MPa seviyesine ulaşarak en yüksek dayanımı sergilemiştir. Bu durum, epoksi/polyester sistemli toz boya atıklarının ve gama ışını uygulamasının birlikte sinerjik bir şekilde eğilme mukavemetini artırabildiğini göstermektedir. Ayrıca TBK katkısı, TBA katkısına göre ışınlama sonrası daha yüksek mukavemet kazancı sağlamıştır.

Tablo 7.19 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PS numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PS Saf	112,1	43,3
PS + %5 Epoksi	124,9	48,1
PS + %10 Epoksi	113,6	62,9
PS + %20 Epoksi	125,8	66,9

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan PS (Polistiren) + toz boya açık siyah (epoksi esaslı) katkılı numunelerin üç nokta eğilme mukavemeti değerlerinde, gama ışıması öncesine kıyasla anlamlı artışlar gözlemlenmiştir. Saf PS numunesinin eğilme mukavemeti, gama ışıması öncesinde 43,3 MPa olarak ölçülürken, katkı uygulanmamış durumda en düşük değeri göstermiştir. %5 epoksi katkılı numunede bu değer 48,1 MPa'ya yükselmiş, %10 katkılı numunede ise 62,9 MPa'ya ulaşarak ciddi bir dayanım artışı sergilemiştir. En yüksek eğilme mukavemeti değeri ise %20 epoksi katkılı numunede gözlemlenmiş olup, bu değer 66,9 MPa olarak belirlenmiştir. Bu veriler, hem

katkı miktarının artmasının hem de gama ışını uygulamasının, PS matrisinin eğilme dayanımı üzerinde sinerjik bir etki yarattığını göstermektedir. Dolayısıyla, epoksi esaslı katkı maddeleriyle desteklenmiş polistiren numunelerde, gama ışını sonrası mekanik özelliklerin belirgin şekilde iyileştirildiği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 7.12 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PS'nin gama ışınması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.12'de, PS (Polistiren) matrisli ve epoksi esaslı toz boya atığı takviyeli kompozitlerin gama ışını öncesi ve sonrası üç nokta eğilme mukavemeti değerleri sunulmuştur.

Grafikte görüldüğü üzere, gama ışını öncesi numunelerde eğilme mukavemeti tüm dolgu oranlarında oldukça yüksek olup, özellikle %5 katkı oranında zirveye ulaşmıştır. Ancak gama ışını sonrası değerlerde kademeli bir artış görülmekte; saf PS'ten başlayarak %20 dolgu katkısına kadar eğilme mukavemeti düzenli olarak yükselmiştir.

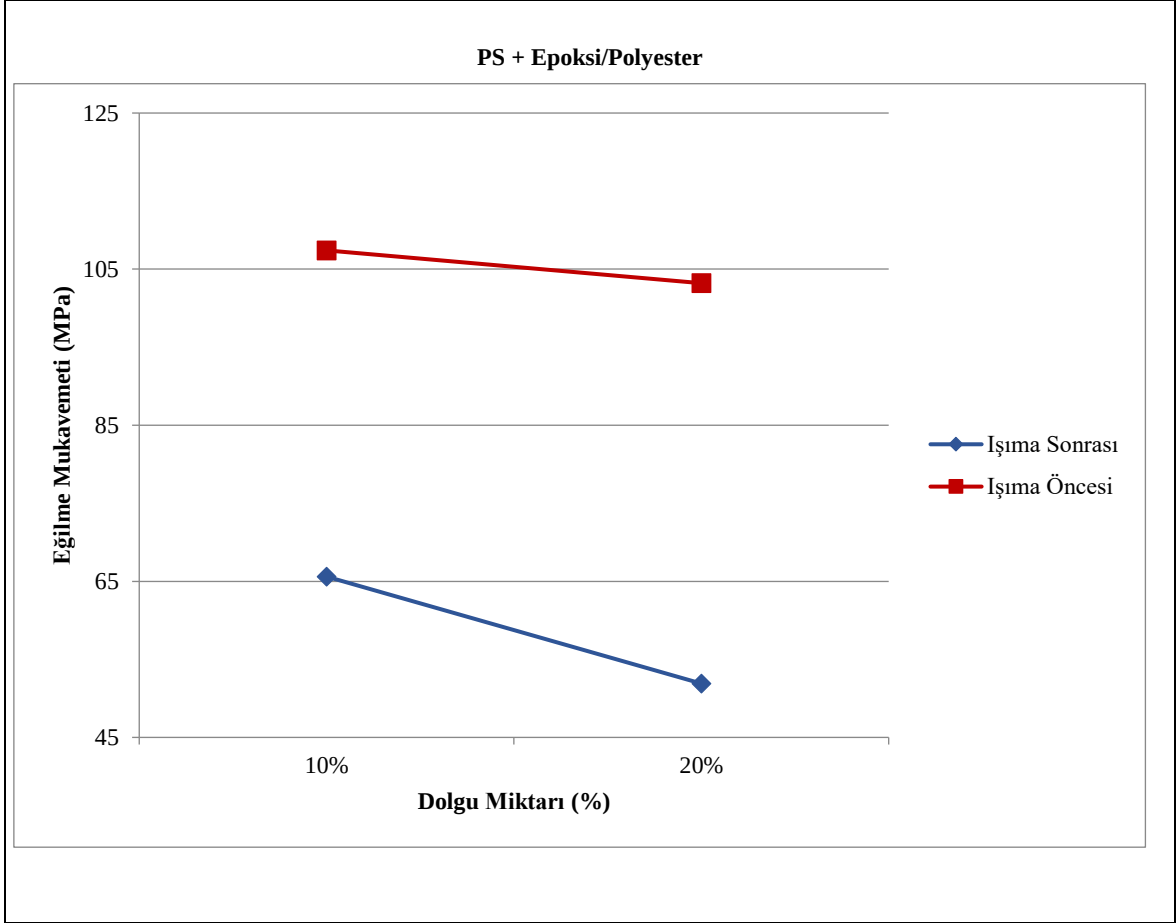
Bu durum, gama ışını uygulamasının dolgu katkılı PS kompozitlerinde yapısal bütünlüğü artırarak eğilme mukavemetine olumlu katkı sunduğunu göstermektedir. Gama

ışını öncesi değerler daha yüksek olsa da, ışınlama sonrası performans artış eğilimi özellikle dolgu miktarındaki artışla paralel bir gelişim sergilemektedir.

Tablo 7.20 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PS numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PS + %10 Toz Boya Açık (Epoksi/Polyester) Siyah	107,4	65,6
PS + %20 Toz Boya Açık (Epoksi/Polyester) Siyah	103,2	51,9

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan PS (Polistiren) + epoksi/polyester esaslı açık siyah toz boya katkılı numunelerin üç nokta eğilme mukavemeti değerlerinde, gama ışıması öncesine kıyasla azalma gözlemlenmiştir. %10 katkı oranında, eğilme mukavemeti gama ışıması öncesinde 107,4 MPa iken ışımadan sonra 65,6 MPa'ya düşmüştür. Benzer şekilde, %20 katkı oranına sahip numunede bu değer 103,2 MPa'dan 51,9 MPa'ya gerilemiştir. Her iki durumda da gama ışını uygulamasının, epoksi/polyester katkılı PS matrisinin eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, epoksi-polyester kombinasyonunun gama ışınına karşı daha düşük yapısal stabiliteye sahip olabileceğini ve dolayısıyla bu tür katkıların mekanik özelliklerde iyileşme değil, zayıflama yaratabileceğini göstermektedir.



Şekil 7.13 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PS'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.13'te, PS (Polistiren) matrisli kompozitlerde epoksi/polyester esaslı toz boya atığı katkısının %10 ve %20 dolgu oranlarında, gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki üç nokta eğilme mukavemeti değerleri sunulmuştur.

Grafikteki verilere göre, gama ışını öncesi numunelerde eğilme mukavemeti %10 dolgu ile yaklaşık 108 MPa seviyesindeyken, %20 dolgu oranında bu değer yaklaşık 103 MPa'a düşmüştür. Bu durum, dolgu oranı arttıkça eğilme mukavemetinde sınırlı bir azalma olduğunu göstermektedir.

Gama ışını sonrası değerlere bakıldığında ise, %10 dolgu katkısında eğilme mukavemeti yaklaşık 67 MPa iken, %20 dolgu oranında bu değer 50 MPa seviyelerine

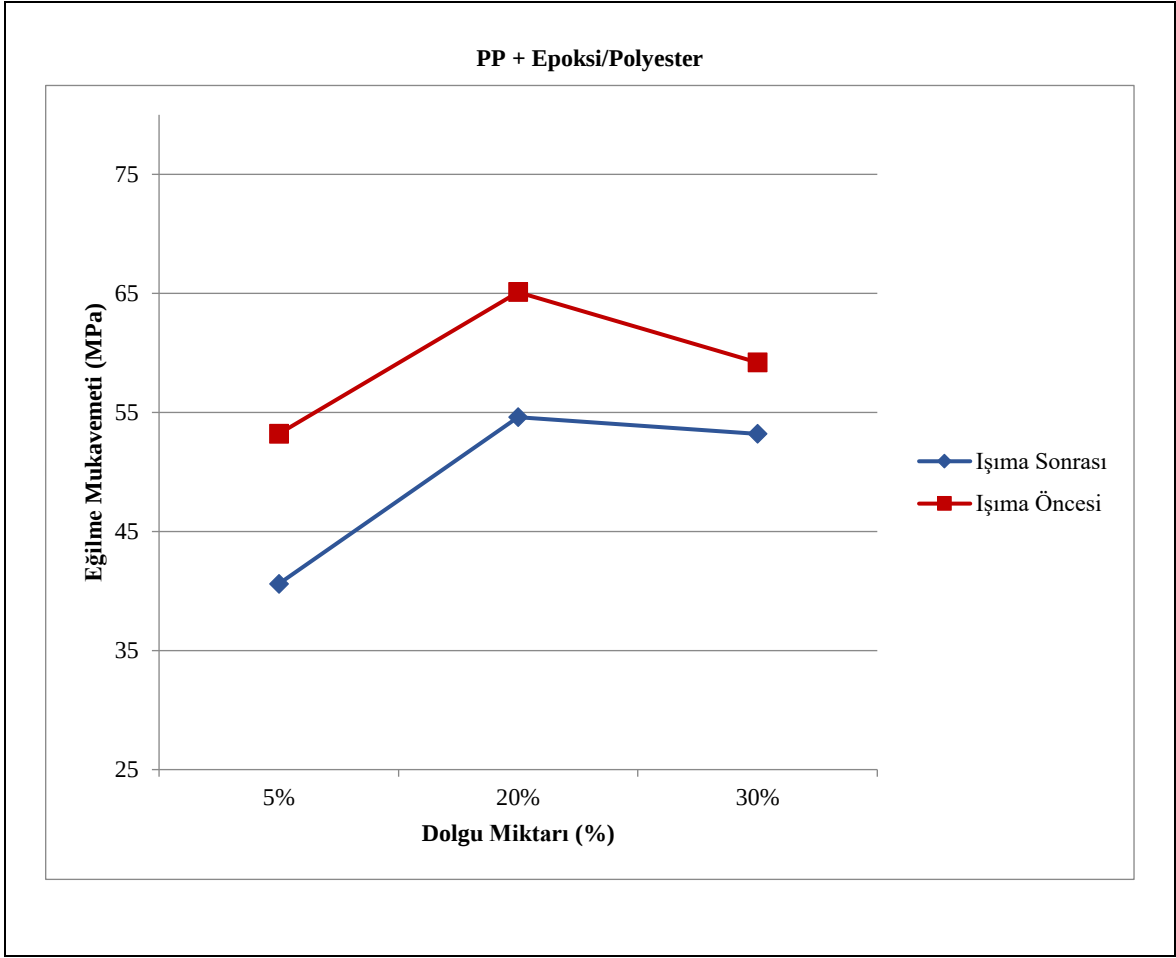
gerilemiştir. Bu azalma, özellikle yüksek dolgu oranlarının gama ışını etkisi altında mukavemeti olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, hem ısınlama öncesi hem de sonrası için dolgu miktarındaki artış, eğilme mukavemetinde düşüşe neden olmuş; bu da epoksi/polyester katkılı sistemlerde yapısal zayıflamanın dolgu miktarıyla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Tablo 7.21 Gama ışımasına tabi tutulmuş ve ışımaya maruz bırakılmamış PP numuneler için ortalama değerleri alınmış eğilme mukavemeti sonuçları

Çekme Gerilmesi Numuneleri	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması öncesi)	Eğilme Mukavemeti (MPa) (gama ışıması sonrası)
PP + %5 Koyu (Epoksi/Polyester) Siyah	53,2	40,6
PP + %20 Koyu (Epoksi/Polyester) Siyah	65,1	54,6
PP + %30 Koyu (Epoksi/Polyester) Siyah	59,2	53,2

Yukarıda verilen sonuçlara göre, gama ışınına maruz bırakılan PP (Polipropilen) + koyu siyah (Epoksi/Polyester) katkılı numunelerin üç nokta eğilme mukavemeti değerlerinde, gama ışıması öncesine kıyasla azalma gözlemlenmiştir. %5 katkı oranında, eğilme mukavemeti gama ışıması öncesi 53,2 MPa iken, ışıma sonrası 40,6 MPa'ya düşmüştür. Benzer şekilde, %20 katkı oranına sahip numunelerde bu değer 65,1 MPa'dan 54,6 MPa'ya gerilemiştir. %30 katkı oranı uygulanan numunelerde ise eğilme mukavemeti, gama ışıması öncesinde 59,2 MPa iken, sonrasında 53,2 MPa seviyesine düşmüştür. Bu veriler, epoksi/polyester katkılı PP numunelerde dolgu oranı artsa dahi, gama ışını uygulamasının eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etki yarattığını göstermektedir. Bu durum, katkı maddelerinin ışıma ile bozunmaya uğraması veya matris içi bağların zayıflaması ile açıklanabilir.



Şekil 7.14 Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak PP'nin gama ışıması sonrasında üç nokta eğilme mukavemetinde ki değişim

Şekil 7.14'te, PP (Polipropilen) matrisli kompozitlere epoksi/polyester esaslı toz boya atığı katkısı yapılmasıyla elde edilen numunelerin gama ışını uygulaması öncesi ve sonrasındaki üç nokta eğilme mukavemeti değerleri sunulmuştur.

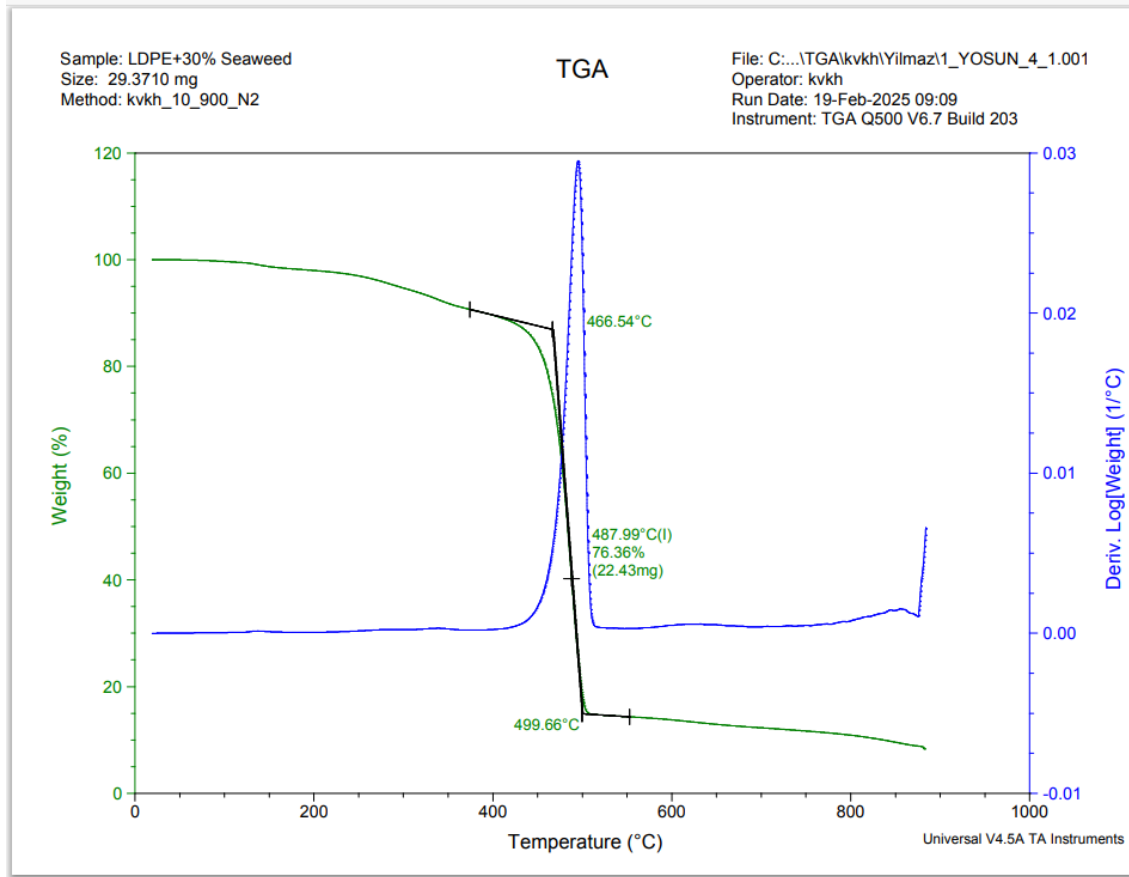
Grafığe göre, gama ışını uygulanmadan önce eğilme mukavemeti %5 dolgu oranında yaklaşık 54 MPa iken, %20 dolgu ile bu değer 65 MPa'a ulaşmıştır. Ancak dolgu oranı %30'a çıkarıldığında mukavemet 59 MPa seviyelerine gerilemiştir. Bu durum, %20 dolgu oranının maksimum eğilme mukavemeti sağladığını ve daha yüksek oranlarda mukavemette azalma eğilimi olduğunu göstermektedir.

Gama ışını sonrası değerlere bakıldığında ise, %5 dolgu oranında yaklaşık 41 MPa olan eğilme mukavemeti, %20 dolgu oranında 54 MPa'a yükselmiş ve %30 dolgu oranında hafif bir düşüşle 53 MPa olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, hem ısınlama öncesi hem de sonrası için %20 dolgu oranı eğilme mukavemeti açısından en etkili seviye olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, epoksi/polyester katkılı sistemlerde uygun dolgu oranının belirlenmesinin performans optimizasyonu açısından kritik olduğunu göstermektedir.

7.3 Termogravimetrik (TGA) Analiz Sonuçları

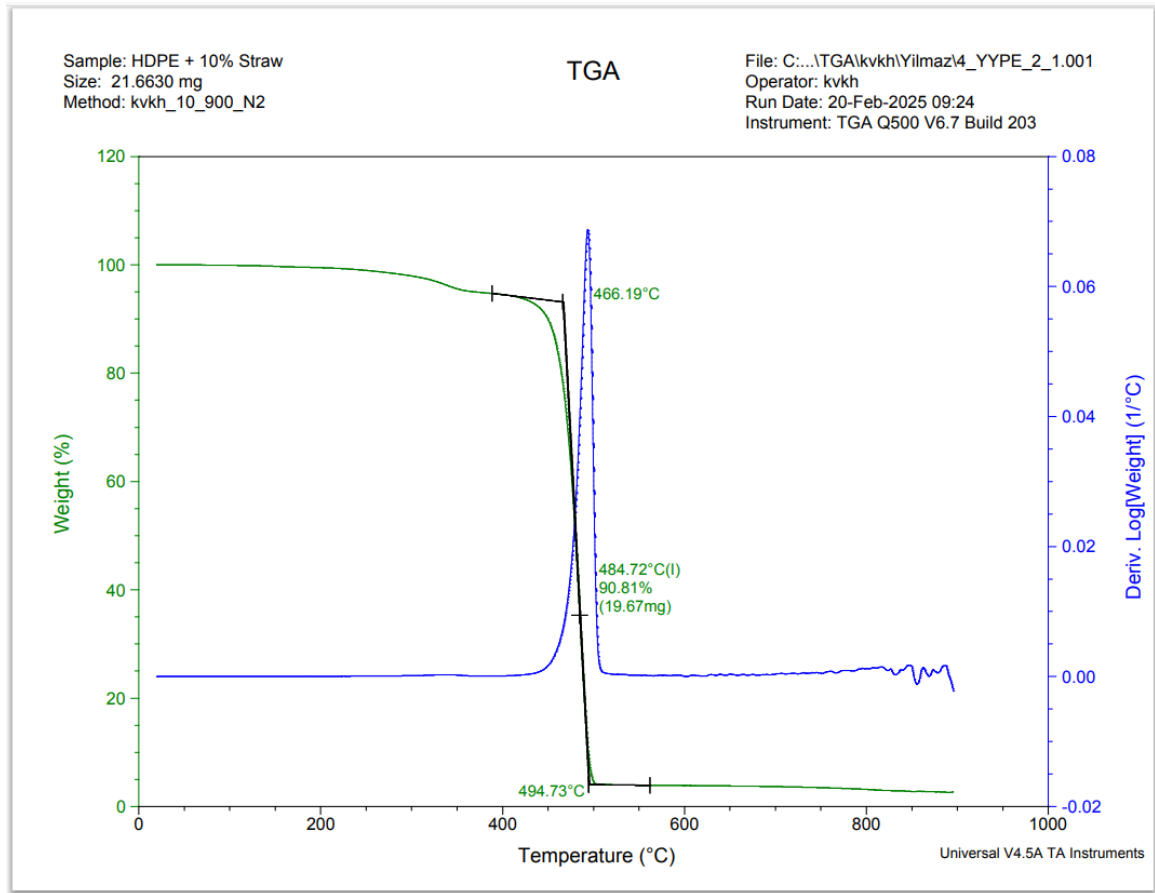
Bu bölümde numunelerin sıcaklık değişimi ile birlikte kütle değişimi ölçümü ve bu sıcaklık değişimi sırasında ısı akış farklarına ait sonuçlar yer verilmiştir.



Şekil 7.15 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi

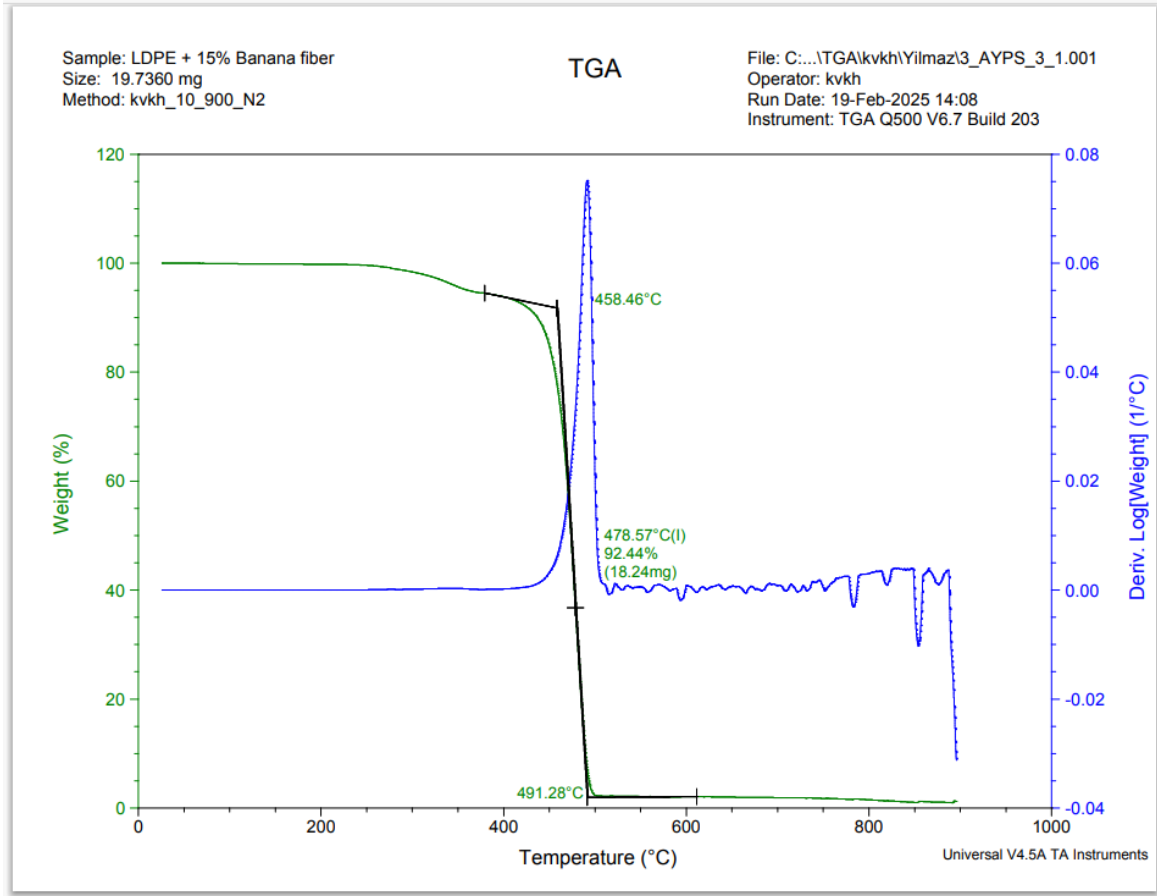
Şekil 7.15'te, AYPE + %30 deniz yosunu katkılı numunenin oda sıcaklığından başlanarak dakika da 10K ısıtılması ile meydana gelen kütle kayıpları verilmiştir. TGA eğrisine göre, numune yaklaşık 100°C'nin üzerinde dışarıdan ısı alarak viskoz hale gelmeye

başlamıştır. Artan ısıya rağmen viskoz özelliğini yaklaşık olarak 400 o C'ye kadar koruyan malzeme bu sıcaklıktan sonra yanmaya başlamaktadır. AYPE'nin tamamı yanarak buharlaşırken deniz yosunun da bir kısmının yandığını ve 500 o C'de yaklaşık olarak ağırlıkça toplam kütlenin %15'nin kaldığı görülmektedir. Artan ısı ile deniz yosunda da kütleli kayıplar oluşmakta ve 900 o C'de ağırlıkça %10'un altında bir kütlenin kaldığı görülmektedir.



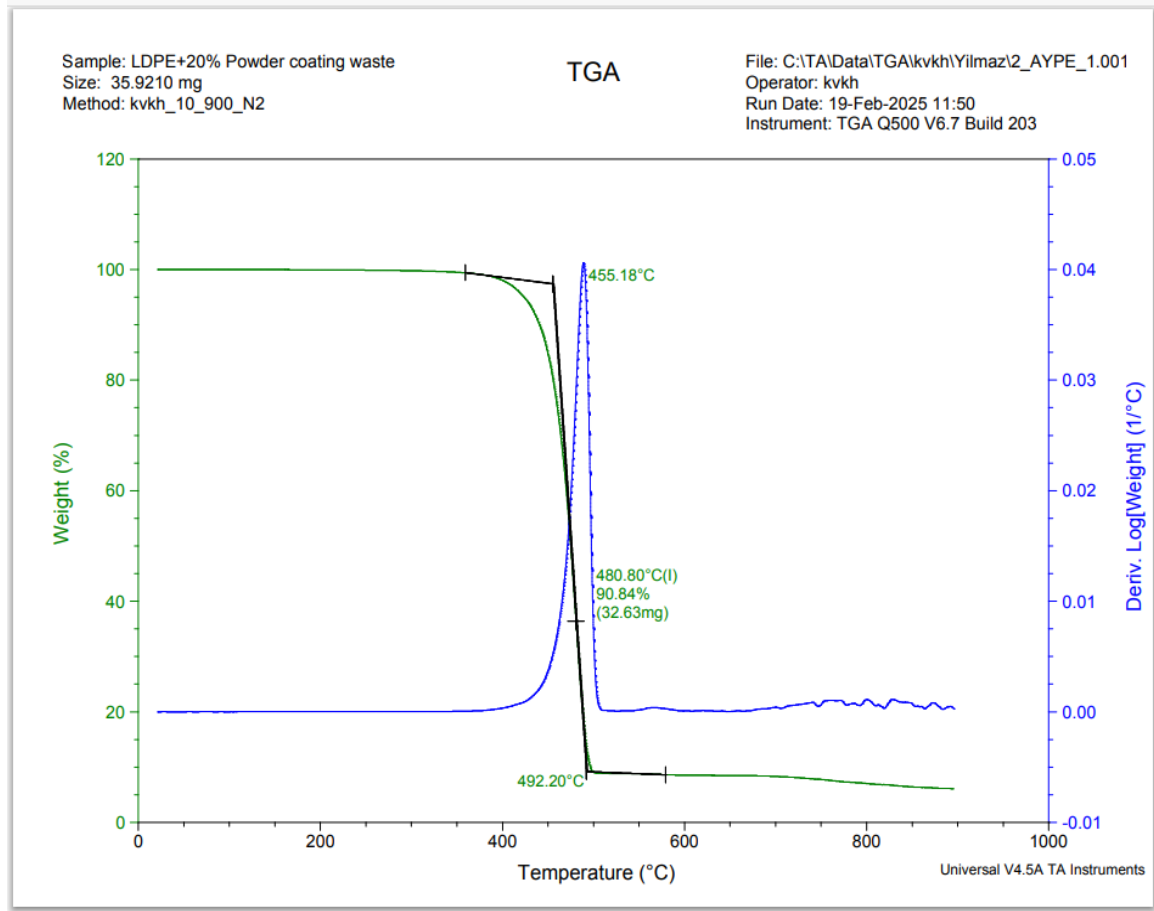
Şekil 7.16 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışınmasına maruz kalmış YYPE'nin TGA değişimi

Şekil 7.16'da, ağırlıkça %10 saman takviyeli YYPE numuneye ait TGA analiz sonucu verilmiştir. Numune oda sıcaklığında başlayarak 900 C'ye kadar 10 K/dk. ısıtma hızı ile ısıtılmıştır. 400 o C üzerinde yanmaya başlayan malzeme 500 C'ye ulaşıldığında içerisindeki termoplastiğin tamamen yandığı anlaşılmaktadır. Dolgu malzemesi olarak kullanılan samanın ise arta kaldığı fakat devam eden ısıtma işlemi ile samanın kütlesinde de kayıpların olduğu görülmektedir.



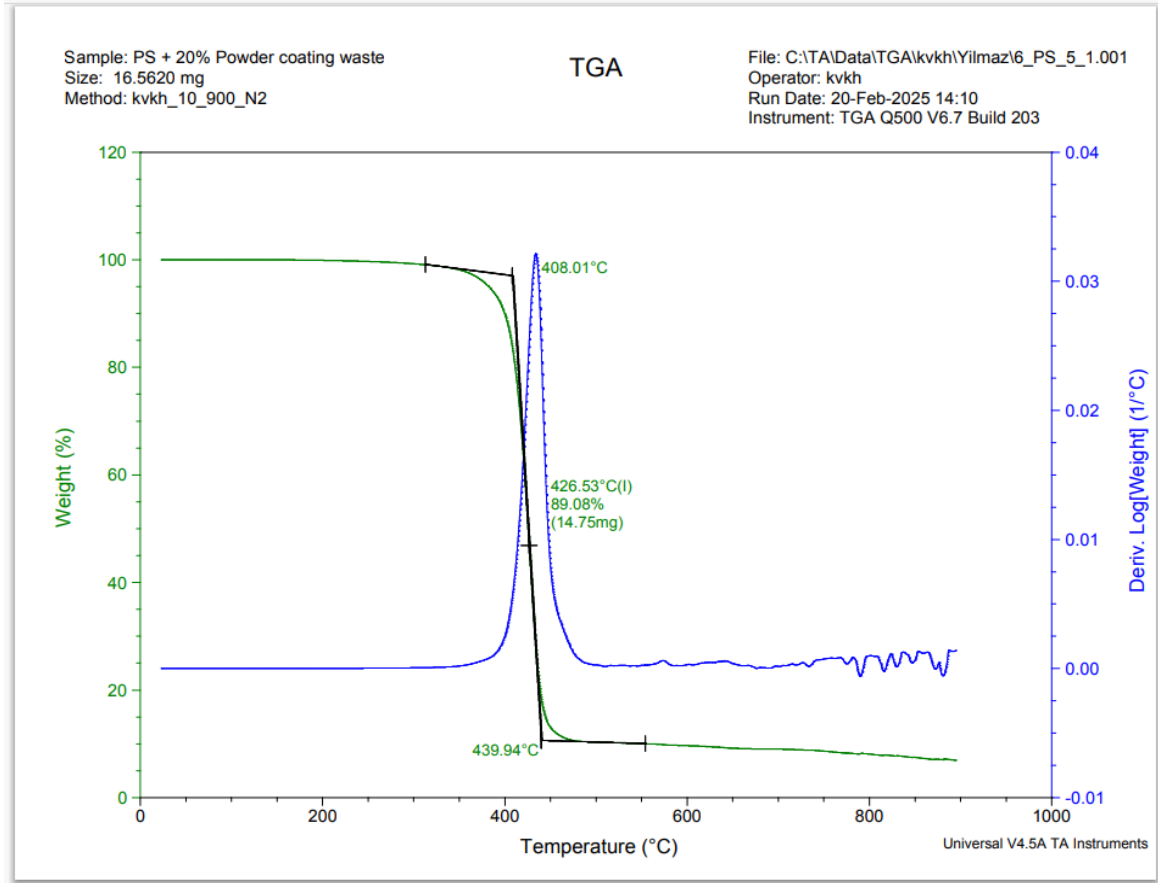
Şekil 7.17 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi

Şekil 7.17'de, ağırlıkça %15 muz lifi takviyeli AYPE numunesine ait TGA analiz sonucu verilmiştir. AYPE + %15 muz lifli numunenin 0°C ile 1000°C arasındaki kütle kayıpları termogravimetrik analiz (TGA) eğrisiyle sunulmuştur. TGA eğrisine göre, numune yaklaşık 400 ila 450°C arasında faz değişimi geçirip yanmaya başlamıştır. 500°C'de AYPE'nin tamamen yandığı ve kütlelerinin sıfırlandığını söyleyebiliriz. Bu sıcaklık değerinde sadece ağırlıkça %5 kadar bir muz lifi kaldığı görülmekte ve artan ısı artışı ile bu muz lifinin de yanarak kütlelerinin sıfıra yaklaştığı görülmektedir.



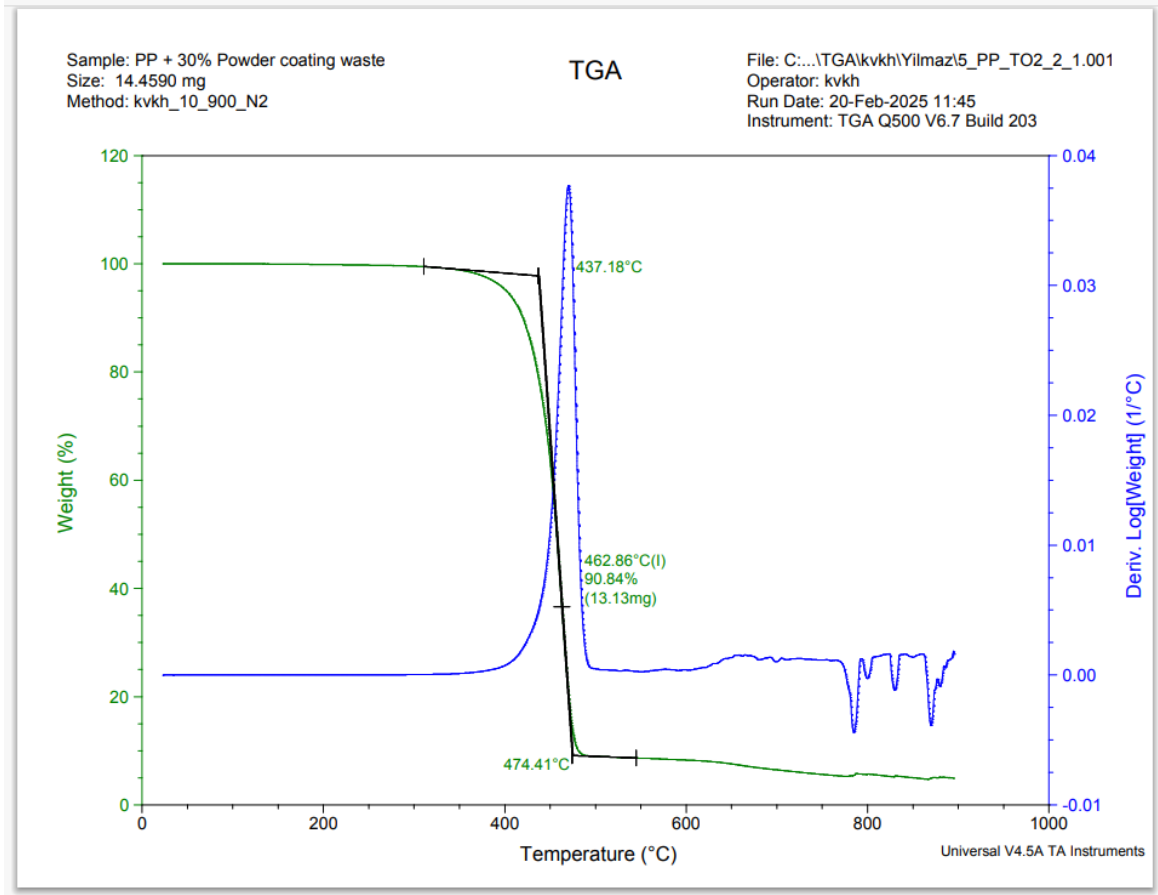
Şekil 7.18 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin TGA değişimi

Şekil 7.18'de, epoksi/polyesterler yani hibrit sisteme ait toz boya atığı ile AYPE karışımlarına ait TGA analiz sonuçları verilmiştir. Matris dolgu karışımı oda sıcaklığından itibaren kademeli olarak 10K/dk. ısıtma hızı ile 900 o C'ye kadar ısıtılmaktadır. 400 C'nin üzerinde matris malzeme olan AYPE yanmaya başlamakta ve yaklaşık 490 C'de AYPE'nin kütlesi sıfırlanmaktadır. Geri kalan toz boya atığı ise o sıcaklıkta tamamen sertleşerek kalmaktadır. Artan sıcaklık ile toz boya atığı da özellikle 700 C'nin üzerinde yanmaya başlamakta ve neredeyse kütlesinin yarısını kaybetmektedir.



Şekil 7.19 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımaya maruz kalmış PS'nin TGA değişimi

Ağırlıkça %20 hibrit sisteme ait toz boya atığı takviyeli PS'nin TGA değişimi Şekil 7.19'da verilmiştir. Amorf yapıdaki polistirenin'de diğer termoplastiklere benzer şekilde 400 ila 450 o C arasında yanmaya başladığı görülmektedir. Yaklaşık olarak 500 o C itibari ile malzemede kütle kayıplarının olduğu ve PS'nin tamamının yandığı söylenilebilir. Geri kalan kütlenin toz boya atığına ait olduğu ve bunun da 600 o C'nin üzerinde kütlesini kaybettiği anlaşılmaktadır.

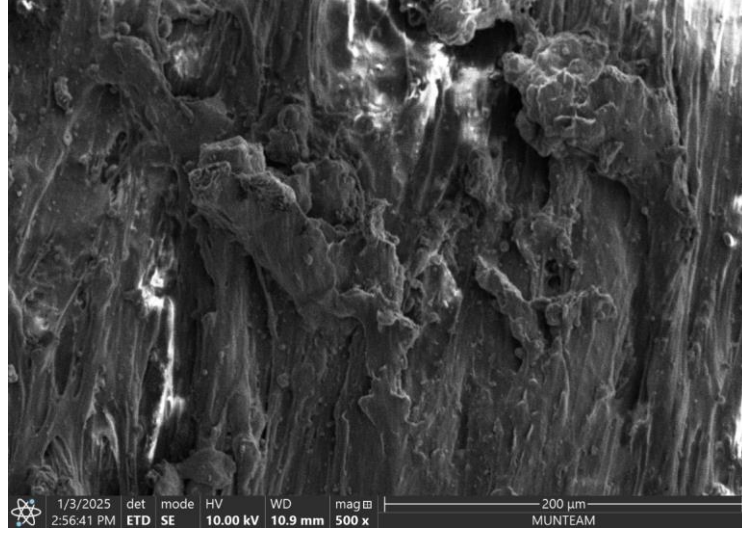


Şekil 7.20 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı katkılı gama ışımına maruz kalmış PP'nin TGA değişimi

Şekil 7.20'de, ağırlıkça %30 epoksi/polyester sisteme ait toz boya atığı takviyeli numunenin TGA analiz sonuçları verilmiştir. Diğer termoplastiklere benzer bir şekilde PP'de yaklaşık olarak 400 C'nin üzerinde yanmaya başlamış ve yaklaşık 500 C'de kütlesini tamamen kaybederek geriye toz boya atığı kalmıştır. Artan sıcaklık ile toz boya atığında da kütle kayıpları oluşmuş ve 900 C'de ağırlıkça %5 civarında bir malzeme kalmıştır.

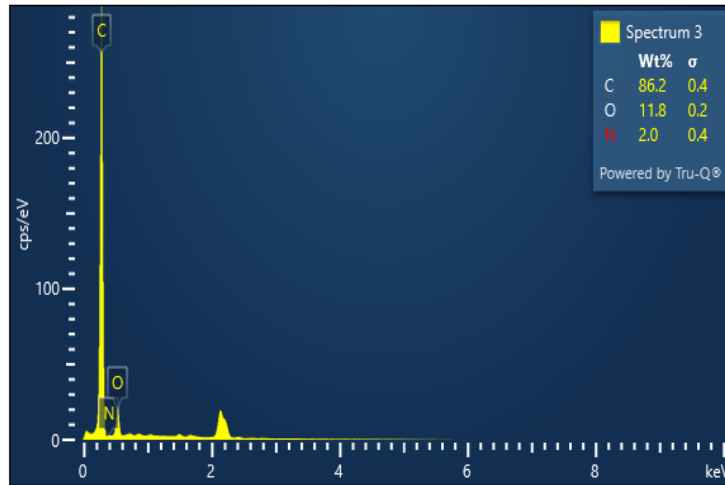
7.4 Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları (SEM/EDS)

Numunelerin matris ve dolgu malzemelerinin birbirine bağlanma özellikleri ile yüzey morfolojileri, farklı ölçeklerde incelenmiştir.



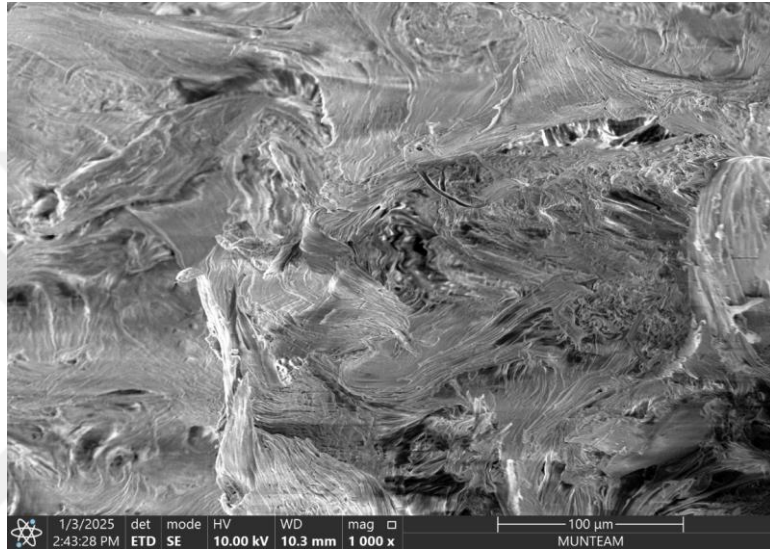
Resim 7.1 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımaya maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü

Resim 7.1'de, ağırlıkça %30 oranında deniz yosunu ile takviye edilmiş AYPE numunesine ait kesit görüntüsü yer almaktadır. SEM analizi, takviye fazın matris içerisinde homojen şekilde dağıldığını ve ara yüzeyde iyi bir yapışma sağlandığını göstermektedir. Gama ışınması sonrası matris malzemenin yapısal bozulmaya uğraması neticesinde numune kesitinde belirgin bir boşluk veya ayrışma gözlemlenmemiş olup, bu durum bağlanma mekanizmasının güçlü olduğunu ve yük transferinin etkin biçimde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu mikroyapısal bulgular, malzemenin mekanik dayanım açısından avantajlı bir yapı sergilediğini desteklemektedir.



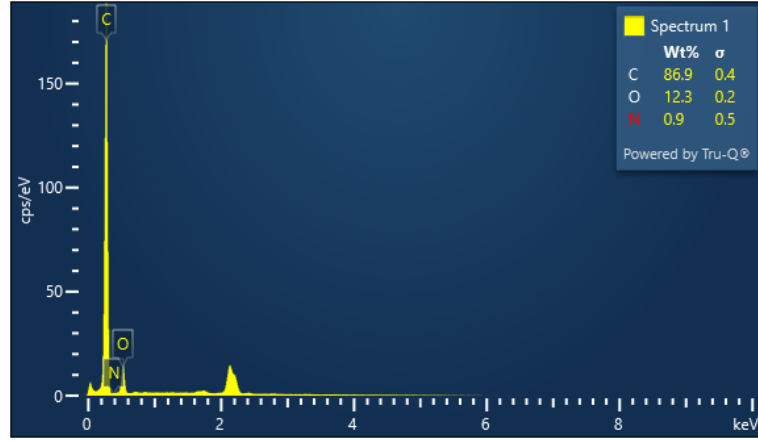
Şekil 7.21 Ağırlıkça %30 deniz yosunu katkılı gama ışımaya maruz kalmış AYPE'nin EDS analizi

Şekil 7.21’de, ağırlıkça %30 oranında deniz yosunu ile takviye edilmiş AYPE numunesine ait EDS analizi sunulmaktadır. Analiz sonucunda, numune yüzeyinde yüksek oranda karbon (%86,2) ve oksijen (%11,8) elementlerinin bulunduğu, ayrıca eser miktarda sodyum (%0,4) ve kalsiyum (%0,4) elementlerinin tespit edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, organik kökenli deniz yosunu katkısının yapıda etkin biçimde yer aldığını ve takviye fazın polimer matrisine başarıyla entegre olduğunu ortaya koymaktadır.



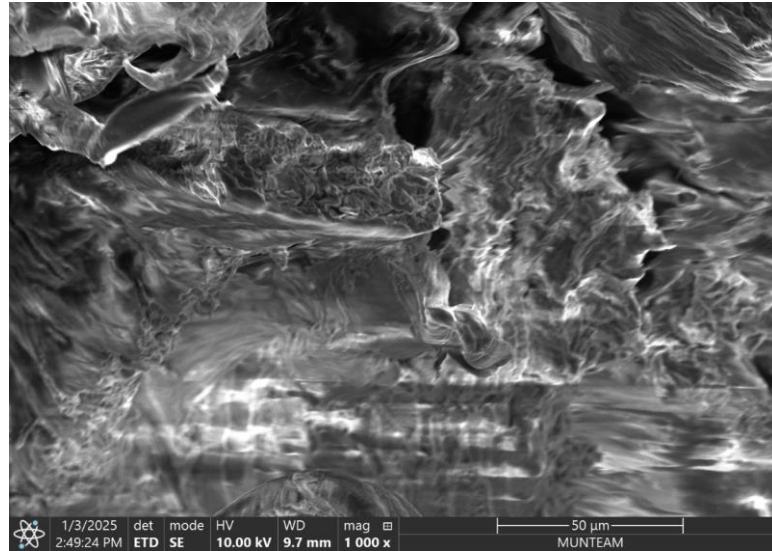
Resim 7.2 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışımasına maruz kalmış YYPE matrisli numunenin kesit görüntüsü

Resim 7.2’de, ağırlıkça %10 oranında saman katkısı içeren YYPE numunesine ait kesit yüzeyi görülmektedir. SEM görüntüsü, saman liflerinin polimer matris içerisinde düzensiz ve lif yönlenmesine bağlı olarak dağılmış olduğunu göstermektedir. Gama ışıması neticesinde matris ile lifler arasında kısmi uyum gözlemlense de bazı bölgelerde lif-matris ayrışmalarına ve boşluk oluşumlarına rastlanmıştır. Bu durum, ara yüzey bağlanmasının tam olarak yeterli olmadığını ve mekanik yük altında potansiyel zayıflık noktaları oluşturabileceğini işaret etmektedir.



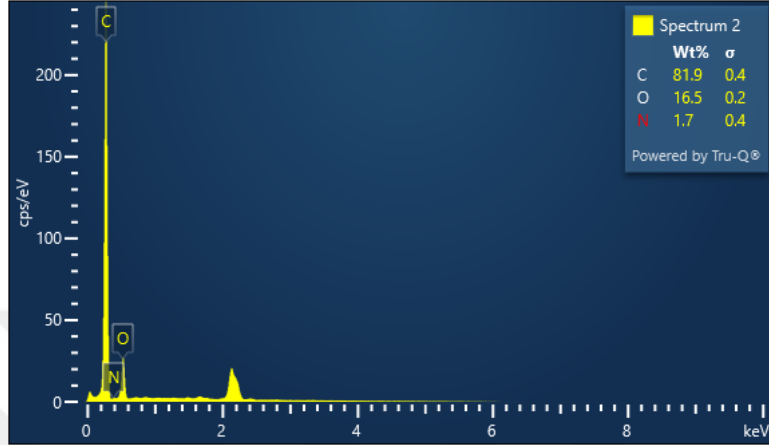
Şekil 7.22 Ağırlıkça %10 saman katkılı gama ışımasına maruz kalmış YYPE'nin EDS analizi

Şekil 7.22'de, ağırlıkça %10 saman katkılı YYPE numunesine ait EDS analizi sonuçları sunulmaktadır. Analiz sonucunda yüzeyde yüksek oranda karbon (%86,9) ve oksijen (%12,3) elementleri tespit edilmiş olup, eser miktarda sodyum (%0,9) elementi de belirlenmiştir. Bu sonuçlar, saman katkısının lignoselülozik yapısından kaynaklanan organik karakterini doğrulamakta ve katkının termoplastik matris içerisine başarıyla entegre olduğunu göstermektedir.



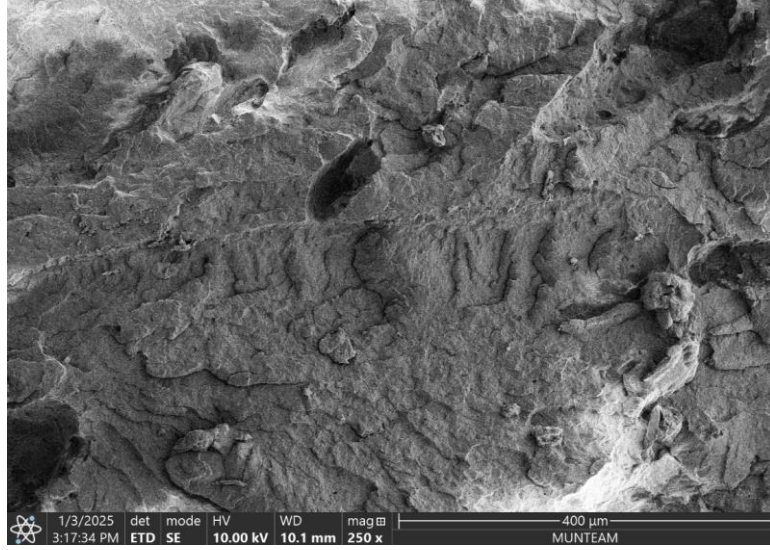
Resim 7.3 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü

Resim 7.3'te, ağırlıkça %15 oranında muz lifi katkısı içeren AYPE numunesine ait kesit görüntüsü sunulmaktadır. SEM analizi çok net olmamakla birlikte belirli bölgelerde malzeme yüzeyinin ışıma neticesinde yandığı görülmektedir. Sadece belli bölgelerde kesit yüzeyinde oluşan plastik deformasyonlar dikkat çekmektedir.



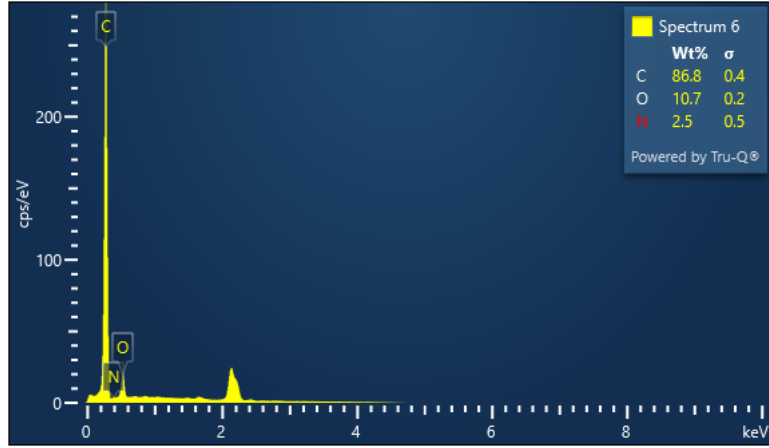
Şekil 7.23 Ağırlıkça %15 muz lifi katkılı gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin EDS analizi

Şekil 7.23'te, ağırlıkça %15 muz lifi katkılı AYPE numunesine ait EDS analiz sonuçları sunulmaktadır. Analizde yüzeyin büyük oranda karbon (%81,9) ve oksijen (%16,5) içerdiği, ayrıca eser miktarda potasyum (%1,7) bulunduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, muz liflerinin lignoselülozik yapısına işaret etmekte ve biyobazlı katkının AYPE matrisiyle etkili şekilde birleştiğini göstermektedir. Bu elementel dağılım, muz liflerinin malzeme içerisinde homojen olarak yer aldığını ve katkının yapısal entegrasyonunun başarılı olduğunu desteklemektedir.



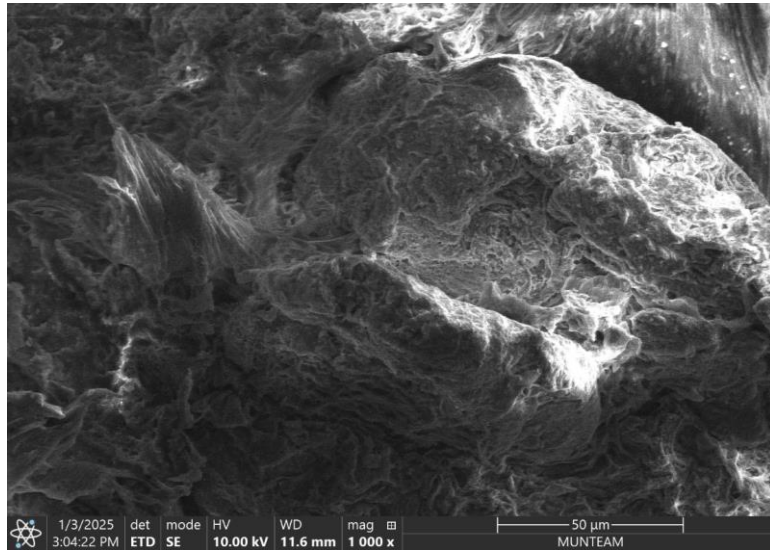
Resim 7.4 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış AYPE'nin kesit görüntüsü

Resim 7.4'te, ağırlıkça %20 oranında toz boya atığı katkısı içeren AYPE numunesine ait kesit görüntüsü sunulmaktadır. SEM analizi, yüzeyde yer yer boşluklar ve mikroyapısal düzensizlikler bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, katkı fazı ile matris arasındaki ara yüzey etkileşiminin sınırlı olduğunu göstermektedir fakat bu sonuç ışıma öncesi mevcut çalışmalarda yer alan kesit görüntüleri ile karşılaştırıldığında (Kısmet, 2012) yüzeydeki boşluklu yapının gama ışıması sonrası azaldığı ve matrisin bozularak takviye elemanı ile daha etkin tutunma yüzeyi oluşturduğu söylenilebilir. Gözlenen boşluklar, mekanik zorlanma altında çatlak başlangıç noktaları oluşturabilecek zayıf bölgeler olarak değerlendirilmektedir.



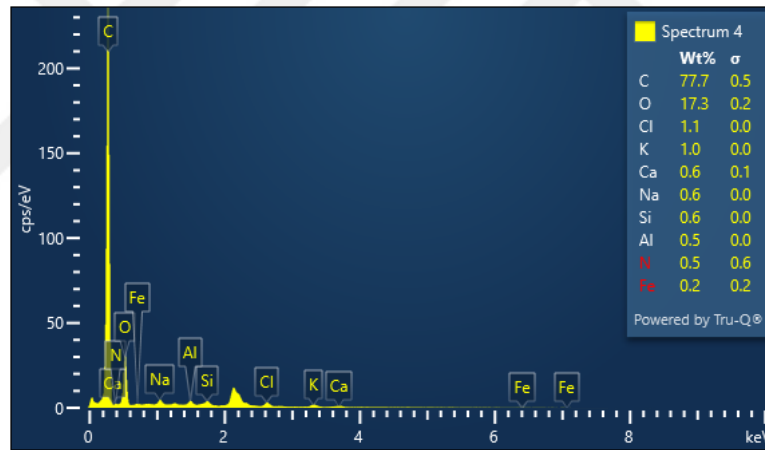
Şekil 7.24 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımına maruz kalmış AYPE'nin EDS analizi

Şekil 7.24'de, ağırlıkça %20 oranında toz boya atığı katkısı içeren AYPE numunesine ait EDS analizi sonuçları verilmektedir. Analiz bulgularına göre yüzeyde yüksek oranda karbon (%86,8) ve oksijen (%10,7) elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca eser miktarda kalsiyum (%2,5) da belirlenmiştir. Bu element dağılımı, katkı maddesinin organik yapı içerdiğini ve matris ile bütünleştiğini göstermekte olup, katkının polimer yapıya başarıyla entegre edildiğini ortaya koymaktadır.



Resim 7.5 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımına maruz kalmış PS'nin kesit görüntüsü

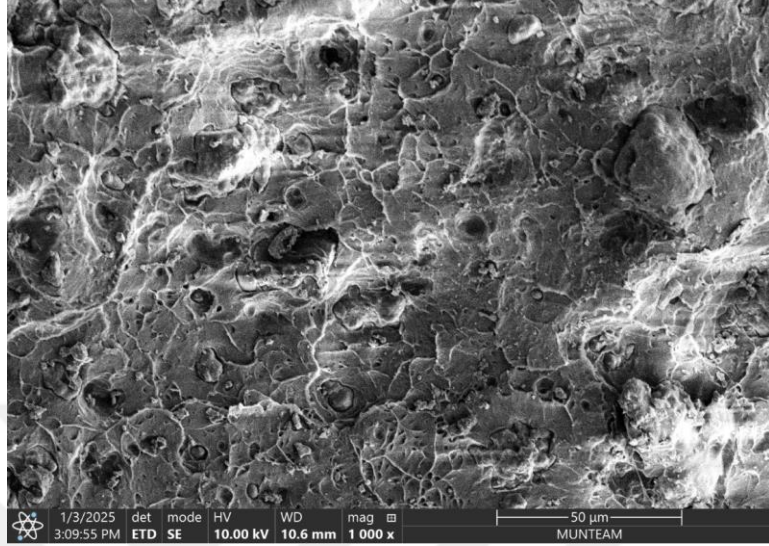
Resim 7.5'te, ağırlıkça %20 oranında toz boya atığı katkısı içeren PS numunesine ait kesit görüntüsü sunulmaktadır. SEM analizi, katkı fazının matris içerisinde belirgin olarak yer aldığı ve yüzeyde yoğun lif yapıları ile topaklanma benzeri morfolojilerin oluştuğu görülmektedir. Bu yapılar, ara yüzeyde bağlanmanın yer yer sınırlı kaldığını ve katkı-matris etkileşiminin homojen olmadığını göstermektedir. Gözlemlenen mikroyapısal boşluklar ve ayrışmalar, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek potansiyel zayıflık noktaları olarak değerlendirilmektedir. Resim 7.5'te, %20 oranında koyu siyah toz boya katkısı içeren PS numunesine ait kesit görüntüsü sunulmaktadır. SEM analizi, katkı fazının matris içerisinde belirgin olarak yer aldığı ve yüzeyde yoğun lif yapıları ile topaklanma benzeri morfolojilerin oluştuğu görülmektedir. Bu yapılar, ara yüzeyde bağlanmanın yer yer sınırlı kaldığını ve katkı-matris etkileşiminin homojen olmadığını göstermektedir. Gözlemlenen mikroyapısal boşluklar ve ayrışmalar, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek potansiyel zayıflık noktaları olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 7.25 Ağırlıkça %20 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımaya maruz kalmış PS'nin EDS analizi

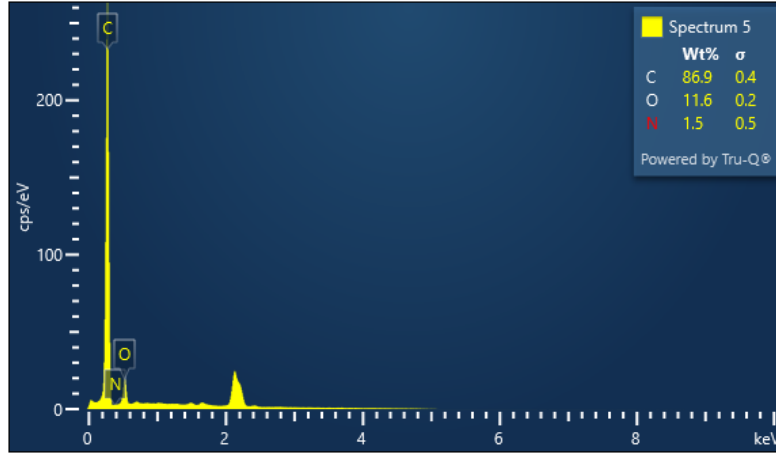
Şekil 7.25'te, ağırlıkça %20 oranında toz boya katkılı PS numunesine ait EDS analizi sonuçları sunulmaktadır. Analiz sonucunda yüzeyde yoğun olarak karbon (%77,7) ve oksijen (%13,1) elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca sodyum, alüminyum, silikon, potasyum, kalsiyum, demir ve klor gibi birçok elementin eser miktarda bulunduğu belirlenmiştir. Bu geniş elementel dağılım, katkı maddesinin kompleks bir yapıya sahip olduğunu ve inorganik içeriklerin numune yüzeyine başarılı şekilde entegre edildiğini

göstermektedir. Bu durum, dolgu malzemesinin kimyasal çeşitliliğini ve polimer matrisle etkileşimini desteklemektedir.



Resim 7.6 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımaya maruz kalmış PP'nin kesit görüntüsü

Resim 7.6'da, ağırlıkça %30 oranında toz boya atığı katkı PP numunesine ait kesit görüntüsü verilmektedir. SEM analizi, yüzeyde çok sayıda düzensiz boşluk ve gözenek yapısının oluştuğunu göstermektedir. Bu boşluklar, katkı fazının matrisle yeterli düzeyde bağ kuramadığını ve ara yüzey etkileşiminin zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca gözlemlenen lif çekilmeleri ve mikroyapısal ayrışmalar, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yaratabilecek potansiyel zayıflık bölgelerine işaret etmektedir.



Şekil 7.26 Ağırlıkça %30 epoksi/polyester (hibrit) toz boya atığı takviyeli gama ışımasına maruz kalmış

Şekil 7.26’da, ağırlıkça %30 oranında toz boya atığı katkısı içeren PP numunesine ait EDS analizi sonuçları gösterilmektedir. Analiz bulgularına göre yüzeyde yüksek oranda karbon (%86,9) ve oksijen (%11,6) tespit edilmiş; ayrıca eser miktarda kalsiyum (%1,5) belirlenmiştir. Bu dağılım, katkı maddesinin hem organik hem de inorganik bileşenler içerdiğini ve polipropilen matrise başarılı şekilde entegre edildiğini göstermektedir. Elementel analiz, katkının yapısal bütünlük ve dağılım açısından etkin bir şekilde sistemde yer aldığını desteklemektedir.

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, doğal ve sentetik dolgu takviyeli termoplastik matrisli kompozitlerin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerinin gama ışıması etkisi ile değişimleri incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan dolgu maddeleri, deniz yosunu, saman, muz lifi ve toz boya gibi doğal ve sentetik bileşenlerden oluşmuştur. Bu dolgu maddelerinin, termoplastik matrislerine entegrasyonu sonrası mekanik özelliklerde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Özellikle, alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) matris ile deniz yosunu takviyeli kompozitlerde, deniz yosununun oranına bağlı olarak, malzemenin çekme ve eğilme mukavemetlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %10 ve %20 oranındaki deniz yosunu takviyeleri, malzemenin mekanik özelliklerini en üst düzeye çıkarırken, daha yüksek oranlarda ise mekanik özelliklerin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, AYPE polimeri ile muz lifi takviyeli kompozitlerde, dolgu oranının artışı ile çekme mukavemeti ve elastik modülde artış gözlemlenmiş, özellikle ağırlıkça %10 ve %15 muz lifi oranlarında optimum mekanik performans elde edilmiştir. Ancak, daha yüksek oranlar kompozitlerin mekanik performansında azalmalara yol açmıştır.

Toz boya ile yapılan takviyelerde ise, termal özelliklerde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Özellikle ağırlıkça %10 epoksi/polyester toz boya atığı takviyeli AYPE ve PS matrisli numunelerin, ısıya dayanıklılığın arttığı, ancak mekanik özelliklerin belirli oranlarda azaldığı tespit edilmiştir. Toz boya oranının artmasıyla, malzemenin sertliği artarken, elastikiyetin azaldığı gözlemlenmiştir.

Gama ışını ile yapılan modifikasyonun, genel olarak polimerlerin mekanik özelliklerini artırdığı ve bu özelliklerin dolgu maddelerinin türüne ve oranına göre değişim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Termal analizler ise gama ışınlarının, polimer matrisinin ısıya dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirdiğini, ancak yüksek dolgu oranlarında bu etkinin zayıfladığını ortaya koymuştur. Morfolojik analizlerde ise, dolgu maddelerinin homojen dağılımı ve gama ışınının malzeme yüzeyindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve dolgu oranının artışı ile birlikte bu değişimlerin malzeme özelliklerine yansıdığı gözlemlenmiştir. Gama ışıması ile matris malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen mikro

bozulmalar sayesinde takviye elemanı ile daha etkin bir fiziksel bağlanma mekanizması geliştiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, gama ışınları ile yapılan modifikasyonlar, farklı dolgu maddeleri ile güçlendirilmiş termoplastiklerin performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu bulgular, özellikle çevre dostu ve sürdürülebilir malzeme geliştirme alanlarında, doğal dolgu maddelerinin kullanımını teşvik etmektedir. Ayrıca, gama ışını uygulamalarının, polimerlerin mekanik ve termal özelliklerini optimize etmek için etkili bir yöntem olduğunu anlaşılmaktadır. Geliştirilen kompozit malzemelerin gama ışıması neticesinde mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi neticesinde özellikle inşaat, otomotiv ve ambalaj sektörlerinde kullanımı potansiyellerinin artacağı ön görülmektedir.



9. KAYNAKLAR

- Akar, D., ve Kısmet Y., 2021,** *Gama Işımasının Kolza Takviyeli Polipropilen Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi*, Munzur Üniversitesi
- Akkurt S. 1991,** “*Plastik Malzeme Bilgisi*”, Birsen Yayınevi, İstanbul, (7-55, 75-89, 91-112)
- Amer, A., 2011.** *Untersuchungen zum materialverhalten von rapsstroh-polypropylen compounds*, Berlin, 93s
- Ay B., (2007)** “*Organik polimerler ve kullanım alanları*”, Bitirme Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Brightworks Engineering. (2023, Nisan 13).** Brightworks Engineering. Web Sitesi: <https://brightworksengineering.com/upload/4/teknik-bulten-ocak-2017.pdf>
- Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H., 2011,** Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. *TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası UCTEA The Chamber of TeXtile Engineers Tekstil ve Mühendis The Journal of Textile and Engineers*, 82: 26-35.
- Carraher, C.E., Seymour, B. R., 2003.** *Polymer chemistry 6th. edn*, Taylor & Francis Press, New York, 713s.
- Carraher Jr, C. E. (2017).** *Introduction to polymer chemistry*. CRC press.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018).** *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Diehl, J. F., 1999.** *Safety of Irradiated Foods*(2nd ed.). CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 464s.
- Donadeli, J. M., Strapasson, B. A., 2015.** Effects of monitoring and social reprimands on instruction-following in under graduate students. *The Psychological Record*, 65(1), 177– 188.
- Dönüşüm, G., & Bakım, K. V.** Plastik Teknolojisi.
- Ekşi O. 2007,** *Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi*, Edirne.
- Engle, L. P., Wagener, K. B., 1993.** A review of thermally controlled covalent bond formation in polymerchemistry. *Journal of Macromolecular Science, Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics*, C33 (1993): 239-257.

- Enşici, A., 2004.** *Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları Raporu.* <http://www.designophy.com>
- Fried, J. R. (2014).** *Polymer science and technology.* Pearson Education.
- Goodship, V., 2004.** *Arburg Practical Guide to Injection Moulding.* Smithers Rapra, Germany 1-65s.
- Groover M. P. 2002,** *Fundamentals of Modern Manufacturing,* John Wiley & Sons, Inc. , Second edition
- Gupta, B. S., Shen, C. R., & Lee, M. J. (2017).** *Effect of biological buffers on the colloidal behavior of sodium dodecyl sulfate (SDS).* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 529, 64-72.
- Güner, Ü., 2012.** Termoplastiklerin ekstrüzyonunda kalıp yüzey pürüzlülüğünün akış hızı ve basınç düşümüne etkisi. *Yüksek Lisans Tezi,* Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 30s.
- Harper, C.A., 2000.** *Modern plastics handbook.* Mc Graw-Hill Professional Publishing
- Heinzelmann, G., Seide Jr, P., & Figueiredo, W. (2015).** *Dynamics of micelle formation from temperature-jump Monte Carlo simulations.* Physical Review E, 92(5), 052305.
- Kamber, Ş. Ö., 2008.** Plastik enjeksiyon kalıplarında basınç ve sıcaklık parametrelerinin ürün kalitesine etkileri ve taguchi yöntemi ile optimizasyonu. *Doktora Tezi,* Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 50s.
- Karakaya N., 2007,** Farklı Dolgu Maddelerinin Termoplastik Elastomer Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi*
- Kılıç, H., C., 2017,** “Gama Işımasının Dolgu Malzemesi Takviyeli Polietilen ve Polipropilenin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi” Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü “*Yüksek Lisans Tezi*”, Tunceli
- Kılınç, Ö., & Toplan, N. (2023).** Amorf Polimerler. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 5(3), 131-148.
- Kısmet Y., 2015,** *Gama Işımasının Polietilen ve Kurutulmuş Kolza Bitkisi Karışımlarından Üretilmiş Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi,* Munzur Üniversitesi
- Kısmet,Y., 2012.** Entwicklung eines Verfahrens für die Verwertung von Pulverlackrecyclaten, Universitätsverlag der TU Berlin, Endformat, Ges. für gute Druckerzeugnisse mbH, ISBN 978-3-7983-2479-4. Berlin, 164s.

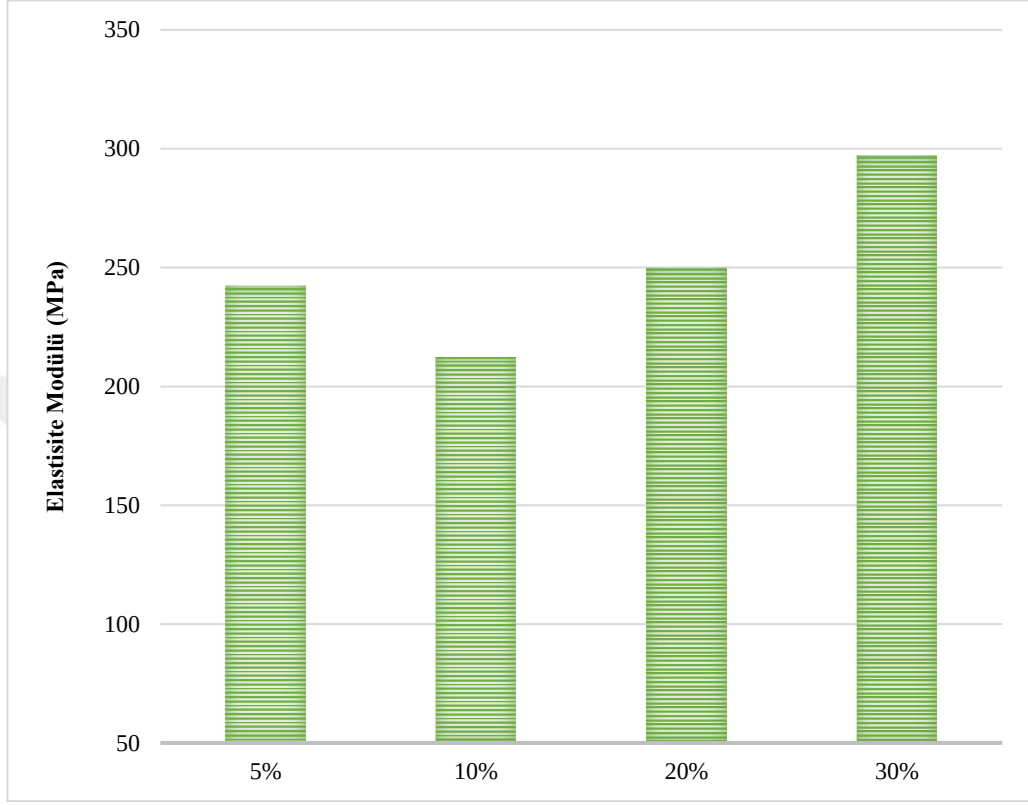
- Kısmet, Y., & Güray, S. (2023).** Nadir toprak elementlerinin karbon elyaf tozu takviyeli poliolefinlerin akışkanlığına etkileri. *Politeknik Dergisi*, 26(4), 1683-1689.
- Kilcast, D. 1995.** Food irradiation: Current problems and future potential. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 36 (3–4), 279-296.
- Kilcast, D. 1995.** Food irradiation: Current problems and future potential. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 36 (3–4), 279-296.
- Kundu, P., P., Biswas, J., Kim, H., Shim, S., E., Choe, S., 2004.** *Effect of calcite and calcite/zeolite hybrid fillers on LLDPE and PP composites.* *Advances in PolymerTechnology*, 23, 230-238.
- Li, D., Zhou, L., Wang, X., He, L., Yang, X., 2019.** *Effect of crystallinity of polyethylene with different densities on break down strength and conductance property.* *Materials*, 2019(12) – 1746.
- M.E.B., 2013.** Kimya Teknolojisi Ders Notları, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerlerin%20Fiziksel%20%C3%96zellikleri%202.pdf
- M.E.B., 2014** Kimya Teknolojisi Ders Notları, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerleri%20%C3%96zelliklerine%20G%C3%B6re%20S%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma.pdf
- M.E.B., 2012** Plastik Teknolojisi Ders Notları, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Termoset%20Kal%C4%B1plama%20Makinelerinde%20%C3%96retim.pdf
- Martínez-Barrera, G., Menchaca-Campos, C. and Gencel, O., (2013),** Polyester polymer concrete: effect of the marble particle sizes and high gamma radiation doses. *Construction and Building Materials*, 41, 204-208pp.
- MEGEP., 2006.** *Temel plastik enjeksiyon kalıpları 1.* Makine Teknolojisi, Ankara, 1-4s
- Naki, N., 2003.** Kozmetik ürünler ve kozmetik ürün hammaddelerinin gama radyasyonla dekontaminasyonu/sterilizasyonu üzerine çalışmalar. *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 43s.
- Nambiar, S., and Yeow, J. T., (2012),** *Polymer-composite materials for radiation protection.* *ACS applied materials and interfaces*, 4(11), 5717-5726pp
- Odian, G. (2004).** *Principles of polymerization.* John Wiley & Sons.

- Olguner, G., Özer, A.Y., 2000.** Radyasyonla sterilizasyon II: İlaçların radyasyonla sterilizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 25:53-73s.
- Onaran, K., 2003,** “*Malzeme Bilimi*”, Bilim Teknik Yayınevi.
- Onaran, K., 2003:** “*Malzeme Bilimi*”, Bilim Teknik Yayınevi
- Özbek R., K., 2022,** Dolgu Takviyeli Plastiklerde üretim Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Hibrit Bir Model Önerisi, *Munzur Üniversitesi-Atatürk Üniversitesi Ortak Yüksek Lisans Programı* Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2012).** *Material science of polymers for engineers* (3rd ed.). Hanser Publishers.
- Peacock, A. J., 2000.** *Handbook of polyethylene: structures, properties, and applications*. Scrivener publishing, New York, 1333s.
- Qu, J. 1993.** The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281.
- Rosato, D., 2004.** Plastic product material and process selection handbook, *Elsevier Science press*, Oxford, 618s
- Saçak, M., 2005.** *Polimer Teknolojisi*. Gazi Kitabevi, Ankara, 71-73s.
- Saçak, M., 2006.** *Polimer Kimyası*. 3. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 33-35s.
- Saheb, D.N., Jog. J.P., 1999.** *Natural fibre polymer composites*. *Advances in Polymer Technology*. 18(4), 351 – 363.
- Sanbur, S., 2020:** Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi* ,Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
- Savaşçı Ö.T. , Uyanık N. , Akovalı G. , 2002,** “*Plastikler ve Plastik Teknolojisi*” , PAGEV Yayınları, (7-46, 65-116, 196-248, 257-263, 298-318)
- Silva J, Lucena L, Rodrigues J, Carvalho M, Costa D. (2015)** *Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder*, *Petroleum Science and Technology*; 33(15-16):1508-1515.
- Şahin Y. , 2000,** “*Kompozit Malzemelere Giriş*” Gazi Kitabevi, Ankara, (8-14, 38-60, 79-87, 118-127)
- Şahin Y. 2000,** *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, (8-14, 38-60, 79- 87, 118-127).
- Şahin, S., 2011.** Medikal alanda kullanılan tekstillerde antibakteriyel etkiler için sol-jel uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

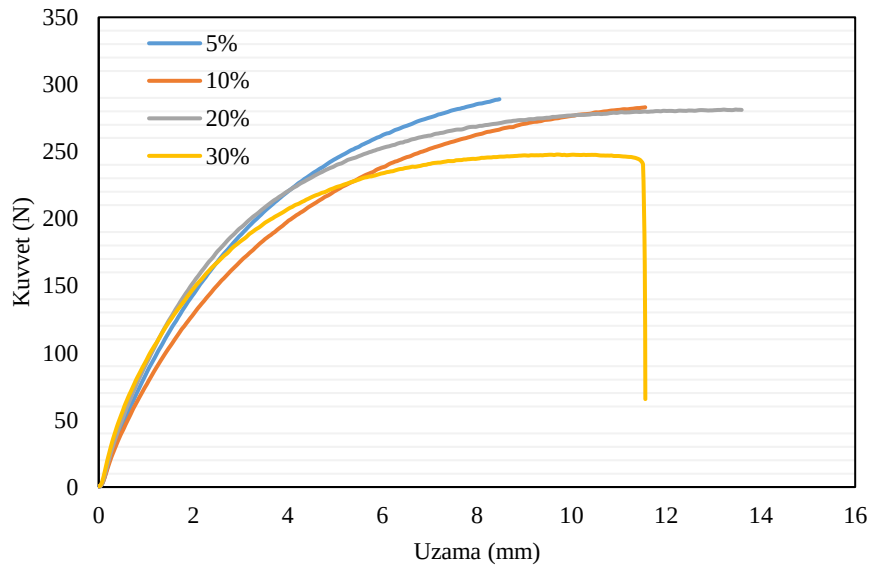
- Strong, A. B. (2006).** *Plastics: Materials and processing*. Pearson Prentice Hall.
- Tayfun, Ü., Yılmaz, V. M., & Arslan, Ç. (2023).** Eklemeli imalat yönteminde filament olarak kullanılan polimerik malzemeler. *Akıllı Sistemler Dergisi*, 2(1), 45-67.
- Turaçlı H. (1999).** *Enjeksiyoncunun El Kitabı*, PAGEV Yayınları, İstanbul, (55-69, 72-173)
- URL-1.,2025** <https://depositphotos.com/tr/photos/polimer.html>
- URL-2.,2014**<https://tolgakaranfil.webnode.com.tr/products/kompozit-malzemeler%2C-s%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1r%C4%B1lmas%C4%B1-ve-uretimi/#:~:text=Kompozit%20malzemeler%2C%20kullan%C4%B1lan%20matrik s%20malzemesinin,karbon%20ve%20nano%20kompozit%20malzemelerdir.>
- URL-3.,2021** <https://www.embibe.com/exams/classification-of-polymers/Classificationof-Polymers:Occurrence,Structure,ThermalBehaviour>
- URL-4.,2009** <http://www.gulhankaucuk.com/page.php?ID=35>, Gülhan Kauçuk *Kauçuk Ürün İmalatında Genel Bilgiler*. 20 Mayıs 2009.
- URL-5.,2021** <https://www.engplastics.com.au/what-is-uhmw-polyethylene>
- URL-6.,2020** <https://delhipages.live/tr/bilim/kimya/45>
- URL-7.,2016** <http://www.zinisan.com.tr/html/kompozit.pdf>
- URL-8.,2021** <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/ibrahim.inanc/126505/Ch6.pdf+&tr&ct=clnk&gl=tr>
- URL-9.,2008** <https://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>
- URL-10.,2023**<https://dckompozit.com/partikül-takviyeli-kompozitler-ozellikleri-ve-kullanim-alanlari/>
- URL-11, 2022** <https://www.products.pcc.eu/tr/blog/polivinil-klorur-kullanimleri-ve-ozellikleri/>
- URL-12, 2024** <https://www.shutterstock.com/tr/image-vector/polyvinyl-chloride-plastic-pvc-chemical-structure-1167386542>
- URL-13, 2024** <https://www.altinkaya.com/tr/blog/teknik-makaleler-6/styrene-acrylonitrile-san-malzemelerin-uretimde-kullanimi-23>
- URL-14, 2014** <https://www.colak.com.tr/akrilonitril-butadien-stiren-nedir>
- URL-15, 2020** https://www.atamanchemicals.com/polymethyl-methacrylate_u29824/?lang=TR
- URL-16, 2015** <https://polimetilmetakrilat.blogspot.com/2015/08/1.html>
- URL-17, 2024** <https://tr.honyplastic.com/news/detail-261443.html>
- URL-18, 2022** <https://nuken.tenmak.gov.tr/tr/tesisler/gida-isinlama-tesisi.html>

- Vahapoğlu, V. (2007).** *Kauçuk türü malzemeler-I: Doğal kauçuk*. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3, 1, 57-70.
- Vikipedi yazarları. (2024, Nisan 22).** *Poliamid*. Vikipedi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Poliamid>
- Yalçın H., Gürü M., (2002)** “*Malzeme Bilgisi*”, Ankara, Palme Yayıncılık,
- Yaşar H., (2001).** “*Plastikler Dünyası*”, MMO Yayınları, Ankara, 2. Baskı, (3-89,97,107,112,115,116,118,119,121,123,125,127,131,132)
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011).** *Introduction to polymers*. CRC press.
- Zhongyang, L. J. J., Shuangjun, C., (2011).** Effect of crystal form and particle size of titanium dioxide on the photo degradation behaviour of ethylene-vinylco polymer, low density polyethylene composite. *Polymer Degradation and Stability*, 2015(96).:43-50
- Zhang, Z. C., Ge, X. W., & Zhang, M. W. (2000).** **Polymer** radiation chemistry. *Radiation Induced Emulsion Polymerization*, 41-54.
- Zor, M., (2016),** *Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler*, http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf

EKLER

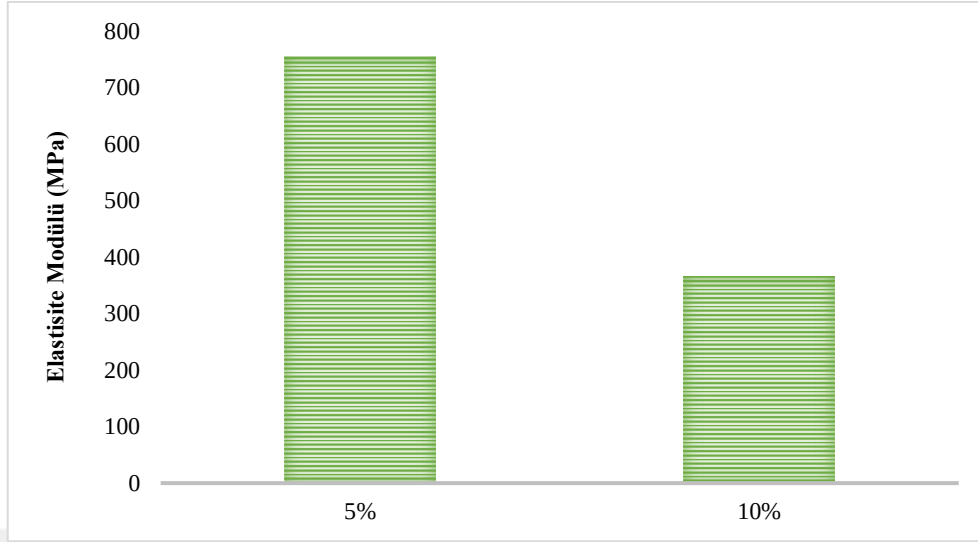


Ek Şekil 1. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş AYPE'nin elastisite modülü değerleri

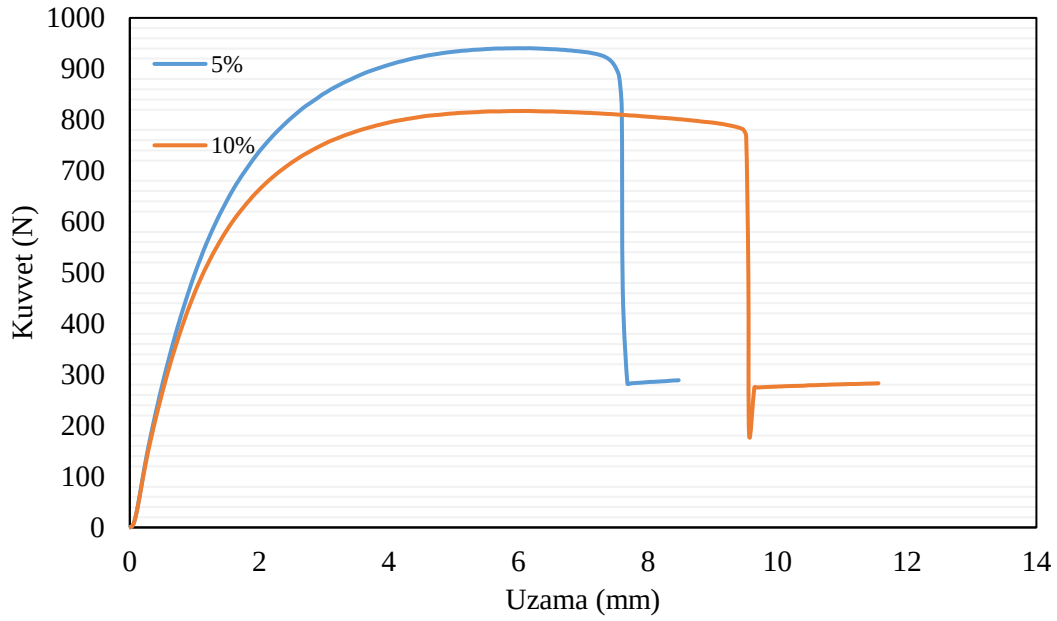


Ek Şekil 2. Gama ışınına maruz bırakılmış AYPE + Deniz Yosunu takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri

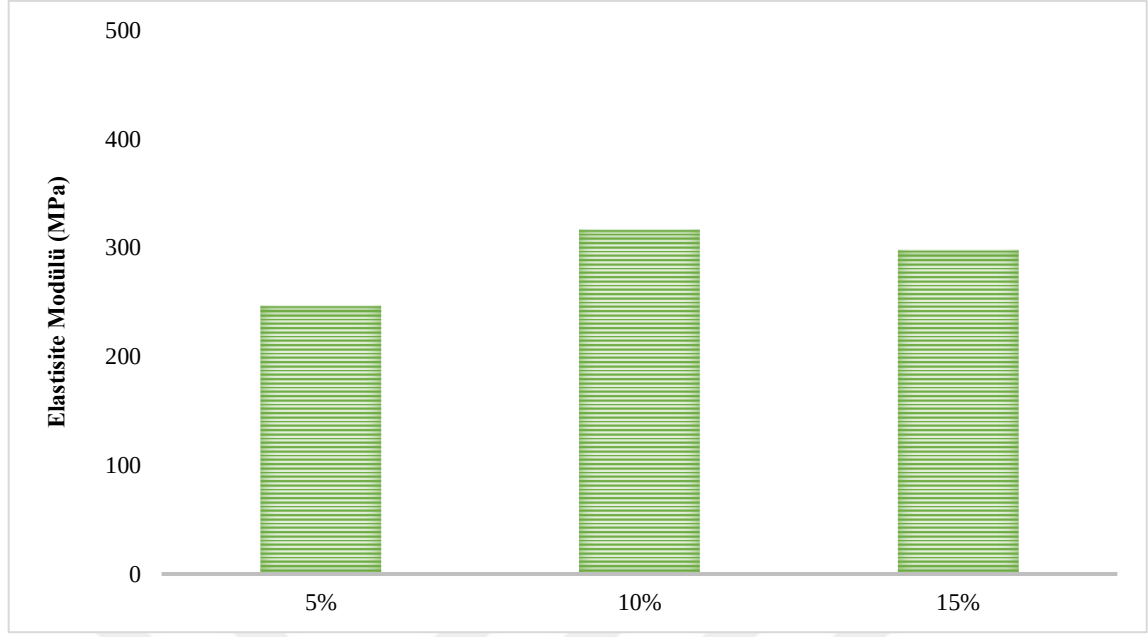




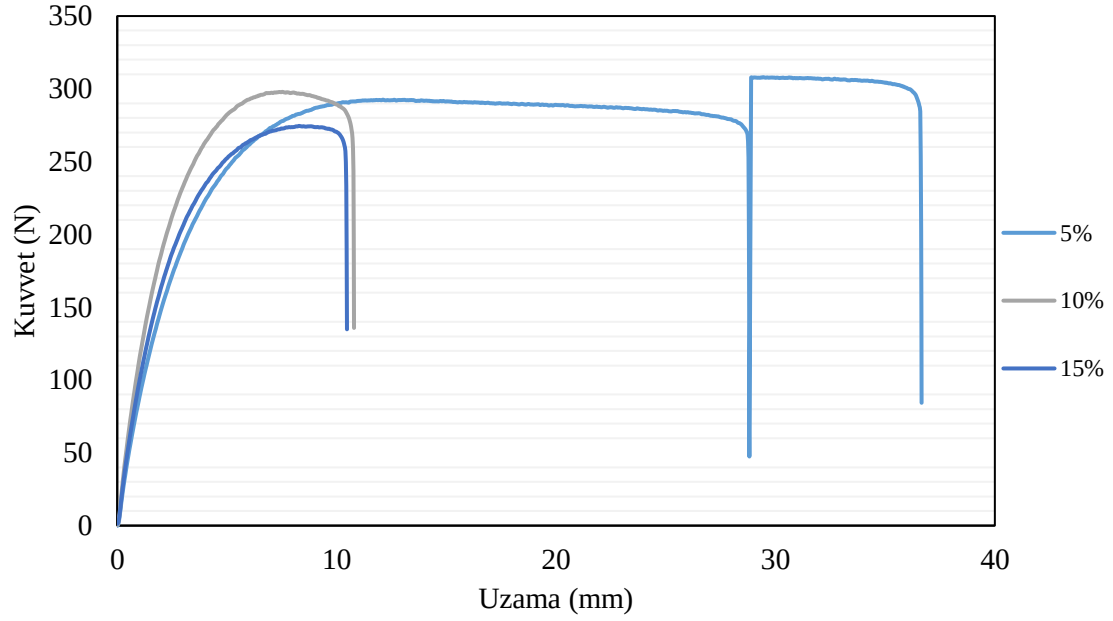
Ek Şekil 3. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş YYPE'nin elastisite modülü değerleri



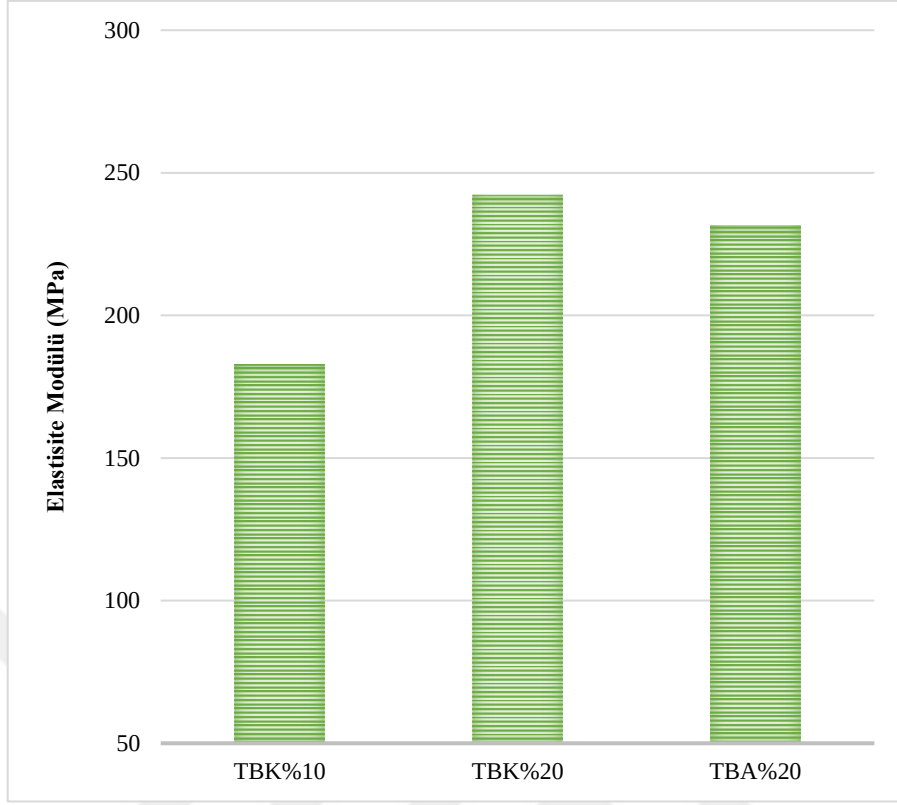
Ek Şekil 4. Gama ışınına maruz bırakılmış YYPE + Saman takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri



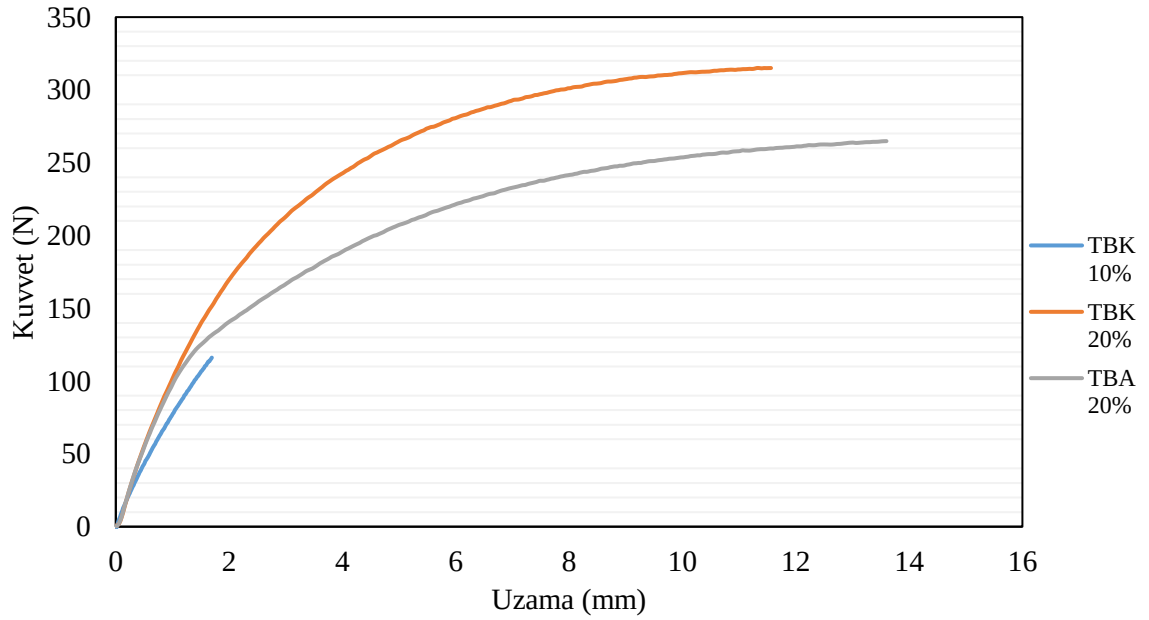
Ek Şekil 5. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışınmasına tabi tutulmuş AYPE'nin elastisite modülü değerleri



Ek Şekil 6. Gama ışınına maruz bırakılmış AYPE + Muz Lifi takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri



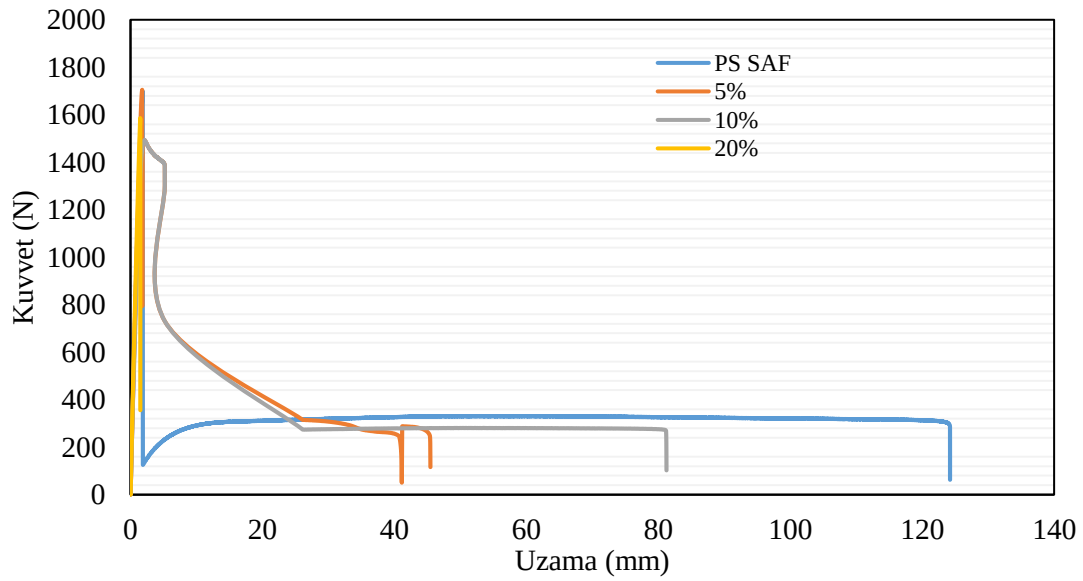
Ek Şekil 7. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş AYPE'nin elastisite modülü değerleri



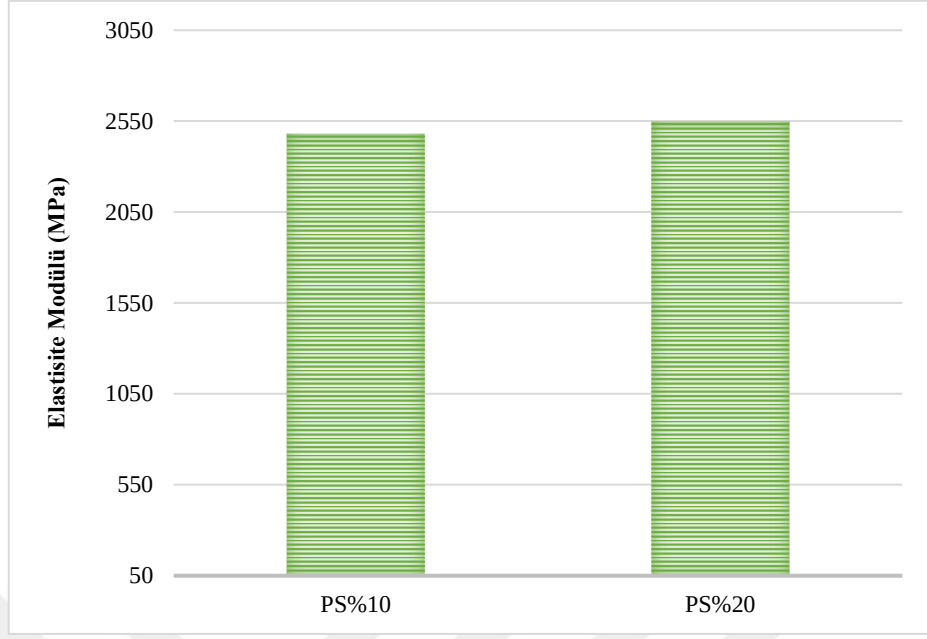
Ek Şekil 8. Gama ışınına maruz bırakılmış AYPE + Toz Boya takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri



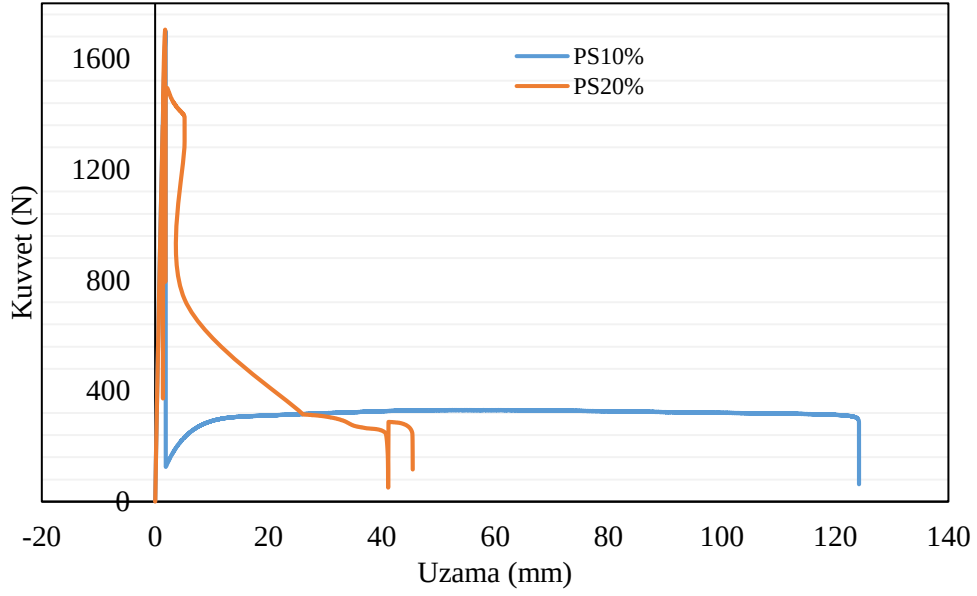
Ek Şekil 9. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş PS'nin elastisite modülü değerleri



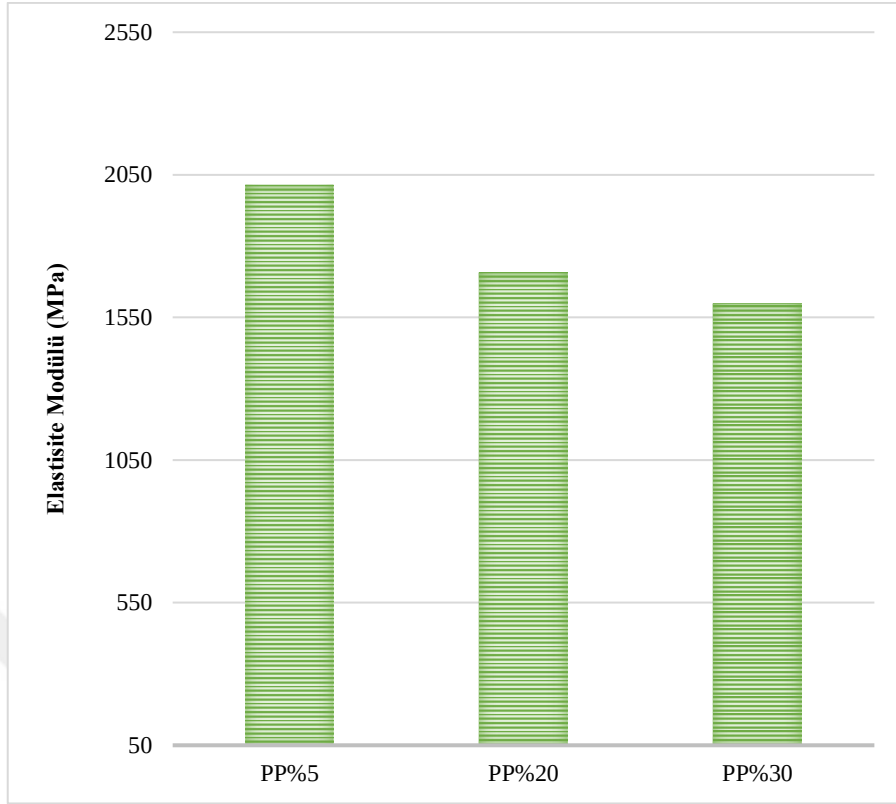
Ek Şekil 10. Gama ışınına maruz bırakılmış PS + Epoksi takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri



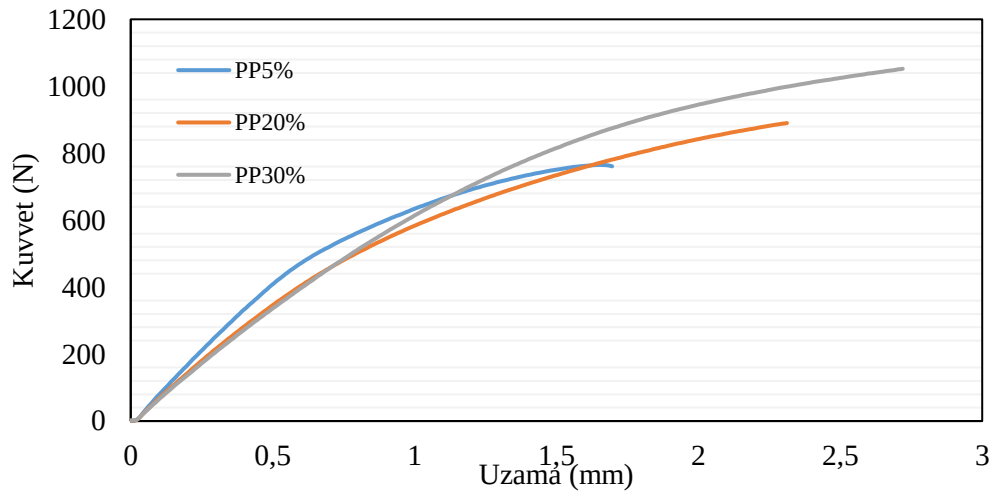
Ek Şekil 11. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş PS'nin elastisite modülü değerleri



Ek Şekil 12. Gama ışınına maruz bırakılmış PS + Epoksi/Polyester takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri



Ek Şekil 13. Dolgu miktarı değişimine bağlı olarak gama ışımasına tabi tutulmuş PP'nin elastisite modülü değerleri



Ek Şekil 14. Gama ışınına maruz bırakılmış PP + Epoksi/Polyester takviyeli malzemelerin çekme Kuvvet-Uzama eğrileri