

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“Enjeksiyon Kalıplama ve Eklemeli İmalat ile Üretilen ABS Temelli Harman Malzemelerin Mekanik ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Recep GÜMRÜK’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan tez izleme komitesi üyeleri saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ömer Necati CORA ve Sayın Prof. Dr. İsa ÇÖMEZ ve eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma, ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan Sayın Dr. Samet ÇALIŞKAN’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’ndeki değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmamı 123M208 sayılı 1002-A Hızlı Destek projesi kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana yardım ve desteğini esirgemeyen sabrıyla hep yanımda olan gülen yüzüm, sevgili eşim Özlem DOĞRU KULEYİN’e ve hayatımıza katılmasıyla hep neşeli yanımız olan kızım Alina KULEYİN’e hep okula gidiyorum diyerek gittiğim günlerdeki tebessümü için teşekkür ederim. Son olarak, bugünlere gelmemde büyük paya sahip, maddi ve manevi desteklerini hep arkamda hissettiğim aileme teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Bu tezi kızım Alina’ya ithaf ediyorum...

Hamdi KULEYİN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Enjeksiyon Kalıplama ve Eklemeli İmalat ile Üretilen ABS Temelli Harman Malzemelerin Mekanik ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Recep GÜMRÜK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/04/2024

Hamdi KULEYİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Polimerlerin Kimyasal Yapısı ve Sınıflandırılması.....	3
1.3. Polimer Harmanlar	8
1.3.1. Polimer Harmanların Üretim Yöntemleri	10
1.3.2. Polimer Harmanların Sınıflandırılması.....	16
1.3.3. Polimer Harmanların Karakterizasyonu.....	19
1.4. Eklemeli İmalat ve Eriyik Yığılma Yöntemi.....	25
1.5. Polimer Yorulması	27
1.6. Literatür Araştırması	31
1.6.1. ABS Harmanlar.....	31
1.6.2. PMMA Harmanlar	38
1.6.3. PMMA/ABS Harmanlar	42
1.6.4. TPU Harmanlar	48
1.6.5. Polimer Harmanların Yorulma Davranışı	50
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı	52
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	55
2.1. Polimer Harman Numunelerin Üretimi.....	55
2.1.1. Malzemeler.....	55
2.1.2. PMMA/ABS Harman Numunelerin Üretimi	57
2.1.3. ABS/TPU Harman Numunelerin Üretimi.....	62
2.2. Karakterizasyon Analizleri.....	68

2.2.1. TGA	68
2.2.2. DSC.....	68
2.2.3. DMA	69
2.2.4. FTIR.....	70
2.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri.....	71
2.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	71
2.4. Yorulma Davranışının Belirlenmesi.....	75
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	78
3.1. TGA Analizlerine Ait Sonuçlar.....	78
3.2. DSC Analizlerine Ait Sonuçlar	84
3.3. DMA Analizlerine Ait Sonuçlar.....	92
3.4. FTIR Analizlerine Ait Sonuçlar	103
3.5. Harman Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	114
3.5.1. PMMA/ABS.....	115
3.5.2. ABS/TPU	130
3.6. Yorulma Davranışı	139
3.6.1. PMMA/ABS Harman.....	139
3.6.2. ABS/TPU Harman	156
3.7. Parametrik Çalışmalar	162
3.7.1. Tutma Basıncının Mekanik Özellikler ve Yorulma Davranışına Etkisi	162
3.7.2. Numune Kalınlığının Mekanik Özellikler ve Yorulma Davranışına Etkisi	172
3.7.3. Yorulma Test Frekansının Yorulma Davranışına Etkisi.....	182
4. SONUÇLAR.....	188
5. ÖNERİLER.....	193
6. KAYNAKLAR	195
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ENJEKSİYON KALIPLAMA VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN ABS TEMELLİ HARMAN MALZEMELERİN MEKANİK VE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hamdi KULEYİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Recep GÜMRÜK
2024, 194 Sayfa

Bu tez çalışmasında PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların termomekanik, kimyasal, mekanik ve yorulma davranışları deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Harman malzemelerin karakterizasyonunda, TGA, FTIR, DSC ve DMA yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca, testler sonrasında kırık yüzey analizleri Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. Böylece ABS bileşiminin PMMA/ABS harmanların ve TPU bileşiminin ise ABS/TPU harmanların mekanik davranışına etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda PMMA/ABS karışımların akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin saf ABS'ye kıyasla sırasıyla %15, %40 ve %80 oranlarında iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca PMMA/ABS harman numunelerin PMMA ve ABS numunelere kıyasla daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediği görülmüştür. Benzer şekilde TPU'nun düşük mekanik özelliklerine rağmen %10 TPU katkılı ABS/TPU harman yapının daha üstün yorulma ömrü sergilediği belirlenmiştir. Son olarak, PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların mühendislik uygulamalarında yorulmaya maruz kalan koşullarda, farklı gereksinimlere cevap verebilecek mekanik özellik ve yorulma ömrü davranışına sahip olacak şekilde tasarlanabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polimer harman, PMMA/ABS, ABS/TPU, Yorulma

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND FATIGUE BEHAVIOR OF ABS BASED BLEND MATERIALS PRODUCED BY INJECTION MOLDING AND ADDITIVE MANUFACTURING

Hamdi KULEYİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Recep GÜMRÜK
2024, 194 Pages

In the thesis study, the thermomechanical, chemical, mechanical and fatigue behaviors of PMMA/ABS and ABS/TPU blends were examined through experimental studies. TGA, FTIR, DSC and DMA methods were used in the characterization of blend materials. Additionally, after tensile and fatigue tests, fracture surface analyzes were carried out using a Scanning Electron Microscope (SEM). Thus, the effects of ABS composition on the mechanical behavior of PMMA/ABS blends and of TPU composition on the mechanical behavior of ABS/TPU blends were investigated. As a result of the study, it was determined that the yield strength, tensile strength, and elongation at break values of PMMA/ABS blends improved by 15%, 40% and 80% compared to neat ABS. Additionally, it was observed that PMMA/ABS blend samples exhibited superior fatigue life performance compared to PMMA and ABS samples. Similarly, despite the low mechanical properties of TPU, it was determined that the ABS/TPU blend structure with 10% TPU additive exhibited superior fatigue life. Finally, it has been understood that PMMA/ABS and ABS/TPU blends can be designed to have mechanical properties and fatigue life behavior that can meet different requirements in conditions exposed to fatigue in engineering applications.

Key Words: Polymer blend, PMMA/ABS, ABS/TPU, Fatigue

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Dünya çapında polimer, polimer kompozit, çelik ve alüminyum malzemelerin ağırlıkça kullanımının yıllara göre değişimi	2
Şekil 1.2.	Polimerik malzemelerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarına ait örnekler	3
Şekil 1.3.	Polimerik malzemelerin temel sınıflandırması	5
Şekil 1.4.	Polimerik malzemelerin yapısına göre sınıflandırmasına ait şematik gösterim	5
Şekil 1.5.	Termoplastik malzemelerin sınıflandırılması	7
Şekil 1.6.	Endüstriyel uygulamalarda kullanılan eriyik polimer harmanlama yöntemlerine ait şematik görüntüler a) ekstrüzyon ve b) enjeksiyon kalıplama.....	11
Şekil 1.7.	Eriyik yığma yöntemi ile üretimde kullanılan filamentlerin hazırlanması sürecine ait şematik gösterim	12
Şekil 1.8.	DSC eğrileri ve bu eğrilerdeki kritik geçiş bölgelerinin gösterimlerine ait örnekler a) PET ve b) PC/ABS polimer harman (URL-2, 2024)	20
Şekil 1.9.	a) DMA analizinde uygulanan gerilme ve birim şekil değiştirme yüklemesinin şematik gösterimi, PLA/ESO polimer harmanı için DMA analizi ile elde edilen kayıp ve depolama modülleri ile kayıp faktörünün b) sıcaklık ve c) yükleme frekansına bağlı değişimi (Liu vd., 2018)	23
Şekil 1.10.	Saf PMMA, saf PVC ve PMMA/PVC harman yapıda görülen FTIR spektrumları (Ramesh vd., 2007).....	25
Şekil 1.11.	Eriyik yığma yöntemi ile parça üretimine ait sürecin şematik gösterim	26
Şekil 1.12.	Yorulma davranışının belirlenmesinde uygulanan test prosedürüne ait önemli parametreleri	29
Şekil 1.13.	Poliasetal malzeme için elde edilen düşük ve yüksek gerilme genliği yüklemelerindeki yorulma davranışını ifade eden histerezis ve Wöhler eğrileri (Lesser, 1995).....	30
Şekil 1.14.	PMMA/ABS harmanlarda farklı bileşim oranlarındaki numunelerden literatür çalışmaları sonucu elde edilen a) çekme dayanımı ve b) darbe dayanımlarının özeti	47
Şekil 2.1.	Enjeksiyon kalıplama işleminin gerçekleştirildiği Haitian MA 1600 plastik enjeksiyon makinesine ait fotoğraf	59
Şekil 2.2.	PMMA/ABS polimer harmanlarda a) düz plaka üzerindeki su jeti kesimindeki numune yerleşiminin şematik gösterimi, b) ASTM D638 Tip 4 çekme ve çeki/çeki, c) tam tersinir (çeki/bası) yorulma test numunelerine ait geometriler ve d) kesim sonrası plaka gerçek görüntüsü (ölçüler mm cinsindendir)	61

Şekil 2.3.	ABS/TPU polimer harman üretiminde kullanılan a) çift vidalı ekstrüder ile donatılmış granül üretim, b) harman granüller ile eklemeli imalata uygun filament üretim hatlarına ait fotoğraflar ve c) filament üretim sürecine ait süreç.....	65
Şekil 2.4.	ABS/TPU harman test numunelerinin üretiminin gerçekleştirildiği 3 Boyutlu yazıcıya ait fotoğraf	67
Şekil 2.5.	Çekme ve yorulma testlerinin gerçekleştirildiği BESMAK Servohidrolik test cihazına ait fotoğraflar a) genel görünüm ve b) numune ve ekstansometre bağlantıları.....	73
Şekil 2.6.	Çekme test sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinden akma dayanımının belirlenmesine ait metodolojinin gösterimi	74
Şekil 2.7.	Tez çalışması sürecinde uygulanan yöntem ve metodolojiye ait süreç akış şeması	77
Şekil 3.1.	Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemelerin TGA analizleri ile elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı ve kütle kaybının türevi eğrileri; a) P100, b) P60A40, c) P40A60, d) P20A80, e) A100 ve f) kütle kaybı (%) eğrilerinin karşılaştırması.....	80
Şekil 3.2.	TGA analizleri ile elde edilen saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20, d) A70T30 ve e) kütle kaybı (%) eğrilerinin karşılaştırması	83
Şekil 3.3.	DSC analizleri ile elde edilen farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemeler için sıcaklığa bağlı ısı akışı eğrileri; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100	85
Şekil 3.4.	Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemelerin DSC analizleri ile elde edilen sıcaklığa bağlı ısı akışı eğrilerinin karşılaştırması.....	88
Şekil 3.5.	DSC analizleri ile elde edilen saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı ısı akışı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20, d) A70T30 ve e) ısı akışı-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırması	90
Şekil 3.6.	DMA analizleri ile farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak elde edilen depolama ve kayıp modülleri ile kayıp faktörlerinin değişimi; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100	94
Şekil 3.7.	PMMA/ABS harmanlarda bileşim oranına bağlı olarak viskoelastik özelliklerin; a) Depolama modülü, b) kayıp modülü ve c) kayıp faktörü karşılaştırmaları	96
Şekil 3.8.	PMMA/ABS harman malzemelerde viskoelastik malzeme özelliklerinin yükleme frekansına bağlı olarak değişimi; a) P20A80 ve b) P60A40.....	99

Şekil 3.9. DMA analizleri ile elde edilen farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak depolama ve kayıp modülü ile kayıp faktörünün değişimi; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30.....	101
Şekil 3.10. ABS3D ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemeler için olarak viskoelastik özelliklerin karşılaştırması; a) depolama modülü, b) kayıp modülü ve c) kayıp faktörü	102
Şekil 3.11. FTIR analizlerinden elde edilen sönümlleme bantları ve karşılık geldikleri dalga sayıları; a) Saf PMMA (P100), b) saf ABS (A100), c) P100 ve A100 kodlu numunelerin FTIR eğrilerinin karşılaştırması	104
Şekil 3.12. PMMA/ABS harman malzemeler için titreşim bantları ve karşılık gelen dalga sayıları a) P20A80, b) P40A60, c) P60A40 ve d) P80A20.....	109
Şekil 3.13. Saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harman numunelerin FTIR analizlerinden elde edilen IR spektrumlarının karşılaştırması; a) P100, A100, P80A20, P60A40 ve b) P100, A100, P60A40, P20A80 kodlu numuneler	109
Şekil 3.14. ABS/TPU harman malzemelerin FTIR analizlerinden elde edilen titreşim sönümlleme bantları ve karşılık gelen dalga sayıları a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30.....	111
Şekil 3.15. Saf ABS ve harman yapıdaki ABS/TPU numunelerin FTIR analizlerinin karşılaştırması; a) ABS3D, A90T10, A80T20, A70T30 ve b) FTIR spektrumlarının 3 boyutlu gösterimi.....	114
Şekil 3.16. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100.....	116
Şekil 3.17. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	119
Şekil 3.18. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında mekanik özelliklerin harman malzemeyi oluşturan polimerlerin bileşim oranına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması.....	120
Şekil 3.19. A100 kodlu malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	122
Şekil 3.20. P20A80 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	122
Şekil 3.21. P40A60 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	123

Şekil 3.22. P60A40 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	124
Şekil 3.23. P80A20 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	124
Şekil 3.24. Saf ABS ve PMMA/ABS harman malzemelerin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	126
Şekil 3.25. Birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak akma ve çekme dayanımlarının PMMA/ABS harman malzemelerdeki değişimleri ile bu değişimlere ait katsayılar a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40 ve e) P80A20	129
Şekil 3.26. Saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemeler için $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30	132
Şekil 3.27. ABS/TPU harman malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	133
Şekil 3.28. ABS/TPU harman malzemelerin mekanik özelliklerin bileşim oranına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması	133
Şekil 3.29. ABS3D numunenin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	135
Şekil 3.30. A90T10 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	135
Şekil 3.31. A80T20 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	136
Şekil 3.32. A70T30 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	137

Şekil 3.33. Saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	137
Şekil 3.34. PMMA/ABS harman numuneler için $R=0,1$ gerilme oranında elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100	141
Şekil 3.35. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numuneler için $R=0,1$ (çeki/çeki) gerilme oranında elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin karşılaştırması	142
Şekil 3.36. Basquin eşitliği kullanılarak $R=0,1$ gerilme oranında farklı gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının bileşim oranına bağlı değişimleri; a) 10 MPa ve b) 6 MPa	145
Şekil 3.37. $R=0,1$ gerilme oranında benzer gerilme genliği altında gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda hasara uğrayan numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) P100, b) A100, c) P20A80 ve d) P40A60	148
Şekil 3.38. P40A60 harman malzemede farklı gerilme genliklerinde gerçekleştirilen yorulma testleri sonrası numunelerin hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) 8,9 MPa ve b) 5,9 MPa	150
Şekil 3.39. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numuneler için $R=-1$ gerilme oranı için yorulma ömrü performansını temsil eden gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100	152
Şekil 3.40. Basquin eşitliği kullanılarak $R=-1$ gerilme oranında farklı gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının bileşim oranına bağlı değişimleri	153
Şekil 3.41. PMMA/ABS harman numunelerin yorulma ömrü karakteristik eğrilerine yorulma testi sırasında uygulanan gerilme oranı veya yükleme tipinin etkisi; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100.....	155
Şekil 3.42. Eriyik yığma yöntemi ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman numuneler için $R=0,1$ gerilme oranlı yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30.....	158
Şekil 3.43. Saf ABS ve ABS/TPU harman numuneler için yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin karşılaştırması	159
Şekil 3.44. $R=0,1$ gerilme oranında benzer gerilme genliği altında gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda hasara uğrayan numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) ABS3D, b) A90T10 ve c) A80T20.....	161
Şekil 3.45. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 0 bar, b) 40 bar, c) 70 bar ve d) farklı tutma basınçlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	164

Şekil 3.46. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen mekanik özelliklerinin tutma basıncına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması.....	166
Şekil 3.47. P40A60 kodlu harman malzemeden farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerin yorulma ömrü karakteristik eğrileri; a) 0 bar, b) 40 bar, c) 70 bar ve d) farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerin karakteristik yorulma ömrü eğrilerinin karşılaştırması.....	169
Şekil 3.48. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu harman numunelerin yorulma testi sonrası SEM analizleri ile elde edilen kırık yüzey görüntüleri; a) 40 bar ve 9,5 MPa (21804 çevrim) ve b) 70 bar ve 9,3 MPa (14230 çevrim).....	171
Şekil 3.49. Farklı plaka kalınlıklarında üretilen P20A80 kodlu harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm ve d) 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	173
Şekil 3.50. Farklı plaka kalınlıklarında üretilen P20A80 kodlu PMMA/ABS harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen mekanik özelliklerinin numune kalınlığına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması.....	174
Şekil 3.51. Farklı kalınlıklarda üretilen P40A60 kodlu PMMA/ABS harman numunelerin çekme testi sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 3 mm, b) 4 mm ve c) 3-4 mm kalınlıklı numunelerden elde edilen eğrilerin karşılaştırması	175
Şekil 3.52. Farklı kalınlıklarda üretilen P20A80 kodlu harman numunelerin eksenel yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm ve d) 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerin yorulma karakteristik eğrilerinin karşılaştırması.....	178
Şekil 3.53. Farklı kalınlıklarda üretilen P20A80 kodlu harman numunelerin eksenel yorulma testlerinde elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri; a) 2 mm (8 MPa), b) 3 mm (8,2 MPa) ve c) 4 mm (9,4 MPa)	179
Şekil 3.54. Farklı kalınlıklarda üretilen P40A60 kodlu harman numunenin eksenel yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) 3 mm, b) 4 mm ve c) farklı kalınlıklı numunelerin karakteristik eğrilerinin karşılaştırması	181
Şekil 3.55. P40A60 kodlu numunenin gerilme oranı, yükleme frekansı ve gerilme genliğine bağlı olarak yorulma testlerinde elde edilen çevrim sayılarının değişimleri	185
Şekil 3.56. P40A60 kodlu numunenin $R=-1$ ve $R=0,1$ gerilme oranlarında farklı yükleme frekanslarında gerçekleştirilen yorulma testlerinde uygulanan çevrim sayısına bağlı yer değiştirme genliğinin değişim eğrileri $R=-1$; a) 5 Hz, b) 15 Hz, c) 25 hz ve $R=0,1$; d) 5 Hz, e) 15 Hz ve f) 25 Hz	186

Şekil 3.57. 30,7 MPa gerilme genliği değerinde farklı yükleme frekanslarında gerçekleştirilen aksenal yorulma testleri sonucunda numune yüzeyinde test öncesi ve kırılma öncesi sıcaklık dağılımı; a) 5 Hz ve b) 10 Hz..... 187



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Dünya çapında ağırlıkça malzeme tüketimi artış hızı*.....	2
Tablo 1.2. Bazı polimerler ve ilgili tekil birimleri.....	4
Tablo 1.3. ABS harmanlar hakkında literatürden örnek çalışmalar.....	34
Tablo 1.4. Ticari ABS temelli polimer harmanlara ait örnekler	37
Tablo 1.5. PMMA/ABS harmanlar konusunda literatürden örnek çalışmalara ait araştırma alanlarının özeti.....	44
Tablo 2.1. Numunelerin üretildiği granül malzemelere ait fiziksel ve mekanik özellikler	56
Tablo 2.2. Enjeksiyon kalıplama makinasına ait özellikler	59
Tablo 2.3. Enjeksiyon kalıplama sırasında kullanılan üretim parametreleri.....	59
Tablo 2.4. PMMA/ABS polimer harman numunelere ait bileşim oranları ve kodlamalar	62
Tablo 2.5. ABS/TPU polimer harman numunelerin ekstrüder ve filament üretim hattındaki üretimi sırasındaki sıcaklık profilleri.....	64
Tablo 2.6. ABS/TPU polimer harman filamentlere ait bileşim oranları ve kodlamalar	65
Tablo 2.7. Eriyik yığma yöntemi ile üretim sürecinde kullanılan yazdırma parametreleri.....	67
Tablo 2.8. Harman malzemelerde uygulanan çekme test prosedürü özeti.....	74
Tablo 3.1. PMMA/ABS harmanların %5 ve %50 kütle kayıp oranına karşılık gelen termal bozunum sıcaklıkları	81
Tablo 3.2. ABS/TPU harmanların %5 ve %50 kütle kayıp oranına karşılık gelen termal bozunum sıcaklıkları	84
Tablo 3.3. PMMA/ABS harmanlar için DSC analizleri ile belirlenen camsı geçiş sıcaklıkları.....	86
Tablo 3.4. ABS/TPU harmanların camsı geçiş sıcaklıkları	91
Tablo 3.5. DMA analizlerinden oda sıcaklığında elde edilen saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harmanlara ait viskoelastik özellikler	96
Tablo 3.6. P20A80 ve P60A40 kodlu numuneler için oda sıcaklığında farklı yükleme frekanslarında elde edilen depolama ve kayıp modülü değerleri	99
Tablo 3.7. ABS/TPU harmanların oda sıcaklığındaki viskoelastik özellikleri ve kayıp faktördeki tepe noktaya ait sıcaklık değerleri.....	103
Tablo 3.8. P100 kodlu saf PMMA ve A100 kodlu saf ABS ile ilişkilendirilen titreşim bantları ve karşılık gelen dalga sayıları.....	106

Tablo 3.9. ABS3D kodlu saf ABS ve TPU malzeme ile ilişkilendirilen titreşim modları ve karşılık gelen dalga sayıları	113
Tablo 3.10. Saf ve harman bileşime sahip PMMA/ABS numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler.....	119
Tablo 3.11. Saf ABS, P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 numunelerin farklı birim şekil değiştirme hızlarında elde edilen mekanik özellikleri	128
Tablo 3.12. Saf ABS ve harman bileşime sahip ABS/TPU numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler	134
Tablo 3.13. Saf ABS3D, A90T10, A80T20 ve A70T30 numunelerin birim şekil değiştirme hızına bağlı elde edilen mekanik özellikler	138
Tablo 3.14. PMMA/ABS harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayılar	143
Tablo 3.15. PMMA/ABS harman numunelerin $R=-1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayılar	153
Tablo 3.16. ABS/TPU harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayılar	159
Tablo 3.17. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunenin çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri.....	165
Tablo 3.18. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları	168
Tablo 3.19. Farklı kalınlıklardaki P20A80 ve P40A60 harman numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri	176
Tablo 3.20. Farklı kalınlıklardaki P20A80 ve P40A60 kodlu harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları	180
Tablo 3.21. Yükleme frekansına ve gerilme genliğine bağlı olarak $R=-1$ ve $R=0,1$ gerilme oranları için yorulma testlerine ait çevrim sayıları ve yüzey sıcaklık değişimleri	184

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<i>OECD</i>	: Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development)
<i>ABS</i>	: Akrilonitril Bütadiyen Stiren
<i>PC</i>	: Polikarbonat
<i>PMMA</i>	: Polimetil metakrilat
<i>POM</i>	: Polioksimetilen
<i>PA6</i>	: Polyamid
<i>PBT</i>	: Polibütilen Tereftalat
<i>PET</i>	: Polietilen Tereftalat
<i>TPU</i>	: Termoplastik Poliüretan
<i>PLA</i>	: Polilaktik asit
<i>HIPS</i>	: Yüksek Etkili Polistiren
<i>GF</i>	: Cam fiber
<i>HDPE</i>	: Yüksek yoğunluklu polietilen
<i>LDPE</i>	: Düşük yoğunluklu polietilen
<i>PS</i>	: Polistiren
<i>PP</i>	: Polipropilen
<i>SEBS</i>	: Stiren Etilen Butilen Stiren Termoplastik Kauçuk
<i>SANMA</i>	: Stiren/akrilonitril/maleik anhidrit
<i>PVDF</i>	: Poliviniliden florür
<i>EVA</i>	: Etilen vinil asetat
<i>EMA</i>	: Etil Metakrilat
<i>PCL</i>	: Polikaprolakton
<i>PO</i>	: Poliefin
<i>UV</i>	: Ultraviyole

1. GENEL BİLGİLER

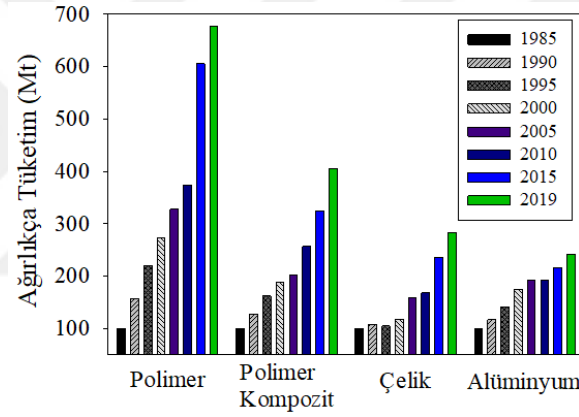
1.1. Giriş

Polimerler, malzeme grubu olarak kullanımı nispeten yakın bir zaman içerisinde başlamasına rağmen teknolojik gelişmeler ve sahip olduğu korozyon direnci, optik özellikleri, aşınma dayanımı, rekabetçi mekanik davranışı nedeniyle günümüzde birçok endüstriyel uygulamada geniş bir kullanım alanına sahiptir (Subramanian, 2017; Pinnavaia & Beall, 2000). Endüstriyel ve mühendislik uygulamaları kapsamında değerlendirildiğinde maliyet, performans, seri veya siparişe dayalı üretime uygunluk ve dayanıklılık temelinde üstünlükleri nedeniyle ürün geliştirme, parça bütünleşmesi ve uygulama konusunda avantajları ile öne çıkan bir malzeme grubudur. Söz konusu özellikleri nedeniyle, uygulamadaki beklentileri ve çeşitliliği açısından farklı birçok malzemede bulunmayan yenilik ve çok yönlülük sunarlar. Bahsedilen bu avantajlarından dolayı geleneksel ve yeni nesil birçok uygulama alanında polimer malzemeler sıkça kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarına elektronik bileşenler, medikal ürünler, ambalajlama, boru bileşenleri, havacılık ve uzay sanayii ile otomotiv endüstri önemli örneklerdir (Dlamini vd., 2011; Ritsema van Eck vd., 2022; Wiese vd., 2020). Polimer malzemelerin endüstriyel alandaki kullanımının artmasıyla dünya çapındaki malzeme üretimi ve tüketimi değerleri de geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla önemli oranda artış ivmesi kazanmıştır (Utracki & Wilkie, 2002). 1900'li yıllarda dünyada polimer tüketimi 30 kiloton ton iken 2019 yılında bu rakam 460 Mt değerine ulaşmış ve son 20 yılda tüketim artışı hızının doyuma ulaşmadan devam ettiği bilinmektedir (Biron, 2012). Tablo 1'de 1985-2019 yılları arasında dünya çapında tüketilen polimer, polimer kompozit, çelik ve alüminyum malzemelerin 1985 yılındaki veriler baz alınarak normalize edilen tüketim miktarları verilmiş ve Şekil 1.1'de ise grafiksel olarak gösterilmiştir (Biron, 2018). Şekil 1.1'den polimer esaslı malzemelerin tüketim hızının geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla oldukça yüksek seyrettiği görülmektedir. OECD plastik kullanımı raporlarında 2060 yılında dünya çapındaki tüketimin 1321 Mt seviyesine çıkacağı ve araçlardaki kullanım oranının 2019 yılına kıyasla en az 3 katlık bir artış sergileyeceği ön görülmektedir (OECD, 2022). Ayrıca polimer malzemelerin 2019 yılında 717 milyon dolar düzeyindeki pazar payının yıllık %5,4 artışla 2032 yılı sonunda 1,207 trilyon dolar seviyesine ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 1.1. Dünya çapında ağırlıkça malzeme tüketimi artış hızı*

Yıllar	Polimer	Polimer Kompozit	Çelik	Alüminyum
1990	100	100	100	100
1995	157	127	107	117
2000	221	162	105	142
2005	272	189	118	175
2010	328	203	160	192
2015	374	257	168	192
2019	606	324	236	217

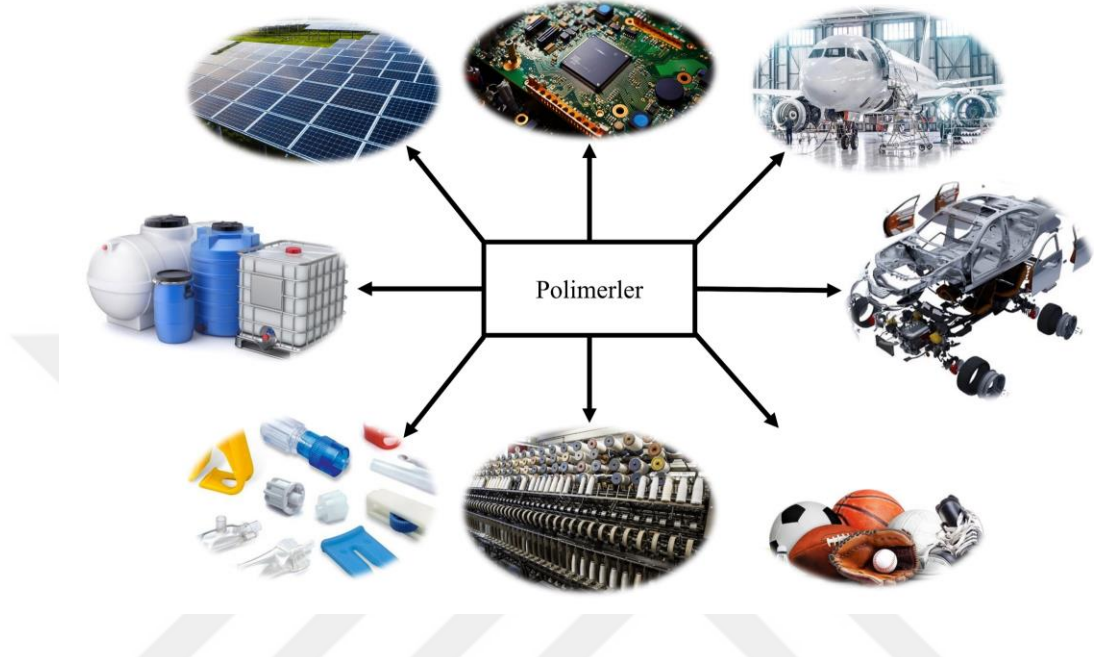
* 1985 yılındaki verilere göre 100 üzerinden normalize edilmiştir.



Şekil 1.1. Dünya çapında polimer, polimer kompozit, çelik ve alüminyum malzemelerin ağırlıkça kullanımının yıllara göre değişimi

Tablo 1 ve Şekil 1.1’den görüldüğü gibi özellikle son birkaç on yılda polimerik malzemelerin dünya çapındaki tüketimi endüstriyel alanlarda ve mühendislik uygulamalarında artan kullanımı ile önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu artış polimerlerin hafiflik, yüksek özgül dayanım, düşük imalat maliyeti, seri üretime uygunluk, karmaşık geometrilerde imalat avantajı ve tasarım esnekliği ile yüksek kimyasal direnç gibi özellikli üstün özellikler sergilemesinden ileri geldiği kaynaklanmaktadır (Rudnik, 2019; Lyu & Choi, 2015; Patil vd., 2017; Tan vd., 2020). Bu nedenle polimer malzemelerin kullanımının genellikle makul maliyetler ile üstün mekanik özellikler sergileme potansiyeli nedeniyle artış gösterdiği söylenebilir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde araç ağırlığı ile karbon salınımı ve yakıt tüketiminin ilişkilendirilmesi nedeniyle geleneksel mühendislik malzemeleri yerine

yüksek özgül dayanıma sahip polimerik malzemelerin kullanımı önemli bir alternatif olmuştur (Haber, 2015). Polimer malzemelerin sıklıkla kullanıldığı mühendislik uygulamalarına ait örnekler Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Polimerik malzemelerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarına ait örnekler

1.2. Polimerlerin Kimyasal Yapısı ve Sınıflandırılması

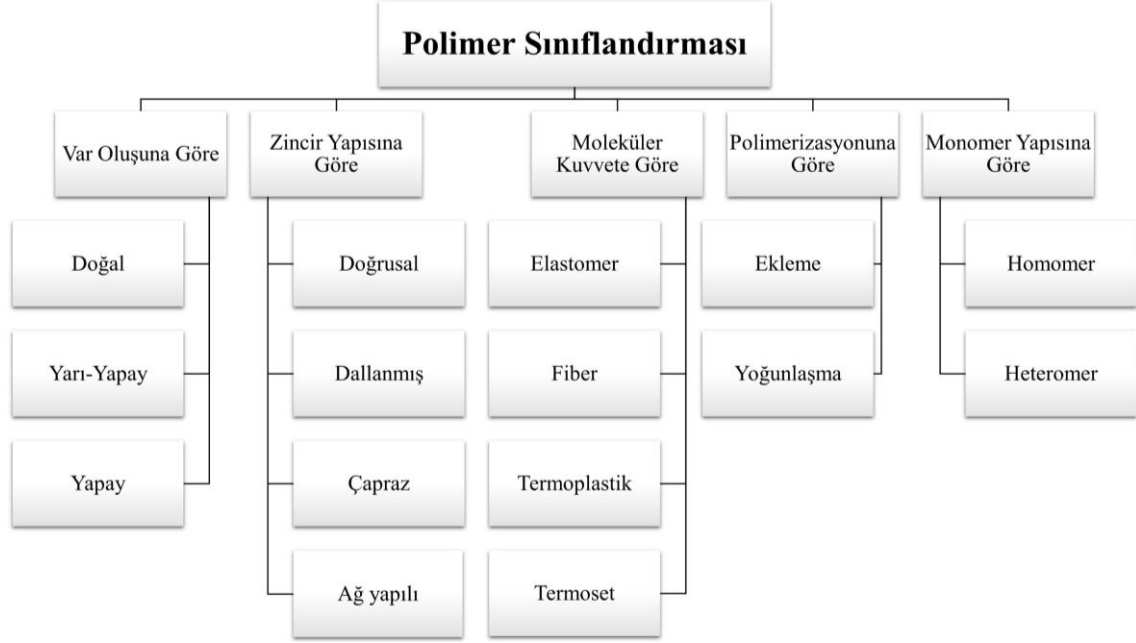
Polimer kelimesi kelime anlamı olarak birçok (poli) birim (mer) anlamına gelmektedir. Polimer bir yapı içerisinde kendisini çok sayıda tekrar eden bir kimyasal birim bulundurmakla birlikte tekrar eden bu birim ise tek bir atomdan veya kimyasal olarak birbirine bağlı atom grubundan oluşabilmektedir. Polimerinin elde edildiği veya bir polimeri oluşturan yapıdaki birim molekül monomer olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel alanlarda sıkça kullanılan bazı polimerler ve ilgili tek birimleri ile tekrar eden yapı birimleri Tablo 1.2’de özetlenmiştir (Ghosh, 2011). Tablodan da görülebileceği gibi polimer malzemeler temelde tekrar eden bir birim veya birimi oluşturan kimyasal yapının tekrarı ile meydana gelmekte ve oluşan polimer yapı bu tekrarlı birimlere ait terminoloji ile isimlendirilmektedir. Örneğin, polietilen polimer malzeme yapısında çoklu tekrar eden tek birim bileşeni etilen olan bir polimer malzemeyi ifade etmektedir. Aynı zamanda iki farklı tekil birimden oluşan polimer yapılar kopolimerler olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 1.2. Bazı polimerler ve ilgili tekil birimleri

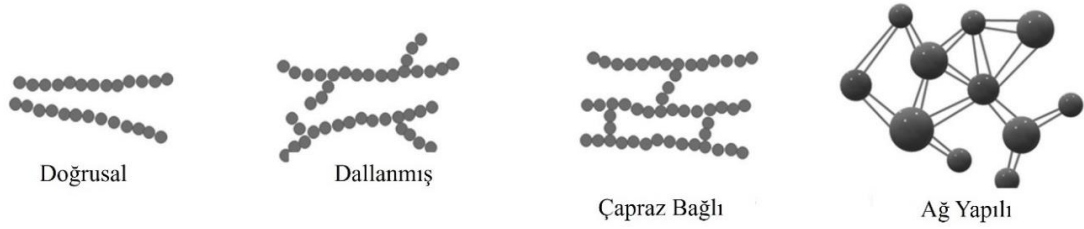
Polimer	Tekil Birim	Tekrar Eden Birim
Polietilen	Etilen	C_2H_4
Polipropilen	Propilen	C_3H_6
Polistiren	Stiren	C_8H_8
Polivinil klorür	Vinil klorür	C_2H_3Cl
Polimetil metakrilat	Metil metakrilat	$C_5O_2H_8$

Şekil 1.3’te polimer malzemelerin genel haldeki sınıflandırılması gösterilmektedir. Bu sınıflandırmaya göre polimer malzemeler varoluşuna, zincir yapısına, moleküler kuvvetine, kristal yapılarına ve monomer yapılarına göre sınıflandırılabilir. Polimerler varoluşlarına göre doğal, yapay ve yarı-yapay polimerler olarak sınıflandırılırken, zincir yapılarına göre ise doğrusal, dallanmış, çapraz bağlı ve ağ yapılı polimerler olarak sınıflandırılmaktadır (Daniels, 1989; Ghosh, 2011). Polimer malzemelerde görülen bu yapılara ait şematik gösterimler ise Şekil 1.4’te verilmiştir. Doğrusal yapıya sahip polimerler uzun zincirler ile birbirine bağlı ve nispeten daha zayıf hidrojen bağları ile bir arada bulunan atomsal dizilimlerden meydana gelmektedir (Daniels, 1989). Tekrarlayan birimlerin uç uca eklenerek zincir yapısının meydana geldiği polimerlerdir. Bu bağ yapısı, ısı veya organik çözücüler etkisiyle kolay bir şekilde kırılmaktadır. Doğrusal yapılı polimerlerde ısı etkisiyle uzun zincir yapı arasındaki bağlar kırılmakta ve zincirler birbirleri üzerinden hareket ederek yeniden bir dizilim formuna sahip olabilmektedir. Bu durum ısı veya sıcaklık etkisiyle yeniden şekillendirilebilmeye olanak tanımaktadır (Carraher Jr. & Seymour, 2012). Bu nedenle termoplastik malzemeler doğrusal yapılı polimerlere önemli bir örnek olarak gösterilmektedir. Dallanmış yapılı polimerler yapısında uzun zincir bağlardan sarkan daha kısa zincirleri barındıran bir bağ yapısına sahiptir. Dallanmış yapılı polimerler doğrusal yapılı polimerlere kıyasla daha az yoğunluğa sahip olmakta aynı zamanda sarkan zincir yapıların uzun zincir yapıları birbirine bağlamaması nedeniyle ısı ile bu bağlar kırılabilir. Bu nedenle bu yapılarda da termoplastik davranışlı polimerlerin eldesi mümkün olabilmektedir. Çapraz bağlı polimer yapısı ise uzun zincirler birbirlerine sarkan zincir yapılar ile bağlı bir forma sahiptir. Çapraz bağlı polimerlerde, doğrusal polimerlerin aksine bağlar kovalent bağlar ile birbirine bağlanmakta ve bu çok güçlü bir yapısal form

oluşturmaktadır (Mukherji & Abrams, 2009). Çapraz bağlı polimerlerde ısıyla sertleşen bir yapı görülmektedir. Ağ bağlantılı polimerler ise üç boyutlu yapıda karmaşık bir ağ yapısına sahip bağlarla birbirine bağlı polimerlerdir. Bu polimer yapısında, alt polimer yapısının bozulmadan ısıtıldığında yumuşatılması neredeyse imkansızdır. Bu nedenle ısıyla sertleşen bir polimer yapısı sergilemektedir.



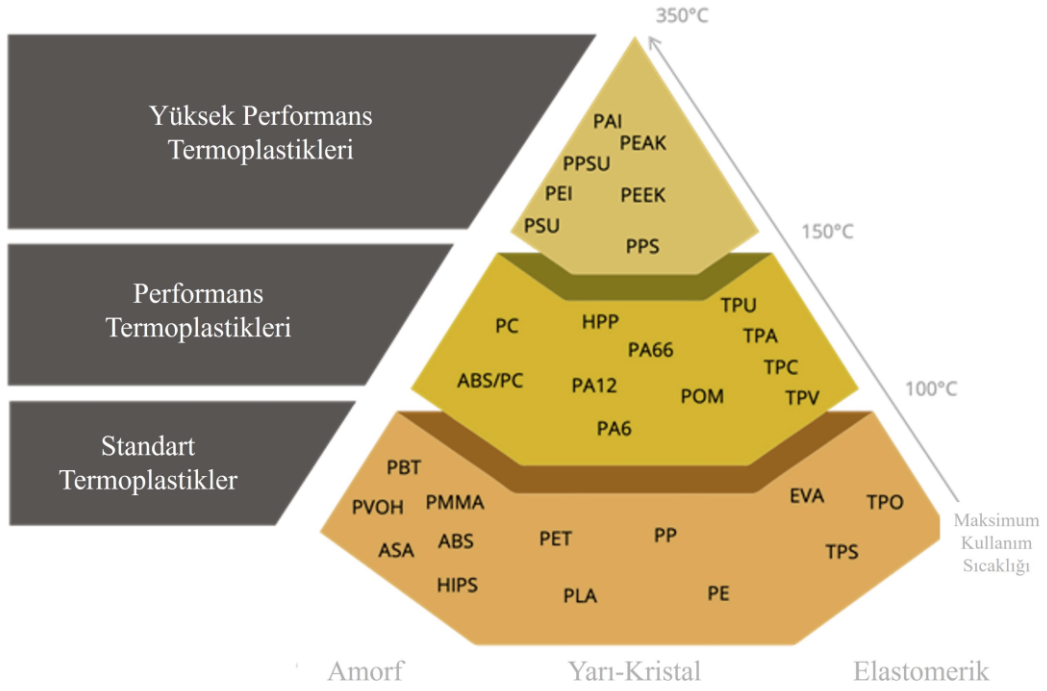
Şekil 1.3. Polimerik malzemelerin temel sınıflandırması



Şekil 1.4. Polimerik malzemelerin yapısına göre sınıflandırmasına ait şematik gösterim

Ancak polimerlerin sınıflandırılmasında en sık karşılaşılan sınıflandırma şekillendirme ve çalışma koşullarındaki durumunu ortaya koyması açısından moleküler kuvvetine göre yapılan ve son kullanım durumundaki davranışını da bir anlamda karakterize eden sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre polimerler temelde elastomerler, termoplastikler ve termosetler olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır (Peters, 2015). Termoplastik malzemeler ile termoset malzemeler arasındaki temel fark malzeme yapısının

ısıya bağılı olarak bağımsız zincir yapılar (termoplastik) ve kimyasal olarak bağılı çapraz zincir yapılardan (termoset) oluşmasıdır (Bîrcă vd., 2019). Termoset malzemeler belirli bir ısı, basınç ve zamana tabii tutulan reçine, takviye malzeme, renklendirici, katalizörden oluşan fiziksel bir karışımdır. Bu karışım polimerizasyon reaksiyonu ile geri dönüşemeyen katı bir form haline gelen termoset malzemeleri oluşturmaktadır. Termoset polimerler çapraz bağları ile bağlanır, ısıtılarak yeniden kalıplanması ve geri dönüştürülmesi mümkün olmayan özelliklere sahiptir. Termoplastik malzemeler doğrusal zincirli yapıya sahip polimerler olarak bilinirler, ısıtılarak yeniden şekillendirilebilmekte ve geri dönüştürülmesi mümkün bir yapıya sahiptirler (Massy & Massy, 2017). Geri dönüştürülebilir olmasının sağladığı ekonomik avantaj ile yeniden üretim sırasında sergilediği özelliklerin önemli ölçüde değişime uğramaması endüstriyel alanlarda ve mühendislik uygulamalarında kullanılmasının önünü büyük ölçüde açmıştır. Termoplastikler, termoset malzeme gruplarına kıyasla üstün darbe dayanımı, yorulma dayanımı, geri dönüştürülebilirliği ve kolay şekillendirilebilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır (Biron, 2018; Zanchin & Leone, 2021). Aynı zamanda sahip oldukları mekanik özellikler, hafiflik, korozyon direnci, kolay şekillendirilebilme ve seri üretime uygunluk avantajlarından dolayı geleneksel metal ve metal alaşım malzemelerin uygulamadaki kullanım alanlarına önemli bir alternatif olmaktadır. Söz konusu avantajları nedeniyle biyomedikal uygulamalar ve aletler, otomotiv, havacılık gibi önemli endüstriyel alanlarda ve çok çeşitli günlük uygulamalarda kullanılmaktadır. Termoplastik malzemelerin yüksek özgül dayanımı nedeniyle tasarım aşamasında ağırlık azaltma yeteneği ile nispeten düşük üretim maliyeti ve parça tasarım esnekliği birleştiğinde, termoplastik malzemelerden üretilen parçaların üretimi büyük ölçüde mali avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle dünya çapındaki termoplastik tüketimi toplam plastik tüketiminin yaklaşık %80'den fazlasını oluşturmaktadır. ABS, PC, PMMA, POM, PA6, PBT gibi yüksek performanslı mühendislik termoplastiklerinin, yıllık küresel tüketimi 30 milyon ton üzerinde gerçekleşmekte ve termoplastik malzemelerin toplam pazar hacminin yaklaşık %10'ununa karşılık gelmektedir (Biron, 2018). Termoplastik malzemeler kendi içerisinde amorf, yarı-kristal ve elastomerik termoplastikler olarak üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bu üç ana grup kendi içerisinde termoplastik malzemelerin çalışma sıcaklığına göre standart, performans ve yüksek performans termoplastikleri olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Şekil 1.5'te termoplastik malzemelere ait sınıflandırma ve örnek termoplastik ürünlerin ticari kısaltmaları verilmiştir (URL-1, 2024).



Şekil 1.5. Termoplastik malzemelerin sınıflandırılması

Termoplastik polimerlerin mühendislik uygulamaları başta olmak üzere endüstriyel alanlarda ve günlük hayatta çok sık kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca termoplastik polimerlerin farklı uygulama alanlarında çeşitli yükleme durumlarına uygun, çevresel faktörlere dirençli ve uygulamaya özgü istenilen kritik başarı değerlerini sağlayacak yapıda olması gerekebilmektedir. Ancak bu açıdan değerlendirildiğinde termoplastik polimerler uygun malzeme ve mekanik özellik dengesi veya uyumunu sergileme konusunda yetersiz kalabilmektedir. Bu durum çalışma koşullarında termoplastik polimerlerden istenilen özelliklerin artmasıyla uygulamadaki polimer malzemeler üzerine yeni araştırma konularının oluşmasına yol açmış ve polimer malzemeler konusunda çalışmaların hız kazanmasına neden olmuştur. Bu çalışma ve araştırmalarda yeni polimer malzemeler ve kompozitleri ile farklı polimerlerin harmanlanması veya toz, fiber, nanomalzeme gibi katkı ilaveleri ile polimer matris özelliklerinin geliştirilmesi konusundaki çalışmalar giderek hız kazanmış ve önemli bir araştırma alanı olmuştur. Polimer matris özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla ilk çalışmalar mekanik özelliklerin daha kolay geliştirilmesine imkân tanınması nedeniyle, polimer matrise bazı nano malzeme, elyaf ve toz malzemeler gibi katkı maddeler veya katkı ajan ilaveleri şeklinde gerçekleştirilmiştir (Lyu & Choi, 2015). Katkı malzemesinin şekli, boyutu, matristeki hacimce dağılımı, matrise uyumu gibi parametreler ile katkılı polimer matrislerin malzeme ve mekanik özellikleri temelde önemli ölçüde

değişimler göstermektedir. Cam elyaf gibi yüksek mukavemetli katkıları ile polimer matris özellikleri önemli ölçüde gelişerek üstün özgül dayanım özelliği ile uygulama alanlarına göre metal veya diğer mühendislik malzemelerine ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilir bir yapı kazanmıştır (Elmarakbi, 2013; Presting & König, 2003; Hussain vd., 2006). Son yıllarda elyaf katkıların yanı sıra nanomalzeme katkılı polimer matrisli malzemeler üstün özgül dayanımı ve polimer matris uyumluluğu nedeniyle artan bir ilgi ve öneme sahiptirler. Polimer malzemelerin malzeme ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkılı termoplastik kompozitlerin üretimi konusunda araştırmalar hala artan bir ilgiyle devam etmesine rağmen hedeflenen malzeme özelliklerine ulaşılmasında yalnızca toz, fiber veya nanomalzeme katkısının yeterli olmadığı buna karşın maliyetli bir yöntem olduğu bilinmektedir. Polimer malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde polimer harman temelli çözümlerin istenilen malzeme özelliklerinin eldesinde yeni polimer matrisin sentezlenmemesi, toz veya fiber katkılara kıyasla daha ekonomik ve ürün tasarımında daha fazla esneklik sunması nedeniyle polimer matris özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden biri olmaktadır (Sadiku & Ogunniran, 2014; Harrats vd., 2006; Utracki vd., 2014). Polimer harmanlar mühendislik termoplastikleri kullanımında önemli bir alt gruptur ve dünya çapındaki tüketimi yıllık 3Mt'un üzerinde gerçekleşmektedir (Akkapeddi, 2014).

1.3. Polimer Harmanlar

Polimer harmanlar, iki ya da daha fazla polimerin birbirleriyle karıştırılarak çeşitli fiziksel, kimyasal, mekanik ve reolojik özellikler ile yeni bir malzeme oluşturulması süreci olarak tanımlanmaktadır (Olabisi vd., 1979; Paul, 2012). Polimerlerin uygulama alanları genişleyip sağlamaları gereken başarı kriterleri daha da zorlu hale geldikçe, istenilen özelliklere sahip polimer malzeme ve polimer matrisli kompozitlerin üretilmesine olanak sağlayan polimer harmanların özellikleri giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Ayrıca polimer harmanların oluşturulması nüfus artışı, iklim değişikliği ve enerji talebiyle ilişkili ortaya çıkan küresel ölçekli ihtiyaçlara sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine yönelik malzeme üretimi yaklaşımlarının önemli bir bileşeni olarak görülmektedir (Subramanian, 2017). Artan dünya nüfusu ile enerji ihtiyacı ve kullanılacak araç sayısı ihtiyacının artması büyük boyutlu taleplerin oluşumunu da önemli oranda tetikleyeceği tahmin edilmektedir. Talep artışı ile tüm endüstriyel alanlarda ve mühendislik uygulamalarında ihtiyacı

karşılacak yeni polimer esaslı ürünler için bir alan oluşacağı düşünülmektedir (Gao vd., 2022). Bu ihtiyaca otomotiv endüstrisinde tasarım ve üretim aşamasında plastik parçaların kullanımında hafiflik, yakıt tüketimi, karbon salınımlarının azaltılması, yüksek güvenlik ve geri dönüşüm başlıkları ile ilişkilendirilmesi örnek verilebilir. Polimer harmanlama bu uygulamalar için ihtiyaç duyulan özelliklerin dengeli bir ürün ile giderilmesinde önemli bir yöntemdir (Harrats & Makhilef, 2005). Bu nedenle polimer harmanlama yöntemi ile polimer malzemelerin ve polimer matris özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi konusu ilgi çeken bir araştırma alanı olmuştur. Polimer harmanlama yöntemi düşük maliyetli, işlevsel amaçlı malzeme üretimine ve işlevsel modifikasyonlar ile polimer malzeme geliştirilmesi sürecine olanak tanıyan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, polimer harman yöntemi mevcut polimerlerle polimer malzemelerin özelliklerini kontrol etmenin uygulanabilir ve çok yönlü bir yolu olarak görülmektedir (Vigild vd., 2001). Polimer harmanların kolay geliştirilmesi ve seri üretime uygunluğunun yanı sıra sağladığı avantajlar istenilen özelliklerde ve düşük maliyetli yeni malzemeler geliştirilebilmesi, mühendislik polimerlerinin özelliklerinin iyileştirilebilmesi, farklı uygulamalar için çeşitlendirilebilir polimerlerin geliştirilebilmesi ve polimer malzemelerin üretilebilirliklerinin iyileştirilebilmesi şeklinde sıralanabilir (Thomas vd., 2014; Utracki vd., 2014). Aynı zamanda polimer harmanlama yöntemi, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, sıkıştırmalı kalıplama vb. üretim yöntemleri kullanılarak kolayca polimer harman üretimi yapılabilen ve malzemedan istenilen özelliklerin uygun ve uyumlu bir halini geliştirme metodu olarak düşük maliyetli ve seri üretime uygun şekilde kullanılabilmektedir (Utracki & Favis, 1989; Parameswaranpillai vd., 2014). Son yıllarda geleneksel polimerlerin harmanlanması yeni polimerik malzemelerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer harmanlar, birbirine kovalent olarak bağlanmamış iki veya daha fazla farklı türde polimer zincirinin bir karışımıdır. Kimyasal olarak farklı polimerlerin harmanlanması, endüstriyel üretimde, en uygun malzeme özelliklerine sahip ürünlerin uyarlanması için önemli bir araçtır (Martuscelli, 2012). Polimer harmanlar, düşük maliyetle tasarım ve başarı kriterleri açısından istenilen özellikleri elde etmek amacıyla uygulamaya özgü yeni ürünler geliştirilmesinde önemli bir rol oynamakta ve böylece polimer harmanlar konusu hem akademi hem de endüstriyel alanın ilgisini çekmektedir (Thomas vd., 2005; Idumah, 2021).

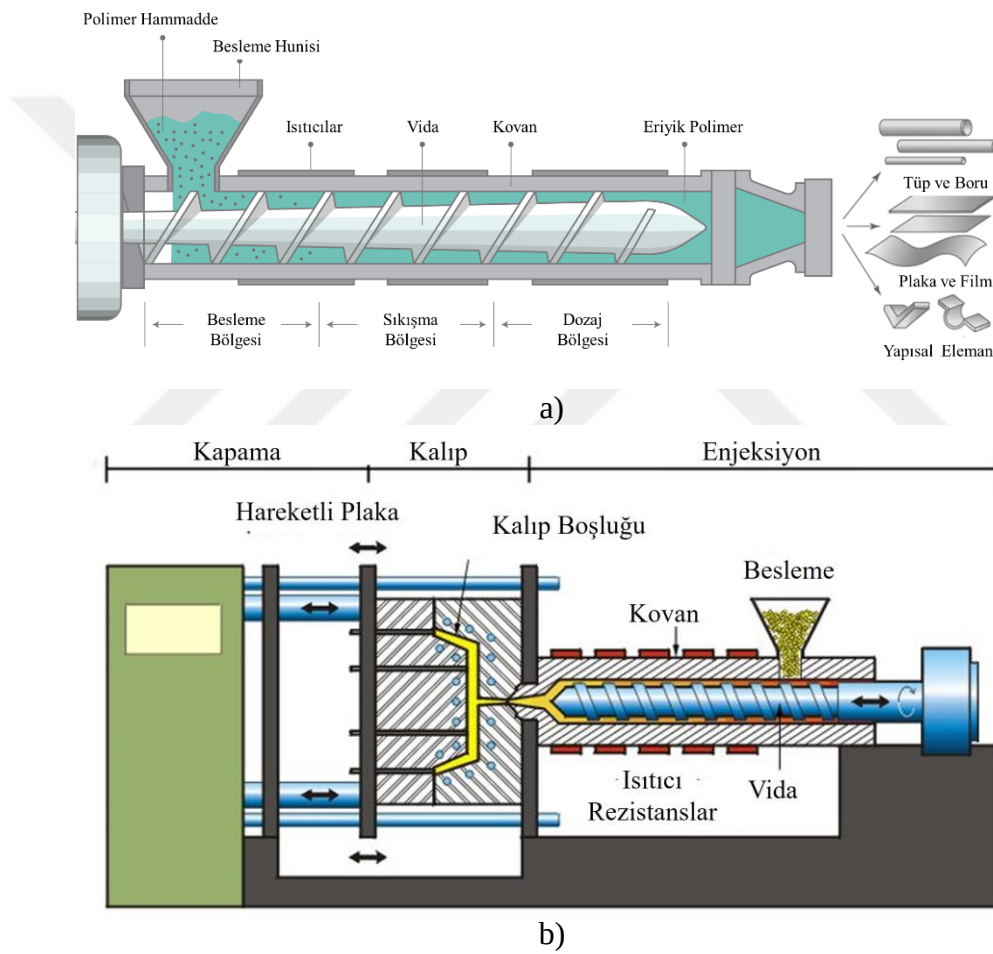
1.3.1. Polimer Harmanların Üretim Yöntemleri

Polimer harmanlama yöntemi ile üretimi düşük maliyetli ve diğer mühendislik malzemelerine kıyasla daha kolay bir şekilde polimer malzemeler geliştirilebilmektedir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda polimer harmanlama yöntemi büyük bir öneme sahiptir. Polimer harmanların üretiminde eriyik harmanlama, blok kopolimerizasyon ve eriyik çözelti gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasından eriyik harmanlama yöntemi endüstriyel boyutta ve seri üretime uygulanabilir olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan ve polimer harmanlama metodu ile istenilen özelliklerin eldesinde endüstriyel alanda ekonomik açıdan en avantajlı yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Ticari ve endüstriyel uygulamalarda eriyik polimer harmanlama yöntemi ile üretim ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama ile gerçekleştirilebilmektedir.

a. Ekstrüzyon

Eriyik polimer harmanlama yöntemlerinden biri olan ekstrüzyon plastik endüstrisinde en sık kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Ekstrüzyon yöntemi filament, boru, plaka vb. gibi sürekli üretime imkân tanıyan basit geometrilerde ürünlerin elde edildiği ve eriyik polimerin belirli bir basınç altında bir kalıp içerisinde hareketi ile gerçekleşen üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.6'da ekstrüzyon üretim yöntemine ait şematik resim verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ekstrüzyon yöntemi vida ve namlu olmak üzere temelde iki ana bileşenden oluşan bir sisteme sahiptir. Ekstrüzyon yönteminde polimer hammadde huni yardımıyla vida içerisindeki boşluğa iletilir. Daha sonra, namlu çevresindeki ısıtıcılar yardımıyla ısıtılan vidanın dönüş hareketi ile eriyik polimer hammadde kalıp boşluğuna doğru ilerletilir. Vida bu dönüş hareketi sırasında besleme kısmında polimerin ön ısıtılmasını, sonrasında polimerin eriyik halde homojen karışmış forma ulaşmasını ve uygun basınca ulaşarak kalıptan çıkışını sağlayacak üretim adımlarını gerçekleştirmektedir. Ekstrüzyon ile üretimde iki temel vida tipi ön plana çıkmaktadır. Bunlar tek vidalı ve çift vidalı karıştırıcılar olarak sınıflandırılabilir. Tek vidalı ekstrüzyon sistemleri uzun yıllardır düşük maliyet ve kolay üretimi nedeniyle tercih edilmekteyken çift vidalı ekstrüzyon sistemleri ise üstün karışım kabiliyeti ve homojen üretim avantajları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Eriyik harmanlama yönteminde harman bileşimini oluşturan polimer malzemeler tek veya çift vidalı karıştırıcılar yardımıyla karıştırılır. Burada eriyik durumda polimer malzemelerin karışımı ile harman yapı oluşturulması karıştırıcı içerisinde gerçekleştirilerek eriyik polimer harman

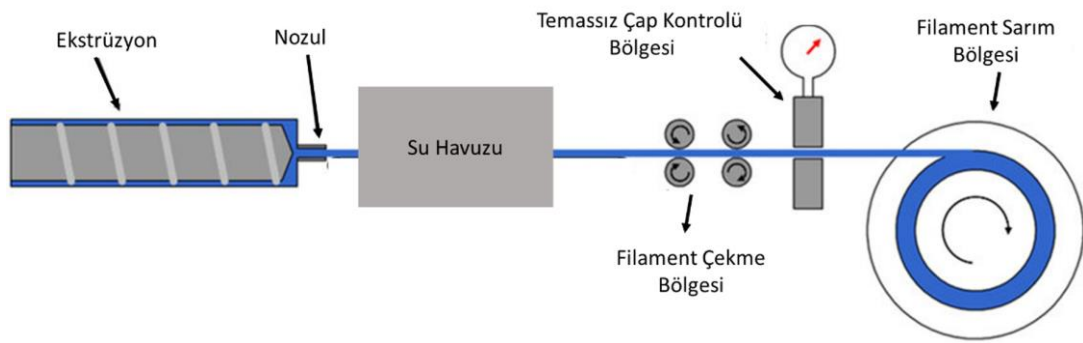
malzeme elde edilmektedir. Ancak, polimer harman yapının homojen bir karışım performansı sergilemesi açısından eriyik harmanlama yönteminde çift vidalı karıştırıcılar tercih sebebi olmaktadır. Polimer harmanlamada ekstrüzyon ile üretim sıklıkla polimer harman granüllerin eldesi veya filament şeklinde harman ürünlerin eldesi amaçlarıyla kullanılmaktadır. Ekstrüzyon ile elde edilen granül haldeki harman malzemeler hem enjeksiyon kalıplama hem de filament eldesi sonrası eklemeli imalat yöntemi ile test numuneleri ve ürünlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 1.6. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan eriyik polimer harmanlama yöntemlerine ait şematik görüntüler a) ekstrüzyon ve b) enjeksiyon kalıplama

Burada bahsedilmesi gereken bir diğer nokta ise ekstrüzyon işlemi sonrası harman filamentlerin üretimi konusudur. Eriyik yığılma yöntemi veya 3 boyutlu baskı sırasında harman filament kullanımı ile test numuneleri ve ürünler harman yapıda elde edilebilmektedir (Koga vd., 2020). Filament ürünler termoplastik granüllerden ekstrüzyon

yardımla yeniden ergitilip belirli bir çap değerindeki nozullar yardımla ekillendirilerek elde edilmektedir (Gkartzou vd., 2017). Böylece ticari olarak kullanılan birçok termoplastik malzemeden (PC, ABS, PET, TPU, PLA, PA6 gibi) filament etimi gerçekleştirilebilmektedir (Dey vd., 2021). şekil 1.7’de filament üretim hattını temsil eden şematik resim verilmiştir. şekilden görüleceği gibi filament üretim hattı temelde 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar sırasıyla ekstrüzyon, soğutma, filament çekme ve filament sarma olarak sıralanmaktadır. Ekstrüzyon kısmında yukarıda açıklandığı gibi vida-kovan içerisine beslenen termoplastik granül belirli bir sıcaklık profiline sahip hat boyunca ergimekte ve nozul bölgesine ulaşmaktadır. Nozul bölgesine ulaşan eriyik termoplastik belirli sıcaklık ve basınç altında nozuldan çıkmakta ve soğuma bölgesini oluşturan sıcak ve soğuk havuzlara iletilmektedir. Burada eriyik haldeki termoplastik malzeme hem polimerizasyon sürecini tamamlamakta hem de katılaşarak istenilen çapta filamentin sarımı için belirli bir form kazanmaktadır. Formu kazanan filament sarım bölgesinde sarım işlemine tabii tutulmaktadır. Aynı zamanda üretim sürecinde filament çap kontrolü ile ekstrüzyon hızı, sıcaklık ve sarım bölgesinin hızı kontrol edilerek istenilen çapta sürekli bir üretim elde edilmesi sağlanmaktadır.



şekil 1.7. Eriyik yığıma yöntemi ile üretimde kullanılan filamentlerin hazırlanması sürecine ait şematik gösterim

b. Enjeksiyon Kalıplama

Endüstriyel rnler (ambalajlar, elektronik ev aletleri vb.) ve mühendislik uygulamalarında (havacılık, otomotiv vb.) en sık kullanılan üretim yöntemlerinden biri de enjeksiyon kalıplama yöntemidir (Khan & Acharya, 2016). Bu yöntemin yaygın kullanılmasının sebebi olarak, karmaşık şekil ve geometrilerdeki ürünlerin yüksek boyutsal hassasiyetle retilbilmesi ve seri üretime çok uygun bir yöntem olması görülmektedir. şekil 1.6’da enjeksiyon kalıplama sistemine ait şematik resim verilmektedir. şekilden de

görüldüğü gibi termoplastik ürün elde edilmesinde kullanılan sistem, enjeksiyon ve kalıplama olmak üzere temelde iki ana kısımdan meydana gelmektedir. Enjeksiyon kısmında granül veya toz halinde bulunan termoplastik hammadde besleme hunisinden geçerek kovan içerisine gelir. Kovan içerisinde ısıtılarak ergitilen hammadde, vida sistemi yardımıyla belirli bir basınç altında nozuldan geçip kilitleme ünitesi tarafından birbirine bastırılan kalıp içerisine dolmaya başlar. Burada eriyik hammaddenin kalıp boşluğunu doldurarak şekillenmesi ve soğuması için belirli bir süre geçtikten sonra birbirine bastırılan kalıplar açılarak termoplastik ürün kalıp dışına çıkartılır. Enjeksiyon kalıplama üretimi sırasında söz konusu işlemler birbirini takip ederek enjeksiyon kalıplama çevrimi tamamlanır. Üretim yönteminde enjeksiyon kısmı ekstrüzyon yöntemine benzer şekilde polimer malzemenin eriyik forma getirilerek besleme yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Ekstrüzyon yönteminden farklı olarak kalıplama kısmında istenilen geometride hazırlanan kalıp içerisine eriyik haldeki polimer malzeme basınç altında beslenerek kalıp içerisinde geometrik formun oluşmasıyla nihai ürün eldesi sağlanmaktadır.

Enjeksiyon kalıplama üretim çevriminin tamamlanması sırasında basınç, sıcaklık, hız ve zaman gibi üretimden kaynaklı parametreler nedeniyle enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçaların ürün kalitesi, mekanik özellikleri, yorulma ömrü ve darbe direnci gibi yapısal özellikleri değişebilmektedir (Kalay & Bevis, 1997; Dar vd., 2016). Bu nedenle enjeksiyon kalıplama ile üretilen termoplastik malzemelerin mekanik davranışının ortaya koyulmasında üretim parametrelerinin malzemenin mekanik davranışına olan etkilerinin de çok iyi anlaşılması gerekmektedir (Shen vd., 2002; Kamber, 2008). Basınç parametresi enjeksiyon kalıplama üretimi için enjeksiyon basıncı, tutma basıncı, kalıp içi basınç gibi alt parametreler halinde incelenebilmektedir (Nian vd., 2015). Enjeksiyon basıncı meme, yolluk sistemi ve kalıp boşluğunda bulunan eriyik hammaddenin kalıp içerisine hareketi için uygulanması gereken basınç olarak tanımlanmaktadır (Muccio, 1994). Enjeksiyon kalıplama üretimi sırasında enjeksiyon basıncı değeri eriyik haldeki malzemenin kalıp içerisine doldurulmasında büyük öneme sahiptir. Enjeksiyon basıncının doğru seçilememesi durumunda kalıp içerisinde soğuma sırasında parçada çöküntü ve çarpılma gibi hatalar oluşmaktadır (Kamber, 2008). Tutma basıncı ise kalıp içerisinde bulunan eriyik malzemeye enjeksiyon basıncı sonrası uygulanan ikincil basınç olarak bilinmektedir (Muccio, 1994). Ayrıca, eriyik malzemenin kalıp içerisinde soğuması sırasında parça üzerinde ortaya çıkabilecek geometrik kusurlar ve boşlukların önüne geçmek için uygulanan basınç olarak da tanımlanabilir (Huang & Tai, 2001). Eriyik malzeme bu basınç altında katılaşılarak soğuma

sürecini tamamlar. Buna ilaveten, enjeksiyon kalıplama sırasında çeşitli kayıplar nedeniyle uygulanan enjeksiyon basıncının bir kısmı kalıp boşluğuna etki etmektedir (Kurt vd., 2009). Bu nedenle üretim sırasında kalıp içerisindeki basıncın belirlenmesi ve üretim sırasındaki değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Enjeksiyon kalıplama üretiminde önemli diğer bir parametre de sıcaklıktır. Parça kalitesi ve mekanik özelliklerini etkileyen bu parametre; eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve hammadde sıcaklığı olarak incelenebilir. Eriyik sıcaklığı genellikle hammaddenin enjeksiyon işlemi sırasında ulaştığı sıcaklık değeri olarak tanımlanmaktadır (Muccio, 1994). Enjeksiyon kalıplama üretiminde hammadde besleme hunisinden geçerek kovan içerisine ulaştığında ergime işlemi başlar. Kovan içerisine ulaşan hammadde farklı sıcaklıklara sahip ısıtıcı bölgelere vidalı sistem yardımıyla iletilerek ergime sıcaklığına ulaştırılıp enjeksiyona hazır hale getirilir. Bu işlem sırasında hammaddenin enjeksiyon için gerekli sıcaklığa (eriyik sıcaklığına) ulaştırılması önemli bir üretim parametresidir (Tsai & Lu, 1998). Bu nedenle hammaddenin enjeksiyon işleminden hemen önce sahip olduğu sıcaklık değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kalıp sıcaklığı ise eriyik malzemenin kalıp içerisine ergime sıcaklığında girmesi sonrasında soğuma hızını etkileyen bir parametredir (Masse vd., 2004). Kalıp sıcaklığının doğru seçilmesi soğuma hızını doğrudan etkilemekte ve bu durum üretilen ürünün kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır (Kurt vd., 2009). Tang vd., (2006) tarafından soğuma hızının parça kalitesine etkisi incelenmiş ve kalıbın farklı bölgelerinde düzensiz soğuma etkisi nedeniyle kalıplanmış parçalarda çarpılmaların oluştuğu belirlenmiştir. Üretim sırasında önem arz eden diğer parametre ise zaman parametresidir. Enjeksiyon kalıplama süreci için zaman parametresi; enjeksiyon zamanı, ütüleme zamanı ve soğutma zamanı olarak incelenebilir. Enjeksiyon zamanı kalıba eriyik malzemenin dolmasıyla başlayan ve tutma basıncının uygulanmasıyla sona eren bir zaman aralığını kapsamaktadır (Kamber, 2008). Bu zaman aralığı enjeksiyon hızının belirlenmesine olanak sağlar. Soğuma zamanı, tutma basıncı uygulanmasından sonra kalıp boşluğunda bulunan eriyik malzemenin katılaşarak kalıptan çıkarılmaya hazır hale gelmesi için geçen süredir. Soğuma zamanı parametresi ise parça kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir (Chen vd., 2000). Enjeksiyon kalıplama süreci için hız parametresi; enjeksiyon hızı ve vida dönüş hızı gibi alt parametrelere ayrılarak incelenebilir. Enjeksiyon hızı, enjeksiyon sırasında vida sisteminin eksenel yöndeki ilerleyiş hızı olarak bilinmektedir (Rosata & Rosata 2012). Eriyik hammaddenin kalıp içerisinde hızla soğuması nedeniyle kalıp boşluğunun eriyik hammadde ile doldurulması için geçen süre enjeksiyon hızı ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle

enjeksiyon hızının doğru seçimi kalıp boşluğunun enjeksiyon basıncı altında dolmasını sağlamaktadır. Ayrıca düşük veya yüksek enjeksiyon hızları artık gerilmeler oluşturmaları nedeniyle parçaların mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır (Seow & Lam,1997; Beamount & Nagel, 2002).

Yukarıda bahsedilen her bir üretim parametresi enjeksiyon kalıplama ile üretilen ürünlerin mekanik davranışını ciddi bir biçimde etkilemekte ve hasar davranışını değiştirmektedir (Dar vd., 2016). Literatürde enjeksiyon kalıplama parametrelerinin kalıplanmış parçaların boyutsal kararlılık, mekanik özellik ve yüzey kalitesi gibi özelliklerine etkileri deneysel, sayısal ve en iyileştirme çalışmaları ile sıkça incelenmiştir (Kitayama, 2022; Porras vd., 2021; Zhou vd., 2021; Luna vd., 2021). Jansen vd., (2004), enjeksiyon kalıplama işlemi sırasında parçalardaki büzülme ve çökme gibi geometrik kusurlar üzerinde etkili olan enjeksiyon kalıplama üretim parametrelerini sistematik bir çalışma ile araştırmışlardır. Çalışmalarında PS, ABS, HIPS, PC, PBT, PBT-GF30 ve HDPE gibi çok sık kullanılan termoplastik malzemeleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda tutma basıncının tüm üretim seçeneklerinde her zaman kritik bir öneme sahip olduğunu buna karşın eriyik sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve kalıp sıcaklığının belirli bir eğilim olmadan daha küçük değişimler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Benzer bir çalışmada, karmaşık geometrili kalıplarda enjeksiyon ile üretilen parçaların kalitesine tutma basıncı ve kalıp sıcaklığı etkileri Kurt vd., (2009) tarafından değerlendirilmiştir. Kalıp içi sensörler ile tutma basıncı ve kalıp sıcaklığının izlendiği bu çalışmada sonucunda, yüksek boyutsal kararlılığın ve yüzey kalitesinin tutma basıncının artmasıyla elde edildiğini belirlemişlerdir. Özçelik, (2011) ise Taguchi yöntemi ile PP malzemede enjeksiyon kalıplama sırasında eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve tutma basıncının mekanik özelliklere ve darbe dayanımına etkisini incelemiştir. Üstün mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının yüksek tutma basıncı, eriyik sıcaklığı ve enjeksiyon basıncında elde edildiğini belirlemiştir. Yadav, (2021), Delrin malzemede tutma ve enjeksiyon basınçlarının mekanik özelliklere ve tribolojik performansa etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda aşınma direncinin, çekme ve basma dayanımlarının enjeksiyon basıncının artmasıyla belirli bir sınıra kadar arttığı daha sonra azaldığını belirlemişlerdir. Ancak inceledikleri tutma basıncı aralığında tutma basıncının artmasıyla ise sürekli artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Benzer bir çalışmada Jadhav vd., (2023), tutma basıncının kaynak çizgili ve kaynak çizgisiz cam elyaf katkılı PA6 malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kaynak çizgili ve çizgisiz numunelerde artan tutma basıncı ile elastisite modülünün ve kopma dayanımının arttığını belirlemişlerdir.

Literatürde enjeksiyon üretim parametrelerinin mekanik özellik ve yorulma davranışı üzerindeki etkilerinin birlikte incelendiği birkaç çalışma da talk tozu ve fiber katkılı termoplastik kompozit malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda örneğin, Zhou & Mallick, (2005) eriyik sıcaklığı ve tutma basıncı parametrelerinin enjeksiyon kalıplanmış talk tozu katkılı PP termoplastik kompozit malzemelerin yorulma dayanımı üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Deneysel testler sonucunda artan tutma basıncı ile yorulma dayanımının arttığını belirlemişlerdir. Benzer bir çalışma yine Zhou & Mallick, (2011) tarafından kısa cam fiber katkılı PA-6,6 (GF/PA-6,6) termoplastik kompozit malzeme için aynı parametre etkileri incelenerek gerçekleştirilmiştir. GF/PA-6,6 termoplastik kompozit malzeme için tutma basıncı ve eriyik sıcaklığının artmasıyla yorulma dayanımının iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde enjeksiyon üretim parametre etkilerinin malzeme yorulma davranışına etkisinin incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu ve bu çalışmalarda fiber ve parçacık katkılı kompozit termoplastiklerin yorulma davranışının incelendiği görülmektedir.

Eriyik harmanlama yöntemi açısından değerlendirildiğinde polimer harmanların oluşturulmasında temel işlev eriyik polimerlerin karışımının elde edildiği vida-kovan bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle hem ekstrüzyon hem de enjeksiyon kalıplama yöntemleri polimer harmanların elde edilmesinde eriyik harmanlama yönteminin kullanımına ticari ve seri üretim açısından uygun üretim yöntemleri olarak görülmektedir. Ekstrüzyon yöntemi ile hem filament hem de granül formda polimer harmanların eldesi mümkün iken enjeksiyon kalıplama yöntemi ile hem plaka veya karmaşık geometrilerde hem de test geometrisi (çekme, eğilme, darbe, basma vb.) şeklinde polimer harman ürünlerin eldesi mümkündür. Tez çalışması kapsamında hem ekstrüzyon ile filament üretimi gerçekleştirilmiş ABS/TPU hem de enjeksiyon kalıplama yöntemi ile plaka şeklinde üretilmiş PMMA/ABS polimer harman malzemeler kullanılmıştır.

1.3.2. Polimer Harmanların Sınıflandırılması

Polimer harmanlar, ikincil bağ kuvvetleri yoluyla birbiri ile etkileşim kuran ve aralarında kovalent bağ bulunmayan, yapısal olarak farklı polimerlerin fiziksel karışımlarıdır. Bileşen polimerlerdeki tekil birimleri arasındaki işlevsel grup etkileşimleri (hidrojen bağı veya dipolar etkileşim), kısmen polimer harmanlardaki entropik etkilerin üstesinden gelmeye yardımcı olur (Folkes & Hope, 1993; Pracella, 2017). Polimer

malzemelerin mekanik davranış, kimyasal dayanım gibi başarı kriterlerinde birbirini tetikleyen iyileşmelerin elde edilmesi amacıyla birçok ticari polimer harman ekstrüzyon yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir (Utracki, 2003; Zdrzilova vd., 2004).

Bu kapsamda incelendiğinde polimer harmanlar termodinamik özellikleri açısından tamamen karışabilen, kısmi olarak karışabilen ve karışamayan harmanlar olmak üzere üç temel kategoride sınıflandırılabilir (Mittal, 2012; Cowie & Arrighi, 2007; Utracki & Wilkie, 2014). Polimer harmanlardaki karışabilirlik durumu ve derecesi polimer harman ürünün mekanik, termal, reolojik vb. karakteristik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir (Barlow & Paul, 1981). Polimer harman yapılarda karışabilirlik tayini için ise ölçüm veya değerlendirme kriteri üzerindeki yorumlamalar temelde camsı geçiş sıcaklığı üzerinden gerçekleştirilmektedir (Manias & Utracki 2014). Polimer harmanlar tamamen karışabilir formda iken harmanı oluşturan saf polimer bileşenlerin camsı geçiş sıcaklıkları arasında olan tek bir camsı geçiş sıcaklığına sahipken karışamayan formdaki harmanlar ise harmanı oluşturan polimer malzemelere ait en az iki farklı camsı geçiş sıcaklığına sahip olmaktadır. Ancak ticari ve endüstriyel alanlarda tamamen karışabilen polimer harmanlar görmek neredeyse imkansızdır. Kısmi karışabilen harmanlar ise polimer harmanı oluşturan bileşenlerden birinin diğer bileşen içerisinde tamamen çözünmediği durumu ifade etmektedir. Bu durumda harman karışım morfolojisi karmaşık bir yapıdan uzak ancak tamamıyla homojen bir yapıda sergilememektedir. Ticari polimer harmanlarda kısmi karışabilen harmanlara PC/ABS önemli bir örnek olarak gösterilebilir. Karışamayan harmanlar ise birbiri içerisinde tamamen çözünmeyen iki polimer malzeme bileşimi ile oluşturulan polimer harman morfolojisi olarak tanımlanmaktadır. Bu tür harman morfolojisinde zayıf arayüzey etkileşimleri nedeniyle yapı içerisinde karışamayan ayrık fazlar görülmektedir. Polimer harmanlarda faz yapısı polimer harmanı oluşturan bileşenlerin oranlarına da bağlı olarak değişimler sergileyeceğinden yapının morfolojik tahmini ve değerlendirmesini yapmak kolay değildir (Han, 2007; Thomas vd., 2017).

Polimer harmanlarda karışabilirlik durumu ayrıca polimer fazlar arasındaki arayüzey gerilmeleri ile de ilişkilendirilmektedir. Burada faz içi dağılım ile arayüzey gerilmeleri ve faz etkileşimleri harman özelliklerini etkilemektedir. Yüksek arayüzey gerilmeleri harman yapılarda faz ayrılmalarına ve morfolojik farklılıklara yol açarak karışamayan harmanların oluşumunu tetiklemekte bunun bir sonucu olarak polimer harmanlardan istenmeyen fiziksel ve yapısal özellikler elde edilmektedir (Kuzmanović vd., 2016; Liu vd., 2013). Tamamen veya kısmen karışabilir formdaki polimer harmanlarda ise düşük arayüzey gerilmeleri

sayesinde harman yapıyı oluşturan fazlar arasındaki güçlü etkileşimler meydana gelmektedir. Bu sayede karışabilir formdaki polimer harmanlar üstün yapısal özelliklere ihtiyaç duyulan tasarımlara uygun malzeme ve mekanik özellik dengesinin sağlanmasında önemli bir alternatif olarak görülmektedir (Inberg & Gaymans, 2002; Torres-Huerta vd., 2014; Marin & Favis 2002; Zhao vd., 2011). Diğer bir deyişle karışamayan formdaki morfoloji heterojen bir yapıya sahipken karışabilir formdaki morfoloji nispeten homojen bir yapıya sahip olmaktadır (Parameswaranpillai vd., 2014). Tamamen karışabilen ve kısmi karışabilen formdaki polimer harmanlar dağınık küçük fazlar (damla-damlacık) veya eş-sürekli faz morfolojisi ile karakterize edilebilmektedir (Nofar vd., 2019). Burada harmanı oluşturan polimerler arasında düşük bileşim oranına sahip malzeme bileşim oranı yüksek olan (matris yapı) faz içerisinde genellikle damla-damlacık veya deniz morfolojisi ile dağılmaktadır. Damlacık şeklinde morfolojik dağılım polimer harmanlarda düşük arayüzey gerilmeleri oluşturmaları nedeniyle mekanik özelliklerin önemli ölçüde geliştirilebilmesine imkân tanıdığı belirtilmiştir (Thomas vd., 2014). Bu yapılarda harman içerisindeki düşük bileşim oranının artmasıyla dağınık olan faz bölgelerinin giderek büyüdüğü ve harman içerisinde eş sürekli bir harman morfolojisi oluşumunun meydana geldiği gözlemlenmiştir. Burada morfolojik yapı harmanı oluşturan bileşenlerin oranı, harman bileşenlerin fiziksel ve termal özellikleri, harman üretimindeki sıcaklık ve basınca bağlı olarak farklılıklar göstermektedir (Kim vd.,1996; Rauwendaal, 2014).

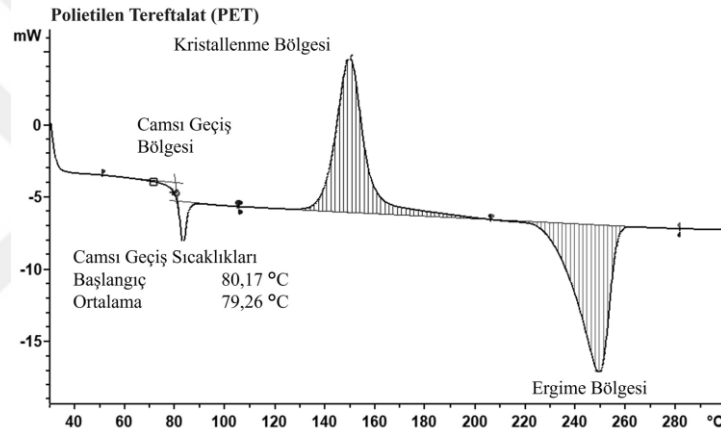
Yukarıda bahsedildiği gibi tamamen karışabilen ve kısmi olarak karışabilen polimer harmanlarda harmanı oluşturan polimer malzemelerin bileşim oranına bağlı olarak ortalama bir fiziksel, kimyasal, termal ve mekanik davranışın elde edilmesi beklenmektedir. Ancak karışamayan yapıdaki harmanlarda ise heterojen morfolojik yapı, fazlar arası düşük etkileşim ve termal kararlılık nedeniyle harmandan beklenen bu özellikler bileşenlerden elde edilen özelliklerin gerisinde kalabilmektedir. Burada tamamen veya kısmen karışamayan polimer harmanlarda yarı kristal ve amorf yapıdaki termoplastik polimerlerin harmanlanması ile harman malzeme mekanik özelliklerinde bütüncül etkileşim ile iyileşmeler elde edilebildiği görülmüştür (Utracki & Wilkie, 2014). ABS, PS, PC gibi amorf ve PA, PBT PP gibi kristal yapıda polimerler ile tasarım amacına uygun olarak elde edilmek istenilen üstün mekanik özelliklere sahip polimer harmanlar oluşturulması amacıyla son yıllarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Koning vd., 1998; Kausar, 2018; Díaz vd., 2007; Shabbir vd., 2013).

1.3.3. Polimer Harmanların Karakterizasyonu

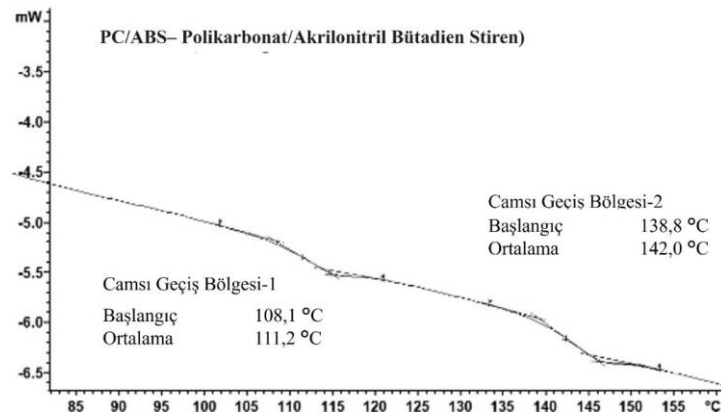
Polimer malzemelerde ve en az iki veya daha fazla polimerin bir araya gelmesi ile oluşturulan termoplastik polimer harmanlarda, polimerin ve harman yapının termal, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen karakterizasyon analizleri hakkında temel bilgiler bu başlık altında sunulacaktır. Saf ve harman yapıdaki polimerlerin termal karakterizasyonu yapının kritik sıcaklık değerleri ve termal davranışı hakkında bilgiler vermektedir. Buna ek olarak, polimer ve polimer harmanlarda malzemenin sıcaklık veya frekansla birlikte viskoelastik malzeme özellikleri de hem kritik sıcaklık değerlerinin hem de malzeme davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Kimyasal yapı analizleri ise polimer ve polimer harmanlarda zincir yapılar aracılığıyla var olan veya değişimler gösteren tepe noktalar ve bağ yapılar hakkında bilgiler vermektedir. Bu kapsamda bu bölümde karakterizasyon analizleri hakkındaki temel bilgiler ayrı ayrı ele alınarak detaylandırılacaktır.

Polimer ve polimer harmanların termal özellikleri DTA (Differential Thermal Analysis) ve DSC (Differential Scanning Calorimetry) gibi analiz teknikleri ile belirlenmektedir. Bu analiz yöntemleri ile genellikle malzemenin termal tepkileri ve yapıdaki kimyasal ve fiziksel değişimlerin termal özelliklere etkilerini, polimer veya polimer harman malzemedan alınan numunenin termal geçiş bölgeleri boyunca belirli bir program dahilinde ısıtılması veya soğutulması süreci ile belirlenmektedir. DSC yönteminde numuneye belirli bir atmosfer altında (nitrojen gibi) ısıtma veya soğutma işlemi uygulanmakta ve numuneye giden ısı akısı zamana veya sıcaklığa göre izlenmektedir. Burada numune ve referans arasındaki sıcaklık farkı, toplam ısı kapasite farkı ve ısıtma/soğutma hızına bağlı olarak elde edilmektedir. Böylece, polimer ve polimer harmanlar için camsı geçiş sıcaklıkları, kristalleşme sıcaklığı, ergime noktası ve termal bozunum sıcaklıkları gibi geçiş bölgelerine ait sıcaklık değerleri elde edilebilmektedir. DSC analizi sonucunda elde edilen örnek ısı akısı-sıcaklık eğrileri hem saf bir polimer hem de polimer harman üzerinden, eğri üzerindeki kritik geçiş bölgelerine ait gösterimleri içerecek biçimde Şekil 1.8’de verilmiştir (URL-2, 2024). Şekilden görüldüğü gibi DSC analizleri ile saf polimer ve polimer harman malzemelerin karakterizasyonunda önemli bir nokta olan camsı geçiş sıcaklığı ve kritik geçiş sıcaklıkları belirlenebilmektedir. Camsı geçiş bölgesi malzeme davranışında sünek gevrek geçiş bölgesi olarak da tanımlanmakta ve bu bölge ısı akısı-sıcaklık eğrisinde adım şeklinde bir artış ile belirgin hale gelmektedir. Adım artışı

görülen bölgedeki eğrinin eğimlerinin kesişim noktası camsı geçiş sıcaklığının başlangıcını vermekte ve bu nokta farklı yaklaşımlarda $T_{g,başlangıç}$ olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte eğrinin bu sıcaklık aralığında birinci ve ikinci türevlerinin uç noktaları ise sırasıyla camsı geçiş sıcaklığının başlangıç ve bitiş noktaları ile ortalaması olan $T_{g,ortalama}$ sıcaklık değerlerini vermektedir. Ayrıca Şekil 1.8b'den görüldüğü gibi, PC/ABS gibi polimer harman yapılı malzemelerde harman yapıyı oluşturan polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları ayrı ayrı adım şeklinde artış bölgeleri gösterebilmekte ve bu durumda harman yapı birden fazla camsı geçiş sıcaklığına sahip olmaktadır. Bu durum harman yapının karışabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Tez kapsamındaki çalışmalarda harman malzemeler için elde edilen DSC eğrileri bu kısımda belirtilen yöntem dahilinde irdelenmiştir.



a)



b)

Şekil 1.8. DSC eğrileri ve bu eğrilerdeki kritik geçiş bölgelerinin gösterimlerine ait örnekler a) PET ve b) PC/ABS polimer harman (URL-2, 2024)

Polimer ve polimer harman malzemelerde diğer bir karakterizasyon ise malzemenin viskoelastik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu özellikler DMA (Dynamic Mechanical Analysis) veya DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) olarak bilinen analiz yöntemi ile belirlenmektedir. DMA yöntemi ile DSC analizinin aksine ısı akısındaki değişim değil, polimerlerin moleküler hareketliliği ölçülmektedir. Bu ölçüm, malzeme üzerine uygulanan sinüs dalgası şeklinde küçük gerilmelerin ve bu gerilmeler sonucu oluşan birim şekil değişiminin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Böylece, test numunesi belirli bir gerilme uygulanarak birim şekil değiştirmeye maruz bırakılmış olur ve elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme yanıtları zaman, sıcaklık veya yükleme frekansına bağlı olarak kayıt altına alınır. DMA yöntemi uygulanan polimer malzemede elde edilen zamana bağlı sinüs formundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şematik gösterimi Şekil 1.9a'da verilmiştir. Burada bilinmesi gereken kritik nokta, tamamen elastik bir malzemede uygulanan gerilme ile elde edilen birim şekil değişimi aynı fazda iken tamamen viskoz bir malzemede ise birim şekil değişimi gerilmenin 90° gerisinde faz farkı ile kaldığıdır. Aynı zamanda polimer malzemelerde DMA analizlerinin gerçekleştirildiği sıcaklığa bağlı olarak viskoelastik davranışı farklı mertebelerde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, polimerik malzemelerde viskoelastik davranış faz içi bileşen olan depolama modülü (storage modulus) ve faz dışı bileşen olan kayıp modülü (loss modulus) tarafından temsil edilmektedir. Depolama modülü (E') malzemenin elastik tepkisini bir ölçüsü olarak temsil edilmektedir ve depolanan enerjiyi ifade eder. Kayıp modülü (E'') ise malzemenin viskoz tepkisinin bir ölçüsüdür ve malzemedeki moleküler hareketliliği göstermektedir. Depolama modülündeki sıcaklığa bağlı azalış, eriyik malzemedeki elastik dayanımının azaldığını ifade ederken, artan kayıp modülü ise, katı benzeri bir davranışını gösteren azalmış moleküler zincir hareketliliğini ifade etmektedir. Şekil 1.9a'da birim şekil değiştirme bölgesindeki eğrilerde faz içi ve faz dışı bileşenleri temsil eden gerilme tepkileri görülmektedir. Ayrıca Şekil 1.9'da verilen eğrilerde belirtilen faz içi, faz dışı gerilmeler ve birim şekil değiştirmeyi ifade eden büyüklükler ile aşağıda verilen matematiksel ilişki yardımıyla depolama ve kayıp modülleri belirlenebilmektedir.

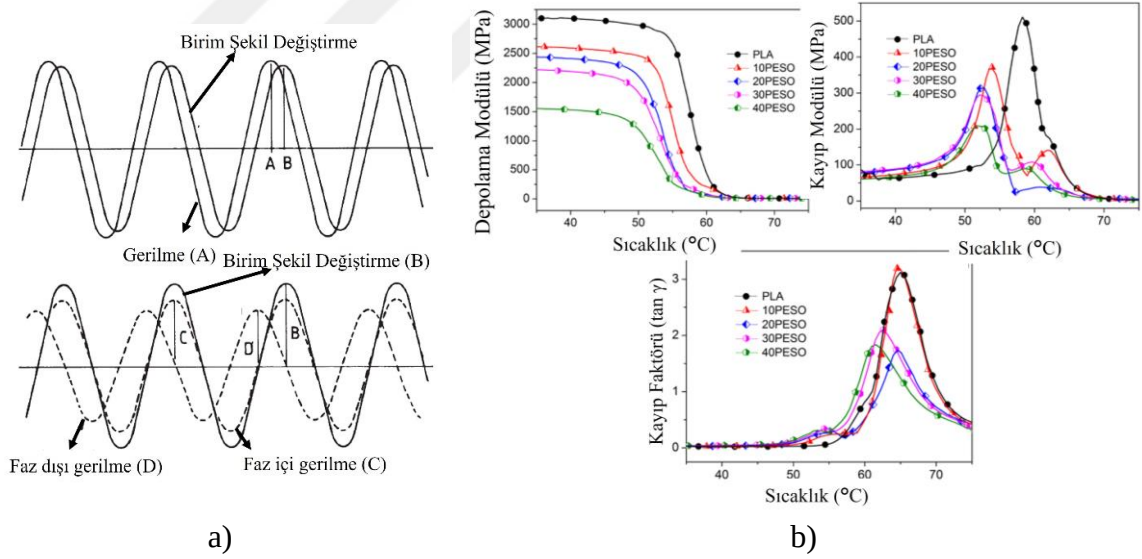
$$\text{Depolama Modülü} = \frac{\text{Faz içi gerilme genliği}}{\text{Birim şekil değiştirme genliği}} = \frac{C}{B} \quad (1)$$

$$\text{Kayıp Modülü} = \frac{\text{Faz dışı gerilme genliği}}{\text{Birim şekil değiştirme genliği}} = \frac{D}{B} \quad (2)$$

Kayıp ve depolama modüllerinin birbirine oranı olan ve faz içi/faz dışı gerilme bileşenlerinin arasındaki faz açısını ifade eden kayıp faktörü ($\tan \gamma$) ise DMA analizleri sonucunda boyutsuz parametre olarak elde edilmektedir. Kayıp faktörü sönümleme derecesi olarak da adlandırılmaktadır ve malzemedeki enerji yayılımının bir ölçüsüdür. Modüller arası faz farkını da ifade eden kayıp faktöründe, faz farkı 0° 'ye yaklaştıkça malzeme davranışı tamamen elastik bir davranışa yaklaşırken faz farkı 90° 'ye yaklaştıkça malzeme davranışı tamamen viskoz bir davranışa yaklaşmaktadır. Kayıp faktörünün sıcaklık veya yükleme frekansına bağlı olarak artış göstermesi malzemenin daha fazla enerji sönümleme kapasitesine ulaşması anlamına gelmektedir. Buna karşın kayıp faktörün azalması ise malzemenin daha elastik davranış sergilemesi ile enerjiyi depolama kapasitesinin artması anlamına gelmektedir. Modüller ve modüllere bağlı olarak elde edilen kayıp faktörü hem sıcaklık değişimine hem de yükleme frekansına bağlı olarak elde edilebilmektedir. Buradan, kritik sıcaklık değerleri veya kritik yükleme frekansı değeri kayıp ve depolama modülleri üzerindeki değişimler yardımıyla incelenebilmektedir. Kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı olarak değişimindeki tepe nokta camsı geçiş sıcaklığının (T_g) belirlenmesinde DSC analizlerine alternatif diğer bir yöntem olarak bilinmektedir. Şekil 1.9b-c'de sıcaklık ve frekansa bağlı olarak PLA/ESO harman için elde edilmiş modüllerin değişimleri verilmiştir (Liu vd., 2018). Şekilden görüldüğü gibi, harman yapıyı oluşturan bileşim oranı, sıcaklık ve yükleme frekansına bağlı olarak malzemenin viskoelastik davranışındaki değişimler depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü gibi bileşenler üzerinden değerlendirilebilmektedir. Böylece malzemenin reolojik davranışı polimer harman malzemelerde hem harman yapıyı oluşturan polimer bileşenlerin bileşim oranı hem de sıcaklık ve yükleme frekansı üzerinden incelenebilmektedir. Örneğin, sıcaklığa bağlı elde edilen modüller incelendiğinde (Şekil 1.9b), harman yapı içerisinde artan ESO bileşen oranı ile depolama ve kayıp modüllerinin azaldığı bununla birlikte kayıp faktörü tepe noktasının görüldüğü sıcaklık değerinin de azaldığı görülmektedir. Bu durum malzemenin elastik ve viskoz tepkilerinin harman yapıda artan ESO bileşim oranı ile azaldığını ve kayıp faktörü tepe noktasının görüldüğü sıcaklık değerinin azalmasıyla camsı geçiş sıcaklığının da azaldığını ortaya koymaktadır. Benzer yorumlamalar ve incelemeler yükleme frekansı dikkate alınarak karakterizasyon amaçlı değerlendirilebilmektedir.

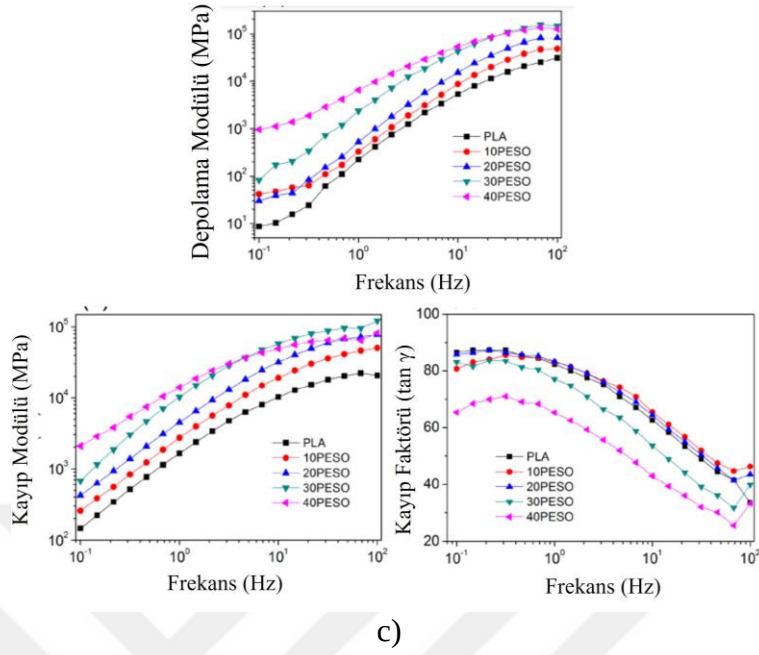
Polimer ve polimer harmanların karakterizasyonunda kullanılan bir diğer yöntem de TGA (Thermogravimetric Analysis) yöntemidir. Bu yöntem polimer ve polimer harmanlar

üzerine yapılan araştırmalarda, özellikle uygulama koşulları altında polimer malzemelerin termal kararlılığını incelemek için sık kullanılan bir yöntemdir (Visakh vd., 2017). Analiz sırasında numune belirli bir atmosfer altında program dahilinde bir sıcaklığa maruz bırakılmakta ve numunede meydana gelen kütle değişimi zaman veya sıcaklığa bağlı olarak kayıt altına alınmaktadır. Böylece kütle kaybının zaman veya sıcaklığa bağlı değişimi belirlenmekte ve numunenin termal kararlılığı hakkında bilgiler bu analiz ile irdelenebilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, polimer harman sistemlerde TGA analizleri ile harman bileşim oranına bağlı olarak kütle kaybı-sıcaklık eğrileri üzerinden termal kararlılık irdelenmesi gerçekleştirilmektedir. Jakic vd., (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PVC/PEO harmanlarda harman bileşim oranı ile termal kararlılığın büyük oranda değişimler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde birçok polimer ve polimer harman malzemeler ve ek olarak toz, fiber, uyumlaştırıcı gibi katkı polimer sistemlerde de malzemenin termal kararlılık davranışlarının incelenmesinde TGA analizlerinin literatürde çok sık kullanılmaktadır (La Mantia vd., 2017).



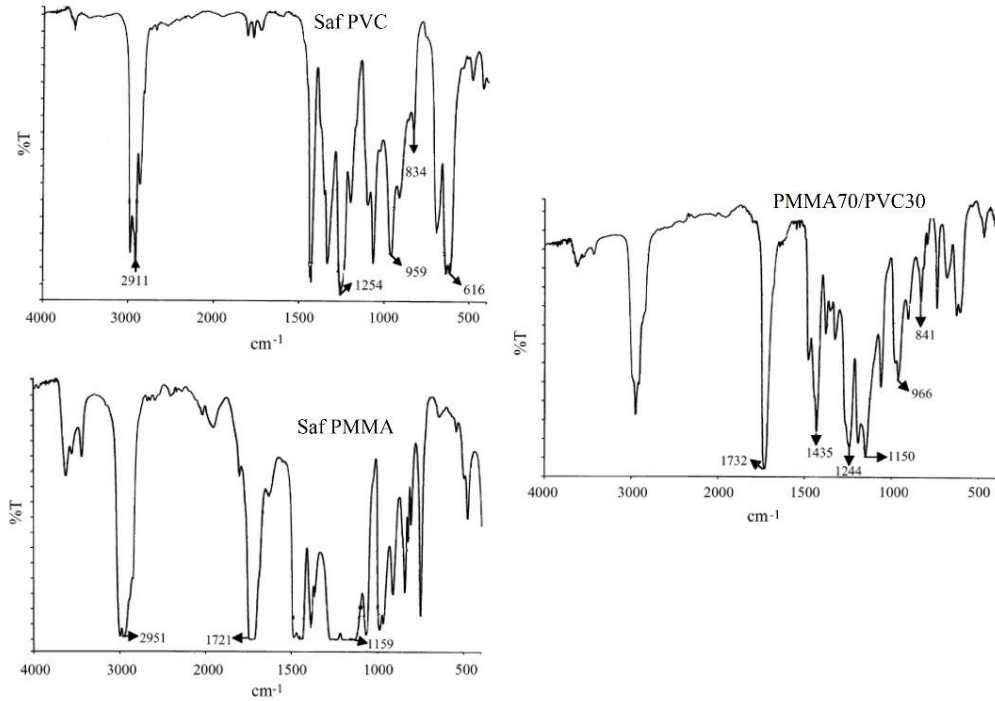
Şekil 1.9. a) DMA analizinde uygulanan gerilme ve birim şekil değiştirme yüklemesinin şematik gösterimi, PLA/ESO polimer harmanı için DMA analizi ile elde edilen kayıp ve depolama modülleri ile kayıp faktörünün b) sıcaklık ve c) yükleme frekansına bağlı değişimi (Liu vd., 2018)

Şekil 1.9'un devamı



Polimer malzemelerde FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) malzeme içindeki kimyasal yapının, var olan bağların ve bu bağların şiddetlerinin incelenmesinde aynı zamanda polimer harman ve polimer kompozit gibi sistemlerde tepe noktası şiddetlerindeki değişimlerin ve kaymaların irdelenmesinde kullanılan bir analizdir (Thomas vd., 2014). FTIR ile kızılötesi ışığın yoğunluğuna karşı dalga numaraları belirlenmektedir. Analiz sırasında numune üzerine gönderilen kızılötesi ışınları moleküler titreşim hareketi ile sönümlenmekte ve sönümlenmenin gerçekleştiği dalga numarası ile bu ışınların sönümlenme derecesi belirlenmektedir. Böylece, FTIR analizi moleküler bağ karakterizasyonu yapılmasına; malzemenin yapısındaki fonksiyonel grupları, yapıdaki bağların durumunu, bağlanma bölgelerini ve yapının aromatik ya da alifatik olup olmadığı irdelenmesine olanak tanımaktadır. Polimer malzemede tipik olarak orta kızılötesi bölgede kızılötesi dalga emdiğinde, ortaya çıkan spektrum (absorbans veya geçirgenlik), birçok farklı uygulamada kullanılan polimerlerin kolayca tanımlanması için kullanılabilecek ayırt edici bir "parmak izi" niteliğinde dağılımı vermektedir. Böylece FTIR yöntemi polimer ve polimer harman ile polimer kompozit malzemelerde dalga sayısı ve dalga sayısındaki tepe noktası şiddetleri içerisindeki dağılım ve şiddetler üzerinden malzeme bileşiminin belirlenmesi ve irdelenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Kim vd., 2014). Örneğin, Ramesh vd., (2007), PMMA/PVC harman malzemedeki kimyasal yapının ortaya koyulmasında FTIR analiz yönteminden faydalanmıştır. Çalışmalarında saf PMMA, saf PVC ve PMMA/PVC harman

yapıdaki spektrumları elde etmiş ve harman yapının durumunu irdelemişlerdir. Şekil 1.10'da Ramesh vd., (2007) tarafından çalışmalarında elde edilen FTIR spektrumları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi harman malzemedede elde edilen spektrum hem PMMA hem de PVC malzemenin barındırdığı karakteristik dalga numaralarında kaymalar meydana gelmiş şekilde elde edilmiştir. Örneğin, PMMA'da görülen karakteristik 1721, 1449 ve 1159 cm^{-1} dalga sayıları 1732, 1435 ve 1150 cm^{-1} , dalga sayılarına kaymalar göstermiştir. Benzer şekilde PVC'de görülen karakteristik 1254, 959 ve 834 cm^{-1} dalga sayıları PMMA/PVC (70:30) harmanda sırasıyla 1244, 966, 841 cm^{-1} dalga sayılarına kaymalar göstermiştir (Ramesh vd., 2007).

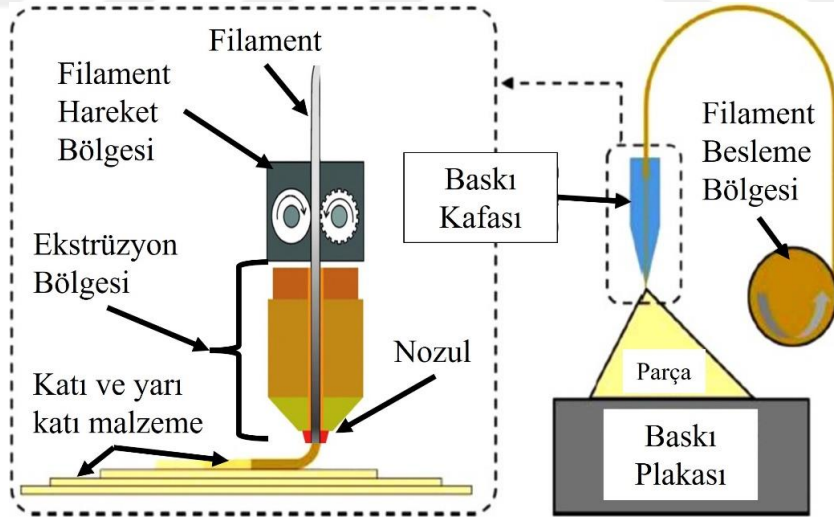


Şekil 1.10. Saf PMMA, saf PVC ve PMMA/PVC harman yapıda görülen FTIR spektrumları (Ramesh vd., 2007)

1.4. Eklemeli İmalat ve Eriyik Yığma Yöntemi

Endüstriyel alanlarda ve mühendislik uygulamalarında test numuneleri üretiminden karmaşık geometrilili ve özel uygulama alanına sahip ürünlerin üretimine kadar geniş bir alanda parça üretiminde sıkça kullanılan yöntemlerin başında eklemeli imalat (Additive Manufacturing) gelmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi temelde üretilmesi istenilen parçanın katmanlar halinde üretilmesi prensibine dayanan bir üretim teknolojisidir

(Bandyopadhyaya vd., 2015). Eklemeli imalat teknolojisinin karmaşık geometrili ürünlerin üretimi ve tasarım seçeneklerinin iyileştirilmesi, ürün geliştirme süreçlerinde hızlı ve yerinde örnek üretimlerin gerçekleştirilmesi uygulamaya dönük pozitif katkıları bulunmaktadır. Ayrıca bu teknoloji ile geleneksel üretim teknolojilerine kıyasla kalıp ihtiyacının ortadan kalkması önemli bir avantaj olarak görülmektedir. Ancak düşük yüzey kalitesi nedeniyle son işlem gerektirmesi ve diğer üretim yöntemleri ile üretilen parçalara kıyasla nispeten düşük mekanik özellikler sergilemesi ise dezavantajı olarak görülmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi ile metal, polimer ve kompozitler gibi geniş bir yelpazede malzemeler kullanılabilir ve bu teknoloji alt birçok yöntemden oluşmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan yöntemler temelde fotopolimerizasyon ve ekstrüzyon temelli yöntemler olarak iki ana kategoride incelenmektedir. Bu kısımda tez kapsamında kullanılması nedeniyle, eklemeli imalat teknolojisini oluşturan yöntemlerden ekstrüzyon temelli yöntem olan eriyik yığmaya ait temel prensip ve bilgilere odaklanılmıştır. Eriyik yığma üretim yöntemi (Fused Filament Fabrication), basit bir yapıda ve mantıkta olup evlerde, ofislerde ve endüstriyel alanlarda üç boyutlu yazıcılar kullanarak model ve kullanıma dönük ürün üretiminde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.



Şekil 1.11. Eriyik yığma yöntemi ile parça üretimine ait sürecin şematik gösterim

Eriyik yığma yönteminde üç boyutlu yazıcı baskı kafası, yazdırma plakası, ekstrüder bölgesi, filament besleme bölgesi ve ısıtıcılar olmak üzere temelde 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Bahsedilen bu kısımlar ve eriyik yığma yöntemi ile üretim sürecine ait şematik gösterim Şekil 1.11’de verilmiştir. Bu yöntemde üretim baskı kafasına bütünleşmiş

veya bütünleşmemiş olarak bulunabilen ekstrüder bölgesine filamentin beslenmesi ile başlamaktadır. Böylece eriyik yığma yöntemi ile üretimin temel prensipleri şu şekilde açıklanabilir. Filament ekstrüdere adım motor kontrollü hareketli dişli veya makaralar aracılığıyla beslenir. Bu hareket filament malzemeyi ergime sıcaklığına ulaştıracak sıcaklığa sahip ekstrüder ucunda doğru devam eder. Ekstrüder içerisinde ergiyen termoplastik malzeme nozul aracılığıyla yazdırma plakası üzerine yönlendirilir. Nozulun bütünleşik halde bulunduğu baskı kafası yazdırılması istenilen şekil ve geometrik özelliklere göre kontrol sistemi tarafından yönlendirilerek istenilen ürünün katman katman üretimi sağlanmaktadır. Baskı kafasının istenilen geometriye göre hareketi ise üretim öncesi katı modeli ve bu modelden oluşturulan .stl dosyasının dilimlenmesini sağlayan yazılım süreci ile başlamaktadır. Böylece baskı kafasının hareketini tamamlayacağı düzlemde tüm koordinatlar belirlenmiş ve üretim için hazırlanmış olmaktadır. Eriyik yığma yöntemi ile geleneksel ve mühendislik polimerlerinin yanı sıra toz, fiber, seramik, bağlayıcı, doğal bozulabilir ve karbon katkılı filamentlerin de üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında ise ABS/TPU harman filamentler kullanılarak eriyik yığma yöntemi ile test numuneleri üretilmiştir.

1.5. Polimer Yorulması

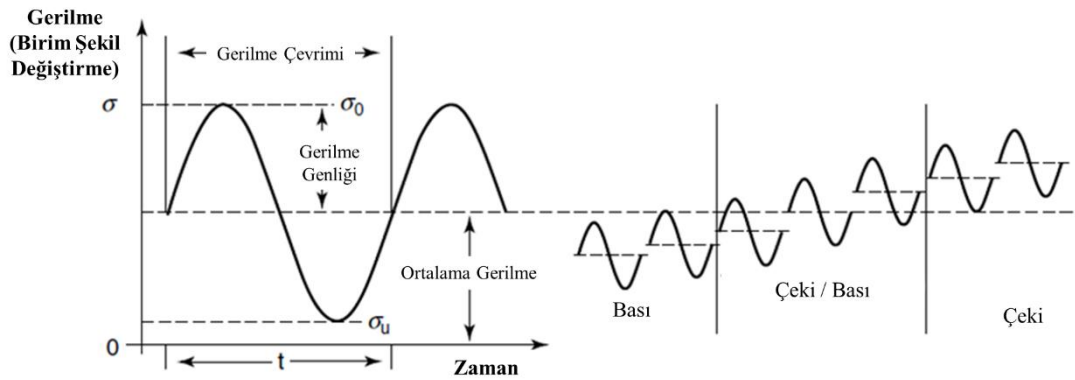
Termoplastik polimer malzemeler, birçok mühendislik uygulamasında geleneksel mühendislik malzemeleri yerine kullanımları giderek artan bir eğilim gösterdiği önceki bölümlerde şekiller ve sayısal veriler ile açıklanmıştır. Termoplastik malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki kullanım oranının artması termoplastik polimerlerden beklenen başarı kriterlerinin çeşitlenmesi ve daha da önem kazanmasına neden olmaktadır. Termoplastik polimer için bu açıdan düşünüldüğünde yorulma ömrü performansı veya yorulma davranışı kullanımları sırasında tek ve/veya çok eksenli döngüsel gerilmeler altında çalışması nedeniyle önem kazanmıştır. Bu kısımda genel olarak yorulma, polimer malzemelerde meydana gelen yorulma davranışı ve yorulma davranışının belirlenmesinde uygulanan temel test ilkeleri hakkında terminolojik bilgiler sunulacaktır.

Yorulma, akma dayanımının altındaki gerilme değerlerinde malzemelerin ömrünü önemli şekilde azaltan döngüsel deformasyon davranışı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle termoplastik malzemenin tekrarlı yüklemeler (titreşim, yer değiştirme veya kuvvet etkisinde) altında sergileyeceği yorulma ömrü bu ürünlerin kullanılacağı uygulamalar için

önemli bir başarı kriteri olarak düşünülmektedir. Tasarım aşamasında uygulamaya bağlı olarak başarı kriterleri olarak akma dayanımı, tokluk, darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerin dengeli olarak elde edildiği seçeneklerde önemli bir diğer kriter de yorulma ömrü davranışdır. Uzun yıllardır mühendislik malzemelerinin yorulma hasarı nedeniyle ciddi maddi kayıpların meydana geldiği bilinmektedir (Ritchie, 1999; Beesley vd., 2017). Yorulma hasarının termoplastik ürünlerin mühendislik uygulamalarındaki kullanımı ve tasarımında önemli bir kriter olması nedeniyle termoplastik ürünlerin yorulma özelliklerinin incelenmesi literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda da önemli bir araştırma alanı olmuştur. Bu çalışmalarda saf, toz ve fiber katkılı ve harman yapılı polimerlerin yorulma davranışlarının değişken yükleme frekanslarında, ortalama gerilme, test sıcaklığı ve üretim yöntemi gibi parametreler ile incelemiştirler (Mortazavian vd., 2015; Shrestha vd., 2017).

Bir malzemenin yorulma nedeniyle hasara uğraması genellikle iki aşamalı bir hasar ilerleyişi ile gerçekleşmektedir. İlk aşama, malzemenin iç yapısındaki düzensizliklerden veya kusurlardan mikro çatlakların veya diğer hasarların başlaması olarak düşünülebilir. Bu hasar mekanizması, malzemenin akma veya çekme dayanımının çok altındaki gerilme seviyelerindeki uygulamalarda başlayıp ilerleyebilmektedir. Bu aşama genellikle başlangıç aşaması olarak bilinmektedir. İkinci aşama ise, mikro çatlakların birleşmesi ve bu küçük çatlakların birleşerek veya büyüyerek büyük çatlaklar oluşturması ve nihai olarak malzemenin hasara uğramasına neden olan hasarın büyümesi aşamalarını içerir. Yorulma hasarı sürecindeki bu adım yayılma aşaması olarak tanımlanmaktadır. Çoğu polimerik malzeme için başlangıç aşaması, yayılma aşamasından çok daha uzun sürebilmektedir. Yorulma hasarlarının ortak yönü, bunların uygulanan döngüsel yükleme uygulamalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmasıdır. Genel olarak herhangi bir numune geometrisine herhangi bir döngüsel yükleme koşulu uygulanabilir. Bununla birlikte, mekanik yükleme etkisiyle meydana gelen yorulma davranışının belirlenmesinde en yaygın yükleme koşulları, tek eksenli (gerilme ve/veya birim şekil değiştirme) veya eğilme yükleme koşullarını içerir. Yorulma ömrünün veya yorulma davranışının belirlenmesinde gerekli olan mekanik özelliklerin veya başarı kriterlerinin belirlenmesi için çeşitli test süreçleri geliştirilmiştir. Örneğin termoplastik polimer malzemelerin yorulma davranışının belirlenmesinde sıkça kullanılan ve bu amaçla geliştirilen test süreci ASTM D7791 Plastiklerin Tek Eksenli Yorulma Özellikleri için Standart Test Yöntemi (Standard Test Method for Uniaxial Fatigue Properties of Plastics) olarak geliştirilmiştir (ASTM, 2017). Bu test standardında, döngüsel yüklemeye veya yorulma davranışının belirlenmesinde genel olarak gerilme genliği,

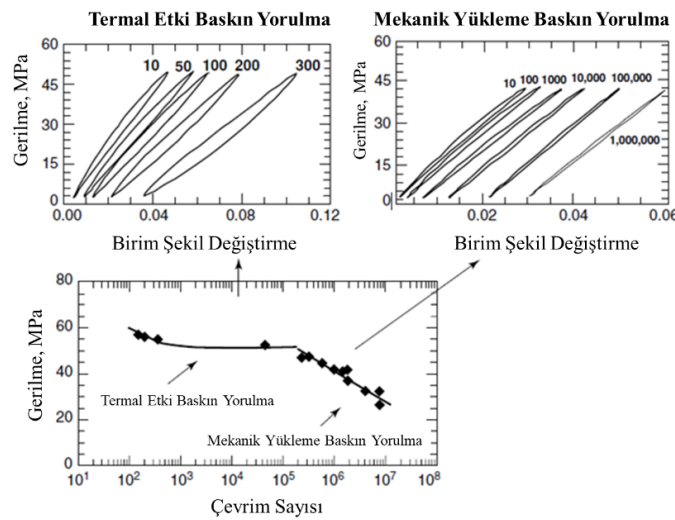
ortalama gerilme ve yükleme frekansı gibi dikkate alınması gereken tüm parametrelere sahip sinüs, üçgen veya kare dalga formlarında yüklemeler gerçekleştirilebilmektedir. Bu parametrelerden bazıları ve yorulma yüklemesine ait genel döngüsel yükleme hali şematik olarak Şekil 1.12'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi döngüsel gerilme veya birim şekil değişimine maruz bırakılan numune belirli bir ortalama gerilme altında salınım hareketleriyle yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu yükleme durumunda ortaya çıkan maksimum gerilme σ_u ve minimum gerilme σ_l olarak tanımlanırsa R ise minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı olarak belirlenmekte ve yorulma yüklemesi için gerilme oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran yüklemenin türünü ifade etmekte ve Şekil 1.9'da görüldüğü gibi çeki, çeki/bası veya bası gibi farklı türde yüklemelerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Burada bahsedilmesi gereken bir diğer nokta da geliştirilen süreçte uzun yıllar önce Wöhler tarafından literatüre sunulan ve çentikli veya çentiksiz bir numunenin döngüsel bir gerilme (σ) haline tabi tutulduğu ve hasara neden olacak yükleme çevrimi sayısının (N) kaydedildiği bir süreç yaklaşımı kullanılarak yorulma ömrü belirlendiği çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde farklı gerilme genliği değerlerinde tekrarlanan testler ve elde edilen sonuçlar σ -N eğrisi şeklinde incelenmektedir.



Şekil 1.12. Yorulma davranışının belirlenmesinde uygulanan test prosedürüne ait önemli parametreleri

Termoplastik polimerlerin yorulma ömrünün belirlenmesinde yorulma hasarının ilerleyişi ve hasar mekanizması da önemli bir rol oynamaktadır. Polimerlerin yorulma hasarı için temelde mekanik yüklemenin baskın olduğu ve termal etkilerin baskın olduğu iki temel mekanizmadan bahsedilmektedir. Mekanik yükleme etkisinin baskın olduğu hasar mekanizmasında yorulma hasarı çatlak başlangıcı, büyümesi ve ilerlemesiyle meydana gelmektedir. Bu mekanizma genellikle düşük gerilme ve düşük yükleme frekanslarında

görülmektedir. Ancak daha yüksek gerilme ve yükleme frekanslarında ise polimer malzemede meydana gelen histerik ısınma veya yükleme ile kendi kendine ısınma nedeniyle malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri bu ısınmadan etkilenmektedir. Test sırasında malzemede ortaya çıkan bu durum nedeniyle yorulma hasarı daha erken meydana gelmekte ve hasar genellikle düşük çevrimli yorulma hasarı olarak tanımlanmaktadır. Lesser, (1995) her iki yorulma hasar mekanizmasının incelenmesi amacıyla Poliasetal polimer ile farklı gerilme ve yükleme frekanslarında yorulma testlerini içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen Wöhler eğrileri ve histerezis davranışları Şekil 1.13'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yorulma testleri sırasında hasar mekanizmasının termal veya mekanik yükleme baskın olup olmadığı histerezis eğrileri üzerinden belirlenebilmektedir. Yüksek gerilme veya yükleme frekansı sonucunda ortaya çıkan düşük çevrimli davranışta histerezis eğrileri döngüsel çevrim sayısı arttıkça büyüyen bir davranış gösterdiğini belirlemiştir. Buna karşın yüksek çevrimli davranışta ise histerezis eğrilerinin çevrim sayısı arttıkça giderek daralan bir davranış sergilediği ve malzemenin viskoelastik davranışının arttığını gözlemlemiştir. Buradan hareketle düşük ve yüksek çevrimli davranışları oluşturan mekanik yükleme baskın ve termal etkilerin baskın olduğu hasar ilerleyişlerinin görülmesine rağmen doğru yorulma davranışının elde edilmesinde mekanik baskın karakterin elde edilmesi gerektiği belirtilmelidir. Bu amaçla ASTM D7791 test standardında yorulma testi sırasında yükleme frekansının numune yüzeyinde sıcaklık artışına yol açmaması amacıyla 5 Hz'i geçmemesi önerilmektedir.



Şekil 1.13. Poliasetal malzeme için elde edilen düşük ve yüksek gerilme genliği yüklemelerindeki yorulma davranışını ifade eden histerezis ve Wöhler eğrileri (Lesser, 1995)

1.6. Literatür Araştırması

Polimer harmanlar, çeşitlilikleri ve geniş kullanım alanlarına sahip olmalarının yanı sıra karmaşık termomekanik ve mekanik davranışı nedeniyle pek çok bilim insanı tarafından üzerine araştırmalar yapılan bir konu olmuştur. Bu nedenle polimer harmanların termal, kimyasal, reolojik ve morfolojik özelliklerinin yanında mekanik davranışlarını incelemeye yönelik literatürde deneysel, sayısal ve teorik çalışmalardan meydana gelen geniş bir bilimsel altyapı bulunmaktadır. Polimer harmanların sınıflandırılmaları, kullanım alanları, ticari polimer harman yapıları, fiziksel özellikleri ve mekanik davranışlarına yönelik çalışmaları Utracki, (2003) ve ilerleyen yıllarda Wilkie, (2014) tarafından bir araya getirilerek önemli bir kaynak kitap oluşturulmuştur. Bu bölümde gerçekleştirilen literatür araştırması ise temelde odaklanılan mühendislik polimerleri ve bu polimerlerin harmanları ile mekanik davranışları hakkında son yıllarda gerçekleştirilen çalışmaları kapsamaktadır.

1.6.1. ABS Harmanlar

ABS sahip olduğu tokluk, dayanım, kolay kalıplanabilme, üstün yüzey kalitesi gibi dengeli özellikleri ve geniş bir sıcaklık aralığında yüksek darbe dayanımı performansı nedeniyle ev aletlerinden elektronik ekipmanlara, otomotiv endüstrisinden havacılık sanayine çok geniş uygulama alanında kullanılan önemli bir mühendislik termoplastiğidir. ABS küresel bazda kullanılan tüm mühendislik termoplastikleri tüketiminin yaklaşık %40'ı (9Mt/yıl) ile en fazla kullanılan mühendislik termoplastiği konumundadır. ABS'nin çok sık kullanılan bir mühendislik termoplastiği olması ve üstün fiyat/performans ilişkisi nedeniyle ABS'nin kimyasal ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla bilim insanları tarafından birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ABS temelli polimer harmanlar üzerine gerçekleştirilen hem akademik hem de ticari polimer harman ürünlere ait çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca bazı durumlarda belli bir özelliği veya konuyu inceleyen benzer çalışmalar ile ticari polimer harman ürünler tablolar halinde verilmiş olup, bu çalışmaların bazıları açık formda sunulmuştur.

ABS termoplastik polimeri son yıllarda giderek artan bir şekilde polimer harmanlarda kullanılmaktadır. Standart ABS polimeri kendi doğası gereği üstün özelliklere sahip olsa da diğer polimerlerle harmanlanarak sahip olduğu özelliklerin uygulamaya özgü istenilen dengeli özellikleri elde edecek şekilde daha da genişletilmesi ve geliştirilmesi mümkündür. Öte yandan, ABS'nin diğer polimerler ile harman halinde kullanılması darbe dayanımının

geliştirilmesi ve işlenebilirliğin iyileşmesi gibi avantajların düşük maliyetli bir şekilde elde edilmesini beraberinde getirmektedir. Hem ABS'nin hem de ikili veya üçlü harman yapıyı oluşturan diğer polimer veya polimerlerin istenilen başarı kriterlerini sağlayacak özelliklere sahip polimer harman yapının elde edilmesi amacıyla ABS bileşim oranı düşük veya yüksek oranlarda kullanılarak ABS temelli polimer harmanlar geliştirilmesinin amaçlandığı bilinmektedir.

Bu kapsamda araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen incelemeler ve literatüre sunulan çalışmaların bazıları Tablo 1.2'de özetlenmiştir. Örneğin, Harris vd., (2020), ABS'nin yapısında bulunan bütadiyen monomerinin neden olduğu düşük termal kararlılığın iyileştirilmesi amacıyla ABS/HDPE polimer harman üzerine çalışmışlardır. ABS/HDPE polimer harman ile eriyik yığıma yöntemi ile elde edilen en üstün eğilme ve basma dayanımları elde edildiği ve ABS/HDPE polimer harmanın her iki saf polimerden daha üstün termal bozunum sıcaklığına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca ABS/HDPE harmanların yaşlanma sonrası mekanik özelliklerinin yapıda herhangi bir bozunum olmadan ciddi oranda artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde elektronik atıklardan geri dönüştürülen ABS'nin termal kararlılığına, mekanik özelliklerine ve reolojik davranışına LDPE polimer ile harmanlanmasının etkileri araştırılmıştır (Saxena & Maiti, 2021). ABS termal bozunum sıcaklığının yapıya LDPE ilavesiyle yaklaşık 100°C artış gösterdiği ve ayrıca ABS'nin tokluğunun LDPE ile harmanlanması ile yaklaşık 5 kat iyileşme elde edildiğini belirlemişlerdir. ABS polimerin termal kararlılığının ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde PE temelli LDPE ve HDPE polimerler ile harman yapıları oluşturulmasının önemli bir alternatif olduğu görülmektedir. Saf ve geri dönüştürülmüş hammaddelerden enjeksiyon kalıplama ile üretilen ABS ve HIPS polimerlerin ve polimer harman yapılarının morfolojik, reolojik ve mekanik özellikleri Hirayama & Saron, (2018) tarafından incelenmiştir. Düşük ABS oranlarında PS matris içerisinde ABS dağılmış bir faz yapısı sergilerken artan ABS oranı ile PS'nin ABS matris içerisinde dağılmış bir faz yapısı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Çalışmada, ABS/HIPS harmanda artan HIPS bileşim oranı ile kopma uzaması değerleri artarken, çekme ve darbe dayanımlarının azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, geri dönüşüm ile üretilen harmanların saf harman yapılara kıyasla üstün çekme dayanımı, elastisite modülü ve darbe dayanımı değerlerine sahip olduğunu dikkat çeken bir sonuç olarak belirtmişlerdir. Vazquez & Barbosa, (2018) ise, ABS/HIPS polimer harmanlarda uyumlaştırıcı katkıların harman yapının mekanik özellikleri ve termal davranışlarını üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, 80/20 (HIPS/ABS)

oranında hazırlanan polimer harmana %2 SBR uyumlaştırıcı katkı ile çekme dayanımı ve tokluğunun HIPS80/ABS20 polimer harmana kıyasla sırasıyla %85 ve %55 oranlarında iyileşme gösterdiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda ABS yapıya uyumlaştırıcı kullanılmadan HIPS polimer ilavesi ile elde edilen HIPS80/ABS20 polimer harmanın ABS yapının tokluğunu 0.67 J/m^3 'ten 1.81 J/m^3 değerine arttığını belirlemişlerdir.

Geniş bir kullanım alanına sahip olması nedeniyle PA6 ve ABS polimerlerin harman davranışları hem ticari hem de akademik araştırmalarda önemli bir çalışma konusu olmuştur. ABS/PA6 polimer harman içerisindeki bileşim oranlarının çekme ve darbe dayanımları üzerindeki etkilerini Mamat vd., (1997) araştırmışlardır. Çalışma sonucunda %60 ABS oranına kadar mekanik davranışta büyük bir değişim gözlemlenmezken %70 ABS oranında kopma uzaması ve darbe dayanımının ciddi oranda arttığı ve yapının eş sürekli bir faz morfolojine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde Kudva vd., (2000) ve Liu vd., (2012) tarafından ABS/PA6 polimer harmanlarda yapıda artan ABS oranı ile akma dayanımının azaldığı buna karşın kopma uzaması ve darbe dayanımının artış gösterdiği belirlenmiştir. Essabir vd., (2020) ve Ren vd., (2008) tarafından yapılan çalışmalarda ABS/PA6 polimer harmanların mekanik özellikleri, reolojik davranışları, morfolojik yapıları ve termal karakterleri SEBS-g-MA ve SAM uyumlaştırıcılar ile uyumlaştırıcı etkilerini içerecek şekilde detaylıca incelenmiştir. Uyumlaştırıcı katkılar ile üstün tokluğa sahip ABS/PA6 polimer harmanların elde edilebileceği ve yapı içi arayüzey yapışmaların iyileştiği bu çalışmalarda belirlenmiştir. Ayrıca, ABS polimerin yorulma çatlak ilerleyişi ve yorulma tokluğunun iyileştirilmesi amacıyla PA6 ve SANMA uyumlaştırıcı ile harman yapıların üstün performans sergilediği Handge vd., (2012) tarafından ortaya koyulmuştur. Çalışmada, %70PA6-%6SANMA içeren ABS/PA6 polimer harmanın tokluğunun yaklaşık 10 kat iyileşme gösterdiğini belirlemişlerdir.

ABS temelli polimer harmanlarda en sık karşılaşılan, ticari ve mühendislik uygulamalarında kendisine en fazla kullanım alanı bulan polimer harman PC ile oluşturulan ABS/PC polimer harmanlardır. ABS/PC polimer harmanlar darbe dayanımının, mekanik özelliklerin ve termal kararlılığın geliştirilmesi amacıyla elde edilen üstün performanslı polimerik harman malzemelere en önemli örnektir. Khun & Liu (2013) ABS bileşim oranının ABS/PC polimer harmanların mekanik, termal ve tribolojik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır, artan ABS oranı ile genel eğilim olarak çekme dayanımının azaldığını ancak %10 ABS bileşim oranındaki polimer harmanın PC ve ABS malzemelere ve tüm bileşim oranlarındaki harmanlara kıyasla en üstün çekme dayanımı ve aşınma direncine sahip

olduğunu göstermişlerdir. ABS/PC polimer harmanlarda değişken bileşim oranlarında çekme ve darbe dayanımı farklı bir çalışmada daha incelenmiş ve benzer şekilde en üstün çekme ve darbe dayanımları aynı bileşim oranında elde edildiğini belirlemişlerdir (Krache & Debbah 2011). Ayrıca bu çalışmalarda, başarı kriterlerindeki iyileşmenin düşük bileşim oranında ABS'nin PC matris içerisinde dağılan bir yapıda ve damlacık formda bulunması ile oluşan gerilme yoğunlaşmasının bir sonucu olduğunu gözlemlemişlerdir (Krache & Debbah 2011; Khun & Liu 2013). Benzer bir sonuç PC/ABS harmanların darbe dayanımının incelendiği farklı bir çalışmada da elde edilmiştir. %25 ABS içeren ABS/PC polimer harmanın darbe tokluğunun PC'ye kıyasla 3 kat iyileşme gösterdiği ve bu iyileşmenin PC matris içerisinde dağılan ABS faz morfolojisinden kaynaklandığı Rybnicek vd., (2008) tarafından yapılan çalışmada belirlemişlerdir. ABS ve PLA polimer harmanların oluşturulmasında uyumlaştırıcı katkıları ve düşük oranlarda akrilik polimer ilavelerin kullanımının ABS/PLA harman yapının mekanik özelliklerini ve karışabilirliğini önemli oranda iyileştirdiği Li & Shimizu (2009) ve Essabir vd., (2020) tarafından yapılan incelemeler ile ortaya koymuşlardır. Dong vd., (2015) ABS/PLA/RC uyumlaştırıcı katkılı farklı bileşim oranlarında numuneleri sıkıştırarak kalıplama yöntemi ile üretmiş ve bileşim oranı ile mekanik özellikler ve termal davranış arasındaki ilişkiyi uyumlaştırıcı katkı ilavesi durumunda araştırmışlardır. Yapı içerisinde ABS katkı oranının %50'ye kadar artmasıyla kopma dayanımı ve tokluğun saf polimerlere ve diğer bileşim oranlarındaki harmanlara kıyasla ciddi oranda artışlar gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu çalışmada, %10 ABS oranında ABS/PLA/RC polimer harmanın PLA, ABS ve PLA/ABS harmanlardan daha üstün akma dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Tablo 1.3. ABS harmanlar hakkında literatürden örnek çalışmalar

Polimer Harman	Araştırmacılar	Test/Analiz Tipleri	Araştırma Alanı
ABS/HDPE	Harris vd., 2020	Çekme, Eğilme, Basma / FTIR, DSC, TGA	Termal kararlılık, mekanik özellikler, yaşlanma etkileri
ABS/LDPE	Saxeana & Maiti 2021	Çekme, Eğilme / FTIR, NMR, DSC, TGA, SEM	Faz morfolojisi, termal kararlılık, mekanik özellikler, kimyasal yapı etkileşimleri
ABS/HIPS	Souza vd., 2016	Çekme, Darbe / DSC, SEM	Bileşim oranı, üretim yöntemi, mekanik/morfolojik özellikler

Tablo 1.3'ün devamı

ABS/HIPS	Vazquez & Barbosa 2018	Eğilme / DSC, SEM	Uyumlaştırıcı etkisi, mekanik özellikler, faz morfolojisi, termal özellikler
	Hirayama & Saron 2018	Çekme, Darbe / MFI, SEM	Karışabilirlik, morfoloji, geri dönüşüm etkisi, reolojik özellikler, mekanik özellikler
ABS/PA6	Mamat vd., 1997	Çekme, Darbe / SEM	Morfoloji, bileşim oranı, mekanik özellikler
	Kudva vd., 2000	Çekme, Darbe / MFI, SEM, DSC	Uyumlaştırıcı etkisi, mekanik özellikler, faz morfolojisi, termal/reolojik özellikler
	Ren vd., 2008	Çekme, Eğilme, Darbe / SEM, DMA, DSC	Uyumlaştırıcı etkisi, bileşim oranı, mekanik özellikler, faz morfolojisi, termal özellikler
	Liu vd., 2012	Çekme, Eğilme, Darbe / SEM, DSC	Bileşim oranı, mekanik özellikler, faz morfolojisi, termal özellikler
	Handge vd., 2012	Çekme, Eğilme, Darbe, Yorulma / SEM, DMA, XRD	Bileşim oranı, mekanik özellikler, yorulma, faz morfolojisi, reolojik özellikler
	Essabir vd., 2020	Çekme / FTIR, DMA, SEM, DSC	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji, kimyasal/reolojik özellikler, termal özellikler
ABS/PBT	Tang vd., 2018	Çekme, Eğilme, Darbe / SEM	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji, uyumlaştırıcı etkisi
	Hale vd., 1999	Çekme, Darbe / TEM	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji, uyumlaştırıcı etkisi
	Farajian vd., 2022	Çekme, Eğilme, Darbe / SEM	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji
ABS/PC	Khun & Liu vd. 2013	Çekme, Aşınma / TGA, DSC, SEM	Bileşim oranı, termal özellikler, morfoloji, triboloji
	Lee vd., 1992	Çekme / SEM	Bileşim oranı, faz morfolojisi
	Krache & Debbah 2011	Çekme, Eğilme, Darbe / FTIR, SEM	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji, kimyasal yapı etkileşimleri
	Rybnicek vd., 2008	Çekme, Darbe / SEM	Bileşim oranı, mekanik özellikler, morfoloji
	Ma vd., 2022	Çekme, Eğilme, Darbe, Yorulma / SEM, FTIR	Mekanik özellikler, morfoloji, kimyasal yapı, yorulma ömür davranışı, uyumlaştırıcı etkisi

Tablo 1.3'ün devamı

ABS/PLA	Li & Shimizu 2009	Çekme, Darbe / SEM, TEM, DMA	Mekanik özellikler, bileşim oranı, uyumlaştırıcı etkisi
	Vadori vd., 2017	Çekme, Darbe / İstatiksel Analiz	Mekanik özellikler, morfoloji, uyumlaştırıcı etkisi
	Dong vd., 2015	Çekme / DMA, DSC, TEM, SEM	Mekanik özellikler, bileşim oranı, morfoloji, termal özellikler, reolojik özellikler
	Dhinesh vd., 2021	Çekme, Eğilme	Mekanik özellikler, bileşim oranı
ABS/PP	Gupta vd., 1999	Çekme, Darbe / SEM	Mekanik özellikler, bileşim oranı, morfoloji
	Lee vd., 2009	Eğilme, Darbe / SEM, TEM	Mekanik özellikler, bileşim oranı, morfoloji, uyumlaştırıcı etkisi
	Bonda vd., 2014	Çekme, Darbe / FTIR, SEM	Mekanik özellikler, bileşim oranı, morfoloji, uyumlaştırıcı etkisi, kimyasal yapı etkileşimleri
	Luna vd., 2022	Çekme, Eğilme, Darbe / SEM, DSC, TGA	Mekanik özellikler, bileşim oranı, faz morfolojisi, termal özellikler, uyumlaştırıcı etkisi
	Feng vd., 2022	Çekme, Darbe / FTIR, SEM, DSC	Mekanik özellikler, faz morfolojisi, termal özellikler, uyumlaştırıcı etkisi
ABS/PTT	Xue vd., 2008	DSC, DMA, SEM	Faz morfolojisi, reolojik özellikler, karışılabilirlik, termal özellikler
	Braga vd., 2019	Çekme / SEM	Mekanik özellikler, faz morfolojisi, uyumlaştırıcı etkisi

Akademik çalışmaların yanı sıra dengeli ve üstün başarı kriteri özelliklerine sahip malzemeler elde edilmesi amacıyla ticari şirketler ABS ile farklı polimerlerin harmanlanması ile elde edilen ticari malzemelerin geliştirilmesi üzerine uzun yıllardır birçok çalışma gerçekleştirmiş ve ticari ürünler geliştirmişlerdir. Ticari alanlarda ve mühendislik uygulamalarında ABS/PC polimer harmanlar en sık tercih edilen polimer harmanlardır. Ticari polimer harmanlar kullanılan polimer harman bileşenleri, ürün ticari adı, üretici şirketi ve harman kullanımının amacını içerecek şekilde Tablo 1.4'te özetlenmiştir. ABS temelli harmanlar ile yapının darbe dayanımı, mekanik özellikleri, işlenebilirliği gibi birçok özelliğinin en iyileştirilmesi veya istenilen özelliği iyileştirmeye yönelik malzeme geliştirme sürecinin amaçlandığı bilinmektedir. Örneğin, PVC ile harman oluşturulması, ABS'nin alev geciktirme performansını ve darbe dayanımını düşük bir maliyetle geliştirmeyi amaçlarken,

daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip Polikarbonat (PC) ve Polisülfon gibi mühendislik polimerleri ile harmanlanması ile ısıl bozulma sıcaklıklarının iyileştirilmesinin ticari kullanımlarda amaçlandığı bilinmektedir. ABS/PC harmanlarda, ABS polimer PC malzemenin işlenebilirliğini, sünekliği ve yüzey parlaklığını iyileştirilmesi amacıyla harman yapılar geliştirildiği görülmektedir. Ticari ABS/TPU karışımlar ise polimer harman bileşeni olarak termoplastik poliüretan elastomer (TPU) içerir. Bu polimer harman amorf/elastomer polimer harmana önemli bir örnek olarak verilebilir. Bu harman karakteristik olarak düşük elastisite modülüne sahip olmasına rağmen yüksek darbe dayanımı sergilemektedir.

Tablo 1.4. Ticari ABS temelli polimer harmanlara ait örnekler

Polimer Harman	Ticari Ürün Adı	Şirket	Harman Üretim Amacı
ABS/PC	Novodur [®]	Styrolution	Darbe dayanımı, işlenebilirlik, üstün mekanik özellikler, yüksek boyutsal kararlılık
	Cycloy [®]	Sabic	
	Bayblend [®]	Bayer	
	Novolly [®] S	Daicel Polymer	
	Triax [®]	Ineos	
	Pulse [®]	Dow	
ABS/PVC	Royalite [®]	Spartech	Darbe dayanımı, işlenebilirlik, alev geciktirme, sıcak yırtılma dayanımı
	Kydex [®] 430	Kydex LLC	
	Cycovin Kaf [®]	B.F. Goodrich	
	KanekaEnplex [®]	Kanegafuchi	
ABS/PBT	Novolly [®] B	Daicel Polymer	Kimyasal dayanım, yüksek tokluk, düşük nem hassasiyeti
	Makroblend [®]	Bayer	
	Strex [®]	Samsung	
ABS/PA6	Terblend [®] N	Styrolution	Düşük nem hassasiyeti, yüksek tokluk, düşük kalıp büzülmesi
	Novolly [®] A	Daicel Polymer	
	Triax [®] 1120	Ineos	
ABS/TPU	Prevail [®]	Dow	Darbe dayanımı, boyanabilirlik

1.6.2. PMMA Harmanlar

PMMA çeşitli mühendislik uygulamalarında amorf yapısı sayesinde iyi optik özellikler sergileyen transparan yapıya ve üstün geometrik kararlılığa sahip termoplastik polimerdir (Reinaldo vd., 2020). Bu nedenle aydınlatma, dekoratif, lens gibi cam ve optik amaçlı uygulamalarda farklı hava koşullarına dayanıklılık, yüksek ışık geçirgenliği, kimyasal direnç, hafiflik ve boyutsal kararlılık gibi avantajları nedeniyle sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir (Aid vd., 2019; Mao vd., 2019). PMMA bazlı akrilik termoplastikler, özellikle olağanüstü berraklıkları ve UV direnciyle dikkat çeken sert, amorf polimerlerdir. Ticari PMMA tipi akrilik termoplastiklerin uygulamalarının çoğu, yüksek derecede şeffaflık ve UV direnci özelliklerine dayandığından, PMMA temelli akrilik karışımların geliştirilmesine yönelik nispeten az ticari araştırma veya ilgi olmuştur. Bu durum PMMA temelli harmanlarda yüksek derecede bir berraklığın korunmasının mümkün olamaması endişesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, PMMA temelli ticari harmanların çeşitli örnekleri olduğu bilinmektedir. Ayrıca, PMMA sahip olduğu üstün optik ve kimyasal direnç özelliklerine rağmen düşük bir kopma uzaması ve düşük darbe dayanımına sahip kırılkan yapıya bir mekanik davranış sergilemektedir. Bu özelliği birçok termoplastik mühendislik polimerine göre düşük darbe dayanımı performansı sergilemesine neden olmaktadır. PMMA malzemelerin optik uygulamalardaki mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı malzemeler ile harmanlar şeklinde kullanımı konusunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Rühl vd., 2017; Todo vd., 2006; Kim vd., 1998). PMMA temelli polimer harmanlar üzerinde yapılan literatür çalışmaları ve ticari ürün olarak elde edilen harmanlar bu kısımda özetlenmiştir.

Ticari olarak geliştirilen PMMA temelli harmanlar PMMA/PC, PMMA/PVC ve PMMA/PLA olarak sıralanabilir. Üretilen ticari harmanlarda PMMA'nın zayıf darbe dayanımı ve sünekliğinin yapıya PC, PVC ve PLA polimerlerin eklenmesiyle geliştirilmesinin amaçlandığı bilinmektedir. PMMA/PLA polimer harman Plexiglas® Rnew ticari adıyla geliştirilmiş ve PMMA'nın sergilediği düşük darbe dayanımı optik performansta ciddi bir kayıp olmadan önemli ölçüde geliştirilmiştir. Böylece optik uygulamalarda üstün ışık yansıtma kabiliyetine sahip ve üstün darbe dayanımlı PMMA/PLA harmanların ticari ürünlerde kullanımı gerçekleştirilebilmiştir. Aynı zamanda PMMA/PC harmanlarda eriyik karıştırma yöntemi kullanılarak üretilmiş ve bu yapı düşük oranda kısmi karışabilirliğe sahip olacak şekilde ayrık faz yapısı nedeniyle nispeten mat bir formda ve PC

malzemeye kıyasla düşük darbe tokluğu performansı sergilemektedir. Bu durum sonucunda EPDM kauçuğun uyumlaştırıcı olarak kullanımı ile Cyrex® ticari ismiyle ve yüksek darbe dayanımlı bir PMMA/PC ticari ürün geliştirilmiştir. Cyrex® PMMA/PC polimer harmanının önemli bir diğer avantajı ise PC ve ABS/PC gibi önemli mühendislik polimerlerinden yaklaşık üç kat üstün darbe dayanımına sahip olmasıdır. Bu kapsamda düşünüldüğünde ticari ilginin düşük olmasına rağmen PMMA temelli harmanların istenilen veya elde edilmesi beklenen dengeli mekanik özellikler, tokluk, termal kararlılık, optik özellikler ve darbe dayanımı gibi önemli başarı kriterlerini sergileyebilecek malzeme geliştirilmesine olanak tanıdığı düşünülmektedir.

PMMA harmanlar için gerçekleştirilen akademik araştırmalarda odak noktasını harman malzemenin termal kararlılığı, darbe dayanımı, mekanik özellikleri, optik performansı ve morfolojik yapısı oluşturmaktadır. Örneğin, Dixit vd., (2009), PMMA/PC harmanlarda PC bileşim oranının harman malzemenin mekanik özellikleri, reolojik ve termo-mekanik davranışlarına etkilerini çekme/darbe testleri, ile DSC, DMA ve SEM analizleri ile araştırmışlardır. Geniş bir bileşim oranı aralığında PMMA/PC harmanlarda tek bir camsı geçiş sıcaklığı ile karışabilir bir formun olduğunu DSC, DMA ve SEM analizleri ile belirlemişlerdir. Ayrıca, artan PC bileşim oranı ile harman yapının akma ve çekme dayanımları ile darbe tokluğunun önemli oranda iyileştiğini, %75 PC içeren PMMA/PC harman malzemenin en iyi mekanik özellik dengesine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu bileşim oranında PMMA matris içerisinde artan PC bileşim oranı ile polimer zincir hareketliliğinin kısıtlanması sonucu malzeme tokluğunun iyileştiği sonucuna varmışlardır. PMMA/PC harman malzeme için benzer bir çalışmada Hoang vd., (2021) enjeksiyon kalıplama üretim parametrelerinin (tutma basıncı, soğuma süresi ve eriyik sıcaklığı) ve PC bileşim oranının PMMA/PC harman malzemelerin mekanik özellikleri, darbe dayanımı ve optik davranışı üzerindeki etkilerine odaklanmışlardır. Bu çalışmada üretim parametreleri ve bileşim oranı etkilerini en iyileştirme tekniği kullanılarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda PMMA/PC harman malzemelerde tutma basıncının akma dayanımı üzerinde büyük oranda etkili olduğu buna karşın darbe dayanımı ve kopma uzaması üzerinde ise soğuma süresinin etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Eriyik sıcaklığının ise üretim sırasında polimer harmanda termal bozulmalara yol açarak tüm mekanik özelliklerin kötüleşmesine sebep verdiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda PMMA/PC harman malzemedeki artan PC oranı ile akma dayanımının azaldığı buna rağmen darbe tokluğu ve kopma uzamasının sırasıyla yaklaşık olarak %283 ve %185 oranında iyileşme gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

PMMA matrisli ve düşük oranda PC katkılı (%1,3,5-10) PMMA/PC harmanların ön ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama sonrası mekanik özellikleri, morfolojik yapısı ve darbe dayanımlarını Lee vd. (2012) incelemişlerdir. Düşük oranda PC ilavesi ile PMMA malzemenin darbe dayanımının iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

PVC malzemelerin sahip olduğu düşük darbe dayanımı ve işlenebilirliğinin iyileştirilmesinde akrilikler önemli bir tamamlayıcı polimer bileşeni olarak görülmektedir. Bu nedenle PMMA harmanlarda yalnızca PMMA malzemedan kaynaklanan davranışın iyileştirilmesi veya en iyileştirilmesi değil aynı zamanda PVC gibi polimerlerde mekanik özelliklerin ve malzeme davranışının iyileştirilmesinde tamamlayıcı polimer bileşeni olarak kullanımı da görülebilmektedir. Örneğin, PMMA/PVC harmanda PMMA bileşim oranının fiziksel, mekanik ve termal özelliklere etkileri Chakrabarti vd., (2004) tarafından incelenmiştir. Saf PVC ile karşılaştırıldığında yapıya PMMA ilavesi ile düşük bileşim oranında (%10) elastisite modülü ve çekme dayanımının azaldığını buna karşın en üstün tokluk ve kopma uzaması değerlerinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca saf PVC'ye kıyasla tüm PMMA oranlarında (%10-%40) mekanik özelliklerin önemli ölçüde iyileştiğini belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada, Dixit vd., (2009) PMMA/PVC harmanlarda çözelti ile döküm yöntemi kullanılarak elde edilen daha geniş bir bileşim oranı aralığında (%0-%100) bileşim oranının harman malzemenin mekanik, termo-mekanik ve reolojik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. DMA ve SEM analizlerinden harman malzemenin %50 PMMA oranına kadar karışabilir formda olduğunu daha yüksek PMMA oranlarında ise karışamaz formun görüldüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca harman içerisinde PMMA bileşim oranının artmasıyla elastisite modülünün ve çekme dayanımının iyileştiği buna karşın darbe dayanımı açısından en üstün performansın %25 PMMA oranında elde edildiğini belirlemişlerdir. PVDF polimer ile oluşturulan PMMA/PVDF harmanlar literatürde çalışılan bir diğer harman örneğidir. Song vd., (2013) PMMA/PVDF harmanların %0-%100 gibi geniş bir bileşim oranı aralığında karışabilirliği, mekanik özellikleri ve morfolojisini araştırmışlardır. Çalışmalarında PMMA/PVDF harmanların tek bir camsı geçiş sıcaklığı göstermesi ve morfolojik yapısında ada/adacık formu bulunmayan düzgün bir yapı sergilemesi nedeniyle karışabilir bir harman olduğunu gözlemlemişlerdir. Dikkat çekici bir şekilde, %40 PMMA oranında en düşük akma dayanımının elde edilmesine rağmen saf PMMA (%7) ve saf PVDF (%48) ile kıyaslandığında üstün bir kopma uzaması (%762) ve dengeli bir darbe dayanımının elde edildiğini belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise benzer şekilde DSC ve XRD analizleri ile PMMA/PVDF harmanların karışabilir olduğu ve her iki polimerinde harman yapı

oluşturmaya uyumlu olduğu Pawde & Deshmukh, (2009) ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda PMMA matris içerisinde bulunan dağılmış PVDF bölgelerin katkıda bulunan etkisi ile darbe dayanımında %78 oranında artış belirlemişlerdir. PMMA/PVDF harmanların uyumlu yapısının, PMMA'nın karbonil grubu (C=O) ile PVDF'nin hidrojen bağlarından kaynaklandığı sonucuna FTIR analizleri ile ulaşmışlardır.

PMMA'nın transparan yapısı ile optik davranış beklenen ve yüksek UV dirençli uygulamalarda kullanılırken düşük darbe dayanımı dezavantajının iyileştirilmesinde PLA, EVA ve EMA polimer ile oluşturulan PMMA/PLA, PMMA/EVA ve PMMA/EMA harmanlar dikkat çekmektedir. Anakabe vd., (2015), Teoh & Chow, (2018) ve Choochottiros & Chin, (2013), PMMA/PLA harmanlarda optik özelliklerde önemli bir değişim olmadan mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının iyileştirilmesinde PMMA/PLA harmanların karışabilirliği ile bileşim oranı etkilerini araştırmışlardır. PMMA/PLA harmanların ışık yansıtma performansının geniş bir dalga boyu aralığında tüm harman bileşim oranlarında PMMA ile rekabetçi bir performans sergilediğini ve darbe dayanımının PLA katkı ile ciddi oranda iyileştiğini belirlemişlerdir. Benzer şekilde PMMA matrise EVA ve EMA polimer katkı ile ışık geçirgenliğinde ihmal edilebilir bir düşüş ile PMMA/EVA ve PMMA/EMA harmanların darbe dayanımı ve kopma uzamasının saf PMMA'ya kıyasla önemli ölçüde iyileştiğini göstermişlerdir (Cheng & Chen, 2004; Poomalai vd., 2009). Bu çalışmalarda saf PMMA'nın darbe dayanımının yapıya EMA katkı ile yaklaşık 2 ve EVA katkı ile yaklaşık 4 kat artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmaların yanı sıra PMMA'nın darbe dayanımı başta olmak üzere mekanik, termomekanik, kimyasal ve reolojik özelliklerinin geliştirilmesinde SAN ve ABS gibi farklı kimyasal yapıya sahip stiren temelli polimerler ile polimer harmanlama şeklinde kullanımı önemli bir yöntem olarak literatürde sıkça kullanılmaktadır (Fowler vd., 1987; Kumaraswamy vd., 2006; Wen vd., 2003). Literatürde stiren temelli polimerler ile PMMA karışımların mekanik ve malzeme özelliklerini inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda PMMA ile stiren temelli ABS ve SAN polimerlerin karışabilirliği, kimyasal yapıları, termomekanik özellikleri, reolojik yapıları ve mekanik davranışları önemli ölçüde incelenmiştir. Bir sonraki bölümde PMMA/ABS harmanlar üzerine literatürde gerçekleştirilen çalışmalar irdelenecektir.

1.6.3. PMMA/ABS Harmanlar

Bölüm 1.6.2’de bahsedildiği gibi üstün UV direnci, şeffaf yapısı, aşınma direnci, sahip olduğu mekanik özellikler ve termal davranışı nedeniyle PMMA mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan önemli bir termoplastiktir. Bu önemli üstün özelliklerine rağmen düşük darbe dayanımı ve tokluk gibi dezavantajlı özelliklerinin iyileştirilmesinde ABS gibi üstün mekanik özellikli mühendislik polimerlerinin kullanımı uzun yıllardır önemli bir alternatif olarak hem ticari hem de akademik çalışmalara araştırma konusu olmuştur.

PMMA/ABS termoplastik malzeme kullanımına ilgi duyulmasının nedeni PMMA/ABS harman ürünün üstün darbe direnci ve kolay şekillendirilmesi gibi avantajları ile birlikte sahip olduğu aşınma direnci, UV ışınlarına karşı koruma performansı, yüksek parlaklıkta yüzey kalitesi ve çevresel koşullara karşı dirençli yapıda olmasından ileri gelmektedir. Bu nedenle otomotiv endüstrisi, gıda endüstrisi, elektronik ürün ve ekipmanlar, ev aletleri ve yapı ürünlerinde kullanımı tercih edilmektedir. Bu kullanımlara duş kabinleri, yol işaretçileri, tıbbi mobilya ve ürünler, otomobil iç ve dış aksam parçaları, buzdolaplarının iç ve dış elemanları örnek verilebilir. Bu amaçla ticari kullanımda PMMA/ABS ürünler ABS ile birlikte eş zamanlı olarak ekstrüzyon edilen PMMA ile çok katmanlı olarak veya ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama işlemi sonrası ürün geometrisinde üretilerek kullanılmaktadır. Ticari olarak PMMA/ABS ürünler kullanan şirketlere dünya çapında üretimleri bulunan Gteek, Zuroplast, Röchling, Karva ve 3AComposites şirketleri örnek verilebilir. Bu uygulamalara ek olarak otomobil iç ve dış parçaları ile araç aydınlatma grubu üretiminde PMMA ve ABS malzemelerin birbirini tamamlayıcı özellikleri nedeniyle sıkça kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin, aydınlatma grubunda bulunan lens ve far üstün ışık yansıtma davranışı nedeniyle PMMA malzemeden, far ve lensin içinde yer aldığı destek görevi gören far yuvası/muhafazası ise darbe dayanımı ve mekanik özellikleri nedeniyle ABS malzemeden imal edilerek birlikte kullanılmaktadır. Bu ürünlerin birlikte üretimi ve tasarımı aşamasında aydınlatma bölgesinin dışında kalan far yuvası ve bağlantı bölgelerinde ise PMMA/ABS harman malzemeler ABS’ye kıyasla tercih edilebilir üstün termal özellikleri, aşınma ve dış ortama karşı dayanıklılıkları nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

Genel olarak PMMA/ABS harmanların, PMMA’a darbe dayanımını ve ABS’ye yüzey özellikleri, UV direnci ve alev geciktiriciliği gibi avantajlar sağlaması amaçlanmaktadır. PMMA/ABS harman yapılar üzerine literatürde araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen

alışmalar araştırma alanlarını içerecek şekilde Tablo 1.5'te özetlenmiştir. Bu kısımda tabloda yer alan bazı çalışmalar ve çalışmalara ait önem arz eden bulgular sunulacaktır. Örneğın, Kim vd., (1993a), farklı akrilonitril (AN) oranlarına sahip ABS ve farklı moleküler ağırlıklara sahip PMMA'dan eriyik karıştırma yöntemi ile enjeksiyon kalıplama sonrasında üretilen PMMA/ABS harmanların karışabilirliğini, morfolojik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. TEM görüntüleri üzerinden %24 ve %27 oranına AN içeren PMMA/ABS polimer karışımların karışabilir yapıda olduğu buna karşın %35 oranındaki AN ile ABS'nin yapı içerisinde karışamaz formda kaldığını gözlemlemişlerdir. Kim vd., (1993b) gerçekleştirdikleri bir diğerk çalışmada ise karışabilir ve karışamaz formdaki farklı bileşim oranlarında üretilen PMMA/ABS harmanların mekanik özellikleri ve yüzey kalitelerini araştırmışlardır. Harman malzemede artan PMMA oranı ile karışabilirliğin, sertliğin, eğilme dayanımının ve akma dayanımının ciddi oranda iyileştiğı buna karşın darbe dayanımının ise azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, yüzey parlaklığının karışabilen harmanlarda artan PMMA oranı ile azaldığı ancak karışamayan harmanlarda %50 PMMA oranına kadar ciddi oranda iyileştiğı sonucuna ulaşmışlardır. Choi vd., (1997) ise lens (PMMA) ve far yuvası (ABS) gibi malzemelerden oluşan otomobil arka far grubunu geri dönüştürerek harman malzeme elde etmiş, mekanik ve karışabilirlik özelliklerini saf ABS, saf PMMA ve PMMA/ABS (60/40) harman malzemeler ile kıyaslamışlardır. Çekme, eğilme ve darbe testleri sonucunda geri dönüştürölen arka far grubunun PMMA/ABS (60/40) harman malzemeye oldukça yakın mekanik özellikler sergilediğini ayrıca saf PMMA'ya kıyasla üstün darbe dayanımı ve tokluğa sahip olduğunu göstermişlerdir. Ek olarak, saf PMMA ve saf ABS hammaddelerden farklı bileşim oranlarında PMMA/ABS (0/100, 20/80, 40/60, 100/0) harman malzemelerin camsı geçiş sıcaklıklarını DSC analizleri ile araştırmışlardır. DSC eğrileri üzerinden saf ABS ve PMMA/ABS (80/20) harman malzemenin faz ayırımından ileri gelen iki camsı geçiş sıcaklığı gösterdiği buna karşın diğerk harman oranlarında ve saf PMMA'da tek bir camsı geçiş sıcaklığının göröldüğünü gözlemlemişlerdir. PMMA/ABS harmanların karışabilirliğı kayıp ve depolama modöü gibi reolojik özellikleri üzerinden Reinaldo vd., (2018) tarafından incelenmiştir. Depolama-kayıp modöü eğrisinin açısai hıza bağlı olarak doğrusal bir davranış sergilediğini ve bu doğrusal bölgenin PMMA/ABS harmanların karışabilir formda olmasından kaynaklandığını belirlemişlerdir. Reinaldo vd., (2020) PMMA/ABS harmanlar üzerine gerçekleştirdikleri bir diğerk çalışmada ise farklı bileşim oranlarında hazırlanan PMMA/ABS harmanların mekanik, termal ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. Harmanlarda artan ABS bileşim oranı ile

çekme dayanımının azaldığı ve kopma uzamasının arttığını belirlemişlerdir. Dikkat çekici bir nokta olarak PMMA/ABS harmanlar saf ABS'ye kıyasla daha yüksek kopma uzamasına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda PMMA/ABS harmanların darbe dayanımının ABS ilavesi ile yaklaşık 2,5 kat artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Mekanik özelliklerdeki bu iyileşmenin PMMA ve ABS'yi oluşturan SAN arasında meydana gelen karışabilirliğin ilave etkisi ile oluştuğu sonucuna varmışlardır. Benzer ilave etkiyi Al-Hydary vd., (2012) dengeli sertlik ve dayanım özelliklerine sahip malzeme elde etmek amacıyla PMMA/ABS harmanların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışma sonucunda elde etmişlerdir. Çalışmada saf ABS ve PMMA ile PMMA/ABS harmanların FTIR sönümlleme bantları incelenmiş, harman malzemelerin bazı karakteristik ABS bantlarına sahip olmadığı, harman malzemelerde yeni sönümlleme bantları gözlemlendiği ve saf polimerlerden gelen bazı karakteristik bantların kayma eğilimi gösterdiğini gözlemlemişlerdir. FTIR eğrilerindeki bu değişimlerin PMMA ve ABS arasındaki güçlü etkileşimlerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca mekanik özellikler üzerinden değerlendirildiğinde, %55 ABS içeren PMMA/ABS harmanın dengeli performans özellikleri veren en iyi harman bileşim oranı olduğunu belirlemişlerdir.

Tablo 1.5. PMMA/ABS harmanlar konusunda literatürden örnek çalışmalara ait araştırma alanlarının özeti

Araştırmacılar	Test/Analiz Tipleri	Araştırma Alanı
Kim vd., 1993a Kim vd., 1993b	TEM, FTIR, Çekme, Eğilme, Darbe, Sertlik	Karışabilirlik, kimyasal yapı, mekanik özellikler, darbe dayanımı, yüzey özellikleri, morfoloji
Choi vd., 1997	Çekme, Eğilme, Darbe, Sertlik, DSC	Karışabilirlik, mekanik özellikler, darbe dayanımı, termal özellikler
Reinaldo vd., 2018	FTIR, DSC, SEM	Karışabilirlik, termal özellikler, morfoloji, reolojik özellikler
Reinaldo vd., 2020	SEM, TEM, TGA, DMA, Çekme, Sertlik, Darbe	Karışabilirlik, mekanik özellikler, darbe dayanımı, termal özellikler, morfoloji, optik özellikler

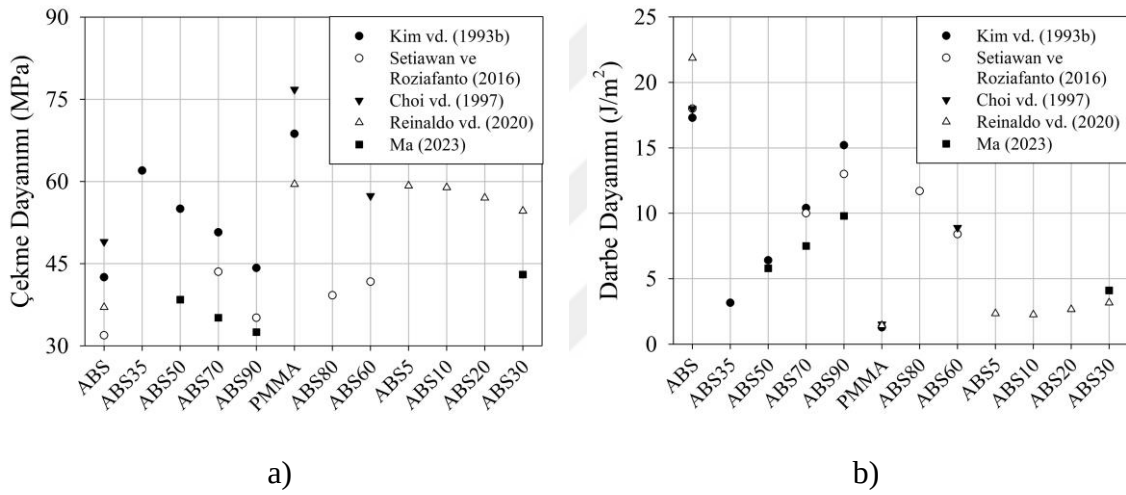
Tablo 1.5'in devamı

Al-Hydary vd., 2012	SEM, FTIR, DSC, Çekme, Basma, Eğilme, Sertlik	Karışabilirlik, kimyasal özellikler, mekanik özellikler, termal özellikler, morfoloji
Setiawan & Roziarfanto 2016	SEM, NMR, DSC, Çekme, Darbe	Karışabilirlik, kimyasal yapı, mekanik özellikler, darbe dayanımı, termal özellikler, morfoloji
Wang vd., 2014	Çekme, Darbe, En iyileştirme	Uyumlaştırıcı etkisi, mekanik özellikler, darbe dayanımı
Zhou vd., 2014	Çekme ve Darbe	Uyumlaştırıcı etkisi, mekanik özellikler
Nazari & Garmabi 2012 Nazari vd., 2012	SEM, TEM, XRD, DMA, Reoloji, Çekme, Aşınma	Toz parçacık etkisi, mekanik özellikler, morfoloji, termal özellikler
Ding vd., 2018	SEM, TEM, Çekme, Darbe, Yüzey	Nano toz parçacık etkisi, mekanik özellikler, darbe dayanımı, morfoloji, optik özellikler
Zhang vd., 2010	SEM, MFI, Çekme, Darbe,	Nano toz parçacık etkisi, mekanik özellikler, morfoloji, akış davranışı
Hou & Siow 2000	SEM, DSC, Çekme, Elektriksel İletim	Karışabilirlik, termal özellikler, mekanik özellikler, elektrik iletkenliği
Zhang vd., 2015	SEM, Çekme, Darbe, Yüzey Parlaklığı	Üretim parametre etkisi, mekanik özellikler, darbe dayanımı, optik özellikler
Ma, 2023	SEM, Çekme,	Üretim parametre etkisi, mekanik özellikler, darbe dayanımı

Setiawan & Roziarfanto, (2016) ise %10-40 bileşim oranı aralığında PMMA ilaveli PMMA/ABS harmanların morfolojik, mekanik, kimyasal yapı ve darbe dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik testler sonucunda artan PMMA oranıyla çekme dayanımının arttığı buna karşın darbe dayanımı ve kopma uzamasının ciddi oranda azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca kullanılan ABS (%2 AN, %22 Bütadiyen ve %76 Stiren) ile üretilen PMMA/ABS harmanların DSC eğrilerinde karışamayan harman yapısına karşılık

gelen iki farklı camsı geçiş sıcaklığının gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, morfolojik açıdan ise PMMA/ABS harmanlarda artan PMMA oranı ile geniş ve gevrek bölgelerin meydana geldiği aynı zamanda harman yapıların karışabilirlik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile düzgün dağılımlı faz yapısı elde edilebilmesi için uyumlaştırıcı katkıların gerekli olabileceğini değerlendirmişlerdir. Uyumlaştırıcı olarak kullanılan maleik anhidrit aşılınmış polistiren (KT-5) ve poliolefin elastomerin (POE) PMMA/ABS termoplastik harmanın mekanik özelliklerine etkilerini Wang vd., (2014) incelemişlerdir. %80 ABS ve %20 PMMA bileşim oranındaki PMMA/ABS harmanlarda düşük oranda (%3) KT-5 uyumlaştırıcı ile darbe dayanımının iyileştiği ancak daha yüksek oranda (%6 ve %9) KT-5 katkı ile darbe dayanımının harmanın saf halindeki dayanımdan dahi kötü değerler verdiğini belirlemişlerdir. Buna karşın KT-5 uyumlaştırıcı ile çekme dayanımının iyileştiğini gözlemlemişlerdir. POE uyumlaştırıcının ise düşük oranda (%5) ilavesi ile darbe dayanımının en yüksek değere ulaştığı ve artan POE oranı (%10-15) ile azalma eğilimi göstermesine rağmen harmanın uyumlaştırıcı katkısız durumuna kıyasla üstün özellikler sergilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca en iyileştirme çalışmaları sonucunda PMMA ve POE uyumlaştırıcının PMMA/ABS harmanların mekanik özellikleri üzerinde daha etkin değişimlere yol açtığını belirlemişlerdir. Zhou vd., (2014), PMMA/ABS harmanlarda uyumlaştırıcı katkı olarak kullanılan ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında stiren maleik anhidrit (SMA) ve %2, 4 ve 6 oranlarında stiren-butadien-stiren (SBS) uyumlaştırıcıların %80 ABS ve %20 PMMA bileşim oranında hazırlanan PMMA/ABS harman malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Mekanik testler sonucunda SMA uyumlaştırıcı ilavenin tüm oranlarında mekanik özellikleri kötüleştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %2 SBS katkı oranı dışında artan SBS oranı ile darbe tokluğunun 15 kJ/m^2 'den 30 kJ/m^2 'ye ve çekme mukavemetinin 22 MPa 'dan 28 MPa 'a iyileşme gösterdiğini belirlemişlerdir. Uyumlaştırıcı katkılara ek olarak PMMA/ABS harmana nano boyutta silika toz (Nano-SiO_2) katkısının mekanik özelliklere, optik performansa ve morfolojik yapıya etkileri Ding vd., (2018) tarafından incelenmiştir. %2'lik silika katkı ile darbe dayanımının yaklaşık %25 oranında bir iyileşme gösterdiğini ancak artan nano silika toz oranı ile darbe dayanımının PMMA/ABS (80/20) harmana kıyasla kötüleştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, harman matris ile uyumsuz formda ve karışamaz yapıdan kaynaklanan ayrık fazlı morfolojik davranış göstermesinden dolayı nano silika toz ilavesi ile yüzey parlaklığının ciddi oranda azaldığını belirlemişlerdir. Benzer bir çalışmada nano boyutta kalsiyum karbonat (CaCO_3) toz katkı ile akma dayanımının nispeten

azalma eğilimi gösterdiği ancak darbe dayanımının katkı oranı arttıkça ciddi bir şekilde azaldığı Zhang vd., (2010) gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda belirlemişlerdir. Şekil 1.14'te literatürde PMMA/ABS termoplastik polimer harmanlar üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen çekme ve darbe dayanımları harman bileşim oranına bağlı olarak özetlenecek şekilde verilmiştir. Farklı hammadde ve üretim parametreleri ile harman malzemelerin elde edildiği göz önünde bulundurularak PMMA/ABS harmanlarda ABS bileşim oranı ile mekanik özelliklerin değişiminin irdelenmesi genel bir bakış açısı oluşturması açısından araştırmacılar tarafından elde edilmiş sonuçlarını içerecek şekilde karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.



Şekil 1.14. PMMA/ABS harmanlarda farklı bileşim oranlarındaki numunelerden literatür çalışmaları sonucu elde edilen a) çekme dayanımı ve b) darbe dayanımlarının özeti

Yukarıda bahsedilen harman yapısını oluşturan polimerlerin bileşim oranı, uyumlaştırıcı katkı ve toz parçacıkların etkileri haricinde PMMA/ABS polimer harmanların üretimi sırasındaki üretim parametrelerinin de harman malzemenin başarı kriterleri üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Örneğin, enjeksiyon kalıplama sırasında eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, soğuma süresi, tutma basıncı, enjeksiyon basıncı gibi üretim parametreleri ile ekstrüzyon sırasındaki vida dönüş hızı, eriyik sıcaklık profili gibi üretim parametreleri mekanik, termal, morfolojik özellikler üzerinde etkili parametreler olarak bilinmektedir. PMMA/ABS harmanlarda ABS bileşim oranı, tekrarlı ekstrüzyon işlemi ve enjeksiyon kalıplama parametrelerinin (enjeksiyon sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı) mekanik özellikler ve morfolojik yapı üzerindeki etkileri ilk olarak Ma, (2023) tarafından yapılan çalışma ile incelenmiştir. Çalışmada, PMMA/ABS polimer harmanda PMMA oranının artmasıyla darbe

dayanımının azaldığı ve buna ek olarak çift ekstrüzyon işlemi sonrasında tüm bileşim oranlarında (90/10,70/30,50/50 ve 30/70) PMMA/ABS harmanının tek ve üç ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen darbe dayanımına kıyasla en üstün dayanıma sahip olduğunu belirlemiştir. Ayrıca farklı enjeksiyon sıcaklıkları (210°C, 220°C ve 230°C) ile üretilen PMMA/ABS harmanlarda nispeten düşük enjeksiyon sıcaklığında (210°C) daha üstün darbe dayanımı ve eğilme mukavemeti elde edildiği buna karşın artan enjeksiyon sıcaklığı ile darbe dayanımının ihmal edilebilir düzeyde azalma eğilimi gösterdiğini gözlemlemiştir. Ancak çekme dayanımının enjeksiyon sıcaklığı değişimi ile büyük ölçüde değişmediğini belirlemiştir. Buna ilaveten, Ma, (2023) deneysel testler sonucunda, artan enjeksiyon basıncı ile (70 MPa-85 MPa) darbe ve çekme dayanım değerlerinin morfolojik yapının daha düzgün bir form kazanmasına rağmen kötüleştiği sonucuna varmıştır. Zhang vd., (2015), enjeksiyon kalıplama üretim yöntemi için önem arz eden bir diğer parametre olan kalıp sıcaklığının PMMA/ABS (80/20) harman malzemenin yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Harman malzemelerin yüzey kalitesinin ve yüzey parlaklığının kalıp sıcaklığı arttıkça arttığını ve yaklaşık 100°C kalıp sıcaklığı üzerinde büyük ölçüde değişmediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, kalıp sıcaklığının artmasıyla çekme mukavemetinin azaldığını buna rağmen darbe dayanımının iyileştiğini belirlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda dikkat çekici bir sonuç olarak, polimer harman malzemenin camsı geçiş sıcaklığına yakın kalıp içi sıcaklıklarda üretilen malzemenin dengeli mekanik özelliklere sahip olduğunu ve daha yüksek kalıp içi sıcaklıklarda harman malzemelerde bozulmaların ve kötü mekanik özelliklerin görüldüğünü belirlemişlerdir. Literatürde PMMA/ABS harman malzemeler kullanılarak elde edilen çekme ve darbe dayanımlarının karşılaştırıldığı grafikler bu kısımda bahsi geçen literatür çalışmalarında elde edilen sonuçları özetleyecek şekilde verilmiştir (Şekil 1.14).

1.6.4. TPU Harmanlar

Polimer harmanlama yöntemi kullanılarak istenilen mekanik özelliklere sahip malzeme eldesinde termoplastik polimerin darbe dayanımının ve tokluğunun iyileştirilmesi amacıyla elastomerik termoplastik poliüretan (TPU) polimerin kullanımı önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Avalle & Romanello (2018), TPU elastomerik termoplastığının polimer harmanlama yöntemi kullanılarak mekanik özelliklerin geliştirilmesinde kullanılabileceğini belirlemiştir. TPU polimerin harmanlanacağı

malzemenin darbe dayanımı, tokluğu, aşınma/çizilme direnci ve mekanik özelliklerinin dengelenmesi veya iyileştirilmesi amacıyla farklı polimerler ile harmanlanmasına ait uygulamalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Lin vd., (2020) çalışmalarında, eriyik karıştırma yöntemi ile ön ekstrüzyon sonrası enjeksiyon kalıplama üretim yöntemi kullanarak %10-30 TPU içeren PP/TPU polimer harmanlar üretmişlerdir. Testler sonucunda PP/TPU harman yapının darbe tokluğunun ve eğilme dayanımının TPU bileşim oranı ile büyük oranda değişmediğini belirlemişlerdir. TPU'nun polimer harman bileşeni olarak kullanıldığı bir diğer çalışmayı Fang vd., (2022) tamamlamışlardır. Çalışmalarında, düşük TPU bileşim oranlarında (%1-10) PLA/TPU polimer harmanların kimyasal, morfolojik, termal, mekanik özellikleri ile darbe dayanımlarını incelemişlerdir. Çekme ve darbe testleriyle TPU bileşim oranının artmasıyla çekme dayanımı ve elastisite modülünün azalmasına rağmen darbe dayanımının yaklaşık %30 oranında iyileştiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda SEM incelemeleri ve DMA analizleri ile PLA/TPU harmanların karışmayan yapıda olduğunu belirlemişlerdir. Karışabilirliğin ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla PLA/TPU harmana uyumlaştırıcı olarak PLA/TPU kopolimer katkısı gerçekleştirmişler ve yapıya uyumlu bu katkı ile PLA'dan ve PLA/TPU harmandan daha üstün mekanik özelliklere sahip PLA/TPU/PTC harman malzeme geliştirmişlerdir. Çalışmalarının önemli bir sonucu olarak hem çekme dayanımı hem darbe dayanımının hem de rijitlik açısından PLA ve farklı bileşim oranlarında PLA/TPU harmanlara kıyasla daha dengeli mekanik özelliklerin PLA90/TPU10/PTC5 bileşim oranı ile elde edildiğini ve bu davranışı ile mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Fang vd., 2022).

Mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan ve önceki bölümlerde de bahsedilen PMMA ve ABS gibi mühendislik polimerlerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi veya dengeli ve istenilen özelliklerde malzeme elde edilmesi amacıyla TPU polimer ile harmanlanmasına ait çalışmalarda literatürde yer almaktadır. Örneğin, Suresha & Lee (2008) %5-20 bileşim oranlarında TPU içeren PMMA/TPU harmanların mekanik ve termal özelliklerini enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen harman numuneler ile araştırmışlardır. Testler sonucunda PMMA yapıya TPU ekleme ile çekme dayanımının ciddi oranda azaldığı ancak kopma uzaması ve darbe dayanımında ise önemli ölçüde iyileşme elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Örneğin, %20 TPU ile hazırlanan PMMA/TPU harmanın kopma uzaması ve darbe dayanımı PMMA'ya kıyasla sırasıyla yaklaşık 10 kat ve 2,2 kat artış gösterdiğini bulmuşlardır. ABS/TPU harman filament üretimi ile FFF yöntemi

kullanılarak farklı bileşim oranlarında üretilen numunelerin kimyasal, morfolojik ve mekanik özelliklerini de Leon vd., (2019) çalışmalarında araştırmışlardır. ABS ve TPU polimer bileşenlerin uyumu için FTIR spektrum analizleri ve Raman mikroskop incelemelerini ile hidrojen bağların yardımıyla oluşan yeni moleküler etkileşimlerin gözlemlendiğini ve iki polimer bileşen arasında iyi derecede uyumun sağlandığını belirtmişlerdir. Çekme testleri sonucunda ise, %10 TPU bileşim oranı dışında artan TPU oranı ile akma dayanımı ve elastisite modülünün ciddi azalma eğilimi gösterdiğini buna rağmen kopma uzamasının arttığını bulmuşlardır. %10 TPU bileşim oranına sahip ABS/TPU harmanının ise ABS'ye kıyasla daha üstün akma dayanımı ve elastisite modülüne sahip olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda düşük bileşim oranına sahip TPU ile elde edilecek ABS/TPU harmanların kolay üretilmesi ve ticari kullanım alanları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda ABS'ye önemli bir alternatif olabileceğini değerlendirmişlerdir.

1.6.5. Polimer Harmanların Yorulma Davranışı

Polimer harmanlama yöntemi kullanılarak termal, mekanik, kimyasal ve morfolojik özelliklerin dengeli ve istenilen başarı kriterlerine uygun malzemeler geliştirilmesinin önemi önceki bölümlerde vurgulanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında polimer harmanların artan kullanım oranı nedeniyle yukarıda belirtilen özelliklerin yanı sıra yorulma ömür performansı veya yorulma davranışı da önem arz eden bir performans kriteri olarak uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu kapsamda yorulma ömrü davranışı ve yorulma çatlak ilerleyişi gibi araştırma alanlarında hem enjeksiyon kalıplama hem de eklemeli imalat yöntemleri ile elde edilen polimer harmanların yorulma davranışları literatürde gerçekleştirilen çalışmalarla araştırılmıştır.

Örneğin, Kiani vd., (2023), çift vidalı ekstrüzyon ile ön karıştırma sonrası filament üretim hattı kullanarak PLA/PCL harman filamentleri %10, %20 ve %30 PCL bileşim oranlarına sahip olacak şekilde üreterek harman malzemelerin mekanik, termal ve yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışma kapsamındaki yorulma testlerini tam tersinir yükleme koşulunda kuvvet kontrollü olacak şekilde 30 Hz frekansta dönel eğmeli yorulma test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Yorulma test sonuçları ile %10 PCL bileşim içeren PLA/PCL harmanının tüm gerilme genliklerinde en üstün yorulma ömrü davranışına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca %20 PCL bileşim oranına sahip PLA/PCL harmanının ise düşük gerilme genliklerinde PLA'ya kıyasla üstün performans sergilediğini ancak yüksek

gerilme genliğinde yorulma çevrim sayısının ciddi düzeyde düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bureau vd., (1998) PS/HDPE harmanları 95/5, 85/15 ve 70/30 yüzde bileşim oranlarında enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üreterek, HDPE bileşim oranının ve SEBS uyumlaştırıcı katkının mekanik özellikler ve yorulma çatlak ilerleyişi davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yorulma çatlak ilerleyişi testlerini 2 ve 20 Hz yükleme frekanslarında gerilme oranı (R) 0,1 olacak şekilde yük kontrollü olarak tamamlamışlardır. Testler sonucunda harman yapıda artan HDPE bileşim oranı ile PS/HDPE malzemenin yorulma çatlak ilerleyişi hızının ciddi oranda azaldığını ve bu azalmanın SEBS uyumlaştırıcı ilavesi ile daha da arttığını bulmuşlardır. Ayrıca, çatlak ilerleyişinin PS/HDPE harman yapıyı oluşturan bileşenlerin oranlarına, yapının morfolojisine ve test koşullarına bağlı olarak büyük oranda değiştiğini değerlendirmişlerdir.

Benzer şekilde mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan ve bir mühendislik termoplastik polimer olarak adlandırılan ABS ve ABS temelli polimer karışımların uygulamalara özgü olarak değişken gerilme ve frekanslı yüklemelere maruz kalması nedeniyle yorulma davranışının önemli bir mekanik davranış olduğu bilinmektedir. Literatürde hem saf ABS hem de ABS temelli polimer karışımların yorulma davranışını inceleyen çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalarda odak noktası genellikle PC/ABS harmanlar olmakla birlikte harman yapıyı oluşturan bileşim oranı, yükleme frekansı, ortalama gerilme etkileri gibi yorulma parametrelerinin ömür çevrim davranışı veya yorulma çatlak ilerleyişi üzerinden değerlendirildiği çalışmalar ise sınırlıdır. Bu nedenle ABS, PMMA ve TPU polimer malzemeler ile oluşturulan harmanların yorulma davranışı üzerine literatürde yer alan çalışmalar mevcut sınırlı literatür üzerinden özetlenmiştir. Örneğin, Lugo vd., (2014) ABS numunelerin mekanik davranışını çekme, basma ve tek eksenli yorulma testleri ile incelemişler ve yorulma davranışının temsil edilmesinde mikroyapısal modelleme yaklaşımının performansını araştırmışlardır. Yorulma testlerini tam çevrim yükleme altında farklı frekanslarda geniş bir birim şekil değiştirme aralığında tamamlamışlardır. Böylece ortalama birim şekil değişimi, frekans ve termal etkilerin yorulma hasarı oluşumu ve ilerleyişi mekanizmasına etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda artan yükleme frekansı ve ortalama birim şekil değişimi ile yorulma ömrünün arttığı ve hasar davranışının çatlak başlangıcı ve kayma bantları ile meydana gelen ilerleyişten termal gerilme yumuşamaları etkisiyle farklı forma dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Farklı yükleme frekansları ve değişken frekanslı yüklemeler altında polimer esaslı malzemelerin davranışlarının incelenmesinde ölçüm bölgesi ve numune yüzeyindeki sıcaklık değişimi

önemli bir role sahip olduğu bilinmektedir. Test sıcaklığı ile saf ABS ve ABS/PC harman malzemenin mekanik özellikleri ve yorulma davranışlarını Mura vd., (2018) geniş bir sıcaklık aralığında (-27°C , 22°C ve 85°C) gerçekleştirilen testler ile araştırmışlardır. Artan test sıcaklığı ile ABS malzeme için yaklaşık %50, PC/ABS harman malzeme için yaklaşık %10 oranında yorulma ömrünün azaldığını bulmuşlardır. Önemli bir sonuç olarak, ayrıca her bir sıcaklık değeri için PC/ABS polimer harmanının saf ABS'ye kıyasla üstün çekme ve yorulma dayanım performansı sergilediğini belirlemişlerdir. Handge vd., (2012) ise enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen ve PA6 bileşim oranı sırasıyla %30 ve %70 olan PA6/ABS polimer harman malzemelerin mekanik özellikleri ve yorulma çatlak ilerleyişi davranışlarını incelemişlerdir. Yorulma testleri sonucunda ABS'nin kırılma tokluğunun %70 PA6 ilave ve uyumlaştırıcı katkı (%6 SANMA) kullanımı sayesinde ABS'ye kıyasla yaklaşık 10 kat iyileştiğini bulmuşlardır. Polimer harmanların yorulma davranışının yanı sıra yorulma testleri sırasında uygulanan yükleme frekansının malzemenin yorulma davranışına olan etkilerini Mellott & Fatemi, (2014) tarafından enjeksiyon kalıplama ile üretilen PP ve PO termoplastikler ile incelemişlerdir. Bu çalışma ile eriyik akış yönü, kalınlık, test sıcaklığı ve yükleme frekansı gibi parametrelerin yorulma davranışı üzerindeki etkileri kapsamlı deneysel çalışmalar ile araştırılmışlardır. Yük kontrollü deneyler sonucunda eriyik akış yönünün her iki malzemenin yorulma davranışına etkisinin önemli düzeyde olmadığını ancak yükleme frekansının numune yüzeyinde sıcaklık artışına neden olması nedeniyle yorulma ömrünün büyük oranda azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Termoplastik polimerlerin termal, optik, termomekanik, kimyasal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle dengeli özelliklerinin elde edilmesinde polimer harmanlama yöntemi düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu nedenle polimerlerin harmanlanmasıyla üretilen polimer harmanların karışabilirliği, termal davranışları, mekanik özellikleri ve kimyasal yapıları ilgi çeken bir araştırma alanıdır. Mühendislik polimerleri olarak bilinen, endüstriyel ve akademik çalışmalarda sıkça odak noktası olan ABS ve PMMA gibi önemli termoplastiklerin hem saf hem de harman yapılarının mekanik davranışlarının incelenmesi üzerine birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan polimer malzemelerde darbe dayanımının iyileştirilmesi, yapının tok ve üstün mekanik özelliklere sahip olması amacıyla ABS ile harman yapıların

oluşturulduğu bilinmektedir. Ayrıca mühendislik polimerlerinin dış ortamda maruz kalacağı UV direnci, aşınma direnci, alev geciktiriciliği ve termal kararlılığında iyileşmelerin PMMA ile harmanlanması sonucunda elde edilebileceğini literatürdeki çalışmalar ortaya koymaktadır. Ek olarak, son yıllarda elastomerik termoplastiklerin yapının tokluk ve darbe dayanımını iyileştirmesine yönelik ikili ve üçlü polimer harmanlarda kullanımına yönelik çalışmalar yer almaktadır.

Termoplastik malzemelerin kullanıldığı havacılık, otomotiv sanayii gibi uygulamalarda kritik yüklemelere maruz bırakılan parçaların tasarımı değerlendirildiğinde, sağlanması gereken başarı kriterleri; i) değişken frekanslı yüklemelere dayanıklı, ii) darbe/çarpmaya anında yeterli darbe performansını sağlayan, iii) farklı tasarımlar gerçekleştirilmesine imkân tanıyan ve seri üretime uygun malzeme kombinasyonuna sahip olması şeklinde sıralanabilir. Belirtilen başarı kriterleri ile havacılık ve otomotiv sanayii gibi uygulama alanlarındaki parçaların tasarımında yalnızca üstün darbe dayanımının sağlanmasının temel amaç olmadığı ayrıca belirli bir darbe yükü altında bileşenin hasara uğramasının tasarıma uygun mekanik davranış kriteri olduğu değerlendirilmektedir. Buna ilaveten sabit/değişken yükleme frekanslı ve değişken yüklerdeki ömrünün yapısal ürünlerden beklenen ömür kriterini sağlayacak yapıda olması gerektiği vurgulanmaktadır. (Hambali vd., 2009; Sapuan vd., 2002). Bu nedenle mühendislik uygulamalarında kullanılan ABS veya ABS ile farklı polimerlerin karışımından polimer harman malzemelerin sergilemesi gereken farklı başarı kriterlerine göre tasarlanması bu araştırmaların ve mühendislik uygulamalarındaki tasarım aşamasının önemli bir ayağını oluşturduğu bilinmektedir (Kiani vd., 2013; Fang vd., 2017).

Bu bağlamda, son yıllarda polimer harmanlama yöntemi ile üretilen harman malzemelerin karışabilirliği, morfolojisi, kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde bileşim oranı ve test koşullarının etkisinin incelendiği bazı deneysel ve analitik çalışmalar yapılmasına rağmen, harman yapıların yorulma davranışı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar tatmin edici düzeyde yeterli olgunluğa henüz ulaşamamıştır. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında ABS ve PMMA gibi mühendislik termoplastiklerinin kullanıldığı polimer harman malzemelerin mekanik özellikleri ve yorulma davranışlarının anlaşılmasına yönelik daha fazla deneysel araştırmaya ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında, polimer harman malzemelerin mekanik, kimyasal, termomekanik, yapısal ve yorulma davranışını önemli ölçüde etkileyen harman içerisindeki bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı, yükleme frekansı, yükleme oranı, ortalama gerilme gibi çekme ve yorulma

test parametrelerinin PMMA/ABS, ABS/TPU polimer harman malzemelerin mekanik ve yorulma davranışına etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, saf ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harman malzemelerin elastisite modülü, akma ve çekme dayanımları, yorulma ömür karakteristiği gibi mekanik davranışları temel araştırma kriterleri olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında yer alan deneysel incelemeler, karakterizasyon, mekanik özellikler ve yorulma davranışının incelendiği temelde üç ana bölüme ayrılabilir. Burada karakterizasyon analizleri polimer harman malzemelerin kimyasal, termal ve termomekanik özelliklerinin harmanı oluşturan polimerlerin bileşim oranına bağlı olarak değişimlerini ve bu oranlarda yapının karışabilirliğini ortaya koyan incelemeleri içermektedir. Polimer harmanların elastisite modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin bileşim oranı ve şekil değiştirme hızına bağlı olarak belirlenmesine yönelik çalışmalar ise mekanik özelliklerin belirlendiği deneysel incelemeler ile gerçekleştirilmiştir. Harman yapıların yorulma davranışı ise bileşim oranı, gerilme oranı, yükleme frekansı, ortalama gerilme, üretim parametreleri ve numune kalınlığı gibi etkileri içerecek şekilde yorulma testleri ile ortaya koyulmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harman malzemeler üretilmiş, üretilen harman malzemelerin kimyasal, termomekanik, termal karakterizasyonları, mekanik özellikleri ve yorulma ömür davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Tez kapsamında kullanılan malzemelere ait deneysel çalışmalar polimer harman numunelerin üretimi, karakterizasyon analizleri, mekanik testler ve yorulma testleri olarak dört kısımda gerçekleştirilmiştir.

2.1. Polimer Harman Numunelerin Üretimi

Bu kısımda tez kapsamında incelenen PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harman numunelerin üretimine ait bilgiler detaylı olarak sunulacaktır. Tez çalışmasında iki farklı üretim yöntemi ile elde edilen numuneler incelenmiştir. Bu numunelerden PMMA/ABS harman numuneler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilirken, ABS/TPU harman numuneler ise harman filamentlerin kullanıldığı eriyik yığma üretim yöntemi ile üç boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilmiştir.

2.1.1. Malzemeler

Bu çalışmada endüstriyel kapsamda kullanılan ve farklı ticari üreticilerden tedarik edilen polimer granül malzemeler kullanılmıştır. PMMA/ABS polimer harmanların üretiminde, ODELO Otomotiv Aydınlatma A.Ş. tarafından enjeksiyon kalıplama yöntemi ile otomotiv aydınlatma grubundaki (lens ve far muhafazası/yuvası) ürünlerin üretiminde kullanılan PMMA ve ABS granül malzemeler tercih edilmiştir. Granül malzemelerin tercihi sadece ticari olarak üretimi ve aydınlatma grubunda kullanım durumu göze alınarak değil aynı zamanda enjeksiyon kalıplama ile üretime uygun eriyik akış hızı değerlerine sahip olacak şekilde seçilerek kullanılmıştır. Bu seçim her iki granül malzeme için birbirine yakın değerdeki eriyik akış hızları ile harman yapıyı oluşturmaya elverişli bir seçim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla PMMA malzeme granül halde Sumitomo firmasından otomotiv sınıfı Sumipex Clear 011 kodlu olarak ABS malzeme ise granül halde Lotte Advanced Materials firmasından Starex Sr-0325lts kodlu olarak temin edilmiştir.

Malzemelere ait fiziksel özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi PMMA ve ABS granül malzemelerin eriyik akış hızları birbirine oldukça yakın değerlerde ve hem enjeksiyon kalıplama hem de harman yapı oluşturulmasına uygun bir yapı sergilemektedir.

ABS/TPU polimer harmanlar için kullanılan granül malzemeler de ticari olarak temin edilerek kullanılmıştır. Bu harman yapıda kullanılan ABS granül LG firmasından HI121H koduyla tedarik edilerek, TPU granül malzeme ise Sipchem firmasından Ravathane 140A koduyla tedarik edilerek kullanılmıştır. Eriyik yığma yöntemi ile üretimde kullanılan ve polimer harmanı oluşturan ABS ve TPU malzemelere ait özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi enjeksiyon kalıplama ile üretimde kullanılan ABS malzemeye kıyasla daha yüksek eriyik akış hızına sahip olan eriyik yığma üretim yöntemine uygun yapıda ABS türü tercih edilmiştir. Buna bağlı olarak harman malzemeyi oluşturacak olan TPU malzemede benzer eriyik akış hızına sahip olacak granül malzeme tercih edilerek kullanılmıştır. Polimer harman yapıları oluşturacak olan granül malzemelerin Tablo 2.1’de verilen mekanik özellikleri, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman yapılar için ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Örneğin, PMMA/ABS harman yapı için kullanılan granül malzemelerde PMMA granülün üstün akma ve eğilme dayanımına sahip olduğu ancak ABS granüle kıyasla oldukça düşük darbe dayanımı sergilediği görülmektedir. Benzer şekilde ABS/TPU harman yapı için kullanılan granül malzemelerde ABS granülün üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ve TPU granülün eğilme ve darbe dayanımı açısından değerlendirilmesi çok düşük performanslar sergilediği görülmektedir. TPU granül malzemenin eğilme ve darbe dayanımında gözlenen bu durum üretici firma katalog ve teknik veriler kitapçıklarında da verilmiştir.

Tablo 2.1. Numunelerin üretildiği granül malzemelere ait fiziksel ve mekanik özellikler

Özellikler	Granül Malzemeler			
	SUMIPEX CLEAR	STAREX SR- 0325LTS	HI121H	RAVATHANE 140A
Eriyik Akış Hızı (g/10dk)	4,2	4,0	22	25
Akma Dayanımı (MPa)	78	43,1	50	35
Eğilme Dayanımı (MPa)	115	60,8	82	-
Darbe Dayanımı (kJ/m ²)	1,4	11,8	22	-

2.1.2. PMMA/ABS Harman Numunelerin Üretimi

Mekanik davranış, yorulma ömrü, kimyasal yapı, fiziksel ve termal özelliklerin belirlenmesi amacıyla saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarında PMMA/ABS polimer harman numunelerin üretimi bu başlık altında detaylıca anlatılacaktır.

Tez kapsamında kullanılan saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarında PMMA/ABS polimer harman numunelerin üretimi enjeksiyon kalıplama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Harman malzemelerden çift vidalı ekstrüzyon sistemi ile donatılmış enjeksiyon kalıplama makinesinde 150 mm x 150 mm x 3 mm boyutlarında düz plakalar üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile polimer harman numunelerin üretimi tez çalışmasına teknik destek sağlayan ODELO Otomotiv Aydınlatma A.Ş. bünyesinde bulunan 160 ton kapasiteli ve çift vidalı eriyik karıştırma ekipmanına sahip Haitian MA 1600 plastik enjeksiyon makinesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1’de tez çalışmasında enjeksiyon kalıplama işleminin gerçekleştirildiği Haitian MA 1600 enjeksiyon kalıplama cihazına ait fotoğraf ve Tablo 2.2’de ise enjeksiyon kalıplama cihazına ait spesifik özellikler verilmiştir. Saf ve harman numunelerin enjeksiyon kalıplama işlemi öncesinde, PMMA ve ABS granül hammaddeler nem nedeniyle ortaya çıkabilecek olumsuz etkilerin (mikro boşluk oluşumu, büzülme, çökme ve geometrik süreksizlikler gibi) önüne geçilmesi amacıyla vakumlu fırın içerisinde sırasıyla 85°C ve 90°C’de 4 saat bekletilmiştir (Kim vd., 1993a, b; Chen vd., 2018; Reinaldo vd., 2020). Granüllere uygulanan kurutma işlemi sonrasında PMMA ve ABS granüller istenilen bileşim oranına bağlı olacak şekilde ilk olarak fiziksel karıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Bu karışım hazırlanırken granüllerin ağırlık ölçüsü baz alınarak istenilen orana bağlı olarak granül ön karışımlar hazırlanmıştır. Örneğin, %60 PMMA ve %40 ABS oranında PMMA/ABS harman plaka enjeksiyonu öncesinde 5 kg ağırlıklı bir karışımın 3 kg’lık kısmı PMMA ve 2 kg’lık kısmı ABS olacak şekilde granül malzemeler bir araya getirilmiştir. Ayrıca, fiziksel ön karışım işlemi enjeksiyon işleminde besleme bölgesi öncesinde bulunan granül ön karıştırma cihazı kullanılarak granüllerin birbiri içerisinde karıştırılmasıyla başlatılmıştır. Bu işlem sonrasında istenilen bileşim oranına göre hazırlanan granül PMMA ve ABS hammaddeler vida kovan sistemi içerisine besleyici yardımıyla iletilmiştir. Burada vida kovan sisteminde yer alan çift vidalı ekstrüzyon içerisinde karıştırma bölgesi boyunca istenilen harman bileşim oranına sahip eriyik polimer harman elde edilerek eriyik haldeki PMMA/ABS enjeksiyon bölgesinden belirli bir basınç ve sıcaklık altında kalıba iletilmiştir. Üretim süreci, kalıba gönderilen eriyik harman

malzemeler ile düz plaka şeklindeki kalıplama işlemi sonrasında tamamlanmıştır. Enjeksiyon kalıplama sırasında kullanılan üretim parametreleri ise granüllerin temin edildiği üretici firma teknik veriler kitapçıklarındaki öneriler ve literatürdeki çalışmalar ışığında belirlenmiştir (Kim vd., 1993a,b; Reinaldo vd., 2018; Reinaldo vd., 2020; Chen vd., 2018; Sumitomo Kimyasal 2015, Lotte Kimyasal, 2024). Belirlenen üretim parametreleri ise Tablo 2.3'te verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi saf granüller veya fiziksel olarak karıştırılan harman yapıyı oluşturacak granüller enjeksiyon kalıplama üretiminde 230-255°C sıcaklık aralığındaki sıcaklık profili ile üretim sürecini tamamlamaktadır. Bu sıcaklık profili ilk olarak granüllerin vida kovan sistemine giriş yaptığı besleme bölgesinden başlamakta ve devamında sırasıyla ergime, transfer, karıştırma ve nozul bölümlerinden sonra enjeksiyon kalıplama süreci tamamlanmaktadır. Sıcaklık profilinin temsil ettiği bölgeler Şekil 1.6b'den görülmektedir. Belirlenen üretim parametreleri ile PMMA, ABS ve PMMA/ABS harman numune üretimleri tamamlanmıştır. Düz plaka şeklindeki saf ve harman numunelerin üretiminde tasarlanan kalıp aynı zamanda farklı kalınlıklarda (2, 3 ve 4 mm) enjeksiyon kalıplama işlemine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece test numunesinin kalınlığının mekanik özellikler ve yorulma davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, enjeksiyon kalıplama üretim parametre etkilerinin incelendiği bölüm 1.3.1 'de verilen literatür çalışmaları incelendiğinde tutma basıncının mekanik özellikler üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle tutma basıncının enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen PMMA/ABS harman malzemelerin mekanik davranışına ve yorulma ömrü performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla 3 farklı tutma basıncında (0, 40 ve 70 bar) harman numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı kalınlıklardaki düz plakalar ise yalnızca numune kalınlığının mekanik davranışa ve yorulma ömrü performansına etkilerinin incelenebilmesi amacıyla sabit 40 barlık enjeksiyon basıncında üç farklı kalınlıkta (2, 3 ve 4 mm) olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 2.1. Enjeksiyon kalıplama işleminin gerçekleştirildiği Haitian MA 1600 plastik enjeksiyon makinesine ait fotoğraf

Tablo 2.2. Enjeksiyon kalıplama makinasına ait özellikler

	Birim	Haitian MA1600
Vida Çapı	mm	45
Vida Boy/Çap Oranı (L/D)	-	20
Enjeksiyon Hacmi	cm ³	320
Enjeksiyon Basıncı	MPa	169
Kilitleme Kuvveti	ton	163

Tablo 2.3. Enjeksiyon kalıplama sırasında kullanılan üretim parametreleri

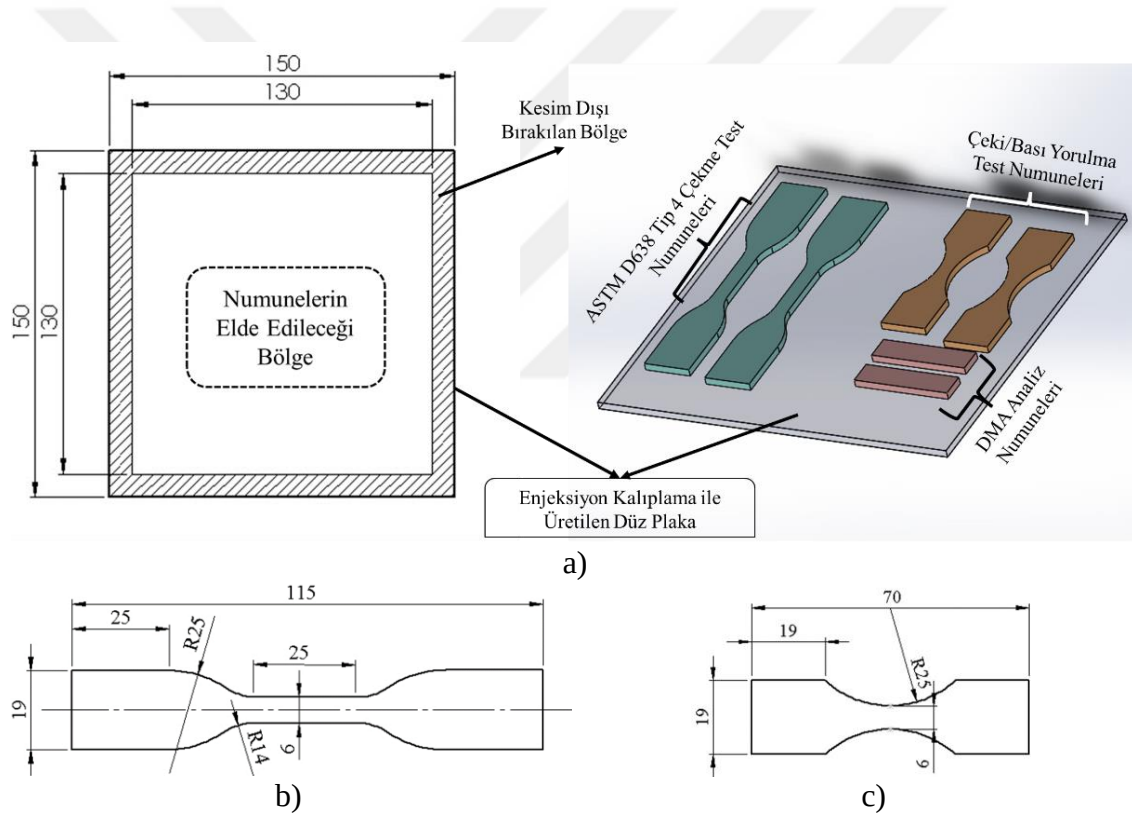
Enjeksiyon Parametreleri								
Eriyik (°C)	Sıcaklık	Profil	Besleme	Ergime	Ergime	Transfer	Karıştırma	Nozul
			230	240	250	250	255	245
Enjeksiyon Basıncı (bar)						140		
Enjeksiyon Zamanı (sn)						1,5		
Tutma Basınçları (MPa)			0		40		70	100
Tutma Zamanı (sn)						3		
Soğutma Zamanı (sn)						15		

Saf ve farklı bileşim oranlarında harman yapılarda enjeksiyon kalıplama ile PMMA/ABS düz plakalar elde edildikten sonra bu plakalardan termomekanik, mekanik ve yorulma test numuneleri ise su jeti kesim yöntemi ile elde edilmiştir. Su jeti kesim ile sırasıyla DMA, çekme ve yorulma test numuneleri üretilmiştir. Düz plakalardan su jeti ile test numune eldesi, talaşlı imalat ve lazer kesimlerde ortaya çıkan sıcaklık nedeniyle numunelerde olası mekanik ve iç yapısal özelliklerdeki değişimlerin önüne geçilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Düz plaka şeklinde plakalardan test numuneleri elde edilmesiyle enjeksiyon kalıplama ile üretimde numune geometrisine sahip kalıba direkt enjeksiyon sırasında numune ölçüm bölgesi ve yüzeyinde meydana gelen geometrik kusurlar, çökme ve büzülme gibi etkilerin de önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Tez çalışması kapsamında testlerde kullanılan DMA, çekme ve yorulma numune geometrileri ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Çekme ve yorulma testlerinde için numune geometrilerinde ASTM D638 standardı referans alınmıştır. Çekme test numuneleri, enjeksiyon kalıplama ile üretilen düz plaka boyutlarına (150 mm x 150 mm) uygun olacak şekilde ASTM D638 Tip 4 numune geometrisi kullanılarak elde edilmiştir. Yorulma testlerinde kullanılacak test numuneleri ise yükleme oranına göre düz plakalardan iki farklı geometride elde edilmiştir. Yükleme gerilme oranının (R) 0,1 olduğu çeki/çeki yüklemesinde çekme testinde de kullanılan ASTM D638 Tip 4 numunesi ASTM D7791 standardı referans alınarak tercih edilmiştir. Tam tersinir gerilme yükleme durumu için (R = -1) numune ölçüm bölgesinde ve yüzeyinde eğilme/burkulma ve sıcaklık artışı etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı ve ölçüm bölgesinde herhangi düz bir kesit bulunmayacak şekilde ASTM D638 Tip 4 numunesinden uyarlanan geometri kullanılmıştır. DMA analizlerinde ise düz plaka üzerinden 40 mm x 10 mm dikdörtgen kesitli numuneler ASTM D5023 standardına uygun olarak elde edilmiştir. DMA, çekme ve yorulma test numunelerine ait geometrik boyutlar, düz plaka üzerindeki su jeti kesim yerleşimlerine ait şematik gösterim ve test numunelerinin kesimi sonrası düz plakaya ait gerçek görüntü Şekil 2.2’de sırasıyla verilmiştir. Şekil 2.2a’dan görüldüğü gibi numuneler düz plakanın 130 mm x 130 mm bölgesinden elde edilmiştir. Bu bölgeden elde edilmesinin nedeni ise su jeti kesim sırasında dış bölgeden plakanın sabitlenerek kesim sırasında geometrik süreksizliklerin önüne geçilmesinin amaçlanmasıdır. Düz plaka üzerindeki örnek numune yerleşiminin verildiği Şekil 2.2b’den görüldüğü gibi plaka üzerinden çekme, yorulma ve DMA test numunelerinin eldesine imkân tanıyan bir yerleşim planı kullanılmıştır. Şekil 2.2d’de verilen kesim sonrası örnek bir plakadaki yerleşim incelendiğinde, numune yerleşiminin enjeksiyon kalıplama

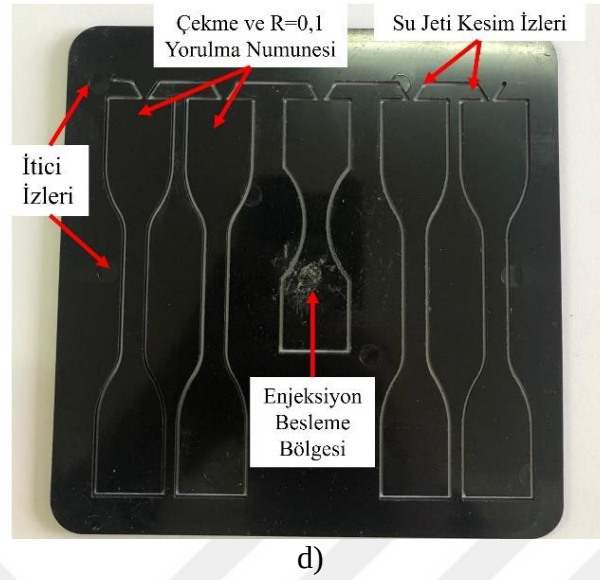
sonrası kalıptan çıkışta kullanılan iticiler sonucu oluşan geometrik izlerin numune ölçüm bölgesine denk gelmeyecek şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Aynı zamanda yerleşime rağmen numune ölçüm bölgesine denk gelen izlerin yer aldığı numuneler ise mekanik testlerde kullanılmamıştır.

Düz plakalardan elde edilen saf ve harman yapıdaki numuneler bileşim oranlarına bağlı olarak ayrı ayrı kodlanmıştır. Bu kodlamaya bağlı olarak kesim sonrası numuneler muhafaza edilmiş ve mekanik testler sonrası numuneler benzer şekilde kodlamaya uygun olarak ayrı ayrı saklanmıştır. Tablo 2.4'te ise farklı bileşim oranlarında enjeksiyon kalıplama ile üretilen PMMA/ABS harman numunelerin tasnifinde kullanılan numune kodlandırması verilmiştir.



Şekil 2.2. PMMA/ABS polimer harmanlarda a) düz plaka üzerindeki su jeti kesimindeki numune yerleşiminin şematik gösterimi, b) ASTM D638 Tip 4 çekme ve çeki/çeki, c) tam tersinir (çeki/bası) yorulma test numunelerine ait geometriler ve d) kesim sonrası plaka gerçek görüntüsü (ölçüler mm cinsindendir)

Şekil 2.2'nin devamı



Tablo 2.4. PMMA/ABS polimer harman numunelere ait bileşim oranları ve kodlamalar

Numune Kodu	Ağırlıkça Bileşim Oranı (%)	
	PMMA	ABS
P100	100	0
P80A20	80	20
P60A40	60	40
P40A60	40	60
P20A80	20	80
A100	0	100

2.1.3. ABS/TPU Harman Numunelerin Üretimi

ABS/TPU harman malzemelerin mekanik, yorulma, kimyasal, termomekanik ve termal özelliklerin incelenmesi amacıyla saf ABS ve farklı bileşim oranlarında üretilen ABS/TPU polimer harman numunelerin üretimi bu başlık altında detaylıca anlatılacaktır.

ABS/TPU harman malzemeler ile test numunelerinin üretimi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar; i) belirlenen bileşim oranlarında ABS/TPU harman granüllerin üretimi, ii) ABS/TPU polimer harman granüllerden eklemeli imalatla kullanılmak üzere filament üretimi ve iii) ABS/TPU filamentler ile test numunelerinin 3D yazıcılarda elde edilmesi olarak sıralanmaktadır. Bu kapsamda ABS/TPU polimer harman

malzemelerin elde edilmesi amacı ile ABS için LG HI121H ve TPU için ise 90 Shore A sertlik değerine sahip Ravathane 140A granül malzemeleri kullanılmıştır. İlk olarak istenilen bileşim oranlarında ABS/TPU polimer harman granüller Gülnar Makinenin ürettiği boy çap (L/D) oranı 48 olan ve 16 mm çapında vidaya sahip çift vidalı ekstrüder sistemi kullanılmıştır. Şekil 2.3a'da çift vidalı ekstrüder sistemi ile granül malzemenin elde edildiği üretim hattına ait fotoğraf verilmiştir. ABS ve TPU polimer malzemeler istenilen bileşim oranında harman malzemelerin elde edilmesi işlemi öncesi nem nedeniyle oluşacak (mikro boşluk, yetersiz yapışma, katmanlar arası ayrılma gibi) olumsuz etkilerin önüne geçebilmek amacıyla vakumlu fırında 85°C'de 4 saat kurutulmuştur. Bu kurutma süresi ABS ve TPU granül hammaddelerin teknik verileri ve literatürde gerçekleştirilen çalışmalar yardımıyla belirlenmiştir (de Leon vd., 2019; Doner vd., 2023). Kurutma işlemi sonrasında istenilen bileşim oranına bağlı olarak ABS ve TPU hammaddeler fiziksel ön karıştırma işlemine tabii tutulmuş ve ekstrüder içerisindeki kovan bölgesine besleme hunisi yardımıyla gönderilmiştir. Bu karışma işleminde üretimi yapılacak filament miktarına ve bileşim oranı dağılımına bağlı olarak ABS ve TPU granüller ağırlıkça belirlenip karıştırılmaktadır. Örneğin, 1 kg'lık bir harman filament üretiminde %90 ABS ve %10 TPU bileşim oranı için 900 g ABS ve 100 g TPU granül hammaddeler karıştırılarak harman granül üretimine hazır hale getirilmiştir. Üretim sürecindeki ilk aşamada çift vidalı ekstrüder sisteminde ABS/TPU harman granülleri oluşturmak amacıyla kovan Tablo 2.5'te verilen sıcaklık profilinde olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık profili, kovana hammadde beslenen bölgede 180°C'tan başlayan ve nozul bölgesinden 205°C ile eriyik harman malzemenin ekstrüzyon ile tamamlanan bir sıcaklık profilini temsil etmektedir (de Leon vd., 2019; Memarian vd., 2016; Rigotti vd., 2020, Doner vd., 2023). Burada çift vidalı ekstrüzyon içerisinde karıştırma bölgesi boyunca istenilen harman bileşim oranına sahip eriyik harman elde edilmektedir. Daha sonra eriyik haldeki bu harman malzeme ekstrüder ucundaki nozuldan sürekli ve dairesel kesitli bir şerit halinde belirli bir basınç ve sıcaklık altında ilk olarak soğutma suyu havuzuna iletilmiştir. Soğutma suyu havuzunda eriyik haldeki harman malzemenin polimerizasyon süreci ile katı bir form alması sağlanmaktadır. Katı bir form alan dairesel şerit halindeki harman malzeme hattın devamında yer alan bir kırıcı vasıtasıyla tekrar harman granüller haline getirilmiştir. Böylece bu aşamada farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU polimer harman granüller elde edilmiştir. Elde edilen bu granüller istenilen bileşim oranlarında ABS/TPU harman filament üretimi için bir sonraki aşamada kullanılmıştır.

Tablo 2.5. ABS/TPU polimer harman numunelerin ekstrüder ve filament üretim hattındaki üretimi sırasındaki sıcaklık profilleri

Ekstrüder Kovan Sıcaklık Bölgeleri						Soğutma Suyu	
	Besleme	Ergime	Karıştırma	Transfer	Nozul		
Sıcaklık (°C)	180	190	195	198	205	20	
Filament Üretim Hattı Sıcaklık Bölgeleri						Soğutma Suyu	
	Besleme	Ergime	Transfer	Kalıp	Havuz 1	Havuz 2	
Sıcaklık (°C)	170	185	195	200	65	24	

ABS/TPU harman filament üretimi sırasında ise 30 mm çapa sahip, L/D oranı 24 olan tek vidalı bir ekstrüder ve sıcak-soğuk soğutma tankları ile donatılmış filament üretim hattı kullanılmıştır. Filament üretim hattında üretim Şekil 2.3b’de fotoğrafı verilen 0.02 toleranslı lazer çap ölçerli ve geri beslemeli olarak filamentin sürekli 1,75 mm çap değerinde kalabilmesini sağlayan otomasyon yazılımlı FILAMEON marka cihaz ile tamamlanmıştır. Filament üretim öncesi harman olarak elde edilen ABS/TPU granüller filament üretim hattına entegre olarak bulunan Shini kurutucu ve besleyici üniteye 3 saat boyunca 80°C’de nem etkilerini minimize edecek şekilde kurutulmuştur. Daha sonra tek vidalı ekstrüder ile donatılmış filament üretim hattındaki kovan içerisinde beslemiştir. Kovan boyunca filament üretim hattındaki üretim bölgesine ait sıcaklık profili ise Tablo 2.5’te verilmiştir (de Leon vd., 2019; Rigotti vd., 2020; Doner vd., 2023). Filament üretim hattı nozul çıkışında ABS/TPU harman malzeme sırasıyla 65°C ve 24°C sıcaklıklara sahip iki adet soğutma havuzundan geçmiştir. Bu havuzlarda ilk olarak daha yüksek sıcaklıkta havuzun kullanılması ile polimerizasyon sırasında ani soğuma ile çarpılma vb. etkilerle geometrik bozulmaların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. İkinci havuzda ise katılaşma sürecinin ve geometrik formun tamamıyla elde edilerek filament şeklinde sarıma imkân tanıyan oda sıcaklığındaki su havuzu kullanılmıştır. Havuzlardan geçen harman malzeme hattın devamında sarılarak harman yapıda ABS/TPU filament üretim süreci tamamlanmıştır. ABS/TPU filamentler üretim sonrasında olası nem etkilerinden korunması amacıyla vakumlanarak nem ve sıcaklık kontrolünün klimalar aracılığıyla gerçekleştiği ortamda saklanmıştır. İstenilen bileşim oranlarında üretilen ABS/TPU harman filamentler her bir bileşim oranı için ayrı ayrı kodlandırılmış ve bu kodlamalara göre filamentler kullanılarak test numuneleri 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Tablo 2.6’da farklı bileşim oranlarında üretilen ABS/TPU harman filamentlere ait numune kodlandırması verilmiştir. ABS/TPU

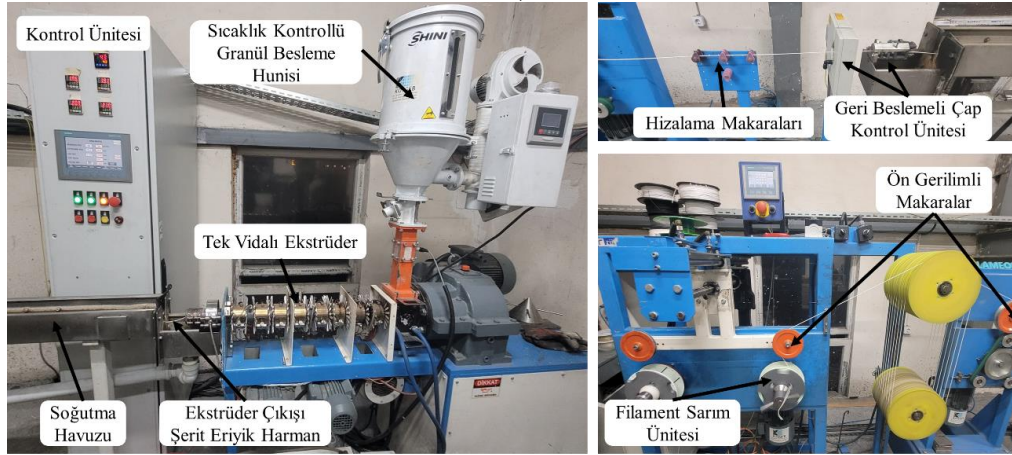
harman numunelerin üretim sürecini temsil eden ve üç ana kısımdan oluşan şematik süreç akış şeması ise Şekil 2.3c’de verilmiştir.

Tablo 2.6. ABS/TPU polimer harman filamentlere ait bileşim oranları ve kodlamalar

Numune Kodu	Ağırlıkça Bileşim Oranı (%)	
	ABS	TPU
ABS 3D	100	0
A90T10	90	10
A80T20	80	20
A70T30	70	30



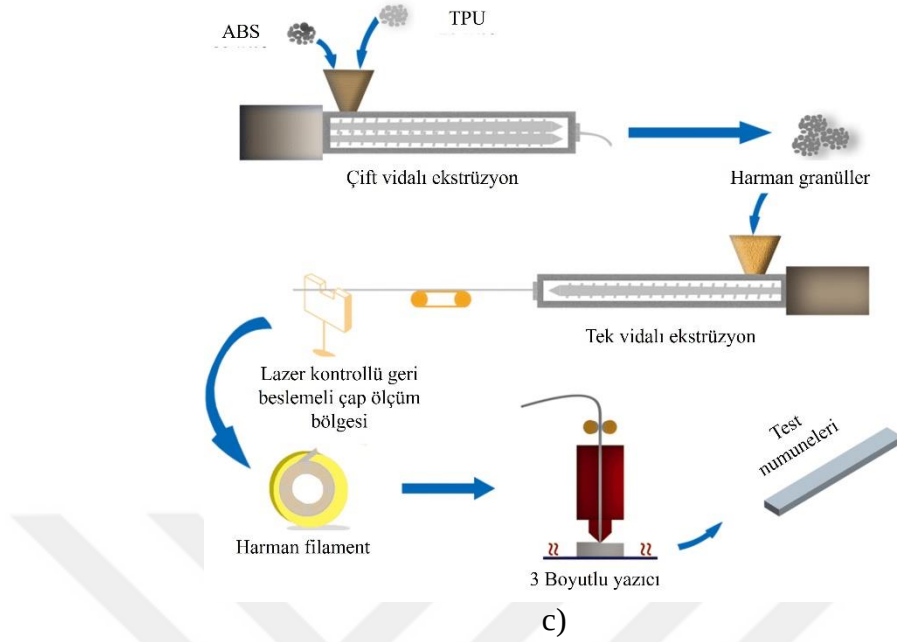
a)



b)

Şekil 2.3. ABS/TPU polimer harman üretiminde kullanılan a) çift vidalı ekstrüder ile donatılmış granül üretim, b) harman granülleri ile eklemeli imalata uygun filament üretim hatlarına ait fotoğraflar ve c) filament üretim sürecine ait süreç

Şekil 2.3'ün devamı

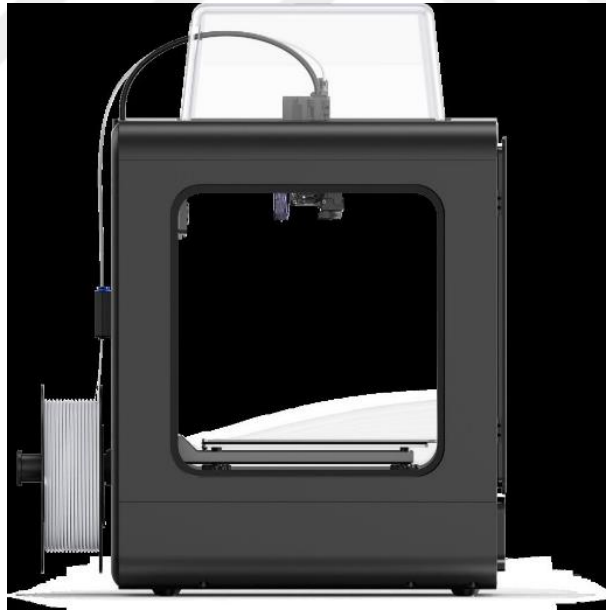


Tez çalışması kapsamında ABS/TPU polimer harmanların termomekanik, mekanik ve yorulma ömrü özelliklerinin belirlenmesi amacıyla test numuneleri yukarıda üretim detayları ile anlatılan ABS/TPU harman filamentler kullanılarak üretilmiştir. Test numuneleri üretim süreci harman filamentler ile 3 boyutlu yazıcı kullanılarak eriyik yığma yöntemi ile tamamlanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlendiği çekme testlerinde ve yorulma ömrü performansı için gerçekleştirilen yorulma testlerinde ASTM D638 standardı referans alınarak belirlenen ve Şekil 2.2b’de geometrik boyutları verilen Tip 4 numune geometrisi kullanılmıştır. Tip 4 numunesine ait geometrinin katı modeli oluşturulduktan sonra Creality Slicer programı ile uygun boyutlarda dilimlenmiş ve eklemeli imalat için gerekli G kodları elde edilmiştir. Elde edilen G kodları daha sonra Creality CR200B 3 boyutlu yazıcıda Tablo 2.7’de verilen üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Üretim parametreleri literatürde ABS/TPU filamentler ile test numunelerinin üretildiği çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir (de Leon vd., 2019; Doner vd., 2023; Thavornyutikarn vd., 2023). ABS/TPU harmanlarda yorulma testlerinde yükleme gerilme oranının 0,1 olduğu çeki/çeki yüklemesinde çekme testinde de kullanılan ASTM D638 Tip 4 numune geometrisi, ASTM D7791 standardı referans alınarak kullanılmıştır. Termomekanik analizler için DMA test numuneleri ise Tablo 2.7’de verilen üretim parametreleri ile her bir bileşim oranında hazırlanan filamentler kullanılarak 40 mm x10 mm x 3 mm boyutlarında numuneler elde edilecek şekilde 3 Boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Şekil 2.4’te eklemeli imalat ile üretimde

kullanılan 3 boyutlu yazıcıya ve filamente ait fotoğraf verilmiştir. Üretimin yapıldığı üç boyutlu yazıcı 200 x 200 x 220 mm boyutlarında baskı hacmine sahip olup yazdırma plaka sıcaklığı ise maksimum 110°C değerine ulaşabilmektedir. Aynı zamanda nozul sıcaklığı değeri ise maksimum 260°C değerine ulaşabilmektedir

Tablo 2.7. Eriyik yığıma yöntemi ile üretim sürecinde kullanılan yazdırma parametreleri

Baskı Parametreleri	
Dolgu Oranı (%)	100
Yazdırma Sıcaklığı (°C)	230
Yazdırma Plakası Sıcaklığı (°C)	100
Yazdırma Hızı (mm/s)	40
Filament Çapı (mm)	1.75
Nozul Çapı (mm)	0.4
Katman Kalınlığı (mm)	0.2



Şekil 2.4. ABS/TPU harman test numunelerinin üretiminin gerçekleştirildiği 3 Boyutlu yazıcıya ait fotoğraf

2.2. Karakterizasyon Analizleri

Bu kısımda, saf ve harman halde üretilen PMMA/ABS ve ABS/TPU malzemelerin kimyasal, termal, termomekanik ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen TGA, DSC, DMA ve FTIR analizleri hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur.

2.2.1. TGA

Termogravimetrik analiz (TGA), analizleri farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harmanların sıcaklığa bağlı olarak termal kararlılıklarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. TGA, yönteminde sıcaklığa bağlı olarak polimer malzemede meydana gelen kütle kayıpları belirlenerek malzeme bozulma sıcaklıkları kütle kaybına bağlı olarak elde edilmiştir. Analizler, Perkin Elmer TGA 4000 termal analiz cihazında 20 ml/dk azot gaz akış ortamında, 25°C-650°C sıcaklık aralığında ve 10°C/dk sıcaklık artış hızında gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. DSC

Farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harmanların önemli özelliklerinden biri olarak bilinen karakteristik sıcaklık değeri olan camsı geçiş sıcaklığı DSC analizleri ile belirlenmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı polimer malzemeler için sünek-gevrek davranışın belirgin değişimindeki önemli bir parametre olmasının yanında ayrıca polimer harmanları oluşturan bileşenlerin birbiri içerisinde karışabilirliğini ortaya koyan önemli bir parametredir. Bu nedenle camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesi polimer harman malzemeler için önem arz etmekte ve literatürdeki çalışmalarda polimer karışımların karışabilirliğinin tayininde sıkça kullanılmaktadır. Camsı geçiş sıcaklığı Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analiz yöntemi kullanılarak her bir polimer harman malzeme grubunda saf ve harman numuneler için belirlenmiştir. DSC analizleri Mettler-Toledo/ DSC 700 cihazında gerçekleştirilmiştir. DSC analizleri 25°C-500°C sıcaklık aralığında ısıtma-soğutma şeklinde 10°C/dk sıcaklık artış hızında azot gazı (20 ml/dk) atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

DSC analizinde incelenecek numune ısıtılır ya da soğutulurken ortaya çıkan enerji miktarının belirlenmesi ve referans ile numune arasındaki ısı farkının sıcaklığa bağlı değişiminin elde edilmesi prensibi kullanılmıştır. Bu analiz ile numunenin ısıtılması veya

soğutulması sırasında enerji miktarındaki değişim sıcaklığa bağlı olarak elde edilmiştir. DSC analizleri bu amaçla sıcaklığa bağlı olarak çizdirilen eğriler üzerinden incelenmiştir. Böylece ısı değişim eğrisi yardımıyla camsı geçiş sıcaklıkları belirlenmiş ve harman malzemelerin hem termomekanik davranışı hem de polimer harmanı oluşturan bileşenlerin karışabilirliği incelenmiştir. DSC eğrileri değerlendirilirken eğrilerin sıcaklığa bağlı olarak birinci ve ikinci türevleri ile elde edilen eğriler de incelenmiştir. Sıcaklığa bağlı birinci türev yardımıyla camsı geçişin başlangıç ve bitiş noktaları, ikinci türevin elde edildiği eğri de ise sıfır ile kesişen sıcaklık değeri ise tam olarak camsı geçiş sıcaklığının elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu eğriler harman yapıda tam ve net bir camsı geçiş sıcaklığı belirlenemeyen durumların ortadan kaldırılması amacıyla elde edilmiştir.

2.2.3. DMA

PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin viskoelastik malzeme özellikleri ve davranışının belirlenmesi amacıyla Dinamik Mekanik Analiz (DMA) yöntemi kullanılmıştır. Bu karakterizasyon analizi ile harman malzemelerin viskoelastik özelliklerinin sıcaklık ve frekans değerlerine bağlı olarak değişimleri elde edilerek incelenmiştir. DMA yöntemi numuneye döngüsel şekilde küçük bir deformasyonun uygulandığı bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde gerilme, sıcaklık ve yükleme frekansı gibi parametrelerin malzemelerin viskoelastik davranışına etkileri incelenmektedir. Tez kapsamında PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerden ASTM D5023 standardında önerilen 40 mm x 10 mm x 3 mm boyutlarında numuneler elde edilmiş ve DMA analizleri gerçekleştirilmiştir. PMMA/ABS harman malzemelerde her bir bileşim oranında enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen düz plakalardan su jeti ile kesilen numuneler kullanırken, ABS/TPU harman malzemelerde ise her bir bileşim oranında üretilen filamentler kullanılarak belirtilen boyutlardaki numuneler 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. DMA analizleri, NETZSCH DMA 242 E Artemis cihazında tek konsol yükleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizler 25°C-200°C sıcaklık aralığında, 30µm genlikte, 12N kuvvet altında ve 1 Hz frekansta azot gazı (80 ml/dk) atmosferinde tamamlanmıştır. DMA analizleri sonucunda numuneye ait rijitlik ve sönümlenme özellikleri kayıp (loss), depolama (storage) modülleri ve tanjant delta verileri belirlenmiştir. Depolama modülü numunenin elastik davranışını, kayıp modülünün depolama modülüne oranı olan tanjant delta ise numunenin sönümlenme davranışını temsil etmektedir. Modüllerin sıcaklığa bağlı değişiminin elde

edilmesiyle tanjant delta eğrisinin tepe noktası camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesinde ayrıca değerlendirilmiştir. Aynı zamanda farklı yükleme frekanslarında DMA analizleri gerçekleştirilerek modüllerin frekansa bağlı değişimleri elde edilecek bu eğri yardımıyla Zaman-Sıcaklık Süperpozisyonu (TTS) kullanılarak modüllerin ani değiştiği kritik yükleme frekansı belirlenmiştir. Kritik yükleme frekans değeri kayıp modülü veya tanjant deltanın tepe noktasının olduğu frekans değeri olarak alınmıştır. Kritik frekans değerinin belirlenmesinde ayrıca kayıp ve depolama modüllerinde görülen doğrusal bölgeler değerlendirilmiştir.

2.2.4. FTIR

PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin kimyasal yapısının belirlenmesi amacıyla Fourier Transform Infrared (FTIR) spektrum analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile saf ve farklı bileşim oranlarında üretilen PMMA/ABS ve ABS/TPU harman polimerlerin kimyasal yapısı incelenmiştir. Bu kapsamda FTIR spektrum analizlerinde P100, P20A80, P40A60, P60A40, P80A20, A100 olmak üzere PMMA/ABS harmanlar ile ABS3D, A90T10, A80T20 ve A70T30 olmak üzere ABS/TPU harman malzemeler incelemeye tabii tutulmuştur. Harman polimer malzemelerde kimyasal yapı her bir numuneye ait IR spektrumların dalga numarasına bağlı olarak elde edilmesi ve kaydedilmesi ile ortaya koyulmuştur. FTIR analizleri Perkin Elmer 100 serisi IR spektrometre cihazında zayıflatılmış toplam yansıma (attenuated total reflection) ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrum analizleri $4000-500\text{ cm}^{-1}$ aralığında 2 cm^{-1} çözünürlükte ve ölçüm sırasındaki gürültünün en düşük düzeyde tutulması amacıyla 16 tarama sıklığı altında tamamlanmıştır. Farklı bileşim oranlarında hem PMMA/ABS hem de ABS/TPU harmanlar için kaydedilen spektrumlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ayrıca harman yapıyı oluşturan malzemede bileşim oranlarının değişimi ile spektrum dalga numaralarında ve tepe noktalarındaki şiddet, kayma ve formasyon değişimi gibi farklılıkların ortaya koyulması amacıyla spektrumlar hem karşılaştırmalı hem de kendi içerisinde normalize edilerek incelenmiştir. FTIR spektrum analizleri ile polimer harman içerisinde kimyasal yapı ve bağ kuvvetleri ile harman yapı içerisindeki durum detaylıca incelenmiş, kimyasal yapı-yapısal performans arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur.

2.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Yorulma testleri sonrası numunelerin hasar/kırık yüzeylerindeki incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerde hem yapısal durumun hem de yorulma testlerindeki hasar ilerleyişin detaylıca incelenmesi amacıyla SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Böylece hem bileşim oranı hem de frekans, gerilme oranı, gerilme genliği gibi yorulma test parametrelerinin hasar davranışı ile arasındaki ilişki detaylıca ortaya koyulacaktır. Yorulma testleri sonrasında hasar başlangıç ve ilerleyiş bölgesi ile ani kırılma bölgeleri ayrı ayrı incelenmiştir. Bu bölgelerin numune yüzeyinde sahip oldukları alanlar ile hasar çevrim sayıları arasındaki ilişki bu kapsamda irdelenmiştir.

SEM incelemeleri öncesinde, PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanlarda yorulma testleri sonrası test numunelerinin kırık yüzeyleri alt oturma yüzeyi oluşturulacak şekilde düz formda test numunesinden kesilmiştir. Daha sonra bu yüzey yapışkan bir tabana oturtulmuş ve numunelerin kırık yüzeyleri açık kalacak şekilde soğuk bakalite alınmıştır. SEM incelemeleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı alt yapısında bulunan ZEISS EVO LS 10 cihazında gerçekleştirilmiştir.

2.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Bu kısımda saf ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harman malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen tek eksenli çekme testleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Çekme testleri sonrasında harman malzemelerin her bir bileşim oranındaki test numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve detaylıca irdelenmiştir. Mekanik özellikler harman malzemelere ait elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması olacak şekilde ayrı ayrı hesaplanarak söz konusu mekanik özelliklere bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı etkileri araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen akma dayanımları ise yük kontrollü yorulma testlerinin gerçekleştirileceği kuvvet değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

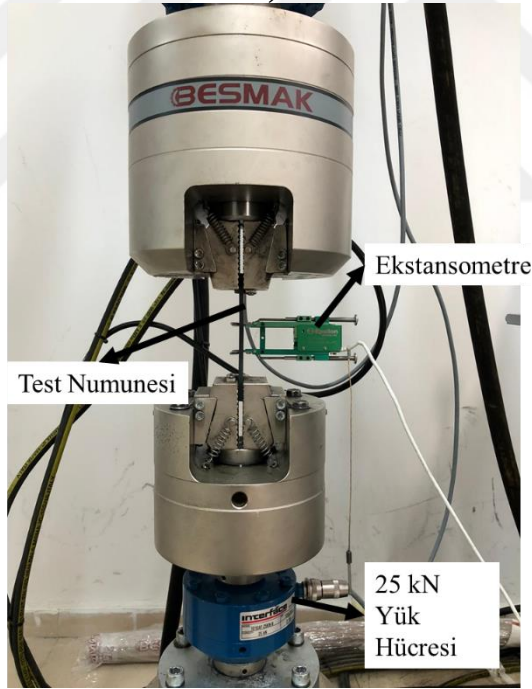
PMMA/ABS ve ABS/TPU malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D638 Plastiklerin Çekme Özelliklerine İlişkin Standart Test Yöntemi (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) standardında önerilen ve bölüm 2.1.2’de geometrik boyutları verilen Tip 4 çekme test numunesi ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler 25 kN yük hücresi donanımına sahip BESMAK Servohidrolik Test Cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazında kullanılan yük hücresi Sınıf 0,5 ($\pm 0,5$)

hassasiyetinde kalibrasyonu tamamlanarak kullanılmıştır. Test cihazına ait fotoğraflar ise Şekil 2.5'te verilmiştir. Çekme testi sırasında kuvvet değişimleri cihaza entegre olarak kullanılan yük hücresi tarafından birim şekil değiştirme değerleri ise numune üzerinden ekstansometre kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Çekme testi sırasındaki numune bağlantısı, ölçüm bölgesindeki ekstansometre bağlantısı ve yük hücresini gösteren fotoğraf ise Şekil 2.5b'de verilmiştir.

Çekme testleri ASTM D638 standardında önerildiği şekilde Tip 4 numune için 0,003, 0,03 ve 0,3 s⁻¹ birim şekil değiştirme hızlarına karşılık gelen 5, 50 ve 500 mm/dk çene hızlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, harman malzemelerin çekme testleri her bir yükleme koşulu için tekrarlanabilirliğin sağlanabilmesi amacıyla en az 3 tekrarlı test gerçekleştirilerek tamamlanmıştır. 5 mm/dk çene hızında gerçekleştirilen çekme testleriyle her bir harman malzemenin temel mekanik davranışını ortaya koyan elastisite modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Birim şekil değiştirme hızının numunelerin mekanik davranışları üzerindeki etkileri ise 0,03 ve 0,3 s⁻¹ birim şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilen çekme testleri ile araştırılmıştır. Tüm harman malzeme grupları için çekme testleri kapsamında gerçekleştirilen test programı Tablo 2.8'de verilmiştir. Burada bahsedilmesi gereken bir diğer husus ise çekme testleri sonrası mekanik özelliklerin belirlenmesinde izlenen metodolojidir. Çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme birim şekil değiştirme verilerinden mekanik özellikler aşağıda özetlendiği şekilde belirlenmiştir. Elastisite modülü ASTM ve ISO standartlarında önerilen 0,0005-0,0025 birim şekil değiştirme aralığında elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin eğimi olarak belirlenmiş ve malzemenin elastik bölgedeki davranışını temsil edecek şekilde her bir harman malzeme ve bileşim oranı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Akma dayanımı ise standartların önerileri ışığında %0,2 birim şekil değiştirme değerine denk gelen elastik bölgenin eğimi ile belirlenmiştir. Bu amaçla elastisite modülünün elde edildiği 0,0005-0,0025 birim şekil değiştirme aralığında elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin eğimi %0,2 birim şekil değiştirme değerine ötelenmiş ve malzemenin sahip olduğu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini kestiği nokta akma gerilmesi olarak belirlenmiştir. Bu metodolojiye ait ilerleyişi temsil eden şematik resim Şekil 2.6'da verilmiştir. Çekme dayanımı ise malzemenin sergilediği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisindeki en yüksek gerilme değeri olarak belirlenmiştir. Ayrıca kopma uzaması değeri ise malzemelerin hasara uğradığı birim şekil değiştirme değeri olarak kayıt altına alınmıştır.

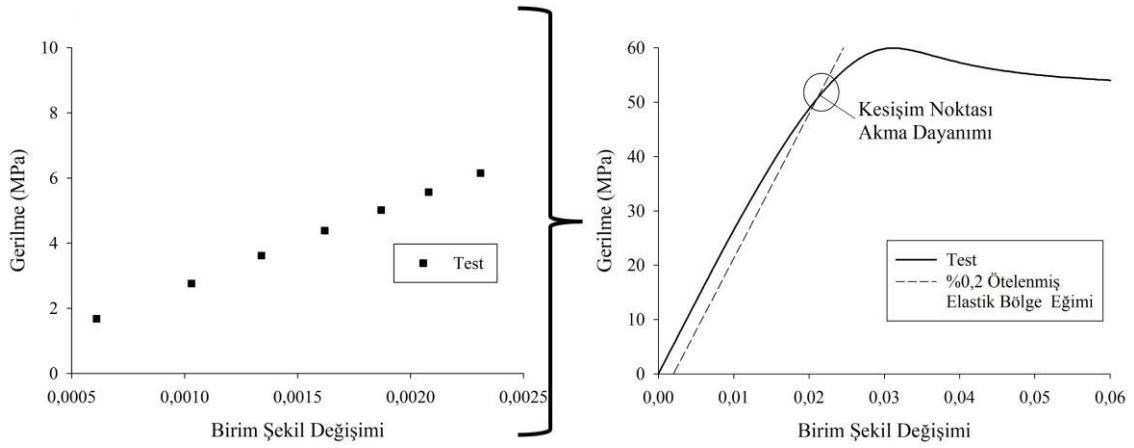


a)



b)

Şekil 2.5. Çekme ve yorulma testlerinin gerçekleştirildiği BESMAK Servohidrolik test cihazına ait fotoğraflar a) genel görünüm ve b) numune ve ekstansometre bağlantıları



Şekil 2.6. Çekme test sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinden akma dayanımının belirlenmesine ait metodolojinin gösterimi

Çekme testleri sonrasında elde edilen deneysel veriler, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerde harman yapıyı oluşturan bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı ile malzeme mekanik davranışı arasındaki ilişkinin incelenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca her bir malzeme için elde edilen akma dayanımları ise yorulma davranışının inceleneceği yük kontrollü yorulma testlerinde uygulanacak kuvvet aralıklarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Tablo 2.8. Harman malzemelerde uygulanan çekme test prosedürü özeti

Numune	Birim Şekil			Numune			Tutma		
Kodu	Değiştirme Hızı (s ⁻¹)			Kalınlığı (mm)			Basıncı (bar)		
	0,003	0,03	0,3	2	3	4	0	40	70
P100	✓				✓			✓	
P80A20	✓	✓	✓		✓			✓	
P60A40	✓	✓	✓		✓				
P40A60	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
P20A80	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
A100	✓	✓	✓		✓			✓	
ABS3D	✓	✓	✓		✓		-	-	-
A90T10	✓	✓	✓		✓		-	-	-
A80T20	✓	✓	✓		✓		-	-	-
A70T30	✓	✓	✓		✓		-	-	-

2.4. Yorulma Davranışının Belirlenmesi

Saf ve farklı bileşim oranlarında üretilen PMMA/ABS ve ABS/TPU polimer harman malzemelerin yorulma davranışı ve bu davranışa harman yapıyı oluşturan malzemelerin bileşim oranı, yükleme frekansı ve gerilme oranı gibi etkilerin incelenmesi amacıyla yük kontrollü eksenel yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri 25 kN yük hücresi donanımına sahip BESMAK (Besmak Malzeme Test Makinaları) Servohidrolik Test Cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazına ait fotoğraf Şekil 2.5'te verilmiştir. Yorulma testleri sırasında elde edilen yükleme çevrim sayıları test cihazına ait dinamik kontrollü Litestx yazılımı aracılığıyla her 50 çevrimde bir veri kaydı ile kaydedilmiştir. Ayrıca test sırasında kuvvet değişimleri de 50 çevrimde bir kayıt altına alınarak gerilme histerezis eğrileri yorulma testleri sırasında elde edilmiştir. Gerilme ömrü yaklaşımında tekrarlı yüklemeler harman malzemelerin yorulma ömrü davranışının incelenmesi amacıyla, termoplastik malzemeler için önerilen ASTM D7791 standardı dikkate alınarak, 5 Hz'i geçmeyecek şekilde uygulanmıştır (ASTM D7791,2015). Bu yükleme frekansı standartta, yükün sık tekrarı sonucunda termoplastik malzemelerde sıcaklık iletiminin metalik malzemeler ile kıyaslandığında çok düşük olması sebebiyle yerel yumuşama davranışının görülmesi nedeniyle önerilmiştir (ASTM D7791,2015). Bu nedenle yorulma testleri sırasında ölçüm bölgesindeki sıcaklık değişimleri $\pm 0,08^\circ\text{C}$ hassasiyete sahip temassız termal kamera ile ölçülmüş ve numune yüzeyindeki sıcaklık artışı izlenecek şekilde ölçüm bölgesinin kontrol edildiği durumda tüm yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numune yüzeyindeki sıcaklık artışının da izleneceği şekilde farklı yükleme frekanslarındaki yorulma testleri tamamlanarak yükleme frekansı ve sıcaklık artışının etkisiyle meydana gelen yorulma ömür performansı da tez çalışması kapsamında araştırılmıştır. Böylece yorulma test cihazından yükleme boyunca yük-zaman, yer değiştirme ve çevrim sayısı verilerinin yanı sıra en iyi yorulma ömrü performansına sahip malzeme için farklı yükleme frekanslarında çevrim sayısı boyunca ölçüm bölgesindeki sıcaklık değişimi de belirlenmiştir.

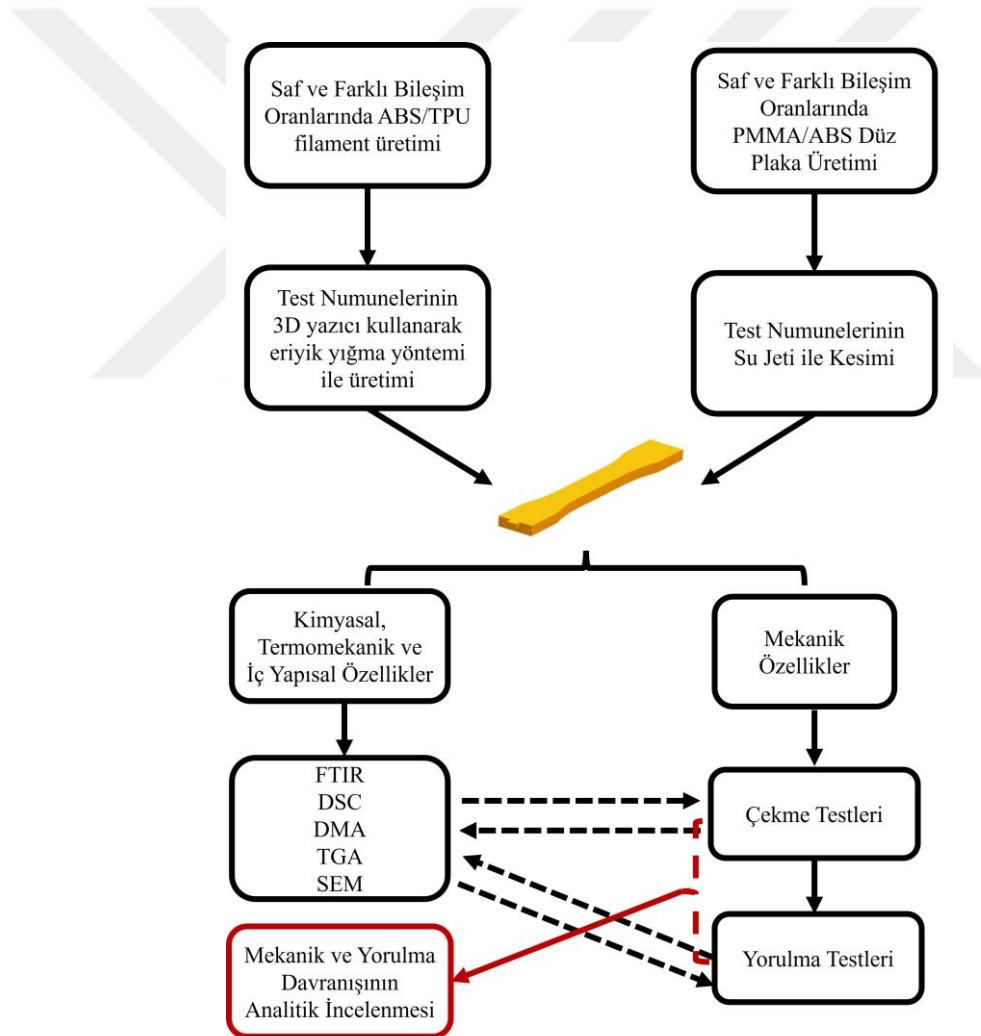
Tez kapsamındaki yorulma testleri sinüs dalga formunda yük kontrollü olarak tamamlanmıştır. PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin yorulma test prosedürleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu durum harman yapıların farklı üretim yöntemleri ile üretilmesi nedeniyle yükleme oranlarının farklı seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, eriyik yığma üretim yöntemi ile harman filamentlerden üretilen ABS/TPU numunelerde eklemeli imalatın doğasından kaynaklanan ve tam tersinir yüklemelerde gerçekleşmesi muhtemel

katmanlar arası ayrılma durumu nedeniyle testler belirli bir pozitif ortalama gerilme etkisinde ($R= 0,1$) gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinde PMMA/ABS harman malzeme ise farklı yükleme oranlarında ($R= -1$ ve $0,1$) hasara uğrayana kadar tekrarlı yüklemelere maruz bırakılmıştır. Bu gerilme oranlarından $R=0,1$ ASTM D7791 standardında önerilen çeki yüklemesi altında maksimum-minimum kuvvet arasında en fazla farkın bulunduğu durumu temsil etmesinden dolayı uygulanmıştır. $R=-1$ gerilme oranındaki yorulma testleri ise tam tersinir yükleme durumunu temsil eden döngüsel yükleme koşulundaki davranışın irdelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilme oranının yorulma davranışı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Yükleme oranına bağlı olarak sırasıyla tam tersinir ($R=-1$) ve belirli bir pozitif ortalama gerilme etkisindeki ($R= 0,1$) durumlarda yorulma testleri Şekil 2.2b-c’de geometrileri verilen test numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı yükleme oranlarının etkisinde PMMA/ABS harman malzemenin yorulma davranışı tez kapsamındaki çalışmalarda araştırılmıştır. Harman malzemelerde her bir karışım oranı için yorulma testleri ASTM D7791 standardına uygun olarak en az 4 farklı gerilme oranında ve testlerin tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla en az 3 tekrarlı yorulma testi gerçekleştirilerek tamamlanmıştır.

Yorulma testleri sonucunda harman malzemelerin uygulanan gerilme genliğine bağlı olarak hasara uğradığı çevrim sayısı (S-N yorulma ömrü) diyagramı edilmiş ve her bir harman bileşim oranı, gerilme oranı ve yükleme frekansının malzeme yorulma davranışına etkisi incelenerek yorulma ömür diyagramlarında (Wöhler eğrileri) test parametrelerinin etkileri ortaya koyulmuştur. Çalışma kapsamında ayrıca, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği, yükleme frekansı ve yorulma çevrim sayısı gibi veriler kullanılarak yorulma davranışına harman yapıyı oluşturan malzemelerin bileşim oranı ve yükleme oranı gibi parametre etkileri uygun matematiksel ifadeler ile temsil edilmiştir. Bu amaçla yükleme oranı, gerilme genliği ve polimer harman içerisindeki malzeme bileşim oranının yorulma ömrü performansına etkileri literatürde malzemelerin yorulma ömrünün tahmininde çok sık kullanılan Basquin ilişkisi yarı ampirik model olan matematiksel ifadeler ile temsil edilmiştir. Basquin ilişkisi (3)’ne ait denklem aşağıda verilmiştir (Amjadi & Fatemi 2020).

$$S_a = A(N_f)^b \quad (3)$$

Burada S_a , gerilme genliğini, N_f , hasar çevrim sayısını, A , b Basquin eşitliğine ait model parametreleridir. PMMA/ABS polimer harman malzeme için tam tersinir ($R=-1$) ve belirli bir pozitif gerilme altında ($R=0,1$) gerçekleştirilen yorulma testleri sonrası yorulma davranışı ABS/TPU polimer harmanlarda ise belirli bir pozitif gerilme altında ($R=0,1$) gerçekleştirilen yorulma testleri sonrası yorulma davranışı Basquin eşitliği yaklaşımıyla irdelenmiştir. Yarı-ampirik bağıntılar ile elde edilen katsayılar kullanılarak yorulma davranışına harman yapıyı oluşturan malzemelerin bileşim oranı, gerilme genliği ve yükleme oranı gibi parametre etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda uygulanan yöntemle ait süreç akış şeması ve yapılan çalışmalar arasındaki ilişkiler şematik olarak Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Tez çalışması sürecinde uygulanan yöntem ve metodolojiye ait süreç akış şeması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, enjeksiyon kalıplama ile üretilen PMMA/ABS ve eriyik yığıma yöntemi ile üretilen ABS/TPU polimer harman malzemelerle gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalara ait bulgular ayrıık formda detaylı olarak sunulmaktadır. Üretim metodolojisi ve harman yapı içeriklerindeki farklılıklar nedeniyle PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların karakterizasyon analizleri ayrı ayrı bölümler halinde verilmiştir.

3.1. TGA Analizlerine Ait Sonuçlar

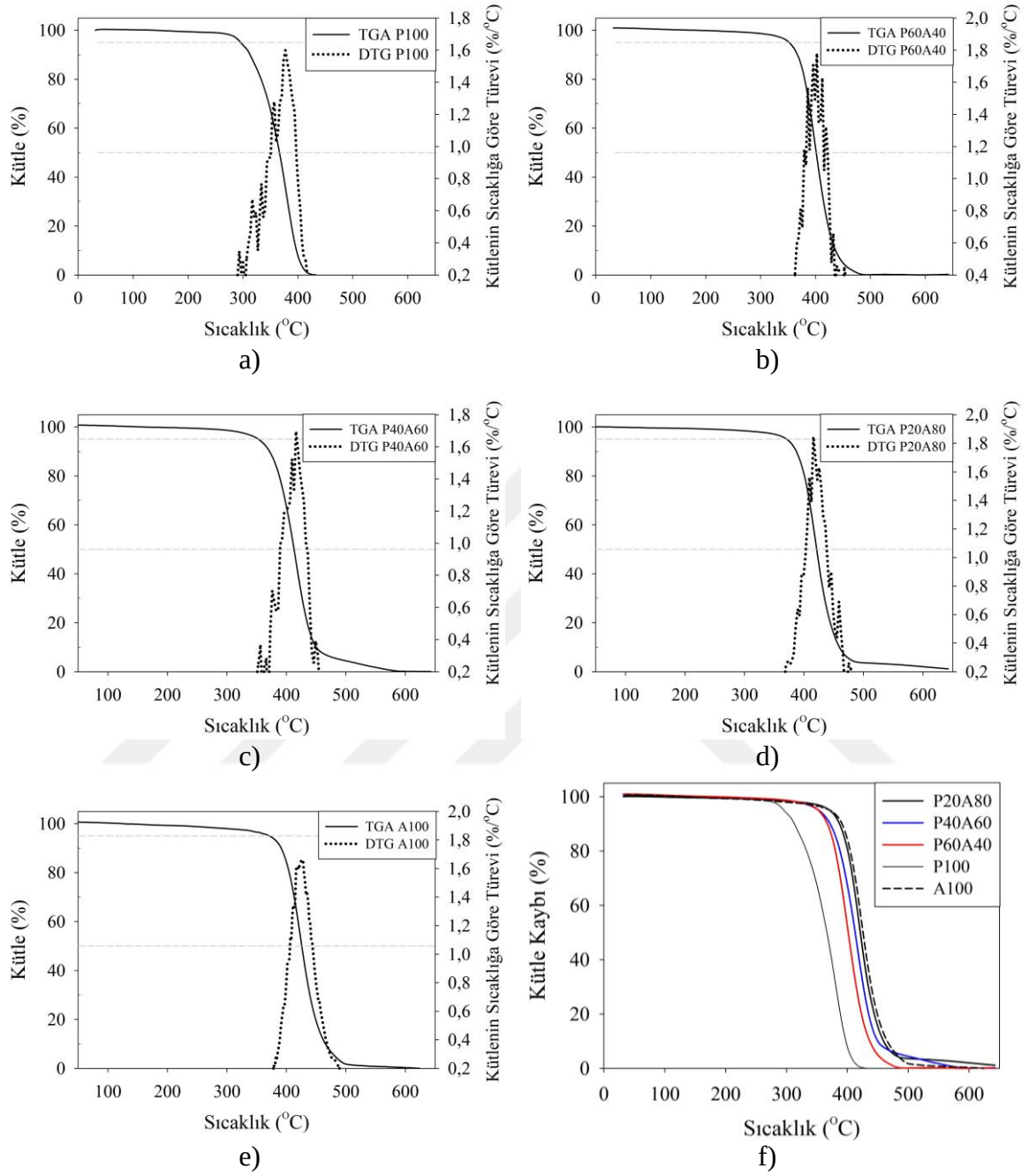
Bu başlık altında, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemeler için gerçekleştirilen TGA analizlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Polimer veya polimer harmanların zaman veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kütle kaybı genellikle TGA analizi yardımıyla belirlenir. Bir polimerin termal bozunmaya bağlı olarak kütle kaybı geri dönüşü olmayan bir süreçtir (Wilkie, 1999). Bu süreç termal bozunma karakteristiği veya termal kararlılığı olarak tanımlanabilmektedir. PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kayıplar ayrı ayrı bölümler halinde sunulmuştur.

a. PMMA/ABS Harman

Şekil 3.1’de farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS polimer harman malzemelere ait TGA analizlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri P100, P80A20, P20A80, P60A40, P40A60, P20A80 ve A100 bileşim oranlarındaki malzemeler için ayrı ayrı eğrileri içerecek şekilde verilmiştir. Ayrıca tüm bileşim oranlarında elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de verilen saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman yapıların sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrilerinden %5 ve %50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklık değerleri belirlenmiş ve Tablo 3.1’de verilmiştir. %5 ve %50 kütle kaybına denk gelen bölgeler Şekil 3.1’de yatay kesikli çizgiler yardımıyla belirtilmiştir.

TGA eğrileri incelendiğinde saf ve harman yapıdaki PMMA/ABS malzemelerin termal bozunum davranışının iki aşamada gerçekleştiği görülmektedir. Termal bozunumun ilk aşaması kütle kaybı değerindeki artışla birlikte yaklaşık 290-300°C aralığında başlamakta ve yaklaşık olarak 420-450°C aralığında sona ermektedir. Bu aşama harman PMMA/ABS’de yapısal ayrışmaya karşılık gelmektedir. İkinci aşama ise 450°C’de başlayıp

yaklaşık 600°C'ye kadar devam eden ve analiz gerçekleşen ölçüm kabında kalan polimer malzemenin yandığı bölümü ifade etmektedir. Bu durum literatürde saf ABS ve ABS temelli toz ve fiber katkılı polimerlerde de benzer şekilde görülmüştür (Suzuki & Wilkie 1995; Billah vd., 2020). TGA analizlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kayıp eğrilerinden ve Tablo 3.1'de verilen kütle kayıplarının gerçekleştiği sıcaklık değerlerinden, PMMA/ABS harman yapıda artan ABS oranı ile termal kararlılığın ve kütle kaybının başladığı sıcaklık değerinin PMMA malzemeye kıyasla artış gösterdiği söylenebilir. PMMA malzemenin ABS'ye kıyasla düşük termal bozunum sıcaklığına sahip olduğu TGA analizlerinden ve literatürde yapılan çalışmalardan bilinmektedir (Korobeinichev vd., 2019; Suzuki & Wilkie 1995). PMMA/ABS harman malzemelerde termal bozunum sıcaklıkları değerlendirildiğinde ABS katkı ile sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin, %5 kütle kaybı, P100 numunede 295,9°C'de meydana gelirken ABS bileşim oranı %40 olan P60A40 numunede ise 352,4°C'de meydana gelmektedir. Bu bileşim oranında termal bozunum sıcaklığının P100 kodlu saf PMMA'ya kıyasla yaklaşık %20'lik bir iyileşme gösterdiği söylenebilir. Bu durum PMMA'nın düşük termal kararlılığının yapıya ABS polimer katkısıyla iyileşme gösterdiğine işaret etmektedir (Reinaldo vd., 2020). Aynı zamanda PMMA/ABS harman malzemelerin TGA analiz eğrileri termal kararlılık açısından değerlendirildiğinde, harmanı oluşturan malzemelerin yapısal uyumlu bir davranış sergilemesi nedeniyle termal kararlılığın ve termal bozunum sıcaklıklarının artış gösterdiği söylenebilir. PMMA/ABS harmanlarda bu iyileşme ABS'nin yapısında bulunan akrilonitril bileşenin varlığından ileri geldiği literatürdeki çalışmalarda da belirtilmiştir (Reinaldo vd., 2020). Termal bozunum karakteristiği veya termal kararlılık davranışı saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harman malzemelerde kütle kaybı sıcaklık eğrilerinin birinci türevlerinin tepe noktaları irdelenerek de incelenmiştir (Boparai vd., 2016). Bu eğriler DTG (Derivative Thermogravimetry) eğrileri olarak adlandırılmaktadır ve DTG eğrilerinden elde edilen tepe noktalardaki sıcaklık değerleri (T_p) Tablo 3.1'de verilmiştir. DTG eğrileri kütle değerinin sıcaklığa bağlı türevi şeklinde elde edilmiş ve Şekil 3.1'de verilen eğrilerde sağ eksende değerleri okunacak şekilde sunulmuştur. Tepe noktalardaki sıcaklık değerleri termal kararlılık ile ilişkilendirilmekte ve tablodan görüldüğü gibi P100 numunede bu sıcaklık değeri 379°C iken A100 numunede 426°C olarak elde edilmiştir. Harman numunelerde ise yapıda artan ABS oranı ile tepe noktasındaki değere karşılık gelen sıcaklıkların artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum termal kararlılıktaki iyileşmenin bir diğer göstergesi olarak bilinmektedir (Boparai vd., 2016).



Şekil 3.1. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemelerin TGA analizleri ile elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı ve kütle kaybının türevi eğrileri; a) P100, b) P60A40, c) P40A60, d) P20A80, e) A100 ve f) kütle kaybı (%) eğrilerinin karşılaştırması

Tablo 3.1. PMMA/ABS harmanların %5 ve %50 kütle kayıp oranına karşılık gelen termal bozunum sıcaklıkları

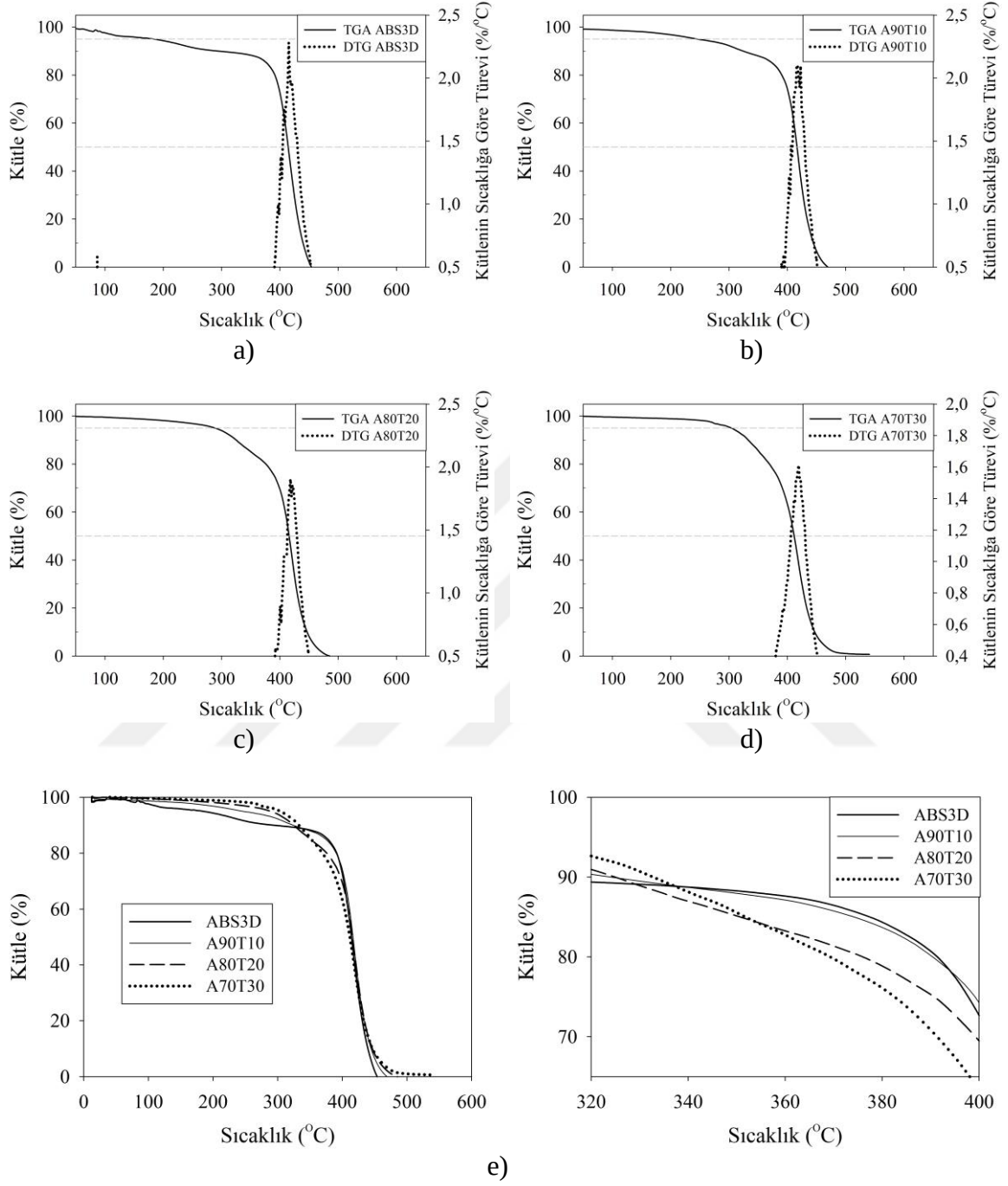
Numune Kodu	T _{%5} (°C)	T _{%50} (°C)	T _p (°C)
P100	296	367	379
P60A40	352	401	400
P40A60	354	413	415
P20A80	371	421	417
A100	372	426	426

b. ABS/TPU Harman

Filament üretim hattında elde edilen farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU polimer harman numunelere ait TGA analizlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri her bir bileşim oranı için Şekil 3.2’de verilmiştir. Ayrıca tüm bileşim oranlarında kütle kaybı eğrileri karşılaştırmalı olarak da sunulmuştur. Şekil 3.2’de verilen eğriler aynı zamanda kütle kaybının sıcaklığa bağlı türevinin değişimi eğrilerini de içermektedir.

Şekil 3.2’de verilen sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri incelendiğinde, saf ABS ve ABS/TPU harmanlarda iki aşamalı termal bozunum davranışı meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu davranış literatürde ABS (Suzuki & Wilkie, 1995; Billah vd., 2020) ve TPU (Bajsić vd., 2013; Quan vd., 2009; Bera & Maji, 2017) malzemelerde görülen iki aşamalı termal bozunum davranışının ABS/TPU harmanlarda da gözlemlendiğini göstermektedir. Şekil 3.2a ve e’de verilen ABS3D kodlu numuneye ait kütle kaybı-sıcaklık eğrileri incelendiğinde, termal bozunumun nispeten düşük sıcaklıklarda başladığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda başlayan kütle kaybı ABS’nin yapısında bulunan stiren-akrilonitril bileşeninin daha düşük sıcaklıkta bozunuma başlaması ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum DSC analizlerinde ısı akısında iki belirgin adım şeklinde düşüş gözlemlenmesinden de görülmektedir. Yapıdan kaynaklanan bu kütle kaybı, TGA eğrilerinde de görüldüğü gibi yaklaşık 320°C’ye kadar devam etmekte ve bu aralıktaki kütle kaybı yaklaşık %10 oranında gerçekleşmektedir. Ayrıca, Şekil 3.2b-d’den saf ABS’ye kıyasla ABS/TPU harmanlara ait kütle kaybı-sıcaklık eğrileri üzerinden yaklaşık 400 °C sıcaklığa kadar gerçekleşen kütle kaybı yüzdesinin TPU katkılı harman malzemelerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, 400°C’de ABS3D numunede kütle kaybı yaklaşık %25,9 iken A70T30 (%30 TPU katkılı) numunede ise kütle kaybı yaklaşık %36,7 değerine ulaşmaktadır. ABS/TPU harmanların termal bozunum karakteristiği artan sıcaklıkla birlikte

($>400^{\circ}\text{C}$) saf ABS malzemeye benzer bir yapı göstermektedir. ABS/TPU harmanların kütle kaybı davranışı ise $320-420^{\circ}\text{C}$ ve $420-550^{\circ}\text{C}$ aralıklarında iki adımda gerçekleşmektedir. Bu adımlardan ilkinde TPU'nun termal bozunum davranışının başladığı bilinmektedir (He vd., 2014). İkinci adımda ise ABS'nin termal bozunumu başlayarak kütle kaybı meydana gelmektedir (Jagadeesh Chandra vd., 2022). ABS/TPU harmanlarda bileşim oranına bağlı olarak termal kararlılık davranışının incelenebilmesi amacıyla analiz sırasında %5 ve %50 oranlarındaki kütle kayıplarının meydana geldiği sıcaklık değerleri belirlenmiş ve belirlenen bu değerler Tablo 3.2'de özetlenerek sunulmuştur. Tablo 3.2'den %5 kütle kaybı değeri için ABS malzemenin en düşük termal bozunum sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir. Ancak bu durumun ABS'nin yapısında bulunan polimer bileşenin daha düşük sıcaklıkta bozulmaya başlamasından ileri geldiği düşünülmektedir. %50 kütle kaybı gerçekleşen sıcaklık değerleri incelendiğinde ise, yapıdaki belirli bir TPU oranına kadar (%20) termal bozunum sıcaklığının iyileştiği ancak %30 oranında TPU ilavesi ile termal bozunum sıcaklığının ABS3D numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Böylece, ABS/TPU harmanlarda yapıdaki TPU oranı ile termal kararlılık davranışının büyük oranda değişimler göstermediği belirlenmiştir. Ayrıca bu durum kütle kaybı sıcaklık eğrilerinin birinci türevlerinin tepe noktaları irdelenerek de araştırılmıştır. Bu yaklaşım literatürde termal kararlılığın irdelenmesinde önemli bir bakış açısı ortaya koymaktadır (Boparai vd., 2016). Tablo 3.2'de verilen T_p değerleri incelendiğinde, en düşük tepe noktası sıcaklık değerinin ABS3D numunede görüldüğü ve yapıya TPU ilavesi ile büyük oranda değişmemesine rağmen %20 TPU katkıda en yüksek değere (420°C) ulaştığı belirlenmiştir. Tablo 3.2'den ve Şekil 3.2'den görüldüğü gibi nispeten düşük sıcaklıklarda ABS içerisindeki bileşende başlayan termal bozunum davranışına rağmen artan sıcaklıkla yaklaşık 320°C 'den sonra harman yapıda termal bozunumla kütle kaybının arttığı söylenebilir. Ayrıca yaklaşık 420°C itibarıyla ABS'nin de termal bozunumu ile artan kütle kaybı nedeniyle ABS/TPU harman malzemelerde termal kararlılık hakkında bileşim oranı ile büyük oranda bir değişimin görülmediği belirlenmiştir. Şekil 3.2e'den görüleceği gibi $320-400^{\circ}\text{C}$ aralığında yapıda artan TPU oranı ile kütle kaybının daha büyük bir hızla arttığı belirlenmiştir. Ancak %10 TPU içeren A90T10 kodlu numunenin bu sıcaklık aralığında kütle kaybı-sıcaklık eğrisindeki davranışının saf ABS malzemeye oldukça benzer bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu davranışı nedeniyle nispeten düşük oranda TPU katkı ile oluşturulan A90T10 kodlu harman malzemenin termal kararlılığının ABS3D'ye kıyasla iyileşmesine olanak tanıdığı söylenebilir.



Şekil 3.2. TGA analizleri ile elde edilen saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı kütle kaybı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20, d) A70T30 ve e) kütle kaybı (%) eğrilerinin karşılaştırması

Tablo 3.2. ABS/TPU harmanların %5 ve %50 kütle kayıp oranına karşılık gelen termal bozunum sıcaklıkları

Numune Kodu	T _{%5} (°C)	T _{%50} (°C)	T _p (°C)
ABS3D	183,7	414,2	415
A90T10	245,3	416,5	418
A80T20	288,7	415,8	420
A70T30	304,1	411,7	417

3.2. DSC Analizlerine Ait Sonuçlar

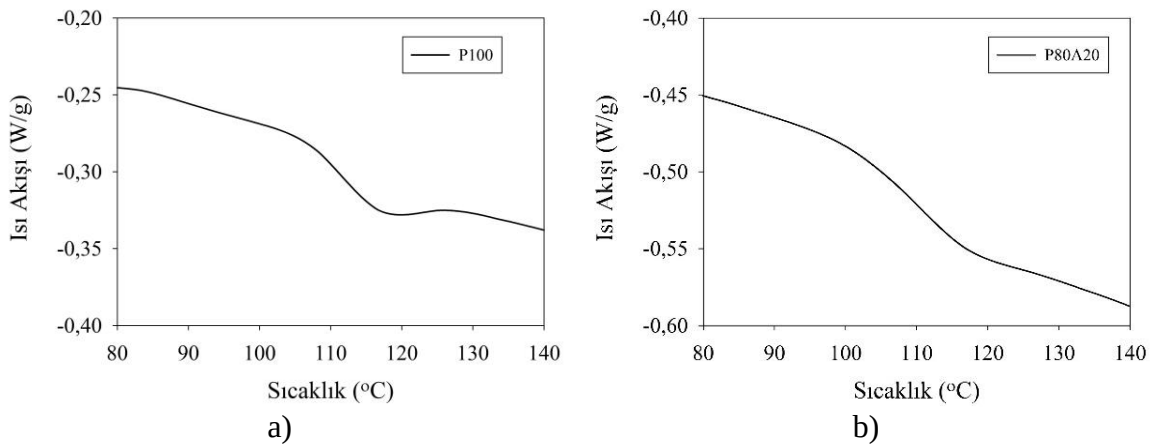
Bu başlık altında, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemeler için gerçekleştirilen DSC analizlerine ait sonuçlar sunulmuştur. DSC analizleri ile harman malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları ve harman yapının karışabilirlik durumu incelenmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar detaylarıyla her bir harman malzeme için ayrı ayrı sunularak tartışılmıştır. Harman malzemelerde camsı geçiş sıcaklığının tayini için her bir bileşim oranında grafikler ısı akısının sıcaklığa bağlı değişimleri ve bu değişimlerin birinci ve ikinci türevlerini içerecek şekilde irdelenerek belirlenmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen DSC analizleri sırasında kullanılan yöntemle ait detaylı bilgiler Bölüm 1.3.3'te verilmiştir.

a. PMMA/ABS Harman

Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harman malzemelerin termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen DSC analiz sonuçları bu başlık altında sunulmuştur. DSC analizleri sonucunda her bir malzeme için elde edilen ısı akısı-sıcaklık grafikleri polimer harmanlarda kritik öneme sahip camsı geçiş sıcaklığının tayininde kullanılmıştır. PMMA/ABS harman yapıdaki karışabilirlik durumu DSC analizlerinden elde edilen eğriler üzerinden tartışılmıştır. Bu kapsamda saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemelerin DSC analizleri sonucunda elde edilen sıcaklığa bağlı ısı akısı eğrileri ayrı ayrı Şekil 3.3'te verilmiştir.

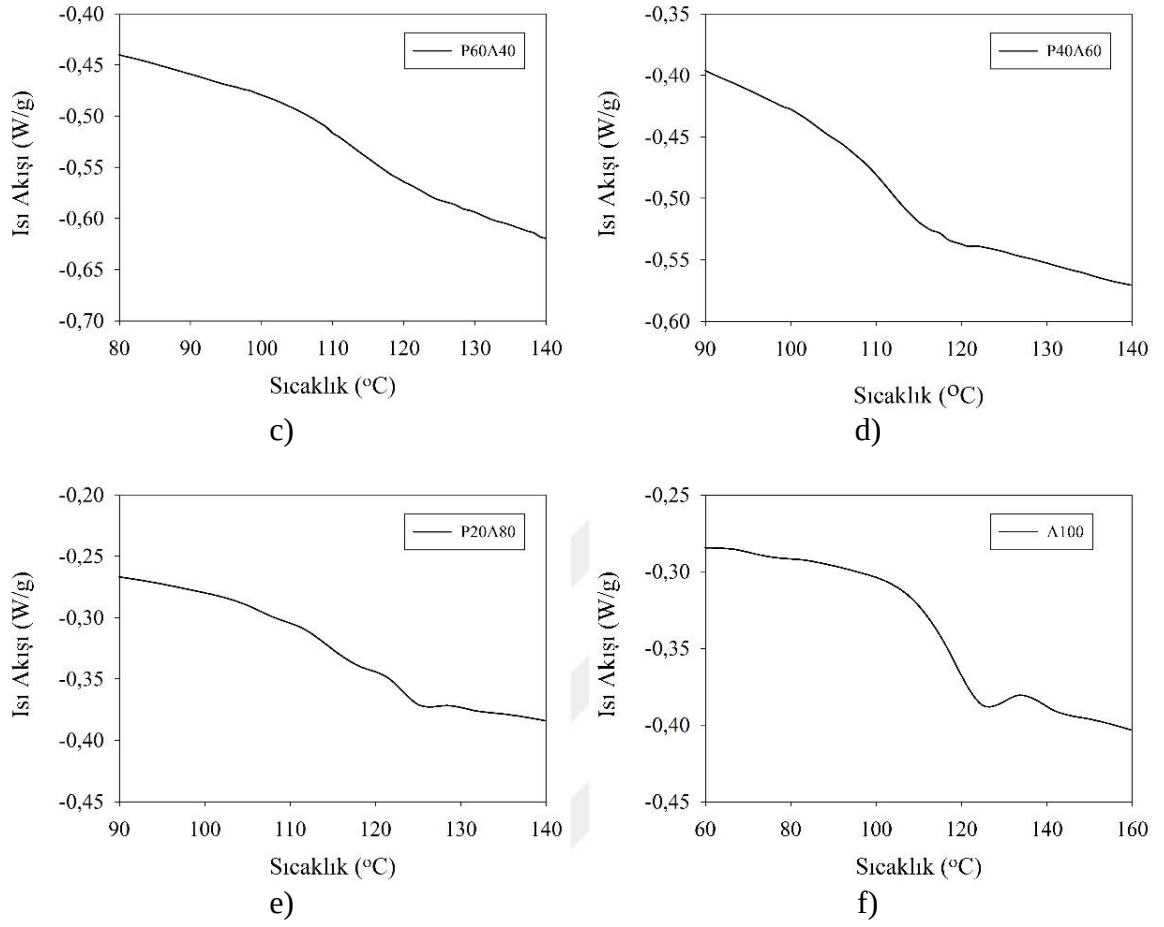
Şekil 3.3'te verilen eğrilerden görüldüğü gibi 100-120°C aralığında ısı akısı değerinde tek adımlı bir azalış eğilimi gösteren belirgin bölgeler elde edilmiştir. Bu bölgelerdeki ısı akısı değişimlerinin tek bir adımda gerçekleşen azalış eğilimine sahip bir geçiş bölgesi veya geçiş formasyonu yapısında olacak şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Geçiş formundaki bu yapı özellikle harman malzemede bir yapısal değişimin ya da faz geçişinin

görülmeyişi ifade etmektedir. Harman malzemelerin karışabilirlik durumunun karakterize edilmesi amacıyla camsı geçiş noktası sıcaklığının (T_g) belirlenmesi literatürde sıkça kullanılan önemli bir yöntemdir. Daha önceki çalışmalarda ve Bölüm 1.3.3'te belirtildiği gibi harman malzemelerde tek bir camsı geçiş sıcaklığının bulunması durumu malzemenin tek fazlı bir yapıda olduğunu ve karışabilir bir form sergilediğini ifade etmektedir. Aynı zamanda harman yapıyı oluşturan polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları arasında yaklaşık 10°C sıcaklık farkı bulunması durumunda oluşan harman yapının da büyük oranda karışabilir formda olduğu önceki çalışmalardan bilinmektedir (Kumaraswamy vd, 2006). Bu kapsamda camsı geçiş sıcaklıkları DSC eğrilerinden eğrilerin sıcaklığa bağlı ikinci türevleri alınarak belirlenmiş ve Tablo 3.3'te özetlenmiştir. Saf PMMA ve saf ABS için elde edilen ısı akısı-sıcaklık eğrileri incelendiğinde; saf PMMA'nın $95-115^\circ\text{C}$ aralığında ısı akısının geçiş formu gösterdiği ve bu bölgede geçiş formu içerisinde camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık 105°C olarak belirlenmiştir. Saf ABS'de ise ısı akısındaki adım görümlü geçiş formu $105-125^\circ\text{C}$ aralığında gözlemlenmiş ve A100 numune için camsı geçiş sıcaklığı 118°C olarak elde edilmiştir. Saf PMMA ve saf ABS malzemeler için elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 16°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3. DSC analizleri ile elde edilen farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemeler için sıcaklığa bağlı ısı akısı eğrileri; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100

Şekil 3.3'ün devamı



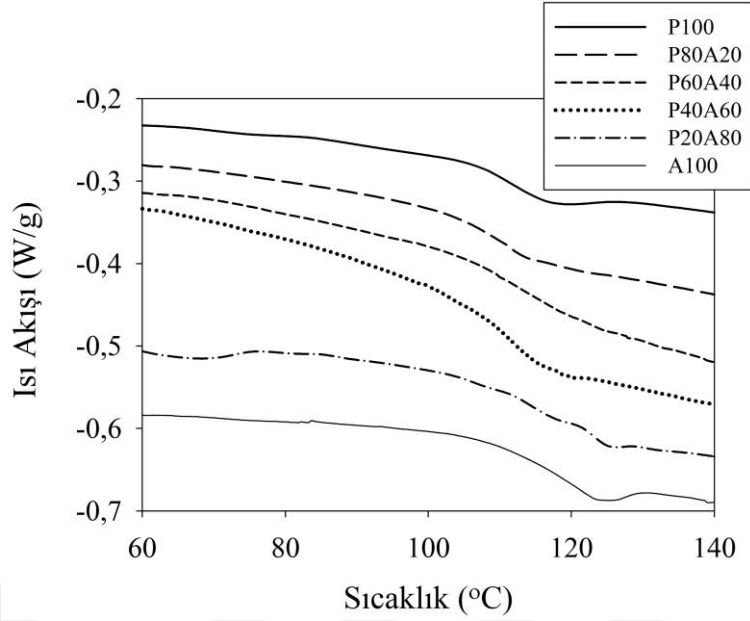
Tablo 3.3. PMMA/ABS harmanlar için DSC analizleri ile belirlenen camsı geçiş sıcaklıkları

Numune Kodu	T _g (°C)
P100	105
P80A20	108
P60A40	113
P40A60	111
P20A80	115
A100	118

Tablo 3.3'ten harman yapı içerisinde artan ABS oranı ile harman bileşimde camsı geçiş sıcaklığının saf PMMA'ya kıyasla arttığı görülmektedir. Tablodan görüldüğü gibi saf PMMA ve saf ABS için camsı geçiş sıcaklıkları sırasıyla 105°C ve 118°C olarak

belirlenmiştir. Buna karşın harman yapıdaki numunelerde ise yapısında %60 oranında ABS bulunan P40A60 kodlu harman numunenin camsı geçiş sıcaklığı 111°C ve benzer şekilde P20A80 kodlu numunede de camsı geçiş sıcaklığı ise 115°C olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda tüm harman bileşim oranlarında tek bir adımda gerçekleşen ısı akısı düşüşü gözlemlenmiş ve tek bir camsı geçiş noktası elde edilmiştir. Böylece tüm bileşim oranlarında karışabilir formda PMMA/ABS harman malzemelerin elde edildiği ve tez çalışması kapsamında kullanıldığı söylenebilir.

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların ısı akısı-sıcaklık eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekilden PMMA/ABS harman malzemelerde ısı akısı değerindeki azalış veya geçiş formu bölgesi saf PMMA ve saf ABS malzemelerde görülen bölgelerin arasında bir bölgede gerçekleştiği görülmektedir. DSC eğrilerinde görülen ısı akısı-sıcaklık karakteristikleri ise yapıdaki PMMA ve ABS oranlarına bağlı olarak saf PMMA ve saf ABS karakteristiğine benzer formlarda elde edilmiştir. Örneğin, saf ABS ve P20A80 malzemede 60-100°C bölgesinde neredeyse doğrusal bir bölge görülmüş ve ısı akısındaki geçiş bölgesi belirgin bir yapıda oluşmuştur. Benzer şekilde PMMA oranı yüksek harman bileşimlerde (P80A20 ve P60A40), 60-100°C ısı akısının sıcaklığa bağlı değişimi saf PMMA'ya benzer bir yapıda ilerlemiş ve camsı geçiş sıcaklıkları bu harman malzemelerde saf PMMA'da elde edilen sıcaklık değerine yakın sıcaklıklarda elde edilmiştir. Şekil 3.4'ten kolayca görüldüğü gibi en belirgin geçiş adım bölgesi P40A60 malzemede elde edilmiştir. Bu harman yapıda 60-100°C sıcaklık aralığı bölgesinde PMMA malzemeye benzer bir eğilimde ısı akısı değişimi elde edilmiş ancak camsı geçiş bölgesi saf ABS malzemeye benzer olarak çok belirgin bir formda ortaya çıkmıştır. Bu durum esasen Kumaraswamy vd., (2006) tarafından belirlenen %50-75 oranında PMMA içeren PMMA/ABS harmanlarda PMMA'nın ABS içerisinde tam karışabilir faz oluşturması davranışından ileri geldiği düşünülmektedir. Bu bileşim oranı aralığında belirgin bir ısı akısı değişimi ile tek bir camsı geçiş noktası elde edilen tam karışabilir harman yapı elde edildiği önceki çalışmalarda da belirtilmiştir (Kim vd., 1993a; Oral, 2019).



Şekil 3.4. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemelerin DSC analizleri ile elde edilen sıcaklığa bağlı ısı akısı eğrilerinin karşılaştırması

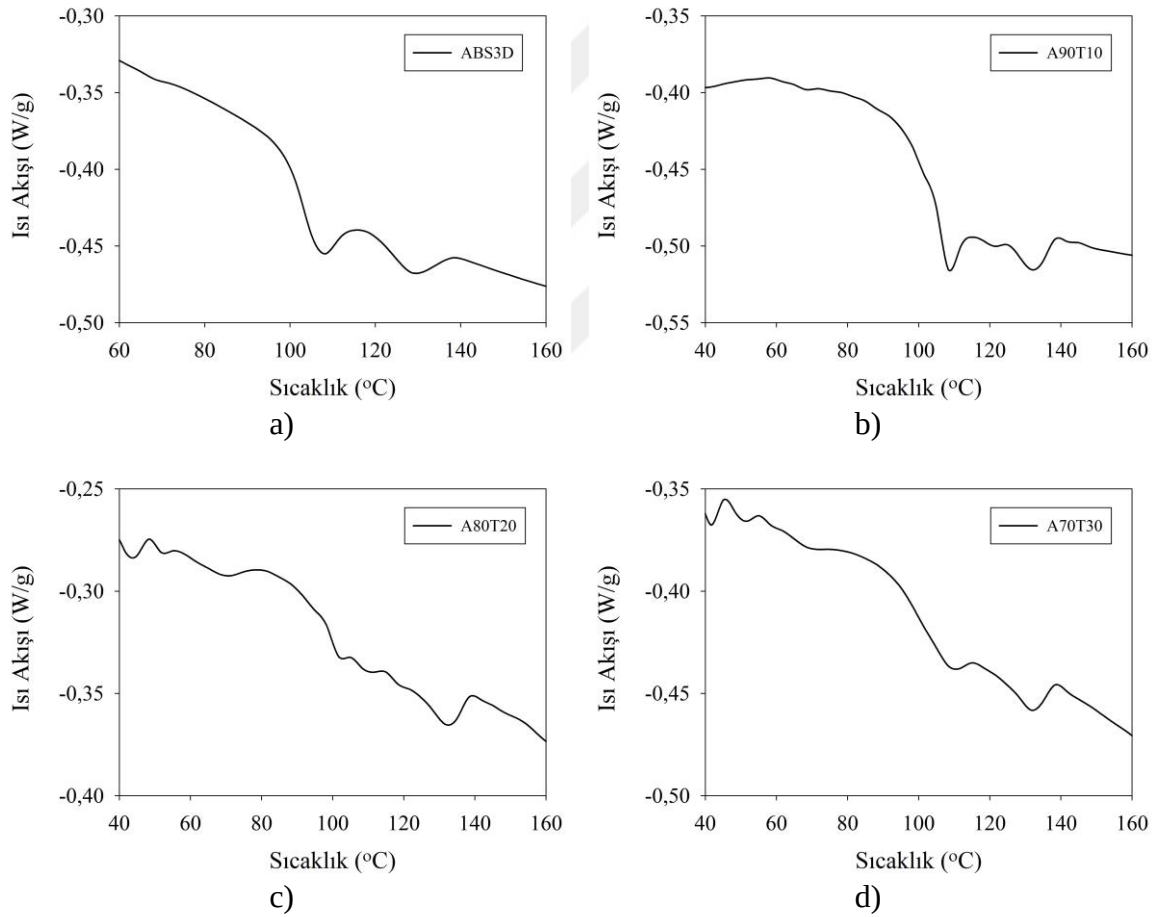
b. ABS/TPU Harman

Eriyik yığma yöntemi ile üretilen ABS/TPU harmanların camsı geçiş sıcaklıkları ve bu sıcaklıklar ile harman yapının karışabilirlik durumu irdelenmelerine ilişkin DSC analizlerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. DSC analizlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı ısı akısı eğrileri saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemeler için ayrı ayrı Şekil 3.5'te verilmiştir. Sıcaklığa bağlı ısı akısı eğrileri camsı geçiş sıcaklıklarının tayininde ve harman yapı karışabilirliğinin irdelenmesinde kullanılmıştır.

Şekil 3.5'te verilen ısı akısı-sıcaklık eğrileri incelendiğinde tüm eğrilerde ortak karakteristik davranışın ısı akısındaki azalış bölgelerinin birden fazla sıcaklık aralığında belirgin olduğu görülmektedir. Ancak bu noktada saf ABS malzemeyi temsil eden Şekil 3.5a'daki eğri ile farklı bileşim oranlarında hazırlanan ABS/TPU malzemelere ait eğrileri ayrı ayrı değerlendirmek gerekmektedir. ABS3D numune kodu ile verilen DSC eğrisinde, ısı akısındaki değişimden görüldüğü gibi 60-140°C aralığında ısı akısı değerinde iki adımlı bir azalış gösteren belirgin bölgeler elde edilmiştir. PMMA/ABS harman yapıda olduğu gibi geçiş bölgelerindeki bu değişimler hem camsı geçiş sıcaklıklarının tayininde hem de harman yapının karışabilirlik durumunun araştırılmasında önemli bilgiler vermektedir. Literatürdeki çalışmalardan harman yapıyı oluşturan saf polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları arasında birden fazla camsı geçiş sıcaklığı barındıran polimer harmanların kısmi karışabilir (partially

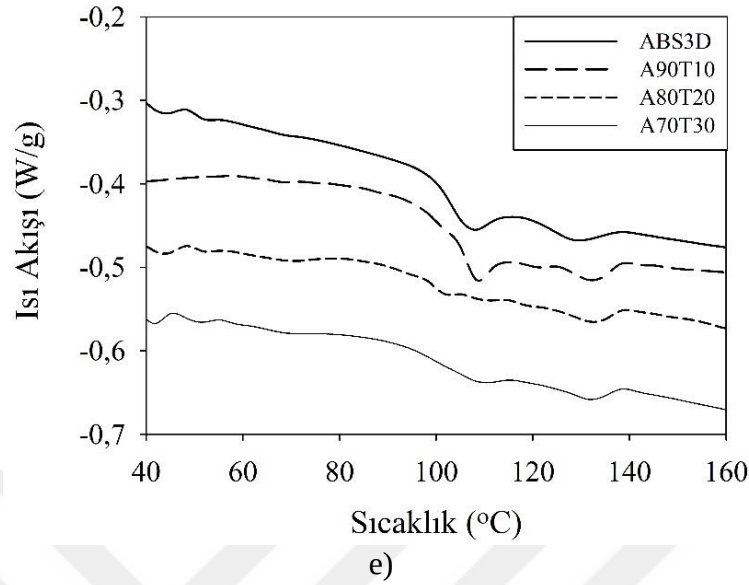
miscible) bir davranış gösterdiği, belirtilmiştir (Ajitha & Thomas, 2020; White vd., 2012). Buna karşın harman yapıyı oluşturan saf polimerlerin camsı geçiş sıcaklık aralığı dışında birden fazla camsı geçiş sıcaklığı barındıran polimer harman malzemelerin ise karışamaz (immiscible) formda davranış gösterdiği belirtilmiştir (Ajitha & Thomas, 2020; White vd., 2012). Şekil 3.5a'da verilen eğri incelendiğinde 60-140°C aralığında iki tepe noktası meydana getiren iki adımlı bir ısı akısı azalışı görülmektedir. ABS3D kodlu saf ABS'de görülen bu davranış enjeksiyon kalıplama ile üretilen A100 kodlu saf ABS malzemenin farklı bir karakter sergilemektedir. Bu durum enjeksiyon kalıplama ve eriyik yığma yöntemlerinde kullanılan ABS hammaddelerin farklı fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle gözlemlenmiştir. Eriyik yığma yönteminde kullanılan saf ABS ekstrüzyon ve filament üretim hattında üretime uygun formda olacak şekilde seçilmiştir. Örneğin, enjeksiyon kalıplama üretimi için seçilen ABS malzemenin eriyik akış hızı 4,2 g/10dk iken eriyik yığma yöntemi ile ABS/TPU üretiminde kullanılan saf ABS'nin ise 22 g/10dk değerine sahiptir. Bu nedenle her iki saf ABS malzemenin DSC eğrilerinin karşılaştırılmaması gereklidir. ABS3D kodlu saf ABS de görülen iki adımlı azalış eğilimi davranışının malzemeyi meydana getiren bileşenlerin kendilerine ait camsı geçiş noktalarını oluşturmaktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sıcaklık aralığındaki ısı akısının sıcaklığa bağlı türevleri yardımıyla ABS3D kodlu numunenin camsı geçiş sıcaklıkları sırasıyla 104°C ve 126°C olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklık değerleri ABS yapısında bulunan sırasıyla stiren-akrilonitril ve bütadiyen bileşimlerinin karakteristik camsı geçiş sıcaklıkları olarak önceki çalışmalardan bilinmektedir (Howard, 1961; Muntean & Vasile 2005). Böylece ABS yapının tek bir camsı geçiş sıcaklığı vermeyen karışabilir formda olmayan bir karakter sergilediği söylenebilir. ABS/TPU harmanlar için elde edilen ve Şekil 3.5b-d'de sırasıyla bileşim oranlarına bağlı olarak verilen eğrilerde ısı akısının sıcaklığa bağlı olarak ABS'de görülen iki adımlı azalışı karakteristiğine ek olarak TPU'dan kaynaklandığı düşünülen bir adım daha içerdiği böylece üç adımlı bir ısı akısı azalışı olduğu görülmektedir. Bu adım ABS/TPU harmanlardan elde edilen DSC eğrilerinde 55-70°C sıcaklık aralığındaki ısı akısındaki düşüş bölgesinde belirlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda da TPU malzemenin benzer sıcaklık aralığında karakteristik camsı geçiş sıcaklığı gösterdiği bilinmektedir (Akkoyun, 2016). Şekil 3.5a-d'de verilen DSC eğrilerinden ABS ve ABS/TPU harmanların camsı geçiş sıcaklıkları belirlenmiş ve Tablo 3.4'te özetlenmiştir. Şekil 3.5 ve Tablo 3.4'ten görüldüğü gibi ABS/TPU harmanlar hem ABS'nin hem de TPU'nun karakteristik camsı geçiş sıcaklıklarını yapısında bulunduran bir

davranış sergilemektedir. ABS3D kodlu numune 104°C ve 126°C değerlerinde gözlemlenen camsı geçiş sıcaklıklarına yakın sıcaklık aralığında ABS/TPU harmanlarda da camsı geçiş sıcaklıkları elde edilmiştir. Örneğin, A90T10 kodlu harmanda 99,7°C ve 128°C sıcaklıklarında, A80T20 kodlu harmanda ise 106,8°C ve 124,3°C sıcaklıklarında ABS3D kodlu malzemeden ileri geldiği bilinen camsı geçiş noktaları elde edilmiştir. Tablo 3.4’te verilen $T_{g,3}$ camsı geçiş sıcaklığı ise harman yapıda bulunan TPU bileşeninden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, ABS/TPU harmanlarda gözlemlenen üç adımlı ısı akışı azalışı davranışının ABS ve TPU’nun karakteristik camsı geçiş sıcaklıkları arasındaki yaklaşık 40°C fark oluşmasından ileri geldiği düşünülmektedir.



Şekil 3.5. DSC analizleri ile elde edilen saf ABS ve farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı ısı akışı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20, d) A70T30 ve e) ısı akışı-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.5'in devamı



Tablo 3.4. ABS/TPU harmanların camsı geçiş sıcaklıkları

Numune Kodu	T _{g,1} (°C)	T _{g,2} (°C)	T _{g,3} (°C)
ABS3D	104	126	-
A90T10	99,7	128	65
A80T20	106,8	124,3	64,9
A70T30	99,9	127	61,5

Şekil 3.5e’de ise ABS3D, A90T10, A80T20 ve A70T30 numunelerden elde edilen DSC eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden ve Tablo 3.4’ten, ABS/TPU harmanlarda artan TPU oranı ile TPU’dan ileri gelen camsı geçiş sıcaklığının azalma eğilimi gösterdiği, benzer şekilde ABS yapısındaki stiren-akrilonitril bileşiminden kaynaklanan ilk geçiş bölgesindeki camsı geçiş sıcaklığının da azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bu durum Şekil 3.5e’de bu sıcaklık bölgelerinde gözlemlenen tepe noktalarındaki kaymalardan da kolayca görülmektedir. Saf ABS’nin yapısında bulunan bütadiyen fazından ileri gelen ve ABS/TPU harmanlarda 124-128°C aralığında görülen camsı geçiş sıcaklığı ise harman yapıdaki TPU oranı ile nispeten değişim göstermediği gözlemlenmiştir. ABS/TPU harman yapısında DSC analizleri sonucunda polimer harmanın karışabilir bir formda olmadığı ve birden fazla camsı geçiş sıcaklığı karakteristiği sergilediği söylenebilir.

3.3. DMA Analizlerine Ait Sonuçlar

Bu bölümde, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemeler için gerçekleştirilen DMA analizlerine ait sonuçlar sunulmuştur. DMA analizleri yardımıyla harman malzemelerin depolama ve kayıp modülleri ile bu modüllerin birbirine oranı olan kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi incelenmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar detaylarıyla her bir harman için ayrı ayrı tartışılmıştır. Aynı zamanda harman yapıdaki bileşim oranına bağlı olarak modüllerin değişimleri irdelenerek sunulmuştur. DMA analizleri ile harman malzemelerin viskoelastik malzeme davranışları (kayıp ve depolama modülleri) belirlenmiş ve harman bileşim oranına bağlı olarak irdelenmiştir. PMMA/ABS harman malzemelerin DMA analizleri sıcaklık taraması ve frekans taraması modlarında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık taraması modunda sabit bir yükleme frekansında sıcaklık artışıyla viskoelastik malzeme özellikleri elde edilirken, frekans taraması modunda ise sabit oda sıcaklığında yükleme frekansına bağlı olarak viskoelastik malzeme davranışları incelenmiştir. ABS/TPU harman malzemelerde ise DMA analizleri sıcaklık taraması modunda tamamlanmıştır.

a. PMMA/ABS Harman

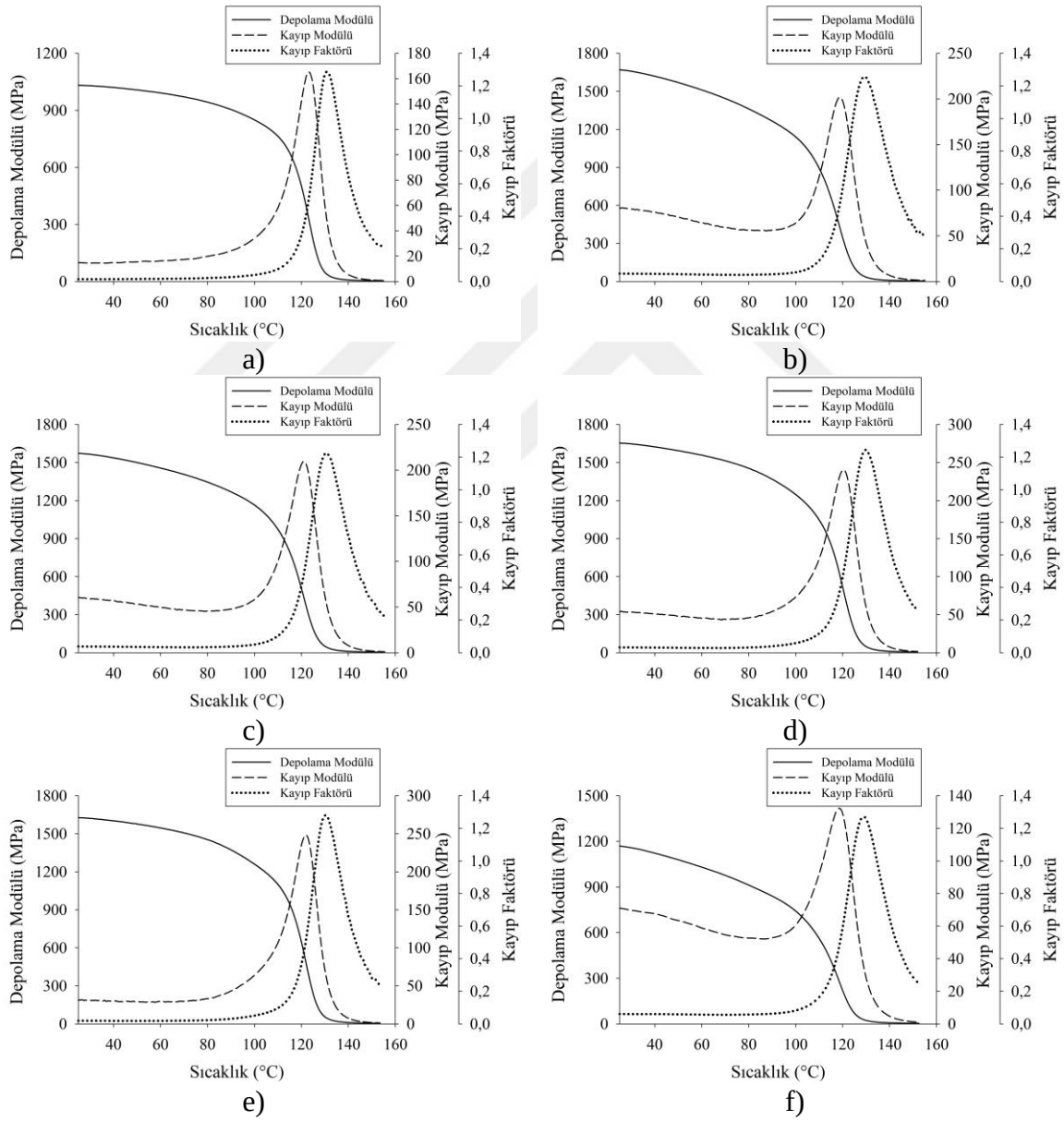
Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numunelerin DMA analizlerine ait sonuçlar bu başlık altında irdelenmiştir. Saf ve harman malzemelerin viskoelastik özellikleri, sıcaklığa bağlı olarak sabit frekansta depolama modülü (E'), kayıp modülü (E'') değişimlerinin yanı sıra kayıp faktörünün değişimlerine dayandırılarak değerlendirilmiştir. Numunelerden sıcaklığa bağlı elde edilen depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktör değişimleri Şekil 3.6'da sırasıyla verilmiştir. Ayrıca bileşim oranına bağlı değişimlerin yorumlanması amacıyla Şekil 3.7'de saf ve harman numunelerden elde edilen depolama, kayıp modülleri ile kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 3.6'dan görüldüğü gibi saf ve harman numunelerin depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimleri benzer bir davranış izlemektedir. Bu kapsamda detaylı irdelemeler öncelikle P100 ve A100 kodlu saf PMMA ve saf ABS malzemeler üzerinden gerçekleştirilecektir. Şekil 3.6a'da verilen P100 kodlu saf PMMA numunenin DMA analizleri sonucunda elde edilen depolama ve kayıp modüllerindeki değişimler incelendiğinde, sıcaklıkla depolama modülünün azalış gösterdiği ve çok küçük bir değere ulaşarak doğrusal kaldığı buna karşın kayıp modülünün ise sıcaklıkla artış

gösterip bir tepe noktası değerine ulaştıktan sonra ani düşüş gösterdiği görülmektedir. Benzer davranış A100 kodlu saf ABS'de de görülmektedir. P100 kodlu numunenin depolama modülündeki değişim ele alındığında, yaklaşık 100°C'ye kadar depolama modülünün nispeten küçük azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Depolama modülü bu sıcaklık değerinden sonra keskin bir düşüş göstermekte ve devamında sabit bir değere ulaşmaktadır. P100 kodlu numunedeki bu değişim oda sıcaklığında yaklaşık 1035 MPa ile 145°C'de yaklaşık 6 MPa değerleri arasında meydana gelmektedir. Şekil 3.6f'de verilen A100 kodlu saf ABS malzemenin depolama modülü ise oda sıcaklığından itibaren sıcaklık artışı yaklaşık 100°C'ye kadar belirli bir eğimde azalma davranışı göstermektedir. Bu sıcaklık değerinden sonra ise artan bir eğimle azaldığı belirlenmiştir. A100 numunedeki bu değişim oda sıcaklığında yaklaşık 1170 MPa değeri ile başlamakta ve 100°C'de 741 MPa olarak elde edilmektedir. Ancak depolama modülü 100-120°C aralığındaki ani düşüşü ile 120°C'de 220 MPa olarak elde edilmektedir.

PMMA/ABS harman numunelerin Şekil 3.6b-e'de verilen depolama modüllerinin sıcaklığa bağlı değişim eğrileri incelendiğinde, tüm bileşim oranlarında numunelerin benzer davranış sergilediği görülmektedir. Bu davranış 25-90°C ve 90-130°C aralığında farklı eğimlerde sıcaklığa bağlı depolama modülünün azalmasını temsil etmektedir. PMMA/ABS harman numunelerin depolama modülü değerleri P100 kodlu saf PMMA'nın aksine 80°C'ye kadar neredeyse doğrusal bir davranış göstermemiş ve yapısında bulunan ABS'nin davranışına benzer şekilde 25-90°C aralığında sıcaklık artışıyla düşük bir eğimde azalış göstermiştir. Buna ilaveten, 90-130°C aralığında depolama modülünde sıcaklığa bağlı olarak görülen düşüş ise A100 kodlu numunedeki ani düşüş bölgesinden daha yüksek bir eğimle P100 kodlu numuneye benzer şekilde gerçekleşmiştir. PMMA/ABS harman numunelerin oda sıcaklığında depolama modüllerinin saf ABS ve saf PMMA'dan daha yüksek değerlere sahip olduğu da Şekil 3.6'dan görülmektedir. Depolama modülündeki sıcaklığa bağlı görülen azalma eğilimi ile açıklanan bu davranış polimer yapısındaki moleküler segmentlerin hareketliliği ile açıklanabilir (Meng vd., 2018). Düşük sıcaklıklarda moleküler hareketlilik küçük salınımlar ile gerçekleşen düşük kinetik enerji nedeniyle daha sınırlıdır (Ionita vd., 2014). Bu durumda depolama modülü, malzeme rijitliği ile de ilişkilendirilmesi nedeniyle oda sıcaklığında maksimum değere sahip olmakta, malzemeler bu sıcaklık değerinde yoğun ve katı bir halde bulunmaktadır. Sıcaklık artışı ile moleküler hareketliliğin artmasıyla moleküler bazda kinetik enerji artış göstermekte bu durum moleküllerin ortalama konumları etrafındaki salınımlarının artışına neden olmaktadır (Agrawal vd., 2010). Bu artış

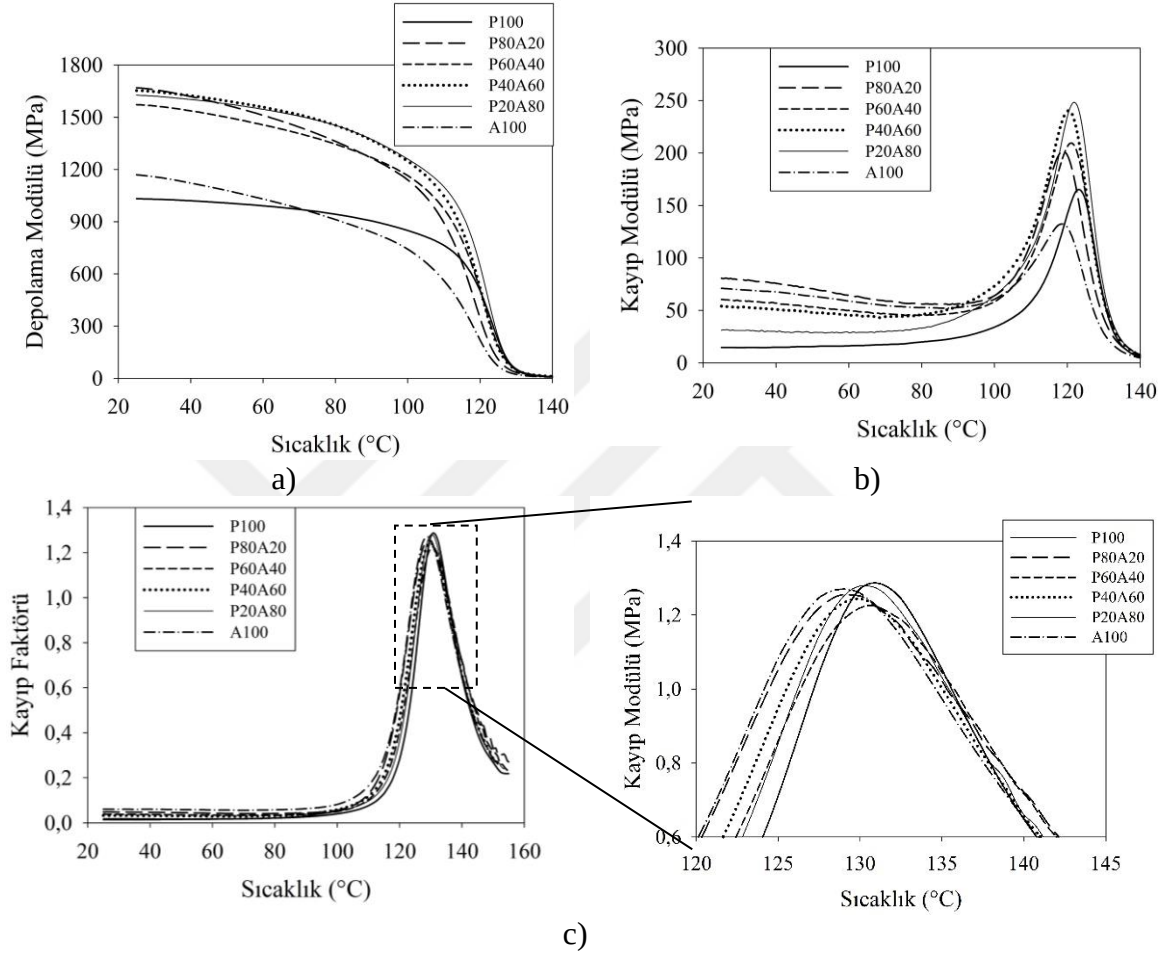
moleküler segmentler arası serbest hacmin artışına neden olarak depolama modülünde sıcaklığa bağlı azalmaların gözlemlenmesi sonucunu doğurmaktadır (Brostow, 2007). Şekil 3.6a ve f’de verilen kayıp faktörü ise kayıp modülünün depolama modülüne oranı olarak bilinmekte ve sönümlleme faktörü olarak da adlandırılmaktadır. Kayıp faktörü, sıcaklık artışı ile artış göstermekte ve bir tepe noktası değerine ulaştıktan sonra sıcaklık artışı ile ani bir düşüş karakteristiği göstermektedir. Temelde bu tepe noktası malzemedeki sünek/gevrek geçiş noktası sıcaklığı olarak önemli bir geçişi temsil etmektedir.



Şekil 3.6. DMA analizleri ile farklı bileşim oranlarına sahip PMMA/ABS harman malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak elde edilen depolama ve kayıp modülleri ile kayıp faktörlerinin değişimi; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların depolama modülleri, kayıp modülleri ve kayıp faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri karşılaştırmalı incelenmesi amacıyla Şekil 3.7’de verilmiştir. Saf ve harman yapıdaki numunelerin oda sıcaklığında sahip olduğu depolama ve kayıp modülleri ise Tablo 3.5’te verilmiştir. Şekil 3.7a’da saf ve harman numuneler için elde edilen depolama modülleri kıyaslandığında P100 kodlu numunenin saf ABS ve PMMA/ABS harmanlara kıyasla camsı bölgede (glassy region) yaklaşık 90°C’ye kadar neredeyse doğrusal değişim gösterdiği ancak ABS ve PMMA/ABS harmanlarda ise sıcaklıkla daha yüksek eğilimli gerçekleşen bir azalış eğilimi hâkim olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda oda sıcaklığında saf PMMA’nın saf ABS’den daha düşük depolama modülüne sahip olduğu ancak artan sıcaklıkla yaklaşık 75°C’den sonra ABS’nin depolama modülünün PMMA’dan daha düşük değerlere düştüğü görülmüştür. Bu durum moleküler hareketliliğin ABS numunede sıcaklıkla daha erken gerçekleştiği ve depolama modülündeki düşüşün PMMA’ya kıyasla daha hızlı meydana geldiğini ifade etmektedir. Saf PMMA ve saf ABS’nin oda sıcaklığındaki depolama modülleri birbirine yakın değerlerde iken PMMA/ABS harmanların depolama modülleri ise sırasıyla saf PMMA ve saf ABS’den yaklaşık 1,6 ve 1,4 kat daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durum Bölüm 3.4’te ifade edilen PMMA/ABS harman malzemelerde saf PMMA ve saf ABS’de gözlemlenen sönümleme bantlarına ek olarak görülen hidrojen bağı (-OH-) varlığı ile açıklanmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan da yapıda yer alan hidrojen bağı ile depolama modülünün iyileştiği bilinmektedir (Jenkins vd., 2000; Li & Goh, 2002; Zhu vd., 2004; Song & Wang, 2020; Lewis vd., 2014). Bu durum PMMA/ABS harmanların saf PMMA ve saf ABS’ye kıyasla daha üstün enerji depolama kapasiteli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Hidrojen bağ yapısı bulunan ve bulunmayan polimerlerin döngüsel yükleme altında elde edilen histerezis eğrilerinin altındaki alanın hidrojen bağlı polimerlerde daha üstün olduğu ve yapısal enerji sönümleme performansının da iyileştiği bilinmektedir (Huang vd., 2021). Aynı zamanda PMMA/ABS harmanların depolama modülünün camsı bölgede PMMA’ya kıyasla sıcaklığa bağlı olarak daha yüksek eğimli bir azalış davranışına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 3.7b-c’de verilen sırasıyla kayıp modülü ve kayıp faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinde, kayıp modülünün bileşim oranı ile değişimler gösterdiği buna karşın kayıp faktörünün hem saf hem de farklı bileşim oranlarındaki harman malzemeler için büyük oranda değişim göstermediği görülmüştür. Kayıp modülü ve kayıp faktörü sıcaklığa bağlı olarak oldukça büyük bir tepe noktası oluşturmakta ve bu tepe nokta camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinmektedir (John vd., 2003).

Ayrıca, Şekil 3.7c’de tepe noktanın elde edildiği sıcaklık değerinin nispi değişimler içerdiği görülmektedir ($< 5^{\circ}\text{C}$). Tepe nokta değerlerinin 1,3 ile 1,22 arasında değişim gösteren ve bileşim oranına bağlı olarak net bir değişim eğilimi vermeyen davranış sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 3.7. PMMA/ABS harmanlarda bileşim oranına bağlı olarak viskoelastik özelliklerin; a) Depolama modülü, b) kayıp modülü ve c) kayıp faktörü karşılaştırmaları

Tablo 3.5. Oda sıcaklığında elde edilen saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harmanlara ait viskoelastik özellikler

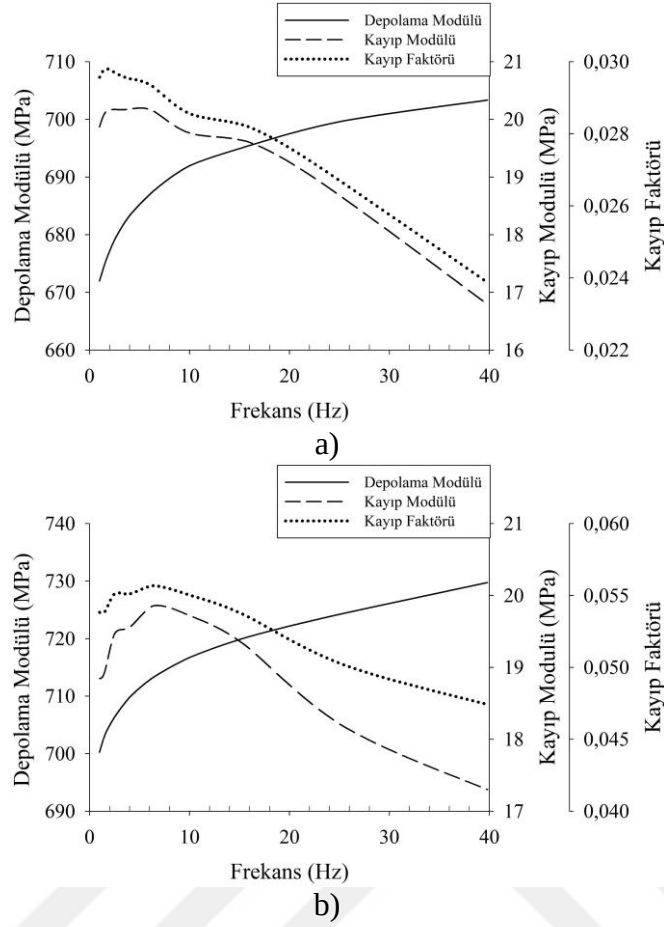
Numune Kodu	Depolama Modülü (MPa)	Kayıp Modülü (MPa)
P100	1032	14,7
P80A20	1669	80,7
P60A40	1572	60,4
P40A60	1653	54

Tablo 3.5'in devamı

P20A80	1627	31
A100	1170	71

PMMA/ABS harmanların yorulma yüklemesi gibi dinamik yüklere maruz kaldığı uygulamalardaki malzeme davranışının irdelenmesinde viskoelastik malzeme özelliklerinin değişiminin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla harman yapıdaki numunelerin oda sıcaklığında değişken frekanslı yükleme altındaki viskoelastik malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla frekans taramalı DMA analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler yapısında farklı oranlarda ABS ve PMMA içeren P20A80 ve P60A40 kodlu numunelerle oda sıcaklığında (25°C) 1-40 Hz frekans aralığında tamamlanmıştır. Frekans taraması analizleri sonucunda depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü değişimleri yükleme frekansına bağlı olarak elde edilmiş ve Şekil 3.8'de P20A80 ve P60A40 kodlu harman numuneler için sırasıyla verilmiştir. Frekansa bağlı olarak elde edilen depolama modülü, malzemenin elastik davranışının frekansa bağlı tepkisini ifade ederken, kayıp modülü değişimi ise malzemenin viskoz davranışının frekansa bağlı olarak değişimini ifade etmektedir (Das vd., 2014; Zeltmann vd., 2016). Depolama modülündeki artış moleküler zincir içerisindeki elastik davranışın iyileşmesini ifade eder ve polimer zincirleri arası etkileşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayıp modülündeki artış ise polimer zincirler arasındaki moleküler hareketliliğin artması anlamına gelmektedir. Aynı zamanda kayıp faktöründe frekansın artmasıyla gözlemlenen azalma ise yükleme frekansının artmasıyla malzeme tepkisinin daha elastik bir davranış gözlemlenmesine işaret etmektedir. Bu davranış değişimi artan yükleme frekansı sonucunda plastik enerji depolama kabiliyetinin düşmesi ve ani kırılma gözlemlenmesi gibi bir durumun oluşabileceğine işaret etmektedir. Kayıp faktörü ve kayıp modülünde azalma eğiliminin ani bir şekilde gözlemlendiği doğrusal bölge sonrası görülen ani düşüş bölgeleri ise kritik yükleme frekanslarını temsil eden bölgeler olarak bilinmektedir (Dunson, 2017; Schallnat vd., 2021). Frekans taraması ile gerçekleştirilen DMA analizleri hakkındaki yorumlar burada belirtilen hususlar dikkate alınarak irdelenmiş ve sunulmuştur. Şekil 3.8a ve b'den görüldüğü gibi depolama modülü oda sıcaklığında artan frekans ile hem P20A80 hem de P60A40 kodlu numunelerde artış eğiliminde iken kayıp modülü ve kayıp faktörü ise her iki numune içinde artan yükleme frekansı ile azalış eğilimi göstermiştir. Depolama modülünde yükleme frekansı artışı ile gözlemlenen artış katı formdaki PMMA/ABS harmanın elastik

dayanımının iyileşme gösterdiğini buna karşın kayıp modülünde gözlemlenen azalış ise moleküler zincir hareketinin arttığını ifade etmektedir. Bazı frekans değerleri için elde edilen depolama modülü ve kayıp modülü değerleri P20A80 ve P60A40 kodlu numuneler için özetlenerek Tablo 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.8 ve Tablo 3.6'dan görüldüğü gibi kayıp modülü ve kayıp faktörü değerlerinde belirli bir frekans değerine kadar artış eğilimi gözlemlenirken bu frekans değeri sonrasında ani bir azalış eğilimi ile değişim gösterdiği görülmektedir. Kayıp modülü ve kayıp faktörlerinde frekans artışı ile artış sonrası görülen bu tepe nokta malzeme enerji sönümleme kabiliyetinin maksimum olduğu noktayı ifade etmektedir. Bu frekans değeri sonrasında görülen ani azalma ile harman malzemelerin enerji sönümleme kabiliyetini kaybetmeye başladığı ve daha elastik bir davranış göstereceği söylenebilir. Bu durumun polimer esaslı malzemelerde farklı frekanslarda gerçekleştirilen yorulma testlerinde artan frekansla birlikte belirli bir frekans değeri sonrasında çevrim sayısındaki ani azalmanın görülmesine yol açtığı bilinmektedir (Barron vd., 2001; Mortazavian vd., 2015). Bu durum eğrilerde 1-10 Hz frekans aralığında belirgin olan doğrusal, omuz formu gösteren bölgeler ve belirgin bir tepe dönüşüm noktası ile kendisini göstermektedir. Kritik frekans değerinde meydana gelen bu değişim literatürde yapılan çalışmalarda malzeme viskoelastik davranışında geçiş bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu geçiş bölgesi, yorulma gibi dinamik uygulamalarda yüklemenin gerçekleştirileceği frekansın seçimi için önemli ipuçları taşımaktadır. Polimer ve polimer harmanlarda numunenin enerji sönümleme kabiliyetindeki değişim ile ilişkilendirilen kritik bu frekans malzeme hasar davranışı üzerinde de büyük öneme sahiptir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, tez çalışmasında kullanılan PMMA/ABS harmanların malzeme davranışının karakterize edilmesi amacıyla gerçekleştirilecek yorulma testlerinin frekans taramalı DMA analizleri ışığında yaklaşık 6 Hz değerini geçmeyecek yüklemeye maruz bırakılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.8. PMMA/ABS harman malzemelerde viskoelastik malzeme özelliklerinin yükleme frekansına bağlı olarak değişimi; a) P20A80 ve b) P60A40

Tablo 3.6. P20A80 ve P60A40 kodlu numuneler için oda sıcaklığında farklı yükleme frekanslarında elde edilen depolama ve kayıp modülü değerleri

Numune Kodu	Yükleme Frekansı (Hz)					
	1	6	25	1	6	25
	Depolama Modülü (MPa)			Kayıp Modülü (MPa)		
P20A80	672	687	699	19,9	20,2	18,7
P60A40	700	714	724	18,8	19,9	18,2

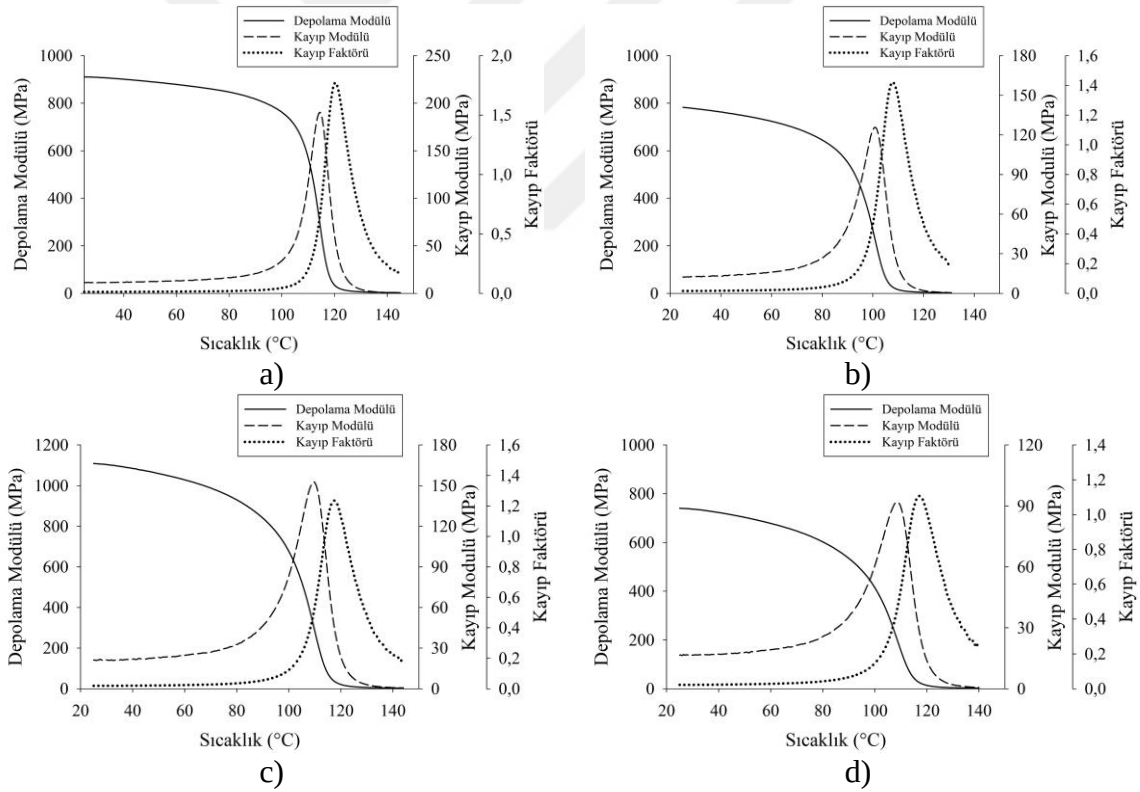
b. ABS/TPU Harman

Eriyik yığma yöntemi ile üretilen saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemelerin (A90T10, A80T20 ve A70T30) DMA analizleri yardımıyla elde edilen viskoelastik malzeme özellikleri bu başlık altında sunulmuştur. Depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktöründen oluşan viskoelastik özellikleri sıcaklığa bağlı olarak

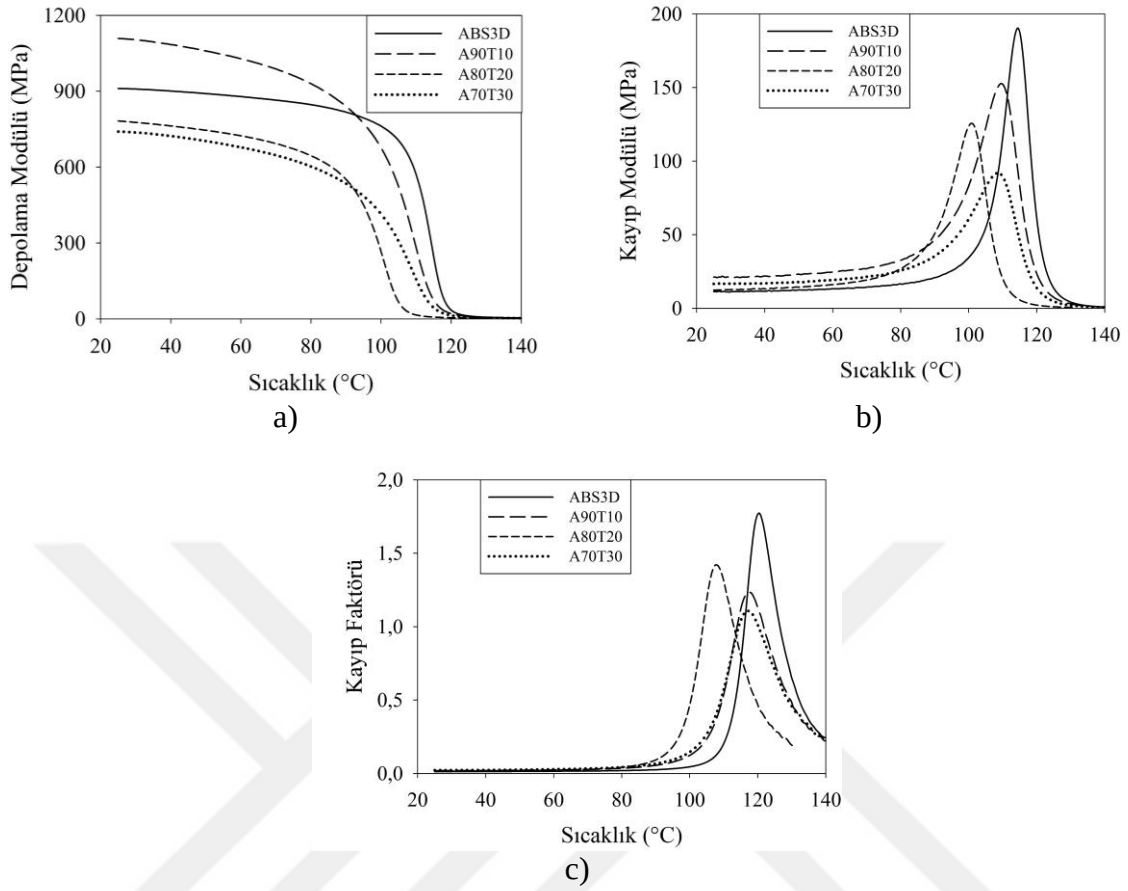
sabit bir frekansta (1 Hz) belirlenmiş ve bu modüllerin sıcaklığa bağlı değişimleri irdelenmiştir. Şekil 3.9'da saf ABS ve harman yapıdaki ABS/TPU numunelerin sıcaklığa bağlı viskoelastik modüllerindeki ve kayıp faktöründeki değişimleri sırasıyla verilmiştir. Aynı zamanda harman yapıdaki TPU bileşim oranı ile viskoelastik malzeme özelliklerinin değişimlerinin değerlendirilmesi amacıyla Şekil 3.10'da depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü karşılaştırmalı formda sunulmuştur.

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10a'da verilen depolama modüllerinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelendiğinde, A90T10 kodlu numunenin oda sıcaklığında maksimum depolama modülü değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda ABS3D kodlu saf ABS malzemenin A80T20 ve A70T30 kodlu harman numunelerden daha üstün depolama modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde artan sıcaklıkla depolama modülünde azalış eğiliminin farklı sıcaklıklarda ani düşüşler ile belirgin hale geldiği görülmektedir. A90T10 kodlu numunenin depolama modülü yaklaşık 100°C'ye kadar saf ABS'den daha yüksek iken bu sıcaklık değerinden sonra harman yapıda bulunan TPU'dan kaynaklanan moleküler düzeydeki artan hareketlilik ile ani düşüş göstermiş ve ABS3D numuneden daha düşük değere ulaşmıştır. Burada bahsedilmesi gereken bir diğer nokta ise oda sıcaklığı koşulundan yaklaşık 100°C'ye kadar üstün elastik malzeme davranışı nedeniyle A90T10 numunenin daha yüksek enerji depolama kabiliyetine sahip olacağıdır. Bu durum mekanik testler ve yorulma ömrü performansı değerlendirmesinde dikkate alınacak bir husus olarak öne çıkmaktadır. ABS/TPU harman numunelerin oda sıcaklığında sahip olduğu depolama ve kayıp modülleri ile kayıp faktörünün tepe noktası değerinin elde edildiği sıcaklıklar Tablo 3.7'de özetlenerek verilmiştir. Şekil 3.10 ve Tablo 3.7'de görüldüğü gibi, oda sıcaklığında en üstün depolama modülü A90T10 numunede elde edilmiştir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10b'de verilen kayıp modülü ve kayıp faktörü değişimleri irdelendiğinde, kayıp modülünde sıcaklık değişimi sırasında elde edilen tepe noktaya bağlı olarak kayıp faktöründe de benzer bir değişim eğiliminin elde edildiği söylenebilir. Bu nedenle kayıp faktörü artan sıcaklıkla tepe noktası değerine kadar arttıktan sonra ani bir düşüş gösteren karakteristik bir davranış sergilemektedir. Şekil 3.10b ve Tablo 3.7'den de görüldüğü gibi kayıp faktörünün tepe noktasının değeri ve bu tepe noktanın oluştuğu sıcaklık değerleri bileşim oranına bağlı olarak farklılık sergilemektedir. Polimer ve polimer harmanlarda kayıp faktöründeki tepe noktasına denk gelen sıcaklık değerinin sünek/gevrek geçiş sıcaklığı veya camsı geçiş sıcaklığı olarak da değerlendirilmesi nedeniyle bileşim oranına bağlı değişim önemli bir sonuç içermektedir. Tablo 3.7'den görüldüğü gibi kayıp faktörünün tepe noktaya ulaştığı sıcaklık değerleri

ABS3D, A90T10, A80T20 ve A70T30 kodlu numuneler için sırasıyla 120,4°C, 117,5°C, 107,8°C ve 117,1°C olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi tepe noktadaki sıcaklık değerleri artan TPU oranı ile harman bileşimlerde %20 TPU oranı hariç ciddi şekilde bir değişim gözlemlenmemiştir. ABS/TPU harmanlarda DSC analizleri ile elde edilen camsı geçiş sıcaklıklarının TPU oranı ile değişimine benzer bir karakter izlemektedir. Burada şu hususu belirtmek gerekir ki, DSC ve DMA analizlerindeki yaklaşımsal farklılıklar nedeniyle elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları birbirleriyle farklılıklar gösterebilmektedir (Menard & Menard, 2020; Groenewoud 2001). Bu durum DMA analizlerinde camsı geçiş sıcaklıklarının depolama modülünün sıcaklığa bağlı değişiminin birinci türevi, kayıp modülü ve kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimlerinin tepe noktalarının da camsı geçiş sıcaklığı olarak değerlendirildiği yaklaşımların bulunmasından ileri gelmektedir (Gracia-Fernández vd., 2010).



Şekil 3.9. DMA analizleri ile elde edilen farklı bileşim oranlarına sahip ABS/TPU harman malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak depolama ve kayıp modülü ile kayıp faktörünün değişimi; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30



Şekil 3.10. ABS3D ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemeler için olarak viskoelastik özelliklerin karşılaştırması; a) depolama modülü, b) kayıp modülü ve c) kayıp faktörü

Şekil 3.10a'da verilen depolama modülünün bileşim oranı ile değişimi aynı zamanda elastik malzeme davranışı ile de ilişkilendirilmektedir. TPU sahip olduğu üstün elastik karakteristiği nedeniyle ABS içerisinde artan bileşim oranı ile depolama modülü ve kayıp modülünü ciddi oranda azaltmıştır (Shi vd., 2021). Örneğin, ABS3D ve A70T30 kodlu numunelerin oda sıcaklığındaki depolama modülü ve tepe noktadaki kayıp modülleri ele alındığında, depolama modülü ve kayıp modülünün %30 TPU bileşim oranı ile yaklaşık %20 ve %50 oranında azaldığı görülmüştür. Şekil 3.10c'de kayıp faktörünün tepe nokta değerleri arasındaki değişim ise bileşim oranına bağlı olarak şu şekilde açıklanabilir. Kayıp faktörünün bileşim oranına bağlı olarak daha düşük bir tepe nokta değere sahip olması malzemenin daha yüksek rijitliği ve bunun sonucunda da daha düşük viskoz davranışı anlamına gelir (Zitzumbo vd., 2016). Bu durum hem depolama modülü hem de kayıp faktörü açısından değerlendirildiğinde sonuçların uyum içerisinde olduğunu da göstermektedir. Ayrıca literatürde eklemeli imalat ile üretilen ABS/TPU harman numunelerin DMA

analizleri ile viskoelastik özelliklerinin irdelendiği çalışmalara benzer depolama ve kayıp modülleri değerlerinin elde edildiği söylenebilir (Soltanmohammadi vd., 2024). Ayrıca sıcaklığa bağlı depolama modülü değişiminin sürekli azalış göstermesi nedeniyle ABS ve TPU malzemelerin uyumlu yapıda olduğu söylenebilir (de Leon vd., 2019; Soltanmohammadi vd., 2024).

Tablo 3.7. ABS/TPU harmanların oda sıcaklığındaki viskoelastik özellikleri ve kayıp faktördeki tepe noktaya ait sıcaklık değerleri

Numune Kodu	Depolama Modülü (MPa)	Kayıp Modülü (MPa)	$T_{p,tan\delta}$ (°C)
ABS3D	911	11,2	120,4
A90T10	1109	21,1	117,5
A80T20	783	12,4	107,8
A70T30	741	16,5	117,1

3.4. FTIR Analizlerine Ait Sonuçlar

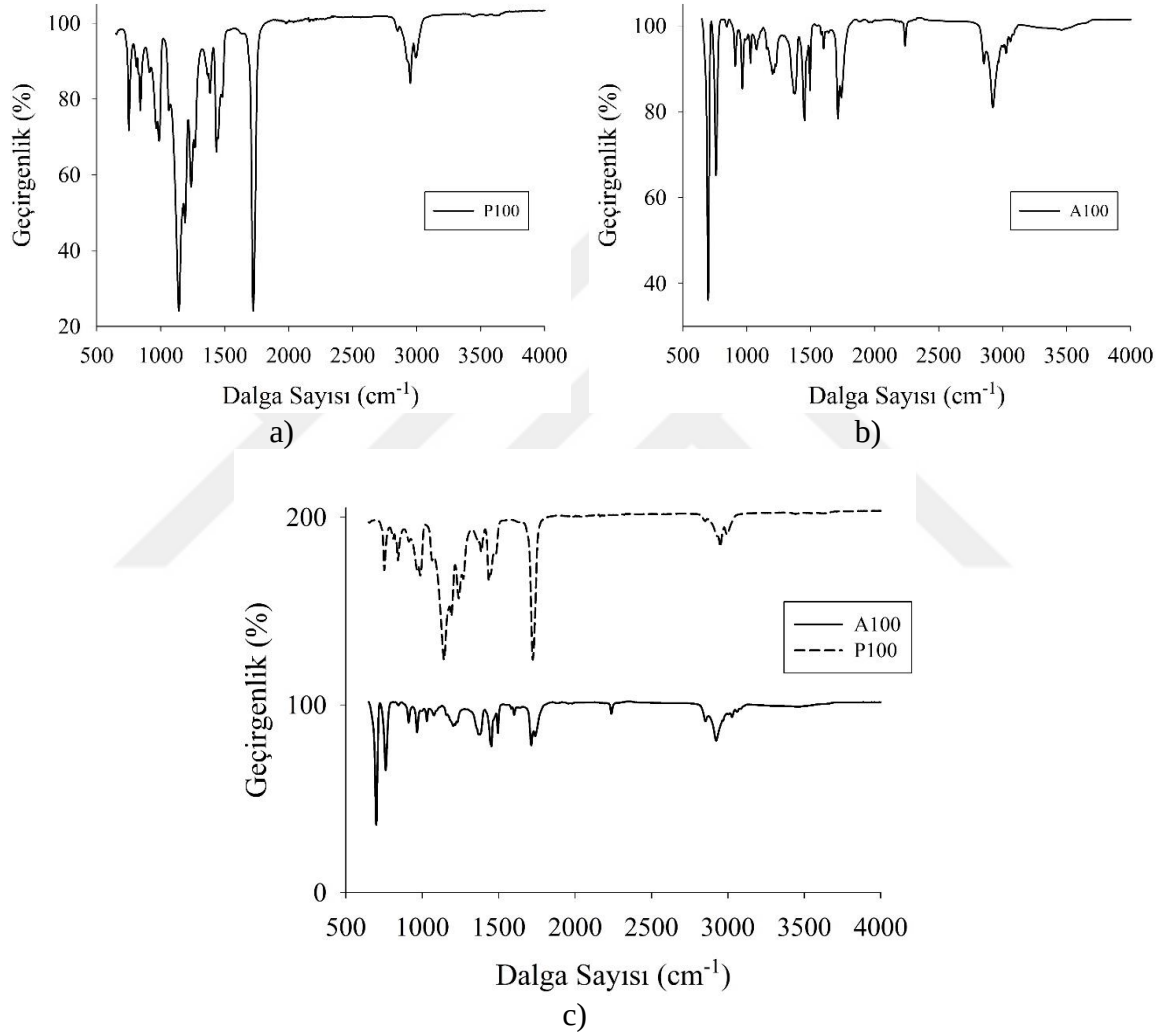
Bu bölümde, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin kimyasal yapılarının, yapı içerisindeki etkileşimlerin ve bağ kuvvetlerinin bileşim oranına bağlı olarak değişimleri FTIR analizlerinden elde edilen sonuçlar ile irdelenmiş ve sunulmuştur. PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemeler ayrı bölümlerde ele alınmış ve her bir bölümde bileşim oranı ile kimyasal yapı arasındaki ilişki IR spektrumları üzerinden tartışılmıştır.

a. PMMA/ABS Harman

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarında elde edilen PMMA/ABS harmanların IR spektrumlarına ait detaylı irdelemeler bu başlık altında sunulmuştur. FTIR analizleri sonucunda her bir numune grubuna ait dalga sayısına karşılık gelen bağ yapısı ile ilişkilendirilen tepe noktalar değerlendirilmiş, saf ve harman grubun kimyasal yapısı detaylıca ortaya koyulmuştur.

PMMA/ABS harman malzemelerin kimyasal yapısının irdelenmesinde ve bağ kuvvetlerindeki değişimlerin belirlenmesinde FTIR analizleri ve incelemeleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak enjeksiyon kalıplamada üretilen saf PMMA ve saf ABS malzemeleri ifade eden P100 ve A100 kodlu numunelerin IR spektrumları araştırılarak değerlendirilmiş. Daha sonrasında ise PMMA/ABS harman numunelerde yapıyı oluşturan

bileşim oranına bağlı olarak harman yapıda elde edilen tepe noktaların dalga sayıları, şiddetleri ve yeni bir tepe noktası oluşup oluşmadığı P100 ve A100 kodlu numuneler ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.11’de saf PMMA ve saf ABS’yi temsil eden P100 ve A100 kodlu numunelerin FTIR analizlerinden elde edilen spektrumlar sırasıyla ayrı ayrı ve karşılaştırılmalı formda verilmiştir.



Şekil 3.11. FTIR analizlerinden elde edilen sönümlenme bantları ve karşılık geldikleri dalga sayıları; a) Saf PMMA (P100), b) saf ABS (A100), c) P100 ve A100 kodlu numunelerin FTIR eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.11’den P100 kodlu saf PMMA’nın ve A100 kodlu saf ABS’nin kendi yapısı ile karakterize edilen karakteristik spektrumlara sahip olduğu görülmektedir. Saf PMMA’yı temsil eden titreşim bantları ve bu bantlara ait dalga sayıları önceki çalışmalardan da bilinmekte ve karakteristik bu tepe noktalara ait ilişkilendirmeler Tablo 3.8’de verilmiştir.

Şekil 3.11a'da P100 kodlu numunede sırasıyla 2950, 1723, 1435 ve 1143 cm^{-1} dalga sayılarında görülen tepe noktalar sırasıyla CH gerilmesi, C=O gerilmesi, CH₃ gerilmesi ve -O-CH₃ gerilme titreşimleri ile ilişkilendirilmektedir (Ahmad vd., 2007; Tsagkalias vd., 2017). Ayrıca P100 kodlu numunede 1386-751 cm^{-1} , 1064-987-840 cm^{-1} dalga numaralarında görülen tepe noktalar ise sırasıyla alfa metil grup (α -methly group) titreşimi ve karakteristik PMMA titreşim sönüm bandı olan C-H eğilme gerilmesi bandını ifade etmektedir (Ahmed, 2009). P100 kodlu numune için 2950 cm^{-1} ve 2995 cm^{-1} dalga numaralarında görülen tepe noktalar CH₃ ve -CH₂- gruplarında yer alan C-H bağının gerilim titreşimi ile ilişkilendirilmektedir. Aynı zamanda 1723 cm^{-1} dalga sayısında belirgin olan ve karbonil grubu olarak (C=O) tanımlanan sönümlenme bandı PMMA ile ABS polimer yapıların karışabilirliği için önemli bir bilgi vermektedir (Balamurugan vd., 2004). Bu kapsamda değerlendirildiğinde P100 kodlu PMMA malzeme için spektrum temel özellikleri; 3100-2800 cm^{-1} bölgesinde belirgin halde görülen C-H gerilim bandı, 1500-1350 cm^{-1} dalga sayısı aralığında belirgin olan eğilme baskın C-H eğilme bandı sönüm bölgesi, 1720-1750 cm^{-1} dalga sayısı aralığında görülen C=O gerilme titreşim bölgesi ve 1350-1100 cm^{-1} dalga sayısı aralığında görülen ester grubu gerilme titreşimlerine veya C-O ve C-C-OO gerilmesine karşılık gelen (1242 cm^{-1}) ve C-H bağ deformasyonuna karşılık gelen iskelet titreşimleri (1194-1150 cm^{-1}) olarak tanımlanabilmektedir (Sain vd., 2012).

Ayrıca 840 cm^{-1} dalga numarasında belirgin olan tepe noktası metilen grubu sallanma modu (methlyene rocking mode) olarak tanımlanmıştır (Aziz vd., 2019). P100 kodlu numunede 1723 cm^{-1} dalga sayısı bölgesinde görülen güçlü ve yoğun şiddetli tepe noktası ABS yapısındaki hidrojen grup ile PMMA/ABS harman yapıların oluşturulmasında karışabilirliğin sağlanabilmesi için önemli bir nokta olduğunu tekrar vurgulamak gereklidir (Parameswaranpillai vd., 2016; Ramesh vd., 2007).

Şekil 3.11b'de ise A100 kodlu saf ABS malzemeye ait IR spektrumlarına karşılık gelen dalga sayıları verilmiştir. Ayrıca saf ABS ile ilişkilendirilen karakteristik tepe noktalar ve bu bölgelere ait ilişkilendirmeler Tablo 3.8'de özetlenmiştir. Şekil 3.11b'de A100 kodlu numune için elde edilen spektrum ve önceki çalışmalardan karakteristik tepe noktaları şu şekilde tanımlanabilir. 3061 cm^{-1} , 1603 cm^{-1} ve 911 cm^{-1} dalga sayılarındaki titreşim bantları alken yapılarının da karakteristik tepe noktaları olan sırasıyla =C-H, C=C gerilmeleri ile =C-H eğilme gerilmesi bantlarına karşılık gelmektedir (Liu vd., 2017). 3033 cm^{-1} , 1496 cm^{-1} ve 698 cm^{-1} dalga sayısında görülen bantlar ise aromatik bileşiklerdeki C-H gerilmesi, iskelet titreşimleri ve mononükleer aromatik hidrokarbonun düzlem dışı C-H eğilme gerilmesinden

kaynaklandığı belirtilmiştir (Liu vd., 2017; Desrousseaux vd., 2015). Aynı zamanda A100 kodlu numune 2237 cm^{-1} dalga sayısında $\text{C}\equiv\text{N}$ gerilmesinden kaynaklandığı ve ABS'nin yapısında bulunan akrilonitril ile ilişkilendirilen bilinen bir sönümlleme bandı da içermektedir (de Leon vd., 2019). Bu tepe noktası ABS malzemeler için karakteristik olarak belirgin oluşan bir sönümlleme bandı tepe noktasıdır. A100 kodlu numunede $3200\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında görülen titreşim tepe noktalarının C-H gerilme bandından ileri geldiği bilinmektedir. Ek olarak, $1630\text{-}1640\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında görülen $\text{C}=\text{C}$ bağı ise ABS yapısında bulunan bütadiyen biriminin gerilme titreşimini temsil ederken, $1490\text{-}1500$, 1600 ve 1583 cm^{-1} dalga sayısı aralığında görülen tepe noktası ise ABS yapısında görülen stiren bileşiminin gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır (Li vd., 2017). 967 cm^{-1} ve 911 cm^{-1} dalga sayılarında görünen tepe noktaları ise bütadiyen içerisinde bulunan hidrojen atomlarından ileri gelen C-H deformasyonunu temsil etmektedir. (Desrousseaux vd., 2015).

Tablo 3.8. P100 kodlu saf PMMA ve A100 kodlu saf ABS ile ilişkilendirilen titreşim bantları ve karşılık gelen dalga sayıları

	Titreşim veya sönümlleme bant bölgesine ait tanımlama	Dalga Sayısı (cm^{-1}) aralığı
PMMA	C-H gerilme (C-H stretching)	2927-2986
	C=O gerilme (C=O stretching)	1700-1744
	CH_3 gerilme (CH_3 stretching)	1435
	$-\text{OCH}_3$ gerilme ($-\text{OCH}_3$ stretching)	1143
	C-H eğilme (C-H bending)	987 ve 840
ABS	C-H gerilme (C-H stretching)	3200-2800
	$\text{C}\equiv\text{N}$ gerilme ($\text{C}\equiv\text{N}$ stretching)	2230-2240
	$\text{C}=\text{C}$ bağı (C=C bond)	1630-1640
	$=\text{C-H}$ deformasyonu	967-911
	Düzlem dışı C-H eğilmesi	690-700

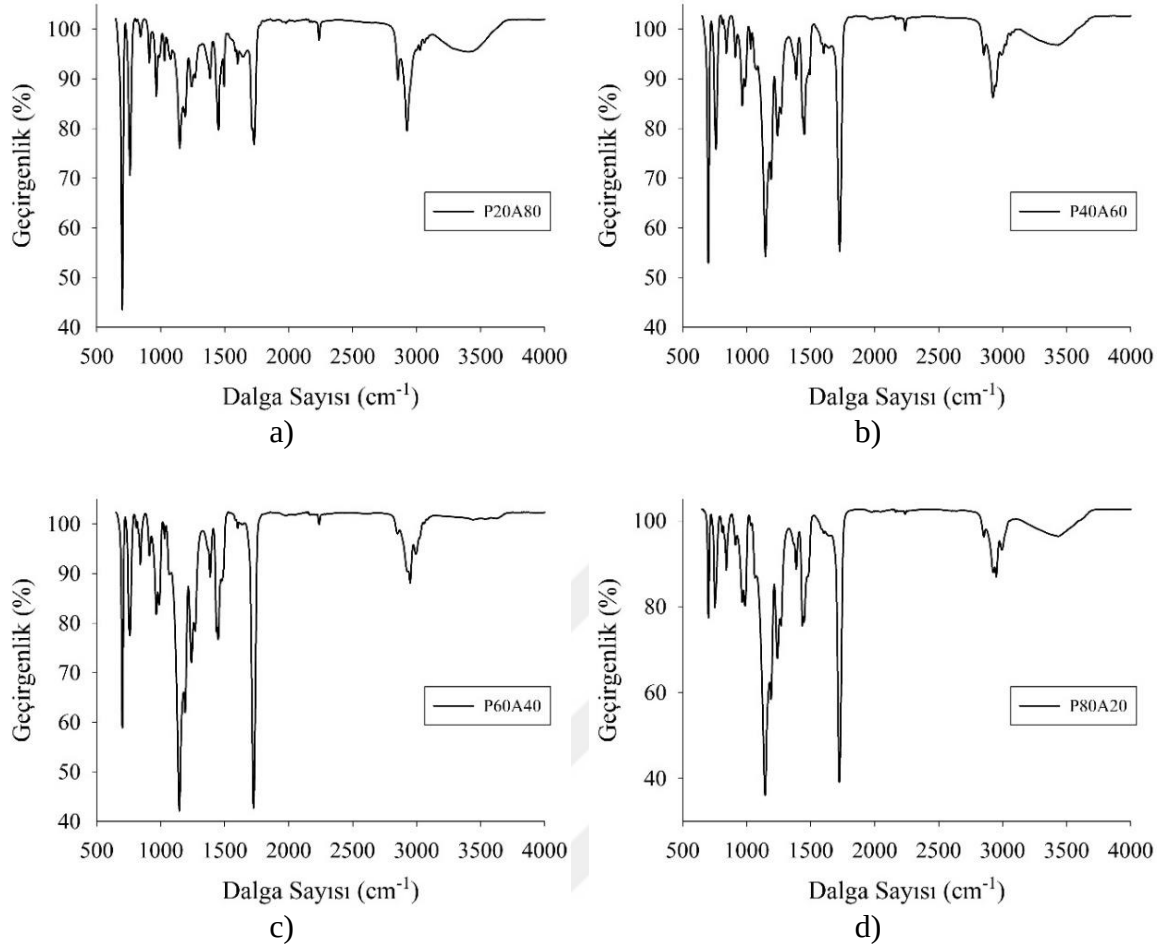
PMMA/ABS harman malzemelerin sahip olduğu IR spektrumları, bu spektrumlardaki titreşim bantları ve karşılık gelen dalga sayıları P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 kodlu harman numuneler için sırasıyla Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.12'den görüldüğü gibi

PMMA/ABS harman malzemeler harman yapıyı oluşturan saf PMMA ve saf ABS'nin sahip olduğu karakteristik tepe noktalarını içerisinde barındıran titreşim bantlarına sahip bir IR spektrumu ve buna karşılık gelen dalga sayılarına sahiptir. Bu durumu ortaya koyabilmek adına ilk olarak saf bileşenlerin karakteristik tepe noktalarının PMMA/ABS harman yapıları malzemelerdeki değişimleri incelenebilir. Örneğin, saf PMMA için karakteristik tepe noktalarından biri olan ve P100 kodlu numunede 1723 cm^{-1} dalga sayısında görülen bant değerlendirildiğinde, bu tepe nokta P20A80 kodlu numunede 1730 cm^{-1} dalga sayısında P80A20 kodlu numunede ise 1724 cm^{-1} dalga sayısında belirgin olarak görülmüştür. Görüldüğü gibi PMMA oranı düşük olan bileşimdeki harmanda (P20A80) tepe noktası görülen dalga sayısı saf malzemeye kıyasla bir miktar kayma davranışı göstermiştir. Ayrıca, Şekil 3.12'den görüldüğü gibi bu tepe noktası değerinin PMMA yapısından gelen bir titreşim tepe noktası olması nedeniyle artan PMMA oranı ile artış göstermiştir. Benzer şekilde A100 kodlu saf ABS malzemenin karakteristik sönümlenme bantlarının görüldüğü 2237 cm^{-1} ile 698 cm^{-1} dalga sayılarında görülen ve ABS yapı içerisindeki akrilonitril ve düzlem dışı C-H deformasyonu ile ilişkilendirilen tepe noktalarını ele alalım. Yüksek oranda PMMA (P80A20) içeren harman yapıda düzlem dışı C-H deformasyonu görülen tepe noktası bir miktar kayma ile 701 cm^{-1} dalga sayısında belirgin olurken P20A80 kodlu ABS oranı yüksek harman da ise tepe noktası 699 cm^{-1} dalga sayısında görülmektedir. Benzer şekilde A100 kodlu numunede 2237 cm^{-1} dalga sayısında belirgin olarak görülen ve yapıdaki akrilonitril ile ilişkilendirilen titreşim bandı, P20A80 kodlu numunede 2237 cm^{-1} dalga sayısında görülürken P80A20 kodlu PMMA oranı yüksek numunede bu dalga sayısında belirgin bir tepe noktası görülmemiştir. Ayrıca, 2237 cm^{-1} dalga sayısındaki tepe noktası şiddetinin yapıda artan ABS oranı ile arttığı gözlemlenmiştir.

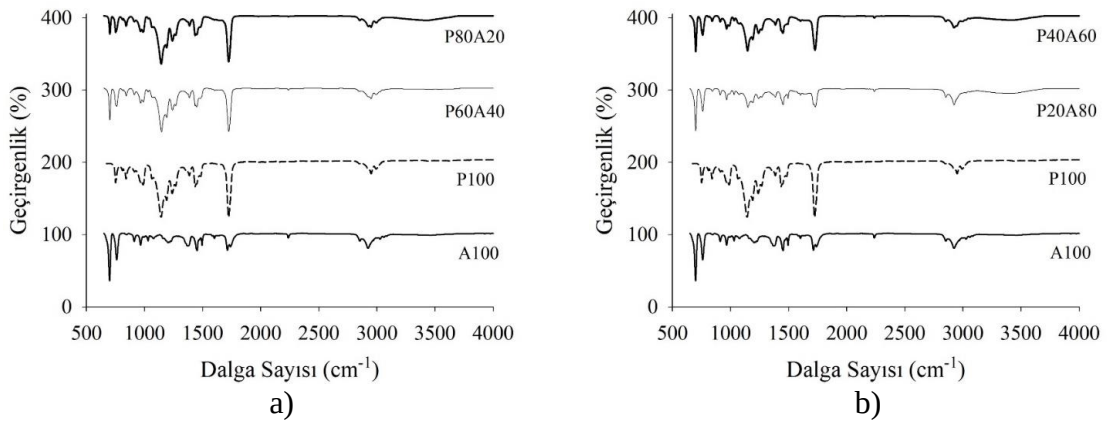
Saf PMMA ve saf ABS malzemelerde gözlemlenmeyen ancak PMMA/ABS harman yapıda belirgin olarak yeni bir tepe noktasının 3434 cm^{-1} dalga sayısında gözlemlendiği Şekil 3.12'den görülmektedir. Bu tepe noktası PMMA ve ABS polimerler ile oluşturulan harman yapıda hidrojen bağlanmasını (hydrogen bonding) temsil eden -OH- titreşim bandı olarak bilinmektedir (Yang & Han, 2008; Sharififard vd., 2014). Bu tepe noktası kendi arasında bağ oluşturan -OH- moleküler yapıları temsil etmektedir (Santiago Cintrón & Hinchliffe, 2015). Harman yapıda oluşan hidrojen bağlanma etkisinin aynı zamanda polimer harmanların karışabilirliğini de iyileştirdiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (Kuo, 2008). Bu nedenle harman yapıda 3434 cm^{-1} 'de görülen bu tepe noktası karışabilir polimer harman yapısının oluştuğunun önemli bir göstergesidir. Aynı zamanda saf yapılara kıyasla

ek bir bağ olarak gözlemlenen hidrojen bağının harman numunelerin mekanik özellikleri ve viskoelastik malzeme özelliklerini temsil eden modüllerinde de iyileşmelere yol açacağı bilinmektedir (Jenkins vd., 2000; Li & Goh, 2002; Zhu vd., 2004; Song & Wang, 2020; Lewis vd., 2014; Ren & Yu, 2018;). Ayrıca, Huang vd. (2021) hidrojen bağı bulunduran ve bulundurmeyen polimer yapıların mekanik özelliklerini döngüsel yüklemeler ile irdeleyerek araştırmıştır. Çalışma sonucunda hidrojen bağları bulundurmeyen yapıların tamamen elastik bir yapı şeklinde tepki verdiği ancak hidrojen bağ yapısı içeren polimerlerin ise yükleme sırasında bağların kırılması ve yeniden oluşumunu yansıtan histerezis davranışı sergilediğini belirlemişlerdir. Buna ilaveten, döngüsel yükleme sırasında elde edilen histerezis eğrilerinin hidrojen bağlı yapılarda sönümlendiği enerjinin hidrojen bağısız yapıya kıyasla en az 3 kat iyileştiğini belirlemişlerdir. Bu durum PMMA/ABS harman yapılarda görülen ilave -OH- hidrojen bağlanma bandı ile yapının enerji depolama kabiliyetinin iyileşebileceği ve bu kabiliyeti gösteren sönümlenme modülü ve döngüsel yükleme performansında da artış gözlemlenebileceği söylenebilir.

Saf ve harman numunelerdeki titreşim bantlarının harman yapıyı oluşturan bileşenlerin oranına bağlı olarak değişimleri hakkında yorumların ve gösterimin daha net olması amacıyla saf ve harman numunelerin FTIR spektrumlarına ait karşılaştırmalı eğriler Şekil 3.13'te verilmiştir. Şekil 3.13a-b'den saf PMMA'yı temsil eden karakteristik tepe noktası şiddetlerinin PMMA oranının bağlı olarak artış ve azalış eğilimi içerisinde olduğu ve buna benzer şekilde saf ABS'yi temsil eden karakteristik tepe noktalarına ait şiddetlerinde harman yapıdaki ABS oranına bağlı olarak artış ve azalış eğilimi içerisinde olduğu söylenebilir. Bu durum harman yapıyı oluşturan bileşim oranlarına bağlı olarak titreşim bant şiddetlerinin belirli bir uyum içerisinde değişim gösterdiği anlamına gelmektedir. Şekil 3.12-13'te P100 kodlu numunede ABS ile harman yapının oluşturulmasında önemli bir etkisi olduğu önceki çalışmalardan bilinen ve yukarıda da belirtilen 1723 cm^{-1} dalga sayısında görülen C=O titreşim bandı da ayrıca değerlendirilmelidir. PMMA/ABS harman yapıdaki PMMA oranının %40, 60 ve 80 olduğu bileşimlerde çok belirgin ve yüksek şiddetli tepe noktalar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun Kumaraswamy vd., (2006) tarafından %50-75 oranında PMMA içeren PMMA/ABS harmanlarda karışabilir faz oluşturması davranışının meydana geldiğinin belirtilmesi ile de desteklendiği söylenebilir.



Şekil 3.12. PMMA/ABS harman malzemeler için titreşim bantları ve karşılık gelen dalga sayıları a) P20A80, b) P40A60, c) P60A40 ve d) P80A20

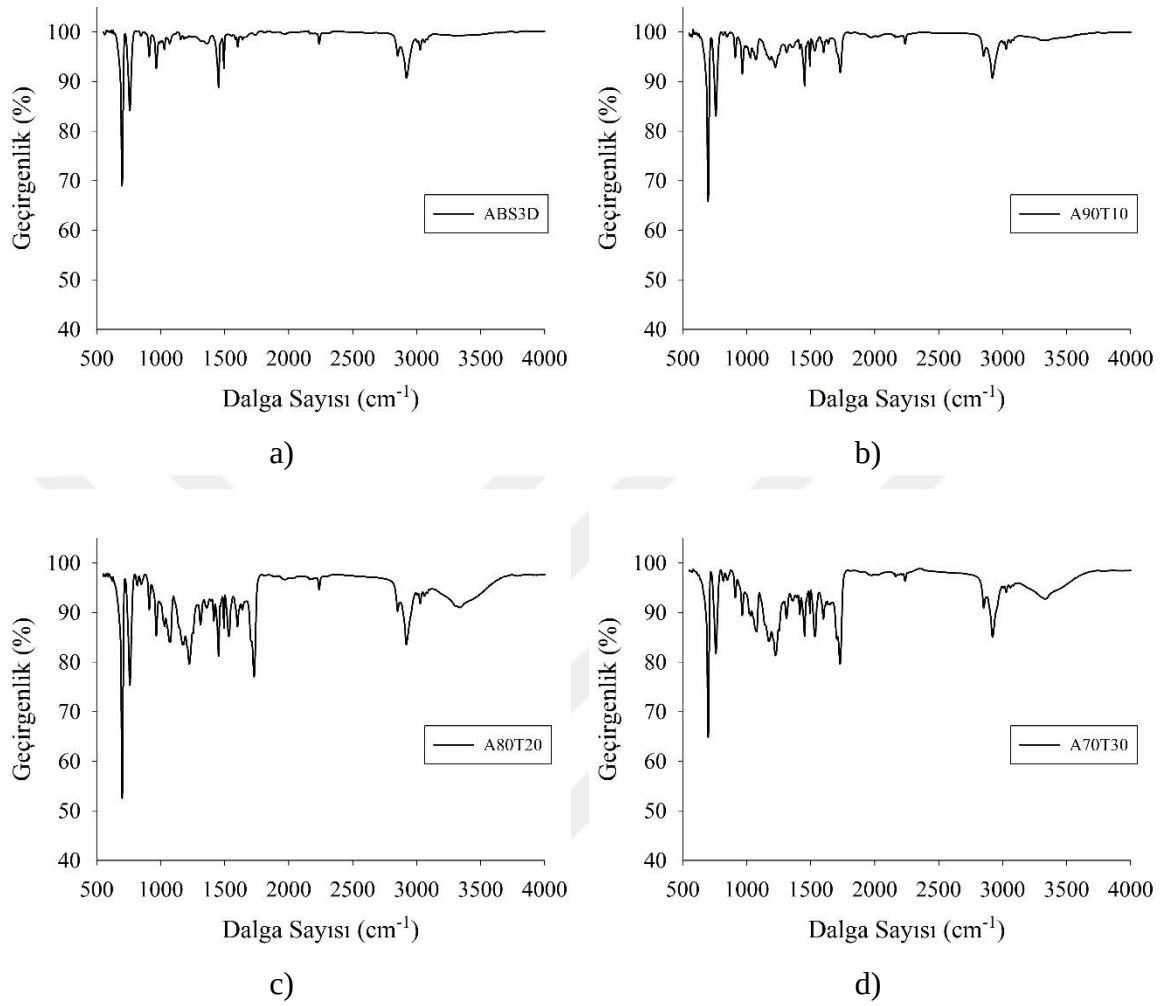


Şekil 3.13. Saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harman numunelerin FTIR analizlerinden elde edilen IR spektrumlarının karşılaştırması; a) P100, A100, P80A20, P60A40 ve b) P100, A100, P60A40, P20A80 kodlu numuneler

b. ABS/TPU Harman

Eriyik yığma yöntemi ile üretilen saf ABS, farklı bileşim oranlarında üretilen ABS/TPU harmanların (A90T10, A80T20 ve A70T30) IR spektrumlarına ait detaylı irdellemeler bu başlık altında sunulmuştur. FTIR analizleri sonucunda her bir numune grubuna ait dalga sayısına karşılık gelen bağ yapısı ile ilişkilendirilen titreşim bantları değerlendirilmiş, saf ve harman grubun kimyasal yapısı detaylıca irdelenmiştir.

ABS/TPU harman malzemelerin kimyasal yapısı, bağ kuvvetlerindeki değişimler ve sönümleme bantlarının oluştuğu bölgelerdeki değişimlerin incelemesi PMMA/ABS harmanlarda olduğu gibi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak saf ABS malzemeyi temsil eden ABS3D kodlu numunenin IR spektrumları araştırılarak değerlendirilmiş. Daha sonrasında ise ABS/TPU harman numunelerde yapıya ait bileşim oranına bağlı olarak elde edilen tepe noktaların dalga sayıları, şiddetleri ve yeni bir tepe noktası oluşup oluşmadığı ile tepe noktası görülen bölgelerde kaymaların mevcut olup olmadığı ABS3D kodlu numune ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.14'te saf ABS ve ABS/TPU harmanların FTIR analizlerinden elde edilen spektrumlar sırasıyla ayrı ayrı ve karşılaştırılmalı formda verilmiştir. Aynı zamanda ABS/TPU harmanlarda TPU malzemedan kaynaklandığı düşünülen titreşim bantlarının çalışma kapsamında elde edilen IR spektrumları ile ilişkilendirilmesi ise literatürde daha önce TPU malzemeler için gerçekleştirilen çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak saf ABS malzemeyi temsil eden ABS3D kodlu numuneye ait IR spektrumu değerlendirilmiştir. Şekil 3.14a'dan ABS malzemeyi temsil eden karakteristik tepe noktalar belirlenmiş ve Tablo 3.9'da özetlenmiştir. Tablo 3.9'dan, saf ABS malzemedeki görülen karakteristik sönümleme bantları sırasıyla 697 cm^{-1} , 735 cm^{-1} ve 966 cm^{-1} dalga sayılarında görülen tepe noktalar olarak belirlenmiştir. Bu dalga sayılarında görülen tepe noktalar sırasıyla düzlem dışı C-H deformasyonu, benzen halkası formasyonu (C_6H_6) ve bütadiyen moleküler etkileşimini temsil eden C-C bağındaki açılmal deformasyonları temsil etmektedir. Saf ABS yapıdaki önemli bir diğer karakteristik tepe noktası ise 2240 cm^{-1} dalga numarasında görülen ve $\text{C}\equiv\text{N}$ titreşim gerilmesi sönümleme bandı olarak bilinen tepe noktasıdır. Bu tepe noktası ABS yapısında bulunan akrilonitrilden kaynaklanan $\text{C}\equiv\text{N}$ gerilim bandıdır ve malzemenin termal kararlılığı ile üstün yorulma performansı sergilemesine olanak tanıdığı literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir. 2850 cm^{-1} ve 2922 cm^{-1} 'de görülen sönümleme bantları ise C-H gerilmesi bandı olarak ABS'nin karakteristik tepe noktaları içerisinde yer almaktadır.



Şekil 3.14. ABS/TPU harman malzemelerin FTIR analizlerinden elde edilen titreşim sönümlleme bantları ve karşılık gelen dalga sayıları a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30

Şekil 3.14'te verilen saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin IR spektrumları incelendiğinde, saf ABS numunede görülen karakteristik tepe noktalarının harman yapılarda da görüldüğü söylenebilir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, ABS/TPU harmanların IR spektrumlarında karakteristik ABS bantları dışında görülen sönümlleme bantları literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan da yararlanılarak kimyasal yapı ile ilişkilendirilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, Şekil 3.14b-d'de verilen eğrilerde karakteristik ABS tepe noktalarına ilaveten TPU bileşim oranına da bağlı olarak değişim gösteren tepe noktalar detaylıca irdelenmiştir. Karakteristik ABS sönümlleme bantlarına ilaveten FTIR spektrumunda 1705 cm^{-1} ve 1730 cm^{-1} dalga sayılarında görülen tepe noktalar TPU'dan kaynaklandığı

düşünülen karakteristik tepe noktalar olarak değerlendirilmiş ve moleküler zincirdeki karbomat grubu sönümleme bandına karşılık gelmektedir. Bu tepe noktalar sırasıyla hidrojen bağlı ve serbest karbonlu (hidrojen bağlı bulunmayan) titreşim gruplarına karşılık gelen C=O gerilmesi karakteristik tepe noktalarını temsil etmektedir (Lee vd., 2005; Pokharel & Choi, 2015; Thakur & Karak 2014). Şekil 3.14b-d'den, literatürdeki önceki çalışmalara paralel olarak ABS/TPU harman yapıda TPU bileşimi varlığı ile keskin bir şekilde oluşan sönüm bandı yapıda artan TPU oranı ile omuz formasyonuna sahip bir spektrum tepe noktası görünümüne kavuşmaktadır. TPU yapısından ileri gelen diğer karakteristik tepe noktaları ise sırasıyla 1531 cm^{-1} ve 1220 cm^{-1} 'de görülen C-N gerilmesi ve üretan birimleri ile meydana gelen C-O-C titreşim bandı bölgesidir (Bera & Maji 2017; Cheng vd., 2011). Bu bant ABS/TPU harmanlarda da net bir şekilde görülmektedir. TPU karakteristik tepe noktalarından olan N-H eğilme sönümleme bandı harman yapılarda görülmüş ve harman içerisinde artan TPU oranı ile daha yüksek dalga sayısına doğru genişlediği belirlenmiştir (Leon vd., 2019; Xu vd., 2018). Bu durum ABS/TPU harmanın moleküler hidrojen bağlanma etkileşimleri gerçekleştirerek güçlü ve yeni bağlar oluşturduğunu ifade etmektedir. Literatürde TPU harman yapılarda benzer şekilde polar gruplar arası ve N-H grup etkileşimleri olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda ABS/TPU harmanlarda ABS yapıdaki stiren bölgelerin TPU ile etkileşim içerisinde olduğu görülmüştür (Wang vd., 1994; Saggu vd., 2012). İlave olarak Şekil 3.14'ten karakteristik tepe noktalarda TPU'nun ABS/TPU harman yapı içerisinde artan bileşim oranıyla tepe nokta şiddetlerinin değişim gösterdiği görülmektedir. Bu durumun ABS/TPU harmanların uyumluluğuna önemli bir gösterge olduğu söylenebilir.

ABS/TPU harman malzemelerde, harman yapıyı oluşturan bileşim oranı ile IR spektrumlarında görülen tepe nokta şiddeti ve tepe nokta dalga sayısı kaymaları gibi değişimlerin daha net ortaya koyulması amacıyla saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harmanların IR spektrumları ve karşılık geldikleri dalga sayıları karşılaştırmalı formda Şekil 3.15'te verilmiştir. Şekil 3.15b'de ABS/TPU harman yapılardaki sönümleme tepe noktası şiddetleri harman yapının bileşim oranına bağlı olarak 3 boyutlu şekilde ve renklendirilmiş skala ile verilmiştir. Şekil üzerinden bileşim oranına bağlı olarak yapıda yeni belirgin olan tepe noktalar, artan veya azalan tepe nokta şiddetleri net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bu eğrilerde dikkat çekici önemli bir nokta, yapı içerisinde artan TPU oranı ile TPU ile ABS içerisindeki akrilonitril yapı arasında görülen polar gruplar

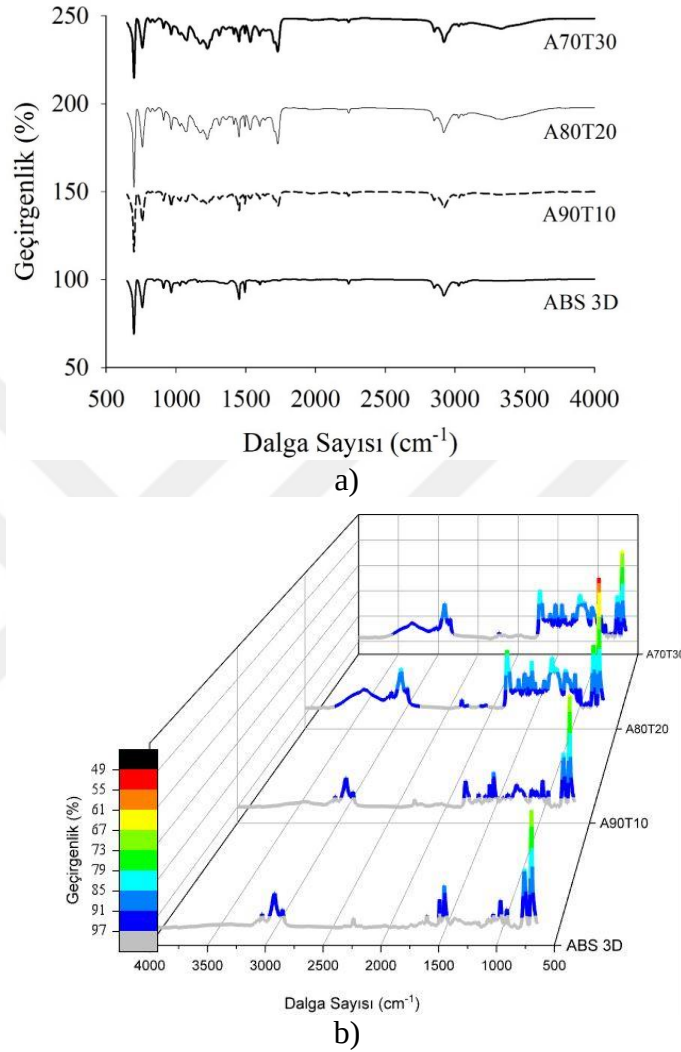
arasında hidrojen bağı oluşumu etkileşimlerin etkilendiği sonucudur (Xu vd., 2008; Hood vd., 2010).

Tablo 3.9. ABS3D kodlu saf ABS ve TPU malzeme ile ilişkilendirilen titreşim modları ve karşılık gelen dalga sayıları

	Titreşim veya sönümlenme bant bölgesine ait tanımlama	Dalga Sayısı (cm⁻¹) aralığı
ABS	C-H gerilme (C-H stretching)	2800-2922
	C≡N gerilme (C≡N stretching)	2230-2240
	C-C açısal deformasyonu (C-C angular deformation)	960-970
	C ₆ H ₆ halka deformasyonu (Benzen ring)	735
	Düzlem dışı C-H eğilmesi	690-700
TPU	N-H sönümlenme (N-H absorption of carbamic acid ester)	3331, 2919
	CH ₂ gerilme (symmetric and asymmetric CH ₂ stretching)	2830-2950
	C=O gerilme (C=O stretching)	1705,1730
	C-N gerilme	1531
	C-O-C gerilme	1220

Önceki çalışmalarda %10 ve %20 oranlarında TPU bileşen ihtiva eden ABS/TPU harman malzemelerin yapının iyi oranda uyumlu olduğu ancak %30 TPU oranı ile harman içerisinde sürekli fazda TPU yapının meydana geldiği belirtilmiştir (Cheng vd., 2015). Tez kapsamında incelenen ABS/TPU harmanların Şekil 3.14-15'te verilen FTIR analiz sonuçları değerlendirildiğinde, harman yapıda bulunan karakteristik tepe nokta şiddetlerinin de artan TPU oranı ile %20 orana kadar artış gösterdiği ancak %30 oranda azalma eğilimi gösterdiği ve bu durumun yapıdaki sürekli TPU fazlardan ileri geldiği söylenebilir. Yapıda görülmesi muhtemel olan sürekli TPU fazları harman yapının mekanik özellikleri üzerinde de etkilere neden olmaktadır. Sürekli TPU faz oluşumu ile numunenin yüzde uzama değerlerinin ciddi

seviyelere ulaşabileceği değerlendirilmektedir. Bu konudaki yorumlar mekanik test sonuçlarında tekrar ele alınacaktır.



Şekil 3.15. Saf ABS ve harman yapıdaki ABS/TPU numunelerin FTIR analizlerinin karşılaştırması; a) ABS3D, A90T10, A80T20, A70T30 ve b) FTIR spektrumlarının 3 boyutlu gösterimi

3.5. Harman Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Bu bölümde PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme testlerine ait sonuçlar verilmiştir.

Mekanik özellikler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman malzemeler için bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı etkilerini içerecek şekilde irdelenmiş ve sunulmuştur. Benzer şekilde

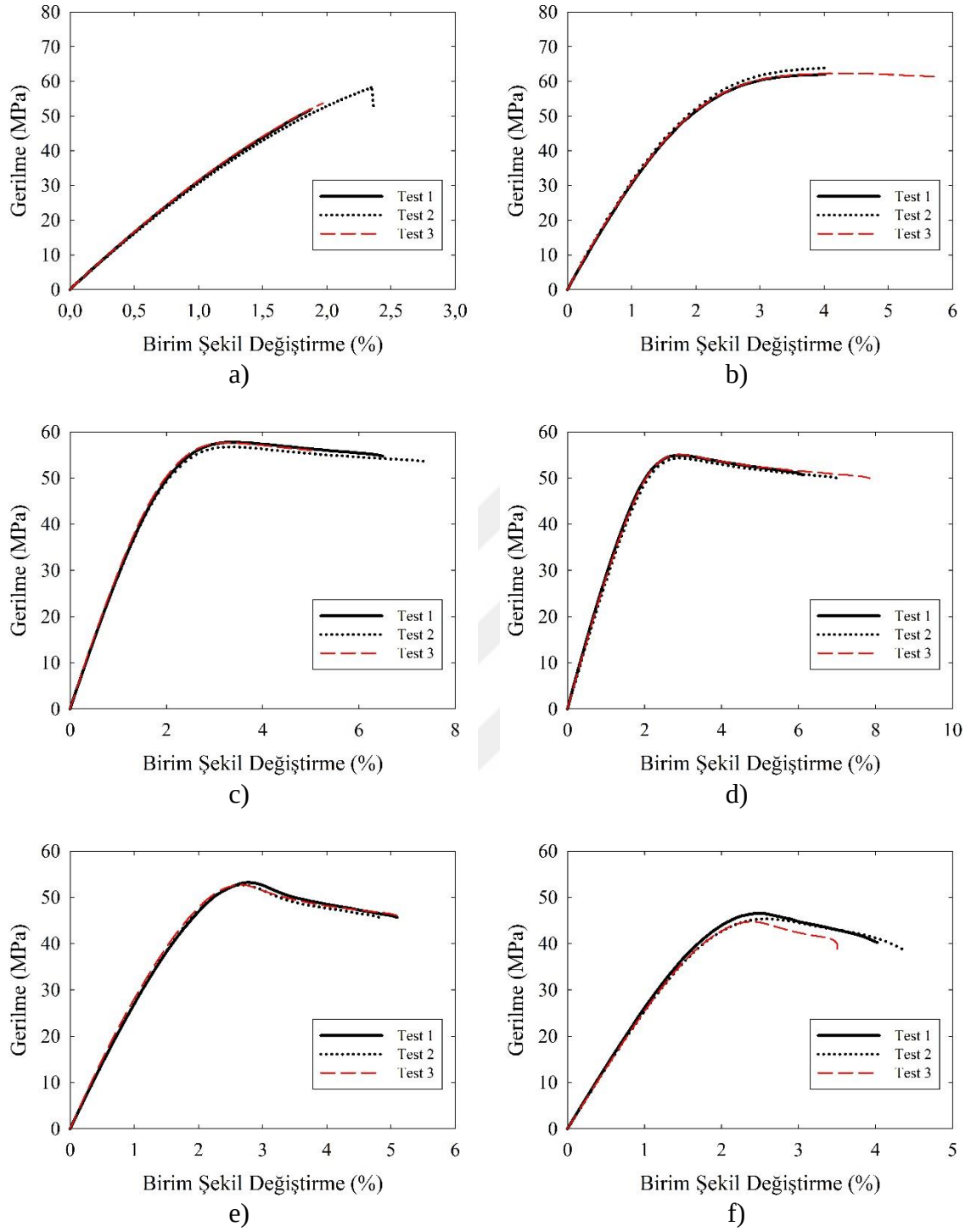
eriyik yığıma yöntemi ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman malzemelerde de mekanik özellikler bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı etkilerini içerecek şekilde verilmiştir. PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların mekanik özellikleri ayrı ayrı alt bölümler halinde verilmiştir. Çekme test sonuçları üzerinden harman malzemelerin, elastisite modülleri, akma dayanımları, çekme dayanımları ve kopma uzamaları gibi temel mekanik özellikleri bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızı etkilerini içerecek şekilde belirlenmiştir.

3.5.1. PMMA/ABS

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numunelerin mekanik özelliklerini temsil eden çekme test sonuçları bu başlık altında detaylandırılacaktır. PMMA/ABS harmanlarda mekanik özellikler iki ana kısımda irdelenmiştir. Bu kısımlar harman yapıyı oluşturan bileşenlerin mekanik özelliklere etkisi ve birim şekil değiştirme hızının mekanik özelliklere etkisi olarak sıralanabilir. Bu kapsamda PMMA/ABS harman malzemelerin çekme testlerine ait sonuçlar ve irdellemeler ile mekanik özellikler bileşim oranı etkisi ve birim şekil değiştirme hızı etkisi alt başlıklarında detaylandırılmıştır.

a. Bileşim Oranı Etkisi

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman malzemelerin çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri tekrarlı test sonuçlarını da içerecek şekilde Şekil 3.16'da verilmiştir. PMMA/ABS harman malzemelere ait Şekil 3.16'da verilen eğriler incelendiğinde gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin tekrarlı testlerde birbirleri ile büyük oranda uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Özellikle gerilme değerlerinin saf ve harman bileşimdeki her bir numune grubu içerisinde tekrarlı testlerde çok yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Böylece çekme testlerinde testlerin tekrarlanabilirliğinin sağlandığı söylenebilir.



Şekil 3.16. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) P100, b) P80A20, c) P60A40, d) P40A60, e) P20A80 ve f) A100

Saf ve harman yapıdaki numunelerin çekme testleri sonucunda Şekil 3.16’da verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri hem testlerin tekrarlanabilirliği hem de saf ve harman yapıdaki numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil

3.16a'da verilen saf PMMA'ya ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, P100 kodlu numunenin sırasıyla yaklaşık 55 MPa çekme dayanımı ve %2 kopma uzaması değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu yapısı itibarıyla ve literatürdeki önceki çalışmalardan da bilindiği gibi PMMA malzemenin gevrek bir davranış gösterdiği söylenebilir (Wu vd., 2004; Abdel-Wahab vd., 2017). Saf ABS numuneye ait Şekil 3.16f'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi incelendiğinde, A100 kodlu numunenin sırasıyla yaklaşık 39 MPa akma dayanımı, 46 MPa çekme dayanımı ve %4 kopma uzaması değerlerine sahip olan bir mekanik karakter sergilediği görülmektedir. A100 kodlu numunenin PMMA numuneye kıyasla daha yüksek kopma uzamasına sahip olmasına rağmen nispeten daha düşük akma ve çekme dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca kopma uzamasındaki üstünlük ve gerilme-birim şekil değiştirme eğri karakteri ile literatürde gerçekleştirilen önceki çalışmalar üzerinden A100 kodlu saf ABS numunenin sünek bir mekanik davranış karakteri sergilediği söylenebilir (Lay vd., 2019; Foltuğ vd., 2023). Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi PMMA'nın düşük darbe dayanımı ve tokluk davranışının iyileştirilmesinde ABS gibi üstün kopma uzaması ve darbe dayanımına sahip polimerler ile harman yapı oluşturulması önemli bir araştırma ve ilgi alanı oluşmasının temel nedeni olarak görülmektedir.

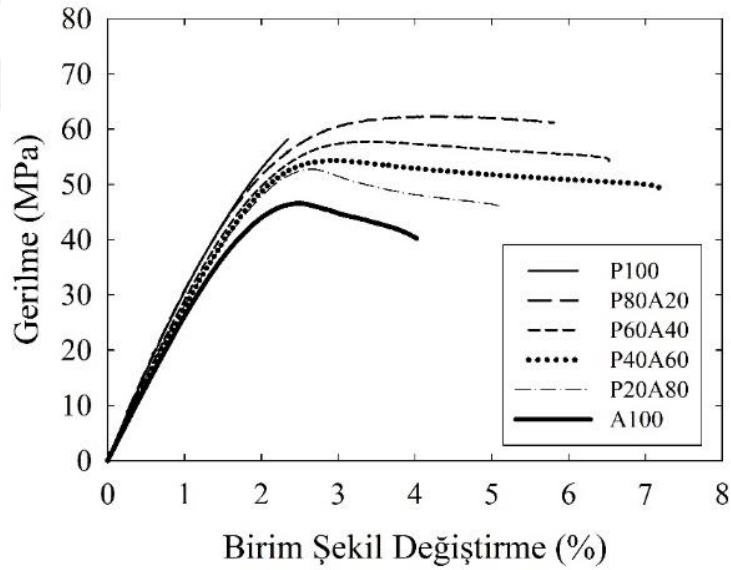
P80A20 kodlu numunenin Şekil 3.16b'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, testlerdeki akma ve çekme dayanımlarının birbirine oldukça yakın değerler verdiği söylenebilir. Benzer şekilde Şekil 3.16c-e'de verilen ve P60A40, P40A60 ve P20A80 kodlu numunelerin de gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin her bir test grubu için uyum içinde olduğu görülmektedir. Saf ve harman yapıdaki numunelere ait Şekil 3.16'da verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kullanılarak malzemelerin mekanik özellikleri (elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması) belirlenmiş ve Tablo 3.10'da özetlenmiştir. Tablo 3.10'da saf ve harman malzemeler için verilen mekanik özellikler her bir mekanik özellik için elde edilen büyüklüğe ait standart sapmayı içerecek şekilde ayrı ayrı sunulmuştur. Şekil 3.16 ve Tablo 3.10'dan P80A20 kodlu numuneden ortalama akma dayanımı yaklaşık 42 MPa iken yapı içerisindeki ABS bileşim oranının belirli bir değerine kadar (%60) akma dayanımı yaklaşık 45 MPa değerine kadar artış göstermektedir. Harman yapıda artan ABS bileşim oranı ile akma dayanımı P20A80 numunede yaklaşık 40 MPa değerine gerilemektedir. Harman malzemelerde ABS bileşim oranının artmasıyla akma ve çekme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durum ABS içerisinde düşük elastisite modüllü bütadiyen fazı içeriğinin (yani ABS'nin PB'si) artmasıyla

harman malzemenin gevrek davranıştan daha sünek hale gelmesine neden olması ve bu nedenle de akma ve çekme mukavemetinin azalmasına yol açtığı söylenebilir (Setiawan & Roziyanto, 2016; Reinaldo vd., 2020; Ma, 2023).

Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarında üretilen PMMA/ABS harman malzemelerin mekanik özelliklerinin harman yapıyı oluşturan bileşim oranlarına bağlı olarak değişimlerinin kolayca anlaşılması amacıyla tüm numunelerde en az üç test sonucunda elde edilen ait ortalama gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, saf PMMA saf ABS’ye kıyasla daha üstün akma ve çekme dayanım performansı sergilerken daha düşük kopma uzamasına sahiptir. Ayrıca, tüm bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların hem saf PMMA hem de saf ABS’den daha yüksek kopma uzaması değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Kopma uzaması değerleri üzerinden harman malzemelerde ABS içeriğinin artmasıyla birlikte harmanların kopma uzamasının da arttığı belirlenmiştir. Bu durum harman yapılarda ABS içerisinde yer alan bütadiyen kauçuk faz oranının artmasıyla yapının sünekliğinin artması ve bunun bir sonucu olarak kopma uzamasının da iyileştiği literatürde yapılan çalışmalardan da bilinmektedir (Setiawan & Roziyanto, 2016; Reinaldo vd., 2020; Ma, 2023). Ayrıca, bütadiyen faz içeriğinin azalması ile kopma uzaması değerinin azaldığı ve harman numunelerde çekme dayanımı değerinin arttığı belirlenmiştir. Buna ilaveten, harman malzemelerde P40A60 bileşim oranındaki harmanın en üstün kopma uzaması değerine sahip olduğu bulunmuştur. Ek olarak, bu bileşim oranında elde edilen akma dayanımının diğer bileşim oranı seçeneklerinde hazırlanan PMMA/ABS harmanların akma dayanımlarından da üstün olduğu görülmektedir. Saf ve harman yapıdaki numunelerin elastisite modülleri değerlendirildiğinde, A100 kodlu numunenin en düşük elastisite modülüne (2665,3 MPa) ve P100 kodlu numunenin en büyük elastisite modülüne (3314,4 MPa) sahip olduğu kolayca söylenebilir. Bu bileşimler arasında hazırlanan farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların elastisite modülleri ile birlikte değerlendirildiğinde, harman yapıda artan ABS bileşim oranı ile elastisite modülünün azaldığı sonucuna ulaşılabilir.

Tablo 3.10. Saf ve harman bileşime sahip PMMA/ABS numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler

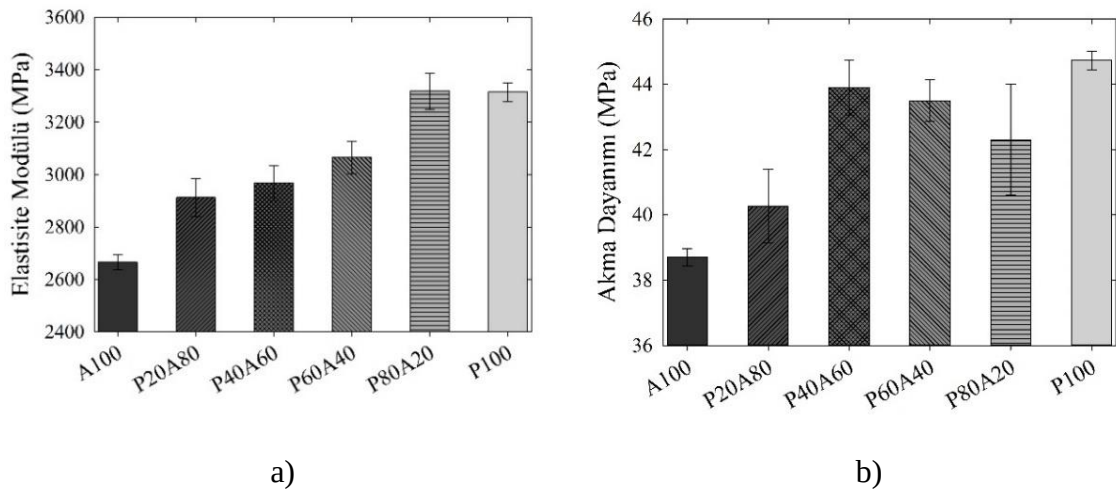
Numune Kodu	Mekanik Özellikler			
	Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
P100	3314,7 ± 61,7	44,7 ± 0,49	54,5 ± 3,33	2,05 ± 0,28
P80A20	3318 ± 120,1	42,3 ± 2,89	62,8 ± 0,98	4,74 ± 0,93
P60A40	3064,7 ± 105,9	43,5 ± 1,11	57,4 ± 0,49	6,39 ± 1,18
P40A60	2967 ± 115,9	43,9 ± 1,45	54,7 ± 0,42	7,12 ± 0,93
P20A80	2911,9 ± 124,9	40,3 ± 1,96	52,9 ± 0,26	5,09 ± 0,16
A100	2665,3 ± 50,1	38,7 ± 0,21	45,5 ± 0,92	3,98 ± 0,45



Şekil 3.17. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

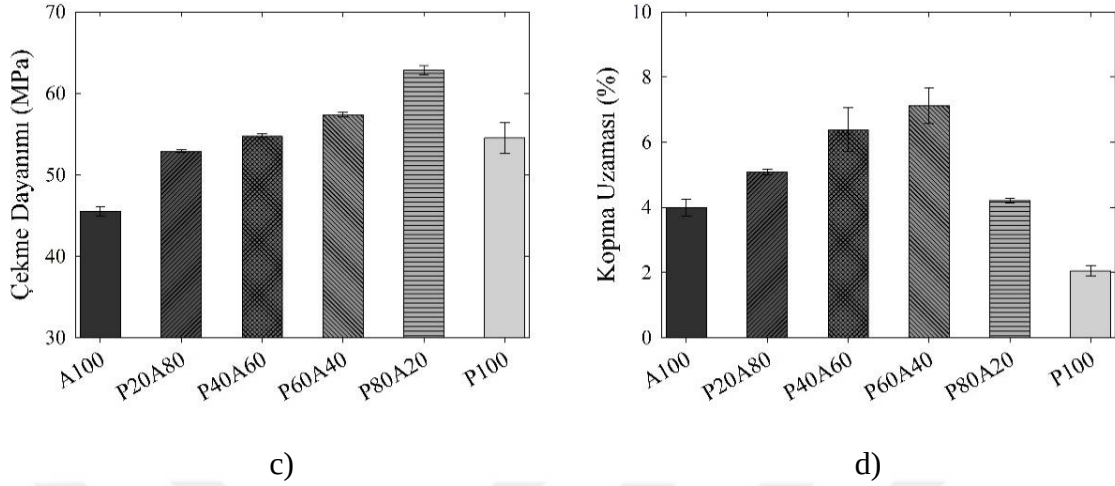
Mekanik özellikleri oluşturan elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzamasının harman yapıdaki bileşim oranlarına bağlı olarak değişimlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması amacıyla her bir mekanik özelliğin harman yapıdaki bileşim oranına bağlı olarak değişimleri çubuk grafikler şeklinde Şekil 3.18’de sırasıyla verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi mekanik özelliklerde bileşim oranlarına bağlı ortaya çıkan

değişimler eğrilerde sol ve sağ kenarlarda harman yapıdaki kritik iki ucu gösteren saf PMMA ve saf ABS numunelere ait sonuçları da içermektedir. Şekil 3.18d'den PMMA/ABS harmanlarda kopma uzaması değerlendirildiğinde en üstün performanslı bileşim P60A40 olarak öne çıktığı görülmektedir. Buna karşın akma dayanımında harman bileşim oranına bağlı olarak değişimin net bir eğilim içermediği ancak yapıda artan PMMA oranına bağlı olarak belirli bir değere kadar (%60) artış eğilimi içinde olduğu görülmektedir. Çekme dayanımları dikkate alındığında, harman yapıda artan PMMA oranı ile çekme dayanımının iyileştiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.17-18 ve Tablo 3.10'da verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik özellikler üzerinden, mekanik özelliklerin dengeli ve üstün performans sergilediği harman yapının P40A60 ve P60A40 bileşim oranlarında elde edildiği söylenebilir. Bu bileşim oranlarındaki harman malzemelerin saf ABS'ye kıyasla üstün elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Böylece PMMA/ABS harman yapıların oluşturulmasında temel amaçlardan biri olan PMMA'nın düşük tokluğunun ve darbe dayanımı davranışının iyileştirilmesinin yanı sıra saf ABS'den de daha üstün mekanik özelliklerin polimer harmanlama yöntemi ile elde edilebildiği sonucuna varılabilir.



Şekil 3.18. PMMA/ABS harman malzemelerin $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında mekanik özelliklerin harman malzemeyi oluşturan polimerlerin bileşim oranına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması

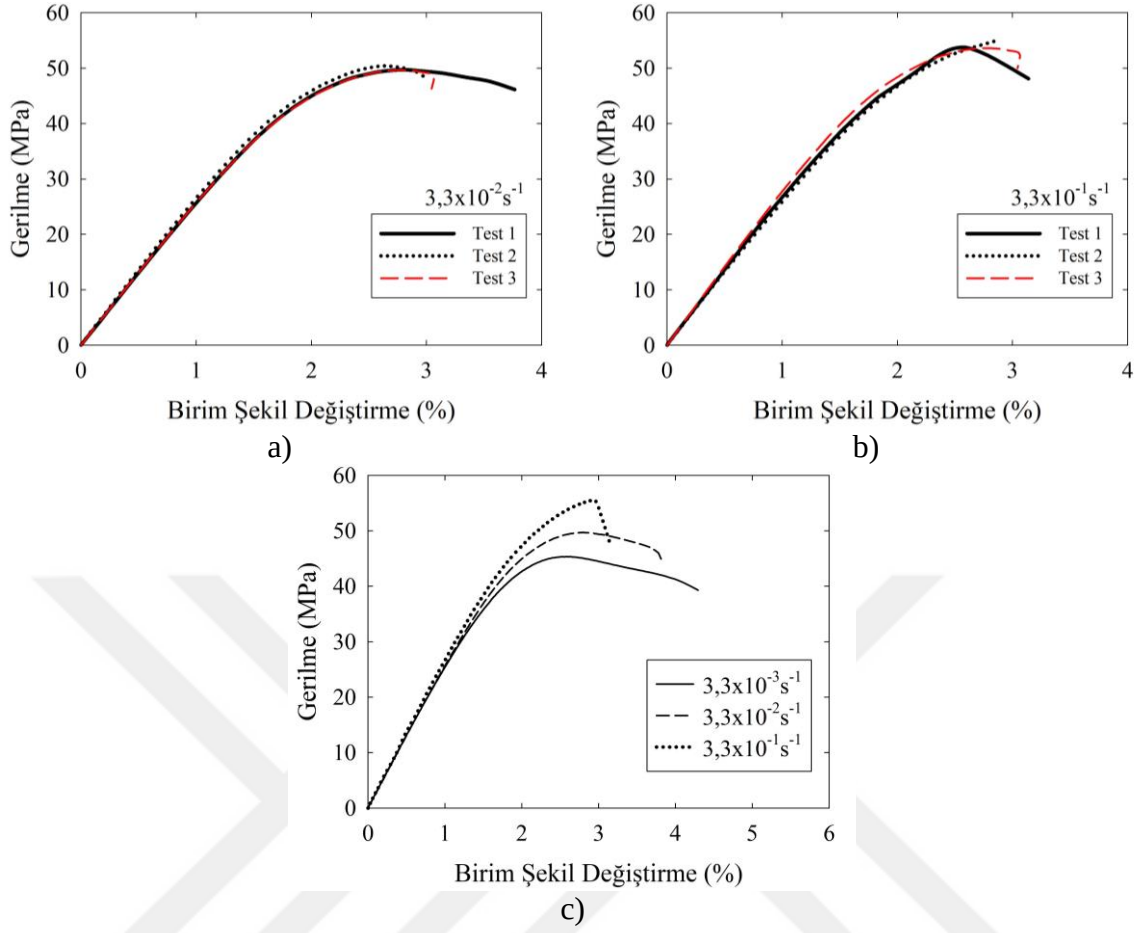
Şekil 3.18'in devamı



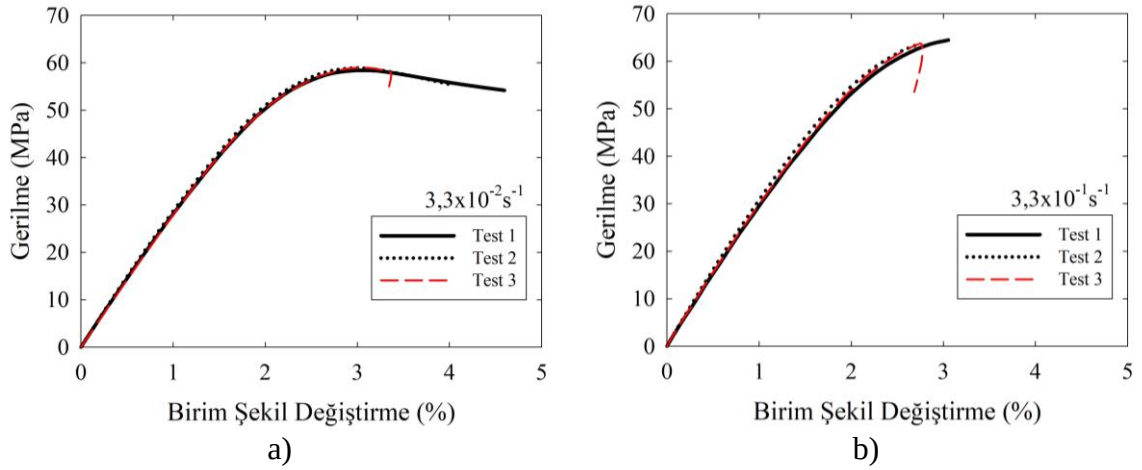
b. Birim şekil değiştirme hızı etkisi

Tez çalışmasının bu başlığı altında saf ABS, P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 numunelerin mekanik özellikleri ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinde birim şekil değiştirme hızı etkileri incelenmiştir. Tüm numune gruplarında sırasıyla $3,3 \times 10^{-3}$, $3,3 \times 10^{-2}$ ve $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızlarına karşılık gelen 5, 50 ve 500 mm/dk çene hızlarında testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri bu bölümde verilmiştir. Şekil 3.19-23'te sırasıyla ABS, P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 numunelerin $3,3 \times 10^{-3}$, $3,3 \times 10^{-2}$ ve $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızlarında tekrarlı testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Bu şekillerde her birim şekil değiştirme hızında test tekrarlanabilirliğinin gösterilmesi amacıyla tekrarlı testlere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri de sunulmuştur. Ayrıca her numune grubu için farklı birim şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin ortalamaları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 3.19a ve b'den saf ABS numune için verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, tekrarlı testlerin her bir birim şekil değiştirme hızında birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3.19c'den artan birim şekil değiştirme hızıyla çekme dayanımının arttığı buna karşın kopma uzamasının ciddi oranda azaldığı söylenebilir. Saf ABS'de görülen bu davranışın tüm harman bileşim oranlarındaki numuneler içinde benzer şekilde gözlemlendiği gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinden görülmektedir (Şekil 3.20-23).

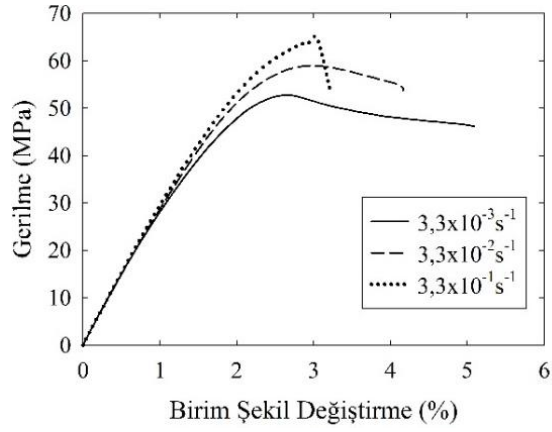


Şekil 3.19. A100 kodlu malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

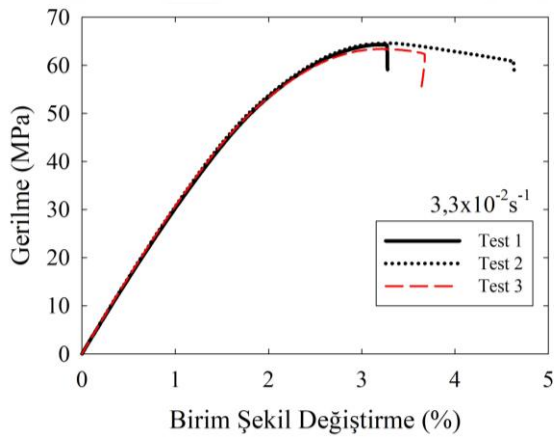


Şekil 3.20. P20A80 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

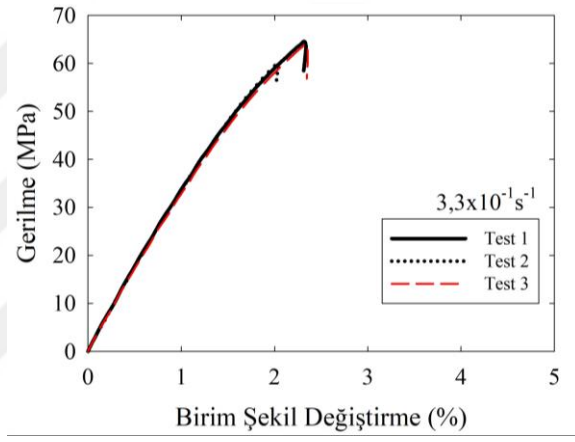
Şekil 3.20'nin devamı



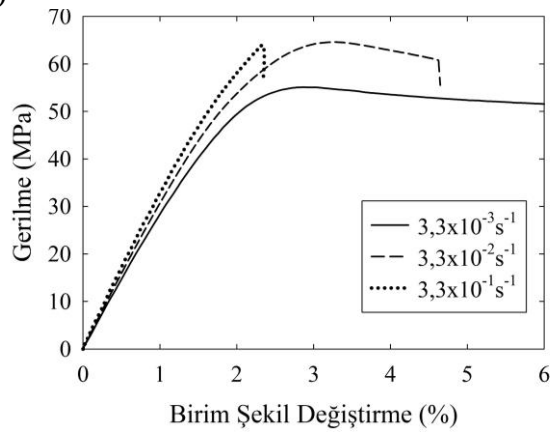
c)



a)

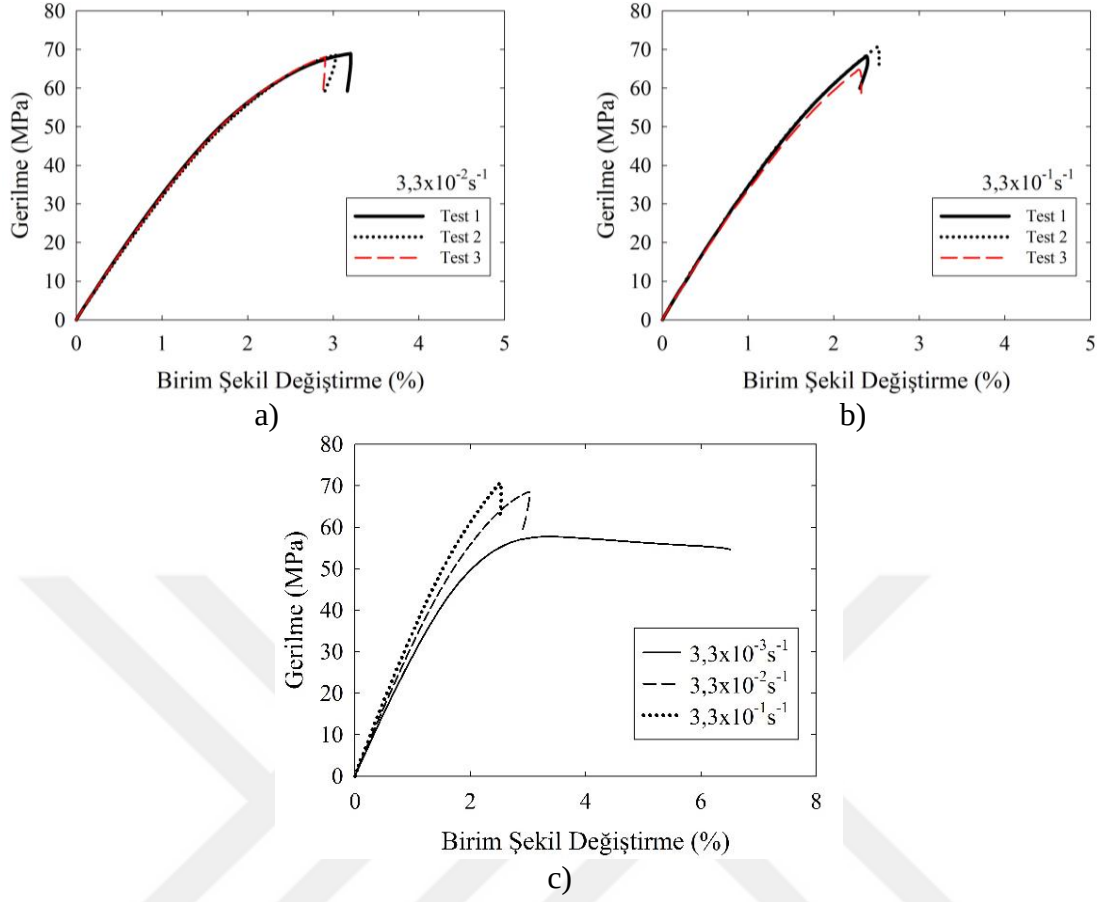


b)

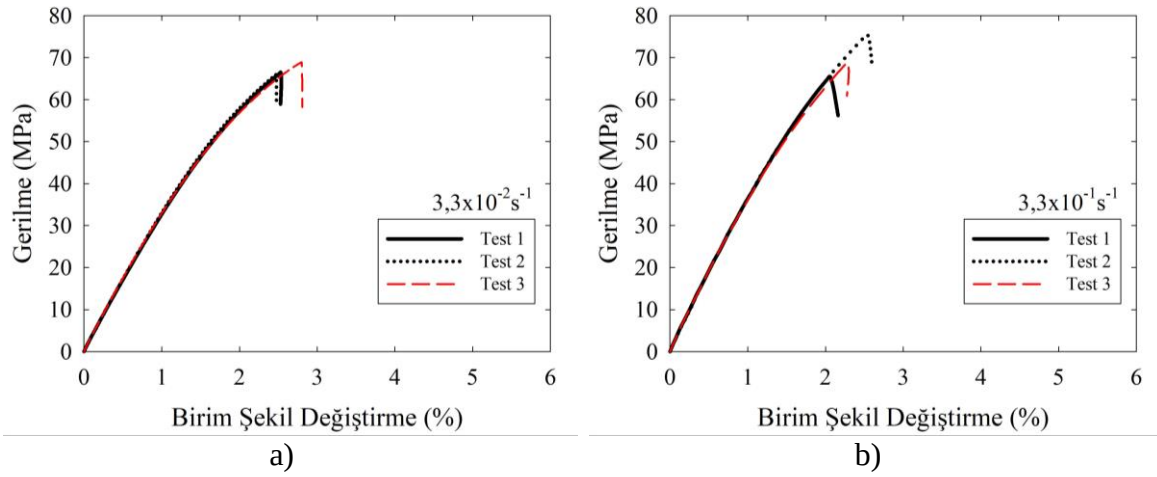


c)

Şekil 3.21. P40A60 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

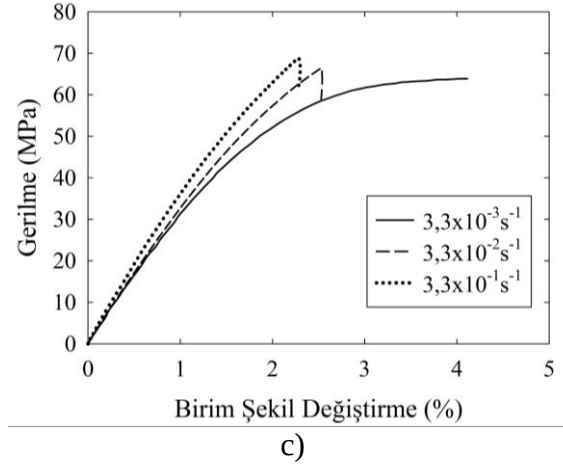


Şekil 3.22. P60A40 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması



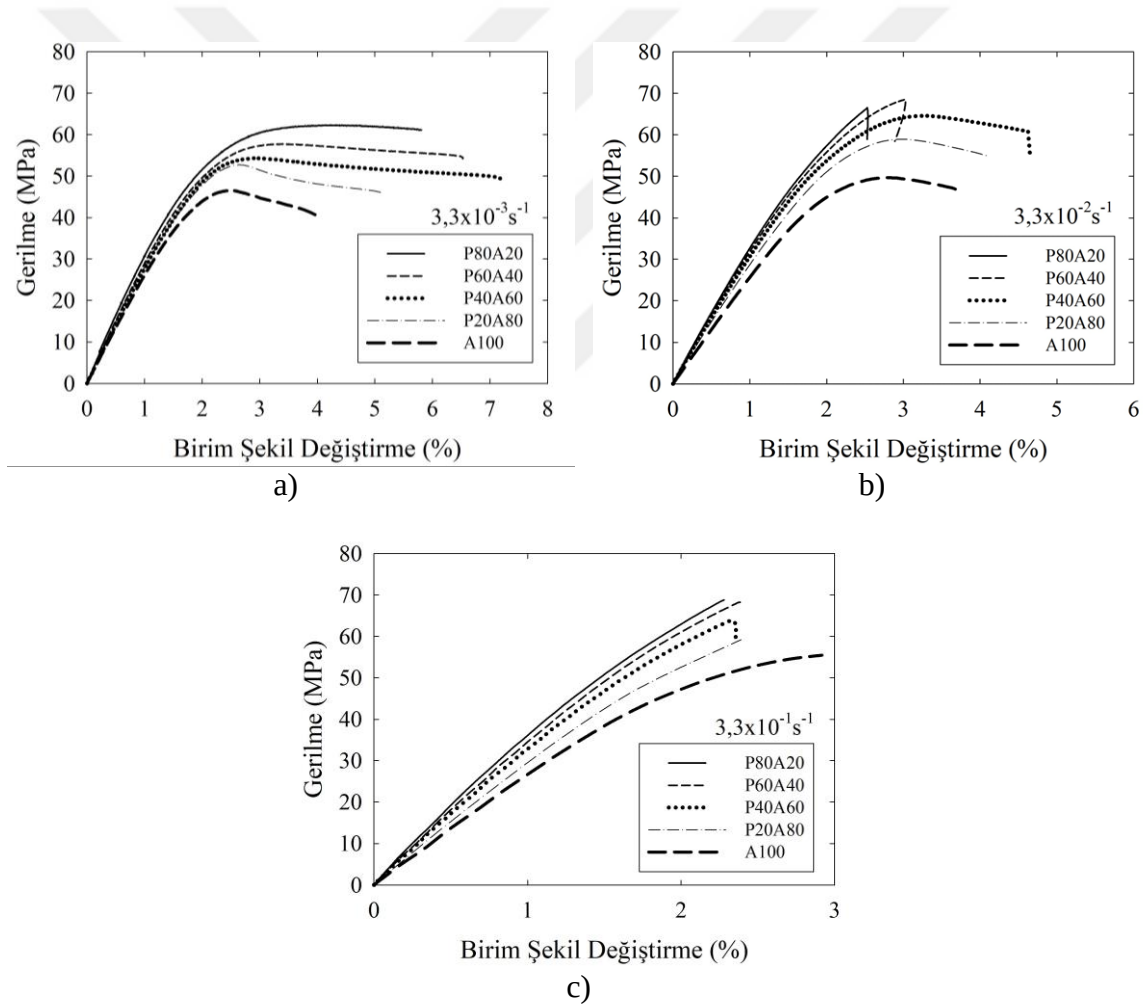
Şekil 3.23. P80A20 harman malzemenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.23'ün devamı



PMMA/ABS harman malzemelerde bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak gerilme-birim şekil değiştirme eğri karakteristiklerinin incelenmesi amacıyla Şekil 3.24'te her bir birim şekil değiştirme hızında saf ve harman numunelerin ortalama gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ayrı ayrı verilmiştir. Saf ve harman numunelerden farklı birim şekil değiştirme hızlarında elde edilen elastisite modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikler Tablo 3.11'de sunulmuştur. Şekil 3.24'ten elde edilen ve Tablo 3.11'de özetlenen mekanik özelliklerden akma ve çekme dayanımlarının birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak değişimleri her bir numune grubu için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 3.24 ve Tablo 3.11'den, tüm birim şekil değiştirme hızlarında PMMA/ABS harman malzemelerin saf ABS'ye kıyasla daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda her bir malzeme grubunda artan birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak mekanik özelliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, saf ABS malzemede $3,3 \times 10^{-3}$, $3,3 \times 10^{-2}$ ve $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinde elde edilen akma dayanımları sırasıyla 38,7 MPa, 42,6 MPa ve 45,1 MPa olarak belirlenmiştir. ABS numune için akma dayanımının birim şekil değiştirme hızıyla yaklaşık %17 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Benzer şekilde ABS numunenin elastisite modülü ve çekme dayanımları incelendiğinde her bir mekanik özelliğin sırasıyla %2 ve %22'lik iyileşmeler gösterdiği belirlenmiştir. Görüldüğü gibi ABS malzeme için elastisite modülünün birim şekil değiştirme hızına bağlı değişiminin neredeyse ihmal edilebilir düzeyde kaldığı söylenebilir. P40A60 kodlu numunenin Tablo 3.11'de özetlenen mekanik özelliklerindeki değişimler irdelendiğinde, akma dayanımının 43,9 MPa'dan sırasıyla 47,8 MPa ve 54,2 MPa değerlerine ve çekme dayanımının 54,7 MPa'dan 63,3 MPa

ve 64 MPa değerlerine ulaştığı görülmektedir. P40A60 kodlu numune için akma ve çekme dayanım değerlerinin sırasıyla %24 ve %17 artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde P60A40 kodlu numunede ise akma dayanımının $3,3 \times 10^{-3}$ - $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızı aralığında yaklaşık %23 oranında artışla 43,5 MPa'dan 53,4 MPa değerine ulaştığı bulunmuştur. PMMA oranın harman yapı içerisinde %80 değerine ulaştığı P80A20 kodlu numunede ise artan birim şekil değiştirme hızıyla akma ve çekme dayanımlarının $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızındaki değerlere kıyasla sırasıyla %18 ve %10 artış gösterdiği söylenebilir. Bu noktada, PMMA/ABS harman yapıların tamamında artan birim şekil değiştirme hızıyla mekanik özelliklerin artış gösterdiği ancak yapı içerisinde artan PMMA oranı ile artış yüzdesinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 3.24. Saf ABS ve PMMA/ABS harman malzemelerin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

PMMA/ABS harman malzemelerde mekanik özellikleri üzerinde birim şekil değiştirme hızının etkilerini irdelemek amacıyla akma ve çekme dayanımlarının her bir numune grubundaki değişimleri incelenmiştir. Bu inceleme ile akma ve çekme dayanımlarının birim şekil değiştirme hızına olan hassasiyeti ve bu hassasiyet üzerinde harmanı yapıyı oluşturan bileşim oranının etkileri de araştırılmıştır. Bu amaçla numune grubunda her bir birim şekil değiştirme hızında elde edilen akma ve çekme dayanımları birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak Şekil 3.25'te verilmiştir. Şekil 3.25'ten görüldüğü gibi A100, P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 kodlu numunelerin akma ve çekme dayanımlarının birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak değişimleri matematiksel ilişkiler yardımıyla temsil edilmiştir. Birim şekil değiştirme hızına bağlı değişimin ifade edildiği matematiksel eşitlik Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\sigma_y \text{ veya } \sigma_m = A \log(\dot{\epsilon}) + B \quad (4)$$

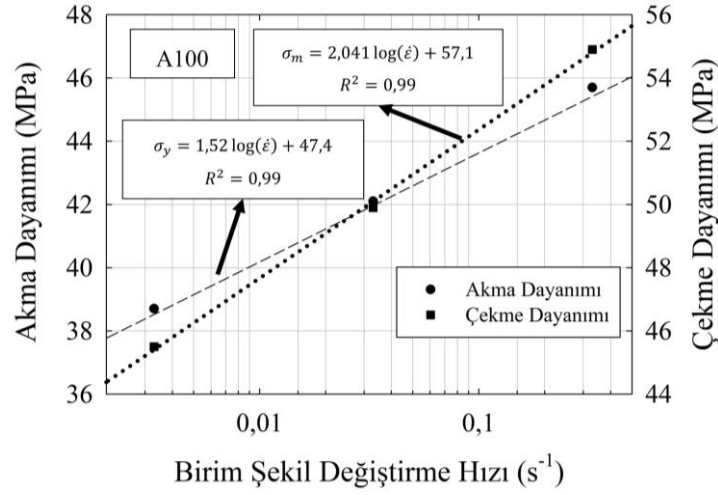
burada, σ_y akma dayanımını, σ_m çekme dayanımını, A ve B katsayısı ise sırasıyla uyumlanan eğrinin eğimini ve kesişim noktasındaki değeri ifade etmektedir. Şekil 3.25'te verilen eğrilerdeki A katsayılarının bileşim oranına bağlı olarak değişimi akma ve çekme dayanımının değişiminin yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, A100 kodlu numunede A katsayısı yaklaşık 1,52 iken P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 kodlu harman numunelerde sırasıyla yaklaşık 2,39, 2,21, 2,37 ve 2,53 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Saf ABS ile kıyaslandığında harman numunelerin akma dayanımlarının daha üstün bir eğimle birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak artış gösterdiği söylenebilir. Bu durumda saf PMMA'nın akma dayanımının yüksek olması ve daha üstün elastisite modülü değerine sahip olması nedeniyle harman yapıların akma dayanımının artış gösterdiği ve birim şekil değiştirme hızıyla da artışın aynı şekilde görüldüğü söylenebilir. Aynı zamanda A katsayısının harman yapıdaki bileşim oranıyla birbirine yakın değerler verdiği ancak en yüksek değerine PMMA'nın en yüksek bileşim oranına sahip olduğu P80A20 kodlu harman numunede elde edildiği belirlenmiştir.

Çekme dayanımlarının birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak değişimlerinden elde edilen A katsayıları irdelendiğinde ise P80A20 kodlu numunenin en düşük katsayıya sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın en üstün artış eğimi ise P20A80 kodlu numunede elde edilmiştir. P80A20 kodlu numunede çekme dayanımı artış hızının düşük olmasının, PMMA oranı yüksek bir harman malzeme olması nedeniyle en düşük birim şekil değiştirme hızında

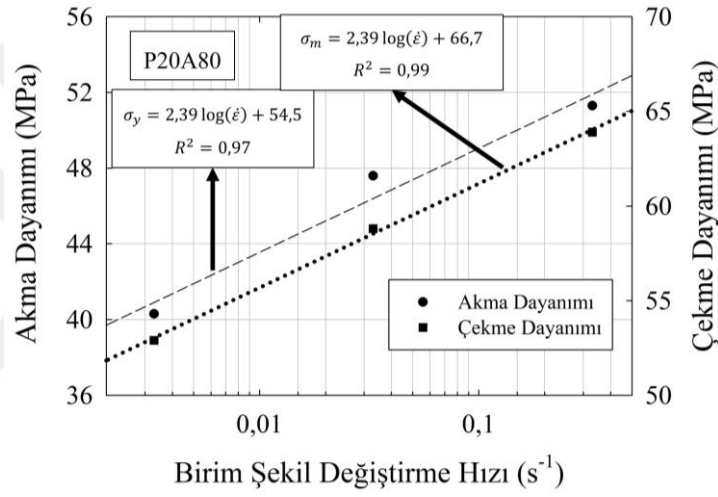
yüksek çekme dayanımına sahip olması ve PMMA'nın birim şekil değiştirme hızı duyarlılığının ABS'den düşük olmasından ileri geldiği söylenebilir.

Tablo 3.11. Saf ABS, P20A80, P40A60, P60A40 ve P80A20 numunelerin farklı birim şekil değiştirme hızlarında elde edilen mekanik özellikleri

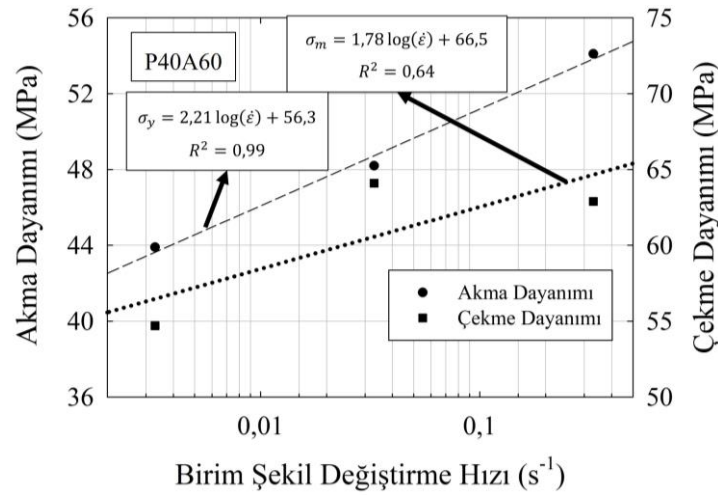
Numune Kodu	Birim Şekil Değiştirme Hızları (s ⁻¹)	Mekanik Özellikler		
		Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
A100	3,3x10 ⁻³	2665,3 ± 50,1	38,7 ± 0,21	45,5 ± 0,92
P20A80		2911,9 ± 124,9	40,3 ± 1,96	52,9 ± 0,26
P40A60		2967 ± 115,9	43,9 ± 1,45	54,7 ± 0,42
P60A40		3064,7 ± 105,9	43,5 ± 1,11	57,4 ± 0,49
P80A20		3318 ± 120,1	42,3 ± 2,89	62,8 ± 0,98
A100	3,3x10 ⁻²	2665 ± 51,7	42,1 ± 0,63	49,9 ± 0,33
P20A80		2920 ± 64,6	47,6 ± 0,98	58,8 ± 0,22
P40A60		3190 ± 37,3	48,2 ± 0,82	64,1 ± 0,5
P60A40		3363 ± 40,7	49,9 ± 0,48	68,5 ± 0,36
P80A20		3468 ± 22,9	49,6 ± 1,25	66,4 ± 1,87
A100	3,3x10 ⁻¹	2726 ± 97,2	45,7 ± 0,52	54,9 ± 0,89
P20A80		3086 ± 72,7	51,3 ± 0,45	63,9 ± 0,46
P40A60		3442 ± 77,7	54,1 ± 1,77	62,9 ± 2,0
P60A40		3571 ± 50,8	54,4 ± 1,59	67,9 ± 2,4
P80A20		3838 ± 64,9	54,9 ± 3,47	69,9 ± 4,2



a)



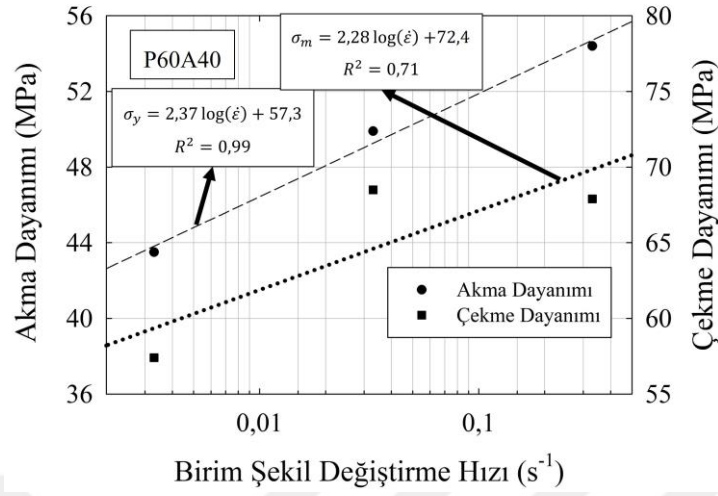
b)



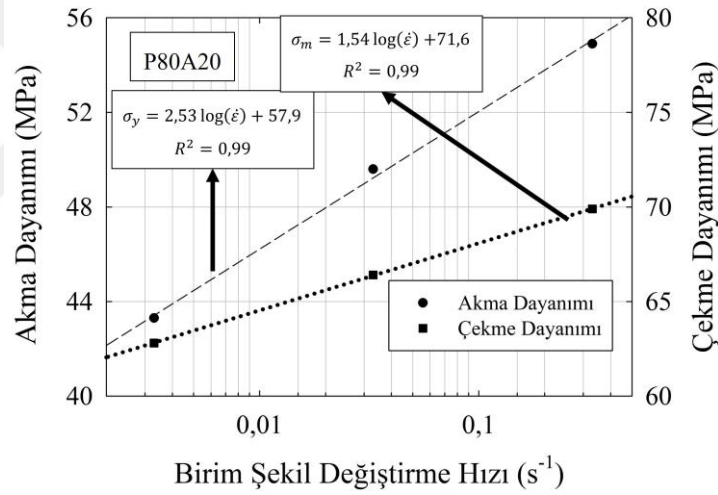
c)

Şekil 3.25. Birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak akma ve çekme dayanımlarının PMMA/ABS harman malzemelerdeki değişimleri ile bu değişimlere ait katsayılar a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40 ve e) P80A20

Şekil 3.25'in devamı



d)



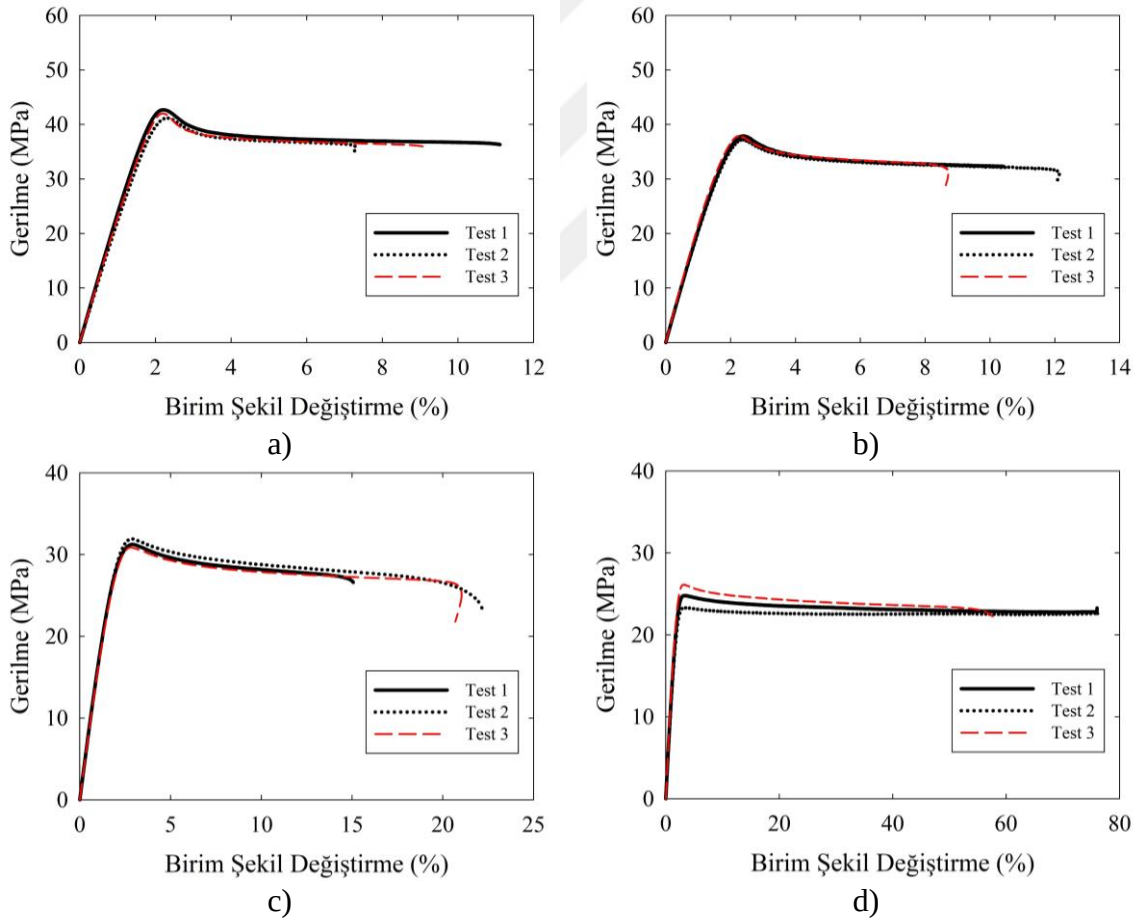
e)

3.5.2. ABS/TPU

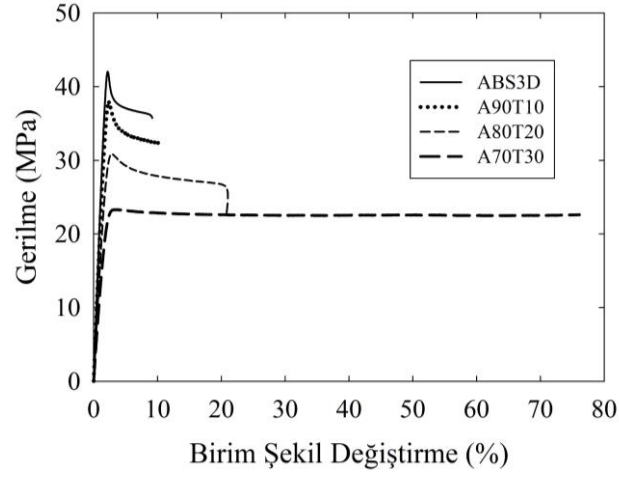
ABS/TPU harman malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme testlerine ait sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. ABS/TPU harman numunelerin mekanik özelliklerinin irdelenmesi harman yapıyı oluşturan bileşim oranlarının etkilerini içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda harman yapıdaki bileşim oranlarının elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklere olan etkileri detaylıca araştırılmış, bulgular ve sonuçlar bu kısımda sunulmuştur.

Şekil 3.26a-d’de sırasıyla saf ABS ve ABS/TPU harman yapıdaki numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında tekrarlı çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri her bir numune grubu için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 3.26’da verilen eğrilerden tüm numune gruplarında test tekrarlanabilirliğinin sağlandığı ve numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme cevaplarının kendi içerisinde yüksek oranda uyumlu olduğu söylenebilir. Saf ve harman yapıdaki numune grubunun Şekil 3.26’da verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.12’de standart sapmaları içerecek şekilde özetlenmiştir. Tablodan görüldüğü gibi ABS yapıya TPU polimer ilavesi ile oluşturulan harman yapılarda artan TPU oranı ile elastisite modülü, akma ve çekme dayanımlarının ciddi oranda azaldığı söylenebilir. Ancak, artan TPU oranı ile kopma uzamasının önemli bir miktarda arttığı da görülmektedir. Bu davranış literatürde daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan da bilinmektedir (de Leon vd., 2019; Doner vd., 2023; Soltanmohammadi vd., 2024). Örneğin, ABS3D kodlu numunede elastisite modülü ve akma dayanımı sırasıyla 2355 MPa ve 39,2 MPa iken A80T20 kodlu numuneden ise sırasıyla 1680 MPa ve 25,4 MPa olarak elde edilmiştir. ABS/TPU harmanlarda akma dayanımlarındaki değişimler ele alındığında artan TPU oranı ile akma dayanımının ABS3D numuneye kıyasla yaklaşık %53 oranında düşüşle 39,2 MPa’dan 18,6 MPa değerine sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın kopma uzaması değerinin ise %29,9’dan %69,9 değerine 2,34 katlık bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak burada belirtilmesi gereken önemli bir husus ise, ABS3D numuneye kıyasla kopma uzaması değerinin %10-20 oranında TPU içeren harmanlarda azaldığı ancak %30 harman içeren numunede ise ciddi oranda artış göstermesi durumudur. Bu durum önceki çalışmalardan TPU’nun bu bileşim oranında sürekli faz oluşturmamasından kaynaklanan bir sünek davranış karakteristiği olarak belirtilmiştir (Leon vd., 2019; Doner vd., 2023). Akma ve çekme dayanımlarında olduğu gibi elastisite modülünün de harman yapıda artan TPU oranı ile ciddi oranda azaldığı belirlenmiştir. A70T30 kodlu numunenin elastisite modülünün ABS3D numunenin elastisite modülünden yaklaşık %42 oranında düşük bir değere sahip olduğu Tablo 3.12’den görülmektedir. Buna ilaveten, saf ABS ve ABS/TPU harmanların Tablo 3.12’de verilen dayanım katsayısı ve pekleşme üssü değerlerinden, TPU oranının artmasıyla malzemelerin artan süneklik davranışıyla pekleşme üssü değerinin ciddi oranda arttığı görülmektedir. Ayrıca en üstün dayanım katsayısının ise A90T10 kodlu numunede elde edildiği belirlenmiştir.

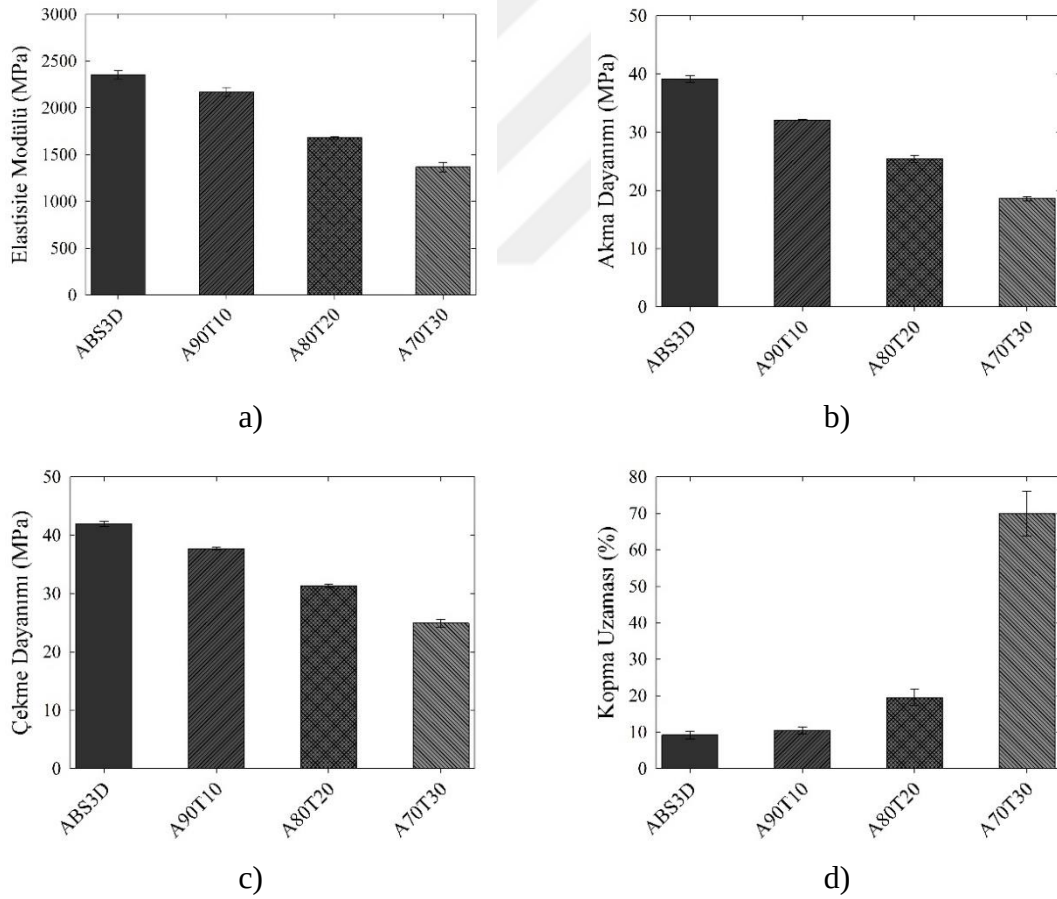
Her bir numune grubuna ait ortalama gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri harman yapıdaki bileşim oranının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkilerinin daha kolay incelenebilmesi amacıyla karşılaştırmalı formda Şekil 3.27’de verilmiştir. Şekil 3.28’de ise her bir mekanik özelliğin (elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması) harman yapıdaki bileşim oranına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Şekil 3.28’den gibi ABS3D ve ABS/TPU harmanlarından elde edilen elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklerin harman yapıdaki TPU oranı ile doğrusal bir değişim gösterdiği söylenebilir. Elastisite modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri harman yapıya TPU ilavesi ve yapıda artan TPU oranı ile birlikte doğrusal bir şekilde azalma davranışı gösterirken kopma uzaması değeri ise artış göstermektedir.



Şekil 3.26. Saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemeler için $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30



Şekil 3.27. ABS/TPU harman malzemelerin gerilme-birim şekil değişirme eğrilerinin karşılaştırması

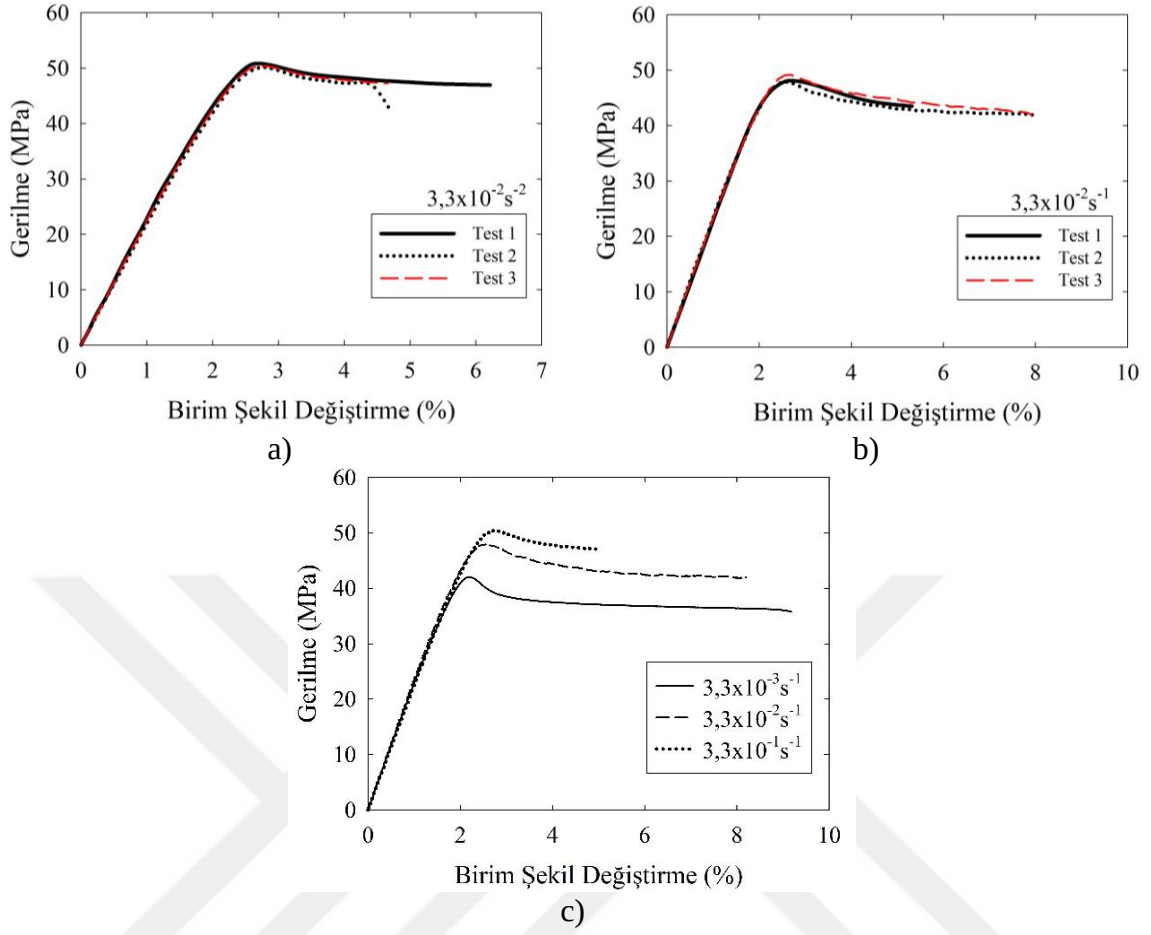


Şekil 3.28. ABS/TPU harman malzemelerin mekanik özelliklerin bileşim oranına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması

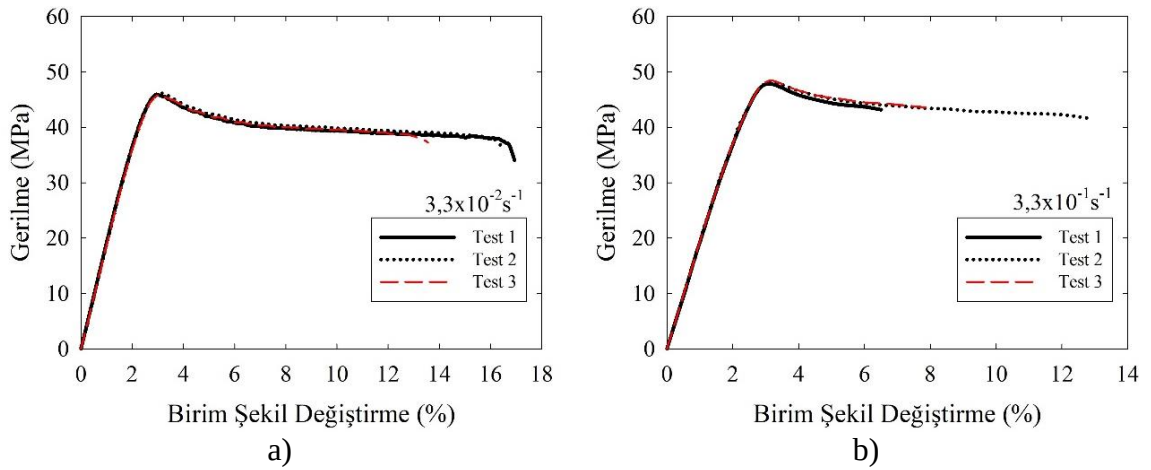
Tablo 3.12. Saf ABS ve harman bileşime sahip ABS/TPU numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler

Numune Kodu	Mekanik Özellikler					
	Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Dayanım Katsayısı K (MPa)	Pekleşme Üssü n
ABS3D	2354 ± 60,5	39,2 ± 0,85	42 ± 0,62	9,9 ± 1,55	46,43	0,018
A90T10	2173 ± 63,9	32,1 ± 0,09	37,7 ± 0,34	10,4 ± 1,4	48,12	0,049
A80T20	1680 ± 15,3	25,4 ± 0,83	31,4 ± 0,43	19,5 ± 3,2	41,53	0,067
A70T30	1368 ± 73	18,6 ± 0,54	24,9 ± 0,95	69,9 ± 8,7	37,8	0,802

Birim şekil değiştirme hızının ABS/TPU harman numunelerin mekanik özellikleri ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi karakteristiği üzerindeki etkileri eksenel çekme testleri ile araştırılmıştır. Bu kapsamda saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman malzemelerden üretilen çekme test numuneleri ile $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızlarında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonrasında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak her bir bileşim oranı için sırasıyla aşağıda verilmiştir (Şekil 29-32). Şekillerde verilen eğrilerden saf ABS ve harman yapıları malzemelerin farklı birim şekil değiştirme hızlarında testlerinin kendi içerisinde tekrarlanabilir olduğu ve artan birim şekil değiştirme hızıyla akma ve çekme dayanımlarının artış gösterdiği görülmektedir. Buna karşın birim şekil değiştirme hızıyla kopma uzaması değerinin doğrusal bir değişim davranışı göstermediği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 3.33'te birim şekil değiştirme hızlarına göre karşılaştırmalı olarak verilen eğrilerde ABS3D ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harmanların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 3.29-32'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen elastisite modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri ise Tablo 3.13'te özetlenmiştir. Şekil 3.33 ve Tablo 3.13'ten A90T10 kodlu harman numunenin tüm birim şekil değiştirme hızlarında ABS3D kodlu saf ABS'ye yakın mekanik davranış sergilediği görülmektedir. Özellikle artan birim şekil değiştirme hızı ile A90T10 kodlu numunenin akma ve çekme dayanımları saf ABS'ye oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum iki malzemenin mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, rekabetçi davranışa sahip olabileceği şeklinde düşünülebilir.

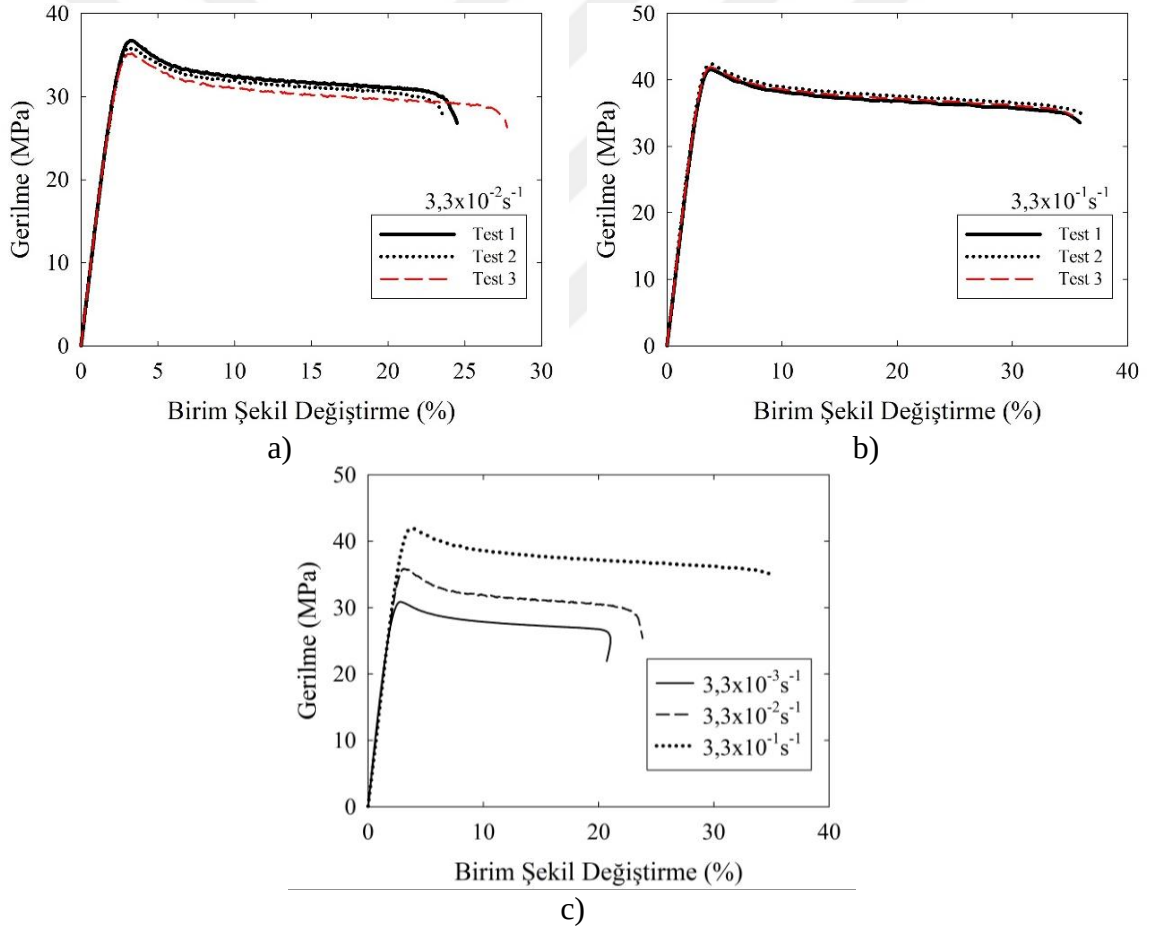
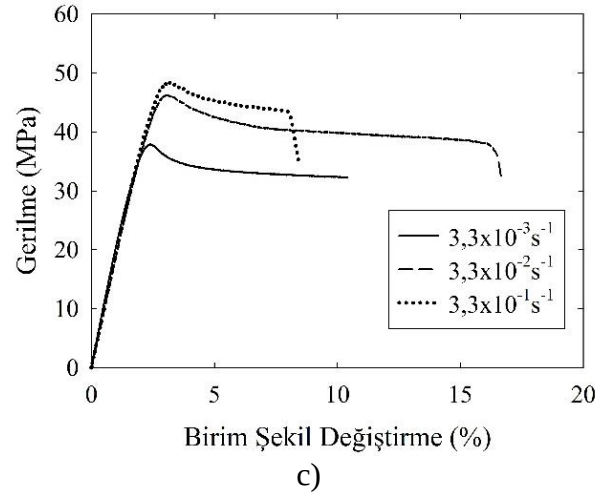


Şekil 3.29. ABS3D numunenin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

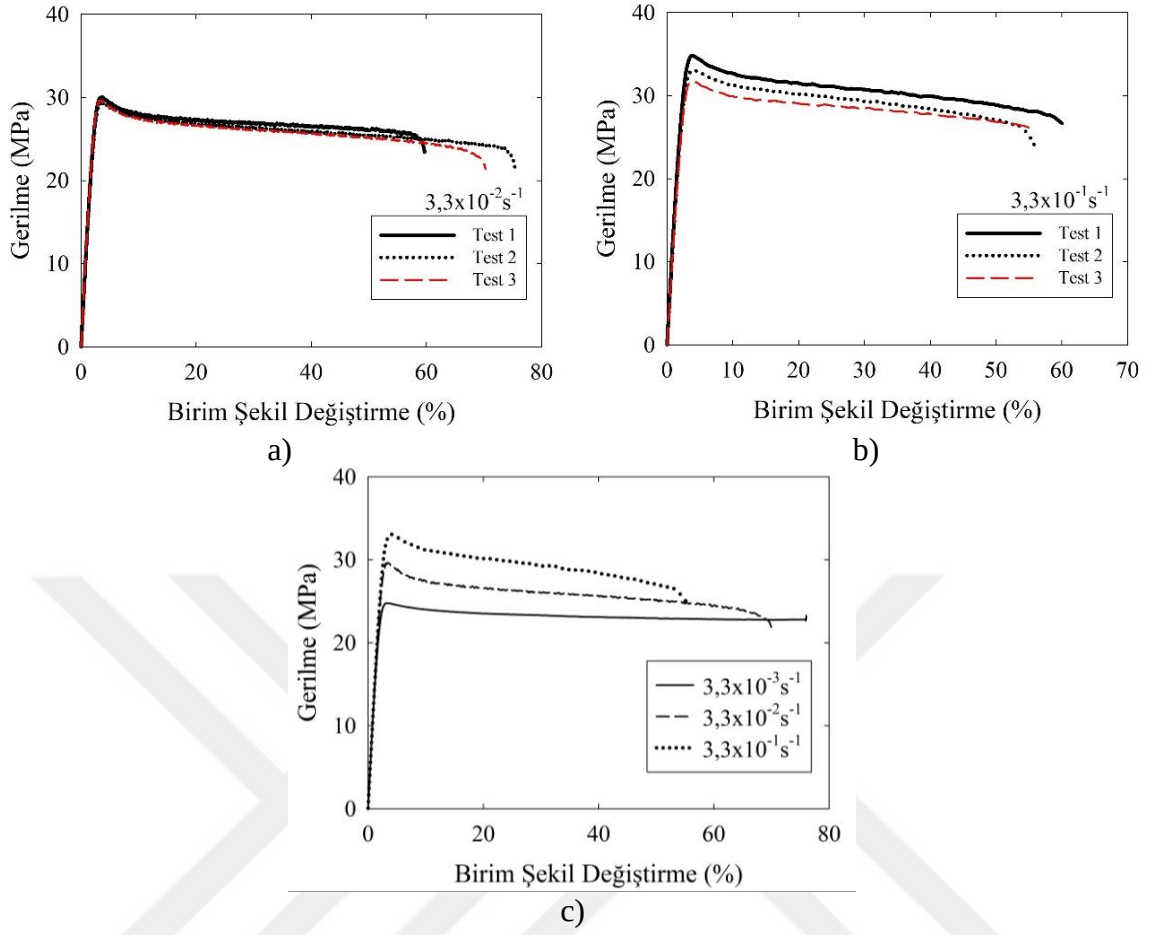


Şekil 3.30. A90T10 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

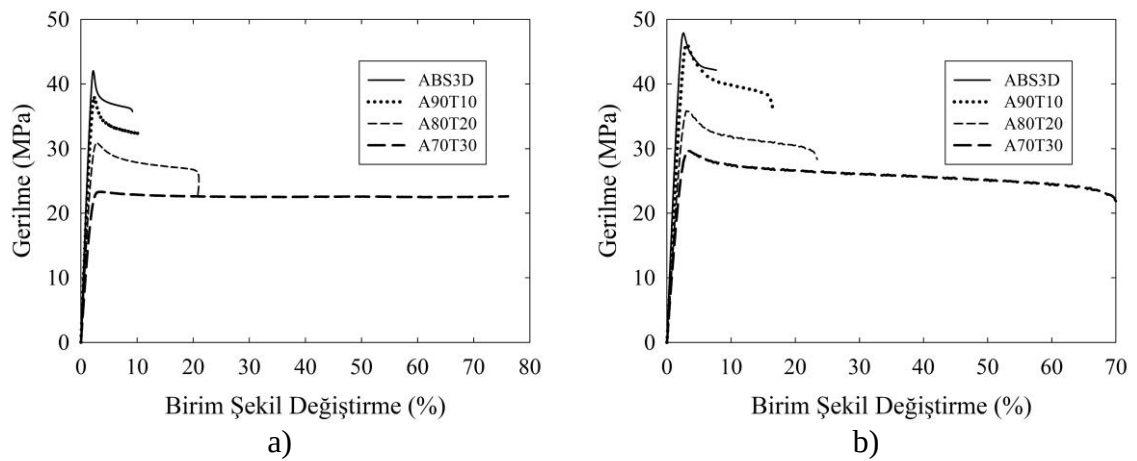
Şekil 3.30'un devamı



Şekil 3.31. A80T20 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

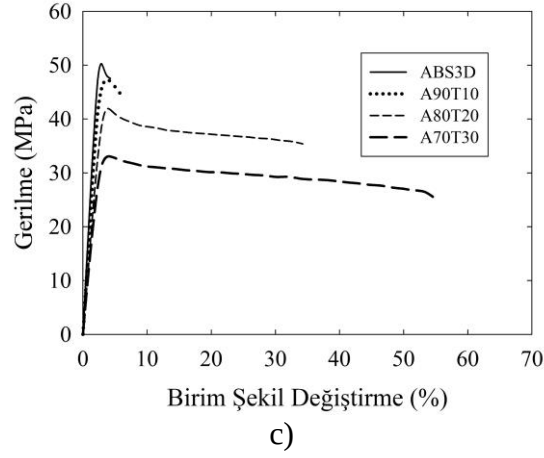


Şekil 3.32. A70T30 numunenin farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) birim şekil değiştirme hızı ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 3.33. Saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin farklı birim şekil değiştirme hızı değerlerinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması; a) $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, b) $3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve c) $3,3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

Şekil 3.33'ün devamı



Tablo 3.13. Saf ABS3D, A90T10, A80T20 ve A70T30 numunelerin birim şekil değiştirme hızına bağlı elde edilen mekanik özellikler

Numune Kodu	Mekanik Özellikler			Birim Şekil Değiştirme Hızları (s ⁻¹)
	Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	
ABS3D	2354,7 ± 60,5	39,2 ± 0,85	42 ± 0,62	3,3x10 ⁻³
A90T10	2173,3 ± 63,9	32,1 ± 0,09	37,7 ± 0,34	
A80T20	1680,3 ± 15,3	25,4 ± 0,83	31,4 ± 0,43	
A70T30	1368 ± 73	18,6 ± 0,54	24,9 ± 0,95	
ABS3D	2356 ± 5,7	44,8 ± 0,62	48,5 ± 0,59	3,3x10 ⁻²
A90T10	1852,3 ± 17,7	42,9 ± 0,25	46 ± 0,19	
A80T20	1550 ± 17,6	30,4 ± 0,92	35,9 ± 0,65	
A70T30	1304 ± 26	23,9 ± 0,57	29,7 ± 0,28	
ABS3D	2316 ± 2,3	46,8 ± 0,5	50,5 ± 0,32	3,3x10 ⁻¹
A90T10	1942 ± 23,8	43 ± 0,69	48,3 ± 0,15	
A80T20	1430 ± 52,3	40,4 ± 1,46	42 ± 0,33	
A70T30	1342 ± 56,7	26,3 ± 1,15	33,2 ± 2,6	

3.6. Yorulma Davranışı

Bu bölümde, PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin yorulma ömrü performansının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen eksenel yorulma testlerinin sonuçları ve bu sonuçlara ait irdellemeler ayrı ayrı ele alınarak sunulmuştur. Yorulma testlerinde harman malzemelere uygulanan gerilme genliğine karşılık elde edilen hasar çevrim sayıları ve bu eğrilerin karakteristik ampirik katsayıları değerlendirilmiştir.

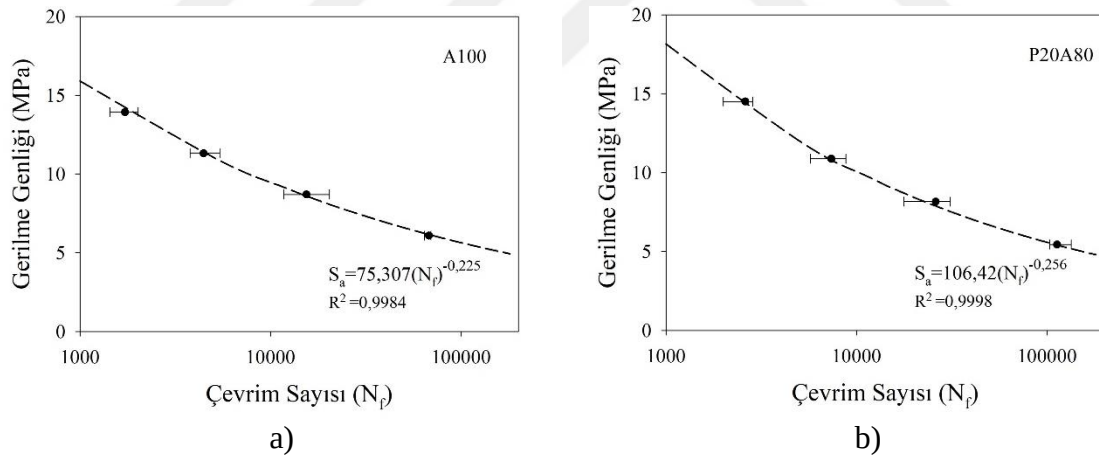
3.6.1. PMMA/ABS Harman

Bu başlık altında, PMMA/ABS harmanların yorulma testleri sonucunda elde edilen veriler harman yapıları oluşturan bileşim oranları ve yükleme oranları etkilerini içerecek şekilde irdelenmiştir. Bölüm 2.1.2’de üretim koşulları hakkında bilgi verilen ve Tablo 3.10’da çekme testleri sonrası mekanik özellikleri özetlenen 40 bar tutma basıncında üretilen 3 mm kalınlıktaki saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların yorulma testleri ile elde edilen sonuçlar bu kısımda sunulmuştur. PMMA/ABS harmanlarda yorulma testleri tam tersinir ve çeki-çeki yükleme tiplerini temsil eden sırasıyla $R=0,1$ ve $R=-1$ gerilme oranlarında gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme tiplerine ait gerilme genliği-hasar çevrim sayısı grafikleri ayrı ayrı irdelenmiş ve sunulmuştur. Bu testlerde yükleme frekansı 5 Hz olarak belirlenmiş ve yükleme frekansının yorulma ömrü davranışı üzerindeki etkileri parametrik çalışmalar kapsamında ayrıca incelenmiştir.

Şekil 3.34’te saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numunelerin çeki/çeki yükleme tipinde ($R=0,1$) gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda elde edilmiş gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri sırasıyla verilmiştir. Bu eğrilerde her bir gerilme genliğinde gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda elde edilen hasar çevrim sayıları standart sapmasını içeren hata çizgilerini ihtiva eden eğriler şeklinde sunulmuştur. Ayrıca eğri üzerinde yorulma davranışını temsil eden ve Denklem 4’te verilen Basquin eşitliğine ait yorulma dayanımı ve yorulma üssü değerleri de verilmiştir. Basquin eşitliğine ait katsayıların harman bileşim oranına bağlı olarak değişimleri ve eğri karakteristikleri üzerindeki etkileri yorulma davranışının irdelenmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılmıştır. Ek olarak PMMA/ABS harman numunelerin yorulma testlerinden elde edilen hasar çevrim sayıları Tablo 3.14’te verilmiştir. PMMA/ABS harman numunelerin yorulma davranışının daha net ortaya koyulması amacıyla ilk olarak saf PMMA ve saf ABS numunelerin yorulma davranışları irdelenmiştir. Şekil 3.34a ve f’de sırasıyla saf ABS ve saf

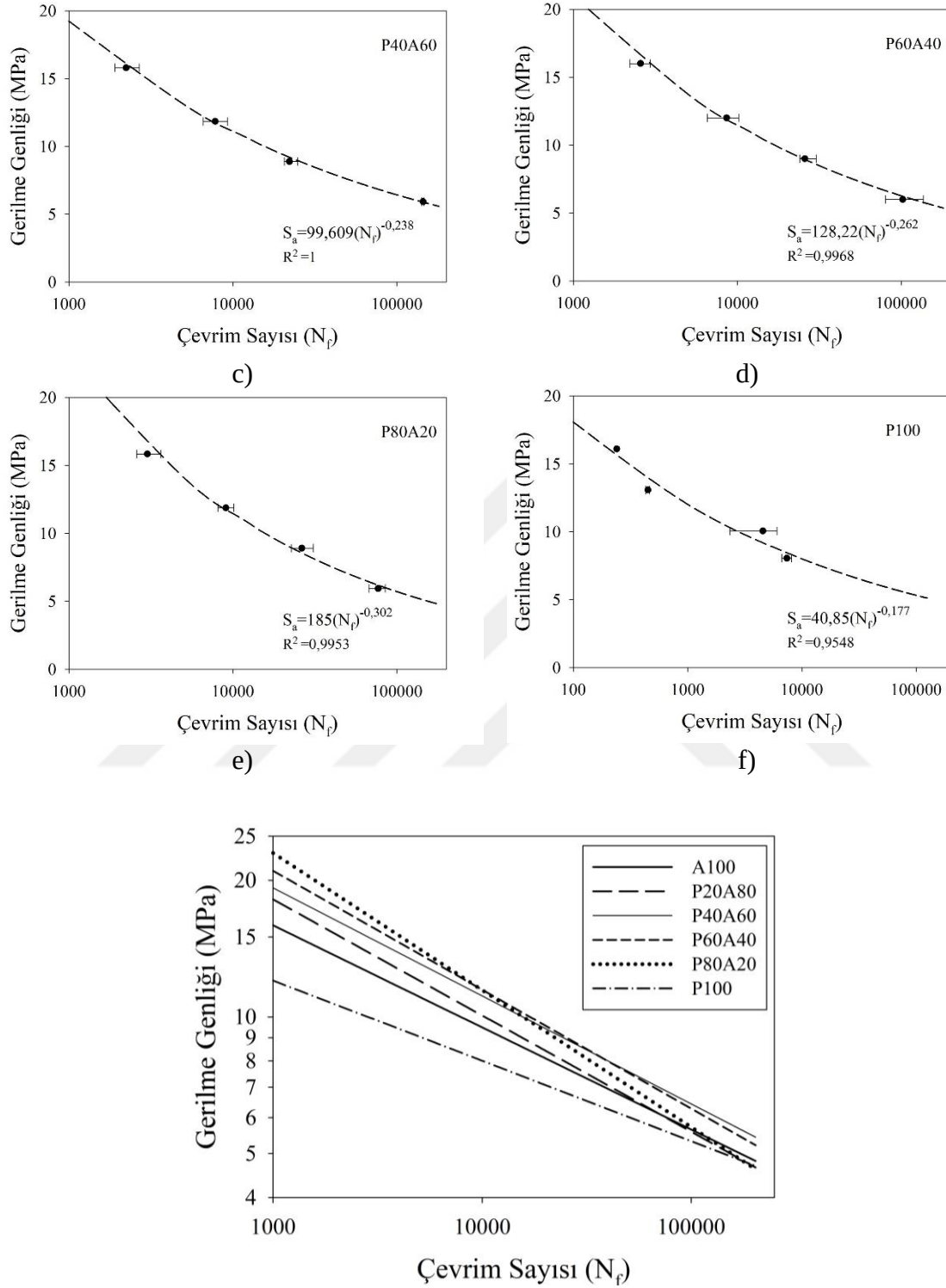
PMMA malzemeleri temsil eden A100 ve P100 kodlu numunelerin gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri incelendiğinde, P100 kodlu numunenin A100 kodlu numuneye kıyasla daha düşük yorulma dayanımı ve daha büyük yorulma üssü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. P100 kodlu saf PMMA'nın daha büyük yorulma üssü değerine sahip olması çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliği değeri değişim eğrisinin eğiminin artması anlamına gelmektedir. Buradan gerilme genliği azaldıkça P100 kodlu numunenin yorulma ömrünün azalacağını sonucuna ulaşılabilir. PMMA numunenin sahip olduğu bu davranışın düşük kopma uzamasına sahip olması ve gevrek hasar davranışı sergilemesinden ileri geldiği düşünülmektedir. Ayrıca A100 kodlu numunede farklı gerilme genliği değerlerinde numunenin hasara uğradığı çevrim sayılarının kendi içinde daha az sapma ile yüksek oranda tekrarlanabilir olduğu görülmektedir. P100 kodlu numunede ise daha yüksek bir standart sapma ile yorulma ömrü karakteri elde edilirken buna paralel olarak Basquin eşitliğini temsil eden eğrinin yakınsama oranı A100 kodlu numuneye kıyasla daha düşük bir değere sahiptir. A100 ve P100 kodlu numunelerin yorulma ömrü performansları karşılaştırmalı olarak deneysel çevrim sayılarına uyumlanan Basquin eşitliği eğrisi üzerinden hesaplanan çevrim sayıları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Örneğin, Basquin eşitliğinden, 10 MPa gerilme genliğinde A100 kodlu numunenin 7889 çevrim sonunda hasara uğradığı belirlenirken, P100 kodlu numunenin ise 2838 çevrim sonunda hasar uğrayacağı belirlenmiştir. Benzer şekilde 6 MPa gerilme genliğinde A100 kodlu numune 76391 çevrim sonunda P100 kodlu numune ise 50868 çevrim sonunda hasara uğrayacağı belirlenmiştir. Bu durumun PMMA'nın gevrek yapısı nedeniyle ABS'ye kıyasla oldukça düşük çevrim sayıları sonunda hasara uğramasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3.34'te PMMA/ABS harman yapıdaki numunelerin gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri incelendiğinde önemli bir nokta göze çarpmaktadır. Tüm bileşim oranlarında harman yapıdaki numunelerin gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri yardımıyla elde edilen Basquin eşitliğindeki yorulma dayanımı ve yorulma üssü değerlerinin saf PMMA ve saf ABS'ye kıyasla daha üstün değerlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bunun bir sonucu olarak PMMA/ABS harman yapıları numunelerin saf PMMA ve saf ABS numunelere kıyasla daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediğini görülmektedir. Örneğin ABS içerisinde %40 oranında PMMA içeren P40A60 kodlu numunede yorulma dayanımı ABS'ye kıyasla, 75,307 MPa'dan 99,61 MPa değerine ulaşmaktadır. Benzer şekilde P60A40 kodlu numunenin yorulma dayanımı saf ABS'ye kıyasla yaklaşık %70 oranında artarak 75,307 MPa'dan 128,22 MPa değerine ulaştığı belirlenmiştir. Tüm bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanlarda yorulma

dayanımı değerleri saf ABS'den daha üstün olacak şekilde elde edilmiştir. Bu durumun PMMA/ABS harman malzemelerde FTIR analizlerinde 1723 cm^{-1} dalga sayısında görülen tepe noktası şiddetinin arttığı %40 ve üzerinden PMMA içeren yapılarda artan karışabilirlik ve yapısal uyumluluktan ileri geldiği söylenebilir. Ayrıca, Şekil 3.17'den görüldüğü gibi akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin saf PMMA ve saf ABS'ye kıyasla iyileşmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. PMMA/ABS harmanlarda elde edilen üstün yorulma ömrü performansı aynı zamanda harman malzemelerin viskoelastik malzeme özellikleri üzerinden de değerlendirilebilir. Şekil 3.7a'dan oda sıcaklığında PMMA/ABS harmanların saf PMMA ve saf ABS'ye kıyasla daha üstün depolama modülü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum harman yapı oluşmasıyla ABS ve PMMA arasındaki hidrojen bağ oluşumunun artması ve bunun bir sonucu olarak moleküler zincir hareketinin azalması sonucu meydana geldiği literatürdeki çalışmalardan da bilinmektedir (Mofokeng vd., 2016; Aranda-García vd., 2015). Böylece elde edilen sonuç PMMA/ABS harman yapı oluşturulmasının yorulma davranışı üzerindeki olumlu katkısını ortaya koyulmaktadır.



Şekil 3.34. PMMA/ABS harman numuneler için $R=0,1$ gerilme oranında elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100

Şekil 3.34'ün devamı



Şekil 3.35. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numuneler için $R=0,1$ (çeki/çeki) gerilme oranında elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin karşılaştırması

Tablo 3.14. PMMA/ABS harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları

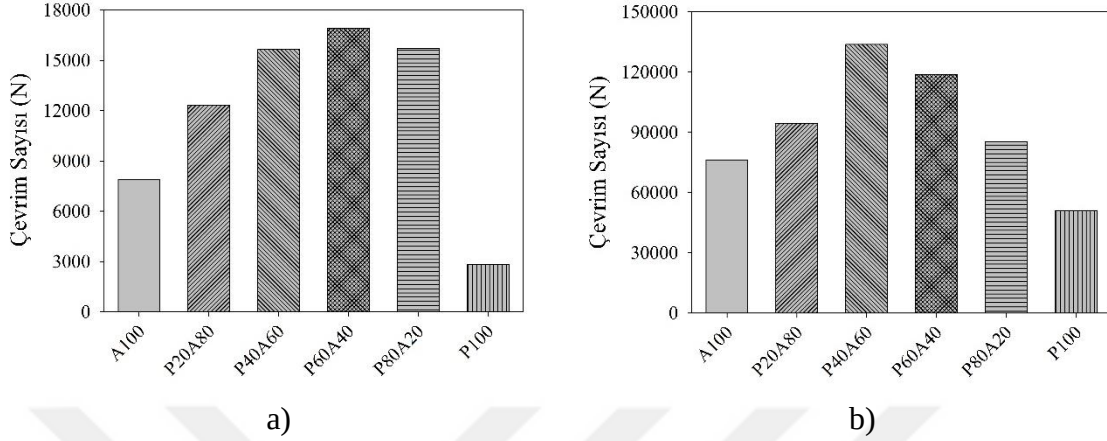
Numune Kodu	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı		
		Test 1	Test 2	Test 3
A100	13,9	1730	1375	1717
	11,3	5464	3854	4454
	8,7	17960	12056	12940
	6,1	69066	64124	67853
P20A80	14,5	2668	2646	2563
	10,9	7475	7268	6763
	8,2	16554	23480	15400
	5,4	112950	107151	136617
P40A60	15,8	2373	1976	1970
	11,9	9675	7507	7289
	8,9	21154	21354	22904
	5,9	146227	144654	141704
P60A40	16	2253	2264	2874
	12	7622	6204	9602
	9	25854	30665	24930
	6	101254	103154	148154
P80A20	15,8	2651	2764	3253
	11,9	9554	8004	8571
	8,9	22454	25154	27554
	5,9	83354	81504	72524
P100	16,1	180	240	210
	13,1	450	464	428
	10	5404	3704	5904
	8,1	7904	6904	7208

PMMA/ABS harmanlarda harman bileşim oranının yorulma ömrü davranışı üzerindeki etkisinin irdelenmesi amacıyla A100, P20P80, ..., P80A20 ve P100 kodlu numunelerin Basquin eşitliği ile elde edilen karakteristik S-N eğrileri karşılaştırmalı formda

Şekil 3.35'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi harman yapıdaki numunelerin hasar çevrim sayıları ve bu hasar çevrim sayılarının gerçekleştiği gerilme genliği değerleri saf numunelere kıyasla daha üstün değerlerde elde edilmektedir. Basquin eşitliği yardımıyla değerlendirildiğinde, örneğin, 10 MPa gerilme genliğinde saf ABS 7889 çevrim sonunda hasara uğrarken yapısına sırasıyla %20 ve %60 oranında PMMA katılması ile sırasıyla 12351 ve 16937 çevrim sonunda hasara uğradığı belirlenmiştir. Böylece P20A80 ve P60A40 kodlu numunelerde saf ABS'ye kıyasla çevrim sayılarında sırasıyla %57 ve %115 oranında iyileşme görüldüğü bulunmuştur. Benzer şekilde 6 MPa gerilme genliğinde A100 kodlu numune 76391 çevrim sonunda P20A80 ve P40A60 kodlu harman numuneler ise sırasıyla 94533 ve 133866 çevrim sayısı sonunda hasar uğramaktadır. Böylece P20A80 ve P40A60 kodlu numunelerin çevrim sayıları 6 MPa gerilme genliğinde A100 kodlu numuneye kıyasla yaklaşık %24 ve %75 oranında artış görüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca tüm bileşim oranlarındaki numunelerin eğrileri üzerinden yaklaşık 10000 çevrim sonrasında en üstün yorulma ömrü davranışının P40A60 ve P60A40 kodlu numunelerde elde edildiği görülmektedir. Bu numuneler arasında ise yüksek gerilme genliği değerinde P60A40 kodlu numune daha üstün performans sergilerken, nispeten düşük gerilme genliğinde ise P40A60 kodlu numune daha üstün yorulma ömrü karakteristiği sergilediği görülmektedir. Örneğin, 10 MPa gerilme genliğinde P40A60 ve P60A40 kodlu numunelerin çevrim sayıları sırasıyla 15650 ve 16937 iken 6 MPa gerilme genliğinde ise çevrim sayıları sırasıyla 133866 ve 119012 olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde saf PMMA, saf ABS ve diğer bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanlara kıyasla daha üstün yorulma davranışı sergilediği söylenebilir.

Burada belirtilmesi gereken bir diğer nokta da harman yapıdaki yorulma ömrünün yapıdaki artan PMMA oranı ile doğrusal olarak bir iyileşme göstermediğidir. Basquin eşitliğinden yararlanarak P80A20 kodlu numune 6 MPa gerilme genliği değerinde ABS'ye kıyasla daha üstün çevrim sayısında hasara uğradığı belirlenirken (85249), P20A80 (94533), P40A60 (133866) ve P60A40 (119012) harman numunelere kıyasla daha düşük çevrim sayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numunelerin hasar çevrim sayıları üzerinde bileşim oranının etkileri çubuk grafik olarak Şekil 3.36'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi hem yüksek hem de düşük gerilme genliklerinde PMMA/ABS harman numuneler saf PMMA ve saf ABS'den daha üstün yorulma ömrü karakteri sergilemektedir. Ayrıca nispeten düşük gerilme

genliğinde en üstün yorulma ömrü performansının sırasıyla P40A60 ve P60A40 kodlu numunelerden elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 3.36. Basquin eşitliği kullanılarak $R=0,1$ gerilme oranında farklı gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının bileşim oranına bağlı değişimleri; a) 10 MPa ve b) 6 MPa

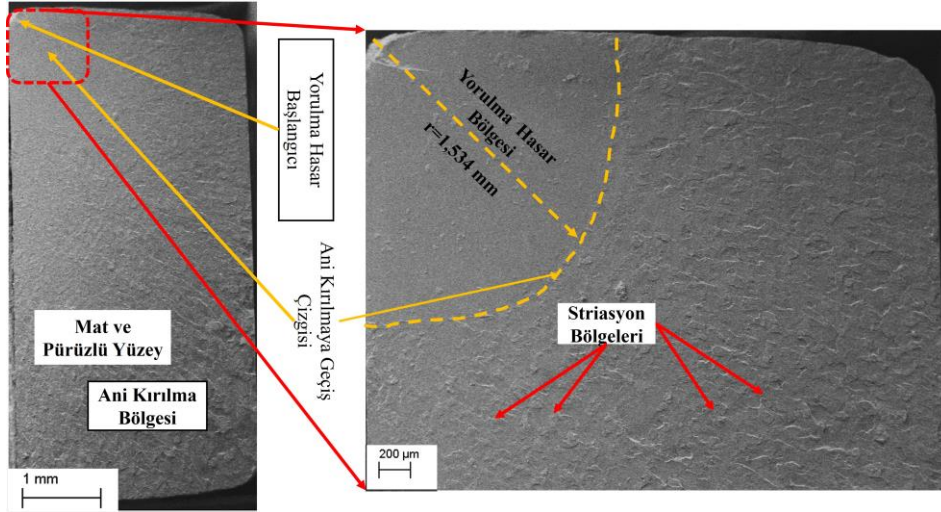
Çeki/çeki yükleme tipinde gerçekleştirilen yorulma testlerine ait gerilme genliği-çevrim sayısı karakteristiklerinin değerlendirilmesinde ayrıca numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri de kullanılmıştır. Yorulma ömrü davranışı ile kırık yüzeydeki hasar yorulma hasarı ilerleyişi arasındaki ilişki saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS numunelerin SEM görüntüleri üzerinden irdelenmiştir. Bu amaçla P100, A100, P20A80 ve P40A60 kodlu numunelerin sırasıyla 8,1 MPa, 8,7 MPa, 8,2 MPa ve 8,9 MPa gerilme genliklerinde teste tabii tutulan numunelerin hasar yüzeylerinin SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerilme genliğine bağlı olarak yorulma hasar davranışındaki değişimlerin irdelenmesi amacıyla P40A60 kodlu harman malzemenin tüm gerilme genliği değerlerinde testleri sonrası numunelerin hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri değerlendirilmiştir. Şekil 3.37’de P100, A100, P20A80 ve P40A60 kodlu numunelerin sırasıyla 8,1 MPa, 8,7 MPa, 8,2 MPa ve 8,9 MPa gerilme genliklerindeki kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.37a’da verilen saf PMMA’ya ait kırık yüzey görüntüsü incelendiğinde, kırık yüzeyin parlak ve mat/pürüzlü olmak üzere temelde iki yüzeyden meydana geldiği ve kırık yüzeydeki parlak bölgenin çeyrek bir daire şeklinde mat bölgeden ayrıldığı görülmektedir. Bu ayrım bir çizgi halinde net ve belirgin bir bölge şeklinde dikkat çekmektedir. Bu bölge içerisinde yorulma hasarı, hasar başlangıcı ve ilerleyişi mekanizması şeklinde iki adımda gerçekleşmektedir (Simsiriwong vd., 2015; Hoey

& Taylor 2009). Bu bölgenin dışında ise yorulma hasar ilerleyişinin daha hızla gerçekleştiği ani kırılma bölgesi başlamaktadır. Parlak ve pürüzlü yüzeyi birbirinden ayıran bölgenin yarıçapı 1,534 mm olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda yorulma çevrimi sırasında yüklemeye birlikte kırık yüzeyde yorulma striasyon bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir (Hoey & Taylor 2009). Striasyon bölgeleri yorulma hasar ilerleyişi sırasında görülen yorulma çizgileri ile oluşan bölgeleri temsil etmekte ve bu bölgelerin giderek büyüdüğü yön genellikle hasar ilerleyişi yönünü belirtmektedir (Hughes vd., 2017). Ayrıca P100 kodlu numunede köşe noktada başlayan ve ilerleyen bir yorulma hasar davranışının gözlemlendiği söylenebilir. Bu hasar davranışı büyük alanlı striasyon bölgeleri oluşturan ve numune kesit bölgesinin oldukça büyük bir alanını kapsayan tipik bir gevrek hasar ilerleyişini temsil etmektedir (Hoey & Taylor, 2009). Şekil 3.37b’de verilen A100 kodlu numuneye ait kırık yüzey görüntüsünün de parlak ve pürüzlü/mat yüzeyden oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda her iki yüzeyi birbirinden ayıran net bir çizgi formunun da oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu çizgi ile ayrılan bölgenin yarı çapı 2,541 mm olarak belirlenmiştir. A100 kodlu numunenin kırık yüzeyinden yorulma hasar ilerleyişinin birden fazla noktadan başladığı ve yükleme etkisiyle ilerleyerek devam ettiği görülmektedir. Şekil 3.36b’de verilen yüksek büyötmeye sahip görüntüde yorulma çizgilerinin kesit yüzeyde belirgin bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu bölgede yorulma çizgileri arasında yorulma striasyon alanlarının da oluştuğu görüntüden kolayca anlaşılmaktadır. Bu bölgede görülen yorulma striasyon alanlarının yorulma hasar ilerleyişi yönüne dik bir şekilde oluştuğu ve genellikle çatlak ilerleyişi yönü hakkında da bilgi verdiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (Hoey & Taylor 2009; Hughes vd., 2017). Böylece çatlak ilerleyişinin yorulma çizgileri boyunca ve striasyon alanlarına dik bir şekilde gerçekleştiği kolaylıkla söylenebilir. A100 kodlu numunede ani kırılma bölgesindeki hasar ilerleyişi malzemenin yapısında bulunan kauçuk faz olarak bilinen bütadiyen bölgelerin kırılması ile devam eden nispeten düz bölgeler oluşturarak gerçekleştiği literatürdeki çalışmalar ve SEM görüntüsü üzerinden söylenebilir (Kwon vd., 2004).

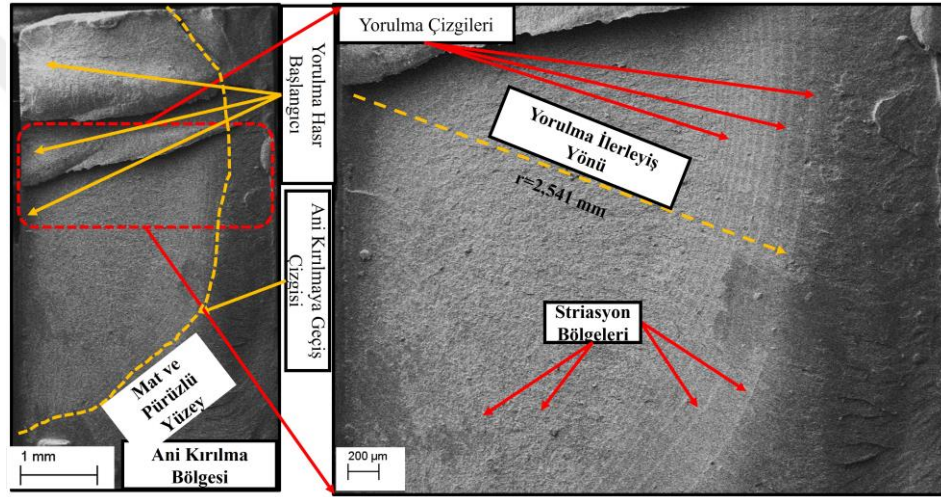
P20A80 kodlu numunenin Şekil 3.37c’de verilen SEM görüntüsü de parlak ve pürüzlü yüzeylerden oluştuğu ve yorulma hasar ilerleyişinin baskın olduğu bölge ile ani kırılma bölgesinin belirgin bir çizgi formu ile birbirinden ayrıldığı görülmektedir. Aynı zamanda kırık yüzeydeki yorulma hasar başlangıcının birden fazla noktadan oluştuğu ve striasyon alanları oluşturarak hasar ilerleyişinin iki farklı yönde gelişerek ani kırılma bölgesine ulaştığı gözlemlenmiştir. P20A80 kodlu harman numunede yorulma hasar ilerleyişinin net bir

şekilde oluştuğu bölgenin yarı çapı ise 3,582 mm olarak belirlenmiştir. Buradan yorulma hasar ilerleyişi oluşan bölgenin büyüklüğü A100 ve P100 kodlu numunelerden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum ayrıca numunelerin hasara uğradığı çevrim sayıları üzerinden de anlaşılmaktadır. Örneğin, P100 ve A100 kodlu numuneler ortalama yaklaşık 7339 ve 14319 çevrim sonunda hasara uğrarken P20A80 kodlu numune 18378 çevrim sonunda hasara uğramaktadır. Buradan yorulma hasar ilerleyişi bölgesinin kırık yüzeydeki alanının artması benzer gerilme genliğindeki yüklemelerde hasarın gerçekleştiği çevrim sayısında da artış olacağına işaret ettiği söylenebilir.

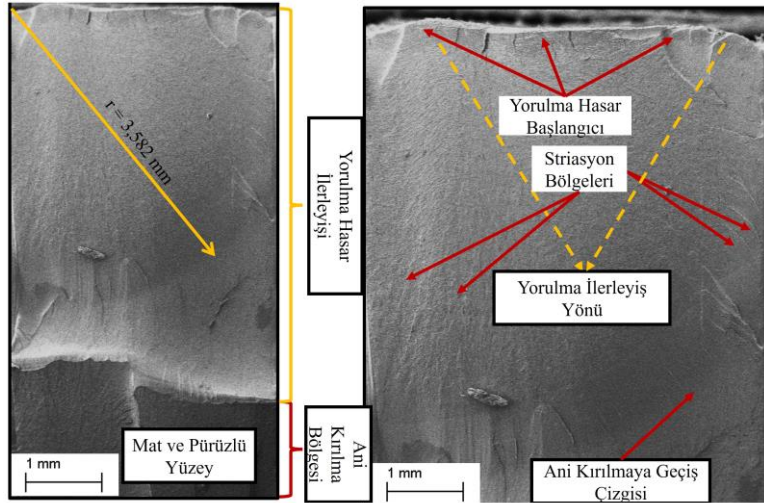
P40A60 kodlu harman numunede de yorulma hasar başlangıcının birden fazla noktada oluştuğu ve yarı çapı 4,1 mm olan bir bölge ile ani kırılma bölgesinden ayrıldığı Şekil 3.37d'de verilen görüntüden görülmektedir. Ayrıca yorulma hasarı başlangıcının olduğu bölgede lifler (fibrils) şeklinde kayma çizgilerinin (slip lines) oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu bölge yorulma yüklemesi sırasında numunede mikroyapısal çatlak veya hasar başlangıcının meydana geldiğini ifade etmektedir (Gómez vd., 2019). Ayrıca yorulma hasar ilerleyişi gözlemlenen bölgede yorulma hasarının oldukça küçük boyutlu striasyon bölgeleri üzerinden ilerlediği ve numune kesit yüzeyinin büyük bir bölümünü bu bölgenin oluşturduğu söylenebilir. Aynı zamanda striasyon alanlarının parabolik formda ilerlediği yorulma hasar ilerleyişinin düşük çatlak ilerleme hızını ifade ettiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (Marissen vd., 2001). Farklı bileşim oranlarındaki numunelerin kırık yüzeylerine ait görüntülerden, P100 kodlu numuneye kıyasla harmanlarda ABS'nin bileşim oranı arttıkça yorulma hasar mekanizmasının sünek bir şekilde ilerlediğini gösteren kademeli ilerleyen striasyon alanlarının ve yorulma çizgilerini ifade eden izlerin görüldüğü söylenebilir.



a)



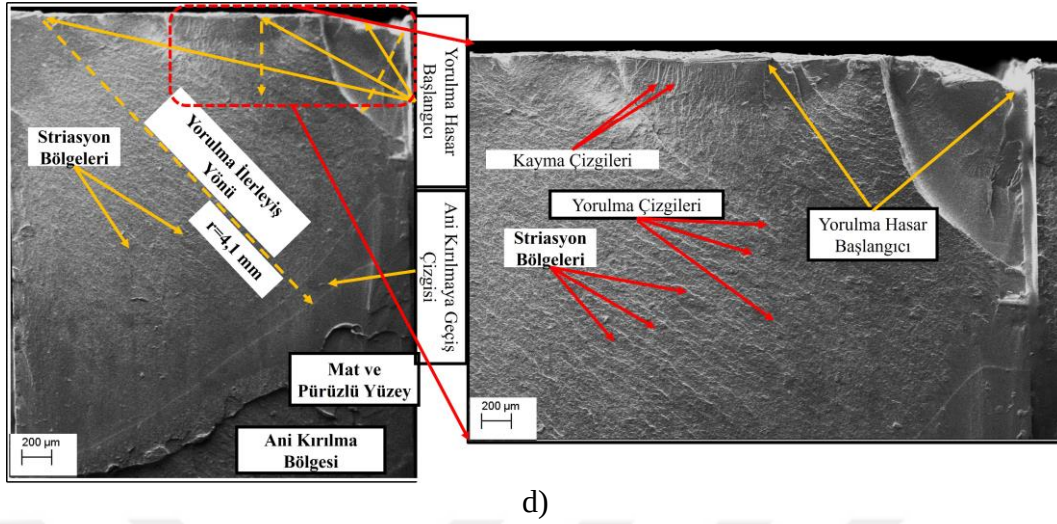
b)



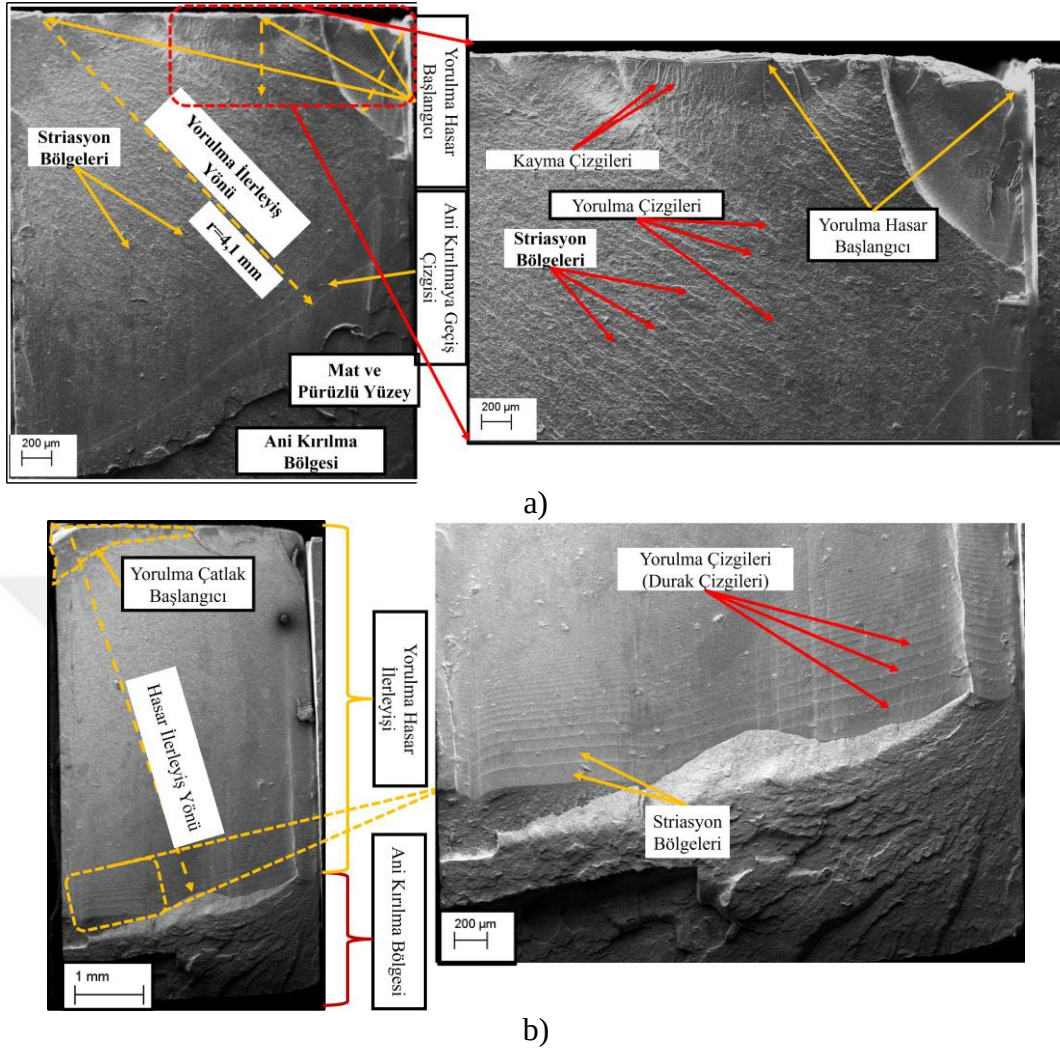
c)

Şekil 3.37. $R=0,1$ gerilme oranında benzer gerilme genliği altında gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda hasara uğrayan numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) P100, b) A100, c) P20A80 ve d) P40A60

Şekil 3.37'nin devamı



Tablo 3.14 ve Şekil 3.36'dan görüldüğü gibi artan gerilme genliği ile çevrim sayısı azalmaktadır. Yorulma testleri sırasında uygulanan gerilme genliği değerlerinin yorulma çevrim sayısı üzerindeki etkileri numune kırık yüzeylerindeki SEM görüntüleri üzerinden irdelenmiştir. Bu amaçla P40A60 kodlu numunenin sırasıyla 8,9 MPa ve 5,9 MPa gerilme genliklerinde ortalama 21804 ve 144195 çevrim sonunda hasara uğrayan numunelerin kırık yüzey görüntüleri elde edilmiş ve Şekil 3.38'de sırasıyla verilmiştir. Şekil 3.38b'de verilen düşük gerilme genliğindeki numunenin kırık yüzeyine ait görüntü incelendiğinde, yorulma hasar başlangıcından itibaren ani kırılma bölgesine kadar ilerleyen yorulma hasar ilerleyişi Şekil 3.38a'ya kıyasla bölgesinin numune kesitinin büyük bir bölümüne sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca yorulma çizgilerinin oldukça sık ve parabolik izler şeklinde ilerlediği ve bu ilerleyişi sırasında küçük striasyon alanları oluşturduğu görülmektedir. Bu alanlar yorulma çizgilerinin sık olduğu bölgelerde küçük iken yorulma çizgileri arasındaki mesafeler arttıkça daha büyük forma sahip olmaktadır. Yorulma çizgilerinin sık olduğu bölgede parabolik formdaki ilerleyişin aynı zamanda düşük yorulma hasarı ilerleme hızını ifade ettiği daha önce belirtilmiştir. Bu noktadan incelendiğinde, düşük gerilme genliğinde kesit yüzeyinin büyük bir bölümünü oluşturan yorulma hasar ilerleyişi bölgesinin düşük ilerleme hızına sahip hasar mekanizmasına sahip olması nedeniyle daha yüksek çevrim sayısı sonunda hasara uğramasının bekleneceği söylenebilir.

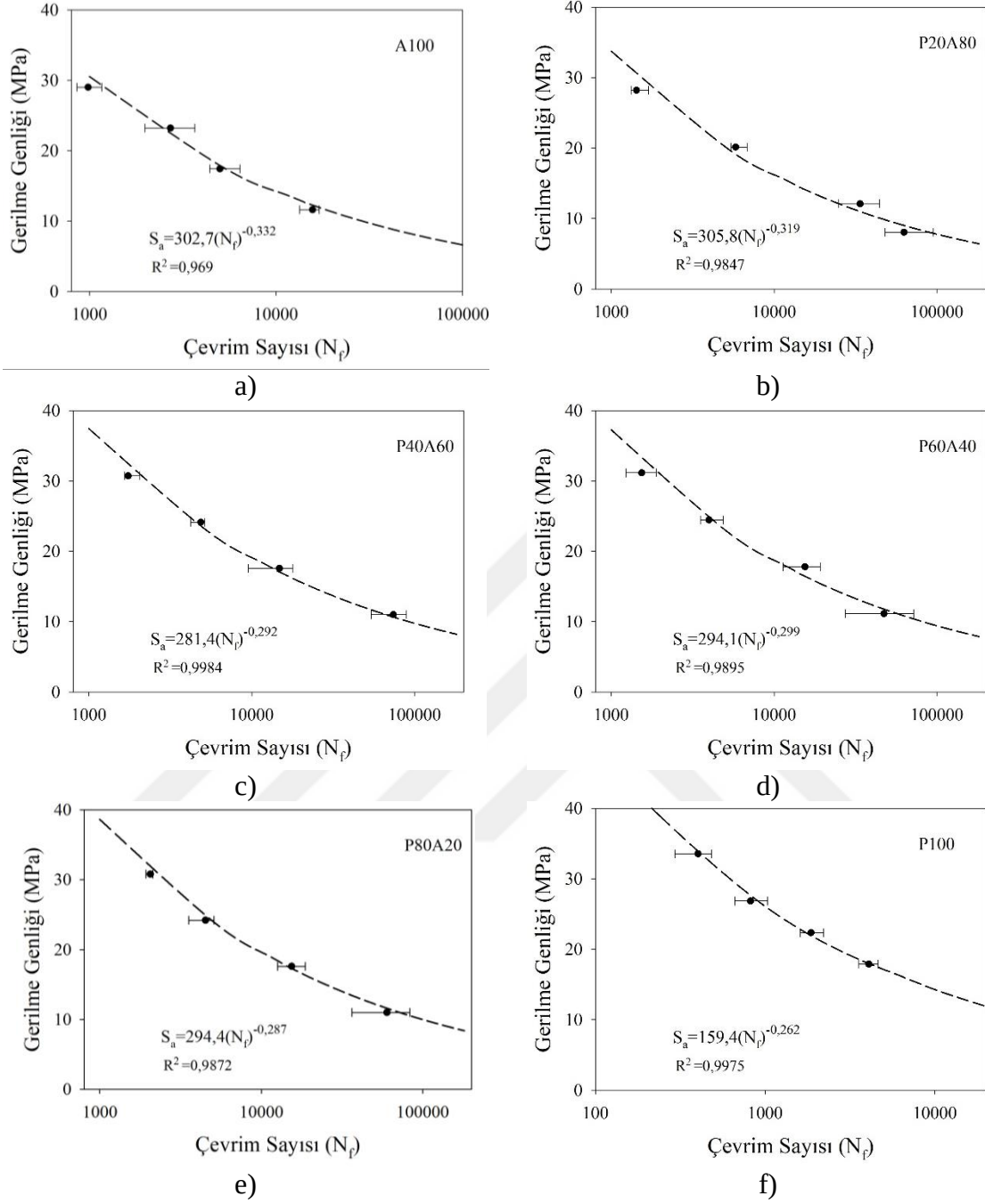


Şekil 3.38. P40A60 harman malzemedeki farklı gerilme genliklerinde gerçekleştirilen yorulma testleri sonrası numunelerin hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) 8,9 MPa ve b) 5,9 MPa

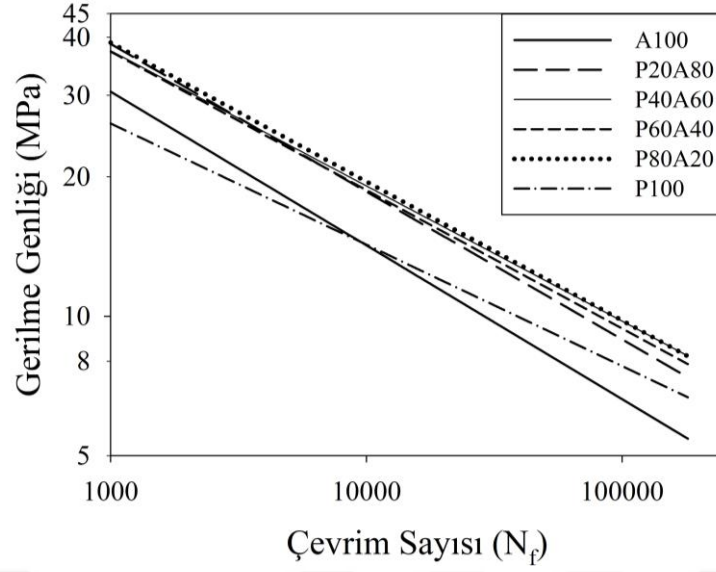
Çeki/çeki yükleme durumundaki davranışına ilave olarak PMMA/ABS harmanların tam tersinir yükleme (çeki-bası) durumu altındaki yorulma ömrü performansı da incelenmiş ve elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri saf ve harman numuneler için sırasıyla Şekil 3.39’da verilmiştir. Çeki/çeki yükleme tipine benzer şekilde tam tersinir yükleme tipinde de harman numunelerin yorulma ömrü karakteristiğinin saf PMMA ve saf ABS’den daha üstün olduğu şekilden görülmektedir. Ayrıca, tam tersinir yükleme durumunu ifade eden bu testler için her bir numuneye yorulma testleri sırasında uygulanan gerilme genlikleri ve bu gerilme genliği altında hasara uğradığı çevrim sayıları Tablo 3.15’te özetlenerek verilmiştir. Saf ABS ve saf PMMA’nın tam tersinin yükleme sonunda elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri incelendiğinde (Şekil 3.39a ve f), P100 kodlu numunenin A100

kodlu numuneye kıyasla daha düşük yorulma dayanımı katsayısına sahip olduğu Basquin eşitliklerinden görülmektedir. Bu durum Şekil 3.39 ve Tablo 3.15'ten de görüldüğü gibi nispeten düşük çevrim sayılarında A100 kodlu numunenin daha yüksek gerilme genliği değerlerine sahip olabildiğini buna karşın P100 kodlu numunenin ise aynı çevrim sayısında daha düşük gerilme genliği altında hasara uğrayacağını ifade etmektedir. PMMA/ABS harman numuneler ise farklı bileşim oranlarında birbirlerine oldukça yakın yorulma dayanımı değerlerine sahip olduğu Şekil 3.39b-e'den görülmektedir. Ayrıca harman yapıdaki numunelerin Basquin eşitliğinden elde edilen yorulma dayanımı ve yorulma üssü değerlerinin A100 kodlu saf ABS'den daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Ancak bu durum yorulma ömrü karakteristiği açısından değerlendirildiğinde Şekil 3.40'tan da görüldüğü gibi harman yapıdaki numunelerin daha yüksek çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı ve saf ABS'ye kıyasla daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediği görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harmanların harman içerisindeki bileşim oranına bağlı olarak yorulma ömrü karakteristiğinin büyük oranda değişmediği ancak P40A60 kodlu harman numunenin en üstün performansı sergilediği belirlenmiştir. Basquin eşitliklerinde Saf ABS numunenin yorulma dayanımı 302,7 MPa iken P40A60 kodlu numunenin yorulma dayanımı 281,4 MPa değerine benzer şekilde yorulma üssü -0,332'den -0,299 değerine düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Ancak her iki numune için 20 MPa ve 10 MPa gerilme genliğinde elde edilen çevrim sayıları dikkate alındığında A100 kodlu numunenin sırasıyla 3582 ve 28899 çevrim sonunda hasara uğradığı belirlenmiştir. Buna karşın P40A60 kodlu numunede 20 MPa ve 10 MPa gerilme genliğinde elde edilen çevrim sayıları ise sırasıyla 8565 ve 91971 olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde tam tersinir yükleme durumunda saf ABS'ye kıyasla P40A60 kodlu harman numunenin her bir gerilme genliğinde sırasıyla %139 ve %218 daha üstün yorulma ömrü çevrim sayısı karakteristiği sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 3.39. Saf PMMA, saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki PMMA/ABS harman numuneler için $R=-1$ gerilme oranı için yorulma ömrü performansını temsil eden gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100



Şekil 3.40. Basquin eşitliği kullanılarak $R=-1$ gerilme oranında farklı gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının bileşim oranına bağlı değişimleri

Tablo 3.15. PMMA/ABS harman numunelerin $R=-1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları

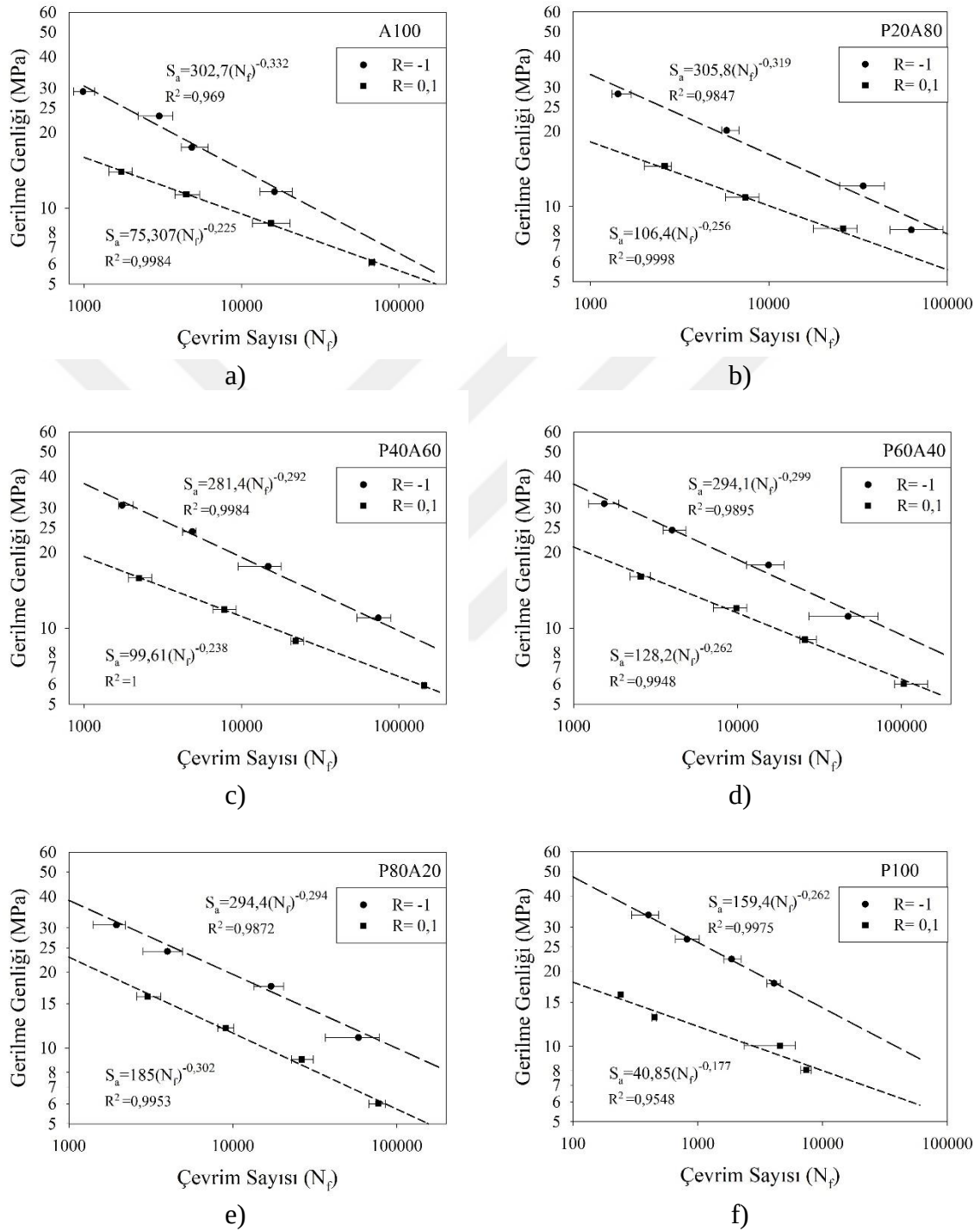
Numune Kodu	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı		
A100	29	987	872	1176
	29,2	2718	3717	3284
	17,4	4678	6533	5003
	11,6	15704	16804	13204
P20A80	28,2	1430	1372	1719
	20,2	5804	6920	5654
	12,1	29604	24404	34304
	8,1	53404	63004	62750
P40A60	30,7	1724	2080	1744
	24,2	4167	4874	4984
	17,6	13611	16964	17105
	10,9	48570	69904	43020

Tablo 3.15'in devamı

	31,2	1340	1230	1740
P60A40	24,5	5126	4228	3750
	17,8	13436	17564	19413
	11,1	32450	29404	45270
	30,8	1907	2002	2117
P80A20	24,2	4509	4988	3470
	17,6	18810	15420	20582
	11	36300	43250	46700
	33,5	288	402	475
P100	26,8	660	880	760
	22,4	1880	1850	2330
	17,9	4224	3480	3957

Gerilme oranının veya bir başka değişle yükleme tipinin (çeki/çeki ve çeki/bası) saf ve PMMA/ABS harman numunelerin yorulma ömrü karakteristiğini veren gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri üzerindeki etkisinin ortaya koyulması amacıyla her iki gerilme oranında elde edilen eğriler karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Pozitif gerilme oranı altında gerçekleştirilen yorulma testlerinde ($R=0,1$), numune üzerine etki eden maksimum gerilmenin uygulanan gerilme genliğinin yaklaşık %122 ($S_m = 1,22S_a$) daha fazla olduğu literatürdeki çalışmalardan da bilinmektedir (Mortazavian & Fatemi, 2016). Tam tersinir yükleme durumunda ise her iki gerilme değeri birbirine eşit olmaktadır. Saf ABS, saf PMMA ve PMMA/ABS harmanlarda gerilme oranının yorulma ömrü performansı üzerindeki etkilerini gösteren eğriler Şekil 3.41'de sırasıyla verilmiştir. Şekil 3.41'de verilen eğrilerden tüm numunelerde aynı gerilme genliği için çeki/çeki yüklemesi altındaki yorulma ömrünün tam tersinir yükleme durumundaki yorulma ömründen oldukça düşük bir düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu durum her iki gerilme oranı için elde edilen Basquin eşitliğine ait katsayılar yardımıyla değerlendirilebilir. Örneğin, $R=0,1$ gerilme oranında ve 10 MPa gerilme genliğinde P40A60 kodlu numune 15650 çevrim sonunda hasara uğrarken, $R=-1$ gerilme oranında ise 91971 çevrim sonunda hasara uğramakta ve böylece $R=0,1$ gerilme oranında yorulma ömrünün yaklaşık 5,9 kat azaldığı söylenebilir. Benzer şekilde P60A40 numunede aynı gerilme genliğinde yorulma ömrünün $R=-1$ gerilme oranında 81537

çevrimden $R=0,1$ gerilme oranında 16937 çevrime düştüğü ve bunun sonucunda yaklaşık 4,8 kat azaldığı söylenebilir.



Şekil 3.41. PMMA/ABS harman numunelerin yorulma ömrü karakteristik eğrilerine yorulma testi sırasında uygulanan gerilme oranı veya yükleme tipinin etkisi; a) A100, b) P20A80, c) P40A60, d) P60A40, e) P80A20 ve f) P100

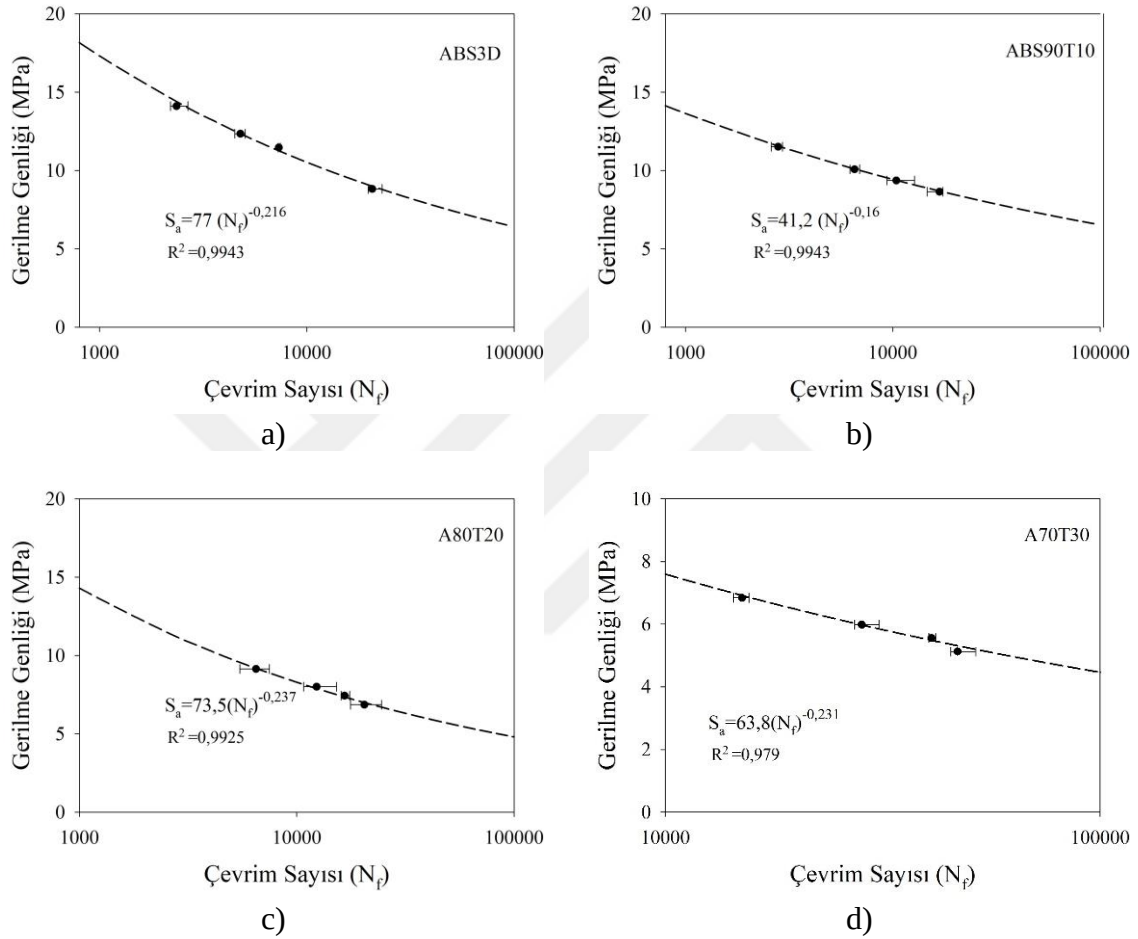
3.6.2. ABS/TPU Harman

Bu başlık altında, ABS/TPU harmanların yorulma testleri sonucunda elde edilen veriler harman yapıları oluşturan bileşim oranları etkisini içerek şekilde irdelenmiştir. Eriyik yığma yöntemi ile saf ABS ve farklı bileşim oranlarında üretilen ABS/TPU harmanların çekme testleri sonrasında elde edilen mekanik özellikleri kullanılarak yük kontrollü yorulma test koşulları belirlenmiş ve bu koşullarda gerçekleştirilen yorulma testlerine ait sonuçlar sunulmuştur.

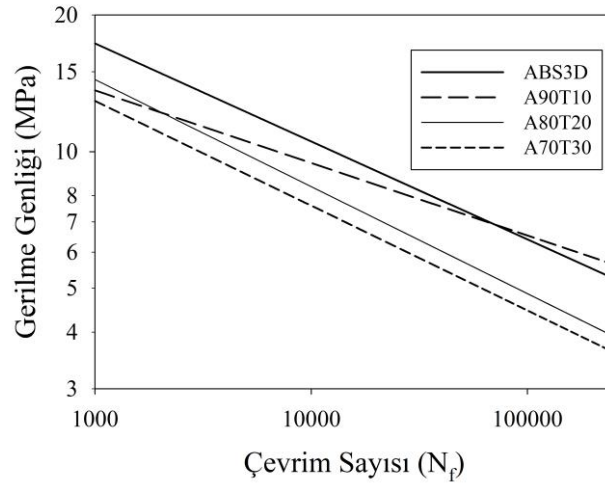
Şekil 3.42’de saf ABS ve farklı bileşim oranlarındaki ABS/TPU harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranında 5 Hz yükleme frekansında gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda elde edilmiş gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri sırasıyla verilmiştir. Bu eğriler her bir gerilme genliğinde gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda elde edilen hasar çevrim sayılarının standart sapmasını içeren hata çizgilerini ihtiva edecek şekilde sunulmuştur. Ayrıca şekiller üzerinde yorulma davranışını temsil eden Basquin eşitliğinden elde edilen ait yorulma dayanımı ve yorulma üssü değerleri de verilmiştir. Basquin eşitliğine ait katsayıların harman bileşim oranına bağlı olarak değişimleri ve eğri karakteristikleri üzerindeki etkileri yorulma davranışının irdelenmesinde önemli bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Ek olarak eriyik yığma yöntemi ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin yorulma testlerinden elde edilen hasar çevrim sayıları Tablo 3.16’da özetlenmiştir. Şekil 3.42’de verilen eğrilerden ve Tablo 3.16’dan, saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerde yorulma testlerinin gerçekleştirildiği her bir gerilme genliğinde kendi içerisinde tekrarlı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm numune gruplarında her bir gerilme genliğinde elde edilen çevrim sayılarının birbirine oldukça yakın değerlere sahip olduğu da belirlenmiştir. Aynı zamanda Tablo 3.16’da verilen yorulma testleri sırasında uygulanan gerilme genliğinin her bir numune grubunun akma dayanımının belirli bir orandaki yüzdesi üzerinden belirlendiği bilinmektedir. Bu durum ABS/TPU harmanlarda artan TPU oranı ile akma dayanımının azalması nedeniyle harman numunelerde uygulanan gerilme genliği değerlerinin benzer şekilde azalması üzerinden kolayca görülmektedir. Ancak gerilme genliğindeki bu azalış eğilimi neticesinde daha yüksek çevrim sayılarında numune gruplarının hasara uğradığı da görülmektedir. Bu nedenle yorulma ömrü karakteristiği Basquin eşitliği ve gerilme genliği-çevrim sayıları eğrileri üzerinden irdelenmiştir. Gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin karakteristik davranışını ortaya koyan Basquin eşitliği kullanılarak elde edilen ve şekillerde kesikli çizgiler ile gösterilen

eğrilerin deneysel verilere yüksek yakınsama ile uyumlandığı Şekil 3.42'den kolayca anlaşılmaktadır. Örneğin, saf ABS için korelasyon katsayısı 0,9943, A80T20 ve A70T30 kodlu harman numuneler için ise sırasıyla 0,9925 ve 0,9793 değerlerinde elde edilmiştir. Böylece yorulma ömrü tahmini ve harman bileşim oranına bağlı olarak yorulma ömrü karakterinin karşılaştırılmasına Basquin eşitliğindeki ampirik katsayılar kullanılarak elde edilen eğriler kullanılabilmiştir. Saf ABS ve ABS/TPU harmanlar numuneler için elde edilen yorulma dayanımı ve yorulma üssü değerleri değerlendirildiğinde, yorulma dayanımının saf ABS'de en yüksek değere sahip olduğu buna karşın artan TPU oranı ile ilk başta ciddi oranda düştüğü daha sonra artan TPU oranı ile tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Yorulma dayanımı değerindeki bu değişim karakteristik eğrinin gerilme genliği değeri üzerindeki etkin olduğu bilinmektedir. Yorulma üssü değerlerindeki değişim irdelendiğinde ise, saf ABS'nin -0,216 değerine sahip olduğu ve yapıda artan TPU oranı yorulma dayanımına benzer şekilde ilk başta ciddi oranda artarak A90T10 numunede -0,16 değerine ulaştığı belirlenmiştir. Ancak yapıda artan TPU oranı ile A80T20 ve A70T30 numunelerde yorulma üssü değerleri saf ABS'den daha düşük değerlere ulaşarak sırasıyla -0,237 ve -0,231 olarak elde edilmiştir. Basquin eşitliğinde ampirik olarak elde edilen yorulma üssü değerleri gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin eğimini büyük oranda etkilemekte ve çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliğinin değişimini ciddi oranda değiştirmektedir. Bu değişim Şekil 3.43'te verilen ABS3D ve A90T10 kodlu harman numuneler üzerinden değerlendirildiğinde, şekilden görüldüğü gibi çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliği değerlerinin değişiminin %10 TPU katkılı numunede daha düşük bir eğimde gerçekleşmektedir. Bu durum düşük gerilme genliği değerlerinde %10 TPU katkılı harman numunenin daha üstün yorulma ömrü performansı sergilemesinin temel sebebini oluşturmaktadır. Örneğin, 10 MPa gerilme genliğinde ABS3D ve A90T10 kodlu numuneler sırasıyla 12709 ve 10812 çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı ve saf ABS'nin daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediği görülmektedir. Ancak, 6 MPa gerilme genliğinde ise aynı numuneler sırasıyla 135270 ve 263296 çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı ve A90T10 kodlu numunenin ABS3D kodlu numuneye kıyasla yaklaşık %95 daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediği bulunmuştur. A90T10 kodlu numunenin yorulma davranışındaki bu iyileşme yapısına katılan TPU ile saf ABS'ye kıyasla mekanik özelliklerinin büyük oranda azalmadan sünekliğinde görülen artıştan kaynaklandığı ön görülmektedir. Ancak artan TPU oranı ile akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerdeki düşüşlerin artması artan kopma uzaması değerine rağmen yorulma dayanımının da azalmasına neden olduğu

düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 3.43'te verilen ABS3D, A80T20 ve A70T30 kodlu numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliği değerlerindeki değişimlerin ise benzer bir eğilimde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durumun söz konusu numunelerin benzer yorulma üssü değerlerine sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 3.42. Eriyik yığma yöntemi ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman numuneler için $R=0,1$ gerilme oranlı yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) ABS3D, b) A90T10, c) A80T20 ve d) A70T30

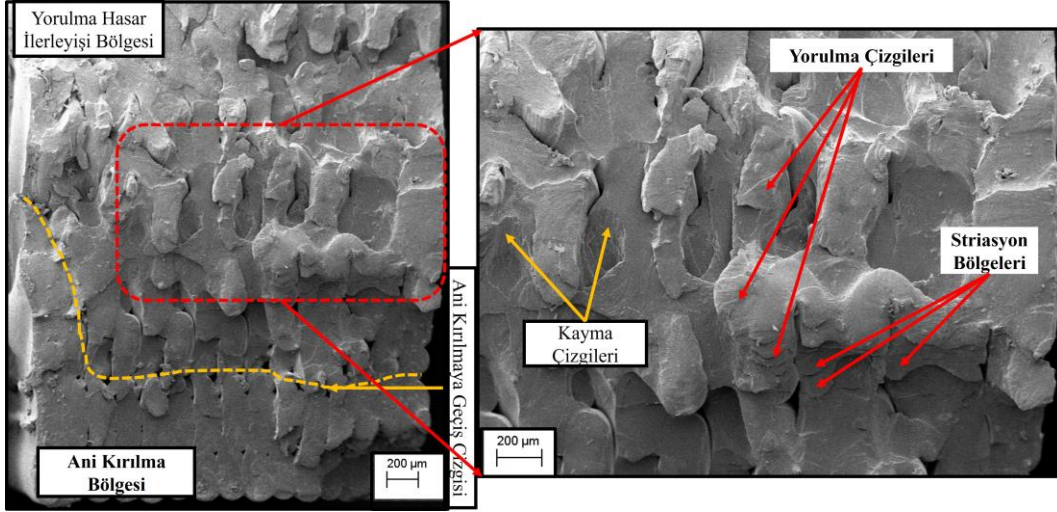


Şekil 3.43. Saf ABS ve ABS/TPU harman numuneler için yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinin karşılaştırması

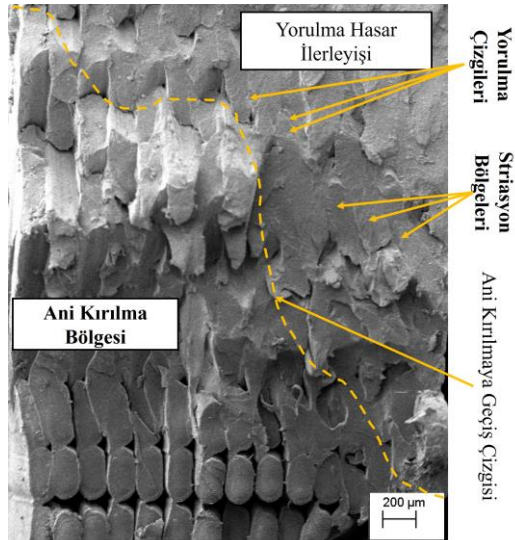
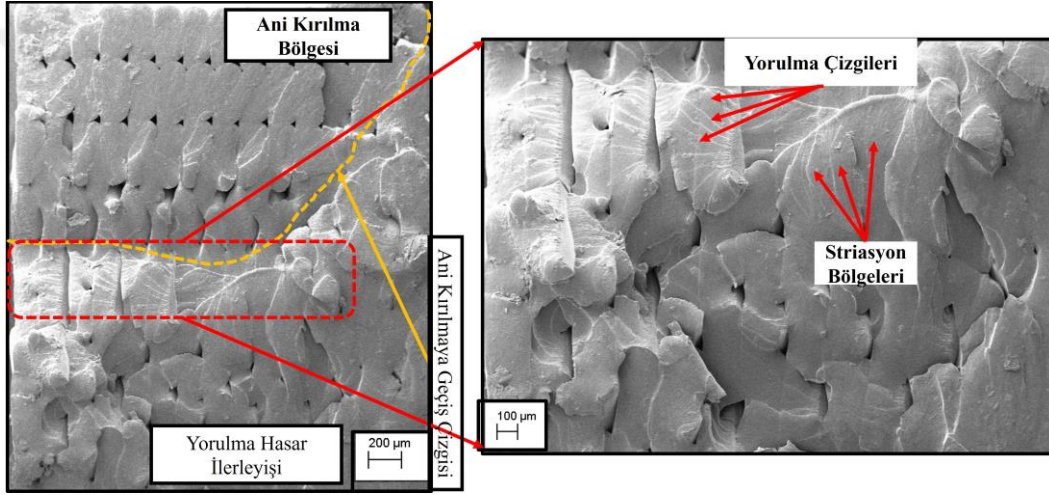
Tablo 3.16. ABS/TPU harman numunelerin R=0,1 gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları

Numune Kodu	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı		
		Test 1	Test 2	Test 3
ABS3D	14,1	2354	2704	2254
	12,3	4784	4484	5042
	11,5	7454	7304	7330
	8,8	23304	20704	20274
A90T10	11,5	2914	2800	2574
	10,1	6220	6926	6540
	9,4	9816	10410	12994
	8,6	14454	16950	16820
A80T20	9,1	5854	7140	7517
	8	15504	11154	12354
	7,4	16104	17604	16604
	6,9	18154	18604	22354
A70T30	6,8	15554	15004	14304
	5,9	27754	31254	28288
	5,6	40504	40951	42004
	5,1	52224	46504	47004

Eriyik yığıma yöntemi ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin yorulma ömrü performanslarının irdelenmesinde kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri de kullanılmıştır. ABS3D, A90T10 ve A80T20 kodlu numunelerin sırasıyla 8,8 MPa, 8,6 MPa ve 8 MPa gerilme genliği değerlerinde yorulma testleri sonrası hasar yüzeylerinin görüntüleri alınmış ve Şekil 3.44'te verilmiştir. Şekil 3.44'te verilen SEM görüntülerinden yorulma hasarı ilerleyişi ile hasar mekanizmasının geliştiği bölgenin kırık yüzeyde en büyük alana sahip olduğu numunenin ABS3D kodlu numune olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 3.44a'dan yorulma hasar ilerleyişi bölgesinde numune kesitini oluşturan katmanlardaki filamentlerde yorulma çizgileri ve striasyon bölgelerinin belirgin bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yorulma yüklemesi ile katmanlar arası bölgede kayma çizgilerinin de gözlemlenmiştir. Kırık yüzeyde yorulma hasar ilerleyişi bölgesinin daha büyük bir alana sahip olması, yorulma çizgilerinin oluştuğu bir hasar ilerleyişi gözlemlenmesi sonucunda Tablo 3.16'dan da görüldüğü gibi ABS3D kodlu numune benzer gerilme genliğinde üstün bir yorulma ömrü performansı sergilediği söylenebilir. 8,6 MPa gerilme genliğindeki yorulma testi sonrası 16820 çevrim sonunda hasara uğrayan A90T10 kodlu numunenin SEM görüntüsü ise Şekil 3.44b'de verilmiştir. Şekilden, ABS3D kodlu numuneye kıyasla yorulma hasar ilerleyişi mekanizmasının daha küçük bir alanda gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca, ani kırılma bölgesinin belirgin bir şekilde kırık yüzeyde gözlemlendiği ve bu bölge öncesinde ABS3D kodlu numuneye benzer şekilde yorulma çizgileri ve striasyon bölgelerinin belirgin olduğu bir hasar ilerleyişi mekanizması görülmüştür. A90T10 kodlu numunede de yorulma yüklemesiyle numuneyi oluşturan katmanların ve filament kesitinin yorulma çizgilerinin baskın olduğu bir hasar ilerleyişi meydana geldiği görülmektedir. 8 MPa gerilme genliğinde 12354 çevrim sonunda hasara uğrayan A80T20 kodlu numunenin SEM görüntüsü ise Şekil 3.44c'de verilmiştir. Şekilden kırık yüzeyde ani kırılma bölgesinin diğer SEM görüntülerine kıyasla daha büyük bir alan kapladığı kolayca görülmektedir. Yorulma hasar ilerleyişi mekanizması ABS3D ve A90T10 kodlu numunelere benzer bir şekilde ilerlemiş ancak hasar daha büyük bir ani kırılma bölgesi sonunda gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri ve Tablo 3.16'da verilen çevrim sayıları üzerinden yorulma hasar ilerleyişi bölgesinin daha büyük olduğu ABS3D kodlu numunenin verilen gerilme genliği için en üstün yorulma ömrüne sahip olduğu söylenebilir.



a)



c)

Şekil 3.44. $R=0,1$ gerilme oranında benzer gerilme genliği altında gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda hasara uğrayan numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri; a) ABS3D, b) A90T10 ve c) A80T20

3.7. Parametrik Çalışmalar

Bu bölümde tez çalışması kapsamında irdelenen PMMA/ABS harman numunelerin mekanik özellikleri ve yorulma ömrü karakteristiğine tutma basıncı ve numune kalınlığı ile yorulma test frekansının etkileri araştırılmıştır. PMMA/ABS harman numunelerin üretildiği enjeksiyon kalıplama yönteminde önemli bir üretim parametresi olan tutma basıncının harman numunedeki mekanik özelliklere ve yorulma ömrü performansına etkileri P40A60 kodlu numune üzerinden incelenmiştir. Bu amaçla P40A60 kodlu numune 3 mm kalınlığa sahip kalıpta 0, 40 ve 70 bar tutma basınçlarında üretilmiştir. Daha sonrasında her bir tutma basıncında üretilen düz plakalardan çekme ve yorulma test numuneleri elde edilmiş ve teste tabii tutulmuştur. Numune kalınlığının mekanik özelliklere ve yorulma ömrü performansına olan etkileri ise sabit 40 bar tutma basıncında sırasıyla 2, 3 ve 4 mm kalınlıklarda düz plakalar şeklinde üretilen numuneler yardımıyla incelenmiştir. Numune kalınlığı etkisinin incelenmesi amacıyla, P20A80 ve P40A60 kodlu harmanlarda sırasıyla 2-3-4 mm ve 3-4 mm kalınlıklarında düz plakalar enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Bu plakalar üzerinden çekme ve yorulma test numuneleri elde edilerek testlere tabii tutulmuştur. Bu bölümde son olarak yorulma test frekansının yorulma ömrü karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla P40A60 kodlu numune grubunda sabit 40 bar enjeksiyon basıncında 3 mm'lik kalınlıkta üretilen düz plakalardan hem tam tersinir hem de çeki/çeki gerilme oranı durumlarında kullanılacak yorulma test numuneleri elde edilerek farklı frekanslarda testlere tabii tutulmuştur. Parametrik çalışmalar kapsamında incelenen tutma basıncı, numune kalınlığı ve yorulma test frekansı parametrelerinin harman numunelerin mekanik ve yorulma davranışına olan etkilerine ait sonuçlar aşağıda ayrı ayrı bölümler halinde verilmiş ve irdelenmiştir.

3.7.1. Tutma Basıncının Mekanik Özellikler ve Yorulma Davranışına Etkisi

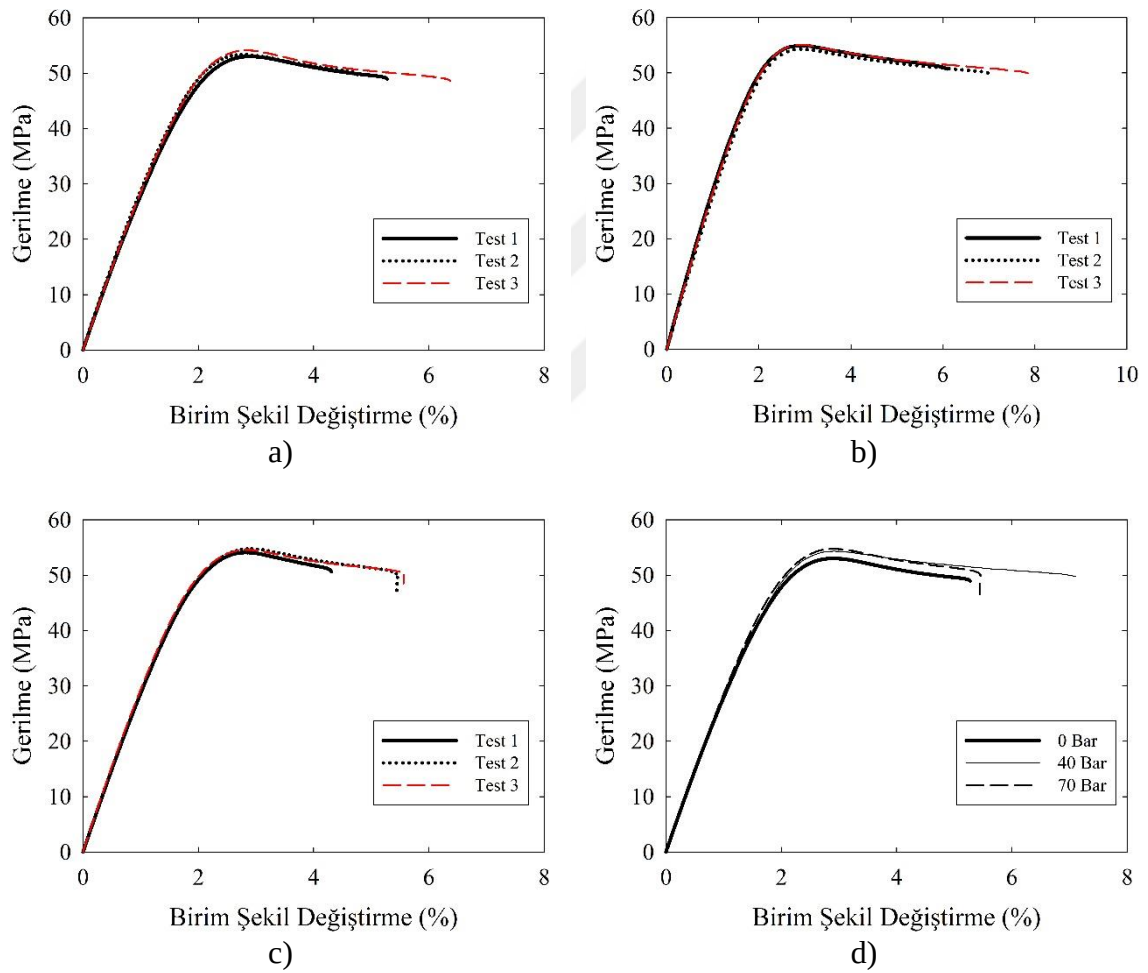
Enjeksiyon kalıplamada üretimin önemli üretim parametrelerinden biri olan tutma basıncının P40A60 kodlu %40 PMMA ve %60 ABS içeren harman numunenin mekanik ve yorulma davranışına etkileri bu kısımda irdelenecektir. Çekme testleri $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında ve test tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla en az 3 tekrarlı şekilde tamamlanmıştır. Çekme testleri sonrasında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri 0, 40 ve 70 bar tutma basınçları için sırasıyla Şekil 3.45'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.45'te verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen elastisite

modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikler Tablo 3.17’de özetlenmiştir. Şekil 3.45a-c’de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerin çekme test sonuçlarının kendi içerisinde tekrarlanabilir olduğu her bir şekilde verilen üç farklı test sonucuna ait eğrilerden görülmektedir. Tutma basıncının P40A60 kodlu numunenin gerilme-birim şekil değiştirme eğri karakterine ve mekanik özelliklerine etkilerinin irdelenmesi amacıyla farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.45d’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 3.45d’den 0 bar tutma basıncında kıyasla artan tutma basıncıyla numunenin elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı değerlerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu iyileşmenin yüksek tutma basıncında enjeksiyon kalıplama sırasında kalıpta daha düzgün bir dağılım olması ve daha yüksek moleküller arası bağlanmanın bir sonucu olduğu Singh vd. (2015) tarafından da belirlenmiştir. Benzer bir sonuç talk tozu katkılı PP malzemelerde farklı tutma basınçlarındaki numunelerin çekme testleri üzerinden Zhou ve Mallick (2005) tarafından da ortaya koyulmuştur. Ayrıca, Özçelik (2011) ve Jadhav vd. (2023) artan tutma basıncı ile mekanik özelliklerin iyileştiğini PP ve PA6/GF30 malzemeler ile belirlemişlerdir.

Şekil 3.45d ve Tablo 3.17 birlikte değerlendirildiğinde, P40A60 kodlu harman numunede 40 bar tutma basıncında en üstün akma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca 70 bar tutma basıncında üretilen numunenin 40 bar tutma basıncında üretilen numuneye oldukça benzer akma ve çekme dayanımı değerlerine sahipken kopma uzaması değeri ise yaklaşık %40 oranında daha düşük kalmaktadır. Bu durumda P40A60 kodlu numunede 0 bardan 40 bara artan tutma basıncı ile kopma uzaması ve sünekliğin ciddi oranda iyileştiği ancak 70 bar tutma basıncında ise tekrar 0 bar tutma basıncında üretilen numuneye kıyasla daha düşük kopma uzaması değerine sahip olduğu bulunmuştur. Kopma uzaması değerinde görülen benzer davranışlar literatürde tutma basıncının mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin irdelendiği çalışmalarda görülmektedir. Örneğin, Zhou ve Mallick (2005), talk tozu katkılı PP malzemede 27,6 MPa, 55,2 MPa ve 82,7 MPa tutma basıncı değerlerinde üretilen numunelerde gerçekleştirdikleri çalışmada en yüksek kopma uzamasını 55,2 MPa tutma basıncı için elde ederken 82,7 MPa tutma basıncında ise daha düşük bir kopma uzaması değeri elde etmişlerdir. Benzer şekilde Jadhav vd. (2023), artan tutma basıncı ile ilk etapta kopma uzamasının nispeten artış gösterdiğini ancak daha sonra ciddi oranda düştüğünü belirlemiştir. Tutma basıncına bağlı olarak kopma uzaması değerindeki bu değişim, matris içerisinde moleküllerin birbirine yaklaşması

sonucunda çeki yüklemesi altında numune kesitinde artan kayma gerilmesinin olduğu söylenebilir (Jadhav vd. 2023). Bu durum daha yüksek gerilme değerlerine daha düşük birim şekil değiştirme altında ulaşılmasına yol açmakta ve akma ile çekme dayanımlarının iyileşmesine rağmen kopma uzamasının daha düşük değerlere sahip olması ile sonuçlanmaktadır.

Buradan benzer akma dayanımı değeri sergileyen 40 bar ve 70 bar tutma basınçlarında üretilen numunelerin süneklik değerinde ortaya çıkan fark yorulma performansının değerlendirilmesinde önemli bir kriter olacağı söylenebilir.

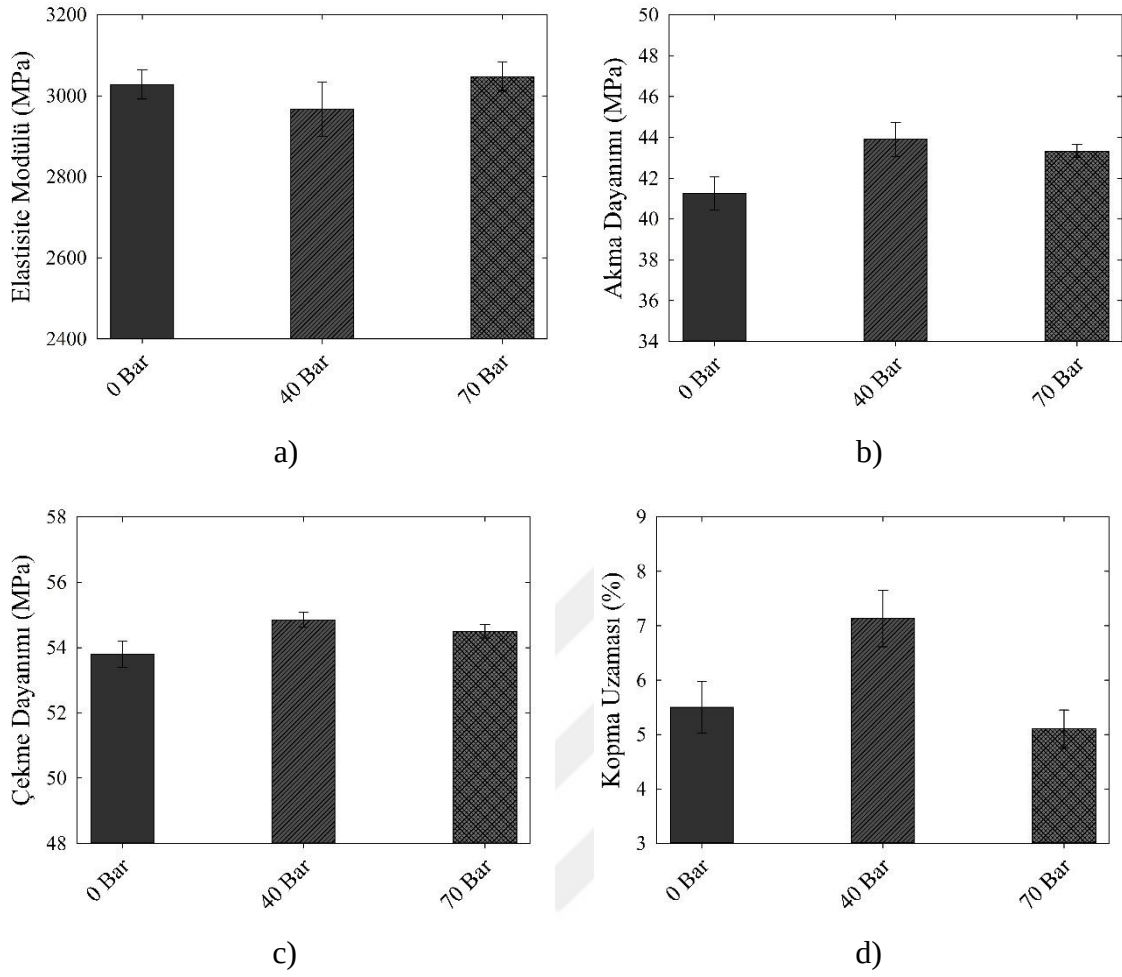


Şekil 3.45. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 0 bar, b) 40 bar, c) 70 bar ve d) farklı tutma basınçlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Tablo 3.17. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunenin çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler				
Tutma Basıncı (bar)	Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
0	3028 ± 50,9	41,3 ± 1,16	53,8 ± 0,56	5,5 ± 0,67
40	2967 ± 115,9	43,9 ± 1,45	54,7 ± 0,42	7,1 ± 0,93
70	3047 ± 50,4	43,3 ± 0,47	54,5 ± 0,29	5,1 ± 0,47

P40A60 kodlu numunenin mekanik özelliklerine tutma basıncının etkileri Tablo 3.17’de özetlenen verilere ve Şekil 3.45’e ek olarak Şekil 3.46’da çubuk grafik olarak da sunulmuştur. Şekil 3.46a’da elastisite modülünün tutma basıncına bağlı olarak değişimi verilmiş ve artan tutma basıncı ile ilk olarak bir miktar düşüş göstermesine rağmen P40A60 kodlu numunenin elastisite modülünün büyük oranda değişim sergilemediği gözlemlenmiştir. Akma dayanımının tutma basıncına bağlı olarak değişimi ise Şekil 3.46b’de çubuk grafik olarak verilmiştir. Akma dayanımı tutma basıncının 0 bardan 40 bara çıkarılmasıyla yaklaşık 41,3 MPa değerinden 43,9 MPa değerine %6 oranında artış göstermiştir. Ancak devamında tutma basıncının 70 bar seviyesine çıktığı numunede ise 40 barda elde edilen akma dayanımına kıyasla nispeten değişim göstermemiştir. Benzer bir davranış Şekil 3.46c’de verilen ve çekme dayanımının tutma basıncına bağlı değişiminde de görülmektedir. P40A60 kodlu harman numunede tutma basıncına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki en belirgin değişim Şekil 3.46d’de verilen kopma uzaması değerinde görülmektedir. 0 bar tutma basıncına kıyasla 40 bar tutma basıncında üretilen numunenin kopma uzaması değerinin %30 oranında iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. P40A60 kodlu numune grubunda kopma uzaması değerindeki bu iyileşmenin akma ve çekme dayanımı değerlerinin büyük oranda değişmeden gerçekleşmesi nedeniyle süneklik ve kırılma tokluğunun da iyileşmesi anlamına geldiği söylenebilir. Ayrıca artan tutma basıncı ile moleküler düzeyde yönlenme derecesinin artması sonucu kopma uzaması değerinin tekrar azalma eğilimi gösterdiği söylenebilir (Pantani vd.,2007)



Şekil 3.46. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen mekanik özelliklerinin tutma basıncına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması

Enjeksiyon kalıplama ile üretime sırasındaki tutma basınçlarının yorulma ömrü performansı üzerindeki etkileri eksenel yorulma testleri yardımıyla araştırılmıştır. 0, 40 ve 70 bar tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunelerden elde edilen ASTM D638 Tip 4 numuneler ile eksenel yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri gerilme oranının çeki/çeki yükleme tipini temsil eden $R=0,1$ değerinde sabit 5 Hz yükleme frekansında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu testler en az 4 farklı gerilme genliğinde ve her bir gerilme genliğinde test tekrarlanabilirliğinin sağlanması amacıyla en az 3 test yapılarak tamamlanmıştır. Yorulma testleri sırasında farklı tutma basınçlarında üretilen numune gruplarına ait test sırasında uygulanan gerilme genliği ve numunelerin hasara uğradığı çevrim sayıları kayıt altına alınmış ve Tablo 3.18’de özetlenmiştir. Ayrıca farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunelerin gerilme genliği-çevrim sayısı değerleri ve

bu değerlere uyumlanan Basquin ampirik bağıntısına ait katsayılar Şekil 3.47’de verilmiştir. Tablo 3.18’den ve Şekil 3.47’den her bir gerilme genliğinde elde edilen hasar çevrim sayılarının birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu ve test tekrarlanabilirliği ile uyumlanan Basquin eşitliğine ait eğrinin korelasyon katsayısının yüksek mertebeye sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 3.18’de verilen çevrim sayıları incelendiğinde yüksek gerilme genliği değerlerinde (≥ 15 MPa) tüm tutma basınçlarında elde edilen hasar çevrim sayılarının birbirine yakın değerler sergilediği ancak en üstün çevrim sayılarının 70 bar tutma basıncında elde edildiği söylenebilir. Ancak, yaklaşık 9 MPa gibi gerilme genliği değerindeki çevrim sayıları irdelendiğinde, 70 bar tutma basıncında üretilen P40A60 kodlu numunenin oldukça düşük çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı görülmektedir. 0 bar tutma basıncında üretilen numune ise 40 bar tutma basıncındaki numuneye kıyasla nispeten daha yüksek çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı söylenebilir. Tutma basıncının yorulma ömrü performansı ve gerilme genliği-çevrim sayısı karakteristiğine etkilerinin daha detaylı irdelenmesi amacıyla Şekil 3.47a-c’de verilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinden elde edilen Basquin eşitliği katsayıları değerlendirilmiştir. P40A60 kodlu harman numunenin 0, 40 ve 70 bar tutma basınçlarında yorulma dayanımı değerleri sırasıyla 75,96 MPa, 99,61 MPa ve 137,6 MPa, yorulma üssü değerleri ise sırasıyla -0,211, -0,238 ve -0,275 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Yorulma dayanımı değerinin artan tutma basıncı ile 0 bar tutma basıncına kıyasla %31 ve %83 oranında artış gösterdiği ancak yorulma üssü değerlerinin ise yaklaşık %13 ve %30 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Yorulma dayanımı değerinde gözlemlenen bu artış literatürde cam elyaf takviyeli PA6 ve talk tozu katkılı PP malzemelerin yorulma dayanımının tutma basıncına bağlı olarak irdendiği çalışmalarda da benzer şekilde belirlenmiştir (Zhou & Mallick, 2005; Zhou & Mallick, 2011). Ayrıca bu çalışmalarda artan yorulma dayanımı değeriyle birlikte Basquin eşitliğindeki yorulma üssü değerinin ise azalış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Yorulma üssü değerindeki azalma gerilme genliği-çevrim sayısı eğrilerinde çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliği değerlerinin değişiminin eğiminin artması anlamına gelirken yorulma dayanımındaki artış ise aynı çevrim sayısında hasarın gerçekleşeceği gerilme genliği değerindeki artışa işaret etmektedir. Bu kapsamda hem yorulma dayanımı hem de yorulma üssü değerleriyle değerlendirildiğinde, yorulma dayanımı yüksek olan numune grubunun düşük çevrim sayısında yüksek gerilme genliği değerlerine sahip olacağı ve yorulma üssü en düşük olan numune grubunda ise artan çevrim sayısı ile gerilme genliğinin daha hızlı düşeceği ön

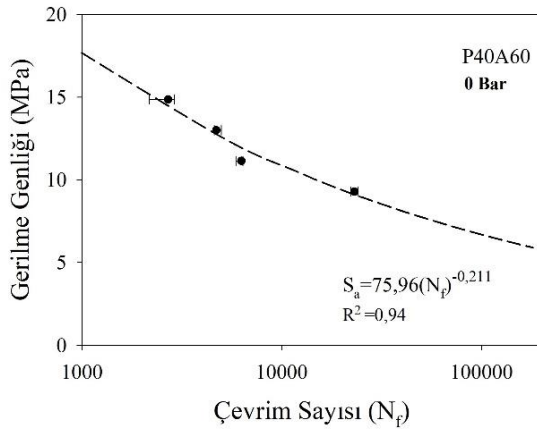
görüldüğünden yüksek çevrim sayılarında düşük gerilme genliği değerlerine sahip olacağı bilinmektedir. Böylece, 1500 çevrim sayısında en üstün gerilme genliğinde hasara uğraması muhtemel görülen numune 70 bar tutma basıncında üretilen numune grubu iken yaklaşık 100000 çevrim sayısında ise 0 bar tutma basıncında üretilen numune en yüksek gerilme genliği altında hasara uğrayabileceği ön görülmektedir. Bu durum Şekil 3.47d’de verilen karşılaştırma eğrisi üzerinden kolayca anlaşılmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi enjeksiyon kalıplama sırasında uygulanan tutma basıncın ile yorulma ömrü performansı karakteristiği değişmektedir. Yaklaşık 10000 çevrim sayısında numune gruplarının karakteristik eğrileri bir dönüşüme uğramakta ve bu çevrim sayısı öncesinde nispeten en kötü performansı gösteren 0 bar tutma basıncında üretilen numune sonrasında ise en üstün yorulma performansını sergilemektedir. Basquin eşitliğindeki katsayıları yardımıyla, örneğin, 18 MPa gerilme genliği değerinde 0 bar tutma basıncında üretilen numune yaklaşık 919 çevrim sayısı sonunda hasara uğrayacağı 40 bar tutma basıncında üretilen numune ise yaklaşık 1324 çevrim sonunda hasara uğrayacağı Basquin eşitliği yardımıyla belirlenmiştir. Aynı gerilme genliğinde 70 bar tutma basıncında üretilen numunenin ise 1633 çevrim sonunda hasara uğrayacağı ön görülmektedir. Buradan nispeten yüksek bir gerilme genliğinde 70 bar tutma basıncında üretilen numunenin üstün performans sergilediği görülmektedir. Benzer şekilde 6 MPa gerilme genliğine 0 bar ve 40 bar tutma basınçlarında üretilen numunelerin sırasıyla 167805 ve 133871 çevrim sayılarında hasara uğrayacağı bulunmuştur. Buna karşın 6 MPa gerilme genliğinde 70 bar tutma basıncında üretilen numunenin ise 87450 çevrim sonunda hasara uğrayacağı belirlenmiştir. Bu gerilme genliği değeri için 0 bar tutma basıncındaki numunenin 40 bar ve 70 bar tutma basıncındaki numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %25 ve %95 daha üstün performans sergilediği söylenebilir.

Tablo 3.18. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki aksenal yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları

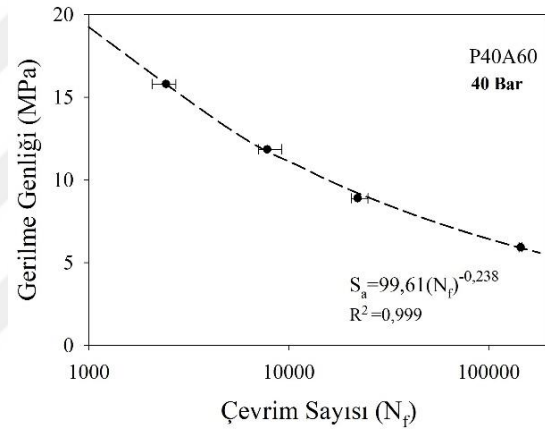
Tutma Basıncı (bar)	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı		
		Test 1	Test 2	Test 3
0	14,9	2654	2754	2724
	13	4704	4654	5015
	11,2	5854	6304	6284
	9,3	23104	24004	22154

Tablo 3.18'in devamı

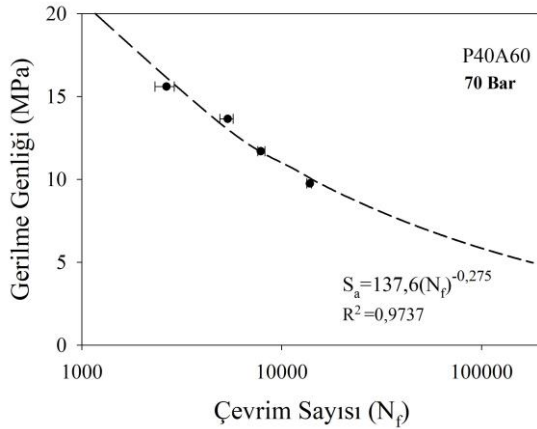
40	15,8	2373	1976	1970
	11,9	9675	7507	7289
	8,9	21154	21354	22904
	5,9	146227	144654	141704
70	15,6	2880	2650	2303
	13,7	5404	5330	5718
	11,7	8250	7630	7854
	9,8	14736	14100	13854



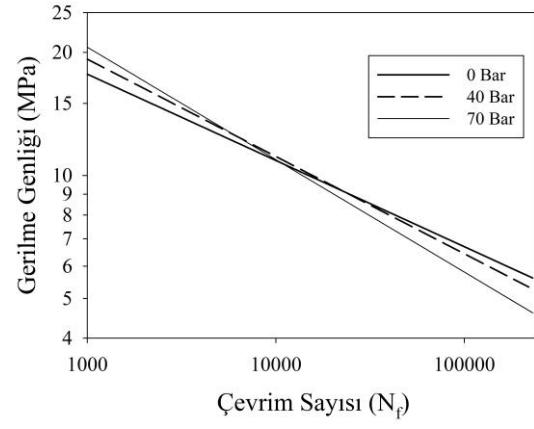
a)



b)



c)

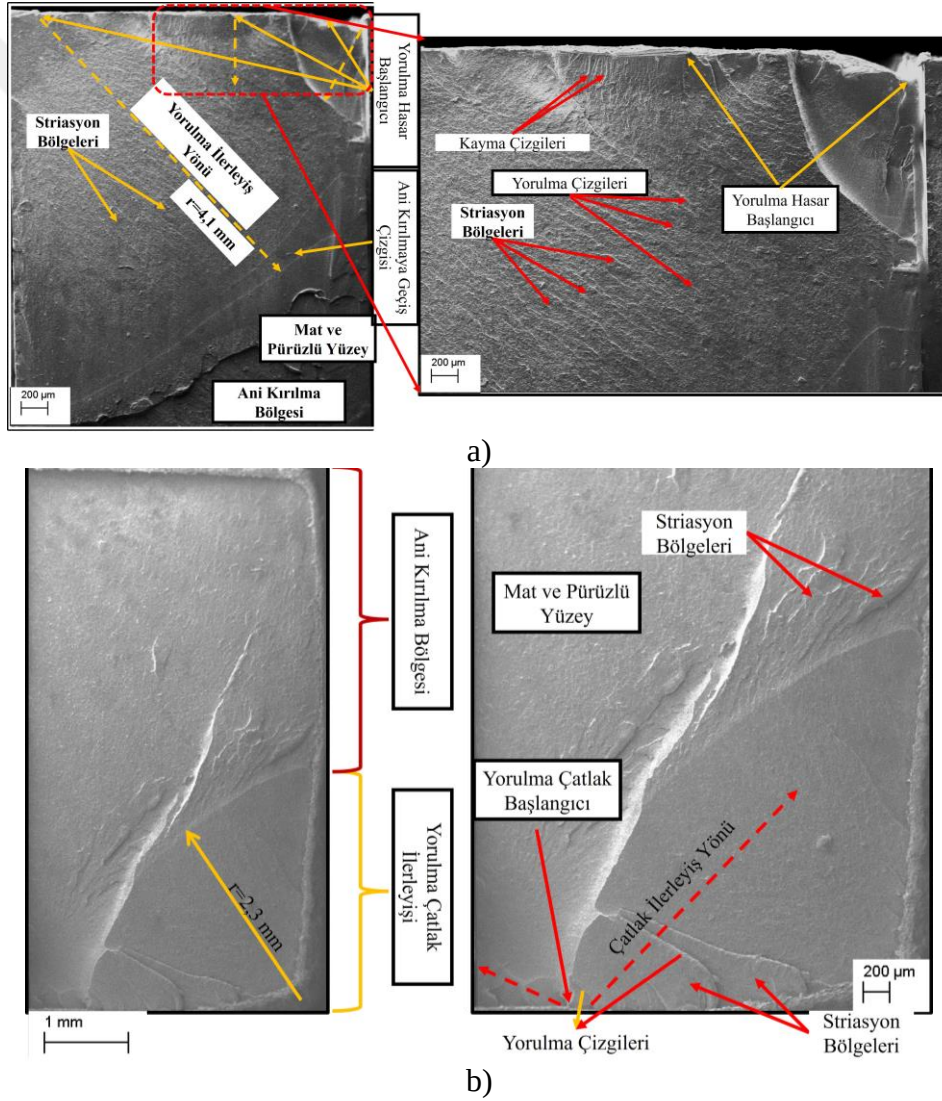


d)

Şekil 3.47. P40A60 kodlu harman malzemeden farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerin yorulma ömrü karakteristik eğrileri; a) 0 bar, b) 40 bar, c) 70 bar ve d) farklı tutma basınçlarında üretilen numunelerin karakteristik yorulma ömrü eğrilerinin karşılaştırması

Tutma basıncının P40A60 kodlu numunenin yorulma ömrü karakteristiğine etkisi ayrıca yorulma testleri sonrası numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri yardımıyla da irdelenmiştir. 40 ve 70 bar tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu numunelerin sırasıyla 9,5 MPa ve 9,8 MPa gerilme genliği altındaki yorulma testleri sonrasında oluşan hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 3.48'de verilmiştir. Bu görüntüler üzerinden benzer gerilme genliği altında sırasıyla 21804 ve 14230 çevrim sonunda hasara uğrayan 40 bar ve 70 bar tutma basınçlarında üretilen numunelerde yorulma hasar başlangıcı ve ilerleyişi araştırılmıştır. Şekil 3.48a'da 40 bar tutma basıncında 9,5 MPa gerilme genliği değerinde 21804 çevrim sonunda hasara uğrayan numunenin kırık yüzeyine ait SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, numune kırık yüzeyinde yorulma çatlak ilerleyişi ve ani kırılma bölgesi olmak üzere iki bölge bulunduğu görülmektedir. Kırık yüzeydeki mat yüzeyin ani kırılma bölgesini daha parlak yüzeyin ise yorulma çatlak ilerleyişi bölgesini oluşturduğu literatürdeki çalışmalardan da bilinmektedir. Şekil 3.48a'da verilen görüntüde ise yorulma çatlak ilerleyişi ile hasarın olduğu bölgenin numune kırık yüzeyinin oldukça büyük bir bölümünü oluşturduğu ilk olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca, numune kırık yüzeyinde yorulma çatlağının köşeden başladığı, çevrimsel yükleme sırasında yorulma çizgileri ve striasyon bölgeleri oluşturarak ilerlediği belirlenmiştir. Ek olarak, yorulma çizgilerinin ani kırılma bölgesine yaklaştıkça daha geniş striasyon bölgeleri oluşturacak şekilde ilerlediği ve sonunda ani kırılma bölgesine çatlak ilerleyişinin ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.48b'de ise 70 bar tutma basıncında üretilen ve 9,3 MPa gerilme genliğinde yorulma testine tabii tutulan numunenin kırık yüzeyine ait SEM görüntüsü verilmiştir. 40 bar tutma basıncında irdelenen numuneye benzer şekilde kırık yüzeyi yorulma çatlak ilerleyişi ve ani kırılma bölgesi olmak üzere iki ana bölgeden oluşmaktadır. Ancak yorulma çatlak ilerleyişinin meydana geldiği bölge çeyrek daire şeklinde ve kırık yüzey kesitinin oldukça küçük bir alanında belirgin bir formda gözlemlenmiştir. Bu bölge yaklaşık $4,15 \text{ mm}^2$ alana sahiptir ve bu alan numune kesitini yaklaşık %23'ünü temsil etmektedir. Şekil 3.48b'de verilen detay görüntü incelendiğinde, yorulma çatlağının numune yüzeyine yakın bir bölgeden başladığı ve yorulma çizgileri ile büyük alanlı striasyon bölgeleri oluşturarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.48a'da verilen görüntü ile karşılaştırıldığında, daha düşük çevrim sayısı sonunda yani bir başka deyişle daha hızlı yorulma çatlak ilerlemesi sonucunda hasarın oluştuğunu belirtmektedir. Aynı zamanda ani kırılma bölgesinde de çevrimsel yükleme sırasında striasyon bölgelerinin büyük ölçekli şekilde meydana geldiği görülmektedir. Mat ve pürüzlü

yüzey ise hızlı çatlak ilerleyişi ile hasarın meydana geldiği bölge olarak ani kırılma bölgesinde gözlemlenmiştir. 40 bar ve 70 bar tutma basınçlarında üretilen numunelerin Tablo 3.18’de 9,5 ve 9,3 MPa gerilme genlikleri için sırasıyla verilen çevrim sayıları ve SEM görüntüleri üzerinden, yorulma çatlak başlangıcı ve ilerleyişi bölgesinin daha büyük bir alanı temsil ettiği 40 bar basınçta üretilen numunenin daha üstün yorulma ömrü performansı sergilediği görülmektedir. Bu durum deneysel ve ampirik bağlantı yardımıyla incelenen yorulma ömrü performansının SEM görüntüleri üzerinden irdelenen çatlak ilerleyişi mekanizması ve hasar davranışı ile aynı paralelde sonuçları ortaya koyduğunu göstermektedir.



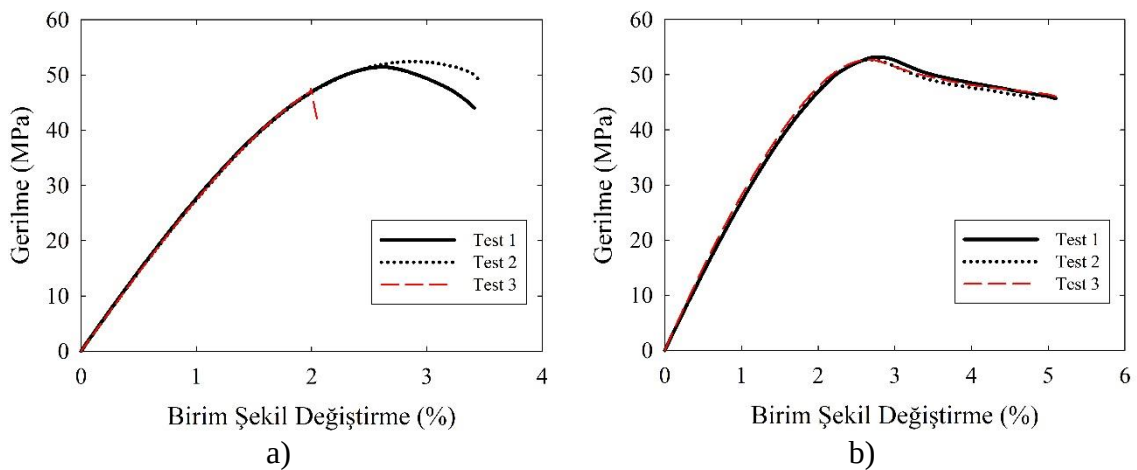
Şekil 3.48. Farklı tutma basınçlarında üretilen P40A60 kodlu harman numunelerin yorulma testi sonrası SEM analizleri ile elde edilen kırık yüzey görüntüleri; a) 40 bar ve 9,5 MPa (21804 çevrim) ve b) 70 bar ve 9,3 MPa (14230 çevrim)

3.7.2. Numune Kalınlığının Mekanik Özellikler ve Yorulma Davranışına Etkisi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen harman numunelerde plaka kalınlığının harman malzemelerin mekanik özellikleri ve yorulma ömrü performansına etkileri bu bölümde detaylıca araştırılmıştır. Bu kapsamda P20A80 kodlu harman numune enjeksiyon kalıplama ile sabit 40 bar tutma basıncında 2,3 ve 4 mm kalınlıklarda düz plaka şeklinde üretilirken, P40A60 kodlu numune ise aynı tutma basıncında 3 ve 4 mm kalınlıklarda düz plakalar şeklinde üretilmiştir. Farklı kalınlıklarda üretilen plakalardan ASTM D638 Tip 4 geometrisine sahip numuneler su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş ve sırasıyla çekme ve yorulma testlerine tabii tutulmuştur. Numune kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkileri $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen aksenal çekme testleri ile araştırılmıştır. Çekme testleri her bir kalınlıktaki numune grubunda tekrarlanabilirliğin sağlanabilmesi amacıyla en az 3 test yapılarak tamamlanmıştır.

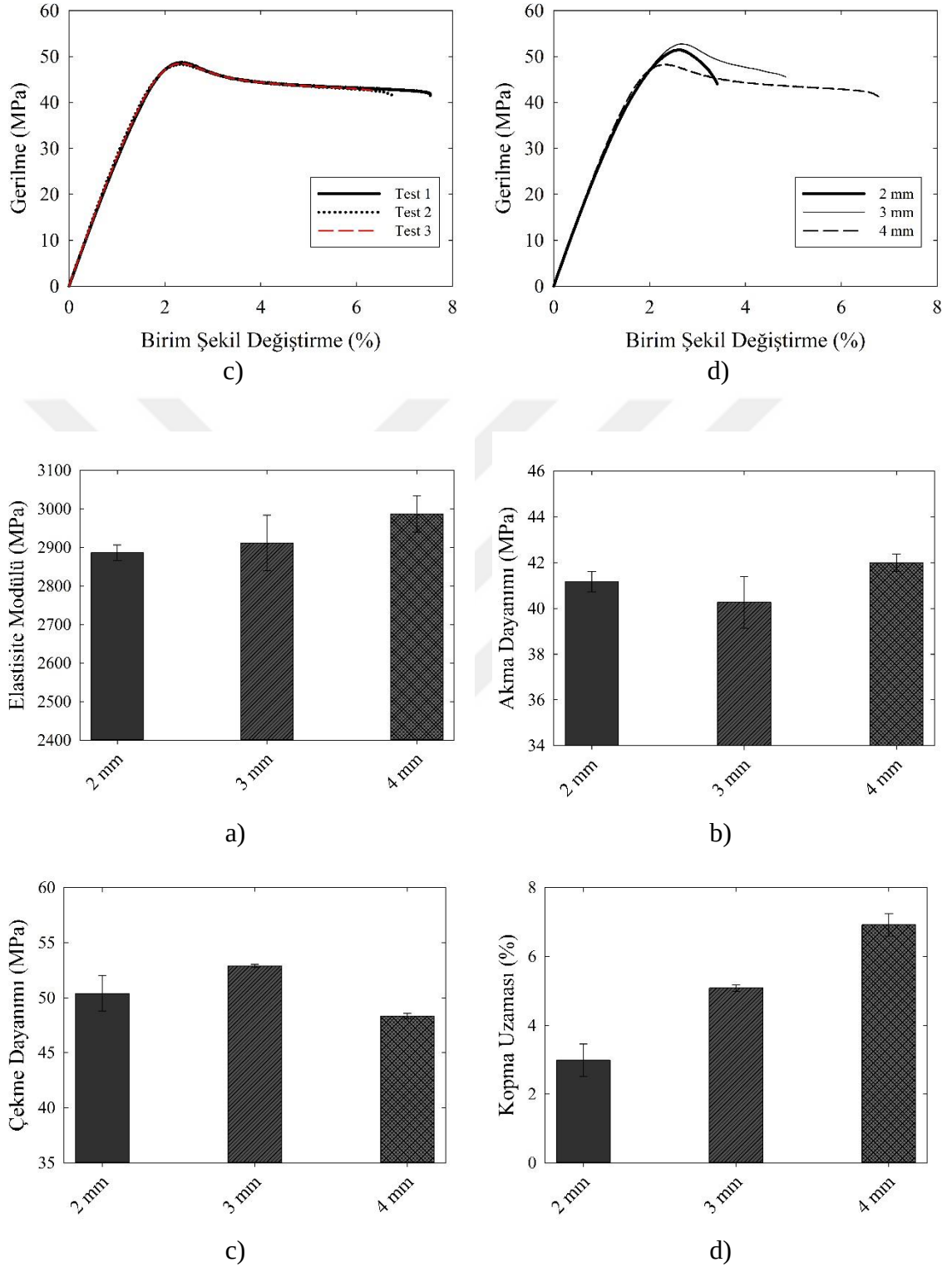
P20A80 kodlu %20 PMMA ve %80 ABS bileşiminden oluşan harman malzemenin farklı kalınlıklardaki numuneleri ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.49'da numune kalınlığına göre sırasıyla verilmiştir. Şekil 3.49a-c'de verilen eğrilerden farklı kalınlıklardaki P20A80 kodlu numunelerin kendi içerisinde tekrarlanabilir gerilme-birim şekil değiştirme davranışına sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 3.49a-c'de verilen eğrilerden elde edilen elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikler her bir mekanik özelliğe ait standart sapmayı içerecek şekilde Tablo 3.19'da özetlenmiştir. Numune kalınlığının P20A80 numunenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin daha net irdelenebilmesi amacıyla Şekil 3.49d'de farklı kalınlıktaki numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ise karşılaştırmalı formda verilmiştir. Mekanik özelliklerde numune kalınlığı meydana gelen değişimlerin irdelenmesi amacıyla Şekil 3.50'de çubuk formda grafikler her bir mekanik özellik için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'den görüldüğü gibi numune kalınlığının artmasıyla P20A80 numunenin kopma uzaması değerinin ciddi oranda arttığı ve elastisite modülü değerlerinde ise nispeten artış görüldüğü söylenebilir. Kopma uzaması değeri P20A80 kodlu numunede numune kalınlığının artmasıyla %2,98 değerinden sırasıyla %5,09 ve %6,92 değerlerine ulaşmıştır. 4 mm kalınlıktaki numunenin daha yüksek kırılma tokluğu ile daha sünek bir davranış sergilediği söylenebilir. Akma dayanımı değerleri ise numune kalınlığına bağlı olarak büyük oranda değişmezken çekme dayanımı değeri ise en yüksek değerine 3 mm kalınlığındaki

numunede ulaşmıştır. 4 mm kalınlıklı numunede ise 2 mm kalınlıklı numuneden daha düşük çekme dayanımı değeri elde edilmiştir. Çekme dayanımı değerinin numune kalınlığının 4 mm'ye ulaşması ile ani düşüşü ve 2 mm kalınlıklı numuneden daha düşük bir değere sahip olması moleküler yönlenme ile açıklanabilir. Benzer bir durum, Amjadi ve Fatemi (2020) tarafından HDPE malzeme ile farklı kalınlıklarda üretilen numunelerin çekme test sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Çekme dayanımında görülen bu düşüş, düşük numune kalınlığında daha yüksek moleküler yönlenmeye sahip yüzey katmanlarının var olmasına rağmen 4 mm kalınlıklı numunede ise moleküler yönlenmenin numune merkez bölgesine daha yakın olan katmanlarla karşılaştırıldığında, yüzeye daha yakın olan bölgeye doğru azalması ile açıklanabilir (Amjadi & Fatemi 2020). Bu nedenle mekanik özelliklerde görülen bu değişimler enjeksiyon kalıplama sırasında uygulanan tutma basıncının 40 barda sabit kalmasına rağmen artan numune kalınlığı ile mikroyapısal yönelimler ve kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer bir çalışmada enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen PA6 polimerin numune kalınlığına bağlı olarak mekanik özellikleri Uribe-Arocha vd. (2003) tarafından araştırılmıştır. Çalışma sonucunda artan numune kalınlığı ile belirli bir değere kadar çekme dayanımının arttığı daha sonra ciddi oranda azaldığı ancak akma dayanımının büyük oranda değişmediği belirlenmiştir. Ayrıca kopma uzaması değerinin ise artan numune kalınlığı ile ciddi oranda artış gösterdiği sonucuna ulaşılmışlardır (Uribe-Arocha vd., 2003).



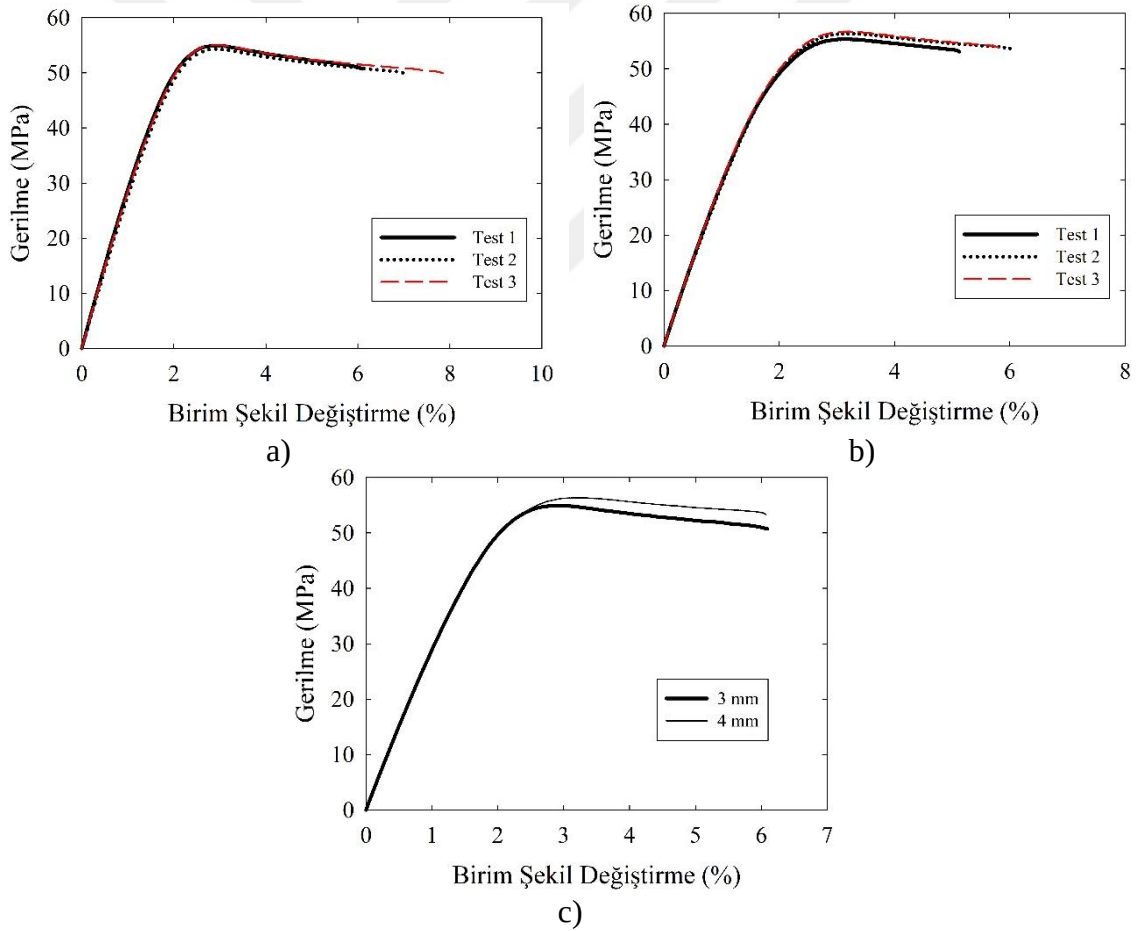
Şekil 3.49. Farklı plaka kalınlıklarında üretilen P20A80 kodlu harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm ve d) 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.49'un devamı



Şekil 3.50. Farklı plaka kalınlıklarında üretilen P20A80 kodlu PMMA/ABS harman numunenin çekme testleri sonrası elde edilen mekanik özelliklerinin numune kalınlığına bağlı değişimi; a) elastisite modülü, b) akma dayanımı, c) çekme dayanımı ve d) kopma uzaması

P40A60 kodlu numunenin 3 ve 4 mm kalınlıklı çekme test numuneleri ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.51’de verilmiştir. Ayrıca gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen mekanik özellikler ise Tablo 3.19’da özetlenmiştir. Şekil 3.51c’de karşılaştırmalı formda verilen eğrilerden P40A60 kodlu numunede artan numune kalınlığı ile elastisite modülü, akma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin büyük oranda değişmediği ancak çekme dayanımının 4 mm kalınlıklı numunede nispeten artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum Tablo 3.19’da verilen mekanik özellikler tablosundan da görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.51c’den 4 mm kalınlıklı numunenin daha yüksek kırılma tokluğuna ve sünekliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu davranış yorulma ömrü performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak düşünülebilir.



Şekil 3.51. Farklı kalınlıklarda üretilen P40A60 kodlu PMMA/ABS harman numunelerin çekme testi sonrası elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 3 mm, b) 4 mm ve c) 3-4 mm kalınlıklı numunelerden elde edilen eğrilerin karşılaştırması

Tablo 3.19. Farklı kalınlıklardaki P20A80 ve P40A60 harman numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri

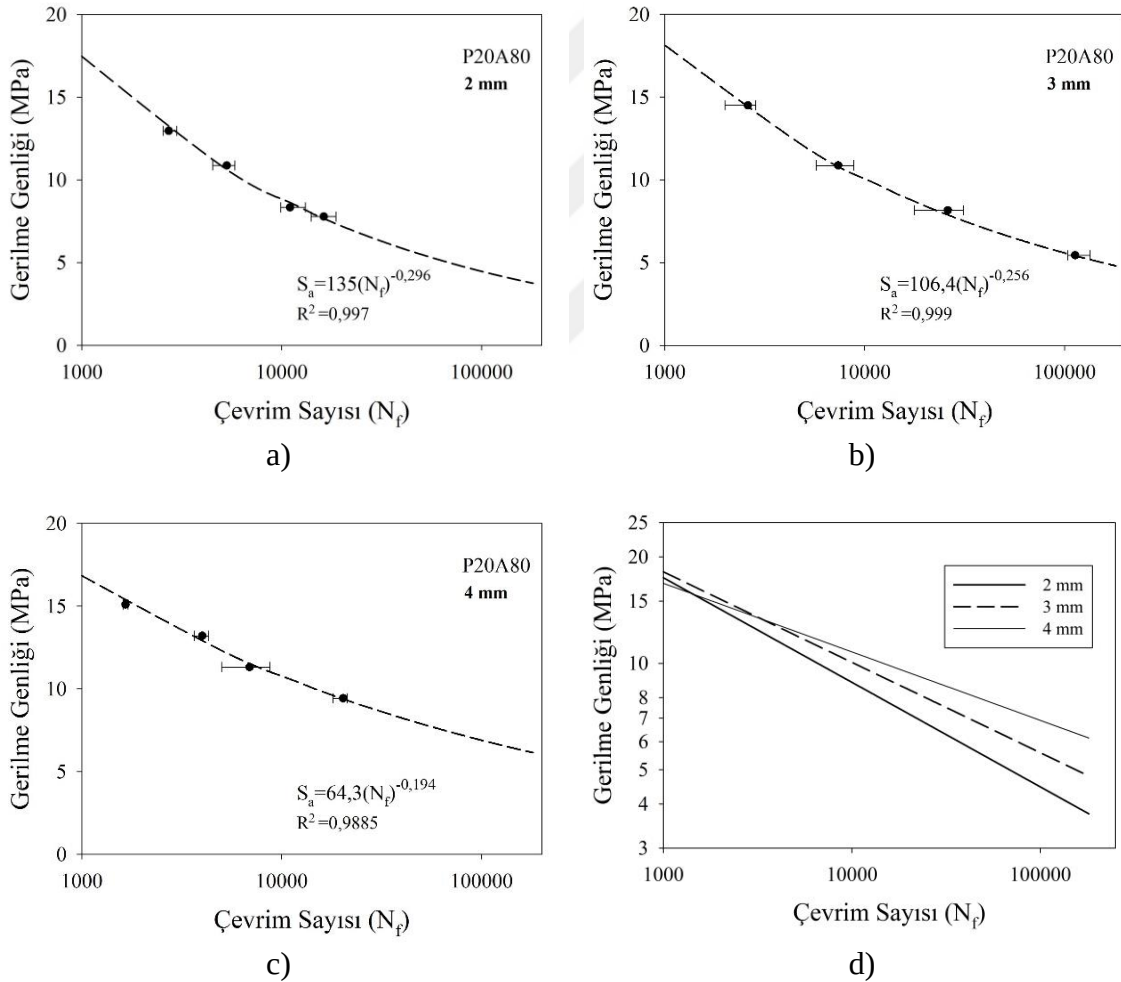
Numune Kodu	Numune Kalınlığı (mm)	Mekanik Özellikler			
		Elastisite Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
P20A80	2	2886 ± 28,7	41,2 ± 0,62	50,4 ± 2,3	2,98 ± 0,66
	3	2912 ± 124,9	40,3 ± 1,96	52,9 ± 0,26	5,09 ± 0,16
	4	2987 ± 66,6	42 ± 0,54	48,4 ± 0,31	6,92 ± 0,46
P40A60	3	2967 ± 115,9	43,9 ± 1,45	54,7 ± 0,42	7,12 ± 0,93
	4	3128 ± 43,5	42,2 ± 0,48	56,2 ± 0,55	5,74 ± 0,39

Numune kalınlığının mekanik özelliklerin yanı sıra harman malzemelerin yorulma ömrü performansına veya başka bir deyişle yorulma davranışına olan etkileri eksenel yorulma testleri sonrasında elde edilen deneysel veriler üzerinden değerlendirilmiştir. Yorulma testleri sonrasında testlerin gerçekleştirildiği gerilme genliği ve bu gerilme genliğine karşılık gelen numunelerin hasara uğradığı çevrim sayıları her bir numune kalınlığındaki harman malzemeler için ayrı ayrı irdelenmiştir. Şekil 3.52’de P20A80 kodlu harman malzemeden 2, 3 ve 4 mm kalınlıklarda üretilen test numuneleri kullanılarak elde edilmiş gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri ve bu eğrilerdeki yorulma ömrü davranışını temsil eden Basquin eşitliğine ait katsayılar sırasıyla verilmiştir. Yorulma testleri sırasında uygulanan gerilme genliği değerleri ve bu değerlerde numunelerin hasara uğradığı çevrim sayıları ise Tablo 3.20’de verilmiştir. Tablo 3.20’den P20A80 kodlu malzemede farklı kalınlıklardaki numunelere uygulanan farklı gerilme genliği değerlerindeki yorulma testleri sonucunda numunelerin hasara uğradığı çevrim sayılarının kendi içerisinde uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel verilere Basquin eşitliği kullanılarak uydurulan eğrilerin yüksek korelasyon katsayılarına sahip olması ve her bir gerilme genliği değerinde elde edilen deneysel çevrim sayılarının birbirilerine yakın mertebede olması üzerinden görülmektedir. Her bir numune kalınlığında elde edilen Basquin eşitliğine ait katsayılar ise P20A80 kodlu malzemenin numune kalınlığı ile yorulma davranışı arasındaki ilişkinin ortaya koyulmasına olanak tanımaktadır. P20A80 harman malzemede artan numune kalınlığı ile yorulma dayanımı değerinin 135 MPa’dan sırasıyla 106,4 MPa ve 64,3 MPa değerine düştüğü

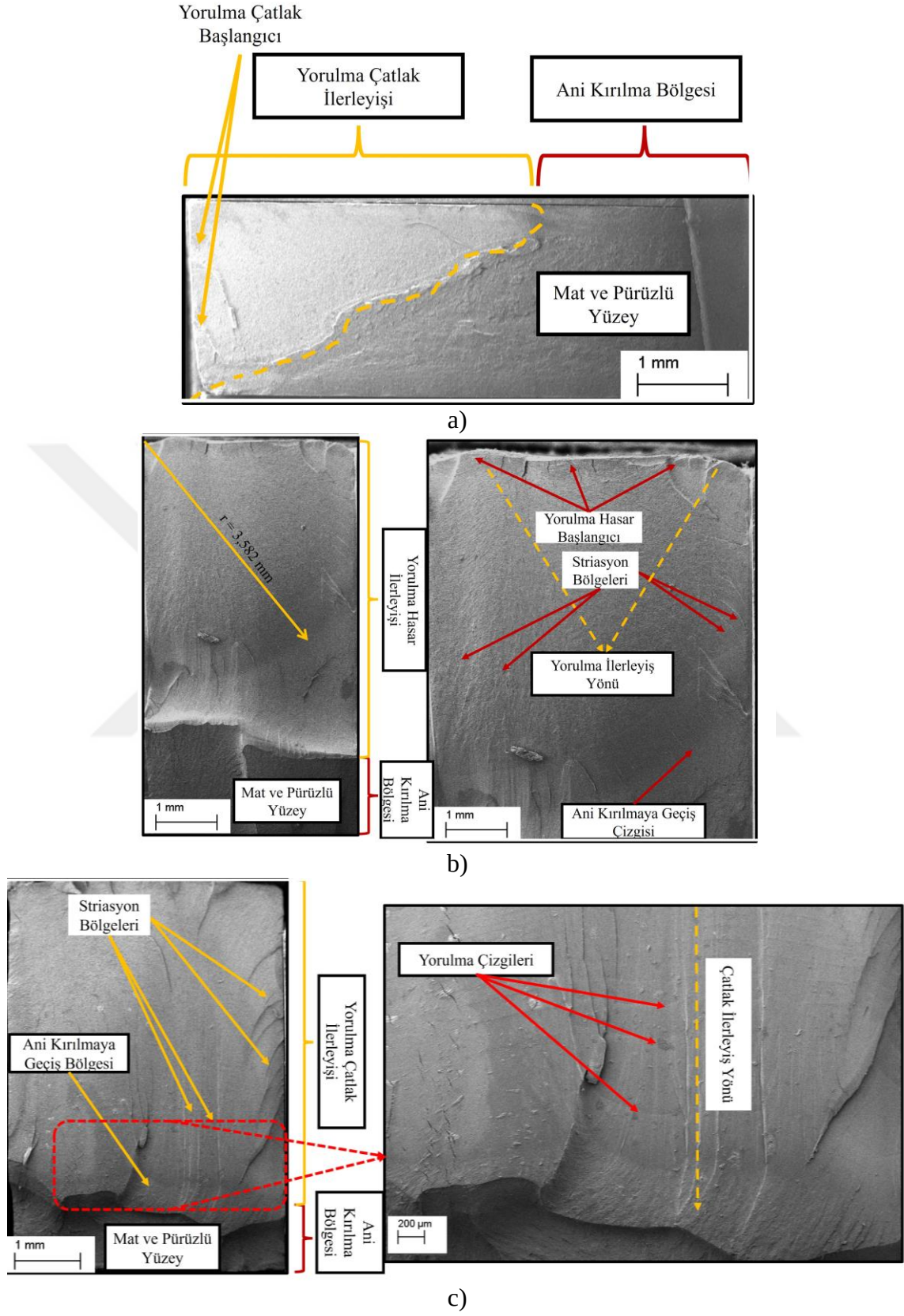
belirlenmiştir. Ayrıca yorulma üssü değerleri ise artan numune kalınlığı ile -0,296'dan sırasıyla -0,256 ve -0,194 değerlerine artış göstermiştir. P20A80 kodlu 2 mm kalınlıklı numunenin en düşük yorulma üssü değerine sahip olması artan çevrim sayısı ile daha yüksek bir eğim içerisinde gerilme genliği değerinin azalmasını ifade etmektedir. Bu durum 2 mm kalınlıklı numunede yorulma ömrü performansının yüksek çevrim sayısında daha düşük gerilme genliği değerlerine sahip olması anlamına gelmektedir. 2 mm kalınlıklı numuneye kıyasla artan numune kalınlığı ile eğimin azaldığı ve yüksek çevrim sayılarında daha üstün gerilme genliği değerlerinin elde edileceği belirlenmiştir. Bu kapsamda Şekil 3.52d'de 2,3 ve 4 mm kalınlıklı numunelere ait Basquin eşitliği yardımıyla elde edilen karakteristik eğriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi artan numune kalınlığı ile P20A80 kodlu numunenin yorulma ömrü performansının iyileştiği söylenebilir. Örneğin, 7 MPa gerilme genliği değeri dikkate alındığında 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerin sırasıyla 21979, 41360 ve 92451 çevrim sonunda hasara uğradığı Basquin eşitliği yardımıyla belirlenmiştir. Bu durumda artan numune kalınlığı ise aynı gerilme genliğinde yorulma ömrünün 2 mm kalınlıklı numuneye kıyasla 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerde sırasıyla %88 ve %321 oranında artış gösterdiği söylenebilir. Numune kalınlığı ile yorulma ömrü performansında gözlemlenen bu değişim Mortazavian ve Fatemi (2015) tarafından fiber katkılı PA6 ve PBT numunelerin yorulma davranışının numune kalınlığı ile araştırıldığı çalışmada da gözlemlenmiştir.

P20A80 kodlu harman malzemede numune kalınlığı ile yorulma davranışı arasındaki ilişkinin tartışılmasında yorulma testleri sonrası numunelerin kırık yüzeylerindeki SEM görüntüleri de irdelenmiştir. Bu amaçla Şekil 3.53'te 2 ve 3 mm kalınlıklarda yaklaşık 8 MPa gerilme genliğinde ve ayrıca 4 mm kalınlıklı numunenin yaklaşık 9 MPa gerilme genliğinde yorulma testi sonrası kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri sırasıyla verilmiştir. Şekil 3.53'te sırasıyla 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerin kırık yüzeylerinde gözlemlenen ani kırılma bölgelerinin büyüklükleri dikkate alındığında, numune kalınlığına kıyasla en büyük ani kırılma bölgesinin 2 mm kalınlıklı numunede olduğu söylenebilir. 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerde yorulma hasarı başlangıcı sonrasında çevrim sayısına bağlı olarak numune kesitinde yorulma çizgilerinin ve striasyon bölgelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, 4 mm kalınlıklı numunede yorulma çizgilerinin çok belirgin bir formda olduğu ve kum birikintisi formunda ilerleyen bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir. 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerin yorulma çatlak ilerleyişinin baskın olduğu bölgelerde ani kırılmaya geçiş bölgelerinin bir çizgi şeklinde belirgin bir görüntü sergilediği belirlenmiştir. Özellikle

4 mm kalınlıklı numunede ani kırılmaya geçiş öncesinde, yorulma çizgileri arası mesafenin arttığı ve striasyon bölge geniliklerinin büyümesiyle ani kırılma bölgesine geçişin görüldüğü söylenebilir. Benzer gerilme genliklerindeki 2 ve 3 mm kalınlıklı numuneler sırasıyla ortalama 10733 ve 18488 çevrim sonunda hasara uğradığı göz önüne alındığında, kesitte artan yorulma çatlak ilerleyişı bölgesinin yorulma ömrü performansının iyileşmesinin bir kanıtı olarak görüleceğini göstermektedir. Örneğın, 4 mm kalınlıklı numunede yorulma çizgilerinin sık ve belirgin formda ilerlediğı çatlak ilerleyişı mekanizması ile bunu ilerleyişin oluşturduğu bölgenin kesitte daha büyük bir alana sahip olması sonucunda numunenin daha üstün yorulma ömrü sergilemesi ilişkilendirilen bir sonuç olarak düşünülebilir.



şekil 3.52. Farklı kalınlıklarda üretilen P20A80 kodlu harman numunelerin aksenal yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliğı-çevrim sayısı eğrileri; a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm ve d) 2, 3 ve 4 mm kalınlıklı numunelerin yorulma karakteristik eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 3.53. Farklı kalınlıklarda üretilen P20A80 kodlu harman numunelerinin eksenel yorulma testlerinde elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri; a) 2 mm (8 MPa), b) 3 mm (8,2 MPa) ve c) 4 mm (9,4 MPa)

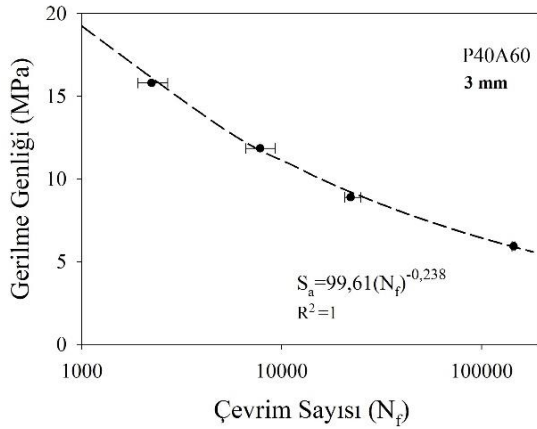
P20A80 kodlu malzemeye benzer şekilde P40A60 harman malzemenin yorulma davranışına numune kalınlığının etkisi eksenel yorulma testleri ile araştırılmıştır. 3 ve 4 mm kalınlıklı P40A60 kodlu numuneler eksenel yorulma testlerine 5 Hz yükleme frekansı ve $R=0,1$ gerilme oranında tabii tutulmuş, test sonucunda elde edilen çevrim sayıları gerilme genliğine bağlı olarak Şekil 3.54'te verilmiştir. Şekillerde verilen Basquin yorulma üssü katsayısının artan numune kalınlığı ile -0,238'den -0,211 değerine artış gösterdiği yani artan kalınlıkla çevrim sayısına bağlı gerilme genliği değişiminin eğiminin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca yorulma dayanımı değeri ise numune kalınlığı ile 99,6 MPa değerinden 82,6 MPa değerine düşmüştür. Şekil 3.54c'de numune kalınlığına bağlı olarak elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı karakteristik eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden numune kalınlığının artmasıyla düşük gerilme genliğinde daha üstün yorulma ömrü performansı sergileneceği söylenebilir. Örneğin, 15 MPa gerilme genliği değerinde 3 ve 4 mm kalınlığa sahip numuneler sırasıyla 2849 ve 3245 çevrim sonunda hasara uğrayacağı belirlenmiştir. Bu gerilme genliği için numune kalınlığı artışıyla çevrim sayısı yaklaşık %14 iyileşme göstermiştir. Benzer şekilde 7 MPa gerilme genliği için ise 3 ve 4 mm kalınlıklı numuneler sırasıyla 70048 ve 120229 çevrim sonunda hasara uğrayacağı bulunmuştur. 7 MPa gerilme genliği için numune kalınlığının artmasıyla yorulma ömrü yaklaşık %72 oranında iyileşme göstermiştir. Bu durumun nedeni yorulma üssünün artmasıyla meydana gelen ve çevrim sayısına bağlı olarak gerilme genliği değerindeki değişimin eğimi ile ilişkilendirilen karakteristik davranıştır. Numune kalınlığının artmasıyla kesit yüzeyde yorulma hasar mekanizmasının gözlemlendiği bölgenin büyümesi ve kesit alanda hasara kadar meydana gelecek çatlak ilerleyişi bölgesinin daha geniş kalması yorulma ömrü performansının iyileşmesine yol açtığı söylenebilir.

Tablo 3.20. Farklı kalınlıklardaki P20A80 ve P40A60 kodlu harman numunelerin $R=0,1$ gerilme oranındaki eksenel yorulma testlerinde farklı gerilme genliklerinde elde edilen hasar çevrim sayıları

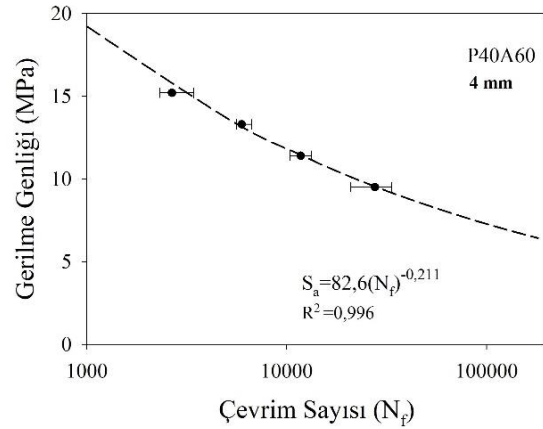
Numune Kodu	Numune Kalınlığı (mm)	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı		
			Test 1	Test 2	Test 3
P20A80	2	12,9	3004	2574	2724
		10,9	4454	5309	5754
		8,3	10200	10900	11100
		7,8	18754	14054	16250

Tablo 3.20'nin devamı

P20A80	3	14,5	2668	2646	2563
		10,9	7475	7268	6763
		8,2	16554	23480	15400
		5,4	112950	107151	136617
	4	15,1	1654	1704	1604
		13,2	4004	3654	4277
		11,3	8804	8048	5754
		9,4	17904	20804	20304
P40A60	3	15,8	2373	1976	1970
		11,9	9675	7507	7289
		8,9	21154	21354	22904
		5,9	146227	144654	141704
	4	15,2	3504	2254	2666
		13,3	5954	5725	6754
		11,4	10404	11754	13304
		9,5	26650	28704	34504



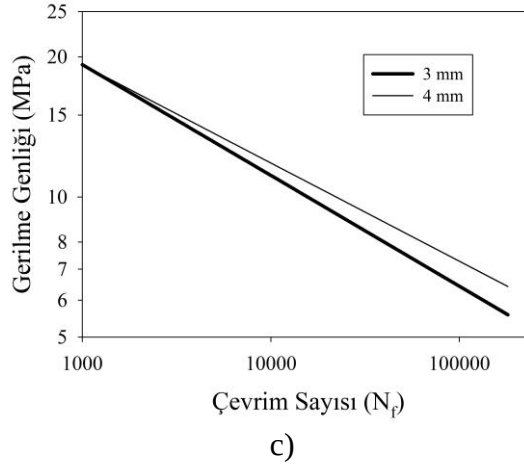
a)



b)

Şekil 3.54. Farklı kalınlıklarda üretilen P40A60 kodlu harman numunenin eksenel yorulma testlerinden elde edilen gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri; a) 3 mm, b) 4 mm ve c) farklı kalınlıklı numunelerin karakteristik eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.54'ün devamı



3.7.3. Yorulma Test Frekansının Yorulma Davranışına Etkisi

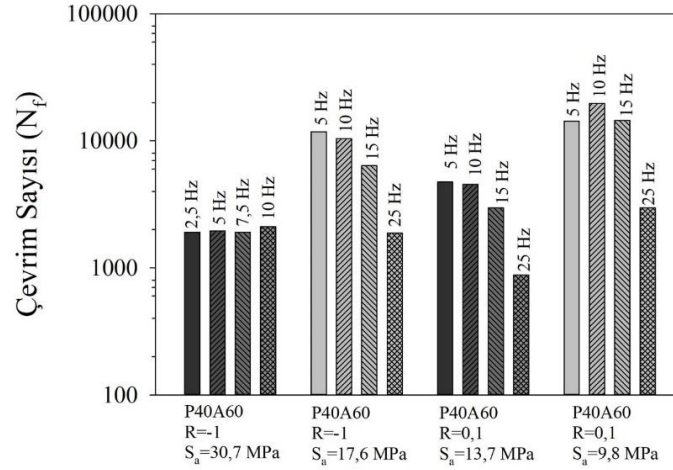
Polimer malzemelerin yorulma davranışının karakterize edilmesinde yükleme frekansına bağlı olarak ortaya çıkan kendi kendine ısınma (self-heating) davranışı ve yükleme frekansının yorulma davranışı karakteristiği üzerindeki etkileri bu bölümde irdelenmiştir. Yükleme frekansı etkilerinin incelenmesi amacıyla P40A60 kodlu harman numune ile hem tam tersinir hem de çeki/çeki yükleme tiplerinde farklı frekanslarda eksenel yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında numune yüzeyindeki sıcaklık artışları temassız termal kamera ile izlenmiştir. Termal görüntüler Testo 871 marka 0,08°C hassasiyete sahip termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Yorulma yüklemesi sırasında numune yüzeyindeki sıcaklık değeri kamera üzerinden okunmuş ve numune hasara uğrayana kadar termal görüntüler kayıt altına alınmıştır. Tam tersinir ($R=-1$) yükleme durumunda 30,7 MPa gerilme genliğinde 2,5 Hz, 5 Hz, 7,5 Hz ve 10 Hz yükleme frekanslarında, 17,6 MPa gerilme genliğinde ise 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz ve 25 Hz yükleme frekanslarında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. $R=-1$ gerilme oranındaki testlerde 30,7 MPa gerilme genliği için 15 ve 25 Hz frekanslarda yorulma testleri denenmiş ancak 300 çevrim sayısı ve altında sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle bahsi geçen frekanslarda ani sıcaklık artışı ve yüksek frekanstaki nispeten yüksek gerilme genliği altında ani kırılmaların gözlemlendiği söylenebilir. Çeki/çeki ($R=0,1$) yükleme durumunda ise 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz ve 25 Hz frekanslarda sırasıyla 13,7 MPa ve 9,8 MPa gerilme genliği değerlerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri sonrasında farklı yükleme tiplerinde ve gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayıları ile numune yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışları Tablo 3.21'de

özetlenmiştir. Ayrıca, çevrim sayılarının gerilme genliği ve yükleme frekansına bağlı olarak değişimleri hem tam tersinir hem de çeki/çeki yükleme durumları için çubuk grafik şeklinde Şekil 3.55'te verilmiştir. Tam tersinir yükleme durumunda 30,7 MPa gerilme genliğinde gerçekleştirilen 2,5-10 Hz aralığındaki yorulma testlerinde frekansa bağlı olarak çevrim sayısının büyük oranda değişmediği ancak yüzey sıcaklığının 2,5 Hz frekansta 4,8 °C artış gösterirken 10 Hz frekans değerinde ise 23,5 °C artış gösterdiği bulunmuştur. Ancak bu frekans aralığında numune yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışının yorulma ömrü davranışı üzerinde büyük oranda etkisinin olmadığı söylenebilir. Buna karşın, 17,6 MPa gerilme genliğinde sırasıyla 5, 10, 15 ve 25 Hz frekans değerlerinde gerçekleştirilen yorulma testleri sonucunda çevrim sayıları 11804'den sırasıyla 10454, 6379 ve 1879 çevrim sayılarına düşmüştür. Bu düşüşe paralel olarak artan yükleme frekansı ile numune yüzeyindeki sıcaklık farkı değeri yaklaşık 31°C değerine ulaşmıştır. Bu gerilme genliği değerinde de 5 ve 10 Hz frekans değerlerinde çevrim sayısının büyük oranda değişmediği ancak artan frekans değeriyle yüzey sıcaklığının da artmasıyla numunenin daha düşük çevrim sayısı sonunda hasara uğradığı belirlenmiştir. Bu durum düşük çevrimli yorulma rejimi bölgesinde yani uygulanan gerilme genliğinin çekme dayanımı değerinin altında kaldığı yorulma yüklemesi durumunda artan yükleme frekansı ile yer değiştirme genliğinin de artmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Mortazavian vd., 2015; Katunin, 2018; Amraei & Katunin, 2022; Shojaei & Volgers, 2017). Artan yükleme frekansı ile yer değiştirme genliğinin artması numune yüzey sıcaklığının artmasına yol açmakta ve bu durum döngüsel yüklemelerde malzeme yumuşaması ile hasarın gerçekleşmesi ile sonuçlanmaktadır (Shojaei & Volgers, 2017; Mortazavian vd., 2015). Şekil 3.56'da $R=-1$ ve $R=0,1$ gerilme oranlarında 5, 15 ve 25 Hz yükleme frekanslarında çevrim sayısına bağlı olarak yer değiştirme genliğindeki değişimi ifade eden eğriler verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi her bir gerilme oranında artan yükleme frekansı ile yer değiştirme genliği artmıştır. Bunun bir sonucu olarak numune yüzeyinde sıcaklık artışı meydana geldiği Tablo 3.21'den de görülmektedir. Şekil 3.55'ten de görüldüğü gibi yükleme frekansının artması sonucu yer değiştirme genliğinin artması ve numune yüzeyindeki sıcaklık artışı ile malzeme yumuşama etkisinde daha erken bir çevrim sayısı sonunda hasara uğramıştır. Şekil 3.56'da $R=-1$ gerilme oranı için artan yükleme frekansı ile gerilme genliği artışı irdelendiğinde, örneğin, 5 Hz yükleme frekansında gerilme genliği ortalama 0,24 mm iken 25 Hz yükleme frekansında ise bu değer yaklaşık 0,52 mm'ye ulaşmaktadır. Benzer oranda bir artış $R=0,1$ gerilme oranında gerçekleştirilen yorulma testinde de gözlemlenmektedir. Bu artışın sonunda hem numune

yüzey sıcaklığının arttığı hem de çevrim sayısının ciddi oranda azaldığı söylenebilir. PA6 malzeme ile gerçekleştirdikleri yorulma testleri sonucunda yüksek frekanslarda kendi kendine ısınma etkisinin bir sonucu olarak malzeme yumuşaması etkisi ile hasarın belirgin olduğunu ifade eden benzer bir sonuç Mortazavian vd. (2015) tarafından literatüre sunulmuştur. Bu belirginlik çevrim sayılarındaki ani düşüş ile gözlemlenmiştir. Gerilme oranının 0,1 olduğu çeki/çeki yükleme durumunda da 5, 10, 15 ve 25 Hz frekanslarda 13,7 ve 9,8 MPa gerilme genliklerinde yorulma testleri sonucunda hasar çevrim sayısının 5 Hz frekansta gerçekleştirilen testlere kıyasla artan yüzey sıcaklığı ile 10 Hz değerinden sonra çevrim sayılarının ciddi şekilde azaldığı belirlenmiştir. Bu gerilme oranında da artan yükleme frekansı ile yer değiştirme genliğinin belirgin bir şekilde arttığı Şekil 3.56'dan görülmektedir.

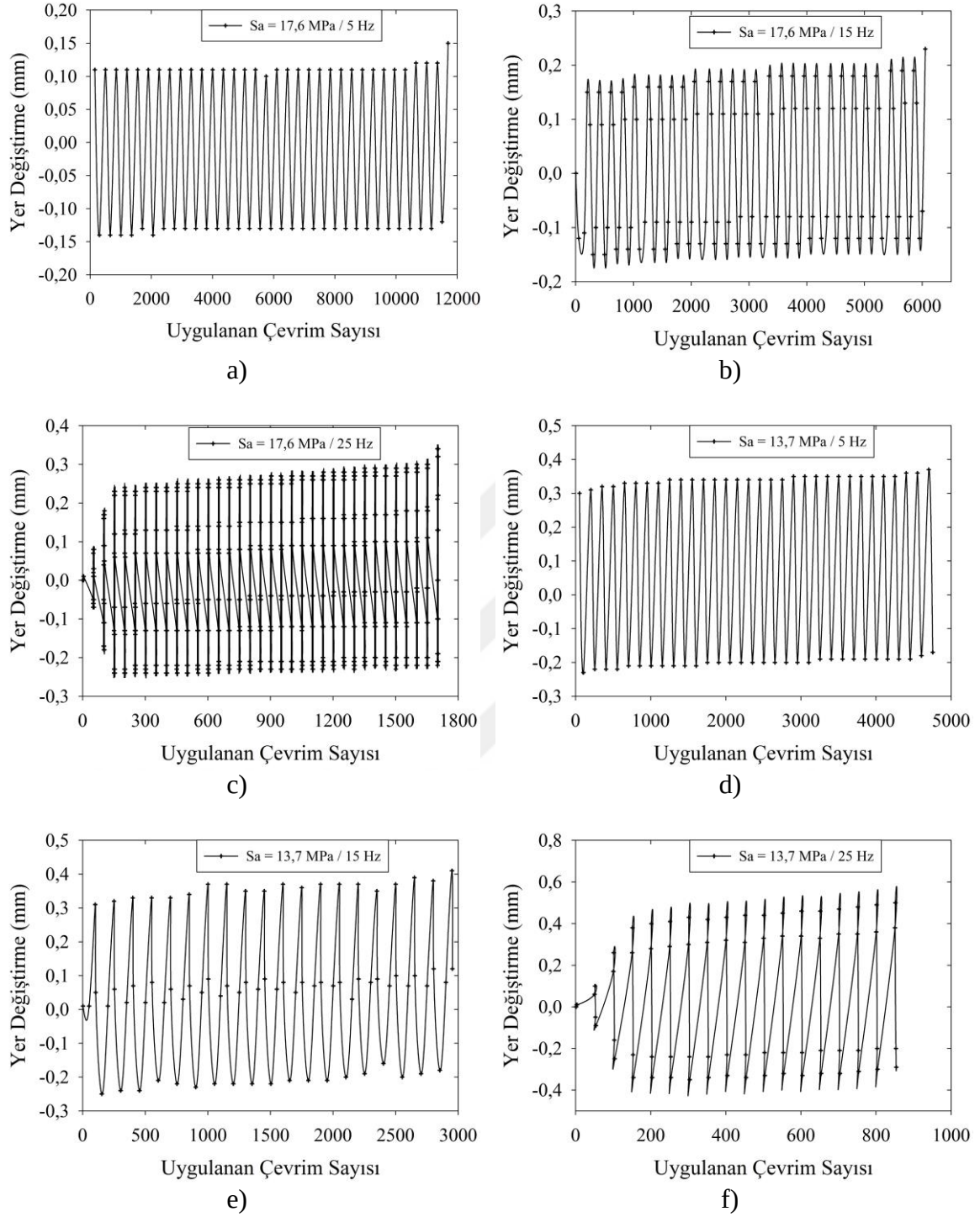
Tablo 3.21. Yükleme frekansına ve gerilme genliğine bağlı olarak R=-1 ve R=0,1 gerilme oranları için yorulma testlerine ait çevrim sayıları ve yüzey sıcaklık değişimleri

Gerilme Oranı	Gerilme Genliği (MPa)	Yükleme Frekansı (Hz)	Çevrim Sayısı	Sıcaklık Artışı, ΔT (°C)	
-1	30,7	2,5	1904	4,8	
		5	1954	12,1	
		7,5	1904	17,2	
		10	2104	23,5	
	17,6	5	11804	3,1	
		10	10454	11,5	
		15	6379	15,3	
		25	1879	30,5	
	0,1	13,7	5	4754	3,9
			10	4554	9,5
15			2979	11,9	
25			878	16,5	
9,8		5	14270	2,3	
		10	19758	4,7	
		15	14479	6,7	
		25	2979	16,2	

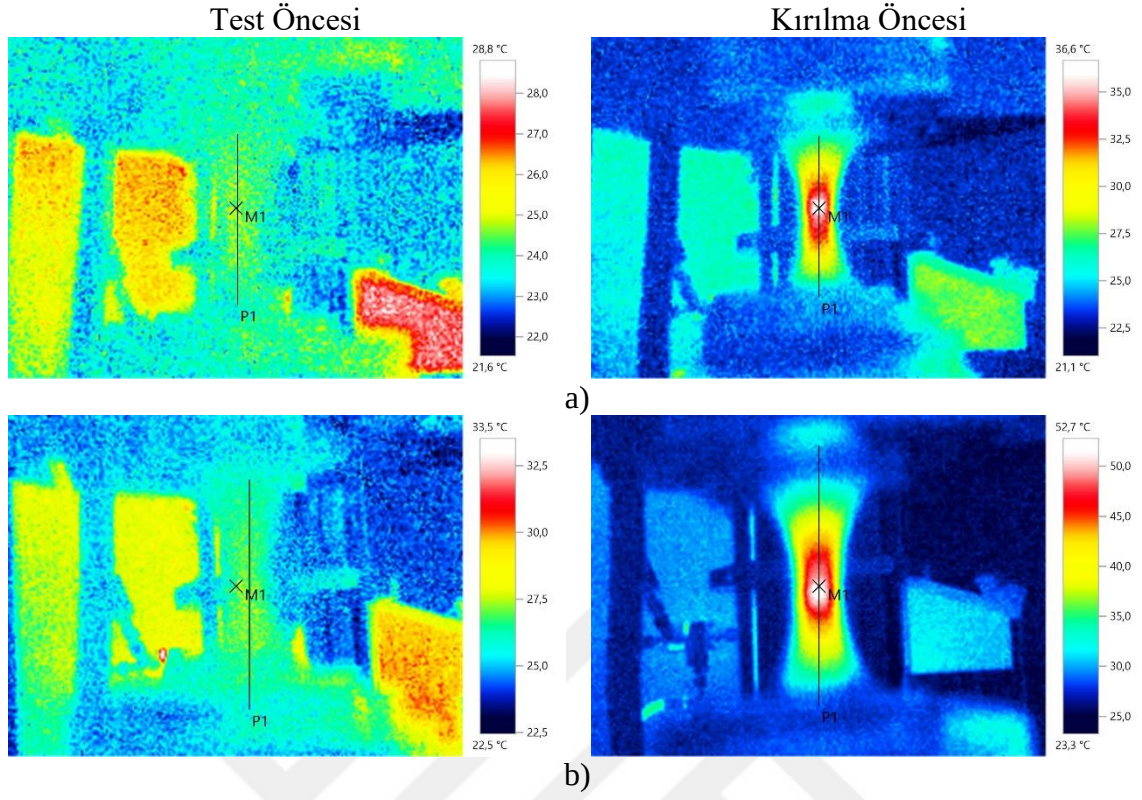


Şekil 3.55. P40A60 kodlu numunenin gerilme oranı, yükleme frekansı ve gerilme genliğine bağlı olarak yorulma testlerinde elde edilen çevrim sayılarının değişimleri

Yorulma testi sırasında farklı frekanslarda gerçekleştirilen yüklemeler sonrası numune yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışları termal kamera ile görüntülenmiştir. Yorulma testleri öncesi ve sonrası numune yüzeyinden elde edilen görüntüler sıcaklık ölçeğini içerecek şekilde Şekil 3.57’de verilmiştir. Bu kapsamda tam tersinir yükleme durumunda 30,7 MPa gerilme genliğinde 5 Hz ve 10 Hz değerlerinde elde edilen termal görüntüler yorulma testi öncesi ve numune hasarı hemen öncesinde olacak şekilde alınmış ve şekilde sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi farklı frekanslarda gerçekleştirilen yorulma testleri öncesi ve sonrası termal görüntüler elde edilmiş ve numune yüzeyindeki sıcaklıklar noktasal ve çizgisel hat boyunca elde edilmiştir. Bu sıcaklık değerlerinin yükleme frekansına bağlı olarak değişimleri elde edilerek değerlendirilmiştir. Tablo 3.21’de verilen sıcaklık farkı değerleri bu Şekil 3.57’de örneği verilen şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.56. P40A60 kodlu numunenin $R=-1$ ve $R=0,1$ gerilme oranlarında farklı yükleme frekanslarında gerçekleştirilen yorulma testlerinde uygulanan çevrim sayısına bağlı yer değiştirme genliğinin değişim eğrileri $R=-1$; a) 5 Hz, b) 15 Hz, c) 25 Hz ve $R=0,1$; d) 5 Hz, e) 15 Hz ve f) 25 Hz



Şekil 3.57. 30,7 MPa gerilme genliği değerinde farklı yükleme frekanslarında gerçekleştirilen aksenal yorulma testleri sonucunda numune yüzeyinde test öncesi ve kırılma öncesi sıcaklık dağılımı; a) 5 Hz ve b) 10 Hz

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, eriyik karıştırma yöntemi kullanılarak elde edilen PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerin termal, kimyasal, mekanik ve yorulma davranışları genel deneysel incelemeye tabi tutulmuştur. Tez kapsamında incelenen PMMA/ABS harman numuneler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilirken, ABS/TPU harman numuneler ise eriyik yığma yöntemi ile üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalar iki ana kısımda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak üretilen polimer harman yapıların karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra harman yapıların mekanik özelliklerinin belirlendiği çekme testleri ve yorulma ömrü performansının belirlendiği yorulma testleri tamamlanmıştır. Harman yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde hem yapıyı oluşturan bileşenlerin bileşim oranı etkisi hem de birim şekil değiştirme hızı etkileri irdelenmiştir. Mekanik özellik üzerine incelemeler bileşim oranı ve birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimleri hem deneysel hem de ampirik bağıntılar ile ortaya koyulmasına yönelik çalışmaları içermektedir. Harman yapılarıdaki yorulma ömrü performansı ise bileşim oranı, gerilme oranı, yükleme frekansı gibi parametre etkilerini içerecek deneysel araştırmaları içermektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Polimer harmanların termal kararlılık davranışlarının incelendiği TGA analizlerinden elde edilen sonuçlar, saf PMMA'nın düşük termal kararlılık performansının ABS ilavesi ile iyileştiğini göstermiştir. Aynı zamanda termal kararlılıktaki iyileşmenin önemli göstergelerinden, TGA eğrilerinin türevlerinde gözlemlenen tepe noktalarına ait sıcaklıkların da harman malzemedeki artan ABS oranıyla arttığı bulunmuştur.
- ABS/TPU harman yapılarında ise termal kararlılık davranışının TPU katkı oranı ile büyük oranda değişmediği gözlemlenmiştir.
- Harman yapıların termal özelliklerinin ve karışabilirliğinin incelendiği DSC analizleri sonucunda, PMMA/ABS harmanlarda tek bir camsı geçiş sıcaklığının varlığı görülmüştür. PMMA/ABS harmanların tüm bileşim oranlarında sergilediği bu davranış nedeniyle karışabilir formda bir harman yapı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tüm bileşim oranı aralıkların PMMA/ABS

harman numunelerin saf PMMA ve saf ABS malzemenin sahip olduğu camsı geçiş sıcaklıkları aralığında bir değere sahip olduğu bulunmuştur.

- Eklemeli imalat ile üretilen ABS/TPU harmanlarda ise DSC analizleri sonucunda birden fazla camsı geçiş sıcaklığı içeren karışamaz formda bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu harman yapılarda ABS'nin yapısında bulunan stiren ve bütadiyen varlığından kaynaklanan camsı geçiş sıcaklıkları ile TPU'nun karakteristik yapısından gelen camsı geçiş sıcaklığı DSC eğrilerinde gözlemlenmiştir.
- Viskoelastik özelliklerden biri olan depolama modülünün PMMA/ABS harmanlarda saf PMMA ve saf ABS'ye kıyasla daha üstün değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuca bağlı olarak PMMA/ABS harmanların saf PMMA ve saf ABS'ye kıyasla daha elastik davranış bir yapıya sahip olduğunu ve bu yapısı nedeniyle PMMA/ABS harmanların daha üstün enerji depolama kapasitesinde karakteristik davranış göstereceği belirlenmiştir.
- Viskoelastik özelliklerin ABS/TPU harmanlarda bileşim oranına bağlı olarak değişimleri incelendiğinde, TPU sahip olduğu üstün elastik karakteristiği nedeniyle ABS içerisinde artan bileşim oranı ile depolama modülü ve kayıp modülünün ciddi oranda azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, kayıp faktörünün bileşim oranına bağlı olarak daha düşük bir tepe noktası değerine sahip olduğu gözlemlenmiş ve bu durumun malzemenin daha yüksek rijitliği ve bunun sonucunda da daha düşük viskoz davranışı nedeniyle meydana geldiği belirlenmiştir.
- Harman malzemelerin kimyasal yapılarının ve bileşim oranına bağlı olarak kimyasal yapısında gözlemlenen sönümlleme bantları, tepe nokta şiddetleri ve tepe noktaların oluştuğu dalga sayıları harmanı oluşturan saf polimerlerin FTIR analizleri yardımıyla irdelenmiştir. PMMA/ABS harman yapıların tüm bileşim oranlarında hem PMMA hem de ABS'nin karakteristik sönümlleme bantlarını ihtiva eden bir yapıda olduğu görülmüştür.
- Saf PMMA'yı temsil eden karakteristik tepe noktası şiddetlerinin PMMA oranına bağlı olarak artış/azalış eğilimi içerisinde olduğu ve benzer şekilde saf ABS'yi temsil eden karakteristik tepe noktalarına ait şiddetlerinde harman yapıdaki ABS oranına bağlı olarak artış/azalış eğilimi içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

- PMMA/ABS harman yapıdaki PMMA oranının %40, 60 ve 80 olduğu bileşimlerde 1723 cm^{-1} dalga sayısında çok belirgin ve yüksek şiddetli olarak görülen C=O sönümeleme bandı PMMA/ABS harmanlarda karışabilir faz meydana gelmesi durumunu destekleyen önemli bir bulgu olarak elde edilmiştir.
- PMMA/ABS harman numunelerde saf ABS ve saf PMMA malzemelerde gözlemlenmeyen 3434 cm^{-1} dalga sayısında belirgin yapıda bir hidrojen bağı (-OH-) belirlenmiştir. Harman malzemelerde gözlemlenen bu bağı etkisiyle depolama modülü değerlerinin ve mekanik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir.
- ABS/TPU harmanların FTIR eğrilerinden, yapı içerisinde artan TPU oranı sonucunda TPU ile ABS içerisindeki akrilonitril yapı arasında görülen polar gruplar arasında hidrojen bağı oluşum etkileşimlerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. ABS/TPU harmanlarda, harman yapıda bulunan karakteristik tepe noktası şiddetinin artan TPU oranı ile %20 oranına kadar artış gösterdiği ancak %30 oranda TPU içeren harman malzemedeki tepe noktası şiddetlerinin azalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun TPU etkisiyle yapıda oluşan sürekli fazlardan ileri geldiği belirlenmiştir.
- PMMA/ABS harmanların mekanik özelliklerine ait sonuçlardan, akma dayanımında harman bileşim oranına bağlı olarak değişimin net bir eğilim içermediği ancak yapıda artan PMMA oranına bağlı olarak belirli bir bileşim oranına kadar (%60) artış eğilimi içinde olduğu görülmüştür. Çekme dayanımları dikkate alındığında ise harman yapıda artan PMMA oranı ile çekme dayanımının giderek arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- PMMA/ABS harmanlarda mekanik özelliklerin dengeli ve üstün performans sergilediği harman yapının P40A60 ve P60A40 bileşim oranlarında elde edildiği söylenebilir. Bu bileşim oranlarındaki harman malzemelerin saf ABS'ye kıyasla üstün elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- PMMA/ABS harmanlarda birim şekil değiştirme hızı ile mekanik özelliklerin değişimi incelendiğinde saf ve harman yapıları numunelerde artan birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bileşim oranına bağlı olarak,

yapı içerisinde artan PMMA oranı ile mekanik özelliklerdeki artış eğiliminin azaldığı belirlenmiştir.

- Saf PMMA, saf ABS ve PMMA/ABS harman numunelerin yorulma ömrü performansları değerlendirildiğinde, harman yapıdaki numunelerin saf PMMA ve ABS'ye kıyasla daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Gerilme oranının 0,1 olduğu yükleme tipinde saf ABS'ye kıyasla çevrim sayısında yaklaşık % 115 oranında, gerilme oranının -1 olduğu yükleme tipinde ise çevrim sayısında % 218 oranında iyileşmenin PMMA/ABS harman yapı ile elde edildiği bulunmuştur.
- PMMA/ABS harman yapıda artan ABS bileşim oranı ile yorulma ömrü performansının doğrusal değişmediği, P40A60 harmanının ise $R=0,1$ gerilme oranına gerçekleştirilen yorulma testlerinde en üstün performansı sergilediği belirlenmiştir.
- Eklemeli imalat ile üretilen saf ABS ve ABS/TPU harman numunelerin yorulma ömrü performansları irdelendiğinde, en üstün performansı %10 oranında TPU içeren numunenin verdiği belirlenmiştir. A90T10 numune ile saf ABS'ye kıyasla çevrim sayısında %95 oranında iyileşme elde edildiği belirlenmiştir.
- A80T20 ve A70T30 kodlu ABS/TPU harman numunelerin saf ABS'ye kıyasla daha düşük yorulma ömrüne sahip olduğu belirlenmiştir.
- Enjeksiyon kalıplama ile üretim yönteminin önemli bir parametresi olan tutma basıncı ile P40A60 harman numunenin mekanik özelliklerinin ve yorulma ömrü performansının önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Yorulma ömründe görülen değişimin tutma basıncı ve gerilme genliğine bağlı olarak net bir eğilim içerisinde olmadığı gözlemlenmiştir. Yüksek gerilme genliğinde yüksek tutma basıncında üretilen numune üstün çevrim sayısına sahipken, düşük gerilme genliğinde ise düşük tutma basıncında üretilen numune üstün yorulma ömrü performansı sergilemiştir.
- Yorulma test frekansının artmasıyla hem tam tersinir hem de çeki/çeki yüklemesi altındaki testlerde numune yüzey sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Artan numune sıcaklığı ve yükleme frekansı sonucunda çevrim sayısının ciddi oranda düştüğü sonucuna ulaşılmıştır.

- R=-1 gerilme oranında yükleme frekansının 5 Hz'den 25 Hz'e çıkmasıyla numune yüzeyi sıcaklığı 3,1°C'den 30,5°C'ye ulaştığı belirlenmiş. Ayrıca evrim sayısının ise %84 oranında azalarak yorulma ömrü performansının kötüleştiği belirlenmiştir. R=0,1 gerilme oranında da numune yüzey sıcaklığı ciddi oranda artmamasına rağmen yükleme frekansının 5 Hz'den 25 Hz'e çıkmasıyla yorulma ömrünün %80 oranında azaldığı belirlenmiştir.
- Yorulma test frekansının artmasıyla hem tam tersinir hem de çeki/çeki yükleme tiplerindeki testlerde yer değiştirme genliğinin artış gösterdiği belirlenmiştir.



5. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların eriyik karıştırma ile üretilen polimer harman yapıların termal, viskoelastik, kimyasal, mekanik ve yorulma davranışlarının anlaşılmasında ve harman malzemelerin tasarım seçeneklerinde yorulma yüklemesi içeren mühendislik uygulamaları için kullanabilirliğinin değerlendirilmesine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların daha da ileri bir noktaya taşınması adına aşağıda sıralanan önerilerin dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

- PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların geniş bir şekil değiştirme hızı aralığında (düşük, orta ve yüksek) mekanik davranışları araştırılabilir.
- Harman numunelerin sayısal analizlerde modellenmesi amacıyla malzeme modellerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Deneysel çalışmalara ek olarak sayısal modeller oluşturularak mekanik ve yorulma davranışları sayısal analizler yardımıyla da incelenebilir.
- PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemelerde uyumlaştırıcı katkıların kimyasal, termomekanik, mekanik ve yorulma ömrü performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- PMMA/ABS ve ABS/TPU harman malzemeleri temel alan ayrı ayrı üçlü polimer harman yapılar oluşturulabilir ve bu yapıların karakterizasyon analizleri ile mekanik davranışları incelenebilir.
- Harman malzemelerin kimyasal, termomekanik, mekanik ve yorulma ömrü performanslarına toz, fiber gibi katkı malzemelerinin etkileri incelenebilir.
- PMMA, ABS ve TPU polimerlerin geri dönüştürülerek kullanımındaki fiziksel, termal ve mekanik davranışının irdelenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Üretilen PMMA/ABS ve ABS/TPU harman numunelerin kırılarak yeniden üretim döngüsündeki mekanik ve yorulma davranışları yeniden üretim sayısına bağlı olarak araştırılabilir.
- PMMA/ABS ve ABS/TPU harmanların bileşim oranına bağlı olarak tribolojik performansları araştırılabilir.

- Otomotiv sektöründe de sıklıkla kullanılması nedeniyle tez kapsamında incelenen harman yapıların tek eksenli yorulma davranışının yanı sıra titreşim yorulması performansı hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Abdel-Wahab, A. A., Ataya, S., & Silberschmidt, V. V. (2017). Temperature-dependent mechanical behaviour of PMMA: Experimental analysis and modelling. *Polymer Testing*, 58, 86-95.
- Agrawal, S., Patidar, D., Dixit, M., Sharma, K., & Saxena, N. S. (2010, June). Investigation of Thermo-mechanical Properties of PMMA. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 1249, No. 1, pp. 79-82)*. American Institute of Physics.
- Ahmad, S., Ahmad, S., & Agnihotry, S. A. (2007). Synthesis and characterization of in situ prepared poly (methyl methacrylate) nanocomposites. *Bulletin of Materials Science*, 30, 31-35.
- Ahmed, R. M. (2009). Optical study on poly (methyl methacrylate)/poly (vinyl acetate) blends. *International Journal of photoenergy*, 2009.
- Aid, S., Eddhahak, A., Khelladi, S., Ortega, Z., Chaabani, S., & Tcharkhtchi, A. (2019). On the miscibility of PVDF/PMMA polymer blends: Thermodynamics, experimental and numerical investigations. *Polymer Testing*, 73, 222-231.
- Ajitha, A. R., & Thomas, S. (2020). *Introduction: Polymer blends, thermodynamics, miscibility, phase separation, and compatibilization*. In *Compatibilization of polymer blends*. Amsterdam: Elsevier.
- Akkapeddi, M.K. (2014). *Commercial Polymer Blends*. In: Utracki, L., Wilkie, C. (eds) *Polymer Blends Handbook*. Dordrecht: Springer,
- Akkoyun, B. D. (2016). *Investigation of The Effects of Various Types of Plasticizers on The Properties of Polyester Polyol Based Thermoplastic Polyurethane*. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul
- Al-hydary, I., Manocha, L., & George, P. (2012). Preparation and characterization of PMMA-ABS Blend. *The Iraqi Journal of mechanical and material engineering*, 12(4), 709-722.
- Amjadi, M., & Fatemi, A. (2020). Tensile behavior of high-density polyethylene including the effects of processing technique, thickness, temperature, and strain rate. *Polymers*, 12(9), 1857.
- Amraei, J., & Katunin, A. (2022). Recent advances in limiting fatigue damage accumulation induced by self-heating in polymer–matrix composites. *Polymers*, 14(24), 5384.
- Anakabe, J., Zaldua Huici, A. M., Eceiza, A., & Arbelaiz, A. (2015). Melt blending of polylactide and poly (methyl methacrylate): Thermal and mechanical properties and phase morphology characterization. *Journal of applied polymer science*, 132(42).
- Aranda-García, F. J., González-Núñez, R., Jasso-Gastinel, C. F., & Mendizabal, E. (2015). Water absorption and thermomechanical characterization of extruded starch/poly

- (lactic acid)/agave bagasse fiber bioplastic composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- A.S.T.M. (2015). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *D638*. West Conshohocken: ASTM International
- A.S.T.M. (2017). Standard Test Method for Uniaxial Fatigue Properties of Plastics. *D7791*. West Conshohocken: ASTM International
- Avalle, M., & Romanello, E. (2018). Tribological characterization of modified polymeric blends. *Procedia Structural Integrity*, 8, 239-255.
- Aziz, S. B., Abdullah, O. G., Brza, M. A., Azawy, A. K., & Tahir, D. A. (2019). Effect of carbon nano-dots (CNDs) on structural and optical properties of PMMA polymer composite. *Results in Physics*, 15, 102776.
- Bajsić, E. G., Rek, V., & Pavić, B. O. (2013). The influence of talc content on the thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane/polypropylene blends. *Journal of Elastomers & Plastics*, 45(6), 501-522.
- Balamurugan, A., Kannan, S., Selvaraj, V., & Rajeswari, S. (2004). Development and spectral characterization of poly (methyl methacrylate)/hydroxyapatite composite for biomedical applications. *Trends Biomater. Artif. Organs*, 18(1), 41-45.
- Bandyopadhyay, A., Bose, S., & Das, S. (2015). 3D printing of biomaterials. *MRS bulletin*, 40(2), 108-115.
- Barlow, J. W., & Paul, D. R. (1981). Polymer blends and alloys—a review of selected considerations. *Polymer Engineering & Science*, 21(15), 985-996.
- Barron, V., Buggy, M., & McKenna, N. H. (2001). Frequency effects on the fatigue behaviour on carbon fibre reinforced polymer laminates. *Journal of materials science*, 36, 1755-1761.
- Beaumont, J. P., Nagel, R. L., & Sherman, R. (2002). *Successful injection molding: process, design, and simulation*. Hanser Gardner Publications
- Beesley, R., Chen, H., & Hughes, M. (2017). A novel simulation for the design of a low cycle fatigue experimental testing programme. *Computers & Structures*, 178, 105-118.
- Bera, M., & Maji, P. K. (2017). Effect of structural disparity of graphene-based materials on thermo-mechanical and surface properties of thermoplastic polyurethane nanocomposites. *Polymer*, 119, 118-133.
- Billah, K. M. M., Lorenzana, F. A., Martinez, N. L., Wicker, R. B., & Espalin, D. (2020). Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101299.

- Bîrcă, A., Gherasim, O., Grumezescu, V., & Grumezescu, A. M. (2019). *Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. In Materials for biomedical engineering.* United Kingdom: Elsevier.
- Biron, M. (2012). *Thermoplastics and thermoplastic composites.* Oxford: William Andrew.
- Biron, M. (2018). *Thermoplastics and thermoplastic composites.* Oxford: William Andrew.
- Bonda, S., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2014). Influence of compatibilizer on mechanical, morphological and rheological properties of PP/ABS blends. *Iranian Polymer Journal*, 23, 415-425.
- Boparai, K. S., Singh, R., Fabbrocino, F., & Fraternali, F. (2016). Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications. *Composites Part B: Engineering*, 106, 42-47.
- Braga, N. F., LaChance, A. M., Liu, B., Sun, L., & Passador, F. R. (2019). Influence of compatibilizer and carbon nanotubes on mechanical, electrical, and barrier properties of PTT/ABS blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(3), 121-125.
- Brostow, W. (2007). *Dynamic Mechanical Analysis: a practical introduction.* USA: CRC Press
- Bureau, M. N., Dickson, J. I., & Denault, J. (1998). Fatigue propagation behaviour of polystyrene/polyethylene blends. *Journal of Materials Science*, 33, 1405-1419.
- Carraher Jr, C. E., & Seymour, R. B. (2012). *Structure—property relationships in polymers.* New York: Plenum Press.
- Chakrabarti, R., Das, M., & Chakraborty, D. (2004). Physical, mechanical, and thermal properties of PVC/PMMA blends in relation to their morphologies. *Journal of applied polymer science*, 93(6), 2721-2730.
- Cheng, J., Wang, S., Chen, S., Zhang, J., & Wang, X. (2011). Properties and crystallization behavior of poly (vinylidene fluoride)(PVDF)/thermoplastic polyurethane elastomer (TPU) blends. *Desalination and Water Treatment*, 34(1-3), 184-189.
- Cheng, S. K., & Chen, C. Y. (2004). Mechanical properties and strain-rate effect of EVA/PMMA in situ polymerization blends. *European Polymer Journal*, 40(6), 1239-1248.
- Choi, C. H., Yoo, T. W., Hong, J. H., & Lim, Y. S. (1997). Recycling of Automotive Tail Lamp Assembly. *SAE transactions*, 384-390.
- Choochottiros, C., & Chin, I. J. (2013). Potential transparent PLA impact modifiers based on PMMA copolymers. *European polymer journal*, 49(4), 957-966.
- Cowie, J. M. G., & Arrighi, V. (2007). *Polymers: chemistry and physics of modern materials.* North West: CRC press.

- Daniels, C. A. (1989). *Polymers: structure and properties*. Basel: Technomic Publishing Co. Inc
- Dar, U. A., Xu, Y. J., Zakir, S. M., & Saeed, M. U. (2017). The effect of injection molding process parameters on mechanical and fracture behavior of polycarbonate polymer. *Journal of applied polymer science*, 134(7).
- Das, R., Kumar, R., Banerjee, S. L., & Kundu, P. P. (2014). Engineered elastomeric bio-nanocomposites from linseed oil/organoclay tailored for vibration damping. *RSC Advances*, 4(103), 59265-59274.
- De León, A. S., Domínguez-Calvo, A., & Molina, S. I. (2019). Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF). *Materials & Design*, 182, 108044.
- De Souza, A. M. C., Cucchiara, M. G., & Ereio, A. V. (2016). ABS/HIPS blends obtained from WEEE: Influence of processing conditions and composition. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(34).
- Desrousseaux, C., Cueff, R., Aumeran, C., Garrait, G., Mailhot-Jensen, B., Traoré, O., & Sautou, V. (2015). Fabrication of acrylonitrile-butadiene-styrene nanostructures with anodic alumina oxide templates, characterization and biofilm development test for *Staphylococcus epidermidis*. *PloS one*, 10(8)
- Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3), 69.
- Dhinesh, S. K., Arun, P. S., Senthil, K. K., & Megalingam, A. (2021). Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1175-1180.
- Díaz, M. F., Barbosa, S. E., & Capiati, N. J. (2007). Reactive compatibilization of PE/PS blends. Effect of copolymer chain length on interfacial adhesion and mechanical behavior. *Polymer*, 48(4), 1058-1065.
- Ding, J., Yue, Z., Sun, J., & Gao, J. (2018). Effects of nano-silicon dioxide surface modification on the morphology and mechanical properties of ABS/PMMA blends. *Journal of Polymer Engineering*, 38(7), 617-623.
- Dixit, M., Mathur, V., Gupta, S., Baboo, M., Sharma, K., & Saxena, N. S. (2009). Morphology, miscibility and mechanical properties of PMMA/PC blends. *Phase Transitions*, 82(12), 866-878.
- Dlamini, N. G., Fujimura, K., Yamasue, E., Okumura, H., & Ishihara, K. N. (2011). The environmental LCA of steel vs HDPE car fuel tanks with varied pollution control. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 410-419.
- Doner, S., Paswan, R., & Das, S. (2023). The influence of metallic particulate inclusions on the mechanical and thermal performance of 3D printable acrylonitrile-butadiene-

- styrene/thermoplastic polyurethane fused polymer blends. *Materials Today Communications*, 35, 106111.
- Dong, W., He, M., Wang, H., Ren, F., Zhang, J., Zhao, X., & Li, Y. (2015). PLLA/ABS blends compatibilized by reactive comb polymers: double T_g depression and significantly improved toughness. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(10), 2542-2550.
- Dunson, D. (2017). Characterization of polymers using dynamic mechanical analysis (DMA). *EAG Appl Note*.
- Elmarakbi, A. (2013). *Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness*. John Wiley & Sons.
- Essabir, H., El Mechtali, F. Z., Nekhlaoui, S., Raji, M., Bensalah, M. O., Rodrigue, D., ... & Qaiss, A. (2020). Compatibilization of PA6/ABS blend by SEBS-g-MA: morphological, mechanical, thermal, and rheological properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 1095-1111.
- Fang, H., Zhang, L., Chen, A., & Wu, F. (2022). Improvement of mechanical property for PLA/TPU blend by adding PLA-TPU copolymers prepared via in situ ring-opening polymerization. *Polymers*, 14(8), 1530.
- Farajian, J., Alipanahi, A., & Mahboubkhah, M. (2023). Analyses of mechanical properties and morphological behavior of additively manufactured ABS polymer, ABS/PBT blend, and ABS/PBT/CNT nanocomposite parts. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(6), 2390-2411.
- Folkes, M. J., & Hope, P. S. (Eds.). (1993). *Polymer blends and alloys*. London: Blackie Academic & Professional.
- Foltuț, D., Vălean, E., Dzitac, V., & Marșavina, L. (2023). The influence of temperature on the mechanical properties of 3D printed and injection molded ABS. *Materials Today: Proceedings*, 78, 210-213.
- Fowler, M. E., Barlow, J. W., & Paul, D. R. (1987). Effect of copolymer composition on the miscibility of blends of styrene-acrylonitrile copolymers with poly (methyl methacrylate). *Polymer*, 28(7), 1177-1184.
- Gao, D., Lv, J., & Lee, P. S. (2022). Natural polymer in soft electronics: opportunities, challenges, and future prospects. *Advanced Materials*, 34(25), 2105020.
- Ghosh, P. (2011). *Copolymerization and Techniques of Polymerization*. *Polymer Science and Technology: Plastics, Rubbers, Blends and Composites*, India: McGraw-Hill.
- Gkartzou, E., Koumoulos, E. P., & Charitidis, C. A. (2017). Production and 3D printing processing of bio-based thermoplastic filament. *Manufacturing Review*, 4, 1.
- Gómez, E. C., Almaraz, G. M. D., & Juárez, J. C. V. (2019). Crack initiation and propagation on CT specimens of two polymers (ABS and PMMA), under cyclic constant displacement loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 55-64.

- Gracia-Fernández, C. A., Gómez-Barreiro, S., López-Beceiro, J., Saavedra, J. T., Naya, S., & Artiaga, R. (2010). Comparative study of the dynamic glass transition temperature by DMA and TMDSC. *Polymer Testing*, 29(8), 1002-1006.
- Gupta, A. K., Jain, A. K., Ratnam, B. K., & Maiti, S. N. (1990). Studies on binary and ternary blends of polypropylene with ABS and LDPE. II. Impact and tensile properties. *Journal of applied polymer science*, 39(3), 515-530.
- Groenewoud, W. M. (Ed.). (2001). *Characterisation of polymers by thermal analysis*. United Kingdom: Elsevier.
- Haber, D. (2015). *Lightweight materials for automotive applications: a review*. SAE Technical Paper
- Hale, W. R., Pessan, L. A., Keskkula, H., & Paul, D. R. (1999). Effect of compatibilization and ABS type on properties of PBT/ABS blends. *Polymer*, 40(15), 4237-4250.
- Hambali, A., Sapuan, S. M., Ismail, N., & Nukman, Y. (2009). Application of analytical hierarchy process in the design concept selection of automotive composite bumper beam during the conceptual design stage. *Scientific Research and Essays*, 4(4), 198-211.
- Handge, U. A., Galeski, A., Kim, S. C., Dijkstra, D. J., Götz, C., Fischer, F., ... & Steininger, H. (2012). Melt processing, mechanical, and fatigue crack propagation properties of reactively compatibilized blends of polyamide 6 and acrylonitrile–butadiene–styrene copolymer. *Journal of applied polymer science*, 124(1), 740-754.
- Harrats, C., & Mekhilef, N. (2005). *Cocontinuous phase morphologies: predictions, generation, and practical applications*. In *Micro-and Nanostructured Multiphase Polymer Blend Systems*. New York: CRC Press.
- Harrats, C., Thomas, S., & Groeninckx, G. (Eds.). (2005). *Micro-and nanostructured multiphase polymer blend systems: phase morphology and interfaces*. CRC press.
- Harris, M., Potgieter, J., Ray, S., Archer, R., & Arif, K. M. (2020). Preparation and characterization of thermally stable ABS/HDPE blend for fused filament fabrication. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(2), 230-240.
- He, M., Zhang, D., Guo, J., & Wu, B. (2016). Dynamic mechanical properties, thermal, mechanical properties and morphology of long glass fiber-reinforced thermoplastic polyurethane/acrylonitrile–butadiene–styrene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(3), 425-439.
- Hirayama, D., & Saron, C. (2018). Morphologic and mechanical properties of blends from recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene. *Polymer*, 135, 271-278.
- Hoang, V. T., Tao, Q. B., Truong-Le, B. T., Tran, M. S., & Luu, D. B. (2021). Experimental study on mechanical behaviors of injection molded PC/PMMA blends. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(9), 3959-3966.

- Hoey, D., & Taylor, D. (2009). Comparison of the fatigue behaviour of two different forms of PMMA. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 32(3), 261-269.
- Hood, M. A., Wang, B., Sands, J. M., La Scala, J. J., Beyer, F. L., & Li, C. Y. (2010). Morphology control of segmented polyurethanes by crystallization of hard and soft segments. *Polymer*, 51(10), 2191-2198.
- Hou, X., & Siow, K. S. (2000). Mechanical properties and ionic conductivities of plasticized polymer electrolytes based on ABS/PMMA blends. *Polymer*, 41(24), 8689-8696.
- Howard, W. H. (1961). The glass temperatures of polyacrylonitrile and acrylonitrile–vinyl acetate copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 5(15), 303-307.
- Huang, M. C., & Tai, C. C. (2001). The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. *Journal of materials processing technology*, 110(1), 1-9.
- Huang, X., Nakagawa, S., Houjou, H., & Yoshie, N. (2021). Insights into the role of hydrogen bonds on the mechanical properties of polymer networks. *Macromolecules*, 54(9), 4070-4080.
- Hughes, J. M., Lugo, M., Bouvard, J. L., McIntyre, T., & Horstemeyer, M. F. (2017). Cyclic behavior and modeling of small fatigue cracks of a polycarbonate polymer. *International Journal of Fatigue*, 99, 78-86.
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., & Gorga, R. E. (2006). Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview. *Journal of Composite Materials*, 40(17), 1511-1575.
- Ionita, G., Ariciu, A. M., Turcu, I. M., & Chechik, V. (2014). Properties of polyethylene glycol/cyclodextrin hydrogels revealed by spin probes and spin labelling methods. *Soft Matter*, 10(11), 1778-1783.
- Idumah, C. I. (2021). Recent advancements in self-healing polymers, polymer blends, and nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 29(4), 246-258.
- Inberg, J. P. F., & Gaymans, R. J. (2002). Co-continuous polycarbonate/ABS blends. *Polymer*, 43(8), 2425-2434.
- Jadhav, G., Gaval, V., Divekar, M., & Darade, N. (2023). Effect of packing pressure on stagnation weld-line strength for thermoplastic semicrystalline glass fiber reinforced material. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(10), 3874-3890.
- Jagadeesh Chandra, R. B., Shivamurthy, B., Sathish Kumar, M., & Thimmappa, B. H. S. (2022). Mechanical, thermal and electromagnetic shielding effectiveness of MWCN-ABS films. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 1-9.
- Jakić, M., Vrandečić, N. S., & Klarić, I. (2013). Thermal degradation of poly (vinyl chloride)/poly (ethylene oxide) blends: Thermogravimetric analysis. *Polymer degradation and stability*, 98(9), 1738-1743.

- Jansen, K. M. B., Van Dijk, D. J., & Husselman, M. H. (1998). Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding. *Polymer Engineering & Science*, 38(5), 838-846.
- Jenkins, S., Jacob, K. I., & Kumar, S. (2000). The effect of hydrogen bonding on the physical and mechanical properties of rigid-rod polymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 38(23), 3053-3061.
- John, B., Varughese, K. T., Oommen, Z., Pötschke, P., & Thomas, S. (2003). Dynamic mechanical behavior of high-density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blends: The effects of the blend ratio, reactive compatibilization, and dynamic vulcanization. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(13), 2083-2099.
- Kalay, G., & Bevis, M. J. (1997). Processing and physical property relationships in injection-molded isotactic polypropylene. 1 Mechanical properties. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 35(2), 241-263.
- Kamber, Ö. Ş. (2008). *Plastik enjeksiyon kalıplarında basınç ve sıcaklık parametrelerinin ürün kalitesine etkileri ve Taguchi yöntemi ile optimizasyonu*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Katunin, A. (2018). Criticality of the self-heating effect in polymers and polymer matrix composites during fatigue, and their application in non-destructive testing. *Polymers*, 11(1), 19.
- Kausar, A. (2018). A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 34(1), 60-97.
- Khan, R. M., & Acharya, G. (2016). Plastic injection molding process and its aspects for quality: a review. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 3(4), 66-70.
- Khun, N. W., & Liu, E. (2013). Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *Journal of Polymer Engineering*, 33(6), 535-543.
- Kiani, P., Sedighi, M., Kasaeian-Naeini, M., & Jabbari, A. H. (2023). High cycle fatigue behavior and thermal properties of PLA/PCL blends produced by fused deposition modeling. *Journal of Polymer Research*, 30(7), 264.
- Kim, B. K., Choi, C. H., & Xie, X. M. (1996). ABS ternary blends: Morphology, surface gloss, and mechanical properties. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 35(5), 829-841.
- Kim, B. K., Shin, G. S., Kim, Y. J., & Park, T. S. (1993a). Miscible and immiscible blends of ABS with PMMA. II. Mechanical and surface properties. *Journal of applied polymer science*, 47(9), 1581-1587.
- Kim, G. M., Laatsch, J., Michler, G. H., Arndt, T., & Sufke, T. (1998). Investigation of the micromechanical deformation behaviour of transparent toughened poly

- (methylmethacrylate) modified with core-shell particles. *Polymers for Advanced Technologies*, 9(10), 716-720.
- Kim, Y. J., Shin, G. S., Lee, I. T., & Kim, B. K. (1993b). Miscible and immiscible blends of ABS with PMMA. I. Morphology and rheology. *Journal of applied polymer science*, 47(2), 295-304.
- Kitayama, S. (2022). Process parameters optimization in plastic injection molding using metamodel-based optimization: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11), 7117-7145.
- Koga, S., Straub, D., Diagne, M., & Krstic, M. (2020). Stabilization of filament production rate for screw extrusion-based polymer three-dimensional-printing. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 142(3), 031005.
- Koning, C., Van Duin, M., Pagnoulle, C., & Jerome, R. (1998). Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in polymer science*, 23(4), 707-757.
- Korobeinichev, O. P., Paletsky, A. A., Gonchikzhapov, M. B., Glaznev, R. K., Gerasimov, I. E., Naganovsky, Y. K., ... & Vinu, R. (2019). Kinetics of thermal decomposition of PMMA at different heating rates and in a wide temperature range. *Thermochimica Acta*, 671, 17-25.
- Krache, R., & Debbah, I. (2011). Some mechanical and thermal properties of PC/ABS blends. *Materials Sciences and Applications*, 2(5), 404-410.
- Kudva, R. A., Keskkula, H., & Paul, D. R. (2000). Properties of compatibilized nylon 6/ABS blends: Part I. Effect of ABS type. *Polymer*, 41(1), 225-237.
- Kumar, P., Narayan Maiti, U., Sikdar, A., Kumar Das, T., Kumar, A., & Sudarsan, V. (2019). Recent advances in polymer and polymer composites for electromagnetic interference shielding: review and future prospects. *Polymer Reviews*, 59(4), 687-738.
- Kumaraswamy, G. N., Ranganathaiah, C., Urs, M. D., & Ravikumar, H. B. (2006). Miscibility and phase separation in SAN/PMMA blends investigated by positron lifetime measurements. *European polymer journal*, 42(10), 2655-2666.
- Kuo, S. W. (2008). Hydrogen-bonding in polymer blends. *Journal of Polymer Research*, 15, 459-486.
- Kurt, M., Kamber, O. S., Kaynak, Y., Atakok, G., & Girit, O. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials & Design*, 30(8), 3217-3224.
- Kuzmanović, M., Delva, L., Cardon, L., & Ragaert, K. (2016). The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*, 8(10), 355.

- Kwon, H. J., Jar, P. Y. B., & Xia, Z. (2004). Residual toughness of poly (acrylonitrile-butadiene-styrene)(ABS) after fatigue loading—effect of uniaxial fatigue loading. *Journal of materials science*, 39, 4821-4828.
- La Mantia, F. P., Morreale, M., Botta, L., Mistretta, M. C., Ceraulo, M., & Scaffaro, R. (2017). Degradation of polymer blends: A brief review. *Polymer Degradation and Stability*, 145, 79-92.
- Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341.
- Lee, H. G., Sung, Y. T., Lee, Y. K., Kim, W. N., Yoon, H. G., & Lee, H. S. (2009). Effects of PP-g-MAH on the mechanical, morphological and rheological properties of polypropylene and poly (acrylonitrile-butadiene-styrene) blends. *Macromolecular Research*, 17, 417-423.
- Lee, S. I., Hahn, Y. B., Nahm, K. S., & Lee, Y. S. (2005). Synthesis of polyether-based polyurethane-silica nanocomposites with high elongation property. *Polymers for advanced technologies*, 16(4), 328-331.
- Lee, S. K., Cho, S. S., Kang, L. S., Lee, C. G., & Hong, H. S. (2012). Mechanical properties and fracture morphology of blends of PC with PMMA. *International Polymer Processing*, 27(5), 626-630.
- Lesser, A. J. (1995). Changes in mechanical behavior during fatigue of semicrystalline thermoplastics. *Journal of applied polymer science*, 58(5), 869-879.
- Lewis, C. L., Stewart, K., & Anthamatten, M. (2014). The influence of hydrogen bonding side-groups on viscoelastic behavior of linear and network polymers. *Macromolecules*, 47(2), 729-740.
- Leyva-Porras, C., Balderrama-Aguilar, A., Estrada-Ávila, Y., Espelosín-Gómez, I., Mendoza-Duarte, M., Piñón-Balderrama, C., ... & Estrada-Moreno, I. (2021). Injection molding of low-density polyethylene (LDPE) as a model polymer: Effect of molding parameters on the microstructure and crystallinity. *Polymers*, 13(20), 3597.
- Li, J., Chen, F., Yang, L., Jiang, L., & Dan, Y. (2017). FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 184, 361-367.
- Li, X. D., & Goh, S. H. (2002). Hydrogen Bonding Interaction and Miscibilization of Ternary Blends of Poly (2-vinylpyridine), Poly (N-vinyl-2-pyrrolidone), and 4, 4'-(1, 4-Phenylenediisopropylidene) bisphenol. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 203(16), 2334-2343.

- Li, Y., & Shimizu, H. (2009). Improvement in toughness of poly (l-lactide)(PLLA) through reactive blending with acrylonitrile–butadiene–styrene copolymer (ABS): Morphology and properties. *European Polymer Journal*, 45(3), 738-746.
- Lin, T. A., Lin, J. H., & Bao, L. (2020). Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: Mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5304-5312.
- Liu, G., Liao, Y., & Ma, X. (2017). Thermal behavior of vehicle plastic blends contained acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) in pyrolysis using TG-FTIR. *Waste Management*, 61, 315-326.
- Liu, W., Qiu, J., Fei, M. E., Qiu, R., & Sakai, E. (2018). Manufacturing of thermally remoldable blends from epoxidized soybean oil and poly (lactic acid) via dynamic cross-linking in a twin-screw extruder. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(22), 7516-7524.
- Liu, X. Q., Bao, R. Y., Liu, Z. Y., Yang, W., Xie, B. H., & Yang, M. B. (2013). Effect of nano-silica on the phase inversion behavior of immiscible PA6/ABS blends. *Polymer testing*, 32(1), 141-149.
- Liu, X. Q., Yang, W., Xie, B. H., & Yang, M. B. (2012). Influence of multiwall carbon nanotubes on the morphology, melting, crystallization and mechanical properties of polyamide 6/acrylonitrile–butadiene–styrene blends. *Materials & Design*, 34, 355-362.
- Lugo, M., Fountain, J. E., M. Hughes, J., Bouvard, J. L., & Horstemeyer, M. F. (2014). Microstructure-based fatigue modeling of an acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(20).
- Luna, C. B. B., Siqueira, D. D., Araújo, E. M., do Nascimento, E. P., & da Costa Agra de Melo, J. B. (2022). Evaluation of the SEBS copolymer in the compatibility of PP/ABS blends through mechanical, thermal, thermomechanical properties, and morphology. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(1), 111-124.
- Luna, C. B. B., Siqueira, D. D., Ferreira, E. D. S. B., Araujo, E. M., & Wellen, R. M. R. (2021). Effect of injection parameters on the thermal, mechanical and thermomechanical properties of polycaprolactone (PCL). *Journal of Elastomers & Plastics*, 53(8), 1045-1062.
- Lyu, M. Y., & Choi, T. G. (2015). Research trends in polymer materials for use in lightweight vehicles. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 16, 213-220.
- Ma, J. (2023). The influence of processing conditions on the mechanical properties of poly (acrylonitrile-butadiene-styrene)/poly (methyl methacrylate)(ABS/PMMA) blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 62(4), 153-171.

- Ma, M., Yu, C., Bai, L., Chen, S., Shi, Y., He, H., & Xu, W. (2022). Fatigue resistance and failure behavior of reaction compatibilized PC/ABS blends under tensile cyclic loading. *Journal of Polymer Research*, 29(7), 282.
- Mamat, A., Vu-Khanh, T., Cigana, P., & Favis, B. D. (1997). Impact fracture behavior of nylon-6/ABS blends. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 35(16), 2583-2592.
- Mao, Z., Zhang, X., Jiang, G., & Zhang, J. (2019). Fabricating sea-island structure and co-continuous structure in PMMA/ASA and PMMA/CPE blends: Correlation between impact property and phase morphology. *Polymer Testing*, 73, 21-30.
- Marin, N., & Favis, B. D. (2002). Co-continuous morphology development in partially miscible PMMA/PC blends. *Polymer*, 43(17), 4723-4731.
- Marissen, R., Schudy, D., Kemp, A. V. J. M., Coolen, S. M. H., Duijzings, W. G., Van Der Pol, A., & Van Gulick, A. J. (2001). The effect of material defects on the fatigue behaviour and the fracture strain of ABS. *Journal of materials science*, 36, 4167-4180.
- Martuscelli, E. (Ed.). (2012). *Polymer blends: Processing, morphology, and properties*. New York: Plenum Press.
- Massé, H., Arquis, E., Delaunay, D., Quilliet, S., & Le Bot, P. H. (2004). Heat transfer with mechanically driven thermal contact resistance at the polymer–mold interface in injection molding of polymers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(8-9), 2015-2027.
- Massy, J., & Massy, J. (2017). *Thermoplastic and thermosetting polymers. A Little Book about BIG Chemistry: The Story of Man-Made Polymers*, Norwich: Springer
- Mellott, S. R., & Fatemi, A. (2014). Fatigue behavior and modeling of thermoplastics including temperature and mean stress effects. *Polymer Engineering & Science*, 54(3), 725-738.
- Memarian, F., Fereidoon, A., Ghorbanzadeh Ahangari, M., & Ali Khonakdar, H. (2018). Shape memory and mechanical properties of TPU/ABS blends: The role of pristine versus organo-modified carbon nanotubes. *Polymer Composites*, 39(S2), E984-E995.
- Menard, K. P., & Menard, N. (2020). *Dynamic mechanical analysis*. United Kingdom: CRC press.
- Meng, X., Bocharova, V., Tekinalp, H., Cheng, S., Kisliuk, A., Sokolov, A. P., ... & Ozcan, S. (2018). Toughening of nanocellulose/PLA composites via bio-epoxy interaction: Mechanistic study. *Materials & Design*, 139, 188-197.
- Mittal, V. (Ed.). (2012). *Functional polymer blends: synthesis, properties, and performance*. Northwest: CRC Press.

- Mofokeng, T. G., Ojijo, V., & Ray, S. S. (2016). The influence of blend ratio on the morphology, mechanical, thermal, and rheological properties of PP/LDPE blends. *Macromolecular Materials and Engineering*, 301(10), 1191-1201.
- Mortazavian, S., & Fatemi, A. (2016). Effects of mean stress and stress concentration on fatigue behavior of short fiber reinforced polymer composites. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 39(2), 149-166.
- Mortazavian, S., Fatemi, A., Mellott, S. R., & Khosrovaneh, A. (2015). Effect of cycling frequency and self-heating on fatigue behavior of reinforced and unreinforced thermoplastic polymers. *Polymer Engineering & Science*, 55(10), 2355-2367.
- Muccio, E. A. (1994). *Plastics processing technology*. USA: ASM international.
- Mukherji, D., & Abrams, C. F. (2009). Mechanical behavior of highly cross-linked polymer networks and its links to microscopic structure. *Physical Review E*, 79(6), 061802.
- Munteanu, S. B., & Vasile, C. (2005). Spectral and thermal characterization of styrene-butadiene copolymers with different architectures. *Journal of Optoelectronics and Advanced materials*, 7(6), 3135.
- Mura, A., Ricci, A., & Canavese, G. (2018). Investigation of fatigue behavior of ABS and PC-ABS polymers at different temperatures. *Materials*, 11(10), 1818.
- Na, M., & Rhee, S. W. (2006). Electronic characterization of Al/PMMA [poly (methyl methacrylate)]/p-Si and Al/CEP (cyanoethyl pullulan)/p-Si structures. *Organic electronics*, 7(4), 205-212.
- Nazari, T., & Garmabi, H. (2012). Effect of organoclays on the rheological and morphological properties of poly (acrylonitrile-butadiene-styrene)/poly (methyl methacrylate)/clay nanocomposites. *Polymer composites*, 33(11), 1893-1902.
- Nazari, T., Garmabi, H., & Arefazar, A. (2012). Effect of clay modification on the morphology and the mechanical/physical properties of ABS/PMMA blends. *Journal of applied polymer science*, 126(5), 1637-1649.
- Nian, S. C., Li, M. H., & Huang, M. S. (2015). Warpage control of headlight lampshades fabricated using external gas-assisted injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 358-368.
- Nofar, M., Sacligil, D., Carreau, P. J., Kamal, M. R., & Heuzey, M. C. (2019). Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications. *International journal of biological macromolecules*, 125, 307-360.
- OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. Paris: OECD Publishing.
- Olabisi, O., Robeson, L. M., & Shaw, M. T. (1979). *Polymer-Polymer Miscibility*. New York: Academic Press.

- Oral, M. A. (2019). *Production and characterization of polyester/poly (methyl methacrylate) and acrylonitrile butadiene styrene terblends and nanocomposites*. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Özcelik, B. (2011). Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(8), 1067-1072.
- Pantani, R., Coccorullo, I., Speranza, V., & Titomanlio, G. (2007). Morphology evolution during injection molding: Effect of packing pressure. *Polymer*, 48(9), 2778-2790.
- Parameswaranpillai, J., Joseph, G., Sidhardhan, S. K., Jose, S., & Hameed, N. (2016). Miscibility, UV resistance, thermal degradation, and mechanical properties of PMMA/SAN blends and their composites with MWCNTs. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(30).
- Parameswaranpillai, J., Thomas, S., & Grohens, Y. (2014). *Polymer blends: state of the art, new challenges, and opportunities*. New Jersey: Wiley
- Patil, A., Patel, A., & Purohit, R. (2017). An overview of polymeric materials for automotive applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3807-3815.
- Paul, D. R. (2012). *Polymer Blends* (Vol. 2). New York: Academic Press.
- Pawde, S. M., & Deshmukh, K. (2009). Investigation of the structural, thermal, mechanical, and optical properties of poly (methyl methacrylate) and poly (vinylidene fluoride) blends. *Journal of applied polymer science*, 114(4), 2169-2179.
- Peters, E. N. (2015). *Thermoplastics, thermosets, and elastomers—Descriptions and properties*. *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*, New Jersey: Wiley
- Pinnavaia, T. J., & Beall, G. W. (2000). *Polymer-clay nanocomposites*. United Kingdom: John Wiley & Sons Inc
- Pokharel, P., & Choi, S. (2015). The effect of hard segment length on the thermal and mechanical properties of polyurethane/graphene oxide nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 168-177.
- Poomalai, P., Ramaraj, B., & Siddaramaiah. (2007). Thermal and mechanical properties of poly (methyl methacrylate) and ethylene vinyl acetate copolymer blends. *Journal of applied polymer science*, 106(1), 684-691.
- Pracella, M. (2017). *Blends and alloys*. In *Modification of Polymer Properties*. Norwich: William Andrew Publishing.
- Presting, H., & König, U. (2003). Future nanotechnology developments for automotive applications. *Materials Science and Engineering: C*, 23(6-8), 737-741.
- Quan, H., Zhang, B. Q., Zhao, Q., Yuen, R. K., & Li, R. K. (2009). Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic

- polyurethane (TPU) nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(9), 1506-1513.
- Ramesh, S., Leen, K. H., Kumutha, K., & Arof, A. K. (2007). FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 66(4-5), 1237-1242.
- Rauwendaal, C. (2014). *Important polymer properties. Polymer Extrusion*, 5th ed.; Rauwendaal, C., Ed.; Munich: Hanser.
- Reinaldo, J. S., Pereira, L. M., dos Santos Silva, E., Ueki, M. M., & Ito, E. N. (2018). Effect of the chemical structure on the linear viscoelastic behavior of acrylic and styrenic polymer blends. *Polymer Testing*, 67, 257-265.
- Reinaldo, J. S., Pereira, L. M., Silva, E. S., Macedo, T. C., Damasceno, I. Z., & Ito, E. N. (2020). Thermal, mechanical and morphological properties of multicomponent blends based on acrylic and styrenic polymers. *Polymer Testing*, 82, 106265.
- Ren, J., & Yu, D. (2018). Effects of enhanced hydrogen bonding on the mechanical properties of poly (vinyl alcohol)/carbon nanotubes nanocomposites. *Composite Interfaces*, 25(3), 205-219.
- Ren, J., Wang, H., Jian, L., Zhang, J., & Yang, S. (2008). Morphological, thermal and mechanical properties of compatibilized nylon 6/ABS blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 47(4), 712-722.
- Rigotti, D., Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2021). Low-cycle fatigue behavior of flexible 3D printed thermoplastic polyurethane blends for thermal energy storage/release applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(3), 49704.
- Ritchie, R. O. (1999). Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International journal of Fracture*, 100, 55-83.
- Ritsema van Eck, G. C., Chiappisi, L., & De Beer, S. (2022). Fundamentals and applications of polymer brushes in air. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(5), 3062-3087.
- Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2012). *Injection molding handbook*. New York: Springer Science & Business Media.
- Roy, P., Tadele, D., Defersha, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2019). Environmental and economic prospects of biomaterials in the automotive industry. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1535-1548.
- Rudnik, E. (2019). *Compostable polymer materials*. Oxford: Elsevier
- Rühl, A., Kolling, S., & Schneider, J. (2017). Characterization and modeling of poly (methyl methacrylate) and thermoplastic polyurethane for the application in laminated setups. *Mechanics of Materials*, 113, 102-111.
- Rybníček, J., Lach, R., Lapčíková, M., Steidl, J., Krulis, Z., Grellmann, W., & Slouf, M. (2008). Increasing recyclability of PC, ABS and PMMA: Morphology and fracture

- behavior of binary and ternary blends. *Journal of applied polymer science*, 109(5), 3210-3223.
- Sadiku, E. R., & Ogunniran, E. S. (2014). *Compatibilization as a Tool for Nanostructure Formation. In Nanostructured Polymer Blends*. William Andrew Publishing.
- Saggu, M., Levinson, N. M., & Boxer, S. G. (2012). Experimental quantification of electrostatics in X–H $\cdots$ π hydrogen bonds. *Journal of the American Chemical Society*, 134(46), 18986-18997.
- Sain, S., Ray, D., Mukhopadhyay, A., Sengupta, S., Kar, T., Ennis, C. J., & Rahman, P. K. (2012). Synthesis and characterization of PMMA-cellulose nanocomposites by in situ polymerization technique. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(S1), E127-E134.
- Santiago Cintrón, M., & Hinchliffe, D. J. (2015). FT-IR examination of the development of secondary cell wall in cotton fibers. *Fibers*, 3(1), 30-40.
- Sapuan, S. M., Jacob, M. S. D., Mustapha, F., & Ismail, N. (2002). A prototype knowledge-based system for material selection of ceramic matrix composites of automotive engine components. *Materials & design*, 23(8), 701-708.
- Saxena, D., & Maiti, P. (2021). Utilization of ABS from plastic waste through single-step reactive extrusion of LDPE/ABS blends of improved properties. *Polymer*, 221, 123626.
- Schalnat, J., Daelemans, L., De Baere, I., De Clerck, K., & Van Paepegem, W. (2021). Long-term stiffness prediction of particle filled polymers by dynamic mechanical analysis: Frequency sweep versus creep method. *Polymer Testing*, 103, 107368.
- Seow, L. W., & Lam, Y. C. (1997). Optimizing flow in plastic injection molding. *Journal of materials processing technology*, 72(3), 333-341.
- Setiawan, A. H., & Roziyanto, A. N. (2016). Utilization of poly (methyl methacrylate) rejection blended with acrylonitrile butadiene styrene resins and the effect on product properties. *Journal of Leather, Rubber, and Plastics*, 32(2), 111-116.
- Shabbir, S., Zulfiqar, S., Al-Amri, I. S., & Sarwar, M. I. (2013). Enhancement of thermal stability, processability and morphology of polystyrene blends. *Thermochimica Acta*, 573, 213-219.
- Sharififard, H., Soleimani, M., & Ashtiani, F. Z. (2014). Evaluation of chitosan flakes as adsorbent for palladium and platinum recovery from binary dilute solutions. *International journal of global warming*, 6(2-3), 303-314.
- Shen, Y. K., Liu, J. J., Chang, C. T., & Chiu, C. Y. (2002). Comparison of the results for semisolid and plastic injection molding process. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(1), 97-105.

- Shi, X., Chen, B., Tuo, X., Gong, Y., & Guo, J. (2021). Study on performance characteristics of fused deposition modeling 3D-printed composites by blending and lamination. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(9), 32495.
- Shojaei, A. K., & Volgers, P. (2017). Fatigue damage assessment of unfilled polymers including self-heating effects. *International Journal of Fatigue*, 100, 367-376.
- Shrestha, R., Simsiriwong, J., & Shamsaei, N. (2017). Fatigue modeling for a thermoplastic polymer under mean strain and variable amplitude loadings. *International Journal of Fatigue*, 100, 429-443.
- Simsiriwong, J., Shrestha, R., Shamsaei, N., Lugo, M., & Moser, R. D. (2015). Effects of microstructural inclusions on fatigue life of polyether ether ketone (PEEK). *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 51, 388-397.
- Singh, G., Pradhan, M. K., & Verma, A. (2015). Effect of injection moulding process parameter on tensile strength using Taguchi method. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 9(10), 1844-1849.
- Soltanmohammadi, K., Rahmatabadi, D., Aberoumand, M., Soleyman, E., Ghasemi, I., Baniassadi, M., ... & Baghani, M. (2024). Effects of TPU on the mechanical properties, fracture toughness, morphology, and thermal analysis of 3D-printed ABS-TPU blends by FDM. *Journal of Vinyl and Additive Technology*.
- Song, H., Yang, S., Sun, S., & Zhang, H. (2013). Effect of miscibility and crystallization on the mechanical properties and transparency of PVDF/PMMA blends. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(3), 221-227.
- Song, P., & Wang, H. (2020). High-performance polymeric materials through hydrogen-bond cross-linking. *Advanced Materials*, 32(18), 1901244.
- Subramanian, M. N. (2017). *Polymer blends and composites: chemistry and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Suresha, B., & Lee, J. H. (2008). Mechanical and three-body abrasive wear behaviour of PMMA/TPU blends. *Materials Science and Engineering: A*, 492(1-2), 486-490.
- Suzuki, M., & Wilkie, C. A. (1995). The thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymers as studied by TGA/FTIR. *Polymer Degradation and Stability*, 47(2), 217-221.
- Tan, L. J., Zhu, W., & Zhou, K. (2020). Recent progress on polymer materials for additive manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 30(43), 2003062.
- Tang, L., Wang, L., Chen, P., Fu, J., Xiao, P., Ye, N., & Zhang, M. (2018). Toughness of ABS/PBT blends: The relationship between composition, morphology, and fracture behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(13), 46051.
- Tang, S. H., Kong, Y. M., Sapuan, S. M., Samin, R., & Sulaiman, S. (2006). Design and thermal analysis of plastic injection mould. *Journal of materials processing technology*, 171(2), 259-267.

- Teoh, E. L., & Chow, W. S. (2018). Transparency, ultraviolet transmittance, and miscibility of poly (lactic acid)/poly (methyl methacrylate) blends. *Journal of Elastomers & Plastics*, 50(7), 596-610.
- Thakur, S., & Karak, N. (2014). Ultratough, ductile, castor oil-based, hyperbranched, polyurethane nanocomposite using functionalized reduced graphene oxide. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(5), 1195-1202.
- Thavornnyutikarn, B., Aumnate, C., Kosorn, W., Nampichai, N., & Janvikul, W. (2023). Acrylonitrile butadiene styrene/thermoplastic polyurethane blends for material extrusion three-dimensional printing: effects of blend composition on printability and properties. *ACS omega*, 8(47), 45013-45025.
- Thomas, S., Grohens, Y., & Jyotishkumar, P. (Eds.). (2014). *Characterization of polymer blends: miscibility, morphology and interfaces*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Thomas, S., Harrats, C., & Groeninckx, G. (2005). Micro-and nanostructured polymer blends: State of the art, challenges, and future prospects. *Micro-and Nanostructured Multiphase Polymer Blend Systems*, 1-42.
- Todo, M., Takahashi, J., Watanabe, H., Nakamoto, J., & Arakawa, K. (2006). Effect of loading-rate on fracture micromechanism of methylmethacrylate–butadiene–styrene polymer blend. *Polymer*, 47(13), 4824-4830.
- Torres-Huerta, A. M., Palma-Ramírez, D., Domínguez-Crespo, M. A., Del Angel-López, D., & De La Fuente, D. (2014). Comparative assessment of miscibility and degradability on PET/PLA and PET/chitosan blends. *European Polymer Journal*, 61, 285-299.
- Tsagkalias, I. S., Manios, T. K., & Achilias, D. S. (2017). Effect of graphene oxide on the reaction kinetics of methyl methacrylate in situ radical polymerization via the bulk or solution technique. *Polymers*, 9(9), 432.
- Tsai, C. C., & Lu, C. H. (1998). Multivariable self-tuning temperature control for plastic injection molding process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(2), 310-318.
- Uribe-Arocha, P., Mehler, C., Puskas, J. E., & Altstädt, V. (2003). Effect of sample thickness on the mechanical properties of injection-molded polyamide-6 and polyamide-6 clay nanocomposites. *Polymer*, 44(8), 2441-2446.
- URL-1. (2024, Şubat 06). Thermoplastic material classification: https://www.pollen.am/high_performance_thermoplastics_general_introduction/ adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Şubat 06). Differential Scanning Calorimetry (DSC): <https://www.surfacesciencwestern.com/analytical-services/differential-scanning-calorimetry-dsc/> adresinden alınmıştır.
- Utracki, L. A. (2003). *Introduction to polymer blends. Polymer blends handbook*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- Utracki, L. A., & Favis, B. D. (1989). *Polymer alloys and blends. Handbook of polymer science and technology*, New York: Marcel Dekker Inc.
- Utracki, L. A., & Wilkie, C. A. (Eds.). (2002). *Polymer blends handbook*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Utracki, L. A., & Wilkie, C. A. (Eds.). (2014). *Polymer blends handbook* (Vol. 2). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vadori, R., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2017). Statistical optimization of compatibilized blends of poly (lactic acid) and acrylonitrile butadiene styrene. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(9).
- Vazquez, Y. V., & Barbosa, S. E. (2018). Compatibilization of HIPS/ABS blends from WEEE by using Styrene-Butadiene Rubber (SBR). *Journal of environmental management*, 217, 381-390.
- Vigild, M. E., Chu, C., Sugiyama, M., Chaffin, K. A., & Bates, F. S. (2001). Influence of shear on the alignment of a lamellae-forming pentablock copolymer. *Macromolecules*, 34(4), 951-964.
- Visakh, P. M., Markovic, G., & Pasquini, D. (2017). *Recent developments in polymer, macro micro and nano blends. Recent Developments in Polymer Macro, Micro and Nano Blends*. Amsterdam: Elsevier.
- Wang, F. C., Feve, M., Lam, T. M., & Pascault, J. P. (1994). FTIR analysis of hydrogen bonding in amorphous linear aromatic polyurethanes. I. Influence of temperature. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 32(8), 1305-1313.
- Wang, S. H., Gao, J., Fei, G. R., Zhang, P., Huang, J., & Xu, L. L. (2014). Effect of Compatibilizer and Flexibilizer on the Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)/Poly (Methyl Methacrylate) Blends. *Applied Mechanics and Materials*, 496, 317-321.
- Wen, G., Li, X., Liao, Y., & An, L. (2003). Surface phase separations of PMMA/SAN blends investigated by atomic force microscopy. *Polymer*, 44(14), 4035-4045.
- White, R. P., Lipson, J. E., & Higgins, J. S. (2012). How pure components control polymer blend miscibility. *Macromolecules*, 45(21), 8861-8871.
- Wiese, M., Thiede, S., & Herrmann, C. (2020). Rapid manufacturing of automotive polymer series parts: A systematic review of processes, materials and challenges. *Additive Manufacturing*, 36, 101582.
- Wilkie, C. A. (1999). TGA/FTIR: an extremely useful technique for studying polymer degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 66(3), 301-306.
- Wu, H., Ma, G., & Xia, Y. (2004). Experimental study of tensile properties of PMMA at intermediate strain rate. *Materials Letters*, 58(29), 3681-3685.

- Xu, D., Lu, H., Huang, Q., Deng, B., & Li, L. (2018). Flame-retardant effect and mechanism of melamine phosphate on silicone thermoplastic elastomer. *RSC Advances*, 8(9), 5034-5041.
- Xu, Y., Petrovic, Z., Das, S., & Wilkes, G. L. (2008). Morphology and properties of thermoplastic polyurethanes with dangling chains in ricinoleate-based soft segments. *Polymer*, 49(19), 4248-4258.
- Xue, M. L., Yu, Y. L., Chuah, H. H., Rhee, J. M., & Lee, J. H. (2008). Melting and crystallization behaviors of compatibilized poly (trimethylene terephthalate)/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *Journal of applied polymer science*, 108(5), 3334-3345.
- Yadav, R., Pancharya, A., & Kant, R. (2021). Influence of injection and holding pressure on tribological and mechanical behavior of injection moulded thermoplastic. *Materials Today: Proceedings*, 41, 915-920.
- Yang, Z., & Han, C. D. (2008). Rheology of miscible polymer blends with hydrogen bonding. *Macromolecules*, 41(6), 2104-2118.
- Zanchin, G., & Leone, G. (2021). Polyolefin thermoplastic elastomers from polymerization catalysis: Advantages, pitfalls and future challenges. *Progress in Polymer Science*, 113, 101342.
- Zdrazilova, N., Hausnerova, B., Kitano, T., & Saha, P. (2004). Rheological behaviour of PP/PET and modified PP/PET blends. II. Dynamic viscoelastic properties. *Polymers and Polymer Composites*, 12(5), 433-447.
- Zeltmann, S. E., Kumar, B. B., Doddamani, M., & Gupta, N. (2016). Prediction of strain rate sensitivity of high density polyethylene using integral transform of dynamic mechanical analysis data. *Polymer*, 101, 1-6.
- Zhang, A., Zhao, G., & Guan, Y. (2015). Effects of mold cavity temperature on surface quality and mechanical properties of nanoparticle-filled polymer in rapid heat cycle molding. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(6).
- Zhang, A., Zhao, G., Guan, Y., & Chen, G. (2010). Study on mechanical and flow properties of acrylonitrile-butadiene-styrene/poly (methyl methacrylate)/nano-calcium carbonate composites. *Polymer composites*, 31(9), 1593-1602.
- Zhao, G., Pan, Z., Wang, J., Guo, Q., & Cai, X. (2011). Toughening and compatibilization of acrylonitrile-butadiene-styrene/poly (ethylene terephthalate) blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 50(5), 821-830.
- Zhou, H., Zhang, S., & Wang, Z. (2021). Multi-objective optimization of process parameters in plastic injection molding using a differential sensitivity fusion method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 423-449.
- Zhou, J. C., Gao, J., Wang, S. H., Lin, S. X., Huang, J., & Xu, L. L. (2014, August). Effect of compatibilizer on the strength of ABS/PMMA blends. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 62, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.

- Zhou, Y., & Mallick, P. K. (2005). Effects of melt temperature and hold pressure on the tensile and fatigue properties of an injection molded talc-filled polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 45(6), 755-763.
- Zhou, Y., & Mallick, P. K. (2011). Fatigue performance of injection-molded short e-glass fiber reinforced polyamide-6, 6. II. Effects of melt temperature and hold pressure. *Polymer composites*, 32(2), 268-276.
- Zhu, B., He, Y., Yoshie, N., Asakawa, N., & Inoue, Y. (2004). Partial phase segregation in strongly hydrogen-bonded and miscible blends. *Macromolecules*, 37(9), 3257-3266.
- Zitzumbo, R., Avalos, F., & Alonso, S. (2016). Nanostructural complex in ABS/TPU immiscible mixtures. *Polymers and Polymer Composites*, 24(3), 205-212.



ÖZGEÇMİŞ

Hamdi KULEYİN, İlköğrenimini Atatürk İlköğretim Okulu’nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2010 yılında Beşikdüzü İMKB Anadolu Öğretmen Lisesi’nde tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2015 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2018 yılında “Basınçlandırılmış İnce Cidarlı Tüplerin Çarpma Performanslarının Belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2016 yılından itibaren Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır. İyi derece İngilizce bilmektedir.