



**T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDA POLİPROPİLEN
KÖPÜK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Aybala TANRIKULU

Yüksek Lisans Tezi



**YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDA POLİPROPİLEN
KÖPÜK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Aybala TANRIKULU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDA POLİPROPİLEN KÖPÜK
MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Aybala TANRIKULU
0000-0002-2413-0788

Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ
(Danışman)
0000-0001-5358-1396

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA– 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDA POLİPROPİLEN KÖPÜK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aybala TANRIKULU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ

Hızlı gelişen teknoloji ile birlikte hafiflik, ucuzluk ve daha az hammadde tüketimi ön plana çıkmaktadır ve bu durum polimer ve polimer köpüklere olan yönelimi arttırmaktadır. Kullanım alanlarına bağlı olarak polimer köpük malzemeler statik ve dinamik yüklemelere zorlanmaktadır. Bu çalışmada, polimer köpük malzemelerden biri olan polipropilenden farklı yoğunluklarda elde edilen numunelerin basmadaki statik ve dinamik mekanik özellikleri incelenmiştir. Statik yük altındaki mekanik davranışlarını incelemek için statik basma deney sistemi ve dinamik yük altındaki mekanik davranışlarını incelemek için Split Hopkinson basma çubuğu deney sistemi kullanılarak gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir. Artan yoğunlukla birlikte hem statik hem dinamik mekanik özelliklerde artışlar görülmüştür. Ayrıca dinamik deneylerden elde edilen veriler HyperMesh programına girilerek EPP köpük malzemeden oluşturulan örnek bir telefon ambalaj malzemesi modellenmiş ve yüksekten düşme sonucu maruz kalacağı darbe yükü altındaki performansı sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polipropilen köpük, Dinamik analiz, Parçalı hopkinson basınç çubuğu

2022, xi + 72 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE FOAM UNDER HIGH STRAIN RATE

Aybala TANRIKULU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Kenan TÜFEKÇİ

Lightness, cheapness, and less raw material consumption come into by prominence by the fast-growing technology and this situation increases the tendency towards polymer and polymer foams. Polymer foam materials are forced to static and dynamic loads depending on their usage areas. In this study, the static and dynamic mechanical properties of the samples obtained from polypropylene, one of the polymer foam materials, at different densities were investigated. Stress-strain curves were obtained by using the static compression test system to examine the mechanical behavior under static load and the Split Hopkinson compression bar test system to examine the mechanical behavior under dynamic load. Static and dynamic mechanical properties increased with increasing density. Also a sample phone packaging material made of EPP foam material was modeled by entering the data obtained from the dynamic experiments into the HyperMesh program, and its performance under the impact load that it would be exposed to as a result of falling from a height was examined by finite element analysis.

Key words: Polypropylene foam, dynamic analysis, Split hopkinson pressure bar
2022, xi + 72 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

“Yüksek Gerinim Hızlarında Polipropilen Köpük Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Bitirme Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimimin ilk gününden bugüne kadar geçen sürede emek, bilgi ve tecrübeleriyle yanımda olan, en büyük şansım; saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ’ye teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Bir parçası olmaktan mutluluk duyduğum Uludağ Üniversitesi’ne ve eğitimim sırasında ve sonrasında yanımda olup ikinci ailem olan çok kıymetli arkadaşlarıma emek ve desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez sürecimde, evimde gibi hissettirip ders çalışma ortamı sunan Göztepe Kahve Dünyası’na teşekkür ederim.

Maddi manevi yanımda olan, bana güvenen ve destekleyen, sponsorum canım aileme teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli mühendis dostlarım, Okan Maden, Hasan Köklü, Sertan Bolu ve Oğuz Caner Candoğan’a sonsuz teşekkür ederim.

Ve son olarak, süreçteki en önemli ve kıymetli destekçim Makine Mühendisi Halis Akgül’e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Polimer Köpükleri.....	3
2.2. Polimer Köpüklerin Gruplandırılması.....	4
2.2.1. Termoset ve termoplastik polimer köpükleri	4
2.2.2. Kapalı ve açık gözenekli polimer köpükleri	5
2.2.3. Esnek ve sert polimer köpükleri.....	6
2.2.4. Mikro gözenekli veya makro gözenekli polimer köpükler	7
2.2.5. Hafif ve ağır (yoğun) polimer köpükler	8
2.2.6. Yapısal polimer köpükleri.....	8
2.3. Polimer Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	8
2.3.1. Yorulma ömrü	11
2.3.2. Sıkıştırma özellikleri	11
2.3.3. Çekme özellikleri	12
2.3.4. Darbe özellikleri.....	14
2.4. Polipropilen Polimeri ve Özellikleri	16
2.4.1. Polipropilen polimerinin fiziksel özellikleri	18
2.4.2. Polipropilen polimerinin kimyasal özellikleri.....	19
2.4.3. Polipropilen polimerinin mekanik özellikleri	20
2.5. Polipropilen Polimerinin Kullanım Alanları.....	23
2.5.1. Homopolimerlerin kullanım alanları.....	24
2.5.2. Kopolimerlerin kullanım alanları.....	24
2.5.3. Random kopolimerlerin kullanım alanları	25
2.6. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri.....	26
2.6.1. Batch prosesi ile köpük üretimi	27
2.6.2. Ekstrüzyon kalıplama prosesi ile köpük üretimi.....	28
2.6.3. Enjeksiyon kalıplama prosesi ile köpük üretimi	29
2.7. Hopkinson Bar Basma Deneyi	30
2.7.1. Hopkinson basınç bar deney sistemi prensibi ve hesaplama teorisi	34
2.7.2. Çubuklarda dalga yayılımı ve yansıması	35
2.7.3. Gerilim, şekil değiştirme ve deformasyon hızı, veri analizi	36
2.8. Literatür Taraması	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	46
3.1. Deney Numuneleri	46
3.2. Statik Basma Deney Cihazı.....	47
3.3. Split Hopkinson Basınç Çubuğu Deney Düzenegi	48
3.4. Polipropilen Köpük Numunelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi	50
3.4.1. Parçaların modellenmesi	50
3.4.2. Mesh Generasyonu.....	51
3.4.3. Parçalara malzeme atanması	51

3.4.4. Analiz için yükleme şartları	52
4. BULGULAR	54
4.1. Statik Basma Deneyi Sonuçları.....	54
4.2. Dinamik Deney İle Elde Edilen Grafikler ve Sonuçlar.....	58
4.3. Statik ve Dinamik Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	61
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	65
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	72



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
DB	Çubuk çapı
C_0	Dalga hızı
Y	Dalğanın uzaydaki formu
ϵ	Deformasyon hızı
E	Elastisite modülü
Z	Empedans
ϵ_t	Geçen dalğanın meydana getirdiği şekil değiştirme
ϵ_i	Gelen dalğanın meydana getirdiği şekil değiştirme
σ	Gerilme
A_0	Kesit alan
σ_f	Köpüğün çekme dayanımı
E_f	Köpüğün elastiklik modülü
c_1, c_1', c_5, c_5'	Köpüğün mikro yapısına bağlı sabitler
ρ_f	Köpüğün yoğunluğu
h_f	Köpük numune kalınlığı
σ_p	Köpüksüz polimerin çekme dayanımı
E_p	Köpüksüz polimerin elastiklik modülü
ρ_p	Köpüksüz polimerin yoğunluğu
F	Kuvvet
m_1, m_2	Malzeme fonksiyonuna bağlı sabitler
h_m	Matrisin numune kalınlığı
DS	Numune çapı
L	Numune uzunluğu
u	Numune yüzeyindeki yer değiştirme
v	Parçacık hızı
ϵ_r	Yansıyan dalğanın meydana getirdiği şekil değiştirme
ρ	Yoğunluk
t	Zaman

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril-Bütadilen-Stiren
AYPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
POM	Asetal
SHPB	Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu
EPP	Genleştirilmiş Polipropilen
HBB	Hopkinson Basınç Bar
PA	Poliamid
PBT	Polibütilen Tereftalat
PE	Polietilen
PC	Polikarbonat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PU	Poliüretan
PVC	Polivinil Klorür
TPO	Termoplastik Poliolefin
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HIPS	Yüksek Darbe Polistiren

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Polimer köpük yapısı (Yetgin 2012).....	3
Şekil 2.2. Polimer köpük oluşum aşamaları, (a) Çekirdeklenme noktaları oluşumu, (b) Gözenek genişlemesi, (c) Kararlı gözenekli yapı (Saçak 2017).....	4
Şekil 2.3. Polimer köpüklerinde oluşabilecek açık ve kapalı hücre yapıları (Yetgin 2012).....	5
Şekil 2.4. Yoğunluğa bağlı olarak elastiklik modülündeki değişim (Ashby 1992).....	9
Şekil 2.5. Polimer köpüklerde sıkıştırma altında elde edilen gerilim-gerinim eğrisi (Yetgin 2012).....	11
Şekil 2.6. Kabuk tabakası kalınlığına göre çekme modülündeki değişim (Yetgin 2012).....	12
Şekil 2.7. Kabuk tabakası kalınlığına göre çekme dayanımındaki değişim (Yetgin 2012).....	13
Şekil 2.8. Kabuk tabakası kalınlığına göre kopma uzamasındaki değişim (Yetgin 2012).....	13
Şekil 2.9. Relatif yoğunluğa bağlı olarak PC köpüklerde izod darbe dayanımındaki değişim (Yetgin 2012).....	14
Şekil 2.10. Hücrelerin çatlak durdurucu etkisi (Yetgin 2012).....	15
Şekil 2.11. Propilen monomeri ve elde edilen polipropilen polimeri (Öksüz 2019).....	16
Şekil 2.12. Polipropilen türlerine ve sıcaklığa bağlı olarak sertlik değişimi (Yetgin 2012).....	19
Şekil 2.13. Molekül ağırlığının fiziksel ve mekaniksel özelliklere etkisi (İnci 2006).....	20
Şekil 2.14. Polipropilen çeşitlerinin çekme dayanım-uzama grafiği (Yetgin 2012).....	21
Şekil 2.15. Polipropilenin farklı çeşitleri için sıcaklığa bağlı eğme modülündeki değişim grafiği (Yetgin 2012).....	21
Şekil 2.16. Sıcaklık etkisiyle PP polimerlerinin çentikli darbe dayanımı değişim grafiği (Yetgin 2012).....	22
Şekil 2.17. Hammadde halinde polipropilen (Akkuş 2019).....	24
Şekil 2.18. Homopolimerlerin kullanım alanları (Akkuş 2019).....	24
Şekil 2.19. Random kopolimerlerin kullanım alanları (Akkuş 2019).....	25
Şekil 2.20. Kaplama tesislerinde sıvı asit vb. kimyevi maddelerin taşınmasını sağlayan polipropilen malzemeden üretilmiş pompa kesit resmi ve görseli.....	25
Şekil 2.21. Kaplama tesislerinde sıvı asit vb. kimyevi maddelerin depo ve kaplama banyo ünitesi.....	25
Şekil 2.22. Polipropilen malzeme ile su deposu yalıtım uygulaması.....	26
Şekil 2.23. Polipropilen malzemeden imal edilmiş havalandırma sistemleri uygulaması.....	26
Şekil 2.24. Batch prosesi şematik görseli (Yetgin 2008).....	28
Şekil 2.25. Tek vidalı ekstrüder prosesi şematik görseli (Yetgin 2008).....	29
Şekil 2.26. Enjeksiyon köpük kalıplama prosesi şematik görseli (Yetgin 2008).....	30

	Sayfa
Şekil 2.27. Bertram Hopkinson deney düzeneği (Gümüş 2019).....	31
Şekil 2.28. Farklı şekil değiştirme hızları için gerilme-şekil değiştirme grafiği (Gümüş 2019).....	33
Şekil 2.29. PHBÇ yüklemesi altında silindirik polimer malzemede oluşan hasar çeşitlerinin gösterimi (Gümüş 2019).....	33
Şekil 2.30. Deney düzeneği üzerindeki çubuk ve diferansiyel eleman (Şimşek 2011).....	34
Şekil 2.31. Darbe etkisi uygulanan diferansiyel eleman (Şimşek 2011).....	34
Şekil 2.32. Diferansiyel eleman üzerindeki kuvvetler (Şimşek 2011).....	35
Şekil 2.33. Numune üzerine etki eden kuvvetler (Kandırmış 2016).....	36
Şekil 2.34. Parçalı hopkinson deneyinde ölçülen gerinim ölçer kayıtları (Şimşek 2011).....	38
Şekil 3.1. EPP köpük levhanın su jetine yerleştirilmesi, kesimi ve levha üzerinden numune alımı.....	46
Şekil 3.2. Masaüstü mekanik test cihazı ve kullanıcı arayüzü.....	47
Şekil 3.3. Numunenin deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.4. Deney düzeneği görseli.....	48
Şekil 3.5. Deney düzeneği şeması.....	49
Şekil 3.6. Giriş ve çıkış çubuklarından elde edilen örnek sinyal.....	50
Şekil 3.7. a) Telefon modelinin katı modellenmesi, b) EPP köpük hacmi içerisine yerleştirilmesi.....	50
Şekil 3.8. a) Telefona mesh atılması b) EPP köpük hacime uygulanan mesh generasyonu.....	51
Şekil 3.9. Üç farklı yoğunluktaki malzemelere ait mekanik özellikler.....	52
Şekil 3.10. Numunelere uygulanan çarpışma testi.....	53
Şekil 4.1. Statik basma deneyinde gerilme gerinme eğrisi karakteristik bölgeleri.....	54
Şekil 4.2. Statik deney sonucu bir köpüğe ait üç farklı numunenin gerilme-gerinme değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.3. Statik deney sonucu üç farklı köpük numunesine ait gerilme-gerinme değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.4. Elastisite modülü ve akma gerilmesinin tespiti için oluşturulan doğrular.....	56
Şekil 4.5. Statik basma deneyinden elde edilen elastisite modülü değerleri.....	56
Şekil 4.6. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait akma gerilmelerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.7. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait rezilyans değerlerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.8. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait absorbe edilen enerji değerleri.....	58
Şekil 4.9. Üç farklı köpük numunesine ait örnek dinamik gerilme-gerinme grafikleri.....	59
Şekil 4.10. Dinamik elastisite modülü değerleri.....	60
Şekil 4.11. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait itibari akma gerilmeleri.....	60
Şekil 4.12. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait rezilyans değerleri.....	60

	Sayfa
Şekil 4.13. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait absorbe edilen enerji değerleri.....	61
Şekil 4.14. Üç farklı köpüğe ait elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.15. Üç farklı köpüğe ait itibari akma değerlerinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.16. Üç farklı köpüğe ait rezilyans değerlerinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.17. Üç farklı köpüğe ait uzama değerlerine göre absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.18. KI, KII ve KIII numuneleri için gerilme-gerinme analiz sonuçları.....	64



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Otomotiv plastik parça üretiminde kullanılan plastik hammadde oranı(%) (Kaya 2019).....	17
Çizelge 2.2. Polipropilen polimerinin özellikleri ve diğer termoplastikler ile karşılaştırılması (Yetgin 2012).....	17
Çizelge 2.3. PP malzemelerin mekanik özellikleri ve HDPE malzeme ile kıyaslanması.....	22
Çizelge 3.1. Numune kodları ve yoğunlukları.....	46



1. GİRİŞ

Günlük yaşamda yaygın kullanılan yapı elemanları metaller, polimerler, kompozitler ve seramikler olmak üzere dört gruba ayrılır. Son yıllarda polimerik malzemelerin birçok uygulama alanlarında diğer malzemelerin yerine alternatif olarak kullanıldığı görülmektedir. Tüm üretim sektörlerinde hafiflik, ucuzluk ve daha az hammadde tüketimi ön plana çıkmakta olup bu özelliklere ilaveten işlenmelerinin kolay, yoğunluklarının düşük, yüksek kimyasal ve korozyon direnci gibi özelliklere sahip olmaları, polimerik köpük malzemelerin kullanımını arttırmaktadır.

Türk Standartları Enstitüsüne göre, polimerik köpükler “Bir gazın gerçek malzeme içerisine mekanik yöntemlerle dağıtılmasıyla ya da gerçek malzemeye katılan bir kimyasal maddenin ısıtılması esnasında gazlaşmasıyla açık, yarı kapalı ya da kapalı hücrelerden meydana gelen gözenekli bir yapıdır” şeklinde tanımlanmaktadır (Yetgin ve ark. 2008).

Polimer köpükler, içerisi herhangi bir gaz ya da hava doldurulmuş kapalı gözenekler olarak tanımlanır. Bu gözenekler, polimer malzeme katılabilirken içerisinde kalan gaz kabarcıkları ya da gaz kabarcıklarının polimer malzemedan uzaklaşırken arkasında bıraktığı boşluklar sebebiyle oluşur (Saçak 2017).

Polimer içindeki gözenekler malzeme yoğunluğunu azaltır ve dolayısıyla daha az hammadde kullanımı sağlarlar. Bu durum ise ürünün fiyatını önemli oranda düşürür. Bunun yanında polimer içindeki boşluk oranı kontrol edilerek malzeme yoğunluğu ayarlanabilir ve farklı özelliklerde polimer köpükler üretilebilir. Bu üstün özellikleri sebebiyle, polimerik köpüklerin kullanım alanları ve tüketim miktarları ilk ticari üretimlerinden bu yana hızlı bir şekilde artış göstermiştir (Saçak 2017).

Geleneksel malzemelere oranla hafif olmaları, ısı ve sesi yalıtmaları, daha düşük yoğunluk, birim kütle başına yüksek yüklemeye dayanmaları, düşük kalıplama maliyeti, farklı tekniklerle hazırlanabilmeleri ve vurma dayanımlarının iyi olması gibi özelliklere sahip olan polimerik köpükler, mobilya, paketleme, tekstil, oyuncaklar, spor ürünleri, yalıtım uygulamaları gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv

sektöründe parçalarda ağırlık tasarrufu ve bunun sonucunda azalan yakıt tüketimi sağlaması polimer ve polimer köpüklere olan ilgiyi artırmaktadır.

Köpük çalışmalarında en fazla tercih edilen polimer çeşitleri polietilen (PE), polivinil klorür (PVC), poliüretan (PU), polistiren (PS), polipropilen (PP) ve polikarbonat (PC)' dir. Son dönemlerde polietilen ve polistiren polimerlere kıyasla polipropilen malzeme kullanımını artış göstermektedir. Çünkü bu malzemeler daha yüksek ergime sıcaklığı ve daha iyi darbe direnci sağlamaktadır (Yetgin ve ark. 2008).

Kullanılan malzeme kadar önemli olan bir diğer konu ise bu malzemelerin mekanik özellikleridir. Her malzemenin mekanik özelliklerinin saptanabilmesi için çeşitli test yöntemleri mevcut olup uygulanan deney metotlarının büyük çoğunluğunu statik ve yarı statik deney metotları oluşturmaktadır. Çeki-Bası deneyleri, sürünme deneyleri, eğme deneyleri gibi çeşitli testler, malzemelerin statik yükler altındaki davranışları hakkında bilgi verirken; çentik darbe veya yorulma deneyleri gibi bazı deneyler ise düşük hızlı dinamik yükler altındaki malzeme davranışları hakkında bilgi vermektedir. Ancak bilinen veriler doğrultusunda düşme, çarpışma ya da darbe gibi yüksek hızlı dinamik yüke maruz kalan malzemelerin mekanik davranışları, statik testler sonucunda elde edilenden oldukça farklı olup malzemeler, normal durumlardan farklı davranmaktadır. Bu farklılık malzeme seçimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle birçok mühendislik uygulaması için malzemelerin, yüksek hızlı dinamik yük altındaki mekanik davranışlarının tespiti gerekmektedir. Bu davranışları belirlemek üzere bazı mekanik deney cihazları mevcut olup bunlardan biri basma durumu için tasarlanan 'Split Hopkinson Deney Sistemleri' olarak adlandırılmaktadır. Statik yükler altında yapılan mekanik deneylerde deformasyon hızı 1 s^{-1} değerinden küçük iken, yüksek hızlı dinamik yüke maruz kalan Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği, 10^2 s^{-1} ile 10^4 s^{-1} deformasyon hızları arasındaki testler için en ideal yöntemdir.

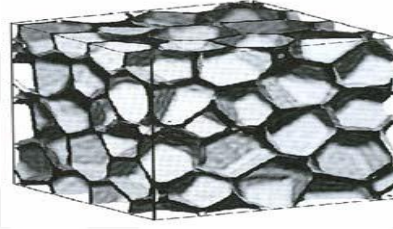
Bu çalışmada, ticari olarak piyasada bulunan üç farklı yoğunluğa sahip polipropilen köpüğün (EPP), SHPB deney sistemi kullanılarak yüksek gerinim hızındaki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler HyperMesh programına veri olarak girilmiş olup düşürme testleri yine aynı programda yapılmıştır. Farklı yoğunluktaki köpük malzemelerin zamana bağlı gerilme ve gerinme grafikleri çizilmiş, yükleme altındaki mekanik davranışları incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Polimer Köpükleri

Polimer köpükler, içerisi hava ya da farklı bir gaz tarafından doldurulmuş kapalı gözenekler şeklinde tanımlanır. Bu gözenekler, gaz kabarcıklarının polimerden uzaklaşırken geride bıraktığı boşluklar ya da polimer katılaşırken içerisinde kalan gaz kabarcıkları nedeniyle oluşur.

Ayrıca, sıvı ya da gaz haldeki köpük ajanlarının genişmesiyle üretilen ve çevresi polimer matris ile sarılmış, kapalı gözenekler içeren malzemeler olarak da tanımlanabilmektedir. Polimer köpükler genellikle, biri katı polimerik matris, diğeri ise köpük ajanı ile elde edilen gaz fazı olmak üzere minimum iki fazdan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de örnek bir polimer köpük yapısı verilmiştir.



Şekil 2.1. Polimer köpük yapısı (Yetgin 2012)

Polimer köpük içerisindeki boşluklar (gözenekler) malzeme yoğunluğunu azaltır ve ürün fiyatının önemli oranda düşmesine sebep olurken, maliyet açısından avantaj sağlar. Ayrıca farklı yerlerde ve değişik özelliklerde kullanılabilen köpük üretimi için boşluk oranı kontrol altına alınarak polimer yoğunluğu ayarlanabilir. Polimer köpüklerinin diğer malzemelere kıyasla üstünlükleri,

- Hafif olmaları
- Düşük yoğunluk
- Isı ve sesi yalıtmaları
- Malzeme tasarrufu
- Birim kütle başına yüksek yüklemeye dayanmaları
- Kalıplama maliyetinin düşüklüğü
- Farklı metotlarla üretilibilmeleri
- Üstün darbe dayanımı

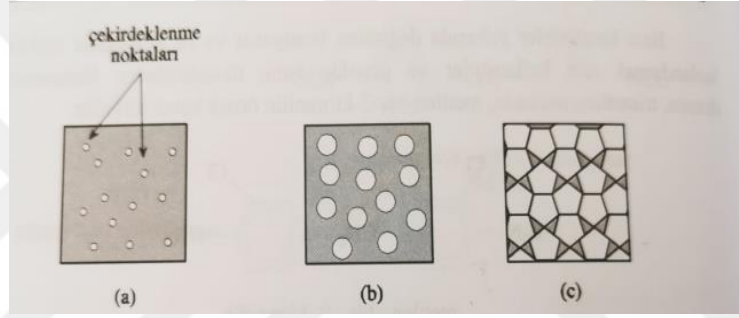
şeklinde sıralanabilir.

Polimer köpükler üstün özellikler sağlamakla birlikte aşağıda verilen noktalarda yetersizdirler.

- Kullanım sırasında bazı mekanik özelliklerini kaybetmeleri
- Ürünlerde bölgesel yoğunluk farklarının oluşabilmesi

2.2. Polimer Köpüklerin Gruplandırılması

Polimerik köpükler; köpüğün esnekliği, boşluk (gözenek) boyutu, polimer yapısı, içlerindeki gözeneklerin yapısı vb. özellikler dikkate alınarak çeşitli şekillerde gruplandırılırlar. Şekil 2.2’de polimer köpük oluşum aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Polimer köpük oluşum aşamaları, (a) Çekirdeklenme noktaları oluşumu, (b) Gözenek genişlemesi, (c) Kararlı gözenekli yapı (Saçak 2017)

2.2.1. Termoset ve termoplastik polimer köpükleri

Polimer köpük gözenekleri, üretilecek köpüğün ısı dayanımı, kimyasal direnci, sertliği, camsı geçiş sıcaklığı, alevlenme sıcaklığı gibi özelliklerinden sorumlu olan polimer matris ile çevrilmiş haldedir.

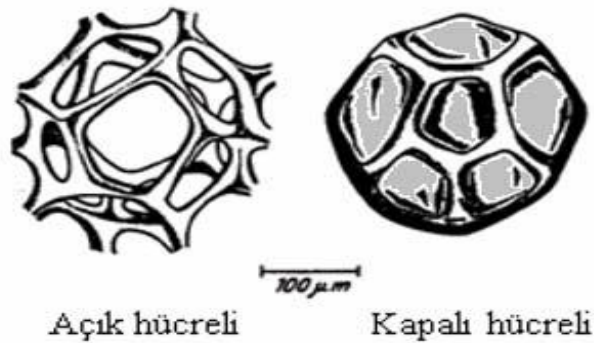
Polimer köpük üretiminde, termoset ya da termoplastik esaslı polimer matris malzeme kullanılabilir. Poliüretan, üre-formaldehit, fenol-formaldehit ve epoksi gibi termoset karakterli polimer köpükler belirli bir erime sıcaklıklarına sahip olmadığı için yüksek sıcaklıklarda bozulmaya uğrayabilir. Biçimlendirme işlemi süresince kalıcı olarak sertleşir ve ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Termoplastik karakterli köpükler ise belirli bir erime sıcaklıklarına sahiptirler ve genelde bu sıcaklık, köpük polimer malzemesinin erime sıcaklığıdır. Termoplastik polimerler şekillendirme sırasında ısının etkisiyle

yumuşarlar, ısıtılmaya devam edilirse sıvılaşır ve soğutulduğunda sertleşirler. Bu proses tekrar edilebilir ve geri dönüşümlüdür. Ancak ergiyik polimerin çok yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması sonucu geri dönüşsüz bozulma meydana gelebilir. Polietilen (PE), Polistiren (PS), polipropilen (PP), poli(vinil klorür) (PVC), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) kopolimeri, polikarbonat (PC), poliamid (PA) ve asetal (POM) termoplastik köpük yapımında kullanılacak termoplastik esaslı polimerlere örnektir. Termosetler, termoplastiklere oranla genellikle daha iyi boyutsal kararlılığa sahip, sert ve dayanıklı malzemelerdir.

Son yıllarda, birçok endüstri, daha ucuz, daha hafif ve daha iyi mekanik özellikler sağlayan malzeme arayışı içerisinde girmiştir. Polipropilen (PP) köpük, bu hedef için uygun malzemelerden birisi olup, köpük üretimi için plastik üretim sektöründe kullanımı yaygınlaşmıştır. PP, PE gibi pahalı olmayan ve yük taşıma kapasitesi daha yüksek olan bir malzemedir. PP camısı geçiş sıcaklığı -10°C ve ergime sıcaklığı 160°C dolayında olup yüksek ergime sıcaklığına sahip olması nedeniyle PE ve PS'den daha iyi termal kararlılık gösterir. PP, oda sıcaklığında PS'den daha iyi darbe direnci sağlamaktadır ve 0.9g/cm^3 yoğunluk değeri ile en hafif termoplastiktir. Ancak, polipropilen köpük yapısı açık hücreye sahiptir ve hücre dağılımı homojen değildir.

2.2.2. Kapalı ve açık gözenekli polimer köpükleri

Polimer köpükler, içerisindeki boşluk yapılarına bağlı olarak, açık veya kapalı gözenekli olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.3'de polimer köpüklerinde bulunabilecek gözenek yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Polimer köpüklerinde oluşabilecek açık ve kapalı hücre yapıları (Yetgin 2012)

Kapalı gözenekli polimer köpüklerde, her bir gözenek tamamıyla hücre duvarları ile çevrilmiştir ve tüm gözenekler birbirinden bağımsız olup kullanılan köpük ajanının ürettiği gaza bağlı olarak karbondioksit, hidrojen ya da uçucu gaza dönüşebilen sıvılardan oluşmaktadır. Kapalı gözenek duvarları gaz geçişine izin verdiğinde, gözenek içerisinde bulunan gaz molekülleri difüzyonla gözenekten ayrılarak köpük içerisinde hareket edebilir. Duvarları gaz geçirmeyen gözenekler ise içlerindeki boşluğu dolduran havayı veya gazı tutar, yer değiştirmesine izin vermez. Bu tür köpüklerin ısı yalıtımları iyidir.

Açık gözenekli polimer köpüklerde ise, hemen hemen tüm gözenekler uygun kanallarla birbirine bağlı olup temas halindedir. Yani gözenekleri birbirinden ayıran hücre duvarları bulunmamaktadır. Bu kanallar vasıtasıyla sıvı ya da gazlar gözenekleri doldururlar veya bir gözenekten diğerine geçerek köpük içerisinde yol alabilirler. Açık gözenekli köpükler, esnek ve yumuşak olabildikleri için genelde sünger adını alır. Örneğin, temizlik amacıyla kullanılan süngerler açık gözenekli polimerlerden yapılmış olup suyla temasları halinde açık gözenekleri su ile dolar ve sünger ağırlığı yüksek oranda artar. Kapalı gözenekli köpükler ise rijittir. Açık gözenekli polimerler sesi iyi absorbe etme kapasitesine sahiptirler fakat açık kanal yapısı yalıtım özelliklerinin azalmasına sebep olmaktadır.

2.2.3. Esnek ve sert polimer köpükleri

Polimer köpükler gözenek çeperlerine, polimerin kimyasal yapısına, kullanılan katkı maddelerine ve çapraz bağ derecesine bağlı olan camsı geçiş sıcaklığının, oda sıcaklığının altında veya üstünde olmasına bağlı olarak esnek veya rijit olabilmektedir. Esnek köpüklerde polimerin camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının altında olup gözenek çeperleri küçük basınçlarda yıkılır. Rijit köpüklerde ise camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının üzerinde olup gözenek çeperleri belirli düzeydeki basınçlara dayanıklıdır. Gözenek duvarlarının dayanımı hem yoğunluk hem de fonksiyonellik açısından bu iki sınıf arasında yer alan köpükler için yarı-sert ya da yarı-esnek köpük tanımlaması yapılmaktadır.

Polimer köpükler, bütünüyle açık ya da kapalı gözenekli olarak üretilemezler. Köpük içerisinde her iki çeşit gözenek yapısı yer alsada, genelde bir gözenek çeşidi baskındır.

Genel olarak esnek köpük gözenekleri açık, sert köpük gözenekleri kapalıdır. Örnek verecek olursak, çok sert poliüretan köpüklerde, kapalı gözenek oranı %85-95 seviyelerine çıkar. Köpüklerin hazırlanmasında kullanılan yöntemle bağlı olarak, gözeneklerin açık ya da kapalı olması şekillendirilebilir.

Rijit yapılı köpükler, mekaniksel dayanımın yüksek olması gereken durumlarda, paketleme, yiyecek/içecek kapları ve kalıplama gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Esnek yapılı köpükler ise mekaniksel dayanımın ön plana çıkmadığı uygulamalarda tercih sebebidir. Özellikle termal ve ses yalıtımında, araç koltuklarında, kasket ve spor ekipmanlarında, paketlemede, mobilya sektöründe kullanılmaktadır.

2.2.4. Mikro gözenekli veya makro gözenekli polimer köpükler

Gözeneklerin boyutları ve köpük içerisindeki dağılım homojenliği dikkate alınarak sınıflandırma yapılabilir. Gözle görülebilen gözeneklerin bulunduğu ve gözenek boyutu $> 100\mu\text{m}$ olan köpüklere makro gözenekli köpük, gözle görülemeyecek kadar küçük gözeneklere ve ortalama $10\mu\text{m}$ 'den düşük gözenek boyutuna sahip köpüklere ise mikro gözenekli köpük adı verilir. Bu tanımlamalara göre bulaşık süngerini makro gözenekli köpüklere örnek verebiliriz.

Gözenek boyutunun geniş ve homojen olmayan dağılım yapısı nedeniyle makro gözenekli polimer köpükler oldukça zayıf mekaniksel özelliklere sahiptirler. Ancak, bu köpüklerin bir faydası, 50 kata kadar genişleme oranı elde edilebilmesidir. Bilindiği gibi gözenek boyutları daha homojen dağılıma sahip ve küçük olan polimer köpükler daha iyi mekaniksel davranışlar göstermektedirler. Makro hücreli köpükler ve köpüklenmemiş polimerler ile karşılaştırıldığında, mikro hücreli köpükler, daha iyi yorulma ömrü, daha iyi tokluk, daha iyi darbe dayanımı, daha iyi dayanım-ağırlık oranı, düşük termal iletkenlik gösterirler.

Üstün mekaniksel özellikler ile azalan ürün maliyeti, mikro hücreli köpükleri birçok üretim sektörü için uygun malzemeler haline getirmiştir. Yüksek dayanım-ağırlık oranı ile uçak ve otomotiv parçalarında, yiyecek paketlemede, akustik yalıtımda, azalan ağırlık ile spor ekipmanlarında, levha ve şişe gibi ince duvarlı malzeme üretimlerinde kullanılmaktadır.

2.2.5. Hafif ve ağır (yoğun) polimer köpükler

Polimer köpükler, yoğunluklar esas alınarak hafif ve yoğun köpük olmak üzere iki gruba ayrılır. Polimer matris içerisinde bulunan gaz kabarcığı miktarı, köpük yoğunluğunu belirleyici etkindir. Hafif köpük yoğunluğu $0,01-0,10 \text{ g/cm}^3$, ağır köpük yoğunluğu $0,4-0,6 \text{ g/cm}^3$ arasında değişkenlik gösterir.

Köpük yoğunluğu, mekanik özellikleri belirlemede önemli bir etken olması sebebiyle köpüklerin uygulama alanlarını da belirlemektedir. Genel olarak yüksek yoğunluklu polimer köpükler otomotiv, mobilya, inşaat ve taşımacılık sektörlerinde kullanılırken, düşük yoğunluklu polimer köpükler ses ve ısı yalıtımı, paketleme amaçlı kullanılmaktadır.

2.2.6. Yapısal polimer köpükleri

Homojen olmayan bu köpüklerin, iç kısmı gözenekli ve yüzeyleri kabuk gibi serttir.

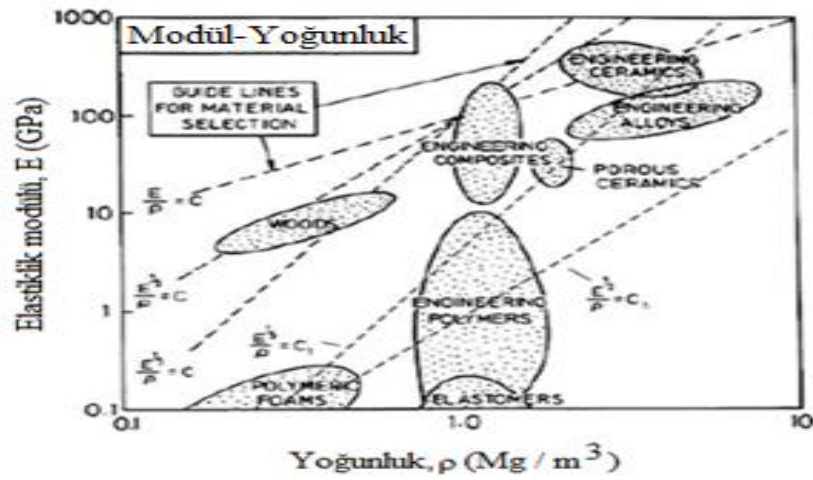
2.3. Polimer Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Polimerlerden elde edilmiş malzemeler kullanımları sırasında, farklı yüklemelerin (kuvvet) etkisi altında kalırlar. Örneğin, araç lastikleri sıkıştırma ve eğilme, plastik alışveriş poşetleri, içlerindeki ürünlerin ağırlığından kaynaklı aşağı doğru çekme yüküne maruz kalır.

Mekanik özellik, cisimlerin sıkıştırma, çekme gibi dış kuvvetlere karşı verdikleri tepkilerin tamamıdır. Her madde dışarıdan uygulanan kuvvetlere farklı tepkiler verir ve kuvvetin şiddetine bağlı olarak uzarlar, bükülürler, koparlar, parçalanırlar veya kırılırlar. Malzeme, kısa süreli yüke maruz kalabileceği gibi zamanla değişebilen yük etkisi ile de karşılaşabilir.

Polimer köpüklerin çekme ve sıkıştırma dayanımı, vurma dayanımı, sertlik gibi mekanik özellikleri genellikle farklı test metotları ile karakterize edilmektedir. Test sonuçları yardımıyla farklı malzemelerin benzer mekanik özellikleri de kıyaslanabilir. Köpüklerin yoğunluk, çekirdek oranı ve kabuk tabakası kalınlığı gibi değişken etkilerinin iyi bilinmesi, mekanik özelliklerini belirlemede gerektirir.

Ashby'nin "Tasarımda malzeme seçimi için optimizasyon teorisi", çeşitli malzeme özelliklerini karşılaştırmalı olarak gösterir ve kübik hücre modeli ile anlatır. Şekil 2.4'de Ashby tarafından geliştirilen, rijit malzeme seçimine yardımcı malzeme haritası verilmiştir. Kılavuz çizgisi ile kesişen malzemeler aynı E/ρ değerine sahiptir. E/ρ , $E^{1/2}/\rho$ ve $E^{1/3}/\rho$, benzer rijit davranış gösteren farklı malzeme kümelerini göstermektedir. Örneğin, $E^{1/3}/\rho=C_1$ çizgisinde yer alan mühendislik seramikleri, gözenekli seramikler, mühendislik polimerleri, polimer köpükler ve mühendislik alaşımları gibi malzemeler benzer rijit davranışa sahiptir.



Şekil 2.4. Yoğunluğa bağlı olarak elastiklik modülündeki değişim (Ashby 1992)

Ashby, köpük özelliklerini yoğunluğa bağlı olarak açıklamak için bu yaklaşımı geliştirmiştir. Mukavemet-yoğunluk değişimini gösteren grafikler mukavemetli malzeme seçiminde, elastiklik modülü-yoğunluk değişimini gösteren grafikler rijit malzeme seçiminde kullanılmaktadır. Açık hücreli polimer köpükler için elastiklik modülü ve çekme dayanımı eşitlik 2.1 ve 2.2 kullanılarak ifade edilmiştir.

$$\left(\frac{E_f}{E_p}\right) = \left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^n \quad (2.1)$$

$$\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_p}\right) = \left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^n \quad (2.2)$$

E_f : köpüğün elastiklik modülü,

E_p : köpüksüz polimerin elastiklik modülü,

σ_f : köpüğün çekme dayanımı,

σ_p : köpüksüz polimerin çekme dayanımı,

ρ_f : köpüğün yoğunluğu,

ρ_p : köpüksüz polimerin yoğunluğudur.

Köpük hücreleri çevresindeki uygulanan yük, gerilim yığılmaları ve mekaniksel özelliklere bağlı olarak $n=1-4$ arasında değişmektedir.

Bu yaklaşım, kapalı hücreli köpükler için hücre duvarının bükülmesine ve uzamasına bağlı olarak eşitlik 2.3 ve 2.4 kullanılarak uygulanabilmektedir.

$$\left(\frac{E_f}{E_p}\right) = c_1 \left(\varphi \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^2 + c_1'(1 - \varphi) \left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_p}\right) = c_5 \left(\varphi \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^{3/2} + c_5'(1 - \varphi) \left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (2.4)$$

c_1, c_1', c_5 ve c_5' köpüğün mikro yapısına bağlı sabitlerdir.

Köpüklendirilmiş ve köpüklendirilmemiş polimerlerin davranışı, polimer köpüklerin darbe özelliklerini etkiler. Köpüğün kırılma enerjisi (I_f) ve köpüklendirilmemiş polimer matrisin kırılma enerjisi (I_m) arasındaki ilişki, Eşitlik 2.5'de gösterilmiştir.

$$\frac{I_f}{I_m} = (\rho_r)^{m_1} \left(\frac{h_f}{h_m}\right)^{m_2} \quad (2.5)$$

Burada,

h_f ve h_m : köpük ve matrisin numune kalınlıkları,

m_1 ve m_2 : malzeme fonksiyonuna bağlı sabitlerdir.

Çoğu polimer için $m_1=2$ ve $m_2=3$ iken bazı çalışmalarda, polipropilen için $m_1= 3$ ve $m_2=1$ 'dir.

Yapısal köpükler, köpüklendirilmemiş hallerine kıyasla düşük mekaniksel davranış sergilerken, mikro hücreli köpüklerde bu durum tam tersinedir. Daha iyi tokluk, darbe direnci ve yorulma ömrü gösterirler.

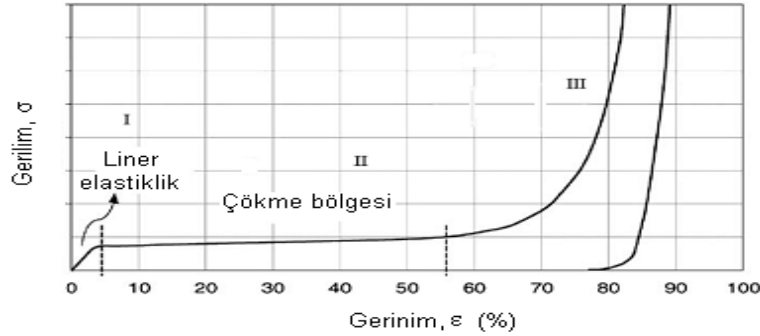
2.3.1. Yorulma ömrü

Yorulma ömrü, malzemelerin akma mukavemetinin altındaki çalışma koşullarında tekrar eden dış kuvvetler etkisiyle malzemenin davranışını karakterize etmektedir.

2.3.2. Sıkıştırma özellikleri

Polimer köpükler, gelen mekaniksel enerjiyi hücre duvarlarının kırılmasına ya da plastik olarak bükülmesine bağlı olarak absorbe ederler. Polimerik köpükler, sıcaklığa, yükleme türüne, uzama oranına ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak farklı sıkıştırma davranışları sergilerler. Hücre içerisindeki sıvı veya gaz haldeki akışkan, deformasyon süresince sıkıştırılır ve dışarı atılır ya da katı polimer içerisinde kalır.

Şekil 2.5'de, polimer köpüklerin sıkıştırma altındaki gerilim-gerinim(uzama) eğrisi verilmiş olup gösterildiği gibi düşük gerilimlerde lineer elastik, çökme bölgesi ve onu takip eden gerilimin adım adım arttığı 3 bölgeden oluşmaktadır.



Şekil 2.5. Polimer köpüklerde sıkıştırma altında elde edilen gerilim-gerinim eğrisi (Yetgin 2012)

Lineer elastik bölge, hücre yüzeyinin uzaması, hücre duvarının bükülmesi ya da eğilmesi ile ilişkili olup uzun çökme bölgesi, plastik akmaya bağlı olarak gerilim neredeyse sabit kalacak şekilde, elastik bükülmeye dayalı hücrelerin çökmesi ile karakterize edilir. Bu bölgede (çökme bölgesi) yüksek şekil değişimine maruz kalan polimer köpük, enerjiyi büyük oranda absorbe eder. Hücre kenarları, elastik ya da plastik bükülme ile çökme davranışı sergilerken, kapalı hücrelerin yüzeyleri bükülür veya eğilir. Hücre duvarları ise eğilme ya da yamulma ile çökerler ve hücreler tamamen çöktüğünde, hücre duvarlarının temas etmesi daha fazla sıkıştırmaya neden olarak,

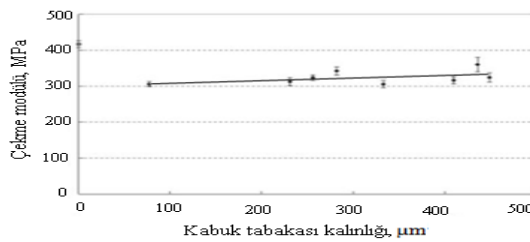
üçüncü bölgede gerilimi arttırmaktadır. Bu durum sırasında eğer hücreler kapalı ise akışkanın sıkışması, köpüğün rijitliğine katkı sağlamakta olup yine bu sıkıştırma çoğu zaman dikkate alınmamaktadır. Plastik çökme bölgesi, sabit gerilim altında mekaniksel enerjinin yayılmasına müsaade etmektedir.

2.3.3. Çekme özellikleri

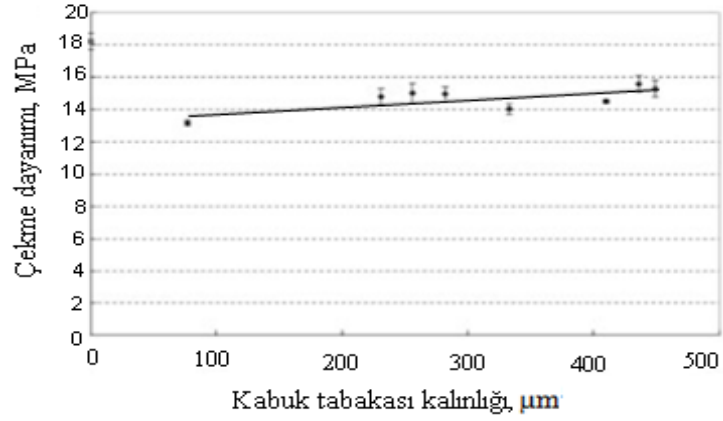
Polimer köpük malzemelerin mekanik özellikleri, proses şartlarına (vida adımı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, kalıp ve ergiyik sıcaklığı, köpük ajanı) bağlı olarak değişen hücre yoğunluğu ve hücre boyutundan önemli miktarda etkilenmektedir. Polimer köpüklerde, küçük boyutlu hücreler oluşturmak ve hücre yoğunluğunu arttırmak, ağırlık azalmasını ve çevrim zamanını düşürmeden çekme direncini artırmanın bir yoludur.

Yapılan enjeksiyon kalıplı köpük numune çalışmalarında, kalıp sıcaklığının artması çekme dayanımını ve rijitliği azaltmış olup geri besleme basıncının artması ise çekme dayanımı ve rijitliği arttırmıştır. Köpük ajanı oranının artırılması ile mekaniksel özellikler azalmıştır. Diğer bir çalışmada, relatif yoğunluğa bağlı olarak çekme direnci ve elastiklik modülünün azaldığı belirlenmiştir. Elastiklik modülü, rijitliğin bir göstergesidir ve yoğunluk düşüşü ile birlikte orantılı olarak rijitlik de azalmaktadır.

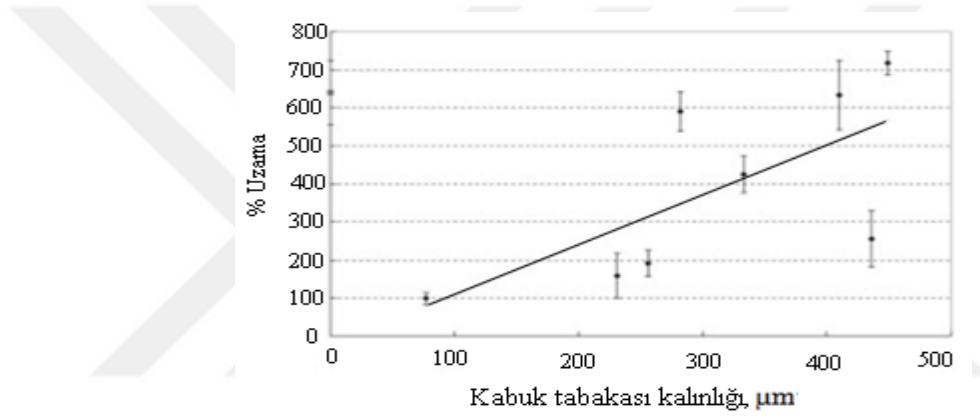
Kabuk tabakası kalınlığı da polimer köpüklerin çekme dayanımını etkileyen önemli değişkenlerden biridir. Aşağıdaki şekillerde, TPO (Termoplastik poliolefin) köpük örneğinde kabuk tabakası kalınlığına bağlı olarak çekme modülü, çekme dayanımı ve kopma uzamasındaki varyasyonlar belirtilmiş olup kabuk tabakası kalınlığının artışı ile birim alandaki ürün miktarı artmıştır ve buna bağlı olarak çekme özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Keskin olmayan çatlak tipi ile küçük kabarcıkların çatlak yayılımı için gerekli olan enerji miktarını artırması ise kopma uzama değerindeki artışın kaynağıdır.



Şekil 2.6. Kabuk tabakası kalınlığına göre çekme modülündeki değişim (Yetgin 2012)



Şekil 2.7. Kabuk tabakası kalınlığına göre çekme dayanımındaki değişim (Yetgin 2012)



Şekil 2.8. Kabuk tabakası kalınlığına göre kopma uzamasındaki değişim (Yetgin 2012)

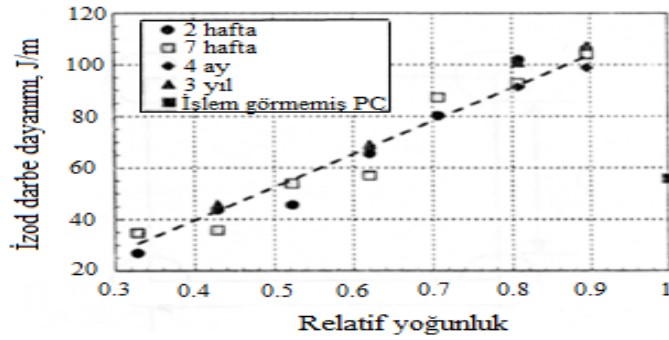
Birkaç araştırmacı mikro hücreli ve nano hücreli köpüklerin çekme dayanımları için çalışmalar yapmış ve hücre boyutunun, köpüklerin çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu söylemişlerdir. Homojenlik artışı ve hücre boyutunun azalması sonucu köpüğün mekaniksel özellikleri artış göstermiştir. Köpüğün rijitliğinin hücre şeklinden ve kalınlığından bağımsız olarak, relatif yoğunluğa bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Lee ve ark. 2005). Başka bir çalışmada hücre boyutunun, AYPE (Alçak yoğunluklu polietilen) köpüklerin mekaniksel özelliklerine etkisi incelenmiş ve hücre boyutlarından bağımsız sadece verilen yoğunluk değerlerinde basma dayanımı ve elastiklik modülü sonuçları benzer elde edilmiştir. Yoğunluk sabitlenip hücre boyutunun değişimiyle ise köpüklerin mekaniksel özelliklerinde bir değişim olmadığı görülmüştür (Richard ve ark. 2005).

İlave katkı maddeleri de polimer köpük yapısını ve mekaniksel özellikleri değiştirmektedir. %20 talk katkılı PP, %30 cam fiber katkılı PBT (Polibütilen Tereftalat), PP ve PC gibi farklı ürünlerin mekaniksel özellikleri üzerine çalışılmış olup katkılı polimer malzemelerin, katkisız polimer köpüklere kıyasla daha iyi hücre yapısına sahip olmaları sebebiyle daha az dayanım kaybı yaşadığı gözlenmiştir.

2.3.4. Darbe özellikleri

Hücre morfolojisi, yoğunluk ve kabuk tabakası kalınlığı polimer köpüklerin darbe dayanımı ile doğrudan ilişkili olup küçük ve homojen dağılmış hücreler, yüksek darbe dayanımı için önemli bir etmendir.

Yüksek yoğunluklu, mikro hücreli polikarbonat (PC) köpüklerin darbe dayanımı için çalışma yapılmış ve izod darbe dayanımının, hücre boyutunun artışı ile geliştiği gözlemlenmiştir (Barlow ve ark. 2001). Şekil 2.9'da, PC köpük numuneye uygulanan, farklı relatif yoğunluklara bağlı olarak izod darbe dayanımındaki değişim gösterilmiştir. 0,63 ve üzerindeki relatif yoğunluk değerlerine sahip köpükler, köpüksüz numunelere kıyasla daha iyi darbe dayanımı göstermiş olup yoğunluğun azalması ile lineer olarak azalmıştır.

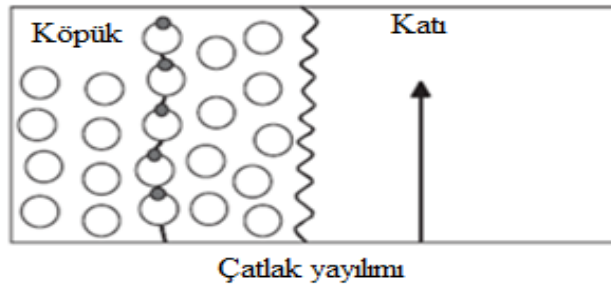


Şekil 2.9. Relatif yoğunluğa bağlı olarak PC köpüklerde izod darbe dayanımındaki değişim (Yetgin 2012)

Hücre boyutu denetimi ile polimer köpüklerin darbe mukavemeti geliştirilebilmektedir. Hücre boyutu küçültülüp, yüzey alanı arttırıldığında hücre yoğunluğu artmaktadır. Farklı hücre boyutlarında ve aynı köpük yoğunluklarındaki PP ve PC gibi yarı kristalin ve amorf polimerler için dayanım özellikleri incelenmiştir. Hücre boyutundaki azalma, köpük kristalin reçinelerin dayanımını arttırmış olup amorf polimerlerin dayanımında

ise herhangi bir değişim meydana getirmemiştir. Polimer köpüklerin darbe direncini etkileyen en güçlü parametrelerinden biri kabuk tabakası kalınlığıdır. TPO köpüklerin kabuk tabakası kalınlığı 90µm'den 450µm'ye çıktığında köpüğün darbe dayanımı yaklaşık üç kat artmış, köpük relatif yoğunluğunun azalması ile ise darbe enerjisi azalmıştır. Köpüksüz TPO için, kauçuk parçacıklarının takviye edilmesi köpüksüz PP polimerini toklaştırmış ve PP matriste ikinci faz gibi işlem görmüş, darbe enerjisinin soğurulmasına katkı sağlamıştır. Buna karşı TPO köpükler için, kauçuk ve PP fazı arasındaki ara yüzey (interface) bağının zayıf olmasından kaynaklı hücreler, ikinci fazın iki bölgesi arasındaki çatlak boyutunu azaltmaktadır. Bu da darbe yükü ile oluşan hücre çatlağı oluşumunun yayılması için daha az enerji gerektirir. Bu sebeple, TPO köpüklerin darbe dayanımı, köpüksüz TPO malzemelere kıyasla büyük oranda azalmıştır.

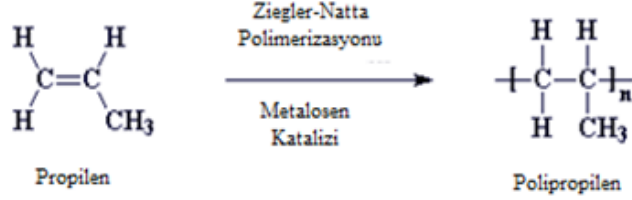
Köpük malzemelerin kırılma enerjisi, köpüksüz malzemelerden daha azdır. Köpüklenen malzemeleri kırmak için daha az enerji ihtiyacını iki etken açıklayabilir. İlk etken, malzeme kalınlığına göre ortalama hücre boyutunun önemsiz olması, ikinci etken ise açık hücrelerin bulunması ve büyük hücre boyutu dağılımı sebebiyle köpükte düzensiz bir yapının oluşması ile buna bağlı gerilme yığılmalarının meydana gelmesidir. Fakat homojen olarak dağılmış ve daha küçük hücrelerin çatlak tipi keskin değildir ve çatlak durdurucu gibi davranış gösterir. Bu durum malzemenin darbe direncini artırmaktadır. Hücrelerin çatlak durdurucu etkisi şekil 2.10'da gösterilmiştir. Küçük hücre boyutuna sahip mikro hücresel köpüklerde, polimer içerisinde oluşan kritik çatlak boyutu, hücre boyutundan büyük olabilmektedir. Boyutu azalan kabarcıkların etrafında oluşan gerilim yoğunluğu da azalmaktadır. Bu sebeple köpük içerisinde mevcut olan hücre boyutunun çok küçük olması, polimer matrisin darbe tokluğunu arttırmakta ve mekanik özelliklerini korumaktadır.



Şekil 2.10. Hücrelerin çatlak durdurucu etkisi (Yetgin 2012)

2.4. Polipropilen Polimeri ve Özellikleri

Polipropilen (PP) polimeri, propilen monomerinin polimerizasyonu ile elde edilen yarı-kristal bir termoplastiktir.



Şekil 2.11. Propilen monomeri ve elde edilen polipropilen polimeri (Öksüz 2019)

Polipropilen, yaygın bulunabilirliği, düşük maliyeti, düşük yoğunluğu ve iyi polimer özellikleri sebebiyle dünyada yaygın kullanılan polimerlerden biridir. Yarı şeffaf, beyaz renkli, oda sıcaklığında katı bir görünüme ve düşük özgül ağırlığa sahip olan polipropilenler, yüksek nem koşullarında ve sıcaklıklarda kararlı yapısıyla tercih edilen bir polimerdir. Sıcak çözücüler içerisinde yumuşarlar ve organik soğuk çözeltilerde çözünmezler. Erime sıcaklığı yaklaşık 130 ile 175°C arasında olup camsı geçiş sıcaklığı ise -10°C'dir. Tüm termoplastiklerin içinde en düşük yoğunluğa (0.9 g / cm³) sahip olmakla birlikte bu oran matrisin takviye maddesi içerip içermemesine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Yüksek sertlik, kimyasal direnç ve yorulma direnci sunar. Çok iyi elektrik yalıtımı olmakla birlikte, UV ışın dayanımı az, dış ortamda oksitlenmeye açık ve sürtünme katsayısı düşüktür. Kaplama ve boya açısından zorluk gösterir. Yanıcı olduğundan nitrik asit, klor içeren solventler ve diğer kuvvetli oksitleyiciler ile etkileşime girerek yanabilir. Zehirsizdirler, doğru şekilde değişime uğratıldıklarında yüksek ısı dayanımı gösterirler.

Polipropilen, düşük yoğunluk, maliyet düşüklüğü, diğer plastik malzemelere göre hafifliği, işleme kolaylığı, yüksek sıcaklıklarda kimyasal malzemelerden etkilenmemesi ve yüksek yumuşuma sıcaklığı gibi avantajlı özelliklerinden dolayı özellikle araştırma, ürün geliştirme ve genel amaçlı ticari termoplastiklerin en popüler olanı olup bazı durumlarda düşük maliyetli mühendislik polimeri olarak da adlandırılır. Yiyecek kapları, çocuk oyuncakları, ambalaj sektöründe ilaç kutularından sigara ve müzik plak ambalajlarına kadar birçok alanda tercih sebebidir. Ambalaj sektörünün haricinde,

köpük malzeme yapımında, beyaz eşya parçalarında, boru, kablo, halat, masa gibi hacimli eşyalarda, halı ipliği, dokuma ve örme kumaşlar gibi ürünlerde, uçak, elektronik ve otomotiv endüstrilerinde umut vaat eden bazı özel uygulamalara kadar günlük yaşamımızda çeşitli uygulamalara sahiptir. Kalıplanabilirliğe sahip olduğundan, otomobillerde kullanılan (fanlar, pano panelleri vb.) tüm plastik malzemelerin yarısından fazlasını oluşturur.

2010-2016 yılları arasında otomotiv sektöründe kullanılan plastik malzemelerin toplam tüketim yüzdeleri Çizelge 2.1’de belirtilmiştir. Görüldüğü gibi otomobillerde kullanılan plastik malzemelerin içerisinde en çok tercih edilen polipropilen malzemelerdir.

Çizelge 2.1. Otomotiv plastik parça üretiminde kullanılan plastik hammadde oranı (%) (Kaya 2019)

Plastik Hammadde	% Tüketim
Polipropilen	23,3
Poliüretan	17,0
Polyamid	12,3
Polivinil klorür	7,0
Polikarbonat	4,7
Polietilen	4,4
Diğer mühendislik plastikleri	12,0
➤ Termoplastik polyester	5,7
➤ PPE	3,8
➤ Poliasetal	1,9
Diğer reçineler	9,5
❖ Doymamış polyester	3,8
❖ Fenolik	3,1
❖ Akrilik	1,5

Polipropilen ile diğer termoplastik malzeme özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Polipropilen polimerinin özellikleri ve diğer termoplastikler ile karşılaştırılması (Yetgin 2012)

Özellikler	PP	PVC	ABS	HIPS	AYPE	YYPE
Eğme modülü (GPa)	1.5	3.0	2.7	2.1	1.3	0.3
Elastik modül (GPa)	1.66	2.14	2.57	1.94	1.35	0.33
Çekme dayanımı (MPa)	33	51	47	42	32	10
Yoğunluk	0.905	1.4	1.05	1.08	0.96	0.92
Maksimum kullanım sıcaklığı (°C)	100	50	70	50	55	50

Polipropilen polimerinin başlıca temel özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- Düşük yoğunluk
- Yüksek erime noktası
- Birçok kimyasal çözücüye karşı direnç
- İyi elektriksel yalıtım
- Yüksek mekanik mukavemet
- İşleme kolaylığı ve düşük maliyet

Polipropilen polimerinin bazı dezavantajları ise aşağıda verilmiştir.

- Kötü optik özellikler
- Düşük ultraviole dayanımı
- Orta seviye rijitlik
- Yanmaya eğilim
- Oksitlenmeye açık olma
- Renklendirme ve kaplama açısından zorluk

2.4.1. Polipropilen polimerinin fiziksel özellikleri

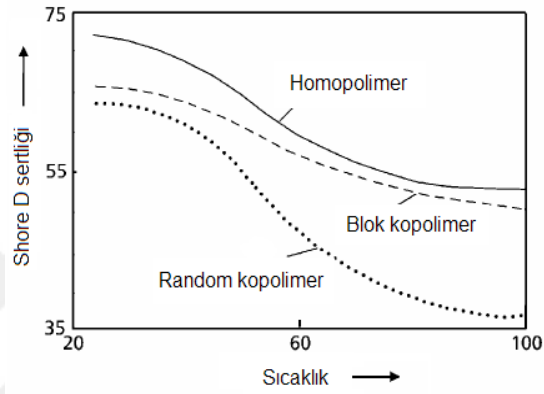
PP (polipropilen) yorulmaya karşı direnç, hafiflik, tokluk, ısı direnci, sertlik, yüksek çekme dayanımı, darbe dayanımı, basınç dayanımı, kolay imalat ve esneklik gibi türlü fiziksel özelliklere sahip olup propilen monomerinin bir petrol yan ürünü olması kullanım kolaylığı ve düşük maliyet sağlar. Ayrıca, fiziksel özelliklerinden kaynaklı farklı tekniklerle işlem yapılabilme kapasitesine sahiptir.

Polipropilen yoğunluğu $0.90-0.91 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve termoplastikler arasında en düşük yoğunluğa sahip polimerdir. Elastomer-modifiyeli ya da katkılı olması PP'nin yoğunluğunu yüksek oranda değiştirir. Örneğin, %40 talk katkılı polipropilen yoğunluğu 1.2 g/cm^3 'tür ya da ağırlığının %30'u cam elyaf polipropilen yoğunluğu 1.125 g/cm^3 'tür. Özgül ağırlığın düşük olması, ürünün kalıba döküldüğünde daha hafif olmasına ve böylece kullanım kolaylığı açısından fayda sağlamasına sebep olacaktır.

Bizim çalışmamızda üç farklı yoğunluğa ($0,043\text{g/cm}^3$, $0,068\text{g/cm}^3$, $0,02\text{g/cm}^3$) sahip EPP (Genleştirilmiş polipropilen) numuneler kullanılmıştır.

Polipropilen sertliği kristallenmeye bağlı değişiklik göstermekte olup azalan moleküler ağırlık ile kristallenme oranı azalacağından, buna bağlı olarak sertlik de azalır. Ayrıca sertlik değerleri, takviye malzemesinin miktarına ve tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin takviyesiz polipropilen sertliği, cam fiber takviyeli PP'nin yüzey sertliğine göre daha düşüktür.

Şekil 2.12'de sıcaklığa bağlı polipropilen çeşitlerindeki sertlik değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık etkisi ile polipropilen sertliğinin azaldığını söyleyebiliriz.



Şekil 2.12. Polipropilen türlerine ve sıcaklığa bağlı olarak sertlik değerimi (Yetgin 2012)

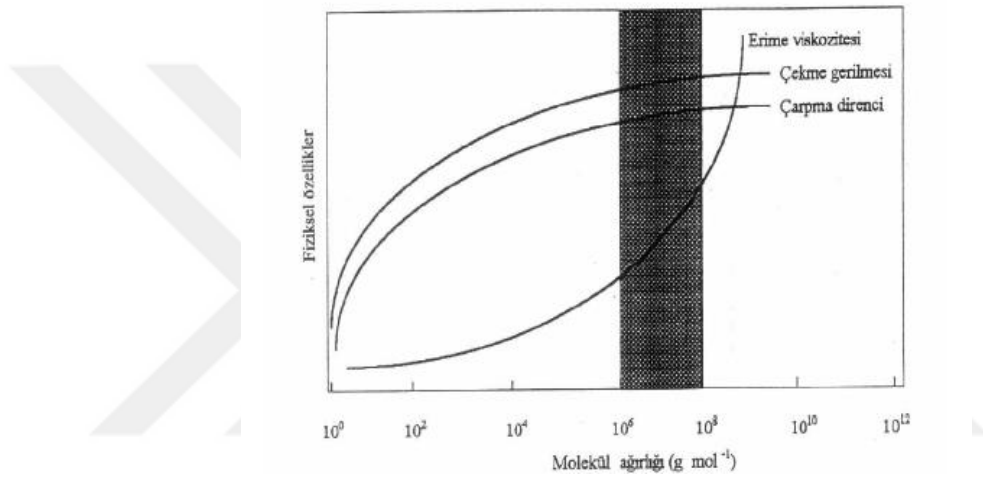
PP polimeri yarı-saydam olup optik özellikleri, saydamlık, kırıcı indeksi ve parlaklık açısından araştırılabilir.

2.4.2. Polipropilen polimerinin kimyasal özellikleri

Polar olmayan yapısından dolayı polipropilenin çoğu kimyasala ve çözücüye kıyasla direnci iyi olup, bu özellik kristalin derecesi yükseldikçe daha da iyileşecektir. Organik kimyasallara ve inorganik çevre şartlarına karşı en güçlü termoplastiktir. Polipropilen yüksek konsantrasyonlu sülfürik asit, nitrik asit, kerosen karbon tetraklorür, potasyum dikromat ve çok kuvvetli oksitleyici maddeler hariç diğer tüm kimyasallara karşı oldukça dayanıklıdır. Detarjanlar, asitler, bazlar, alkoller, tuz solüsyonları, yağlar ve petrol de polipropileni etkilemez. Ayrıca oda sıcaklığında polipropileni hiçbir çözücü çözemez.

2.4.3. Polipropilen polimerinin mekanik özellikleri

Polipropilen polimerinin mekaniksel özellikleri, molekül ağırlığı ve dağılımından oldukça fazla etkilenmektedir. Genellikle moleküler ağırlığın artmasıyla çekme dayanımında ve sertlikte azalma meydana gelirken rijitlik, darbe dayanımı ve moleküler arası çekim kuvvetinde artış gözlenir. Molekül ağırlığı, polimerik yapıda malzemelerin ısı ve mekanik özellikleri başta olmak üzere optik, kimyasal, elektriksel ve işlenebilirlik gibi özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Şekil 2.13’de polimer malzemelerin molekül ağırlığı ile fiziksel özelliklerinin değişimi gösterilmiştir.

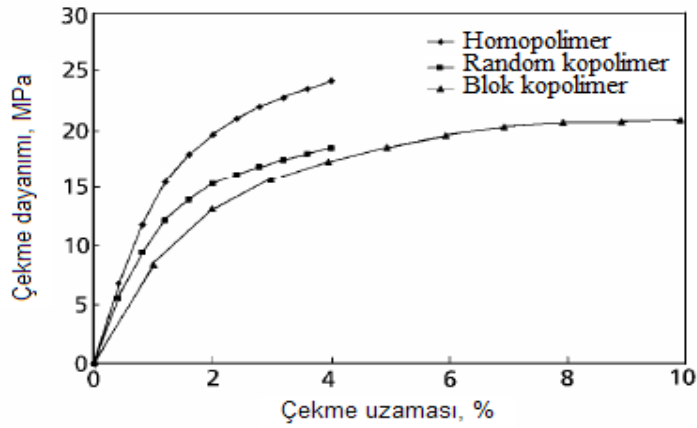


Şekil 2.13. Molekül ağırlığının fiziksel ve mekaniksel özelliklere etkisi (İnci 2006)

Şekil 2.13’de görüldüğü gibi molekül ağırlık artışı, polimerik yapı erime viskozitesinin önce yavaş, sonrasında ise hızlı bir şekilde artışına sebep olmuştur. Buna karşılık polimerik yapının erime, çekme, yumuşama, çarpma ve ısı sıcaklık gibi özellikleri önce hızla artmış ve daha sonrasında değişmemiştir. Anlaşılacağı gibi yüksek molekül ağırlıklı polimerler, yapının mekanik özelliklerini iyileştirirken işlenebilirliklerini zorlaştırır. Şekilde de görüldüğü üzere polimer molekül ağırlıklarının akış, işlenebilirlik ve mekanik özellikler açısından 10⁶-10⁸ olması istenir ve polimerik yapı malzemenin yeterli mekanik davranışları gösterebilmesi için molekül ağırlığının 10000’in üzerinde olması gerekir. Molekül ağırlığı düşük olan polimer yumuşak, yüksek olan polimer ise sert ve kırılındır. Düşük molekül ağırlıklı polimerlerin akış özellikleri iyidir ve bu sebeple bu tür polimerler ince cidarlı kalıp kullanımında iyi sonuçlar verir. Tüm

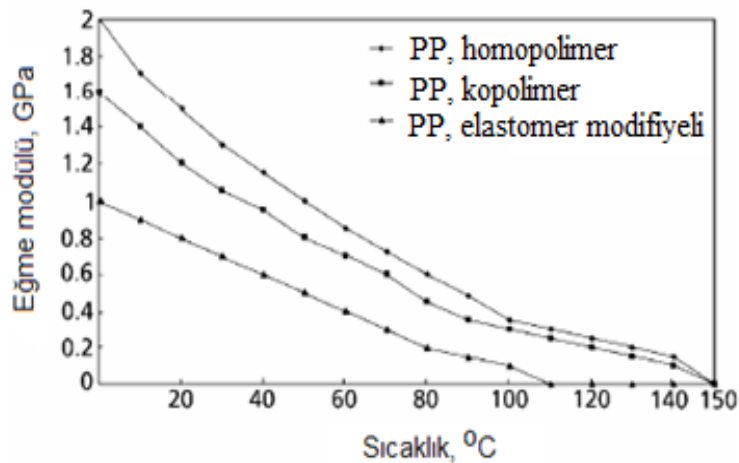
polimerler gibi polipropilenin de mekanik özellikleri molekül ağırlığına göre değişmektedir.

Şekil 2.14’de polipropilen çeşitlerinin çekme dayanım-uzama grafiği verilmiş olup aynı moleküler ağırlığa ya da ergiyik akışa sahip türler arasında, homopolimerlerin mekaniksel özelliklerinin random ve blok kopolimerlerin mekaniksel özelliklerine göre daha yüksek olduğu görülür.



Şekil 2.14. Polipropilen çeşitlerinin çekme dayanım-uzama grafiği (Yetgin 2012)

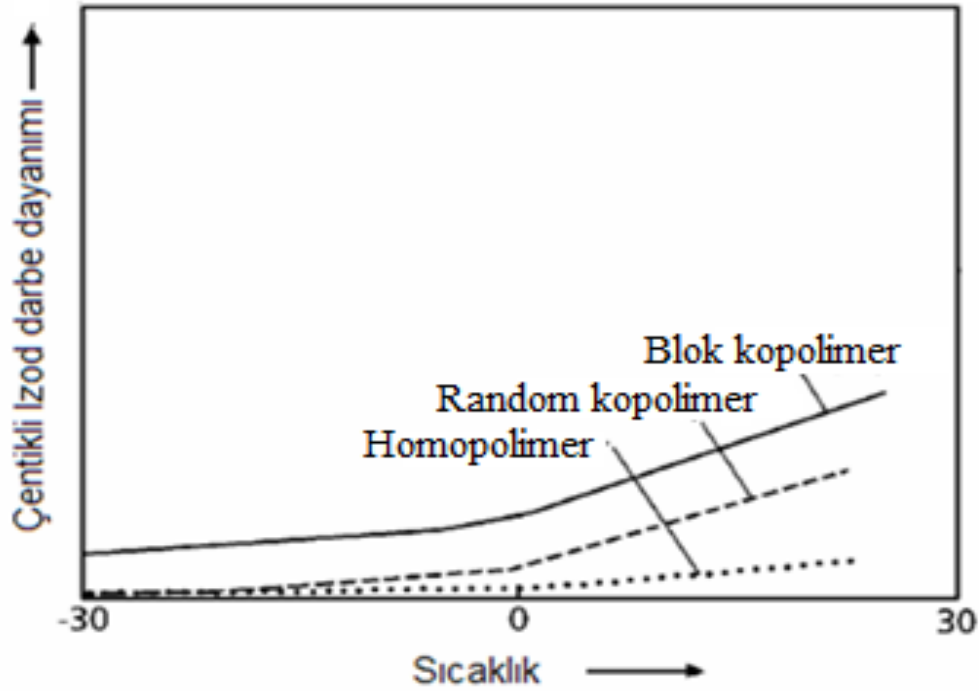
Polipropilenin çekme dayanımı ve eğme modülü, AYPE ve YYPE dışındaki polimer malzemelerden daha düşük olup yüksek eğme modülü/maliyet oranı avantajı ile düşük maliyet açısından birçok mühendislik polimerine göre ideal seçimdir.



Şekil 2.15. Polipropilenin farklı çeşitleri için sıcaklığa bağlı eğme modülündeki değişim grafiği (Yetgin 2012)

Şekil 2.15’de polipropilen polimerinin farklı çeşitleri için sıcaklığa bağlı eğme modülündeki değişimi gösterilmiştir. PP viskoelastik bir malzeme olması yanında, mekaniksel özellikleri, sıcaklık, zaman, test hızı, uygulanan gerilim seviyesi ve tipi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Kullanım sıcaklığının artış göstermesi, PP’nin daha sünek hale gelmesine neden olurken artan sıcaklık ile eğme modülü azalmaktadır. Elastiklik modülü ve dayanım ise zamanla, uygulanan yük altında azalır.

Polipropilen polimerinin darbe dayanımı, moleküler yapıya ve proses şartları neticesinde oluşan yapıya bağlı olarak değişim göstermektedir. Moleküler ağırlık, kopolimer içeriği ve kauçuk fazının sisteme eklenmesi ile darbe dayanımı geliştirilebilir. Kauçuk içerik artışı, tokluğun artmasına neden olarak, azalan sıcaklıkta sünek kırılma yerine gevrek kırılmanın yaşanmasına sebebiyet verecektir.



Şekil 2.16. Sıcaklık etkisiyle PP polimerlerinin çentikli darbe dayanımı değişim grafiği (Yetgin 2012)

Şekil 2.16’da sıcaklık etkisiyle çentikli izod darbe dayanımları değişen, PP polimer çeşitlerinin grafikleri verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda dahi PP kopolimer, homopolimere kıyasla daha yüksek darbe dayanımı göstermektedir.

Çizelge 2.3. PP malzemelerin mekanik özellikleri ve HDPE malzeme ile kıyaslanması

Özellik	Test Metodu	Birim	PP Natur	PP Gri-Beyaz	PPs Gri	YYPE Natur	YYPE Siyah-UV
Yoğunluk	ISO 1183	Gr/cm ³	0,91	0,91-0,92	0,95	≥0,94	≥0,95
MRF-Erime Akış Miktarı 230°C/2,16 kg 190°C/5 kg	ISO 1183	Gr/10dk	0,2-1	0,2-1	0,4-0,6	0,1-2	0,1-2
Esneklik Modülü	ISO 527	N/mm ²	≥1200	≥1200	≥1600	≥800	≥800
Isıl Genleşme Katsayısı	DIN 53752	K-1x10 ⁻¹	1,5	1,5	1,5	1,8	1,8
Yüzey Direnci	DIN VDE 0303, T3	-	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹²	>10 ¹²
Isıl İletkenlik	DIN 52612	W/mK	0,24	0,24	0,22	0,4	0,4
Erime Sıcaklığı	-	°C	165	165	170	-	-
Sertlik	ISO 868	Shore D	65	65	70	60	60
Yanıcılık	DIN 4102	-	B2**	B2**	B1	B2**	B2**

2.5. Polipropilen Polimerinin Kullanım Alanları

Polipropilen türleri genel olarak homopolimer, kopolimer ve random kopolimer olmak üzere üç gruba ayrılır ve kullanım alanları türlere göre değişiklik gösterir.

Homopolimer, tek tür monomerden çıkılarak sentezlenen bir polimer türüdür. Kopolimerler ise zincirlerinde kimyasal yapısı farklı birden fazla monomer türü bulundurur. Makromolekülü, bileşimi veya yapısında farklılık gösteren düzenli veya istatistiksel olarak değişen homopolimer bloklardan oluşan doğrusal kopolimerler, blok kopolimer olarak adlandırılır. Random kopolimer, ana zincir yapısı farklı bir monomer molekülü ile modifiye edilmiş bir polipropilen türüdür.



Şekil 2.17. Hammadde halinde polipropilen (Akkuş 2019)

2.5.1. Homopolimerlerin kullanım alanları

Genel olarak enjeksiyon ve şişirme kalıplama yöntemlerine uygun olan bu polipropilenler düşük sıcaklık uygulamalarında tercih edilmezler. Yüksek sertlik davranışı gösterirler. Uygulama alanlarına bakıldığında; gıda, oyuncak, elektrik prizleri, mutfak eşyaları, endüstriyel parçaların imalatı, kırtasiye ürünleri, tüfek ve tabanca kabzası, teyp ve video kasetleri, tekstil, elektrikli ev aletleri ve otomotiv sektöründeki aksamlar (ön konsol, tampon, direksiyon, benzin deposu vs.) PP'den ya da PP karışımlardan yapılmaktadır.



Şekil 2.18. Homopolimerlerin kullanım alanları (Akkuş 2019)

2.5.2. Kopolimerlerin kullanım alanları

Enjeksiyon ve şişirme kalıplamaya uygun olan bu polipropilenler ısıya dayanıklı olup darbe mukavemetleri yüksektir. Uygulama alanlarına bakıldığında; banyo eşyalarında (banyo küveti, leğen, kova vs.), otomobil akü, pil kutuları, far ve tamponlarında, elektronik ürünlerde, saklama kaplarında, çeşitli amaçlarla kullanılan taşıma kasalarında, beyaz eşya aksamlarında (çamaşır makinesi merdanesi, çamaşır makinesi kazanı, plastik dişli, buzdolabı iç aksamı ve buharlaşma paneli vs.) yerlerde aktif olarak kullanılmaktadır.

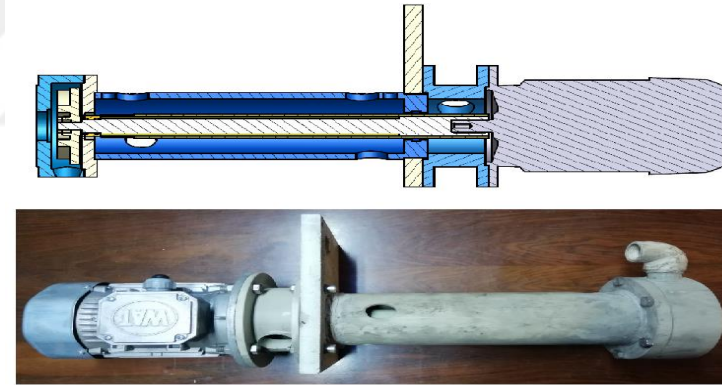
2.5.3. Random kopolimerlerin kullanım alanları

Saydamlıkları iyi olan bu polipropilenler sıhhi tesisat ürünleri başta olmak üzere vakumlu veya oluklu levha, profil plakalar, boru üretimi gibi endüstriyel ürünlerin hammaddesi olup şişirilerek kalıplama yöntemi kullanılarak şekillendirilirler.

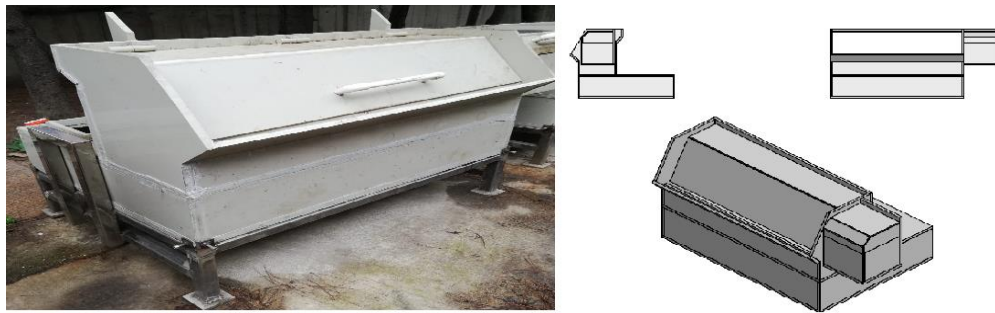


Şekil 2.19. Random kopolimerlerin kullanım alanları (Akkuş 2019)

Aşağıda polipropilen malzemelerin sektörde uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.



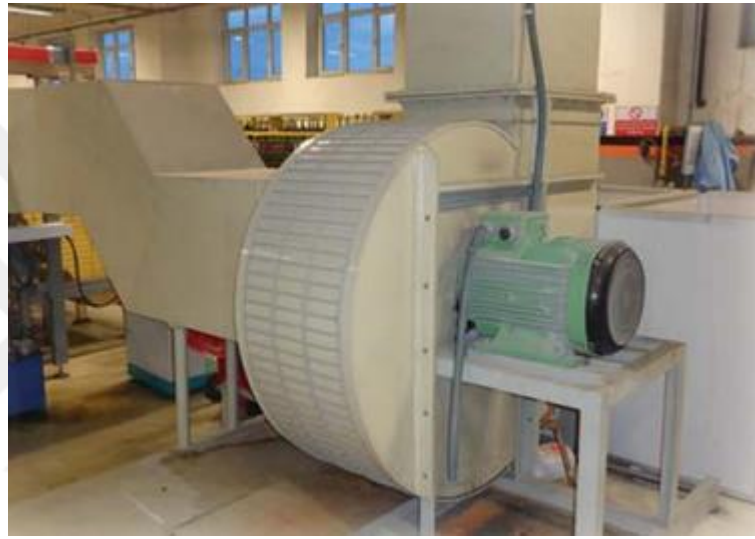
Şekil 2.20. Kaplama tesislerinde sıvı asit vb. kimyevi maddelerin taşınmasını sağlayan polipropilen malzemeden üretilmiş pompa kesit resmi ve görseli



Şekil 2.21. Kaplama tesislerinde sıvı asit vb. kimyevi maddelerin depo ve kaplama banyo ünitesi



Şekil 2.22. Polipropilen malzeme ile su deposu yalıtım uygulaması



Şekil 2.23. Polipropilen malzemedan imal edilmiş havalandırma sistemleri uygulaması

Ana hatlarıyla uygulama alanları belirtilen polipropilenler günümüz şartlarında hemen hemen her sektörde ağırlığı azaltmak ve moleküler özelliğinden kaynaklı, üretimi esnasında yapısal özelliklerini geliştirmek üzere katkı maddeleri kullanımına elverişli olması sebebiyle metal gibi ağır malzemeler yerine çok sayıda uygulamada yer almaktadır.

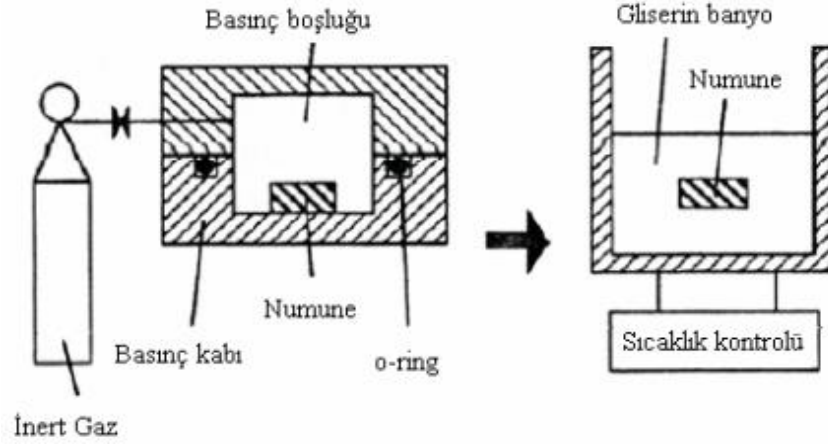
2.6. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri

Polimer köpüklerin üretiminde en yaygın teknoloji ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve batch prosesi yöntemi olmakla birlikte, polimer matris ve kullanılan köpük ajanı türüne bağlı olarak da farklı yöntemler kullanılabilir. Basıncın azaltılması veya sıcaklığın artırılması bir termodinamik kararsızlık oluşturur. Oluşan bu kararsızlık köpük ajanı

çözünürlüğünü azaltarak çekirdeklenme ve hücre büyümesine sebep olur. Bu durum üretim yöntemlerinin temel prensibini oluşturur.

2.6.1. Batch prosesi ile köpük üretimi

Polimer malzeme ilk başta doymuş hale getirilmelidir, bunun için belirlenen bir basınç ve sıcaklık altında CO₂ veya N gibi köpük yapıcılar kullanılır. Yapılan bu işlemlere doyma basıncı ve doyma sıcaklığı denir. Sonrasında çekirdeklenmenin başlaması için termodinamik kararsızlık meydana gelmesi gerekir. Bunun için basınç serbest bırakılarak ya da numune ısıtılarak, doymuş olan gaz çözünürlüğünün hızlıca azalması sağlanır. Numunenin köpük yapıcı ile doyurulmasından sonra hücre çekirdeklenmesi için iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi, süper kritik durum ile ifade edilir. Doyma sıcaklığı, polimerin camsı geçiş sıcaklığına yakın veya bu sıcaklıktan fazla ise doyma sıcaklığı, köpükleme sıcaklığı gibi davranış gösterir. Burada polimer, basıncın hızlı bir şekilde serbest bırakılması ile bu sıcaklıkta köpüklenir. Bu yöntemde, çekirdeklenmeye basınç azalımı ve basınç azalımının zamana bağlı oranı sebep olur. İkinci yöntem ise diğerinin tam tersi şekilde doyma sıcaklığı, polimerin camsı geçiş sıcaklığından daha düşük olduğu durumdur. Camsı yapının rijitliği ile polimerin genleşmesi engellenir. Doymuş polimer, camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa getirilir ve bu işlemi yapmak için sıcaklık kontrolünün sağlandığı bir yağ banyosunun içerisinde doymuş polimer malzeme bekletilir. Bu şekilde köpüklenme sıcaklığı sağlanmış olur. Burada çekirdeklenmeye sıcaklığın artması ve sıcaklık artışının zamana bağlı oranı sebep olur. Çekirdeklenme yöntemi fark etmeksizin polimerin camsı geçiş sıcaklığından daha az bir sıcaklıkta soğutulması ile çekirdeklerin büyümesi durdurulur.



Şekil 2.24. Batch prosesi şematik görseli (Yetgin 2008)

Polimer malzemenin ölçüleri ile doyma zamanı birbiri ile bağlantılıdır. Doyma süresi, polimer içindeki köpük yapıcının dağılma ve yayılma zamanı olarak ifade edilir ve polimerin ölçülerine göre birkaç saatten birkaç güne değişiklik gösterebilir. Bu durum üretim sayısında düşüklüğe sebep olarak maliyeti arttırır. Bu prosesin bir dezavantajıdır, diğer bir dezavantajı ise bu proses ile üretilen köpüklerin genleşme oranı düşüktür. Doyma zamanı, sıcaklığı, basıncı ve basıncın zamana bağlı azalımı hücre yoğunluğunu belirleyen en önemli etkenlerdir.

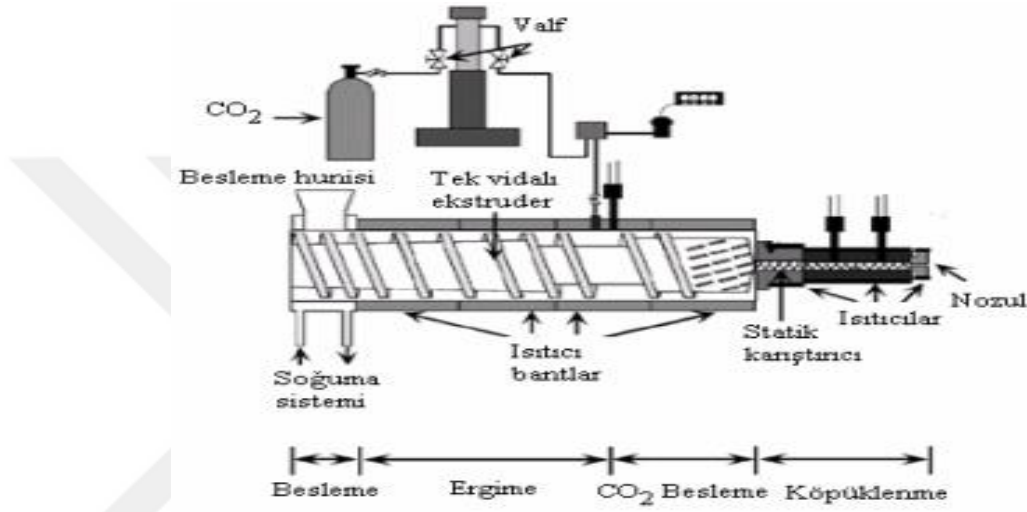
2.6.2. Ekstrüzyon kalıplama prosesi ile köpük üretimi

Batch prosesinin dezavantajı olan uzun doyma süresini kısaltmak için bu yöntem ortaya çıkmıştır. Plastikleştirme, polimer gaz solisyonunun oluşumu, hücre çekirdeklenmesi, hücre büyümesi ve hücre kararlılığı olmak üzere köpük üretimi beş aşama ile sağlanır. Bu proseste CO₂ gazının kullandığı tek vidalı ekstrüder, çift vidalı ekstrüder, bunlara bağlı olan karıştırma ve soğumasının birbirinden bağımsız olduğu tandem ekstrüderler kullanılır.

Köpüklenmede öncelikle polimer reçine plastikleştirilir. Homojen karışım oluşana kadar ekstrüzyon kovanın içine köpükleyici gaz eklenir ve karıştırılır. Eklenen bu gazın miktarı çözünübilirlik seviyesinde bulunmalıdır. Köpükleyici gaz, ekstrüzyon kovanında yükselen sıcaklık sebebiyle konveksiyon difüzyonuna sebep olur ve polimer matris içerisinde çok yüksek oranda difüzyon gerçekleşir. Elde edilen karışım, ekstrüder başlangıcından kalıp çıkışına doğru basıncı azalarak zorlanır. Çekirdeklenme nozülünde hızlı basınç azalımı meydana gelir ve çekirdeklenen kabarcıklar büyümeye devam eder.

Çekirdeklenmenin sonlanmasından sonra ürünün şekil ve köpük genişmesini kontrol edebilmek için kalıplar kullanılır. Köpüklenen akışkan, nozülünden dışarı çıkarak ortam havasında sertleşir.

Bu proses verimliliği yüksek, kontrol edilebilirliği kolay ve ürün şekillendirebilme kolaylığı sayesinde Batch prosesine göre oldukça ekonomiktir. Ayrıca elde edilen köpüklerin kabukları katılarak prostesten gaz kaçışını kontrol edilebilir hale getirir.



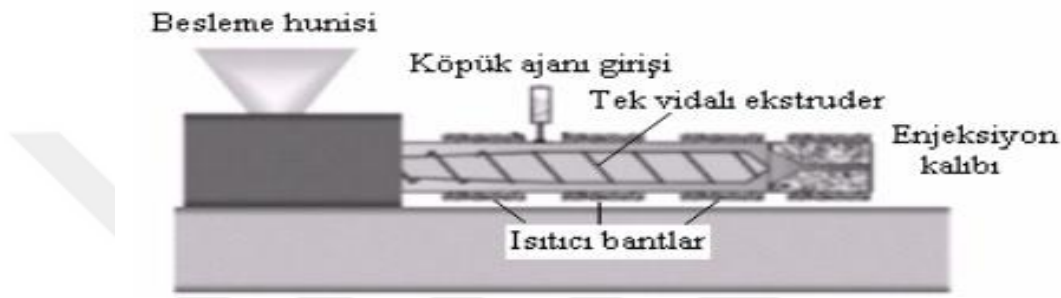
Şekil 2.25. Tek vidalı ekstrüder prosesi şematik görseli (Yetgin 2008)

2.6.3. Enjeksiyon kalıplama prosesi ile köpük üretimi

Bu proses gaz bozulması, hücre çekirdeklenmesi, hücre büyümesi ve ürün şekillendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Enjeksiyon makinesi besleme hunüsü, enjeksiyon vidası, ısıtıcıları ve kalıptan meydana gelmektedir. Bu proseste besleme hunüsünden polimer eklenirken, köpük yapıcı ise giriş kısmından ergimiş polimer içerisine eklenir. Proseste kullanılan kalıp hacmi tamamen doldurulmaz, eklenen gaz yüklü polimerin miktarı azaltılır, enjeksiyon ile kalıplama sırasında polimer malzeme, camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Kalıpta, köpük yapıcının ürettiği gaz aniden serbest kalır ve bu durum kalıpta, basıncın aniden azalması demektir. Hücrelerin çekirdeklenmesi ve sonrasında oluşan hücre büyümesi, kalıptaki boşlukları doldurur. Genleşmenin tamamlanması ile kalıplanan polimer köpük, sertleşme sıcaklığına kadar soğutulur. Enjeksiyonun basıncı, kalıbın doluluğu, köpük

yapıcının konsantrasyonu, kalıp soğuma süresi, geri besleme basıncı, kalıbın sıcaklığı ve ergiyik sıcaklığı bu proseste hücre morfolojisini etkilemektedir.

Bu prosesin en önemli özelliği, çözünen gazın varlığının oluşturduğu düşük viskozitenin, enjeksiyon basıncını azaltma özelliğidir. Üretimi yapılan ürünün hafifliği, daha iyi boyutsal özellikler, soğuma süresindeki azalma ve çevrim süresindeki hızlılık bu prosesin bizlere sağladığı avantajlardır. Ayrıca şekil verilmesi zor parçaların üretiminde kolaylık sağlar.



Şekil 2.26. Enjeksiyon köpük kalıplama prosesi şematik görseli (Yetgin 2008)

2.7. Hopkinson Bar Basma Deneyi

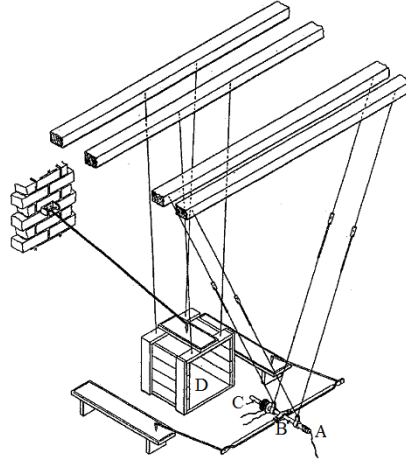
Malzeme mukavemet analizlerini ve mekanik davranışlarını öğrenebilmek için birçok tahribatlı analiz yöntemi bulunmaktadır. Malzemeyi deformasyona maruz bıraktıktan sonra yapısı ve mevcut formundaki değişimi, almış olduğu tahribatı, yük altında göstermiş olduğu şekil değiştirmesini incelemek için darbe testi, iki eksenli çekme testi ve hidrolik şişirme testi en genel kullanılan yöntemlerin başını çekmektedir. Ancak bu testler statik ya da yarı statik yük altında uygulanan testlerdir. Bu testlerde malzemeye uygulanan tahribat hızı 1 s^{-1} 'den küçük ve yaklaşık 10^{-4} s^{-1} - 10^{-1} s^{-1} değerleri arasındadır. Bu testlerde yüksek tahribat hızlarına çıkmak mümkün değildir. HBB deneyinde ise tahribat hızı 10^2 s^{-1} - 10^4 s^{-1} değer aralığına çıkmaktadır. HBB deneyi sonucu göstermiştir ki tahribat hızının yükselmesi malzemenin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnci, sünekliği, pekleşmesi (deformasyon sertleşmesi) gibi mekanik özellikleri şaşırtıcı bir biçimde değiştirmiştir. Bu sayede bilim adamları tarafından önemi artmıştır. Yüksek tahribat hızı ve dinamik yük altında test imkanı sağlayan HBB deneyi askeri alanda zırh ve mermi üretimi, polimer, çelik ve metal malzemelerin mekanik analizi, çarpışmaların

ve malzeme tarafından alınan hasarın önem arz ettiği yerlerde, yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır.

Malzeme üzerine uygulanan tahribatlı testler sonucunda ayrıntılı bilgi almak ve test edilen malzemede oluşan deformasyonun analizinin iyi yapılması gerekmektedir. HBB deneyinde malzeme üzerine direkt tahribat vermek yerine iki esnek çubuk arasında malzemeyi yerleştirerek sadece bir esnek çubuğa güç uygulanmıştır. Bu sayede malzeme üzerinde daha detaylı analiz yapmak mümkün hale gelmiştir.

John Hopkinson 1872'de Düşen ağırlık darbe yöntemi ile çelik tel üstünde deneyler yapmış ve malzemede bir gerilme dalgası oluştuğunu fark etmiştir. Bu gerilme dalgasının darbe şiddetinin de etkisi altında malzemede kopmalar oluşturduğunu saptamış olmasına rağmen tespit ettiği gerilme dalgasının ölçümünü yapamamıştır.

Bertram Hopkinson (John Hopkinsonun oğlu) 42 yıl sonra babasının uyguladığı deneyleri irdelemiş, irdelediği deneylerden öğrendikleri ve kendi tecrübelerini harmanlayarak patlama ile meydana gelen basıncın ölçümünü gerçekleştirebilmek amacıyla basma çubuğu tasarımını yapmıştır. Bertram tasarımında rahatça sallanabilecek bir sarkaç sistemi, bir patlayıcı ve çelik çubuklar kullanmıştır.



Şekil 2.27. Bertram Hopkinson deney düzeneği (Gümüş 2019)

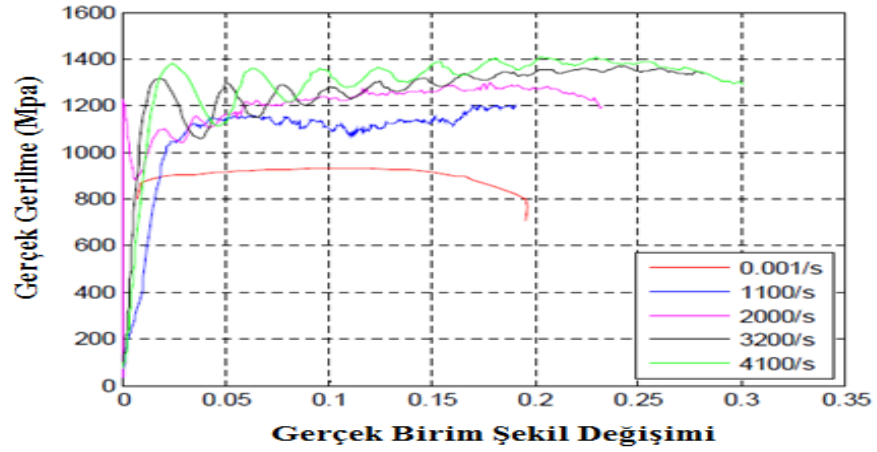
Şekil 2.27'de görünen A noktasındaki patlayıcının ateşlenmesi sonucu patlaması ile B çubuğu üstünde oluşan gerilme dalgası sarkaç üzerinde asılı C noktasındaki çubuğu ileriye doğru fırlatmıştır. Deney düzeneğindeki balistik sarkaç C noktasında meydana

gelen açısız momentumun hesaplanmasını sağlamaktadır. Deney sayesinde çubuktaki momentum değişimi, uygulanan basınç ve basınç süresi ölçülebilmştir. Deney sonucunda basınç ve zamana bağlı bir eğri ortaya çıkmasına rağmen beklenen hassasiyette sonuç elde edilememiştir.

Patlama gerçekleştiği zaman basma çubuğunda dinamik yüklerin oluşturduğu radyal ve aksel şekil değişimini ölçmek için 1948 senesinde Davies silindirik yapıya sahip kondansatör ve paralel plaka kullanmıştır. Patlayıcının ateşlenmesinin ardından basma çubuğu kesitinde meydana gelen şekil değişiminin, silindirik yapıya sahip kondansatör ve çubuk yüzeyindeki doğrusal şekil değişiminin ölçümünü, paralel plaka ile sağlamıştır. Herbelt Kolsky 1949 senesinde Hopkinson deney düzeneği üstünde yaptığı geliştirmeler sayesinde metal, polimer ve kauçuk yapılarda bir takım malzemenin yüksek tahribat hızında şekil değiştirmelerini gözlemlemiş, deney sonucunda gerilim ve şekil değiştirmeye bağlı bir grafik elde etmiştir.

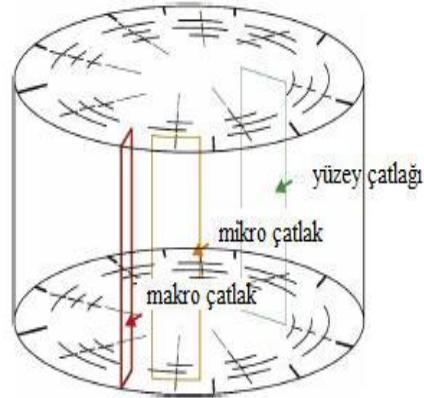
Hербelt Kolsky geliştirdiği düzenekte iki adet basma çubuğu kullanmış, test edeceği malzemeyi bu iki basma çubuğunun arasına koymuştur ve kondansatör ile tespit ettiği sonuçları osiloskop cihazında gözlemlemiştir. Yaptığı hesaplarda ise, gerilme dalgası herhangi bir saçılma ve dağılma olmadan yayılır ve doğrusal gerilme yayılımına sahiptir gibi bir takım kabuller yapmıştır. Hopkinson, basma çubuğunda yaptığı bu gelişmeler ve deney sonucu aldığı sonuçlar sayesinde kurduğu deney düzeneği oldukça önem kazanmış ve adı Parçalı Hopkinson basma çubuğu olarak bilim dünyasında yerini almıştır.

Krafft, deney sonucu ölçülen değerlerin doğruluğunu arttırmak ve daha hassas ölçüm yapabilmek için 1954 senesinde deney düzeneğine gerilim ölçerler (strain gauge) yerleştirmiş, istediği darbe etkisine ulaşabilmek ve deney sürekliliğini sağlayabilmek için deneyde patlayıcı kullanmak yerine darbe etkisi oluşturmak için gaz tabancası geliştirmiş ve kullanmıştır. İlerleyen zamanlarda deney düzeneğine yapılan iyileştirmeler sayesinde parçalı hopkinson deney düzeneği darbe yükü haricinde çekme, burulma, kırılma analizleri yapabilecek bir hal almış ve sonlu elemanlar analizi yazılımları, dijital cihazlar ve gelişen teknoloji ile parçalı hopkinson deney düzeneği ile yapılan testlerde daha kesin ve hassas ölçümler gözlemlemek mümkün olmuştur.



Şekil 2.28. Farklı şekil değiştirme hızları için gerilme-şekil değiştirme grafiği (Gümüş 2019)

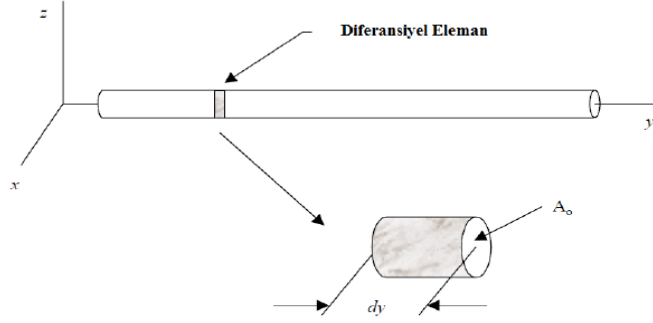
2018 senesinde Fan, Weerheijm ve Sluys polimer yapıya sahip bir malzeme üzerinde farklı şekil değiştirme hızlarında ve dinamik yükler altında malzemenin verdiği tepkinin analizini yapmış ve deney sonucu polimer malzeme üzerinde oluşan deformasyonu incelemiştir. İlk deformasyondan itibaren son parçalanmaya kadar art arda gerilme sonucu meydana gelen dinamik hasar sürecinin radyal yüzey çatlama, çevresel mikro çatlama ve radyal makro parçalamaya sebep olduğu gözlemlenmiştir (Fan, J.T., Weerheijm, J., Sluys L.J., 2018).



Şekil 2.29. PHBÇ yüklemesi altında silindirik polimer malzemede oluşan hasar çeşitlerinin gösterimi (Gümüş 2019)

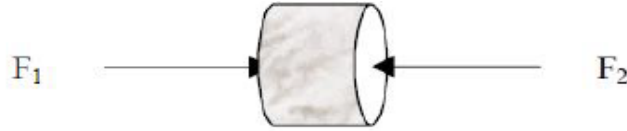
2.7.1. Hopkinson basınç bar deney sistemi prensibi ve hesaplama teorisi

Deneyin çalışma prensibi, darbe kuvvetini oluşturan gaz tabancası, mermi ve çubuk bileşenleri ile tek boyutlu bir dalga yayılımı oluşturmak ve bu dalga yayılımının analiz edilmesidir.



Şekil 2.30. Deney düzeneği üzerindeki çubuk ve diferansiyel eleman (Şimşek 2011)

Şekil 2.30’da merminin oluşturacağı darbeden önce statik dengede olan çubuk, A_0 kesit alanına ve dy uzunluğuna sahip diferansiyel eleman bulunmaktadır. Darbenin etkisi ile diferansiyel eleman üzerinde Şekil 2.31’de görüldüğü gibi F_1 ve F_2 kuvvetleri meydana gelmektedir.

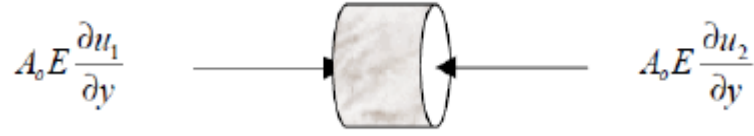


Şekil 2.31. Darbe etkisi uygulanan diferansiyel eleman (Şimşek 2011)

Darbe etkisi ile diferansiyel elemanda meydana gelen kuvvetler, diferansiyel elemanın kesit alanına uygulanan gerilmeler ile ilişkilidir. Hook kanununa uygun çubuklarda Elastisite modülü (E), şekil değiştirme (du/dy) ve gerilme (σ_y) arasında bir ilişki vardır. Diferansiyel elemanda meydana gelen gerilimin tek eksenli olduğunu kabul edersek, meydana gelen kuvvetleri temel değişkenler (u) kullanarak ifade edebiliriz.

$$F_y = A_0 \cdot E \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.6)$$

$$\sigma_y = E \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$



Şekil 2.32. Diferansiyel eleman üzerindeki kuvvetler (Şimşek 2011)

Şekil 2.32’de gösterilen diferansiyel eleman üzerinde etki eden kuvvetleri Newton’un ikinci yasası olan kuvvetlerin hareket üzerine etkisine göre uyarırsak hareket denklemini şu şekilde yazabiliriz.

$$A_0 \cdot E \cdot \frac{du_1}{dy} - A_0 \cdot E \cdot \frac{du_2}{dy} = A_0 \cdot dy \cdot \rho \cdot \frac{d^2u_1}{dt^2} \quad (2.8)$$

$$\frac{d\sigma}{dy} = \rho \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \quad (2.9)$$

Denklem 2.7’yi denklem 2.9’da yerine koyup düzenledikten sonra parçacık ivmelerinin sabit olduğunu kabul edersek y ekseninde hareket denklemini yazabiliriz.

$$C_0^2 \cdot \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{d^2u}{dt^2} \quad (2.10)$$

C_0 dalga hızını ifade eder ve denklemini aşağıdaki gibi yazılır. Denklemden, E çubuğun elastisite modülünü, ρ yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.11)$$

Hareket denklemini, veri analizinde doğrudan kullanılsa bile sonsuz bir dalga boyundaki dalganın teorik hızını bulmak için kullanılır ve bu sayede analizi yapılan parçanın şekil değişimi, gerilimi ve deformasyon hızı değerleri bulunur.

2.7.2. Çubuklarda dalga yayılımı ve yansıması

Kabullerde çubuk uzunluğu sonsuz olarak kabul edilse bile deney düzeneğinde belirli bir uzunluğa ve kesit alanındaki çap ve malzeme değişimi gibi süreksizlikleri vardır. Çubukların malzeme değişimi çubuk empedansı şeklinde de isimlendirilir. Kullanılan çubukların dalga yayılımına etkileri oldukça fazladır. Çubuk ve numunenin birbirine temas eden yüzeyleri, çubuk birleşim noktaları ve çubuk uçları sınır noktalarıdır. Bu

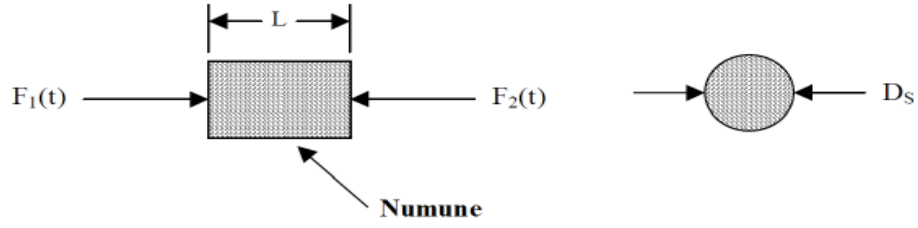
kısımlarda dalga geri yansımaları neden olur. Dolayısıyla buralarda şekil değiştirme daha yüksek çıkar ve bu yüzden ölçümler bu noktalardan daha uzak noktalarda yapılmalıdır.

Empedans, çubuğa uygulanan kuvvetin parçacığın hızına oranı ile bulunur ve Z ile ifade edilir.

$$Z = \frac{F}{v} = A_0 \cdot \rho \cdot C_0 \quad (2.12)$$

2.7.3. Gerilim, şekil değiştirme ve deformasyon hızı, veri analizi

Deney numunesi üzerine etki eden kuvvetler Şekil 2.33’de gösterilmiştir ve ortalama kuvvet, denklem 2.13’de, gerilim ise denklem 2.14’de gösterildiği gibi hesaplanır.



Şekil 2.33. Numune üzerine etki eden kuvvetler (Kandırmış 2016)

$$F_{ort}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{F_{ort}(t)}{(\pi D_s^2 / 4)} \quad (2.14)$$

Dinamik halde denge durumunda olan numunede, çubuk uçlarındaki kuvvetler gelen ve yansıyan dalgaların şekil değişimi cinsinden yazılabilir.

$$F_1(t) = E [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \frac{\pi D_B^2}{4} \quad (2.15)$$

$$F_2(t) = E \varepsilon_r(t) \frac{\pi D_B^2}{4} \quad (2.16)$$

D_B kullanılan çubuk çapını ifade etmektedir ve denklemlerde gerekli düzenlemeler yapıldığında şekil değiştirme cinsinden ortalama gerilme denklemi yazılmış olur.

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{ED_B^2}{2D_s^2} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (2.17)$$

Test numunesi üzerinde oluşan deformasyonun her yere aynı şekilde etki ettiğini kabul edersek giriş ve çıkış çubuklarında meydana gelen şekil değişimi aynı olur. Bu eşitlikten faydalanarak ortalama gerilme denklemi yeniden düzenlenebilir.

$$\varepsilon_t(t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) \quad (2.18)$$

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{\pi D_B^2}{D_s^2} \cdot \varepsilon_t(t) \quad (2.19)$$

Malzeme üzerinde birim zamandaki şekil değişim miktarı, deformasyon hızıdır. Darbe sonrası test numunesi ve çubuk ara yüzeyinde meydana gelen yer değişimi yardımı ile deformasyon hızı bulunabilir.

Giriş (v_i) ve yansıyan (v_r) dalgaya bağlı parçacık hızlarının toplamı, giriş çubuğu ve test numunesi ara yüzeyinde oluşan hızı (v_1) verir. Y ekseninde giriş dalgası +y, yansıyan dalga ise -y doğrultusunda hareket eder.

$$v_1 = v_i + v_r \quad (2.20)$$

$$v_i = -C_0 \cdot \varepsilon_i \quad (2.21)$$

$$v_r = C_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2.22)$$

$$v_1 = -C_0 \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (2.23)$$

Dalga +y doğrultusunda ilerlediği için v_2 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$v_2 = -C_0 \cdot \varepsilon_t \quad (2.24)$$

Şekil değiştirme hızı genel formülü Denklem 2.25'deki gibi yazılmaktadır. Denklemde gerekli düzenlemeler yapıldığında Denklem 2.26'daki gibi yazılır.

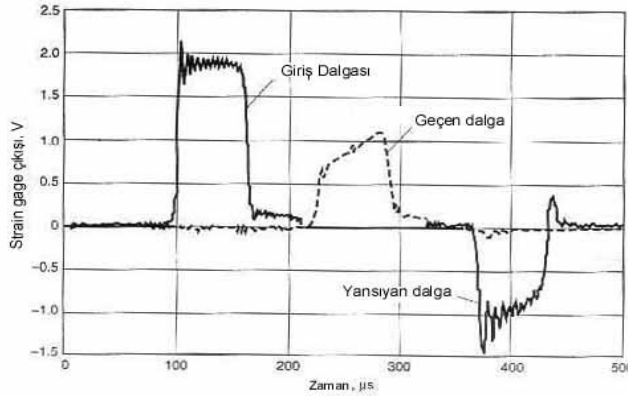
$$\dot{\varepsilon}_n = \frac{(v_1 - v_2)}{L_n} \quad (2.25)$$

$$\dot{\varepsilon}_n = \frac{2C_0(\varepsilon_r)}{L_n} \quad (2.26)$$

ϵ_n sembolü şekil değiştirme hızını ifade etmektedir ve şekil değiştirme ifadesinin hesaplanması için belirlenen bir t zamanı için ϵ_n 'in 0'dan t zamanına integralinin hesaplanması gerekir. Bu sayede şekil değiştirme ifadesi (gerinme) ϵ_s hesaplanabilir.

$$\epsilon_s = \frac{2C_0}{L_n} \int_0^t \epsilon_r dt \quad (2.27)$$

Deney düzeneğinde belirli yerlere yerleştirilen gerinim ölçerler (strain gauge) sayesinde veri elde etmek mümkündür. Sistem üzerinde şekil değişikliği meydana gelirken, gerinim ölçer gerilir ya da sıkışır ve içerisinde bir direnç değişimi olur. Gerinim ölçer bu değişimini wheatstone köprüsü sayesinde görüntülenebilen ve analiz edilebilen bir elektrik sinyaline dönüştürerek veri elde etmemizi sağlar. Elde edilen sinyaller kullanılarak şekil değişimi verilerine çevrilir. Şekil 2.34'de HBB deneyinde elde edilen gerinim ölçer kayıtları ile ilgili bir örnek grafik verilmiştir.



Şekil 2.34. Parçalı hopkinson deneyinde ölçülen gerinim ölçer kayıtları (Şimşek 2011)

2.8. Literatür Taraması

Plastik işleme sanayi sektöründe rekabetçi olabilmek için, üretim süreçlerinde yenilikçi gelişmeler ile ürün maliyetlerini minimuma çekmek ve bu yeni ya da geliştirilmiş ürünleri piyasaya sunmak gerekir. Polimer köpükler, yoğunluklarının ve üretim maliyetlerinin düşük olması sebebiyle iyi bir alternatif olup bu talebe karşılık verebilecek ürünler arasındadır.

Geçmişten günümüze kadar araştırmacılar bu malzemelerin şekillendirilebilirliği, deformasyonu ve malzeme karakterizasyonu gibi bilgilere sahip olabilmek adına birçok

yöntem kullanmışlardır. Bu bilgilere ulaşma sırasında hammadde ve zaman tasarrufu sağlayabilmek için de birçok metot geliştirilmiştir. Üründe meydana gelen deformasyonun ya da üründe oluşan gerilme durumunun sonlu elemanlar veya benzeri metotlar ile öngörülememesi ya da hatalı şekilde tahmin edilmesi, hem zaman hem maliyet kaybına sebep olmaktadır. Bu nedenle zaman ve malzeme tasarrufu amacı güdülen birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler statik veya yarı statik yüklemeye maruz kalan malzemeler için elverişli olup yüksek şekil değiştirme hızlarına çıkamamaktadır. Bu çalışmada, farklı yoğunluktaki EPP köpük malzemelere yüksek şekil değiştirme hızları uygulanacağı için dinamik dayanımları Split Hopkinson (Bölünmüş Hopkinson Basma Çubuğu) deney düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinden elde edilen malzeme verileri kullanılarak, sonlu elemanlar yazılımı (HyperMesh) ile bu farklı yoğunluktaki köpüklerin performansları incelenmiştir.

Her araştırmacı çalışmasında farklı bir polimer malzeme kullanmış olup bazıları ise çalışmalarında köpük yapıcılarının tesirini incelemiştir. Birkaç araştırmacı ise işlem özelliklerinin materyalde oluşturulan köpük hücre yapısına etkisini incelemiştir.

Altepping ve arkadaşları, farklı viskozitelere sahip polipropilen termoplastik malzemeleri ekstrüzyon yöntemi kullanarak 0.2 g/cm^3 'den daha az yoğunluğa sahip köpükler üretmişlerdir. Uygun köpük yapıcı ve çekirdekleyici ajanın kullanımı ile $300 \mu\text{m}$ hücre boyutuna sahip ince hücreli yapılar elde etmişlerdir (Altepping ve ark. 1990).

Xin ve arkadaşları, enjeksiyon köpük kalıplama yöntemi ile PP/atık kauçuk tozu karışımını kullanarak kimyasal köpük ajanı yardımıyla polimer esaslı köpük malzeme üretmişlerdir. Enjeksiyon hızı, vida adımı, ergiyik sıcaklığı ve köpük ajanı miktarının üretilen köpüklerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucu, köpük ajanı miktarının hücre yoğunluğu ve boyutu üzerine en önemli parametre olduğunu, köpük kabuk tabaka kalınlığının artmasıyla çekme dayanımının arttığını göstermiştir (Xin ve ark. 2004).

Chien ve arkadaşları, polipropilen köpüklerin mekanik özelliklerini enjeksiyon köpük kalıplama yöntemi ile araştırmışlardır. Ergiyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi parametrelerin, mekanik özelliklere (rijitlik, çekme ve eğme dayanımı) ve parça ağırlığına etkilerini incelemiştir. Köpük ajanı miktarının ve parça kalınlığının,

köpüklenme derecesi üzerine etkilerini de incelemişlerdir. 0.5 mm kalınlığındaki çekme numunelerinde yaklaşık olarak %4 ile %9 oranında ağırlık azalımı gözlemlenirken 15 mm kalınlığındaki eğme numunelerinde ağırlık azalımı yaklaşık olarak %43-50 arasında meydana gelmiştir. Parça kalınlığının köpüklenme derecesini belirlemede önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Artan ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve kalıp sıcaklığı ile parça ağırlığı ve mekanik özellikler azalırken, geri besleme basıncının artması ile artış göstermiştir. Köpük ajanı miktarının %0.8'den %1.6'ya çıkmasıyla mekanik özellikler (çekme dayanımı, eğme dayanımı ve rijitlik) azalma göstermiştir (Chien ve ark. 2004).

Nam ve arkadaşları, ekstrüzyon metodu ile lineer ve dallanmış polipropilen kullanarak polimer köpük malzeme üretmişler ve proses koşullarının köpük performansı üzerine etkilerini gözlemlemişlerdir. Kimyasal köpük ajanı türü, ince kesitli kalıbın uzunluk/çap oranı gibi parametrelerin köpük yoğunluğuna etkilerini araştırmışlardır. Köpük yoğunluğunu etkileyen en önemli parametrenin, dallanma oranı olduğunu belirlemişlerdir (Nam ve ark. 2005).

Lee ve Cha, enjeksiyon köpük kalıplama metodu yardımı ile fiziksel köpük ajanı kullanarak, %20 talk (sulu magnezyum silikat) katkılı polipropilen köpük malzeme üretmişlerdir. Kalıp sıcaklığının, polimer ergiyik sıcaklığının ve enjeksiyon akış oranının, kabuk tabakası oluşumuna etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları neticesinde, kabuk tabakası kalınlığını etkileyen kritik etmenin kalıp sıcaklığı olduğu sonucuna varmışlardır. Kalıplanmış numunelerin darbe dayanımları ise yüksek kalıp sıcaklığından etkilenmiştir (Lee ve ark. 2005).

Yetgin ve Ünal, polimer köpük üretiminde, polimer içindeki gözeneklerin malzemenin yoğunluğunu önemli oranda azalttığını ve daha az hammadde kullanımı sağladığını, dolayısıyla ürünün fiyatını da büyük oranda düşürdüğünü belirlemişlerdir. Mikro-hücreli köpüklerin, köpüksüz polimerlere göre üstün özelliklere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. En fazla tercih edilen ekzotermik kimyasal köpük yapıcının Azodikarbonamit olduğunu, karbondioksitin ise ozona zarar vermemesi sebebiyle fiziksel köpük yapıcılar arasında en fazla tercih edilen köpük yapıcı olduğunu söylemişlerdir. Polimer köpük malzemelerin hem ekstrüzyon köpükleme gibi metodlarla hem de Batch köpükleme gibi süreksiz metodlarla üretilebileceğini dile getirmişlerdir. Sürekli ekstrüzyon köpükleme yönteminin, Batch yöntemine kıyasla

kontrolünün kolay olması, veriminin yüksek oluşu ve esnek ürün şekillendirme özelliklerinden dolayı daha ekonomik olduğunu ve sürekli ekstrüzyon köpük üretim yönteminde kalıp ve ergime sıcaklığının düşük olmasının ergime direncini geliştirdiği gibi hücre birleşmelerini de azalttığını gözlemlemişlerdir. Enjeksiyon köpük kalıplama işlemi ile azalan soğuma zamanı, hızlı çevrim zamanı, daha iyi ölçü kararlılığı ve model parçalarda ağırlık tasarrufu elde edilebileceğini söylemişlerdir. Ayrıca enjeksiyonla köpük malzeme metodu ile ekstrüzyonla köpük üretim metodu kıyaslandığında, karmaşık şekilli parçaların üretiminde avantaj sağladığı ve uygun köpük yapıcı seçilmesi ile istenilen özelliklerde, düşük yoğunluklu, homojen olarak dağılmış küçük hücre boyutlu köpük malzemeler üretilebileceği gözlenmiştir (Yetgin ve ark. 2008).

Cisneros ve arkadaşları, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kimyasal köpük ajanı kullanarak üretilen YYPE yapısal köpüklerin hücre yoğunluğuna, hücre boyutuna ve kabuk tabakası kalınlığına farklı kalıp sıcaklıklarının tesirini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları eğme ve darbe dayanımları açısından da incelenmiştir. İşlemler sonucu, toplam kabuk tabakası kalınlığının artışı darbe direncini arttırırken, kalıp sıcaklığının artışı, eğme ve darbe dirençlerini azaltmıştır (Cisneros ve ark. 2008).

Bouix ve arkadaşları, EPP (Genleştirilmiş polipropilen) köpük performansını, yoğunluk, mikro yapı ve ayrıca dinamik yükleme sırasında uygulanan şekil değiştirme hızı gibi farklı parametrelerin fonksiyonu olarak incelemişlerdir. Yüksek gerinme hızı basınç testleri yaklaşık 1500 s^{-1} hızında, 34 ve 150 kgm^{-3} arasındaki çeşitli yoğunluklarda, mikro yapısal görünümlü iki özel EPP köpük, naylon çubuklar ile viskoelastik Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu aparatı (SHPB) kullanılarak incelenmiştir. Köpüklerin kapalı hücrelerinde sıkışan gazın katkısını değerlendirmek için, dinamik yükleme hızlarında bir akışkan odasında basınç testleri gerçekleştirilmiştir. EPP köpüklerde sıkıştırma testleri sonucunda köpük mukavemetinin, yoğunluğa göre arttığı gözlenmiştir. Daha yüksek yoğunluklu köpüklerde şekil değiştirme hızının daha belirgin olduğu saptanmıştır. Köpük mikro yapısı, iki farklı mikro yapıda ve eşit yoğunlukta genleşmiş polipropilen köpük vasıtasıyla da incelenmiştir. Daha büyük hücrelerin (daha uzun ve daha kalın hücre duvarları) mikro atalet etkisinin eğilmeyi veya bükülmeyi zorlaştırması sebebiyle dinamik yükler altında daha güçlü olduğu gözlenmiştir (Bouix ve ark. 2009).

Ünal ve Yetgin, polipropilen köpük malzemenin mekanik özelliklerine ve hücre morfolojisine proses koşullarının etkisini incelemişlerdir. Ergiyik sıcaklığının artışı, hücre çapını %13,5 ve hücreler arası uzaklığı ise %18,5 oranında arttırmıştır. Ayrıca ortalama hücre sayısının %13 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Katkısız polipropilen polimerinin yoğunluğu 0.91 g/cm^3 iken köpük polipropilen üretimi sonunda elde edilen köpük yoğunlukları $0,835-0,850 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Enjeksiyon hızının artışı, hücre çapında azalmaya ve hücre sayısında ciddi bir artışa sebep olmuştur. Ergiyik sıcaklığının artışı, hücre yoğunluğunda azalmaya neden olurken, enjeksiyon hızının artışı, hücre yoğunluğunu önemli oranda arttırmıştır. Çalışma sonucunda enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklığı artışı sonucu, darbe direncinde azalma olduğu belirlenmiştir (Ünal ve Yetgin 2011).

Avalle ve arkadaşları, üç polimerik köpüğün (EPP, PU ve PS/PA köpükleri) oda sıcaklığında mekanik özelliklerini (polimerik köpüklerin mekanik özellikleri genel olarak sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır) darbe yükleme koşullarında deneysel olarak değerlendirmiştir. Enerji soğurma özellikleri hem enerji soğurma şeması yöntemi hem de verimlilik şeması yöntemi ile incelenmiştir. Burada köpüğün maksimum verimi, köpüğün optimal enerji hapsedme şartını belirlediği ve maksimum gerilime ulaştığında köpüğün karakterize edilmesi ve enerji hapsedme komponentlerinin dizaynı için faydalı olan sentetik diyagramların elde edilmesi için verimlilik diyagramı kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu üç malzemenin değişen yoğunluklarına bağlı olarak mekanik performans özellikleri kıyaslanmıştır. Gerilim-şekil değiştirme eğrileri darbe yükler altında incelenerek elde edilmiştir. Polipropilen köpükler için beş çeşit, poliüretan ve poliamid köpükler için iki farklı yoğunluk incelenmiştir. Verimlilik diyagramı ve enerji hapsedme diyagramı methodları ile enerji hapsedme karakteristikleri incelenmiştir. Ölçülen sıkıştırılmış gerilme-gerinme eğrisi ile verimlilik eğrisinin elde edilebileceği ve maksimum verimin optimal düzeyde enerji hapsedmeyi tanımladığı gözlenmiştir. Verimlilik diyagramından elde edilen verilerin enerji hapsedme diyagramından elde edilen sonuçlar ile tutarlı olduğu fakat verimlilik diyagramının pratik avantajlar sağladığı gözlenmiştir. Verimlilik diyagramı malzemelerin karakterize edilmesi ve enerji hapsedme komponentlerinin dizaynı için faydalı olan sentetik diyagramların elde edilmesinde kullanılmıştır. Polipropilen ve poliamid köpükler hücre yapıları farklı olmasına rağmen benzer özellikler ve hassas şekil değiştirme oranları

göstermiştir. Poliüretan köpükler tamamıyla farklı özellikler ve daha hassas şekil değiştirme oranı göstermiştir. Bağlı olarak artan yoğunlukların, malzemelerin mekanik özelliklerine herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmiştir (Avalle ve ark. 2011).

Zhang ve arkadaşları, çalışmalarında artık (geriye kalan) gerinme etkileri ile ilişkili sıkıştırılabilir genişletilmiş polipropilen köpüklerdeki gerilmeyi hafifletmeyi gösteren bazı deney sonuçlarını tanımlamışlardır. Daha sonra Ogden ve Dorfmann sonuçlarına dayanarak, enerji fonksiyonuna iki değişken dahil edilerek gerilme hafifletme ve artık gerinme etkilerini ele almak için, sahte elastik model tanımlamışlardır. İki çeşit EPP köpüğün, tek eksenli sıkışma testlerinin sayısal simülasyonu, Ogden modelinin malzeme parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. Sayısal simülasyon göstermiştir ki, sahte elastik model, polimerik köpüğün elastik olmayan, oldukça kesin tahminlerini sağlar (Zhang ve ark. 2011).

Şimşek, C377 pirinç ve 6063 alüminyum numunelerini Parçalı Hopkinson Başınç Çubuğu deney düzeneği kurulumu gerçekleştirerek test etmiştir. Numuneler yarı statik yük altında servo-hidrolik deney cihazında, düşük deformasyon hızlarında incelenerek gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Sonrasında ise bu numuneler yüksek deformasyon hızları altında Hopkinson test düzeneğinde incelenmiş olup dinamik gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. İşlemler sonucu yüksek ve düşük deformasyon hızları sonrasında elde edilen grafikler karşılaştırılmış ve her iki malzemede de düşük deformasyon hızında meydana gelen akma gerilmesinin yüksek deformasyon hızındaki akma gerilmesinden düşük olduğu görülmüştür. Farklı uzunluklarda iki tip alüminyum numunelerde 2 bar, 4 bar ve 6 bar basınçlarda farklı deformasyon hızları elde edilmiş olup numune boyutu azaldıkça deformasyon hızında önemli artışlar gözlenmiştir. Deformasyon hızının yalnızca uygulanan basınca bağlı olarak değil numune boyutuna bağlı olarak da değişim gösterdiği saptanmıştır. Gaz tabancası basınç artışı, yansıyan ve geçen gerilme dalgalarının genliklerinde artışa sebep olarak numunelerde gerilme değerinin ve deformasyonun artmasına neden olmuştur. Ayrıca sinyal şekillendirici olarak kullanılan bakır diskin kalınlığındaki değişimin deformasyon hızını etkilediği ve boyutlarının azaltılmasıyla daha yüksek deformasyon hızlarına ulaşılacağı tahmin edilmiştir. Kalın bakır disk ile numuneden elde edilen akma gerilmesi ve deformasyon hızının, ince bakır diske göre oldukça düşük olduğu tespit

edilmiştir. Parçalı Hopkinson deneyi sonrası numunede sıcaklık artışı gözlenmiş ve bu durum numunede darbe enerjinin bir kısmının ısı enerjisine dönüştüğünü göstermiştir. Parçalı Hopkinson deneyi sonucu elde edilen en yüksek deformasyon hızı 3369 s^{-1} olmuştur. Bakır disk kalınlığının ve numune uzunluğunun azaltılması ile daha yüksek deformasyon hızlarına ulaşılabilceği tespit edilmiştir. Ayrıca basma çubuğu olarak kullanılan çeliğin daha yüksek akma dayanımına sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır (Şimşek 2011).

Maheo ve Viot, çok katmanlı köpük hacimleri üzerinde deneysel dinamik sıkıştırma testleri yapmış ve sonlu elemanlar metodu sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada EPP malzemesi kullanılmıştır. Çok katmanlı köpük darbe yüklemelerine maruz kalmış ve bu yüklemelerde enerji emme kapasiteleri gösterilmiştir. Split Hopkinson Basınç Çubukları ile 10^3 s^{-1} gerinme hızlarına ulaşmak için dinamik sıkıştırma testleri yapılmıştır. Gerilme seviyesindeki küçük bir farklılık dışında FE simülasyonu, deney ile iyi bir sonuç vermiştir. Bu çalışma, kademeli yoğunluğa sahip bir köpüğün, katmanlar arasındaki büyük yoğunluk farkı nedeniyle darbe enerjisi emiliminin sabit değil, kademeli olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca bu çalışma tasarımcısına, gözenekli yapının ve en uygun enerji emilimini ayarlayanın sağlanması için belirli bir kontrole göre köpük oluşumu yapılması gerektiğini göstermiştir (Maheo ve ark. 2013).

Kandırmış, Split Hopkinson deney sistemlerinin çalışması sırasında ortaya çıkan gerilme ile çubukların akma sınırını geçip geçmeyeceğini bilmenin test öncesinde önemli faktör olduğunu söylemiştir. Bu sebeple, Split Hopkinson bası ve çeki düzeneği sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Çubuk hızı ve şekil değiştirmeleri, numune ara yüzeyine 40 cm mesafeden alınmıştır. Analiz sonucu, Split Hopkinson bası düzeneği çubuklarında kullanılan Ck45 malzemesinin, 3 bar deney basıncında akma gerilmesi (450 MPa) değerini aşmadığını ve akma değeri 72 MPa olan numunenin ise akma gerilmesi değerinin üstüne çıktığını ve bundan kaynaklı deforme olduğunu göstermiştir. Split Hopkinson çeki analizleri sonucunda, Ck45 malzemesinin yumuşak ve orta sertlikteki malzemelerin, yüksek deformasyon hızındaki deney düzeneklerinde kullanılabilceği belirlenmiştir (Kandırmış 2016).

Gümüş, çift eksenli gerilme altında parçalı hopkinson basma çubuğu ile malzeme analizi yapmıştır. Numune, içi dolu kapalı hacimli bir düzenek ile 15, 20 ve 24 m/s hızlarında çift eksenli gerilme altında Abaqus programı yardımıyla analiz edilmiştir. PHBÇ için alüminyum malzeme kullanılarak sadece elastik şekil değişimi özellikleri tanımlanmıştır. Analiz sonucunda şekil değiştirme, basınç ve gerilme gibi değerler incelenmiştir. Giriş çubuğuna uygulanan hızın, yansıma çubuğuna gelerek bir miktarının yine buradan geri döndüğü bir miktarının ise çıkış çubuğu üzerinden dalga olarak iletmeye devam ettiği gözlenmiştir. Analiz öncesi numuneye tanımlı eleman geometrisinden alınan gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile yansıyan ve iletilen dalgalardan elde edilen eğriler karşılaştırılmıştır. Hopkinson formülleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu, numunenin gerçek eğrisine yakınsaması için sabit bir katsayı ile çarpılması gerektiği görülmüş ve bu katsayı -33 olarak bulunmuştur. Her hız için akma dayanımı 155-170 N/mm² arasında iken, numunedeki şekil değişiminin hız ile birlikte arttığı görülmüştür. Ayrıca Hopkinson formülleri yardımıyla, yansıma dalgası verileri kullanılarak numuneye ait deformasyon hızı-zaman grafikleri oluşturulmuş ve en yüksek deformasyon hızı 24 m/s hızda 3000 s⁻¹, en düşük ise 15 m/s hızda 2000 s⁻¹ olarak gözlenmiştir. Hopkinson formüllerinin analiz ile birlikte direkt olarak kullanımının çalışma için yeterli olmadığı ve numunenin malzeme özelliklerine yakınsama yapılabilmesi için sabit bir katsayıya ihtiyaç duyduğu sonucu ortaya çıkmıştır (Gümüş 2019).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Numuneleri

Farklı yoğunluğa sahip EPP köpüklerin statik ve dinamik mekanik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada numune boyut ve geometrileri; dış çapı Ø12 mm, uzunluğu 12 mm ölçülerinde silindirik numuneler belirlenmiştir. Literatürde statik basma deneyleri için daha büyük çapa sahip numuneler kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte; dinamik deneylerin yapılacağı Split Hopkinson Bar test düzeneğinde kullanılacak numune çapı, deney sisteminde kullanılan çubuk çapından (12mm) daha büyük olamayacağından dinamik deney numunelerinin çapı 12 mm olarak belirlenmiştir. Statik ve dinamik özellikler arasında kıyaslamanın daha sağlıklı yapılabilmesi için her statik deney numune çapı da 12 mm olarak belirlenmiştir. Numune kodları ve sahip oldukları yoğunluk değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Numune kodları ve yoğunlukları

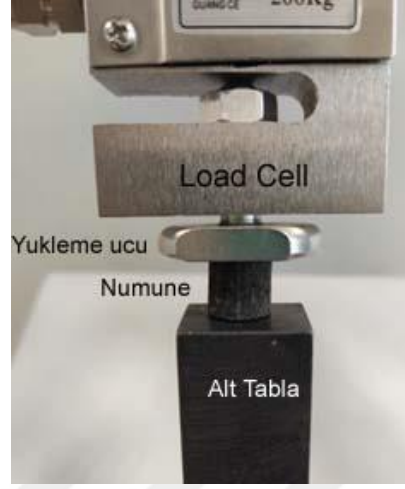
Numune Kodu	KI	KII	KIII
Yoğunluk (g/cm ³)	0.020	0.043	0.068

Numuneler Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yoğunlukları birbirinden farklı üç EPP (genişletilmiş polipropilen) köpük levha su jeti tezgahına yerleştirilmiş ve bu plakalardan belirlenen ölçülerde numuneler elde edilmiştir.



Şekil 3.1. EPP köpük levhanın su jetine yerleştirilmesi, kesimi ve levha üzerinden numune alımı

Statik ve dinamik basma deney numunesi yüksekliği 12 mm, dış çapı 12 mm olacak şekilde deney numuneleri hazırlanmıştır.



şekil 3.3. Numunenin deney düzeneğine yerleştirilmesi

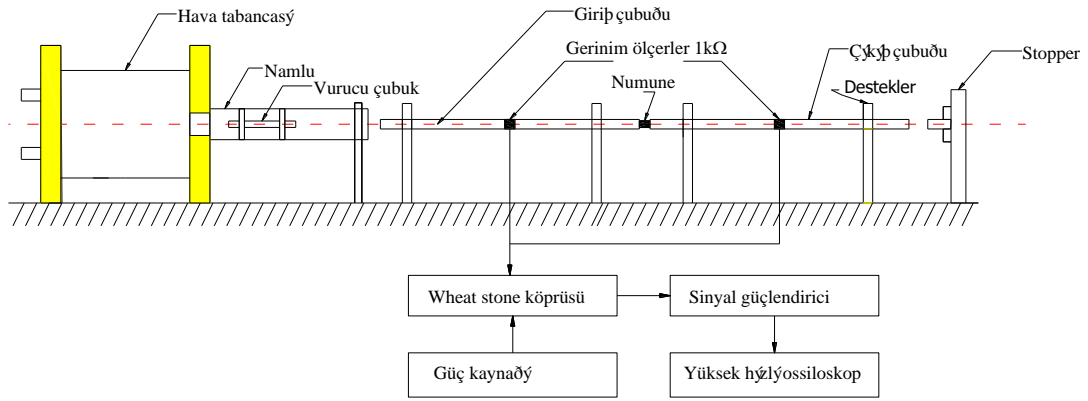
3.3. Split Hopkinson Basınç ubuğu Deney Düzeneği

Split Hopkinson Basınç ubuğu Deneyi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Biomekanik Laboratuvarı'nda bulunan cihazda gerçekleştirilmiştir (şekil 3.4).



şekil 3.4. Deney düzeneği görseli

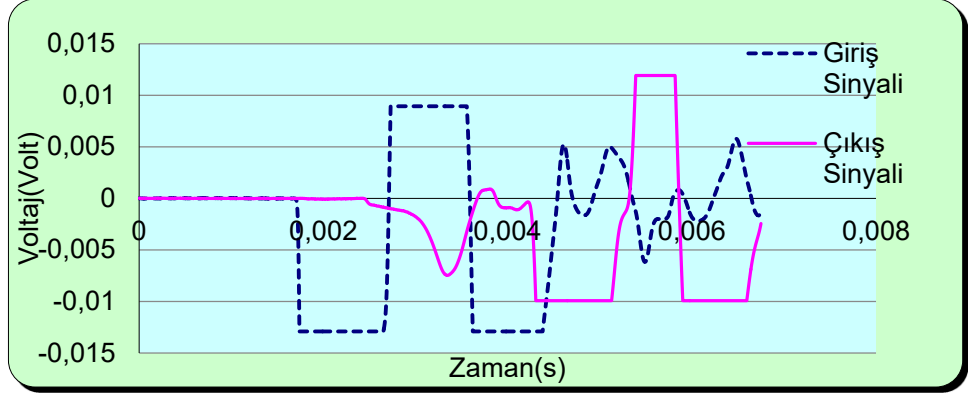
Deney düzeneği şekil 3.5'de görüldüğü gibi hava tabancası, vurucu çubuk, giriş-çıkış çubukları ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Deney düzeneği şeması

Deneyde giriş çubuğuna etki edecek darbe kuvvetini oluşturan kısım hava tabanca sistemidir. Yüksek basınca dayanıklı bir tank, pnömatik vana ve namludan meydana gelmektedir. Doğru bir ölçüm yapabilmek için merminin ve giriş çubuğunun imal edildiği malzeme aynı özellikte ve aynı çap ölçüsünde olmalıdır. Deneylerde plexiglass malzemeden ($E=3 \text{ GPa}$, $\rho=1180 \text{ kg/m}^3$) yapılmış çubuklar kullanılmıştır.

Deneyler sırasında hava tabancasının ateşlenmesi ile hareketlenen vurucu çubuk hızlı bir şekilde giriş çubuğuna çarparak elastik dalgayı oluşturur. Elastik dalga giriş çubuğunda denklem 2.11 ile hesaplanan 1594 m/s ses hızında ilerleyerek giriş çubuğumune ara yüzeyine ulaşır. Dalganın bir kısmı numune üzerinden çıkış çubuğuna geçerken bir kısmı giriş çubuğuna geri yansır. Çıkış çubuğuna geçen dalgadan numunedeki gerilme değeri, giriş çubuğuna geri yansıyan dalgadan ise numunedeki gerilme değeri hesaplanır. Giriş ve çıkış çubuklarındaki elastik gerilmenin ölçülebilmesi için çubukların orta kısımlarına gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Deney esnasında gerinim ölçerlerde meydana gelen direnç değişikliği Wheatstone köprüsü kullanılarak voltaj değişimi cinsinden ölçülmüştür. Sistem de bulunan Osiloskop (Oddsey, USA) ise Wheatstone köprüsünden saniyede $1.000.000$ veri okuyabilmektedir. Giriş ve çıkış çubuklarından okunan örnek bir sinyal Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Elde edilen bu sinyallerden denklem 2.26 ile numunedeki gerilme hızı, denklem 2.27 ile numunedeki gerilme ve denklem 2.19 ile numunedeki gerilme değerleri hesaplanarak gerilme ve gerilme grafikleri elde edilmiştir.



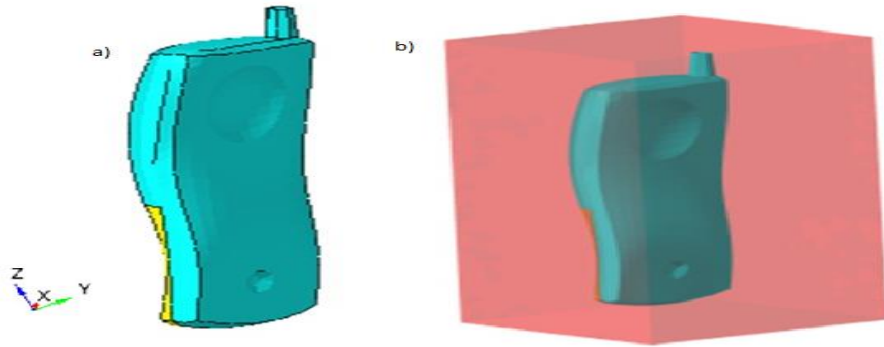
Şekil 3.6. Giriş ve çıkış çubuklarından elde edilen örnek sinyal

3.4. Polipropilen Köpük Numunelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Üç farklı yoğunluğa sahip genişletilmiş polipropilen köpüğün uygulamadaki performansını test etmek amacıyla; bir örnek olarak cep telefonu ambalaj malzemesi olarak modellenmiş ve serbest düşme analizi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Farklı yoğunluktaki köpüklerin dinamik deneyler sonucunda elde edilen yüksek gerinim hızındaki gerilme-gerinme eğrilerinden elde edilen mekanik özellikleri HyperMesh programına veri olarak girilmiş olup düşürme testleri yine aynı programda yapılmıştır.

3.4.1. Parçaların modellenmesi

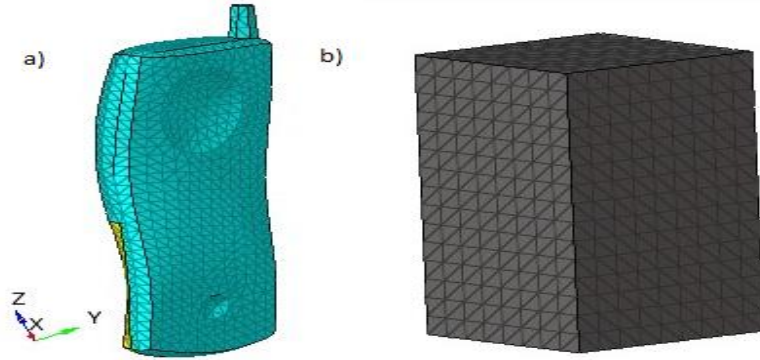
Solidworks programı ile orijinal telefon ölçülerinde bir numune katı modellemesi yapılmıştır ve yine aynı programda polipropilen köpük hacmi içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.7.a'da telefonun katı modeli, Şekil 3.7.b' de ise telefonun EPP köpük hacmi içerisine yerleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.7. a) Telefon modelinin katı modellenmesi, b) EPP köpük hacmi içerisine yerleştirilmesi

3.4.2. Mesh Generasyonu

Mesh atama, belirlenen bir tanım aralığını daha küçük bir tanım aralığına bölme işlemidir. Bu sayede çözülecek olan diferansiyel denklemin çözümü kolaylaşmış olur. Bu tür sonlu eleman analiz yöntemlerinde elde edilecek sonuçların doğruluğu, uygulanan mesh ile doğru orantılıdır. Aynı analizde eleman tipi, sayısı ve boyutu analiz sonuçlarını etkilemektedir. Diğer analizlerde olduğu gibi düşürme analizlerinde de, mesh atanırken yakınsamanın yüksek olabilmesi ve yapılan analizin doğruya en yakın sonuç verebilmesi için mesh generasyonunun üniform dağılımı, eleman seçiminin doğru yapılması, yapının durumuna göre simetriden yararlanılması gibi hususlar göz önünde bulundurularak mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi, yaklaşık çözümler üreten bir yöntemdir. Eleman sayısını arttırarak, eleman tipini değiştirerek, mesh yöntemini değiştirerek farklı sonuçlar gözlenebilir. Şekil 3.8.a'da telefona uygulanan mesh generasyonu, Şekil 3.8.b'de ise EPP köpük malzemenin mesh generasyonu gösterilmiştir. Yapılan analizde 1 adet rijit eleman, 82.005 adet 2 boyutlu üçgen mesh, 625 adet 2 boyutlu kare mesh ve 38.898 adet 3 boyutlu üçgen prizma mesh kullanılmıştır.



Şekil 3.8. a) Telefona mesh atılması b) EPP köpük hacime uygulanan mesh generasyonu

3.4.3. Parçalara malzeme atanması

Sistemde analiz yapılırken modellenen parçalara, analizi yapılmak istenen malzemenin tanımlanması gerekmektedir. Çalışmada üç farklı yoğunluktaki EPP köpüğün dinamik yük altındaki gerilme-gerinme dayanımı analizi yapılmak istendiği için sisteme farklı yoğunlukta EPP malzeme tanımlaması yapılmıştır. Dinamik deneylerle elde edilen

veriler programa girilerek malzeme tanımlaması yapılmıştır. Bu çalışmada numunelerin dinamik deneylerde poisson oranları tespit edilmemiştir. Sanborn ve arkadaşları hiperelastik köpükler için yüksek gerinim hızında yapılan testlerde poisson oranını deneysel olarak tespit etmeye çalışmışlardır. Sanborn %50'lik şekil değiştirme oranına kadar poisson oranının yaklaşık sabit ve 0.23 değerinde olduğunu %50'lik şekil değiştirme oranını aşıttan sonra poisson oranının bir anda artarak; yaklaşık %60'lık gerinme değerine ulaşıldığında 0.47 değerlerine ulaştığını ve bundan sonra sabit kaldığını tespit etmiştir (Sanborn ve ark. 2019). Bu çalışmada yapılan analizde şekil değiştirme oranı değeri %50'nin altında kaldığı için poisson oranı 0.23 olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.9'da seçilen EPP malzemenin üç farklı yoğunluktaki mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Title	KI	KII	KIII
Local Unit System	None	None	None
[RHO_I] Initial density*	2E-10	4.3E-10	6.8E-10
[RHO_0] Reference density	0	0	0
[E] Young's modulus*	11	14	22
[Nu] Poisson's ratio*	.23	.23	.23

Şekil 3.9. Üç farklı yoğunluktaki malzemelere ait mekanik özellikler

3.4.4. Analiz için yükleme şartları

Bu analizde cisim 1 metre yükseklikten bırakarak çözüm süresini uzatmak yerine, serbest düşme formülü uygulanarak tam çarpma anında cismin sahip olacağı hız sınır şartı olarak uygulanmıştır. Sabit düzlem üzerinde ve bağlantı durumu dikkate alınarak tam sabitleme sınır şartı altında x ve y eksenlerindeki hızı sıfır,- z eksenindeki ilk hızı 4400 mm/s belirlenen verilerle serbest düşme analizi yapılmıştır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi programda bu süreci initial velocity içerisinde tanımlanmıştır.



Şekil 3.10. Numunelere uygulanan çarpışma testi

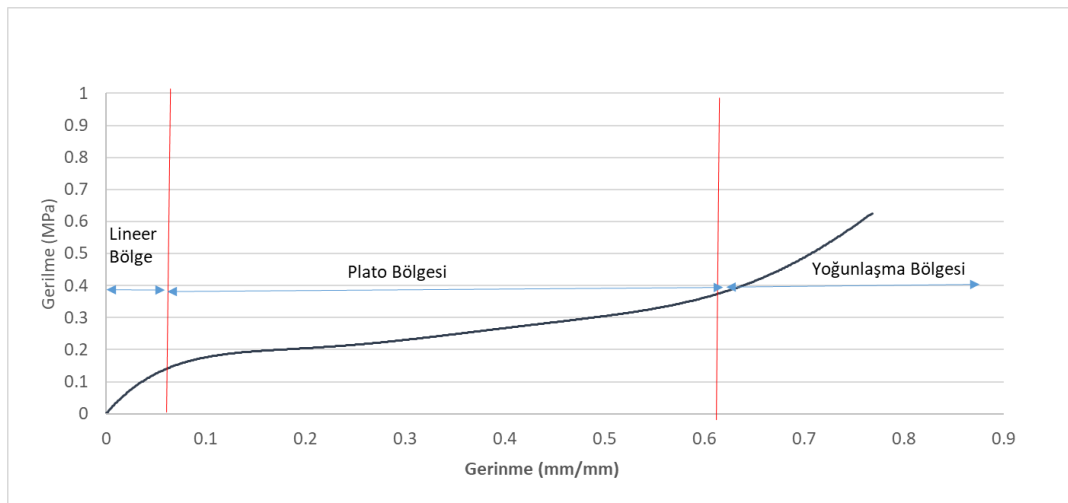


4. BULGULAR

4.1. Statik Basma Deneyi Sonuçları

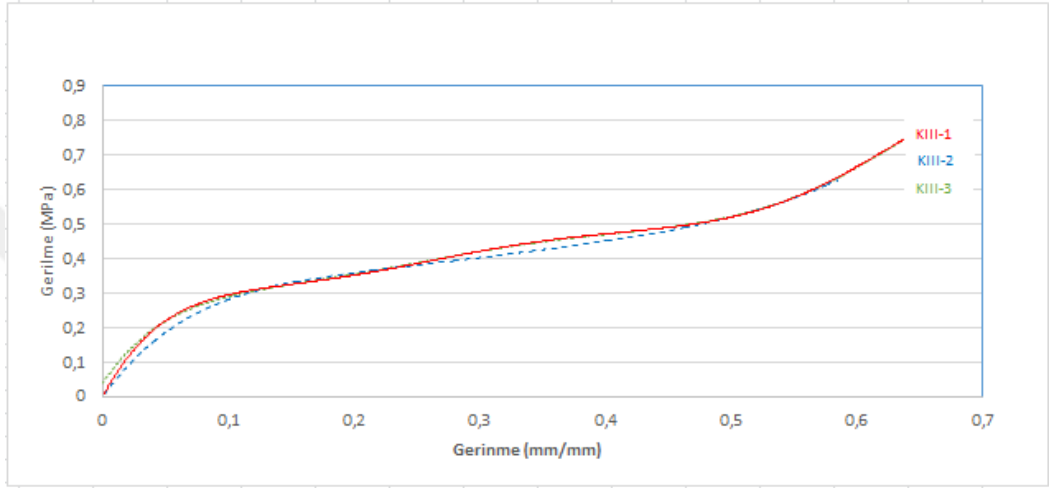
Statik basma deneyleri sabit deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yükleme ucu sabit 7.2 mm/dak hızında hareket ettirilmiş, böylece numunedeki gerinme hızı 0.01 s^{-1} olarak gerçekleşmiştir.

Yoğunlukları birbirinden farklı üç EPP köpükten statik basma deneylerinden elde edilen gerilme-gerinme eğrileri birbirlerine benzer karakteristikler göstermektedir. Uzama değerlerinin %4-7 değerlerinde daha düşük olduğu bölgede lineer elastik özellikler görülürken, bu bölgeyi geçtikten sonra sabit deformasyon hızında gerilmenin uzamaya oranla az değiştiği plato bölgesi başlamaktadır. Yaklaşık %60-70 uzama değerlerine kadar plato bölgesi devam ettikten sonra malzemedeki sıkışmaya bağlı olarak malzeme yoğunluğunun ve kuvvete karşı direncinin arttığı yoğunlaşma bölgesine girildiği görülmüştür (Şekil 4.1). Yoğunlaşma bölgesinde ilerledikçe; malzemede herhangi bir kırılma-dağılma söz konusu olmadığından teorik olarak yükleme çeneleri birbirine temas edene kadar deney sürdürülebilmekte dolayısıyla gerilme değeri sonsuza ulaşabilmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada yoğunlaşma bölgesini geçtikten sonra deney sonlandırılmıştır. Deneyler sırasında numuneler %80'in üzerinde deforme olurken, yükleme kalktıktan sonra büyük oranda geri yaylanmışlar ve tüm numunelerde kalıcı şekil değişiminin %20-25 civarında kaldığı tespit edilmiştir.



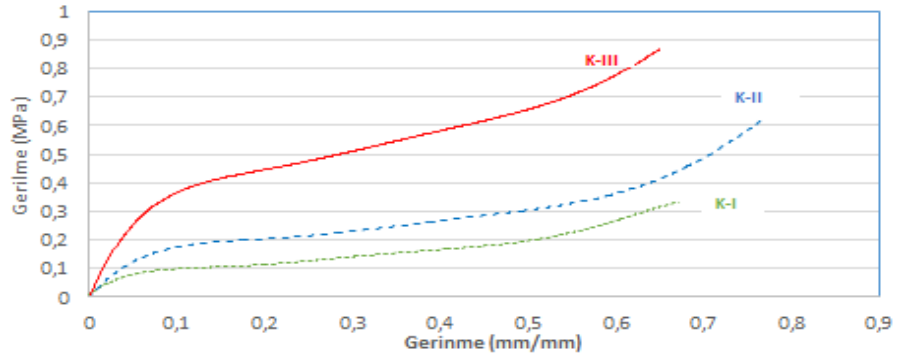
Şekil 4.1. Statik basma deneyinde gerilme gerinme eğrisi karakteristik bölgeleri

Aynı yoğunluğa sahip numunelerden alınan üçer adet numune ile tekrar testleri yapılmıştır. Bir örnek olarak; Şekil 4.2’de KIII kodlu köpükten alınan üç numune ile yapılan deneyler sonucu elde edilen gerilme-gerinme grafiği çizilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi üç numuneye ait gerilme-gerinme eğrileri neredeyse çakışmıştır. Grafikte görünen küçük sapmalar, numunelerin yüzey pürüzlülüğü, numunenin kesimi veya deney sisteminden kaynaklanabilmektedir.



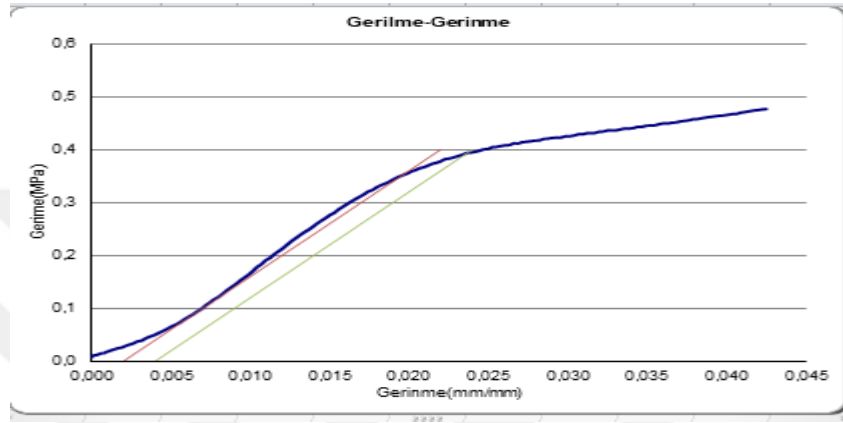
Şekil 4.2. Statik deney sonucu bir köpüğe ait üç farklı numunenin gerilme-gerinme değerlerinin karşılaştırılması

Her köpükten alınan üç numuneden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak KI, KII ve KIII köpüklerine ait mekanik özellikler belirlenmiştir. Şekil 4.3’de üç farklı yoğunluğu sahip köpüklere ait deneylerden elde edilen gerilme ve gerinme değerleri gösterilmiştir. Artan yoğunlukla birlikte mekanik özelliklerdeki artışlar görülmektedir.



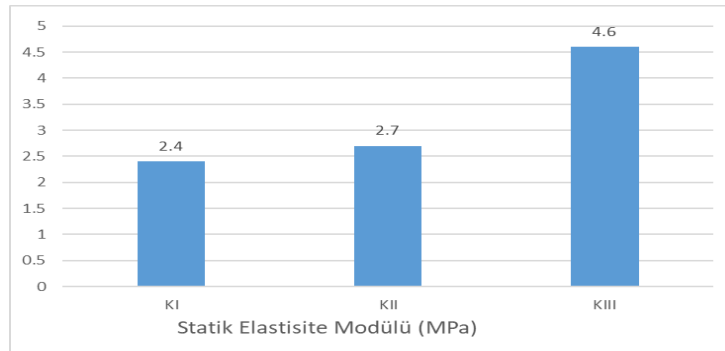
Şekil 4.3. Statik deney sonucu üç farklı köpük numunesine ait gerilme-gerinme değerlerinin karşılaştırılması

Statik ve dinamik deneyler de elastisite modülü hesaplanırken gerilme-gerinme eğrisinin doğrusal kısmı ile çakışacak şekilde bir doğru denklemi oluşturulmuştur. Bu doğrunun eğimi malzemenin elastisite modülü olarak belirlenmiştir. Malzeme açık akma göstermediğinden elastisite modülü için belirlenen doğru, yatay ekseninde %0.2 ofset yapılarak yeniden oluşturulmuş ve bu doğrunun gerilme-gerinme eğrisini kestiği nokta malzemenin itibari akma gerilmesi olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4).



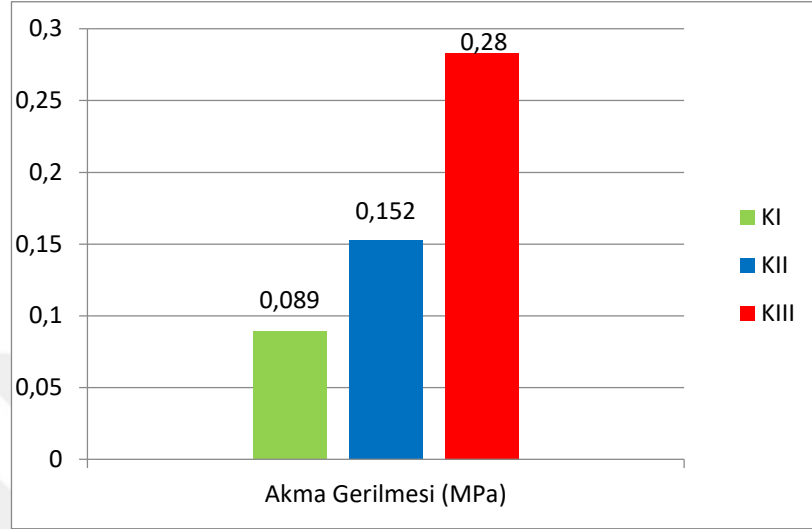
Şekil 4.4. Elastisite modülü ve akma gerilmesinin tespiti için oluşturulan doğrular

Statik basma deneylerinden farklı yoğunluklardaki köpükler için elde edilen elastisite modülü değerleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Beklendiği gibi yoğunluğun artışı ile birlikte elastisite modülü değerleri artış göstermiştir. Ancak bu artış yoğunluğun artışı ile orantılı bir şekilde gerçekleşmemiştir. KI ile KII kıyaslandığında yoğunluktaki artış 2 kattan fazla olmasına karşılık E değerindeki artış sadece %12 civarında kalmıştır. Bununla birlikte KII ile KIII kıyaslandığında yoğunluktaki artış %60 civarında iken elastisite modülündeki artış %70 civarındadır.



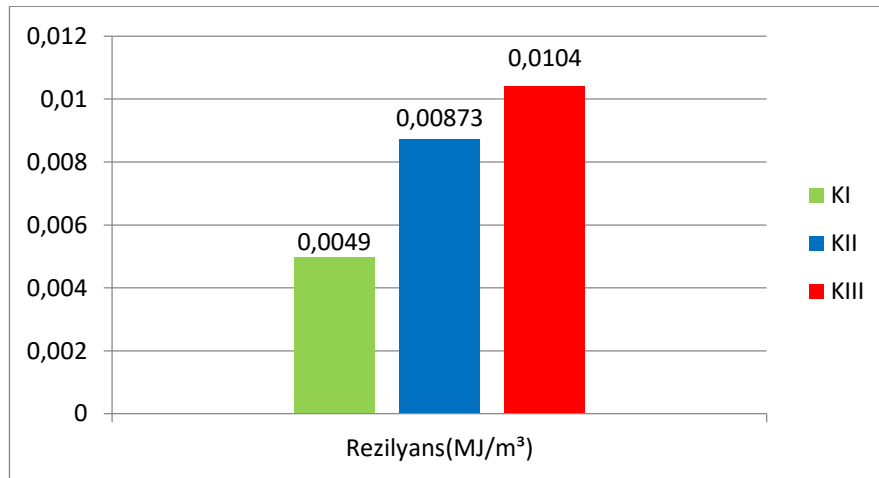
Şekil 4.5. Statik basma deneyinden elde edilen elastisite modülü değerleri

Statik Basma deneylerinden elde edilen akma gerilmeleri (itibari) Şekil 4.6 gösterilmiştir. Elastisite modülünden farklı olarak akma gerilmeleri değerleri yoğunluk artışıyla daha doğrusal bir artış göstermiştir.



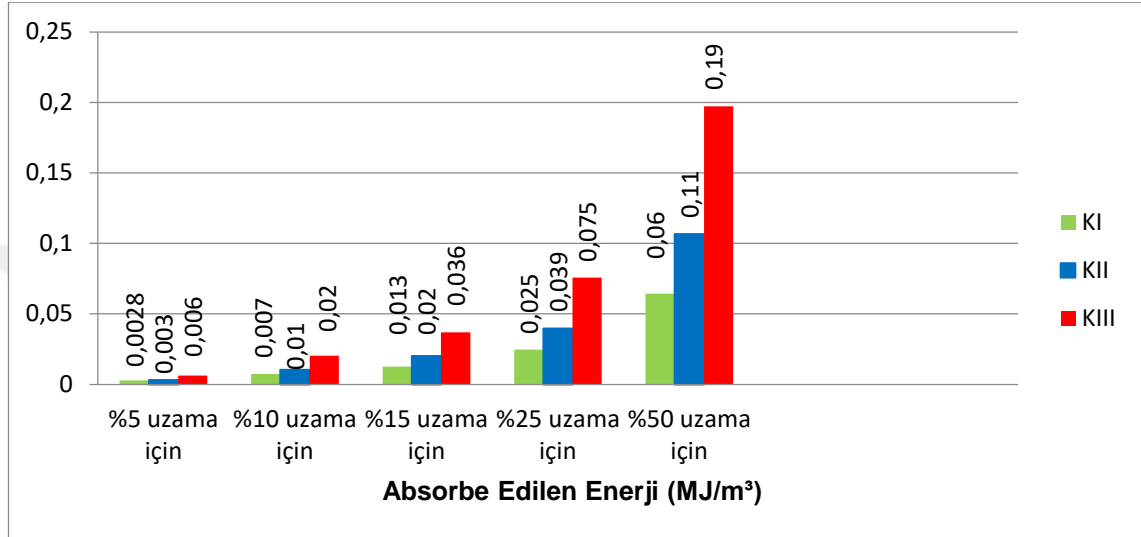
Şekil 4.6. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait akma gerilmelerinin karşılaştırılması

Akma noktasına kadar olan bölgede gerilme-gerinme eğrisinin altında kalan alandan hesaplanan rezilyans değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. KII ve KIII kıyaslandığında yoğunluğa oranla KII numunesinin izafi olarak daha iyi enerji absorbe etme kabiliyetinin olduğu söylenebilir. Bunun nedeni ise görece düşük elastisite modülüne ve görece yüksek akma gerinmesine sahip olması gösterilebilir.



Şekil 4.7. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait rezilyans değerlerinin karşılaştırılması

EPP köpüklerden istenilen en önemli özelliklerden biri enerji absorbe yetenekleridir. Bu çalışmada kullanılan üç farklı yoğunluktaki köpüğün enerji absorbe kabiliyetlerini kıyaslamak için aynı uzama değerlerinde absorbe ettikleri enerjiler hesaplanmış ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde sabit gerinme değerlerinde yoğunluk artışıyla absorbe edilen enerji artışının doğrusala yakın olduğu söylenebilir.

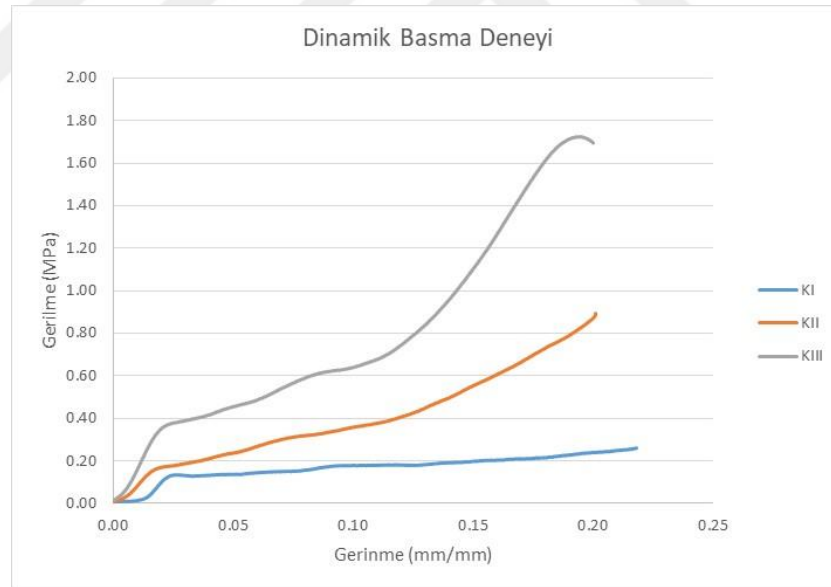


Şekil 4.8. Statik deney sonucu üç farklı köpüğe ait absorbe edilen enerji değerleri

4.2. Dinamik Deney İle Elde Edilen Grafikler ve Sonuçlar

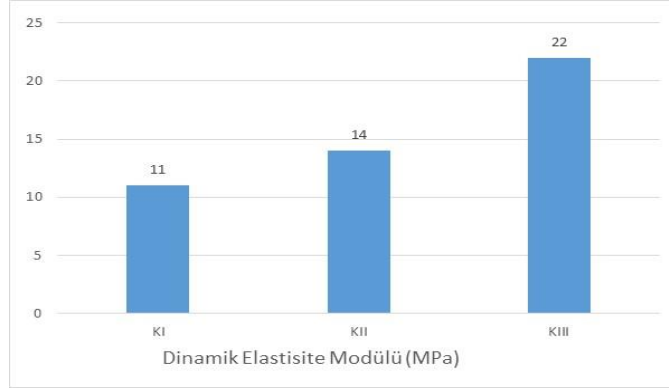
Dinamik deneyler Split Hopkinson Bar deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Bu deney düzeneğinde statik basma deneylerinde olduğu gibi gerinme hızının önceden ayarlanmasına imkan yoktur. Sadece vurucu çubuğu harekete geçiren hava basıncı ve vurucu çubuk boyu ayarlanarak gerinme hızı ve maksimum gerinme miktarı; numunenin de mekanik özelliklerine bağlı değişebilmekte ve ancak deneyler sonrasında hesaplanabilmektedir. Ön çalışmalarda hava basıncı 2, 2.5 ve 3 bar olarak ayarlanmış ve gerinme hızı değerleri hesaplanmıştır. Ancak numunenin görece çok düşük mekanik özelliklere sahip olması farklı basınçlarda yapılan deneylerde gözle görülür gerinme hızı değeri değişimine sebep olmamıştır. Bu yüzden tüm deneyler sabit 2.5 bar hava basıncında yapılmıştır. Daha düşük mukavemetli çubuklar kullanarak daha yüksek basınçlara çıkmak mümkün olmakla birlikte daha düşük mukavemetli çubuklar kullanmak okunan sinyallerin hassasiyetini düşürmektedir. Tüm deneylerde gerinme hızı 240-260 s⁻¹ aralığında ve ortalama 250 s⁻¹ olarak gerçekleştirilmiştir.

Dinamik deney sonucunda elde edilen farklı yoğunluktaki köpüklerin gerilme-gerinme eğrilerine bir örnek şekil 4.9'da gösterilmiştir. Deneylerde maksimum gerinme değerleri %20'ler civarında kalmıştır. Deneysel sisteminin sahip olduğu donanımsal parametreler ile bu değerden daha öteye geçilememiştir. Dinamik deneylerden elde edilen eğriler statik eğrilerden elde edilen eğrilere benzerlik göstermekte ve bir lineer elastik bölgeden sonra plato bölgesi başlamaktadır. KII ve KIII numunelerinde ise belli bir uzamadan sonra gerilmenin hızlı bir şekilde arttığı ve statik deneylerdeki gibi yoğunlaşma bölgesine geçmiş gibi görünmektedir. Ancak bu bölgelerde gerinme değerlerinin %10-15 olduğu göz önünde tutulduğunda gerilme artışının malzemenin yoğunluk artışından kaynaklanabileceğini söylemek zordur. Dinamik deneylerin başlaması ve bitmesi arasındaki zamanın 1 milisaniyeden az olduğu ve köpük malzemenin içinde hapsolmuş hava molekülleri bulunduğu göz önünde tutulursa, köpük malzemeden bu kadar kısa sürede hava moleküllerinin ayrılmasının mümkün olmaması gerilme artışının nedeni olarak düşünülmektedir.



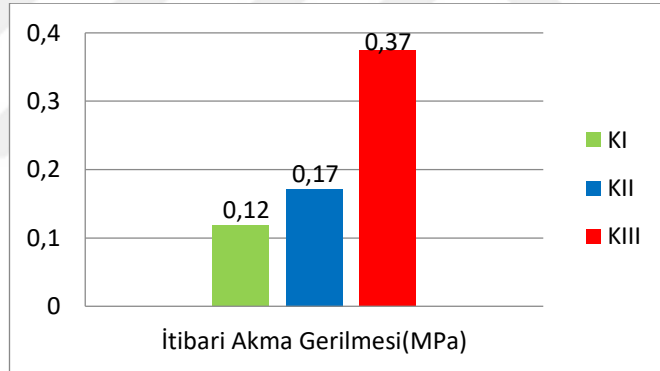
Şekil 4.9. Üç farklı köpük numunesine ait örnek dinamik gerilme-gerinme grafikleri

Statik deneyde olduğu gibi dinamik deneylerde de benzer yöntemler kullanılarak elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Statik elastisite modülü değerlerine benzer artış burada da görülmektedir.

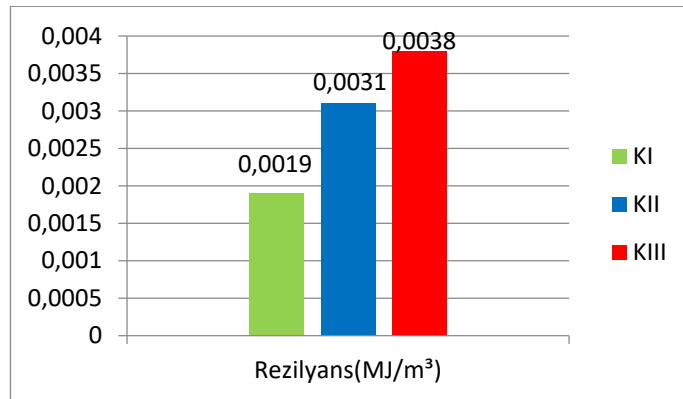


Şekil 4.10. Dinamik elastisite modülü değerleri

Deney sonucunda elde edilen veriler kullanılarak üç farklı köpüğe ait itibari akma gerilmeleri Şekil 4.11’de ve rezilyans değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Dinamik deneylerden elde edilen akma gerilmeleri statik deneylerden farklı olarak yoğunluk artışından daha çok etkilenmektedir.

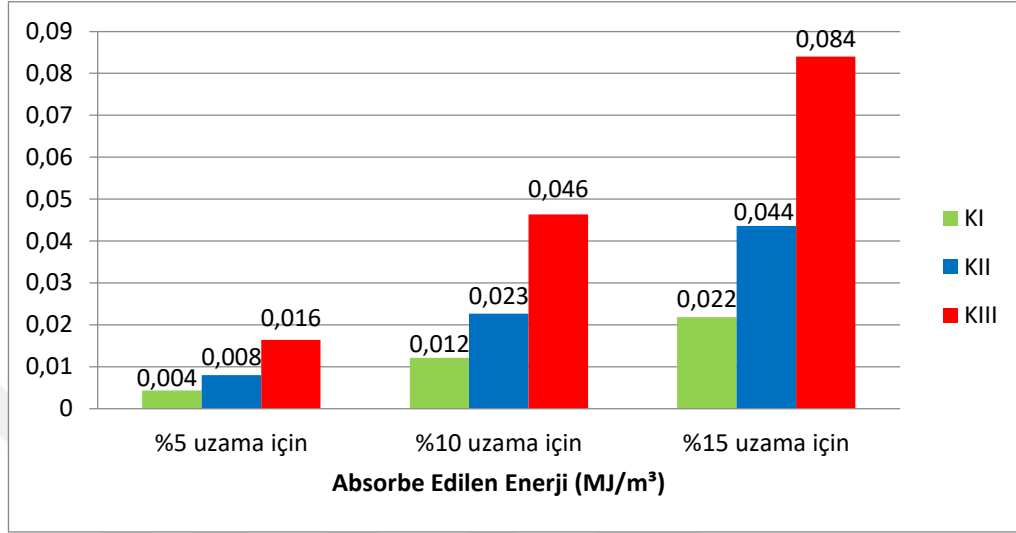


Şekil 4.11. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait itibari akma gerilmeleri



Şekil 4.12. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait rezilyans değerleri

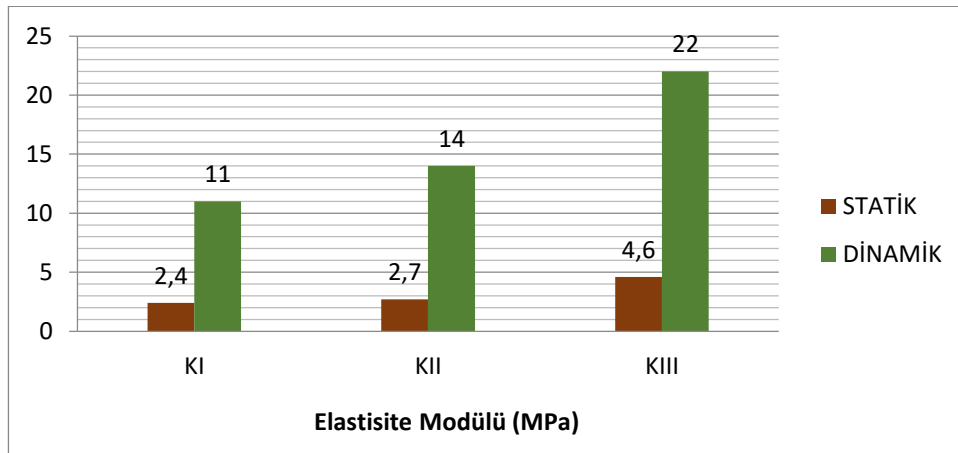
Şekil 4.13’de KI, KII ve KIII köpüklerinin yüzde uzamalarda absorbe ettikleri enerji değerleri kıyaslanmıştır. Yoğunluk arttıkça aynı gerinme değeri baz alındığında absorbe edilen enerji değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Dinamik deney sonucu üç farklı köpüğe ait absorbe edilen enerji değerleri

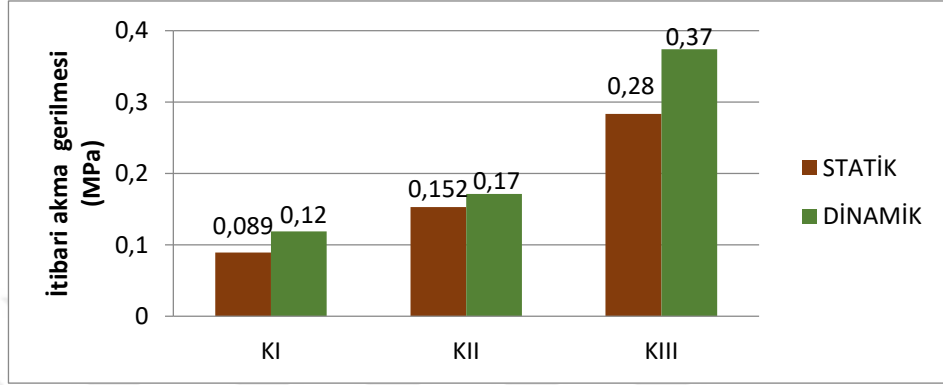
4.3. Statik ve Dinamik Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.14’de üç farklı köpüğe ait elastisite değerlerinin dinamik ve statik deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Grafiğe bakıldığında, dinamik deneylerde köpüklerin elastisite modülü değerlerinin statik deneylere kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür.



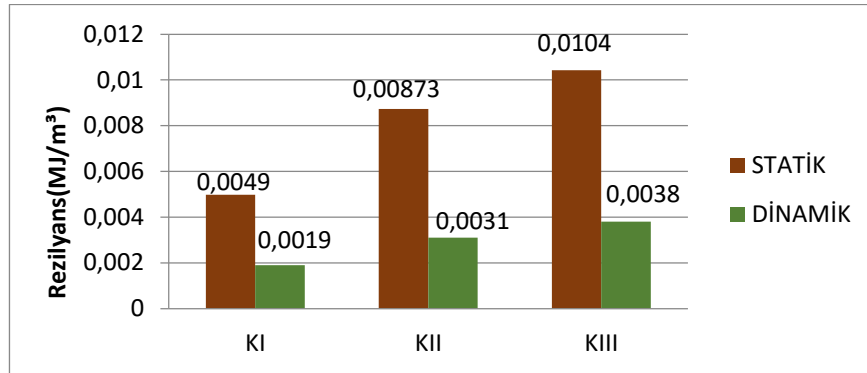
Şekil 4.14. Üç farklı köpüğe ait elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.15’de üç farklı köpüğe ait itibari akma gerilme değerlerinin dinamik ve statik deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Dinamik deneylerde köpüklerin itibari akma gerilmelerinde statik deneylere kıyasla bir artış olduğu ancak bu artışın elastisite modülündeki artış kadar belirgin olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.15. Üç farklı köpüğe ait itibari akma değerlerinin karşılaştırılması

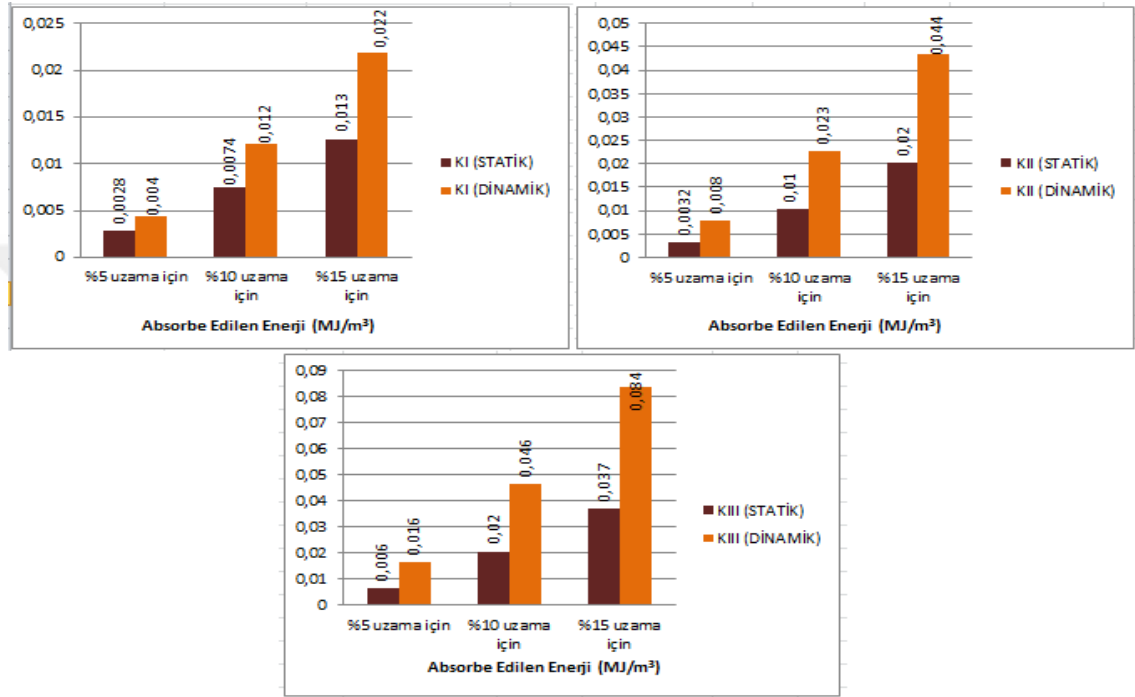
Şekil 4.16’da üç farklı köpüğe ait rezilyans değerlerinin dinamik ve statik deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.14 ve 4.15’de gösterilen elastisite modülü ve akma gerilmelerindeki artış oranlarının bir sonucu olarak yüksek yükleme hızlarında tam elastik bölgede numunelerin daha rijit davranmasıyla enerji absorbe etme özelliklerinde statik duruma göre azalma olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.16. Üç farklı köpüğe ait rezilyans değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.17’de KI, KII ve KIII köpüklerinin yüzde uzamalarda absorbe ettikleri enerji değerleri dinamik ve statik deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Gerilme miktarları sabit tutulup karşılaştırma yapıldığında, dinamik deneylerde köpüklerin

absorbe ettiği enerji değerlerinin statik deneylere kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür. Yüksek gerinim hızlarında yapılan deneylerde deformasyonun çok hızlı olması ve malzeme içerisinde bulunan havanın adeta bir hava yastığı görevi görerek malzemenin enerji sönmüleme özelliklerine katkı sağlaması dinamik deneylerden elde edilen değerlerin yüksek olmasının nedeni olarak düşünülmektedir.

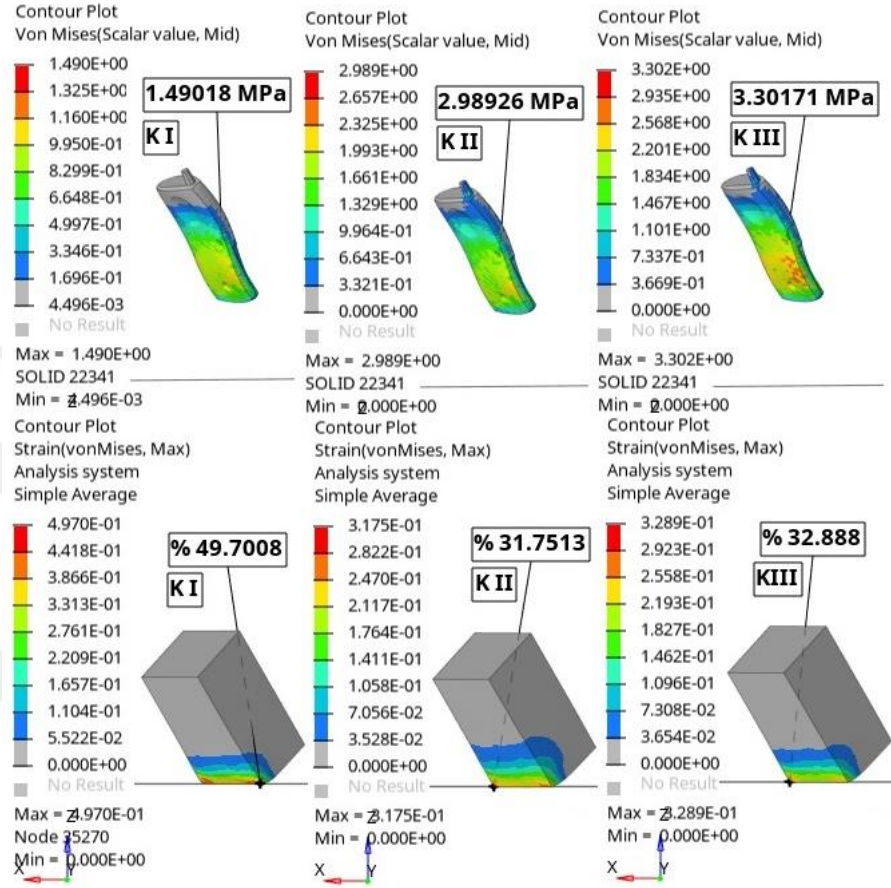


Şekil 4.17. Üç farklı köpüğe ait uzama değerlerine göre absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması

4.4. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Ambalaj malzemesi ve özellikle elektronik parçaları düşme, çarpma gibi etkilerden korumak için kullanılan üç farklı yoğunluğa sahip EPP köpüğün 1 metre yüksekten düşürülmesini simüle eden ve malzeme modelleri bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle oluşturulan sonlu elemanlar analiz sonuçları Şekil 4.18’de gösterilmiştir. En düşük yoğunluğa sahip KI köpüğünün darbe sırasında diğerlerine oranla daha fazla gerinmeye sahip olması absorbe ettiği enerjinin yüksek olmasına ve telefona gelen gerilmenin az olmasına neden olduğu görülmektedir. KII ve KIII ise birbirlerine yakın performans göstermekle birlikte en yoğun malzeme olan KIII köpüğünün muhafaza ettiği telefon üzerinde en yüksek gerilme değeri görülmüştür. KII ve KIII köpüğünün

birbirine yakın performans sergilemesi ambalaj malzemesi olarak kullanılacak ve görece küçük darbelerle maruz kalacak köpüklerin yoğunluğunun fazla olmasının anlamlı olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.18. KI, KII ve KIII numuneleri için gerilme-gerinme analiz sonuçları

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Otomotiv sanayisi başta olmak üzere birçok alanda kullanılan EPP köpüklerin üç farklı yoğunluktaki statik ve dinamik mekanik özellikleri bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir. Statik deneylerden elde edilen gerilme-gerinme eğrilerinin literatürdeki çalışmalara benzer (Chen, 2015) olarak üç farklı bölge karakteristiği gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı parametrelere sahip numunelerin tekrarlı statik deneylerinden elde edilen eğrilerdeki sapmanın az olduğu ve elde edilen gerilme-gerinme eğrilerinin büyük oranda çakıştığı gözlenmiştir. Statik elastisite modülü KI, KII ve KIII için sırasıyla 2.4 MPa, 2.7 MPa, 4.6 MPa olarak belirlenirken, dinamik elastisite modülü 11 MPa, 14 MPa ve 22 MPa olarak belirlenmiştir. İtibari akma gerilmeleri ise statik deneylerde KI, KII ve KIII için sırasıyla 0.089 MPa, 0.152 MPa, 0.28 MPa olarak belirlenirken, dinamik deneylerde 0.12 MPa, 0.17 MPa ve 0.37 MPa olarak belirlenmiştir. Üretici firmaların referans kataloglarında yer alan ve ilgili standartlara göre yapılan testler sonucunda; 0.02gr/cm³ yoğunluklu numunenin %25'lik gerinmedeki dayanımı 0.09 MPa, 0.06 gr/ cm³ yoğunluklu numunenin %25'lik gerinmedeki dayanımı 0.39 MPa olarak gösterilmiştir (Arpro, 2021). Söz konusu değerler bu çalışmada elde edilen bulgular ile uyumludur.

Dinamik deneylerde köpüklerin rezilyans değerlerinin statik deneylere kıyasla daha düşük çıktığı görülmüştür. Dinamik deneylerde malzemenin elastik bölgede daha rijit davranması enerji sönmleme özelliğinin azalmasına neden olmuştur. Plastik bölgede ise sabit gerinme değerleri baz alındığında dinamik deneylerden elde edilen enerji değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerler statik ve dinamik deneylerde farklı mekanizmaların çalıştığını göstermektedir. Dinamik deneylerde deformasyonun çok hızlı gerçekleşmesi, köpüğün hücreli yapısı içerisinde hapsolan havanın ani olarak dışarı çıkamamasına ve deformasyon sırasında sıkışarak enerji sönmlemeye katkı sağladığı düşünülmektedir. Statik testlerde ise deformasyon çok yavaş gerçekleştiğinden hava kolaylıkla tahliye edilmekte ve numune uzama eğrisinin plato bölgesinde ani artışlar görülmemektedir.

Maheo ve Viot, çok katmanlı köpük hacimleri üzerinde deneysel dinamik sıkıştırma testleri yapmış ve sonlu elemanlar metodu sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada EPP malzemesi kullanılmıştır. Bu çalışma, kademeli yoğunluğa sahip bir

köpüğün, katmanlar arasındaki büyük yoğunluk farkı nedeniyle darbe enerjisi emiliminin sabit bir plato şeklinde değil, kademeli olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Bu çalışmada da benzer bulgular elde edilmiş ancak bu kademelinin oluşmasında yapı içerisinde hapsolan havanın sıkışmasıyla darbe emici olarak görev yapmasının etkisi olduğu düşünülmüştür.

Deneyler sırasında lineer bölgeyi geçip sabit yük altından uzama bölgesine geçen numuneler, yük kaldırıldıktan sonra büyük oranda geri yaylansalar dahi ilk haldeki boylarına ve rijitliklerine ulaşamadıkları görülmüştür. Zhang, polimerik köpüklerin kalıcı şekil değişimlerini deneysel, sayısal ve analitik olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarında numuneleri %40'lık ve %80'lik gerinmeye kadar yükledikten sonra serbest bırakmışlar ve kalıcı şekil değişimlerinin; %40'lık uzamalarda %10'lar seviyesinde iken %80'lerin üzerine çıkıldığında %25'ler seviyesine çıktığını belirtmişlerdir (Zhang, 2011). Bu çalışmada statik deneylerde görece yüksek (%80'ler civarında) deformasyonlara çıkmış ve kalıcı şekil değişimlerinin %15-20'ler seviyesinde kaldığı görülmüştür. Dinamik deneylerde kalıcı deformasyonların görece yüksek çıkması, deformasyon sırasında hızla sıkışan havanın köpük malzemenin yapısına verdiği zarardan kaynaklanabileceği düşünülebilir. Ancak, vurucu çubuğun giriş çubuğuna çarpması ile harekete başlayan giriş çubuğu numuneyi, numune de çıkış çubuğunun ittirerek hareket başlamakta ve bu hareket çıkış çubuğunun stopper'a çarpmasına kadar sürmektedir. Stopper'a çarpıldığı anda çıkış çubuğu ani olarak durmakta ve doğrusal bir ataletle sahip giriş çubuğu numuneyi sıkıştırarak durmaktadır. Bu arada geçen süre yaklaşık 500 ms ile 1000 ms arasındadır. Dinamik deneylerde gerilme ve gerinme analizlerinin giriş ve çıkış çubuklarından geçen ilk elastik dalganın analizi ile yapıldığı ve bu sürenin de 1ms'den daha az olduğu göz önünde tutulursa; numunenin bu sırada deney ölçümlerinin dışında yüklemelere maruz kaldığı ve deney ölçümleri sınırları dışında hesaplanamayan deformasyonlara uğradığı söylenebilir. Bu sebeple dinamik deneyler sonrasında ölçülen kalıcı şekil değişimleri sağlıklı olmayacağından bu tez kapsamında tartışılmamıştır.

Lee, yoğunluğu 0.02 g/cm^3 değerindeki genişletilmiş polipropilen statik ve çok yüksek hızlı dinamik testlerde elde edilen elastisite modülü değerleri arasında 5 kat fark olduğunu ancak 0.06 g/cm^3 yoğunluklu numunelerin statik ve dinamik elastisite

modüllerinin birbirlerine eşit olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada farklı yoğunluğa sahip EPP köpüklerin dinamik elastisite modülleri 4.5- ile 5.2 kat fazla bulunmuş ve artan yoğunlukla birlikte malzemenin yüksek gerinme hassasiyetinin çok fazla değişmediği sonucuna varılmıştır.

Dinamik deneylerde kullanılan havalı sistem Hopkinson bar, pleksiglass çubuklar ve 25 cm vurucu çubuk donanımıyla en fazla %20'lik gerinmelere ve 270 s^{-1} 'lik gerinme hızlarına çıkabilmiştir. Lee, daha yüksek basınca sahip argon gazı kullanan Hopkinson bar deney sisteminde daha düşük elastisite modülüne sahip akrilik çubuklar kullanarak 1800 s^{-1} gerinme hızına ve %50 gerinme değerlerine ulaştığını bildirmiştir. Ancak Lee'nin elde ettiği gerinme sinyallerinde dalgalanmalar mevcuttur. Bu çalışmada elde edilen gerinmeler daha stabildir. Daha yüksek gerinme değerleri elde etmek için çubuk malzemeleri değiştirilmeden vurucu çubuğun boyu uzatılarak giriş dalgasının boyunun uzatılabileceği böylece daha yüksek gerinme değerleri elde edilebileceği öngörülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ile bir ambalaj malzemesi olarak modellenen köpük-telefon sisteminin sonlu elemanlar analizi sonrası en düşük yoğunluğa sahip köpüğün en yüksek darbe sönümlene kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar düşük darbe yüklerine maruz uygulamalarda daha az yoğunluklu köpük kullanmanın hem maliyet hem teknik açıdan daha uygun bir yaklaşım olacağını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Akkuş, A. 2019. Polipropilen malzemenin şişme oranının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Altepping J., Nebe, J., P. 1990. Production of low density polypropylene foam. *United States Patent* 4, 940, 736.
- Anonim, 2014. Fırat plastik levha ürünleri.
<https://www.firat.com/cmsfiles/certificates/9910/plastik-levha-urunleri-katalogu.pdf>
- Ashby, M., F. 1992. Materials selection in mechanical design. Butterworth-Heinmann, Department of Engineering, Cambridge University, England.
- Avalle, M., Belingardi, G., Montanini, R. 2001. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *Elsevier, International Journal of Impact Engineering*, 25: 455-472. doi: 10.1016/S0734-743X(00)00060-9
- Barlow, C., Kumar, V., Flinn, B., Bordia, R., K., Weller, J. 2001. Impact strength of high density solid-state microcellular polycarbonate foams. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 123(2): 229-233. doi: 10.1115/1.1339004
- Bouix, R., Viot, P., Lataillade, J. 2009. Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: strain rate, density and microstructure effects. *International Journal of Impact Engineering*, 36: 329–342. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2007.11.007
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., Li, Z. 2015. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Elsevier, Materials and Design*, 69:170-180. doi: 10.1016/j.matdes.2014.12.024
- Chien, R., D., Chen, S., C., Lee, P., H., Huang, J., S. 2004. Study on the molding characteristics and mechanical properties of injection-molded foaming polypropylene parts, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23/4, 429-444. doi: 10.1177/0731684404031891
- Doğu, S. 2020. Eva esaslı elastomer ile uyumlaştırılmış ve silika nanatip katkılı polipropilen/termoplastik elastomer alaşım nanokompozitlerin üretilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yalova Üniversitesi, Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı, Polimer Mühendisliği Programı, Yalova.
- Fan, J., Weerheijm, J., Sluys, L. 2018. Deformation to fracture evolution of a flexible polymer under split hopkinson pressure bar loading, *Polymer Testing*, 70: 192-196. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.07.006

Gümüş, S. 2019. Çift eksenli gerilme altında parçalı hopkinson basma çubuğu ile malzeme analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Katı Cisimler Mekaniği Programı, İstanbul.

Güney, Ş. 2020. Geri dönüşümlü polipropilen, poliakrilonitril ve karbon elyaf kompozitinin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bilim Dalı, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

İnci, S. 2006. Elyaf takviyeli polipropilen/elastomer özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Anonim, 2018. Material Physical Properties for Foam. JSP International Group, ARPRO.

https://www.arpro.com/contentassets/6d4b0cc91dc74ce9aca7be96f4e3c39a/techdoc_geophysprop-epp-20to90gl_2018.pdf

Kandırmış, İ. 2016. Split hopkinson dinamik basma ve çekme sistemi tasarımı, imalatı ve sonlu elemanlar analizi ile doğrulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Kaya, Ö. 2019. Farklı karbon esaslı polipropilen nanokompozitlerin titreşimsel sönümlenme davranışları. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Lee, Y., H., Chul, B., P., K1, H., W., Min, H., L. 2005. HDPE–clay nanocomposite foams blown with supercritical CO2. *Journal of Cellular Plastics*, Volume 41, 487-502. doi: 10.1177/0021955X05056964

Lee, Y., S., Park, N., H., Yoon., H., S. 2010. Dynamic mechanical characteristics of expanded polypropylene foams. *Journal of Cellular Plastics*, 46(1):43-55, doi: 10.1177/0021955X09346363

Maheo, L., Viot, P. 2013. Impact on multi-layered polypropylene foams. *Elsevier, International Journal of Impact Engineering*, 53: 84-93. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.011

Minoru, S., Iku, H., Yasushi, M. 2007. Mechanism of strength improvement of foamed plastics having fine cell. *Journal of Cellular Plastics*, 43, 157-167, 2007. doi: 10.1177/0021955X06075585

Nam, G., J., Yoo, J., H., Lee, J., W. 2005. Effect of long-chain branches of polypropylene on rheological properties and foam-extrusion performances. *Journal of Applied Polymer Science*, 96, 1793–1800. doi: 10.1002/app.21619

Öksüz, A. 2019. Polipropilen/cam elyaf/etilen vinil asetat polimer kompozitinin özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Saçak, M. 2017. Polimer teknolojisi. Gazi Kitapevi, 3, 461, Ankara.

Sanborn, B., Song, B. 2019. Poisson's ratio of a hyperelastic foam under quasi-static and dynamic loading. *Elsevier, International Journal of Impact Engineering*, 123: 48–55. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.001

Şahin, M. 2007. Betonla uyumlu polipropilen elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi ve özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Şimşek, Z., Ö. 2011. Parçalı hopkinson basma çubuğu deney düzeneği kurulumu. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Trelease, E. 2018. Poliüretan köpük ile doldurulmuş bal peteği sandviç plakaların titreşim analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Dinamiği, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Wang, L., Hu, S., Yang, L., Sun, Z., Zhu, J., Lai, H., Ding, Y. 2014. Development of experimental methods for impact testing by combining hopkinson pressure bar with other techniques. *Acta Mechanica Sinica*, 27 (4). doi: 10.1016/S0894-9166(14)60041-0

Yetgin, S., Ünal, H. 2008. Polimer esaslı köpük malzemeler. *Doktora Tezi*, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Yetgin, S., Ünal, H. 2011. Polipropilen köpük malzemenin mekanik özelliklerine ve hücre morfolojisine proses şartlarının etkisinin incelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18.

Yetgin, S. 2012. Otomotiv sektörü için polimer köpük malzeme üretimi ve karakterizasyonu. *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., Fang, J. 2019. Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with expanded polypropylene foam. *Elsevier, Composites Part B*, 156: 17-27. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.043

Zhang, X., Andrieux, F., Sun, D. 2011. Pseudo-elastic description of polymeric foams at finite deformation with stress softening and residual strain effects. *Elsevier, Materials Design*, 32: 877-884. doi: 10.1016/j.matdes.2010.07.004

Zhao, J., Zhao, Q., Wang, C., Guo, B., Park, C., Wang, G. 2017. High thermal insulation and compressive strength polypropylene foams fabricated by high-pressure foam injection molding and mold opening of nano-fibrillar composites. *Elsevier, Materials Design*, 131: 1-11. doi: 10.1016/j.matdes.2017.05.093

