



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkut MELEMENÇİ

KATMANLI POLİETİLEN
KÖPÜK MALZEMELERİN
YAPISAL DAVRANIŞLARI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2017

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KATMANLI POLİETİLEN KÖPÜK MALZEMELERİN
YAPISAL DAVRANIŞLARI**



Erkut MELEMENÇİ

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
HAZİRAN-2017**

TEZ ONAYI

KATMANLI POLİETİLEN KÖPÜK MALZEMELERİN YAPISAL DAVRANIŞLARI

Erkut MELEMENÇİ tarafından Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ danışmanlığında
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği**
Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri
tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ABTÜ

Üye: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Durmuş Ali BİRCAN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ÇÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile
onaylanmıştır.

Doç. Dr. Halil Zeki GÖK
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

*Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak
5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.*

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Erkut MELEMENÇİ



ÖZET

KATMANLI POLİETİLEN KÖPÜK MALZEMELERİN YAPISAL DAVRANIŞLARI

Erkut MELEMENÇİ
Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ

Haziran 2017, 53 sayfa

Ülkemizde Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE) köpük üretimi yapan kuruluşlar seri üretimleri içerisinde ürün kalınlığını en fazla 20 mm olarak belirlemişlerdir. Tasarımcılar ve son kullanıcılar ise kullanım yerine göre farklı kalınlığa sahip polimer köpük malzemelere ihtiyaç duyulabilmektedirler. Bu ihtiyaçları karşılamak için ya ithal tek katmanlı ürünlere yönelmek ya da polietilen köpük tabakaları ısı birleştirme ile yapıştırarak istenilen malzeme kalınlığa ulaşmak gerekmektedir. Ancak ısı birleştirme yönteminin, bu yöntem ile elde edilen tabakalı polietilen köpüklerin mekanik özellikleri üzerine etkisi tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada tek katmanlı polietilen köpük malzeme ile ısı birleştirme ile tabakalı olarak bir araya getirilen aynı kalınlıktaki polietilen köpük malzemenin statik ve dinamik yük altında enerji soğurma yeteneği ve boyutsal özelliklerini geri kazanma kabiliyeti deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca söz konusu deneysel çalışmalar sonlu elemanlar ortamında modellenmiş olup her iki köpük yapı için uygun malzeme modeli seçilerek elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: DYPE Köpük, Katmanlı Köpük Yapılar, Basma Davranışı

ABSTRACT

STRUCTURAL BEHAVIOR OF LAYERED POLYETHYLENE FOAMS

Erkut MELEMENÇİ
M.Sc., Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assist.Prof.Dr Kerimcan ÇELEBİ

June 2017, 53 pages

Low Density Polyethylene Foams (LDPE) are generally manufactured by national firms in the form of layer with 20 mm thickness. But designers and users need the LDPE foams in different forms with various thicknesses. To supply these requirements the designers have to either import monolithic LDPE polyethylene foams or obtain desired foam thickness by hot welding. However there is no sufficient knowledge in the literature about the mechanical behavior of hot welded layered polyethylene foams. In this study the energy absorption capability and the dimensional recovery properties of the monolithic polyethylene and hot welded LDPE polyethylene foams under static and dynamic (drop weight) loadings are investigated and compared. The dynamic loadings are also simulated by the finite element codes and the numerical analyses are performed.

Key Words: LDPE Foam, Layered Foam Structure, Compressive Behavior



Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince birikim ve tecrübeleriyle bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen SECANT Teknoloji A.Ő. yetkilileri Yılmaz ERBİL ve Serdar GÜZEL'e,

Önerileri ve yönlendirmeleri ile çalışmalarım destek sağlayan Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ ve Yrd. Doç. Dr. Durmuş Ali BİRCAN'a,

Ayrıca çalışmalarım süresince manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, cesaretlendiren sevgili eşim İlkay MELEMENCİ'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
3. POLİMER KÖPÜK MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE SINIFLANDIRILMASI	14
3.1. Polimer Köpük Oluşumu	14
3.1.1. Kimyasal Köpük Yapıcılar.....	15
3.1.2. Fiziksel Köpük Yapıcılar	16
3.2. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri	18
3.2.1. Kesikli Süreci ile Köpük Üretimi.....	18
3.2.2. Enjeksiyon Kalıplama ile Köpük Üretimi	19
3.2.3. Döner Kalıplama Yöntemi ile Köpük Üretimi	20
3.2.4. Basınçlı Kalıplama ile Köpük Üretimi	22
3.2.5. Ekstrüzyon ile Köpük Üretimi	23
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
4.1. DYPE Köpük Numunelerin Hazırlanması.....	25
4.2. Statik Yükleme Altında Yapılan Testler.....	28
4.3. Ağırlık Düşürmeli Darbe Yüğü Altında Yapılan Testler	30
5. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	33
6. SONUÇLAR VE İRDELEME	36
6.1. DYPE Köpük Malzemenin Statik Yükleme Altında Mekanik Davranışı	36
6.2. DYPE Köpük Malzemelerin Ağırlık Düşürmeli Darbe Yüğü Altında Mekanik Davranışı.....	37

6.3. Sayısal Sonuçlar.....	43
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	53



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Kimyasal çapraz bağlı DYPE köpüklerin yoğunluğa bağlı fiziksel özellikleri (Durfoam, 2016)	6
Çizelge 3.1 Yaygın kullanılan kimyasal köpük yapıcılar	16
Çizelge 3.2 Yaygın kullanılan fiziksel köpük yapıcılar	17
Çizelge 4.1 DYPE köpük malzemelerin mekanik özellikleri (Durfoam, 2016; Zotefoams, 2016)	25
Çizelge 6.1 Ağırlık Düşürmeli Darbe Testlerinde Soğurulan Özgül Enerji	41



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Açık ve kapalı köpük görüntüsü (Eaves, 2004).....	1
Şekil 1.2 Polimer köpükler için temel gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Avelle, vd., 2001).	3
Şekil 3.1 Termoplastik köpük oluşum aşamaları (Lee, vd., 2007; Yetgin, 2012). ...	14
Şekil 3.2 Kesikli süreci ile köpük üretimi (Gedler, vd., 2012).....	18
Şekil 3.3 İki kademeli ekstruder vidası.....	20
Şekil 3.4 Enjeksiyon kalıplama ile köpük üretimi (Foam Injection Molding, 2016).20	
Şekil 3.5 Döner kalıplama yöntemi ile köpük üretimi (Rotoworldmag, 2016).	21
Şekil 3.6 Köpük üretim aşamaları ve işlem sıcaklıkları (Christian, 2009).	22
Şekil 3.7 Sıkıştırma köpük kalıplama yönteminin şematik gösterimi (Pop-Iliev, vd., 2007, Yetgin, 2012).	23
Şekil 3.8 Ekstrüzyon ile köpük üretimi.	24
Şekil 4.1 Tek eksenli basmaya maruz köpük malzeme kesiti (de Vries, 2009).....	26
Şekil 4.2 Sıcak yapıştırma ile katmanlı köpük hazırlanması.	27
Şekil 4.3 Tek katmanlı ve katmanlı köpük.	27
Şekil 4.4 Instron 3367 evrensel test cihazı.....	29
Şekil 4.5 DYPE köpük malzemelerin statik yük altındaki test cihazı görüntüleri; a) DYPE köpük malzemenin statik yük uygulama öncesi görüntüsü, b) DYPE köpük malzemenin statik yük uygulama sırasındaki görüntüsü.	29
Şekil 4.6 Instron Dynatup dikey ağırlık düşürmeli darbe test cihazı.	31
Şekil 4.7 DYPE köpük malzemelerin ağırlık düşürmeli darbe test cihazı görüntüleri; a) Tek katmanlı DYPE köpük malzeme, b) Katmanlı DYPE köpük malzeme (katman düzleminde yükleme), c) Katmanlı DYPE köpük malzeme (katmana dik yükleme).	32
Şekil 5.1 Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi için Sonlu Elemanlar Modeli.....	34
Şekil 5.2 Sayısal olarak modellenmiş köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışları.	35
Şekil 6.1 LD29 ve XLPE30 köpük malzemelerin statik yükleme altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.....	37
Şekil 6.2 LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.	39

Şekil 6.3 LD29 köpük malzemenin deforme olmuş gözenekli iç yapısı.	39
Şekil 6.4 XLPE30 Katmana dik köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.	40
Şekil 6.5 XLPE30 köpük malzemenin gözenekli iç yapısı.....	40
Şekil 6.6 XLPE30 Katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.	42
Şekil 6.7 LD29, XLPE30 Katmana dik ve XLPE30 katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.	43
Şekil 6.8 LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.	44
Şekil 6.9 XLPE30 katmana dik köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.....	44
Şekil 6.10 XLPE30 katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.....	45

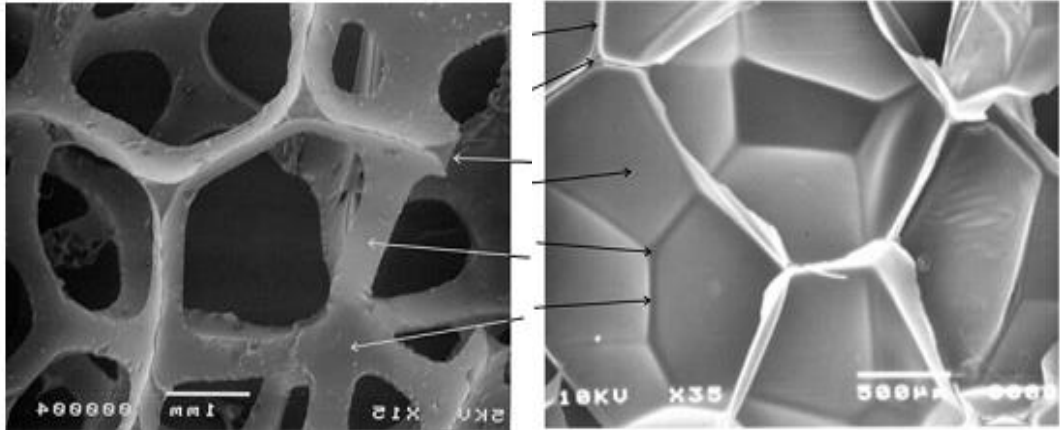
SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Deney parçasının yüzey alanı	(mm ²)
CC ₄₀	%40 Gerilme/Şekil Değişirme Özelliği	(kPa)
CFC	Kloroflorokarbon	(-)
CO ₂	Karbondioksit	(-)
DYPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen	(-)
EFG	Elemansız Galerkin Yöntemi	(-)
EPP	Köpükleştirilmiş Polipropilen	(-)
EPS	Köpükleştirilmiş Polistren	(-)
E _s	Özgül Enerji	(kJ/m ³)
FKY	Fiziksel Köpük Yapıcılar	(-)
F ₄₀	%40 Dördüncü Yüklemede Ölçülen Kuvvet	(N)
g	Yerçekimi İvmesi	(m/s ²)
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	(-)
HKFK	Hidrokloroflorokarbon	(-)
KFK	Kloroflorokarbon	(-)
KKY	Kimyasal Köpük Yapıcılar	(-)
LD29	Tek Katmanlı Polietilen Köpük	(-)
L/D	Uzunluk/Çap Oranı	(-)
N	Azot	(-)
PIF	Poliisosiyanürat	(-)
PP	Polipropilen	(-)
PU	Poliüretan	(-)
PVC	Polivinil Klorür	(-)
SEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi	(-)
XPS	Sıkıştırılmış Polistren	(-)
V	Hız	(m/s)
XLPE	Katmanlı Polietilen Köpük	(-)
X _s	Yükseklik	(mm)
σ _c , σ _d	Gerilme	(MPa)
ε _d	Şekil Değişirme	(mm/mm)

1. GİRİŞ

Polimer köpük malzemeler bol miktarda gaz boşlukları içeren ve bu boşlukların yoğun polimer ana yapı ile tamamen veya kısmen çevrelendiği mühendislik malzemeleridir. İkinci Dünya Savaşı süresince polimer köpük üretim teknolojileri hızlı bir şekilde geliştirilmiş ve polimer köpükler seri üretim ile yaygın kullanılan endüstriyel ürün haline almıştır (Lee, vd., 2004). Günümüzde ise hemen hemen bütün termoset ve termoplastik polimerler gözenekli hale getirilip polimer köpük olarak üretilmektedir. Termoset ve termoplastik polimer köpükler düşük ağırlık, yüksek enerji soğurma yeteneği, düşük maliyet gibi temel özelliklere sahip olduğu için birçok endüstriyel uygulamada bu malzeme kümesi tercih edilmektedir. Bu nedenle polimer köpüklerin tanımlanması ve mekanik davranışlarının belirlenmesi önem arz etmektedir.

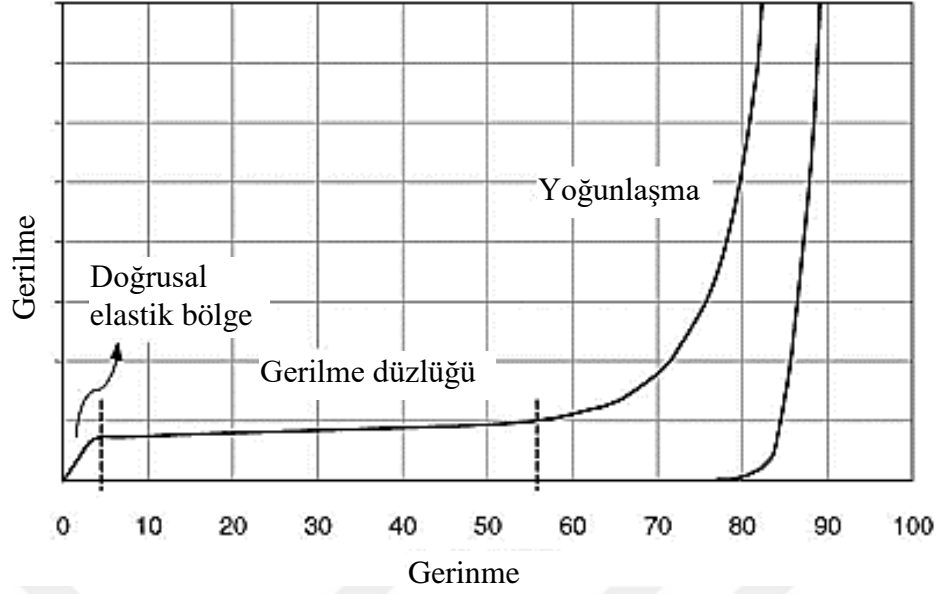
Polimer köpüklerde ana yapı malzemesi köpüğün yoğunluk, sertlik, elastikiyet ve mekanik dayanımını büyük ölçüde etkiler. Yoğunluk polimer köpük malzemeyi oluşturan polimer türü, polimer miktarı ve boşluk miktarının bir ölçüsü olduğu için polimer köpüğün maliyeti ve kullanışlılığı ile doğrudan ilgilidir. Polimer köpüklerin rezilyası ise doğrudan malzemenin enerji soğurma yeteneğinin bir ölçüsüdür ve darbe sönümleyici olarak kullanılacak polimer köpüklerin yüksek elastikiyet değerine sahip olması istenir. Polimer köpüklerde sertlik değeri malzemenin ne kadar büyüklükte bir yükü taşıyabileceğini belirler. Polimer köpüklerin dayanımı ise malzemenin kopması veya kesilmesi esnasında göstermiş olduğu direnç değeri olup malzemenin yastıklama kapasitesi ile doğrudan ilgili değildir (Eaves, 2004).



Şekil 1.1 Açık ve kapalı köpük görüntüsü (Eaves, 2004).

Polimer köpüklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen diğer bir etken ise hücre yapısıdır. Polimer köpüklerin hücrelerinin büyüklüğü, hücre duvarlarının yüzey sayısı, hücre dağılımlarının düzenli olması ve özellikle hücrelerin açık/kapalı olması malzemenin mekanik özellikleri üzerinde belirleyici etkenlerdir. Açık hücreli köpüklerde hücre yapısı kafes sistemini andırır ve hücre duvarları bulunmaz (Şekil 1.1). Kapalı hücreli köpüklerde ise hücreler duvarlar ile ayrılmıştır ve içi boş hücrelerin arasında geçiş bulunmaz. Hücre yapısının açık veya kapalı olması üretim esnasında eriyik polimer içerisine üflenen gazın çekirdeklenmesi (kabarcık oluşturması), oluşan kabarcığın küresel halde ana yapı ile sarılması ve en sonunda çevresini saran ana yapı duvarlarını parçalayacak kadar büyümesi ile belirlenir. Kapalı hücreli polimer köpükler ısı yalıtım malzemesi ve enerji soğurucu malzeme olarak kullanılırken açık hücreli polimer köpükler daha çok akustik yalıtım uygulamaları ve elektronik eşyaların ambalajlarında kullanılır (Landrock, 1994).

Polimer köpük malzemeler endüstride, özellikle paketleme sanayisinde, değerli eşyaları yastıklamak ve darbelerden korumak için kullanılırlar. Bu nedenle polimer köpük malzemelerin basma yükü altında göstermiş oldukları davranış çok önemlidir. Şekil 1.2’de kübik polimer köpük malzeme için tek eksenli statik basma yükü altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir. Şekil 1.2’deki eğri doğrusal elastik bölge, gerilme düzlüğü ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç evreden oluşmaktadır. Genellikle birim şekil değiştirmenin %5’in altında olduğu ilk evrede, köpük malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi doğrusaldır ve bu eğri malzemenin Young Modülü’nü oluşturur. İkinci evrede ise basma yükünün artması ile hücre duvarlarında elastik burkulmalar, plastik akma veya kırılmalar meydana gelir. Gerilme düzlüğü olarak adlandırılan bu evrede şekil değiştirme artarken gerilme değeri neredeyse sabit kalır. İkinci evrede çöken hücre duvarları son evrede artık birbirlerine temas etmeye başlar ve yoğunlaşma evresi ile birlikte köpük malzemedeki oluşan gerilme hızlı bir şekilde artar. Üç evreden oluşan gerilme – şekil değiştirme grafiğinin altındaki alan, basma yükü altındaki köpük malzemenin soğurduğu özgül enerjiye ($E_s - \text{kJ/m}^3$) eşittir.



Şekil 1.2 Polimer köpükler için temel gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Avelle, vd., 2001).

Polimer köpüklerin özellikle düşük yoğunluğa sahip olanları darbe enerjisini sönmleme kabiliyetleri yüksek olduğu için çok tercih edilirler. Düşük yoğunluklu polimer köpükler tasarımcılar tarafından sıklıkla tercih edilen, basma davranışları literatürde tanımlanmış malzemelerdir. Miğfer, tampon gibi darbeye maruz ürünlerin yapımında ve elektronik eşyalar, mücevherler, askeri mühimmatlar gibi değerli ürünlerin paketlenmesinde düşük yoğunluklu polimer köpükler kullanılır. Paketleme endüstrisinde kullanılan köpükler tek kullanımlık ürünler olmayıp kullanım ömürleri boyunca çoğu kez düşmelerden ve sarsılmalardan kaynaklı darbe yüklemelerine maruz kalırlar. Düşük yoğunluklu polimer köpükler içerisinde ise Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE) köpükler çok tercih edilen malzemelerdir (Öztürk, 2008). DYPE köpüklerin üretiminde çapraz bağlı polietilen zinciri ile üretilmiş polimerler tercih edilmektedir. “Çapraz-bağlanmış polietilenin en önemli faydaları ve gelişmiş fiziksel özellikleri ısı dayanımı, yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı, çevresel gerilme çatlağı, kimyasal dayanımı, oksitlenme dayanımı, düşük sıcaklık mukavemeti, yüksek sıcaklıklarda uzun süreli mukavemeti, gaz nüfuzu dayanımı ve yüksek yalıtımıdır” (Durfoam, 2016).

Çapraz bağlı DYPE köpükler ekstrüzyon yöntemi ile üretilir ve DYPE köpük tabakalar istenilen şekillerde kesilerek ticari ürün olarak sunulur (Öztürk, 2008).

Ticari olarak genel kullanıma sunulan DYPE köpüklerin yoğunluğu 30 - 145 kg/m³ aralığında değişmektedir. DYPE köpükler kapalı hücre yapısına sahip, su ve nem geçirmeyen, kimyasal dayanımı yüksek, kloroflorokarbon (CFC) içermeyen, %100 geri dönüşümü olan, ısı ile şekillendirilebilen, çevre dostu malzemelerdir. Bu köpükler daha çok yapı endüstrisi, ayakkabı ve çanta imalatı, otomotiv endüstrisi, beyaz eşya ve elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır. Yaygın kullanıma sahip DYPE köpüklerin mekanik özellikleri Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Genel kullanıma sahip çapraz bağlı DYPE polimer köpükler üreticiler tarafından belirli kalınlıkta tabakalar halinde üretilirken, tasarımcılar ve son kullanıcılar kullanım yerine göre farklı kalınlığa sahip polimer köpük malzemeye ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu ihtiyaçları karşılamak için ya üretici firmalar özel üretim yapar ya da polimer köpük tabakalar ısı birleştirme ile yapıştırılarak istenilen malzeme kalınlığı elde edilir. Polimer köpüklerin ısı birleştirilmesi istenilen kalınlıkta ve şekilde malzeme elde etmek için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak ısı birleştirme yönteminin, bu yöntem ile elde edilen tabakalı polimer köpüklerin mekanik özellikleri üzerine etkisi tam olarak bilinmemektedir. Literatürde ise bu konuda yapılan çalışmaların çok az olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında ise savunma sanayisinde mühimmatların yataklanmasında kullanılan çapraz bağlı DYPE polimer köpük malzemenin mekanik davranış incelenmiştir. Savunma sanayisinde mühimmatların muhafazası ve sevk edilmesi için kullanılan taşıma sandıkları içerisine yerleştirilen çapraz bağlı DYPE polimer köpükler ya tek katmanlı olarak ithal edilen köpük malzemelerden ya da ısı birleştirme elde edilen köpük malzemelerden kesilerek elde edilmektedir. Isı birleştirme ile elde edilen polimer köpükler milli savunma sanayisi için hem ucuz hem de hızlı bir çözümdür.

Bu çalışmada tek katmanlı polietilen köpük malzemenin statik yük altında ve dinamik yük altında enerji soğurma yeteneği ve boyutsal özelliklerini geri kazanma yeteneği deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel ısı birleştirme ile tabakalı hale getirilmiş polietilen köpük malzeme için tekrarlanmış ve tek katmanlı köpük malzemenin mekanik davranışı tabakalı köpük malzemenin mekanik davranışı ile

kıyaslanmıştır. Ayrıca her iki köpük yapı bilgisayar ortamında modellenmiş ve deneyler ile elde edilen gerilme – şekil değiştirme verileri kullanılarak sayısal çözümlene gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlene sonucunda hem polietilen köpük malzemenin basma davranışını modellemek için en uygun malzeme modeli seçilmiştir hem de bu modelin tabakalı polietilen köpüğün basma davranışına uygunluğu araştırılmıştır.



Çizelge 1.1 Kimyasal çapraz bağlı DYPE köpüklerin yoğunluğa bağlı fiziksel özellikleri (Durfoam, 2016)

Fiziksel Özellikler	Kimyasal Çapraz Bağlı DYPE Köpük Yoğunluğu (kg/m ³)								Birim	Test Yöntemi
	30	40	45	50	80	90	120	145		
En Büyük Gerilme	> 200	500	550	-	800	> 600 (Enine)	> 650 (Enine)	> 1200	kPa	ASTM D3575
Kopma Uzaması-Enine	> 120	179,6	180	> 130	175	> 650 (Boyuna)	> 850 (Boyuna)	-	%	ASTM D3575
Kopma Uzaması-Boyuna	> 110	174	175	> 120	149	> 180	> 40	-	%	ASTM D3575
Basma Dayanımı (%25 Gerinimde)	> 0,030	37,4	40	-	-	-	-	> 300	kpa	ISO 844
Kalıcı Şekil Değişimi	< 38 (%50,72 h)	-	-	< 8	-	-	-	< 9 (0,5 h) < 4 (24 h)	%	EN ISO 1856:1999
Kullanım Sıcaklığı	60	-40 +100	-40 +100	-40 +100	-40 +100	-40 +100	-40 +100	< 100	°C	-
Boyutsal Kararlılık-En	0,3 (48h,70°C)	0,2 (48h,70°C)	0,2 (48h,70°C)	-	≤±1 (6h,100°C)	≤±1 (6h,100°C)	≤±1 (6h,100°C)	-	%	TS EN 1604
Boyutsal Kararlılık-Boy	0,8 (48h,70°C)	0,6 (48h,70°C)	0,6 (48h,70°C)	-	≤±1 (6h,100°C)	≤±1 (6h,100°C)	≤±1 (6h,100°C)	< 2 (24h,70°C)	%	TS EN 1604

2. LİTERATÜR TARAMASI

Birçok polimer malzeme kapalı veya açık hücreli köpük biçiminde üretilmekte ve endüstriyel uygulamalarda olası yükleri yastıklamak veya sönümlemek amacıyla kullanılmaktadır. Literatüre sunulmuş çalışmaların bir kısmı farklı türdeki köpük malzemelerin statik basma yükü altındaki ve dinamik basma yükü altındaki mekanik davranışını belirlemiştir. Öztürk ve Anlaş (2009), EPS ve PE köpük malzemelerin basma yükü altında ve basma yükü kaldırılırken göstermiş olduğu mekanik davranışı ve soğurulan enerji miktarını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar art arda birden fazla yükleme ve yük boşaltma yaptıkları deneyler sonucunda köpük malzemelerin elastik davranışlarının değiştiğini ancak her bir yükleme için sabit yük altındaki deformasyon eğrisinin aynı kaldığını belirtmişlerdir. Öztürk ve Anlaş (2009), elde ettikleri deneysel sonuçları matematiksel olarak da modellemişler ve elastik bölgede yükleme ve yük boşaltma esnasında elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisini analitik sonuçlar ile çizmişlerdir. Avelle, vd. (2001), köpükleştirilmiş polipropilen (EPP), poliüretan (PU) ve polyamid malzemelerin darbe yükü altındaki mekanik davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar EPP ve polyamid köpük malzemenin gerilme – şekilde değiştirme davranışlarının benzer olduğunu, ancak PU köpük malzemenin hücre duvarlarında meydana gelen plastik deformasyon ve kırılmalar nedeniyle gerilme şekil değiştirme eğrisinin çok farklı olduğunu belirtmişlerdir. Petel, vd. (2013), patlama ile oluşan basma yükü altında açık hücreli PU, mikro açık hücreli PU ve DYPE köpük malzemelerin deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Petel, vd. (2013), köpük malzeme hücrelerinin gaz filtrasyonunun malzemelerin deformasyon davranışlarını değiştirmediğini belirtmişlerdir.

Ouellet, vd. (2006), deformasyon hızının ve yoğunluğun köpükleştirilmiş polistren (EPS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve PU malzemelerin basma davranışlarına etkisini incelemişlerdir. Ouellet, vd. (2006), 10^3 mm/sn deformasyon hızı değerinin eşik değer olduğunu ve bu değerden daha hızlı yüklemeler altında EPS ve HDPE köpük malzemelerin doğrusal olmayan gerilme – şekil değiştirme davranışı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Song, vd. (2007), düşük yoğunluklu epoksi köpük malzemenin farklı yük uygulama hızları altındaki mekanik davranışını incelemişler

ve yüksek deformasyon hızı altında malzemenin daha yüksek elastisite modülü, basma dayanımı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Viot, vd. (2005), EPP köpük malzemenin yoğunluğu ve malzemenin maruz kaldığı yükün uygulama hızını iki ayrı değişken olarak belirleyip, dinamik yük altındaki malzeme için belirlenen bu değişkenler ile gerilme – şekil değiştirme davranışı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Viot, vd. (2005), elde ettikleri sonuçlara göre; köpük malzemenin yoğunluğunun artması ile gerilme düzlüğündeki gerilme değeri artmaktadır ve yük uygulama hızının artması ile malzemeyi deformasyona uğratan gerilme şiddeti artmaktadır.

Literatüre sunulan çalışmaların bir kısmında ise polimer köpüklerin mekanik davranışları analitik eşitlikler veya sayısal yöntemler ile hesaplanmıştır. Özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) ve bu yöntem ile çözümleme yapılan ticari programlar (ANSYS®, ABAQUS® gibi) sıklıkla kullanılmıştır. Slik, vd. (2006), kapalı hücreli stirenli köpük malzemeye darbe yükü uygulayarak malzemenin gerilme – şekil değiştirme davranışını incelemişler ve elde ettikleri sonuçları LS-DYNA paket programında köpük malzemeyi modellemek için kullanmışlardır. Araştırmacılar sayısal çözümleme sonucunda MAT 57 ve MAT 63 malzeme modellerinin stirenli köpük malzemenin darbe yükü altında mekanik davranışını modellemek için uygun olduğu sonucuna varmışlardır (Slik, vd., 2006). Yang ve Shim (2004), farklı deformasyon hızları altında elastomer köpük malzemelerin mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlar ve bu malzeme kümesinin mekanik davranışını modelleyen formülleri hazırlamışlardır. Araştırmacıların sunduğu yarı deneysel metot elastomer köpük malzemenin hiperelastik davranışını başarı ile modelleyebilmektedir.

Jebur, vd. (2011), kapalı hücreli DYPE köpük malzemenin basma yükü altındaki izotropik hiperelastik davranışını sonlu elemanlar Yöntemi (SEM) esaslı bir yöntem ile modellemişlerdir. Romero, vd. (2008), dinamik yük altındaki açık hücreli visko elastik köpük malzemeyi 3 boyutlu mezoskopik bağ yapısı ile modellemişler ve bu model üzerinde köpük malzemenin deformasyonunu belirleyen, analitik eşitlikler içeren bir yöntem oluşturmuşlardır. Araştırmacıların sunduğu yöntem SEM ile uygulamak için de uygundur (Romero, vd., 2008). Machado, vd. (2011), maruz

kaldıkları yüklemeye ile şekil değiştiren ve tekrar eski şeklini almayan köpük malzemelerin basma yükü altında gösterdikleri büyük elasto-plastik deformasyonları Elemansız Galerkin Yöntemi (EFG) kullanarak modellemişlerdir. Araştırmacıların sunduğu yöntem çözüm esnasında köpük modeli üzerinde tekrar tekrar sonlu eleman ağı oluşturmamakta, tek adımda büyük deformasyonları hesaplayabilmekte ve yük uygulama hızından bağımsız olarak sonuç üretebilmektedir. Yang, vd. (2004), kapalı hücreli EPP köpük malzemeyi birçok defa tek eksenli basma yüküne, iki eksenli basma yüküne ve üç nokta eğme yüküne maruz bırakmış ve tekrarlı yüklemeye ile köpük malzemenin enerji sönümleyebilme yeteneğindeki azalmayı araştırmışlardır. Araştırmacılar ayrıca tekrarlı yüklemeye ile oluşan bu kayıpları ABAQUS® paket programı içerisinde HYPERFOAM ve MULLINS EFFECT elemanları ile de modelleyebilmişlerdir (Yang, vd., 2004). Faruque, vd. (1997), rijit köpük malzemelerin elastik modülünü ve akma dayanımını açık dinamik çözümleme ile hesaplayabilen sonlu eleman yazılımı oluşturmuşlardır. Hazırlanan sayısal yazılım, deformasyon hızından ve ortam sıcaklığından bağımsız olarak köpük malzemenin basma yükü altında gerilme şekil değiştirme davranışını benzetim yapabilmektedir (Faruque, vd., 1997).

Chou, vd. (1998), EPS, PE ve maleik anhidrit köpük malzemeler üzerinde yaptıkları dinamik ve statik basma yüklemeleri ile bu malzemelerin gerilme – şekil değiştirme özelliklerini belirlemişlerdir. Elde edilen veriler araştırmacılar tarafından LS DYNA paket programında MAT 53 köpük modeli için malzeme özelliği olarak kullanılıp malzemenin mekanik davranışı sayısal olarak da modellenmiştir. Ancak MAT 53 modeli köpük malzemenin yüklemeye kaldırılırken göstermiş olduğu gerilme – şekil değiştirme davranışını benzetim yapmakta başarısız olmuştur. Gilchrist ve Mills (2001) ABAQUS® paket programını kullanarak PS köpük malzemenin çekme yükü, basma yükü ve kesme yükü altındaki gerilme – şekil değiştirme davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada PS köpük malzemenin mekanik özelliklerini Bilkhu, vd. (1993), çalışmasını referans alan araştırmacılar elde ettikleri sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile tutarlılık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Hallström ve Juntikka (2004), farklı sıcaklıklardaki EPP köpük malzemenin darbe yükü altındaki gerilme şekil değiştirme davranışını incelemişlerdir. Araştırmacıların

elde ettiği sonuçlara göre köpük malzemenin sıcaklığı düştükçe malzemenin göstermiş olduğu doğrusal elastik gerilme – şekil değiştirme davranış belirgin hale gelmektedir. Ayrıca düşük sıcaklıklardaki köpükler basma yükü altında şekil değiştirirken daha fazla enerji soğurmaktadır. Apostol ve Constantinescu (2013), farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı deformasyon hızları altındaki PU köpük malzemenin basma davranışını, yoğunlaşma davranışını ve boyutsal özelliklerini geri kazanma yeteneğini araştırmışlardır. Araştırmacılar basma yükü altında gerilme – şekil değiştirme davranışını tanımlamak için malzeme yoğunluğuna ve ortam sıcaklığına bağımlı bir matematik model önermişlerdir. Ancak aynı zamanda malzemenin boyutsal özelliklerini geri kazanma yeteneğinin ortam sıcaklığı ve deformasyon hızından bağımsız olduğu görülmüştür. Zhang, vd. (1997), polipropilen (PP), PU ve EPS köpük malzemeleri kesme yükü, hidrostatik basma yükü ve tek eksen basma yükü altında test etmişlerdir. Araştırmacılar basma ve çekme testleri için 50x50x50 mm³ ölçülerinde, kayma testlerinde ise 50x50x100 mm³ ölçülerinde köpükler kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre PS köpük malzeme, hızı 4,45 m/s ile 0,229 m/s aralığında olan basma yüklemelerinde aynı gerilme – şekil değiştirme davranışını göstermiştir. Ancak PP köpüklerde yük uygulama hızının değişmesi ile malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışında büyük farklılıklar oluşmuştur. Araştırmacılar ayrıca deneylerden elde ettikleri sonuçlar ile hacimsel deformasyonu etkileyen değişkenleri tespit etmişler ve bu değişkenler ile oluşturdukları sayısal kodu LS-DYNA paket programı ile çalıştırarak köpüklerin yük altındaki deformasyonunu belirleyebilmişlerdir (Zhang, vd., 1997).

Liu, vd. (2005), farklı değerlerde yoğunluğa ve hücre sıklığına sahip açık hücreli epoksi köpük malzemeleri darbe yükü altında test ederek elde ettiği veriler ile malzemenin hasar davranışını belirleyen bir yöntem oluşturmuşlardır. Walter, vd. (2009), önerdikleri yarı deneysel matematiksel modeli kullanarak farklı yoğunluklardaki polivinil klorür (PVC) köpük malzemelerin hem basma yükü altındaki hem de çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını, kopma dayanımlarını ve şekil değişimlerini belirlemişlerdir.

Deshpande ve Fleck (2001), yoğunluğu 100 kg/m³ ve 200 kg/m³ olan PVC köpük malzemelerin eksenel basma yükü, radyal basma yükü, çekme yükü, hidrostatik yük

ve kesme yükü altındaki akma ve elastik burkulma davranışları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçlar ile PVC köpük malzemeler için akma yüzeyleri belirlemişler ve oluşan hasarları akma ölçütleri ile kıyaslamışlardır. Moreu ve Mills (2003), EPP, XPS (Sıkıştırılmış Polistren), ve DYPE köpük malzemelerin hidrostatik yük altındaki davranışlarını belirleyebilmek için bir hazne içerisinde hava basıncı ile yükleme yapan test cihazı geliştirmişlerdir. Araştırmacıların geliştirdiği cihaz köpük malzeme içerisinde hava kaçışına izin vermeden, yüksek hızlardaki deformasyonları da kaydedebilen ve malzemeyi sıvıdan korumak için kullanılan kauçuk kaplamaya gerek kalmadan testleri gerçekleştirebilmektedir. Yapılan çalışmada DYPE köpüğün hücre duvarlarının düşük basınç değerleri altında çökmeye başladığı ve bu durumun basınç – hacim eğrisini doğrusallıktan uzaklaştırdığı sonucu ortaya çıkmıştır (Moreu ve Mills, 2003). Shen, vd. (2001), tekrarlı basma yüküne maruz açık hücreli PU köpük malzemenin gerilme – şekil değiştirme davranışını değiştirilmiş Ogden modeli ile belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacıların önerdiği matematiksel olarak model her bir yük çevriminde deformasyon için gerekli enerjiyi göz önüne almaktadır. Song, vd. (2005), farklı ortam sıcaklıklarındaki epoksi köpük malzemenin farklı şiddetlerdeki darbe yükleri altında göstermiş olduğu deformasyonu ve oluşan hasarı deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar epoksi köpük malzeme için ortam sıcaklığının artmasına bağlı olarak köpük malzemede yumuşama meydana geldiğini belirterek ısıl yumuşama için bir geçiş sıcaklığı tespit etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca ortam sıcaklığını ve yük uygulama hızını göz önüne alarak epoksi köpüğün deformasyonunu belirleyen malzeme modeli geliştirmişlerdir (Song, vd., 2005).

Bezazi ve Scarpa (2007), PU ve PE esaslı öksetik ve öksetik olmayan polimer köpük malzemelerin statik basma yükü ve tekrarlı basma yükü altındaki mekanik davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen statik gerilme-şekil değiştirme eğrilerine bakıldığında öksetik malzemeler için belirgin gerilme düzlükleri oluşmadığı görülmüştür. Tekrarlı basma yükü altında elde edilen verilere bakıldığında ise ilk yüklemmeden sonra hem öksetik hem de öksetik olmayan köpüklerin rijitliklerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca tekrarlı basma yükü altındaki öksetik köpükler, belirli yük değerlerinde, öksetik olmayan köpüklere göre 16 kat fazla enerji soğurmuşlardır (Bezazi, vd., 2007). Bezazi ve Scarpa (2009), PU ve PE esaslı öksetik ve öksetik olmayan polimer köpük malzemelerin statik çekme

yüklemesi ve tekrarlı çekme yüklemesi altındaki mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Statik yük altında öksetik köpüklerin elastik deformasyon esnasında soğurdukları enerji ve hasar dirençleri daha yüksek çıkmıştır. S-N eğrileri ile öksetik ve öksetik olmayan polimer köpüklerin yorulma davranışları incelendiğinde ise öksetik yapının yorulma dayanımını artırdığı görülmüştür (Bezazi, vd., 2009).

Chen, vd. (2015), farklı yoğunluktaki EPS köpük malzemelerin statik ve dinamik yük altındaki mekanik davranışlarının yük uygulama hızına bağlılığını araştırmışlardır. Yapılan deneyler ile köpük malzemenin yoğunluğu arttıkça statik ve dinamik çekme dayanımının, elastik modülünün arttığı ve soğurduğu enerjinin arttığı görülmüştür. EPS köpük malzemenin hem basma dayanımı hem de çekme dayanımı yük uygulama hızına bağlıyken elastik modül yük uygulama hızından bağımsızdır (Chen, vd., 2015).

Koohbar, vd. (2016), kapalı hücreli yüksek yoğunluklu PU köpük malzemenin ortalama hızlardaki darbe yüklemelerine karşı göstermiş olduğu dayanımı deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar PU köpük malzemenin enerji soğurma yeteneğini hem deney cihazından elde ettikleri veriler ile hem de 3 boyutlu görüntü işleme tekniği ile hesaplamışlar ve görüntü işleme tekniği ile elde ettikleri sonuçların daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir (Koohbar, vd., 2016).

Krundaeva, vd. (2016), dinamik yüke maruz EPS köpük malzeme için farklı yoğunluk, yük uygulama hızı ve ortam sıcaklığı değerlerinin malzeme basma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar yük uygulama hızının köpük malzemenin mekanik davranışına etkisi olmadığını ancak malzeme yoğunluğunun artması ile dinamik yük altında basma dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ortam sıcaklığı da EPS köpük malzemenin basma dayanımını etkilemektedir. Krundaeva, vd. (2016), dinamik yük uygulayarak yaptıkları testleri LS-DYNA® paket programı ile modellemişlerdir. Araştırmacılar statik yük altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme değerlerinin ve malzeme yoğunluğunun, dinamik çözümlenin sayısal modellemesinin doğruluğu ve kesinliği için en önemli değişkenler olduğunu belirtmişlerdir (Krundaeva, vd., 2016).

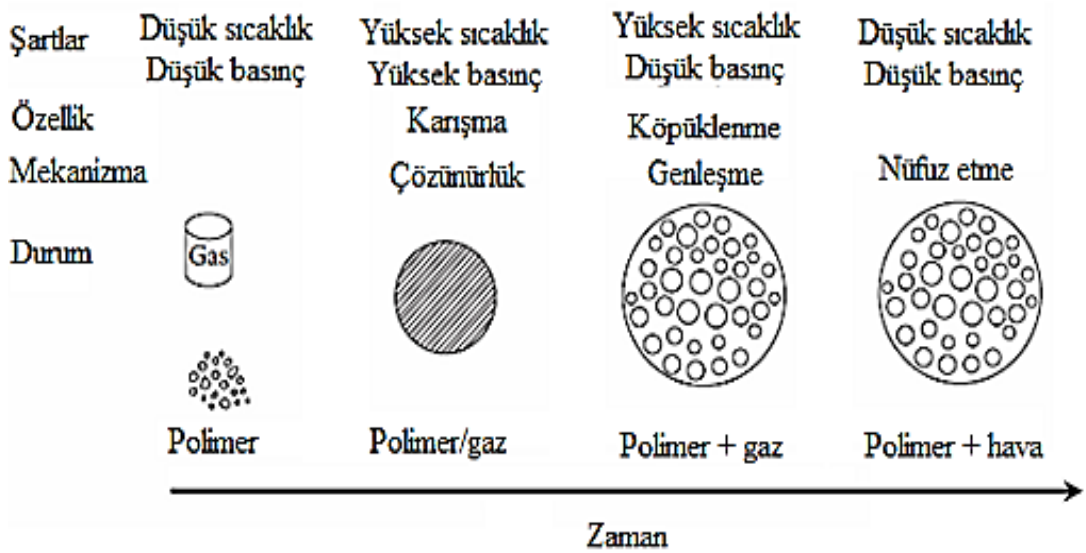
Park, vd. (2016), PU köpük, cam lifli takviyeli PU (RPUF) köpük ve poliisosiyanürat (PIF) köpük malzemelerin düşük sıcaklıklarda ve çok düşük sıcaklıklarda, basma yükü altındaki mekanik davranışlarını ve hasar mekaniğini araştırmışlardır. Yapılan testler ile tüm köpük malzemeler için ortam sıcaklığının düşmesi ile malzemelerin boyutsal özelliklerini geri kazanma kabiliyetlerinin azaldığını ve çok düşük sıcaklıklarda RPUF köpük malzemenin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yonezu, vd. (2016), statik yükleme altındaki mekanik özelliklerini deneysel olarak karakterize ettikleri düşük yoğunluklu kapalı hücreli PP köpük malzemeyi SEM ile modelleyerek malzemenin şekil değişimini benzetim yapmışlardır. Yapılan çalışmada sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile tutarlılık göstermiştir. Araştırmacılar aynı zamanda farklı vurucu tipleri ile değişik yük uygulama hızları ile köpük malzeme üzerine darbe yükü oluşturmuşlar ve darbe yükü ile malzemede oluşan plastik deformasyonu belirleyebilen bir SEM modeli hazırlamışlardır.

3. POLİMER KÖPÜK MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE SINIFLANDIRILMASI

3.1. Polimer Köpük Oluşumu

Polimer köpük malzemeler köpük yapıcı olarak adlandırılan kimyasalların karıştırıldıkları polimer içinde gaz kabarcıkları oluşturması ile elde edilir. Köpük üretimi için enjeksiyon, ekstrüzyon, Kesikli gibi yöntemler mevcuttur ancak tüm üretim yöntemleri karıştırma, hücre çekirdeklenmesi, hücre büyümesi ve kararlı hücre oluşumu adımlarını içermektedir (Şekil 3.1). İlk olarak sıvı polimer ana yapı içerisine karıştırılan köpük yapıcı malzeme bulunduğu ortam içerisinde dağınık halde bulunan ve ana yapı yoğunluğunu düşüren küresel kabarcıklar oluşturur. Küresel kabarcıklar fiziksel veya kimyasal etkileşim ile büyür ve kapalı küresel kabarcıklar içeren polimer ana yapı en düşük yoğunluğa ulaşır. Büyüyen kabarcıkların çeperleri birbirlerine temas eder ve çok yüzeyli hücreler meydana gelir. Son olarak kabarcıkların içerisinde oluşan gazın basınç değerine göre hücre duvarlarında yıkılmalar meydana gelir ise açık hücreli köpük malzeme, hücre duvarları yıkılmaz ise kapalı hücreli köpük malzeme elde edilir (Eaves, 2004).



Şekil 3.1 Termoplastik köpük oluşum aşamaları (Lee, vd., 2007; Yetgin, 2012).

Polimerin köpük formunu alması için içerisine karıştırılan köpük yapıcılar gaz, toz veya taneli halde olabilir. Köpük yapıcılar köpük haline gelecek polimer ana yapı ile aralarındaki etkileşime göre kimyasal köpük yapıcılar ve fiziksel köpük yapıcılar olarak iki türde ele alınır. Türü ne olursa olsun kullanılan köpük yapıcının polimer ana yapı ile tepkime sıcaklığının polimer ana yapı ergime sıcaklığından fazla olması gerekmektedir. Ayrıca polimer ana yapı, katılan köpük yapıcının miktarı ile polimer köpüğün yoğunluğunu ve hücre yapısını doğrudan etkilemektedir.

3.1.1. Kimyasal Köpük Yapıcılar

Polimer köpük üretim sürecinde ısıl bozulma veya kimyasal tepkime sonucunda gaz açığa çıkartan bileşikler Kimyasal Köpük Yapıcılar (KKY) olarak adlandırılır. KKY'nin neredeyse tamamı toz halinde bulunurlar ve depolanmaları ile taşınmaları için özel koruyucu ekipmanlara gereksinim yoktur. Köpük üretimi için KKY ile polimer doğrudan karıştırılır, harmanlanırlar ve bu karışım ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, dönül kalıplama gibi köpük üretim sürecine doğrudan sokulur. KKY pahalı sarf malzemeler oldukları için genellikle orta ve yüksek yoğunluğa sahip (400 – 800 kg/m³) polimer köpük yapımında kullanılırken, düşük yoğunluklu köpük yapımında ise nadiren kullanılırlar. Ancak diğer taraftan KKY'nin köpük üretim sürecinde kullanımı kolay olduğu için ve özel makine cihazlara ihtiyaç duyulmadığı için küçük ölçekli köpük üreticileri bile kimyasal yöntemler ile köpük üretimini tercih etmektedir. Ayrıca düşük basınçlı köpük üretim yöntemleri gibi birçok üretim Yöntemi de yapıları gereği KKY kullanımına uygundur. Bununla birlikte KKY daha ince hücre yapısı oluşumuna uygun oldukları ve kendi kendilerine çekirdeklenebildikleri için tercih edilirler (Eaves, 2004).

KKY kullanıldıkları ana yapı içerisinde birkaç farklı gaz (N₂, CO, NH₃ gibi) ve katı atık oluştururlar (Eaves, 2004). KKY içerisinde buldukları polimer ana yapı ile etkileşimleri esnasında ısıveren veya ısıalan tepkime gerçekleştirerek kimyasal bozulmaya uğrarlar. Köpük yapıcıların kimyasal bozulmalarını başlatmak için prosese ısı girdisine ihtiyaç duyulur. Isıveren bir köpük yapıcı olan ve ticari adı ADC olan Azodikarbonamit (H₂N-OC-N=N-CO-N₂H) en yaygın kullanılan köpük

yapıcıdır. Polimer köpük yapımında kullanılan KKY ve özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Yaygın kullanılan kimyasal köpük yapıcılar

Tanım	Tür	Ayrışma Sıcaklığı (°C)	Gaz Ürünü STP $\times 10^{-3}$ (m ³ /kg)	Gazlar
Azodikarbonamit (ADC)	Isıveren	200-300	220-245	N ₂ , CO, NH ₃ , O ₂
4,4-Oksibis (benzen-sülfonil hidrazid) (OBSH)	Isıveren	150-160	120-125	N ₂ , H ₂ O
p-Toluensülfonil Hidrazid (TSH)	Isıveren	110-120	110-115	N ₂ , H ₂ O
p-Toluensülfonil Semikarbazid (TSS)	Isıveren	215-235	120-140	N ₂ , CO ₂
Dinitroso Penta Metilen Tetramin	Isıveren	195	190-200	N ₂ , NH ₃ , HCHO
Polifenilen Sülfoksit (PPSO)	Isıveren	300-340	80-100	SO ₂ , CO, CO ₂
Sodyum Bikarbonat	Isıyalan	120-150	130-170	CO ₂ , H ₂ O
Çinko Karbonat	Isıyalan			CO ₂
Strik Asit Türevleri	Isıyalan	200-220	110-150	CO ₂ , H ₂ O
5-Fenil Tetrazol	Isıyalan	240-250	190-210	N ₂

3.1.2. Fiziksel Köpük Yapıcılar

Eriyik haldeki polimer ana yapı içerisine eklenen, polimer ile kimyasal tepkimeye girmeden, yüksek sıcaklık veya basınç altında, sıvı fazından gaz fazına geçerek veya genişerek ana yapı içerisinde gözenek oluşturan sıkıştırılmış gazlar veya sıvılar Fiziksel Köpük Yapıcılar (FKY) olarak adlandırılırlar. Sıvı fazdaki FKY düşük sıcaklıkta buharlaşmaya başlayan, alifatik (C₅ – C₇ içeren) hidrokarbon veya halojenli (C₁ – C₄ içeren) alifatik hidrokarbon içeren sıvılardır. Sıkıştırılmış gaz fazındaki FKY ise CO₂, N₂, kısa zincir alifatik hidrokarbon ve halojenli alifatik hidrokarbonlardır. FKY tüm termoplastik ve termoset polimer köpük malzemelerin üretiminde kullanılırlar. FKY kullanılarak çok geniş yoğunluk değerleri aralığında polimer köpük elde etmek mümkündür. Özellikle yoğunluğu 50 kg/m³ değerinden düşük olan köpük malzemelerin üretiminde mutlaka FKY kullanılmalıdır. FKY maliyeti düşük sarf malzemeleridir ancak FKY’ın bazı üretim proseslerinde kullanılabilmesi için özel teçhizatlara ihtiyaç duyulmaktadır (Eaves, 2004).

Kloroflorokarbonlar (KFK) ve hidrokloroflorokarbonlar (HKFK) en çok bilinen FKY’ dandır. KFK ve HKFK çözünürlükleri yüksek viskoziteleri yüksek olduğu için

polimer köpük üretimi için ideal sarf malzemeleridir. Ancak KFK ve HKFK atmosferdeki ozonu tutarak ozon tabakasına zarar verdikleri ve küresel ısınmaya neden oldukları için kullanımları kısıtlanmıştır. Bu nedenle polimer köpük yapımında son 20 yılda propan, bütan, pentan gibi, hidrokarbon gazlar (C_nH_m) ve asal gazlar (CO_2 , N_2 ve Ar) kullanılmaktadır. Özellikle CO_2 gazı ucuz, zehirsiz, yanmaz, kolay elde edilir ve çevreci olması nedeniyle polimer köpük üretiminde çok tercih edilir. Fiziksel Köpük Yapıcılar köpük üretim sürecinde daha kolay kontrol edilebildikleri, daha az atık bıraktıkları, daha düzgün hücre dağılımı ve düzgün hücre yapısı oluşturdukları için Kimyasal Köpük Yapıcılara göre daha çok tercih edilirler.

Çizelge 3.2 Yaygın kullanılan fiziksel köpük yapıcılar

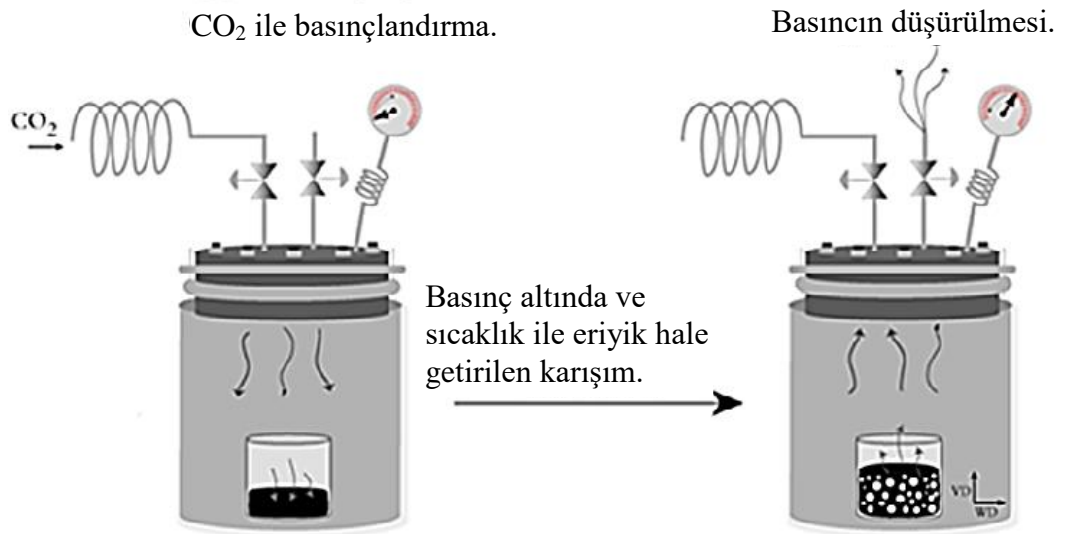
	KFK-11	KFK-12	KFK-114	Metil Klorür	Metilen Klorür
Kimyasal Bileşim	CCl_3F	CCl_2F_2	$CClF_2CClF_2$	CH_3Cl	CH_2Cl_2
CAS Numarası	75-69-4	75-71-8	76-14-2	74-87-3	75-09-2
Molekül Ağırlık	137,4	120,9	170,9	50,5	85
Kaynama Noktası ($^{\circ}C$)	23,8	-29,8	3,8	-24,2	40
Kritik Sıcaklık	198	112	145,7	143	235
Kritik Basınç (MPa)	4,41	4,11	3,39	6,71	6,35
25 $^{\circ}C$ 'deki Sıvı Özgül Ağırlık	1,477	1,31	1,456	1,1	1,33
Kaynama Noktasında Buharlaşma Isısı, kJ/mol	24,8	20	23,2	21,5	28
Gaz İletkenliği mW/m $^{\circ}K$ 10 $^{\circ}C$ 'de 25 $^{\circ}C$ 'de	7,4 7,9	9,2 9,9	- 10,4	- 10,6	N/A 8,4
Buhar Basıncı, kPa 10 $^{\circ}C$ 'de 25 $^{\circ}C$ 'de	60 106	418 644	213	567	31 57
Havada Yanıcı Sınırı (%)	-	-	-	8,1-17,2	12-19
TLV (AGGIH) veya OEL, ppm	1000	1000	1000	50	35-100
ODP (CFC-11=1)	1	1	1	0,02	0,007
GWP (100 y, $CO_2=1$)	4600	10600	9800	16	10
Atmosferik Ömrü, yıl	45	100	300	1,3	0,5
TLV: Eşik Sınır Değeri (Threshold Limit Value)					
OEL: Görev Sırasında Maruz Kalma Limiti (Occupational Exposure Limit)					

3.2. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri

3.2.1. Kesikli Süreci ile Köpük Üretimi

Kesikli sürecinde yüksek basınç veya sıcaklık altında eriyik halde bulunan polimer ana yapı gaz fazındaki köpük yapıcı ile doymuş hale getirilir ve sonrasında sıcaklığın artırılması veya basıncın azaltılması ile çekirdeklenme oluşur. Böylece eriyik polimerin köpürmesi sağlanır (Şekil 3.2). Köpüren polimer ana yapı sıcaklığı camısı geçiş sıcaklığının altına düşürülerek çekirdeklerin büyümesi sağlanır. Bu yöntemde polimer ana yapı sıcaklık değişimi, basıncın değişimi ve hazne içerisine verilen gazın basıncı kontrol edilerek istenen hücre büyüklüğü ve sıklığı elde edilebilir. Kesikli süreci ile bir ayrıtı 10µm mertebesinde olan hücelere sahip polimer köpük üretilebilir (Yetgin, 2012).

Kesikli sürecinde çekirdeklenme doyma basıncının değişim hızından, çekirdek büyümesi ise proses süresinden ve proses sıcaklığının değişiminden etkilenmektedir. Kesikli süreci basit olması nedeniyle ve süreci etkileyen değişkenlerin tanımlanmış olması nedeniyle avantajlı bir yöntemdir. Ancak süreçte kullanılan köpük yapıcı gazların polimer ana yapı doymuş hale getirmesi için gerekli sürenin fazla olması Kesikli Sürecinin olumsuz yanıdır.



Şekil 3.2 Kesikli süreci ile köpük üretimi (Gedler, vd., 2012).

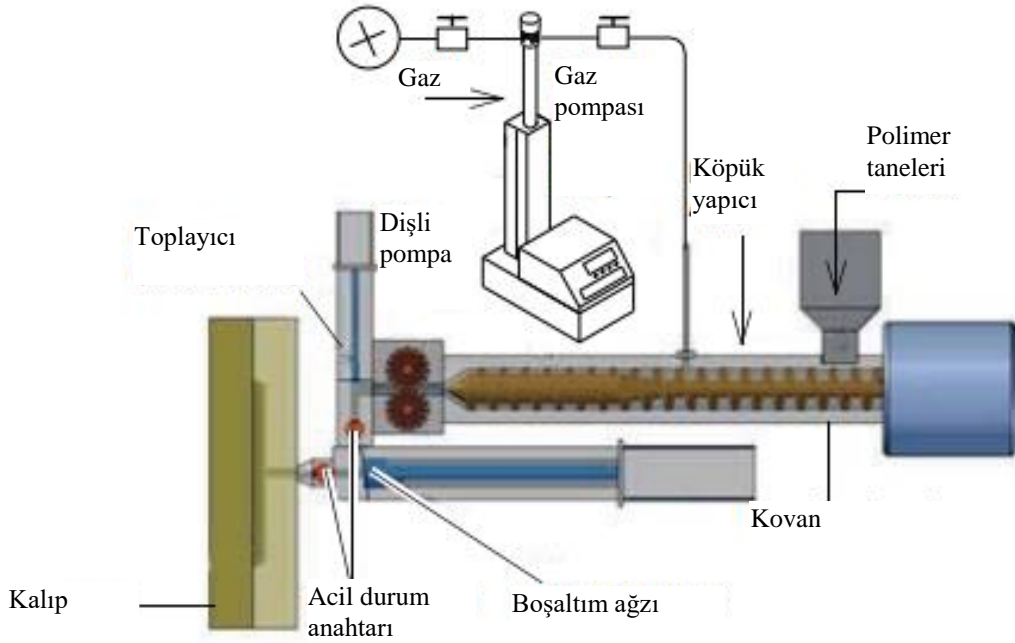
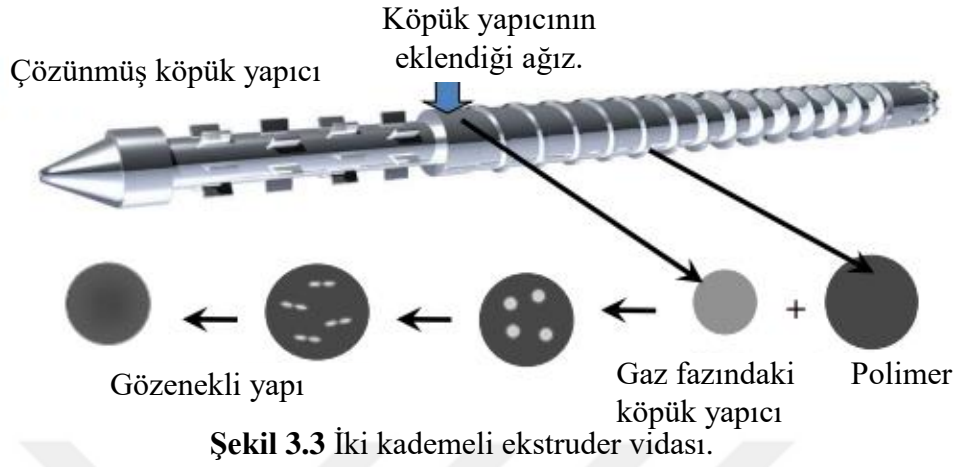
3.2.2. Enjeksiyon Kalıplama ile Köpük Üretimi

Karmaşık şekilli polimer köpüklerin üretimi enjeksiyon kalıplama tekniği ile gerçekleştirilir. Enjeksiyon kalıplama tekniği ile üretilen polimer köpük malzemeler daha düşük hacimli parçalardır. Bu teknik ile düşük maliyetli, kalıp izi taşımayan, boyutsal hassasiyeti yüksek ürünleri firesiz bir şekilde seri halde üretmek mümkündür. Köpük enjeksiyon makineleri silo, kovan, kademeli ekstrüzyon vidası (sonsuz vida), köpük yapıcı dozaj ünitesi, köpük yapıcı giriş ağzı ve kalıp kısımlarından oluşur (Şekil 3.3). Silodan kovana beslenen polimer malzeme sonsuz vidanın ilk kademesinde ısı ile eritir ve sıkıştırılır (Şekil 3.4). Eriyik polimere gaz fazındaki köpük yapıcının enjekte edildiği kısımdan sonra sonsuz vidanın dış profilinin değiştiği ikinci kademe başlar. İkinci kademe kovan içerisine enjekte edilen köpük yapıcı gaz ile polimer düzgün bir karışım oluşturur. Bu teknikte köpük yapıcı gaz olarak daha çok karbon dioksit (CO₂) ve azot (N) kullanılır. Eriyik polimer ile gaz karışımının hacimsel miktarı kalıbın iç hacminden küçük olmalıdır. Bu karışım kalıbın içerisine enjekte edildiğinde köpük yapıcı gaz genişerek polimer içerisinde gözenekler oluşturur.

Eriyik haldeki karışım kalıp içerisinde genişerek soğuk kalıbın iç cidarına temas ettiğinde rijit kabuk tabakası oluşur. Birçok köpük enjeksiyon makinesinde eriyik polimerin hızlı soğumasından kaynaklanan artık gerilmeleri engellemek için enjeksiyon kalıbının sıcaklığı 200°C civarında sabit tutulur ve kalıbın her tarafında eşit sıcaklık dağılımı elde etmek için kalıp yalıtılır. Enjeksiyon kalıplama tekniği ile daha çok 100 – 120 °C sıcaklıktaki eriyik akışkanlığı yüksek olan polimerler köpük haline getirilir. Bu teknik için kullanılan köpük enjeksiyon makinelerinde, sonsuz vidanın uzunluk/çap oranının (L/D) yüksek olması (15 - 30:1) istenir. Ayrıca köpük kalıbının, son üründe iç gerilmeleri önleyecek şekilde tasarlanması gerekir.

Enjeksiyon kalıplama tekniği ile köpük üretiminde kalıp içerisine beslenen karışımın miktarı hücre boyutunu, hücre yoğunluğunu ve köpüğün çekme dayanımını belirleyen en önemli değişkendir. Köpük malzemenin hücre boyutunun küçük olması isteniyorsa kalıba beslenen eriyik polimer-köpük yapıcı gaz karışımının fazla olması ve soğuma süresinin uzun tutulması istenir. Diğer yandan kalıba beslenen karışımın

miktarı çok düşürülür ise hücre büyümesi için çok geniş hacim bırakılmış olur ve bu nedenle büyük hücreli köpük malzeme elde edilir (Deu, 2016).

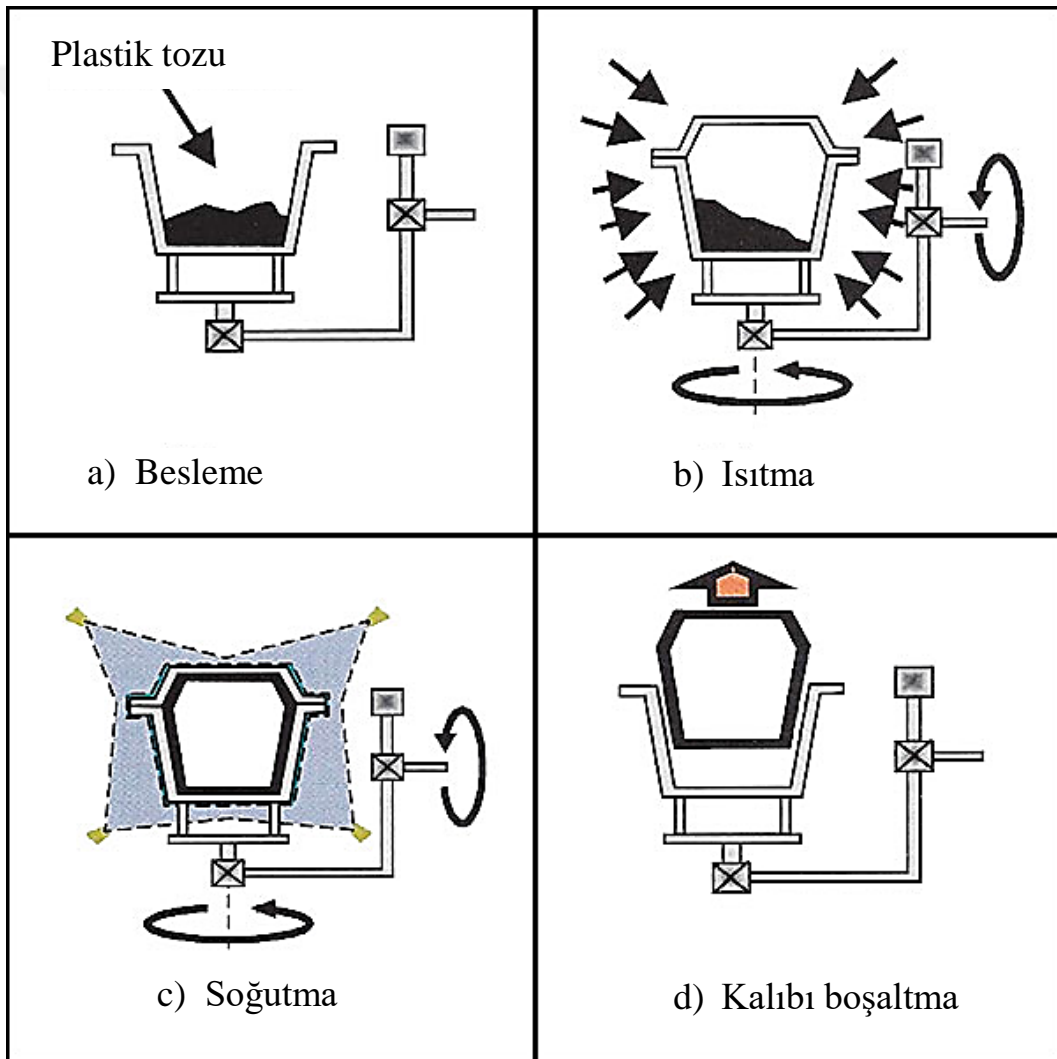


Şekil 3.4 Enjeksiyon kalıplama ile köpük üretimi (Foam Injection Molding, 2016).

3.2.3. Döner Kalıplama Yöntemi ile Köpük Üretimi

Döner kalıplama yöntemi içi polimer köpükten içi boş ürünler elde etmek için uygun bir yöntemdir. 1940'lı yıllarda ortaya çıkan bu yöntem ile 100.000 litre hacme sahip tanklar gibi çok büyük parçalar bile üretilebilir. Karmaşık şekilli parçaların üretimi

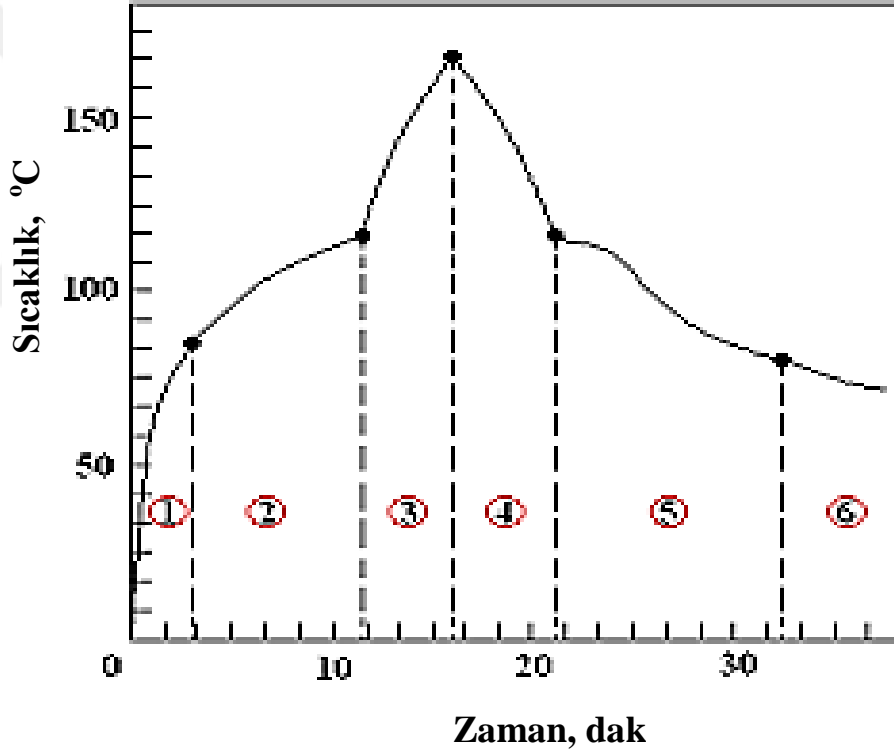
de yine bu yöntem ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde parçalar ortam basıncı altında üretilir. Bu nedenle özel tasarlanmış pahalı kalıplara ihtiyaç duyulmadan birleştirilmesi kolay, basit kalıplar ile üretim yapmak kolaydır. Ayrıca döner kalıplama yöntemi ile et kalınlığı daha düzgün dağılmış, artık gerilme içermeyen ürünler elde etmek mümkündür. Ancak bu yöntem ile parça üretiminin yavaş olması, yöntemin yüksek ısıya ihtiyaç duyması ve yöntemin tam otomasyona uygun olmaması nedeniyle döner kalıplama yöntemi kısıtlı alanlarda tercih edilmektedir (Christian, 2009). Döner kalıplama basit makine ve cihazlar ile gerçekleştirilebilen kolay bir üretim yöntemidir.



Şekil 3.5 Döner kalıplama yöntemi ile köpük üretimi (Rotoworldmag, 2016).

Yöntemi uygulamak için gerekli sistem teçhizatları kalıp, iki eksenli döner kalıp tutucu ve fırından oluşmaktadır (Şekil 3.5). Kalıp içerisine yerleştirilen polimer ve

kimyasal köpük yapıcı karışımı fırın içerisinde iki eksenle dönmeyen sağladığı merkezkaç kuvveti ile kalıp duvarlarına fırlattırılır. Fırının sağladığı ısı ile karışım içerisindeki polimer malzeme erir ve kalıp iç cidarına yapışır. Bu yöntemde toz veya tane biçimindeki polimerler kullanılabilir. Eriyik polimer içerisinde bulunan köpük yapıcı da ısının etkisi ile bozunmaya başlar ve polimer içerisinde hücre çekirdeklenmesi meydana gelir. Kalıp iç cidarında oluşan köpük malzeme soğuyana kadar kalıbın dönme hareketi devam ettirilir. Son ürün kalıp ve içerisindeki polimer köpük tamamen soğuduğunda çıkartılır. Döner kalıplama ile köpük üretim süresi altı aşamada gerçekleşir: 1. Sıcaklığın yükseltilmesi, 2. Polimerin ve köpük yapıcının erimesi, 3. Kabarcıkların eriyikten uzaklaşması ve yoğunlaşma, 4. Ön soğutma, 5. Çekirdeklenme, 6. Son soğutma (Şekil 3.6) (Christian, 2009).

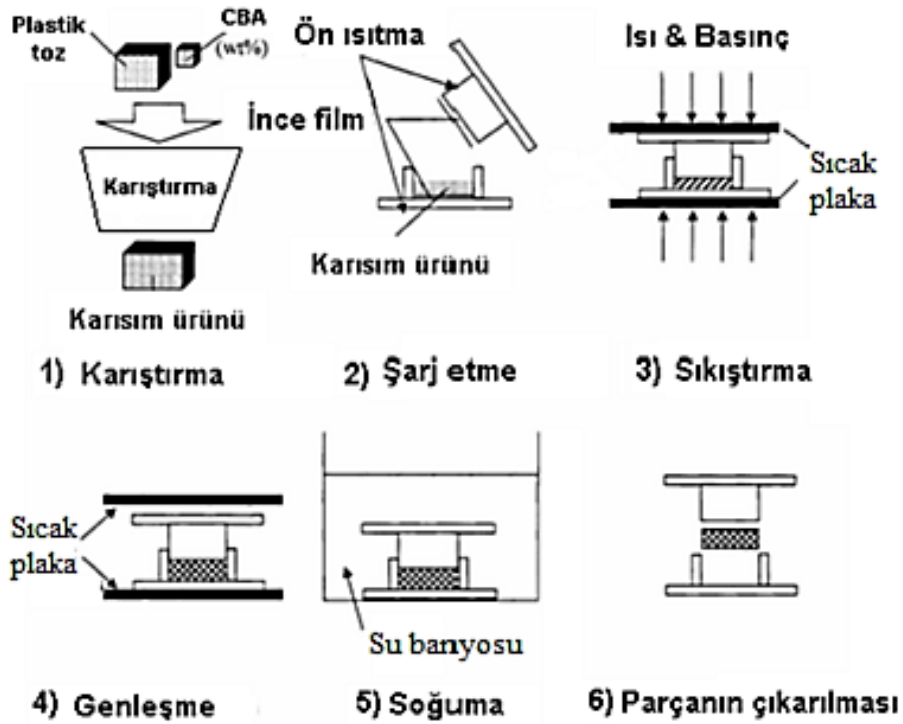


Şekil 3.6 Köpük üretim aşamaları ve işlem sıcaklıkları (Christian, 2009).

3.2.4. Basıncılı Kalıplama ile Köpük Üretimi

Basıncılı kalıplama yönteminde hammadde içeren kalıba ısı ve basınç uygulanarak polimer köpük üretilir. Bu yöntem daha çok kalınlığı kademeli olarak değişen köpük malzemelerin üretilmesinde kullanılır. Bu yöntemde tane veya toz halindeki polimer

ve köpük yapıcının harmanlanması ile elde edilen karışım kalıp ayırıcı ile yağlanmış kalıp boşluğuna beslenir. Isıtılan kalıp içerisinde genellikle hidrolik pres kullanılarak basınçlandırılan hammadde ergimeye başlar ve köpük yapıcıların çözünmesiyle eriyik polimer içerisinde hücre çekirdeklenmesi başlar. Bu safhada kalıp üzerindeki basınç azaltılarak genişleyen köpük hacmi kontrol edilir. Bu yöntemde kalıp basıncı üretilen köpüğün yoğunluğunu, kalıp sıcaklığı ise üretim hızını ve hücre büyüklüğünü doğrudan belirleyen değişkenlerdir. Basıncı kalıplama yöntemi kademeli kesite sahip köpüklerin ve alt-üst yüzeyinde kaplama bulunan kompozit köpüklerin üretilmesinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile hemen hemen tüm polimerler köpük formuna dönüştürülebilir.

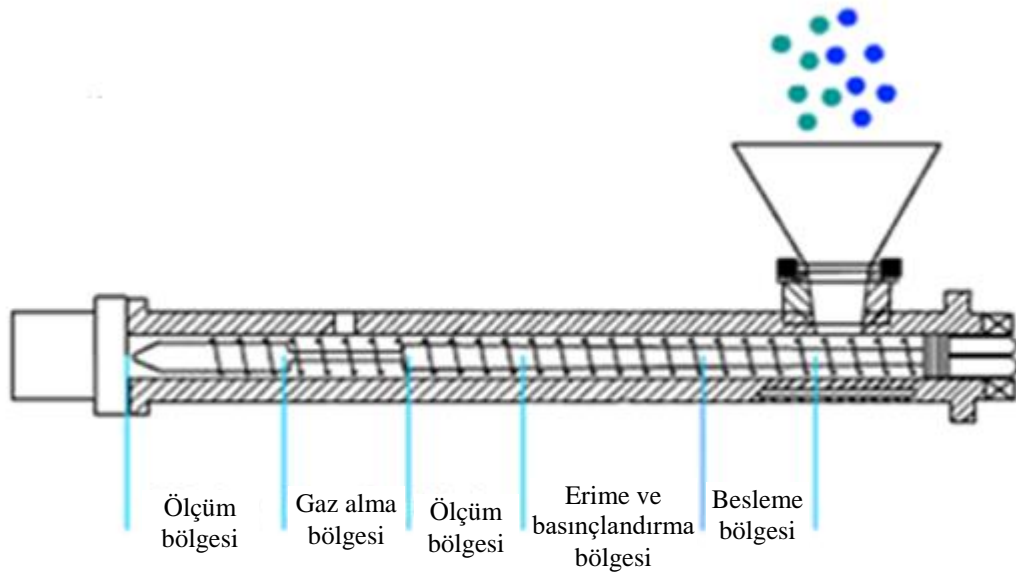


Şekil 3.7 Sıkıştırma köpük kalıplama yönteminin şematik gösterimi (Pop-Iliev, vd., 2007, Yetgin, 2012).

3.2.5. Ekstrüzyon ile Köpük Üretimi

Polimer köpük üretimi için kullanılan ekstrüderler başlıca silo, kovan, sonsuz vida ve kalıp parçalarından oluşmaktadır. Köpük yapıcı türüne bakılmaksızın polimer tanelerini ergetmek için gerekli ısı kovani saran kelepçe dirençler vasıtasıyla elde edilir. Ekstrüzyon yönteminde KKY kullanılacak ise polimer ile KKY karışımı

ekstrüder dışında mekanik karıştırıcılar ile yapılır. Ancak ekstrüzyon yöntemi ile köpük yapımında FKY kullanılacak ise FKY kovan içerisinde eriyik halde bulunan polimere enjekte edilir. Sıcak kovanın içerisinde hareket halinde bulunan sonsuz vida hem polimer ve köpük yapıcı karışımı silodan (kovan başından) kalıba doğru ilerletir hem de karışımı sıkıştırarak ergimeyi kolaylaştırır. Yeni nesil birçok ekstrüderde kovan içerisindeki istenmeyen gazları ekstrüzyon sürecinden önce boşaltmak için gaz alma bölümü ve ventili bulunur. Ayrıca yüksek polimer sıkıştırma oranı sağlayan çift vidalı ekstrüderler ve kovan boyunca belirli bölümlerde vida adımının değiştiği tandem vidalı ekstrüderler polimer köpük üretiminde yaygın kullanıma sahiptir. Ekstrüder kovanının sonunda eriyik haldeki karışım istenilen profile sahip kalıptan geçirilir. Kalıptan çıkan eriyik polimer içerisindeki gazın çözünürlüğü azalır ve polimer içerisinde çekirdeklenme oluşur. Polimer köpük içerisinde istenilen hücre büyüklüğü elde edilene (köpük yapıcıların sağladığı gaz tükenene) kadar çekirdekler büyür (Yetgin, vd., 2008). Kovan sıcaklığı, kovan iç basıncı, sonsuz vida devir sayısı, kalıp sonrası ortam basıncı ve ortam sıcaklığı ekstrüzyon yöntemi ile köpük üretiminde hücre yapısını, hücre yoğunluğunu ve polimer köpük yoğunluğunu etkileyen değişkenlerdir. Ekstrüzyon yöntemi polimer köpüklerin seri üretimi için oldukça uygundur ve işletme maliyeti düşüktür. Ekstrüzyon yönteminde proses kontrolü kolay, verim yüksek ve son ürün kalitesi yüksektir. Boru yalıtım malzemeleri, infiltrasyon malzemeleri, yalıtım levhaları gibi polimer köpük ürünler genellikle ekstrüzyon yöntemi ile elde edilir.



Şekil 3.8 Ekstrüzyon ile köpük üretimi.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Köpük malzemeler için literatürde birçok farklı test mevcuttur. Köpük malzemelerin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için mekanik davranışlarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılması gereklidir. Köpük malzemelerin mekanik özellikleri karmaşık iç yapılarına ve hücre duvarlarını oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde test düzenekleri, test yöntemleri ve köpük malzemelere ait bilgiler verilecektir.

4.1. DYPE Köpük Numunelerin Hazırlanması

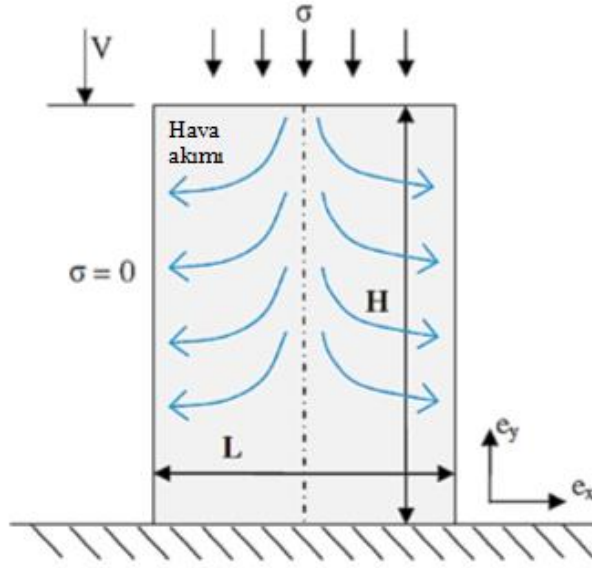
Deneysel çalışmalar için öncelikle İngiliz ZOTE Foams firmasının üretimi olan LD29 kodlu DYPE köpük malzemeler ve yerli DURFOAM firmasının üretimi olan XLPE30 kodlu DYPE katmanlı köpük malzemeler temin edilmiştir. Her iki polietilen köpük malzeme, içerisine ilave edilen kimyasal köpük yapıcılar ve çapraz bağlayıcılar sayesinde ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Köpük malzemelerin sıcaklıktan etkilenmemesi için statik yük altında basma testleri ve ağırlık düşürmeli darbe yükü altında yapılan testler oda sıcaklığı olan yaklaşık 21°C'de gerçekleştirilmiştir. Kullanılan köpük malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 DYPE köpük malzemelerin mekanik özellikleri (Durfoam, 2016; Zotefoams, 2016)

Özellik	Birim	LD29	XLPE30
Ortalama Yoğunluk	kg/m ³	29	30
Çekme Dayanımı	kPa	375	>200
Uzama	%	140	>120
25% Basma Şekil Değişirmesindeki Dayanımı	kPa	64	>30
50% Basma Şekil Değişirmesindeki Dayanımı	kPa	131	>70

Seçilen her iki malzemede kapalı hücre yapısına sahiptir. Bu sayede köpük yapı içerisindeki hava akımının etkisi ihmal edilmiştir (Şekil 4.1). Kapalı hücre yapısına sahip köpüklerin aksine açık hücre yapısına sahip köpük yapılarda, yapı içerisinde

hava akışından dolayı oluşan direnç önemlidir. Bu direnç köpük malzemenin hücre boyutlarını doğrudan etkileyebilmektedir.

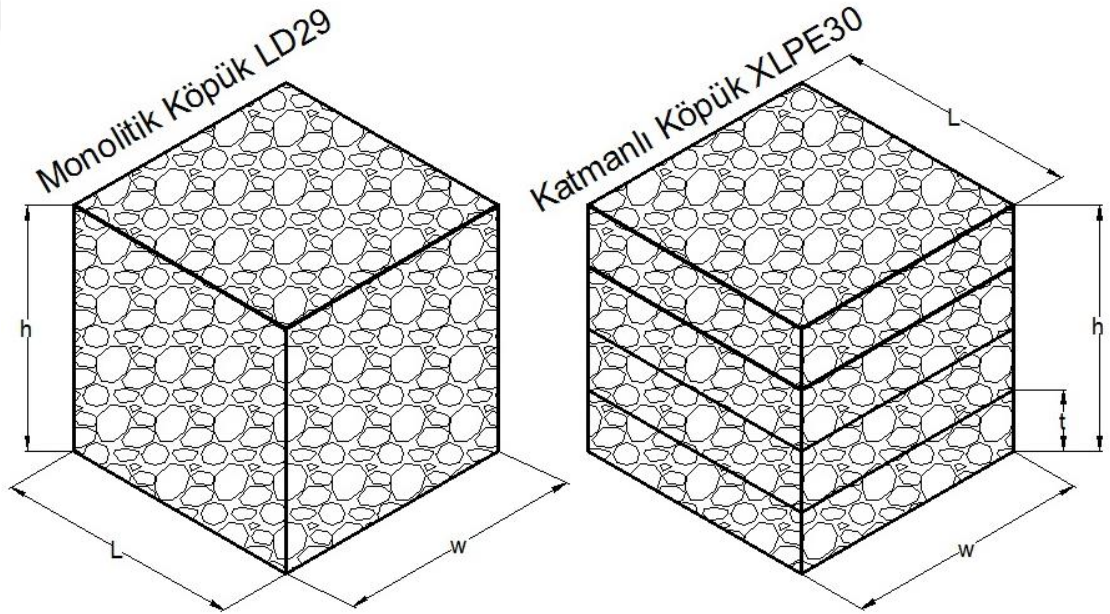


Şekil 4.1 Tek eksenli basmaya maruz köpük malzeme kesiti (de Vries, 2009).

Deneysel çalışmalar için yerli ve yabancı üreticilerin ürünleri özellikle tercih edilerek yerli ürünlerin eşdeğerliliği de kıyaslanmıştır. Ülkemizde DYPE köpük üretimi yapan firmalar seri üretimleri içerisinde ürün kalınlığını en fazla 20 mm olarak belirlemişlerdir. Tasarımcılar ise kalınlığı 20 mm'den daha fazla olan DYPE köpük malzemeye ihtiyaç duyduklarında ya ithal tek katmanlı ürünlere yönelmekte ya üreticilerden özel üretim istemekte ya da sıcak yapıştırma ile elde edilmiş katmanlı köpükleri kullanmaktadır. İthal ve özel üretim DYPE köpük malzemeler ise sıcak yapıştırma ile istenilen kalınlığa ulaşmış köpüklere göre oldukça maliyetlidir.



Şekil 4.2 Sıcak yapıştırma ile katmanlı köpük hazırlanması.

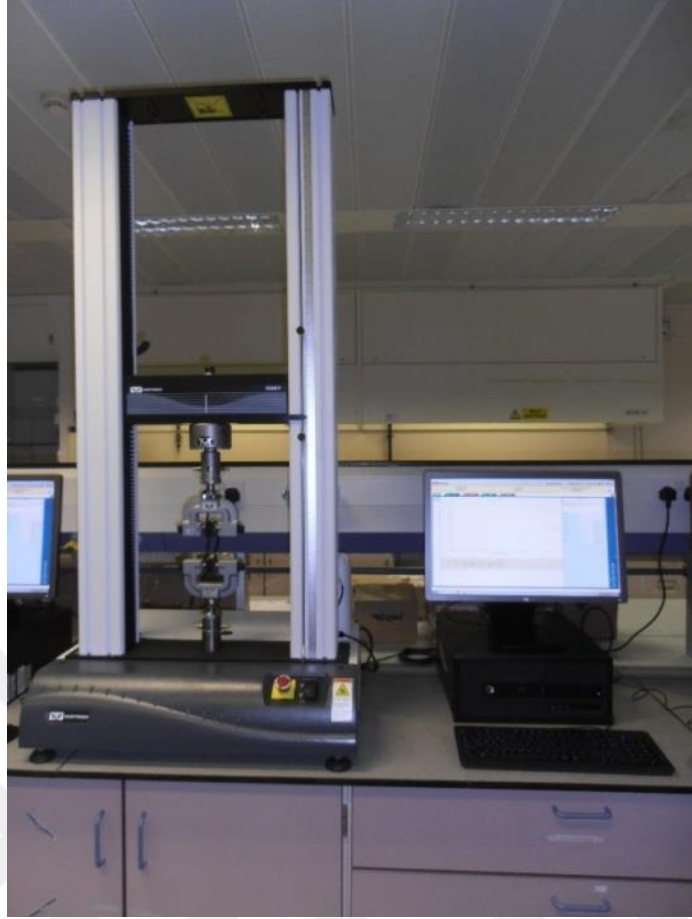


Şekil 4.3 Tek katmanlı ve katmanlı köpük.

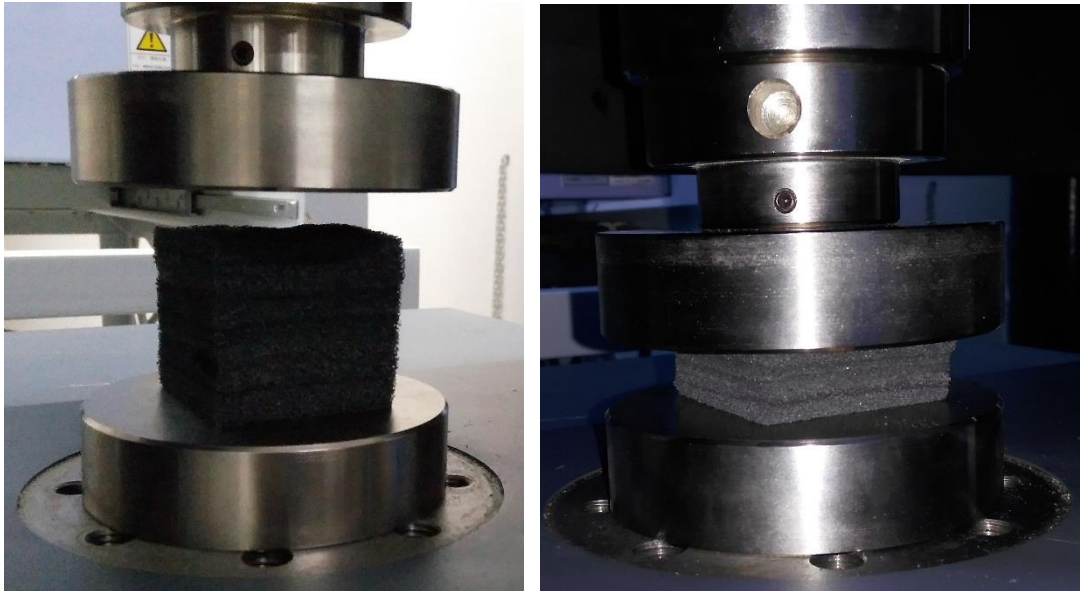
Bu tez çalışmasında kullanılan katmanlı köpük malzemeler sıcak yapıştırma ile elde edilmiştir. Öncelikle tabaka halindeki LD29 ve XLPE30 köpüklerden sıcak tel ile parçalar kesilmiştir. Kesilen köpük parçalardan LD29 DYPE'nin kalınlığı 50 mm, XLPE30'nin kalınlığı ise 13 mm'dir. Daha sonra XLPE30 köpük parçalarının yüzeyleri 350°C sıcaklığa ayarlanmış sıcak hava tabancası ile ısıtılarak yapıştırılmış (Şekil 4.2) ve kalınlığı 50 mm 4 katmanlı DYPE köpük malzeme elde edilmiştir. Statik basma yükü ve dinamik basma yükü altında test edilen numunelerinin şematik görünümü Şekil 4.3'de verilmiştir.

4.2. Statik Yükleme Altında Yapılan Testler

Statik basma testleri Instron 3367 evrensel test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.4). Cihazın yük hücresinin kapasitesi 1 kN'dur. DYPE köpük malzemelerin statik yükleme altında göstermiş olduğu gerilme – şekil değiştirme davranışları “TS 4594 EN ISO 3386-1 Gözenekli, Esnek Polimer Maddeler - Basınç Altında Gerilme/Şekil Değiştirme Özelliklerinin Tayini - Bölüm 1: Düşük Yoğunluklu Maddeler” test yöntemine göre belirlenmiştir (TS 4594 EN ISO 3386-1, 2000). TS 4594 EN ISO 3386-1 yöntemi test edilecek numunelerin kalınlığının 50 ± 1 mm olmasını ve numunenin dik açılı dörtgen prizma olmasını tavsiye etmektedir (TS 4594 EN ISO 3386-1, 2000). Test edilen numunelerin ölçüleri ($L \times w \times h$) $50 \times 50 \times 50$ mm'dir. Test numuneleri test cihazında basma plakaları arasına uygulanacak yük, numunenin tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.5 a). Test numunesine, evrensel test cihazının çapraz kafasına bağlı, basma plakasıyla yük uygulanarak DYPE köpük numunenin orijinal kalınlığının %70'i kadar şekil değiştirmesi sağlanmıştır (Şekil 4.5 b). Devamında test numunesi üzerindeki yük kaldırılarak numunenin ilk boyuna dönmesi beklenmiştir. Yük uygulama ve boşaltma hızı 100 mm/dk'dır. Bu işlem en az 1'er dakika ara ile art arda 3 defa tekrar edilmiştir ve her yüklemede numunenin kuvvet – yer değiştirme verileri kaydedilmiştir. Son olarak test numunesi ilk boyunun %40'ı kadar şekil değişimine uğrayana kadar tekrar basma yükü uygulanmıştır. Test numunesinin %40 şekil değişimine göstermiş olduğu tepki kuvveti kaydedilmiş ve Denklem 4.1 ile numuneye ait basma dayanımı hesaplamasında kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Instron 3367 evrensel test cihazı.



Şekil 4.5 DYPE köpük malzemelerin statik yük altındaki test cihazı görüntüleri;
a) DYPE köpük malzemenin statik yük uygulama öncesi görüntüsü, b)
DYPE köpük malzemenin statik yük uygulama sırasındaki görüntüsü.

$$CC_{40} = 1000 \frac{F_{40}}{A} \quad (4.1)$$

CC_{40} : %40'lik bir sıkıştırma için basınç altında gerilme/şekil değiştirme özelliği, kPa

F_{40} : %40'lik bir sıkıştırmada dördüncü yüklemde ölçülen kuvvet, N

A : Deneysel parçasının yüzey alanı, mm²

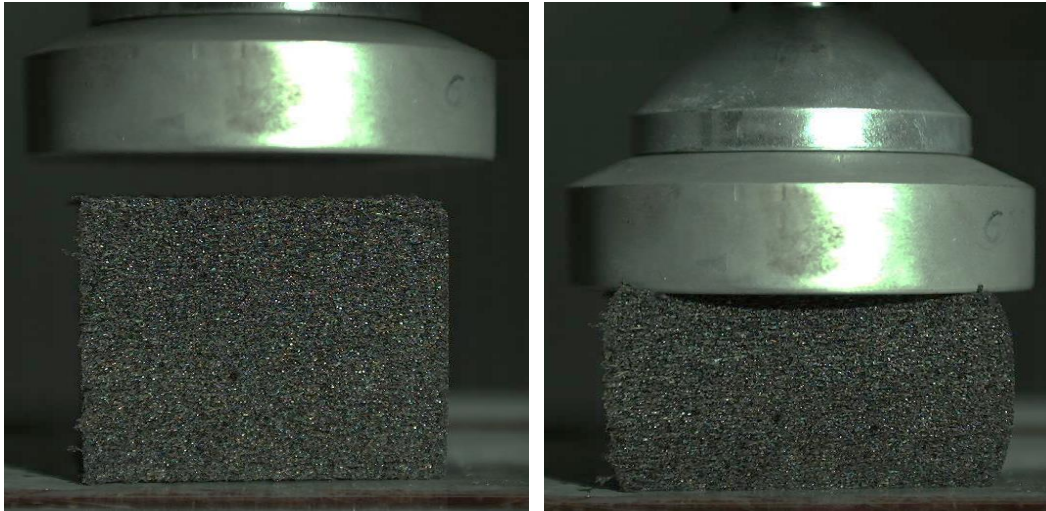
4.3. Ağırlık Düşürmeli Darbe Yüğü Altında Yapılan Testler

Ağırlık düşürmeli darbe yüğü altındaki basma testleri Instron Dynatup dikey ağırlık düşürmeli darbe test cihazı ile “ASTM D 1596 – 14 Method for Dynamic Shock Cushioning Characteristics of Packaging Material” test yöntemine göre yapılmıştır (Şekil 4.5). Darbe yüklemeleri tek katmanlı köpük bloğa (LD29), katmanlı köpük bloğa (XLPE30) katman düzlemine dik olacak şekilde ve katman düzlemine paralel (bloğun yanal yüzeyine dik) olacak şekilde uygulanmıştır. Test cihazına yerleştirilen 50x50x50 mm ebatlarındaki (Lxwxh) numunelere 460 mm yükseklikten serbest bırakılan dairesel darbe bloğu ile yük uygulanmıştır (Şekil 4.6). Dairesel darbe bloğunun ağırlığı 10,927 kg'dır ve bloğun 460 mm'den serbest bırakılması ile 3 m/s darbe hızı elde edilmiştir. Dairesel darbe bloğunun serbest bırakıldığı yükseklik Denklem 4.2 ile hesaplanmıştır (ASTM D 1596, 2003). Her bir numune için en az 1'er dakika ara verilerek 3 test tekrarı yapılmıştır. Her bir test esnasında piezoelektrik algılayıcılar yardımıyla test numunesinin şekil değiştirmesi ve gösterdiği tepki kuvveti okunmuş ve 0,01 sn veri edinme hızı ile kaydedilmiştir.

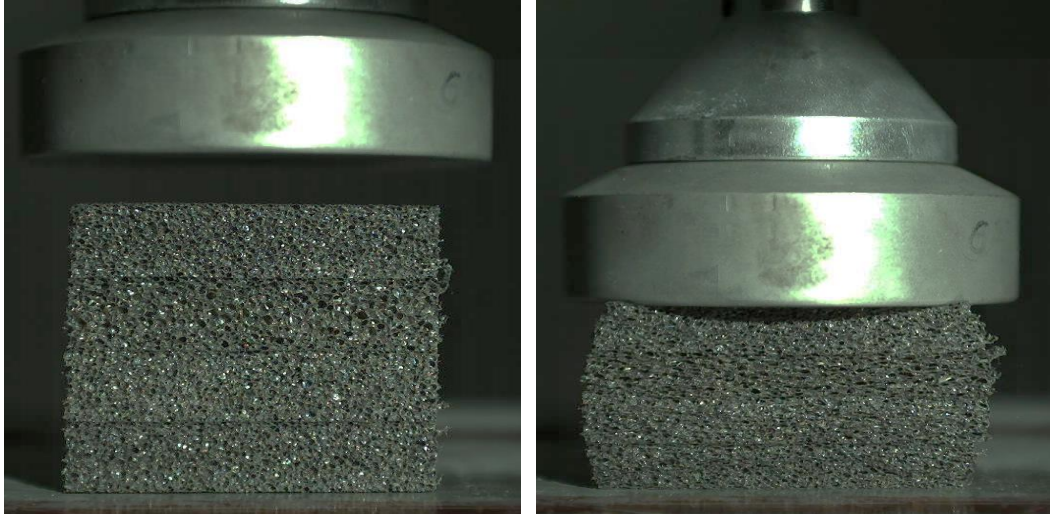
$$X_s = V^2 / 2g \quad (4.2)$$



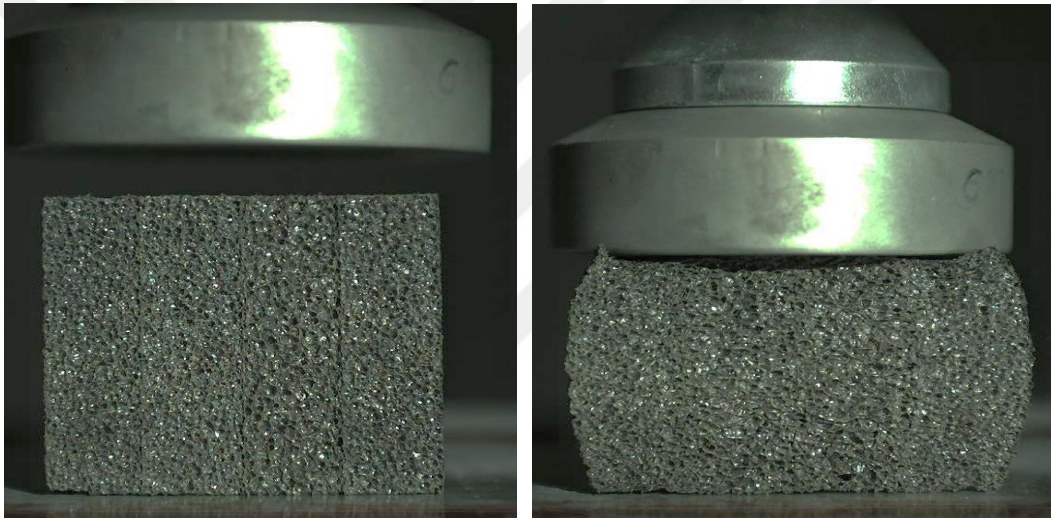
Şekil 4.6 Instron Dynatup dikey ağırlık düşürmeli darbe test cihazı.



a)



b)



c)

Şekil 4.7 DYPE köpük malzemelerin ağırlık düşürmeli darbe test cihazı görüntüleri; a) Tek katmanlı DYPE köpük malzeme, b) Katmanlı DYPE köpük malzeme (katman düzleminde yükleme), c) Katmanlı DYPE köpük malzeme (katmana dik yükleme).

5. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Köpük malzemelerin dinamik özelliklerini incelemek için ANSYS/LS-DYNA yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Yapılan deneyler ANSYS/LS-DYNA sonlu elemanlar programı kullanılarak simüle edilmiştir. Öncelikli olarak kullanılacak malzeme modeli seçilmiştir. Köpük malzeme modelleri için LS-DYNA yazılımı içerisinde çok sayıda malzeme modeli kullanılmaktadır. Bunlar MAT 57, MAT 63, MAT 83, MAT 163, MAT 179 şeklinde sıralanabilir. En genel ve yaygın kullanıma sahip olanlar MAT 57 ve MAT 83 modelleridir.

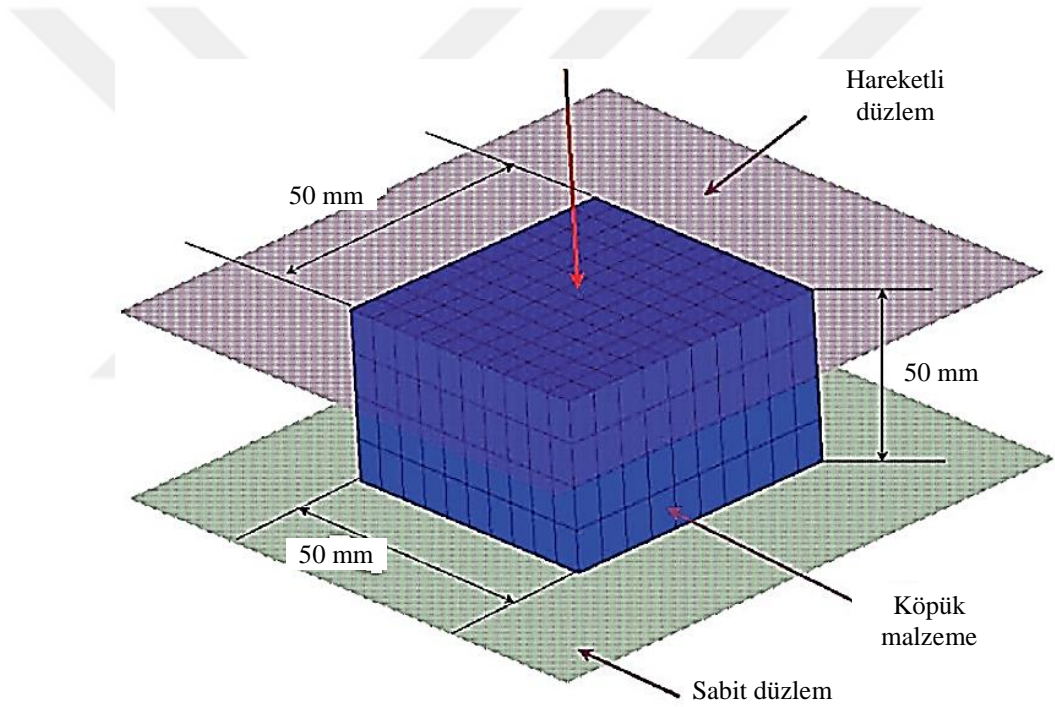
MAT 57, sönümleyici ve yay dizilerinden oluşan Maxwell akışkan tabanlı bir malzeme modeli yaklaşımını içerir. Yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip düşük yoğunluklu köpük malzemeler için kullanılabilir. Daha çok düşük ve orta şekil değiştirebilme hızları için tercih edilmekte ve diğer köpük modellerine kıyaslandığında çok daha kolay ve hızlı bir çözüm alınmasını mümkün kılmaktadır. MAT 57 aynı zamanda içerdiği SHAPE ve HU değişkenleri ile yük boşalması hallerinin (Hysteresis) de kolayca en iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle karmaşık bir yapı içeren ve doğrusal olmayan dinamik karakteristiğe sahip endüstriyel yapısal analiz uygulamalarında hem temas ilişkilerinin kolay çözülmesi hem de hızlı şekilde sonuca ulaşılması konusunda sağladığı avantajlar nedeniyle yoğunlukla tercih edilmektedir.

MAT 83 modeli birleşik bünye denklemi tabanlı bir yaklaşımdır. Düşük ve orta yoğunluklu köpük malzemeler için kullanılmaktadır ancak köpüklerin şekilsel geri kazanımlarını modellemede yetersiz kalmaktadır MAT 83 modeli ayrıca Çözüm süresi MAT 57 ile karşılaştırıldığında daha uzun ve temas ilişkilerinin çözümleri daha zordur.

Yapılan çalışmada daha düşük ve orta seviye şekil değiştirebilme hız mertebeleri ele alınmıştır. Düşük yoğunluklu, kapalı hücre yapısına sahip DYPE köpükler için sağladığı kullanışlı sonuçlar nedeniyle MAT 57 seçiminin kabul edilebilir bir yaklaşım sergilediği görülmüştür. Çözümlemede SHAPE değişkeni 6, HU değişkeni ise 0.01 olarak seçilmiştir (Croop ve Lobo, 2009). Köpük malzemenin sonlu

elemanlar yöntemi ile analizinde SPH yöntemi kullanılmıştır. SPH elemanları arasındaki uzaklık 2 mm olarak alınmıştır.

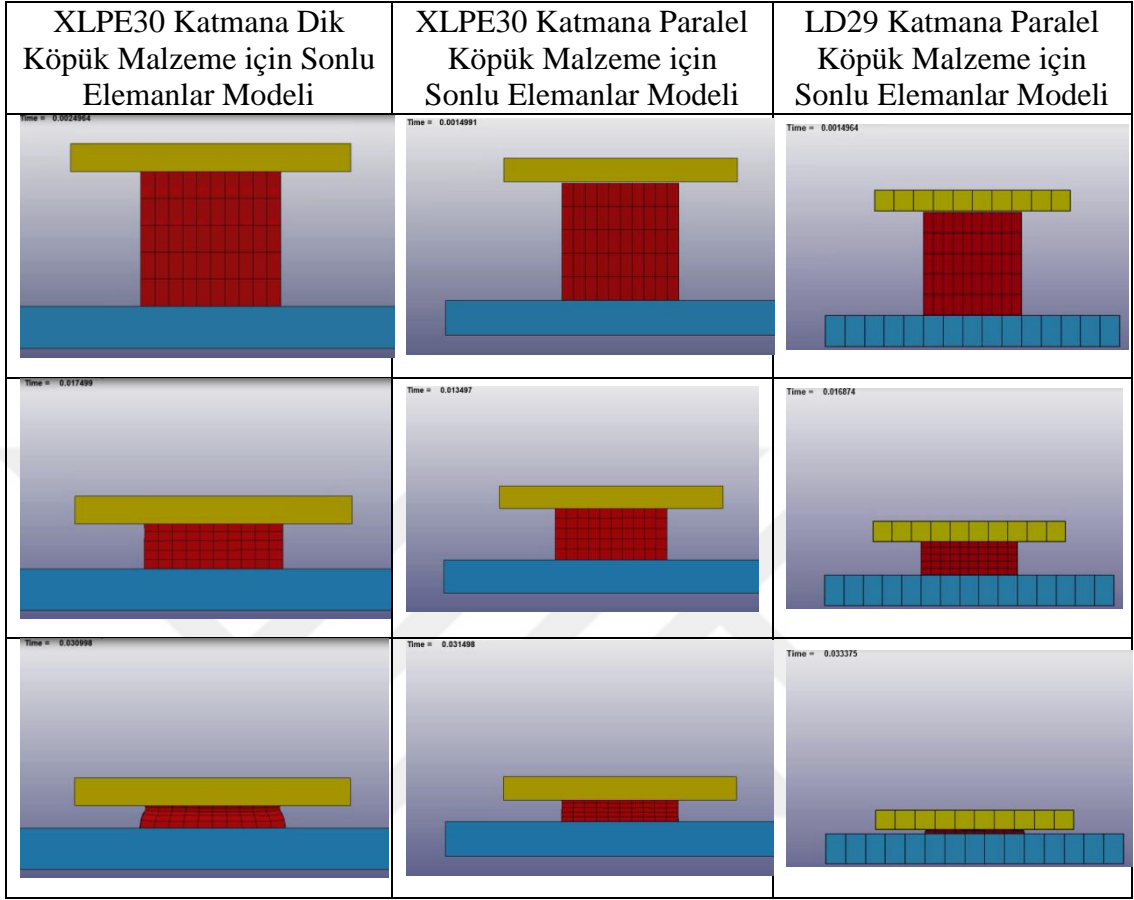
Şekil 5.1 ağırlık düşürmeli darbe testi için sonlu elemanlar modelini göstermektedir. Sonlu eleman çözümü 50 mm kalınlığındaki numuneler için yapılmıştır. Çözümlemede köpük yapının alt tarafı sabit rijit bir plaka üzerine yerleştirilirken üst kısmına ise sabit bir hıza sahip hareketli rijit bir plaka tesir etmektedir. Rijit plakalar için MAT 20 malzeme modeli kullanılmıştır. Sınır koşulları olarak köpük malzemeler alt düğüm noktalarından tüm eksenler için ötelenmeye ve dönmeye karşı sabitlenmiştir. Hareketli rijit plaka ise referans noktalarından dönmeye karşı sabitlenmiştir.



Şekil 5.1 Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi için Sonlu Elemanlar Modeli

Çözüm, iki adımlı olarak yapılmıştır. Birinci yükleme adımında hareketli düzlem köpüğe 3 saniye kadar 45 mm basarak %90 şekil değişimi yaptıracaktır. İkinci adım olan yük boşaltma adımında ise hareketli düzlem yukarı doğru hızla 2 saniye kadar hareket edecektir. Bu süre sonunda hareketli plakanın köpük malzeme ile bağlantısı bitecektir. Bunun için hareketli rijit düzlem üzerine 10.927 kg kütleli bir MASS eleman atanmıştır. Bu hareketli rijit düzleme INITIAL VELOCITY RIGID BODY

kullanılarak 3 m/s başlangıç hızı verilmiştir. Alt kısımdaki sabit düzlemi temsil etmesi içinde RIGIDWALL kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Sayısal olarak modellenmiş köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışları.

Analiz sonuçları ilk olarak ivme-zaman olarak elde edilmiş olup sırasıyla yük-yer değişimi ve gerilim-gerinim eğrisine çevrilmiştir. Gerilim-Gerinim eğrileri Şekil 6.7-6.9'da gösterilmiştir.

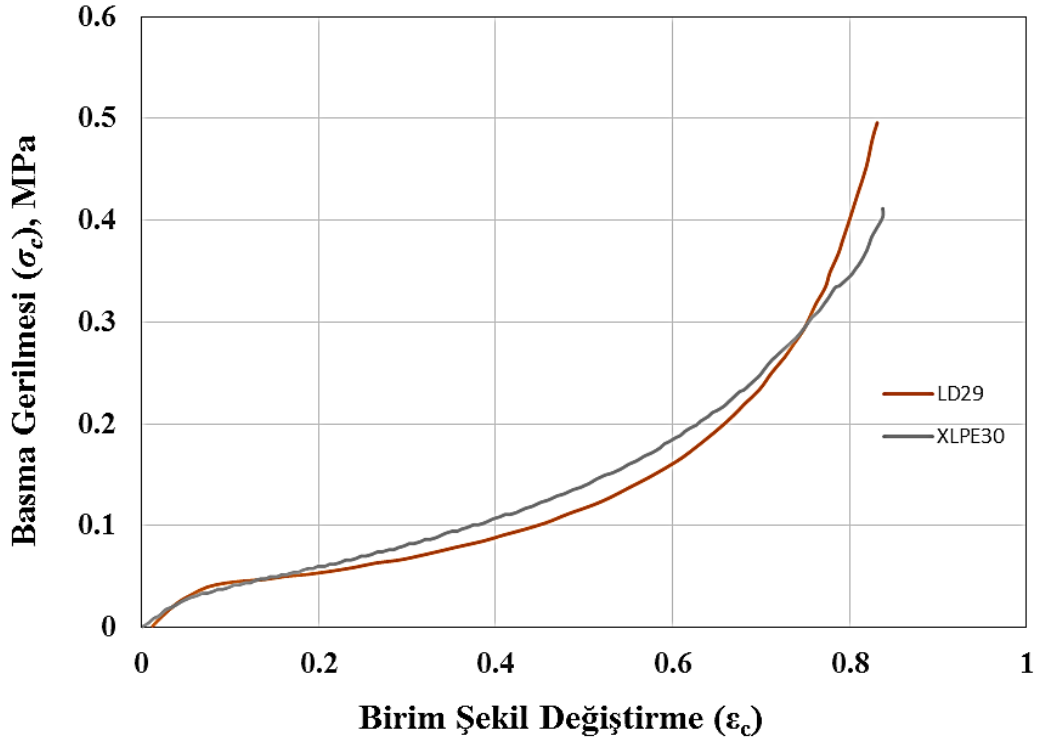
6. SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. DYPE Köpük Malzemenin Statik Yükleme Altında Mekanik Davranışı

Tek katmanlı (LD29) ve katmanlı (XLPE30) DYPE köpük malzemenin statik yükleme altındaki mekanik davranışı Şekil 6.1'de gerilme (σ_c) - şekil değiştirme (ε_d) grafiğindeki eğriler ile gösterilmiştir. Gerilme - şekil değiştirme grafiğinde her iki malzeme türü için de doğrusal elastik bölge ve yoğunlaşma bölgesi belirgin olarak görülmüştür. Gerilme düzlüğü bölgesinde ise şekil değiştirmeye bağlı olarak gerilme değeri de artmış ve geniş gerilme düzlükleri oluşmamıştır. Buna rağmen tek katmanlı ve katmanlı DYPE köpük malzemelere ait σ_c - ε_d grafikleri (Şekil 6.1) polimer köpükler için Şekil 1.2'de gösterilen temel gerilme şekil değiştirme grafiği ile benzerdir.

Her iki köpük malzemenin basma yükü altındaki davranışlarını incelediğimizde ise LD29 köpük için doğrusal elastik bölge gerilmenin 0,065 MPa, birim şekil değiştirmenin ise %0,05 olduğu anda bitmiştir. XLPE30 köpük malzeme için ise gerilmenin 0,058 MPa, birim şekil değiştirmenin ise %0,045 olduğu anda doğrusal elastik davranış sona ermiştir. Petel, vd. (2013), yoğunluğu 45 kg/cm³ olan DYPE köpük malzemenin, Öztürk ve Anlaş (2009), yoğunluğu 58 kg/cm³ olan DYPE köpük malzemenin elastik şekil değiştirme davranışının sona erdiği anda gerilmenin 0,09 MPa, gerinimin ise 0,03 olduğunu belirtmişlerdir. Jebur, vd. (2011), ise yoğunluğu 39 kg/cm³ olan DYPE köpük malzemenin elastik şekil değiştirme davranışının sona erdiği anda gerilmenin 0,1 MPa, gerinimin ise 0,05 olduğunu belirtmişlerdir. Doğrusal elastik bölgeden sonra LD29 ve XLPE30 köpük malzemeler yine benzer gerilme şekil değiştirme davranışı sergilemişlerdir. Her iki malzeme türü için gerilme düzlüğü birim şekil değiştirme değeri %0,4 olmadan sona ermiştir. Gerilme düzlüğünden sonra ise birim şekil değiştirmenin artışının yavaşladığı ve buna karşılık gerilme değerinin hızla arttığı yoğunlaşma evresi başlamıştır. LD29 köpük malzeme visko elastik deformasyonu esnasında 2,525 kJ/m³ enerji soğururken XLPE30 köpük malzeme 2,371 kJ/m³ enerji soğurmuştur. Öztürk (2008), yoğunluğu 58 kg/cm³ olan DYPE köpük malzemenin visko elastik deformasyonu esnasında 2,250 kJ/m³ enerji soğurduğunu hesaplamıştır. Soğurulan

özgül enerji değerlerine bakıldığında tek katmanlı DYPE köpüğün katmanlı köpük malzemeden yaklaşık %6,01 daha fazla enerji soğurabildiği görülmüştür. Şekil 6.1'deki gerilme – şekil değiştirme grafiğine ve malzemelerin soğurdukları özgül enerjiye bakılarak tek katmanlı köpük malzemenin ve katmanlı malzemenin benzer mekanik davranış gösterdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 6.1 LD29 ve XLPE30 köpük malzemelerin statik yükleme altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.

6.2. DYPE Köpük Malzemelerin Ağırlık Düşürmeli Darbe Yüğü Altında Mekanik Davranışı

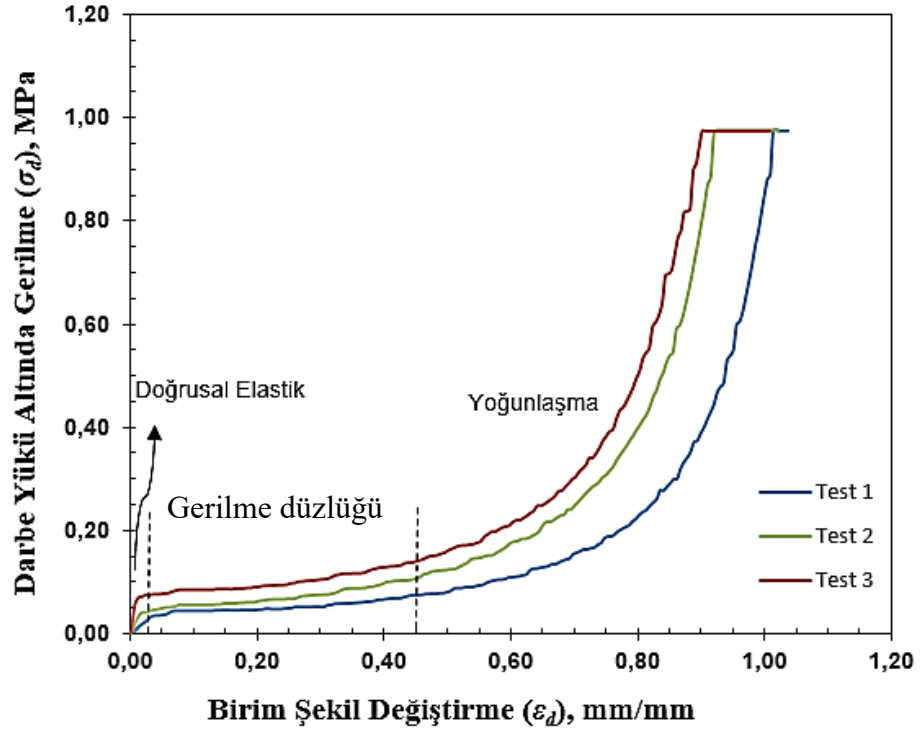
LD29 ve XLPE30 köpük malzemelerin ağırlık düşürmeli darbe yüğü altındaki mekanik davranışı Şekil 6.2 – 6.4'de gerilme (σ_d)- şekil değiştirme (ϵ_d) grafiği ile gösterilmiştir. Hem LD29 köpüğün darbe yüklemesi, hem XLPE30 köpüğün katman düzlemine dik ve katman düzlemine paralel darbe yüklemeleri için gerilme - şekil değiştirme grafiklerinde doğrusal elastik bölge, gerilme düzlüğü ve yoğunlaşma bölgesi belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca DYPE köpük malzemenin gerilme-

şekil değiştirme özelliğini yansıtan grafiklerde her bir numune türü için tekrarlanan testlere ait eğriler görülebilmektedir.

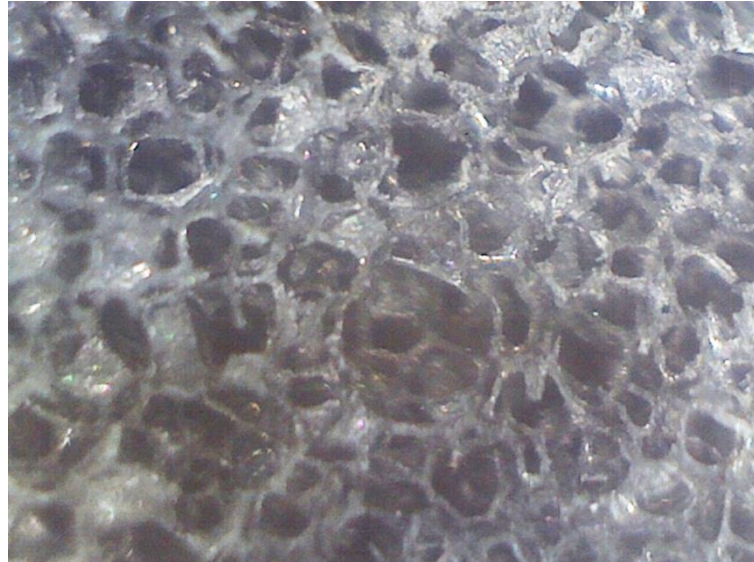
LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği (Şekil 6.2) incelendiğinde üç test tekrarından her birinde eğrinin farklı olduğu ve ardışık darbe yüklemeleri ile köpük malzemenin enerji soğurma yeteneğinin düştüğü görülmüştür (Çizelge 6.1). LD29 köpük malzemenin ilk test esnasında soğurduğu özgül enerji miktarı son testte soğurduğu özgül enerji miktarından %5,20 fazladır. LD29 köpük malzemenin hücre duvarlarında meydana gelen kalıcı deformasyonlar nedeniyle malzemenin şekilsel geri kazanımının ve enerji soğurma yeteneğinin azaldığı düşünölmüştür. Her üç teste ait gerilme - şekil değiştirme grafiğinde belirgin kırılmaların olmaması, hücre duvarlarında meydana gelen elastik ve plastik deformasyonların malzeme içerisinde düzgün dağılmasından kaynaklandığı kanaatine varılmıştır (Şekil 6.2).

XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine dik darbe yüklemesi altındaki sonuçları incelendiğinde malzemenin her bir yükleme için gerilme – şekil değiştirme grafiğinin neredeyse aynı olduğu görölmektedir (Şekil 6.4). Birim şekil değiştirme %5 olana kadar XLPE30 köpük malzeme doğrusal elastik deformasyon sergilemiştir ve sonrasında birim şekil değiştirme %25 olana kadar gerilme düzlüğü yer almıştır. Öztürk (2008), yoğunluğu 58 kg/cm^3 olan DYPE köpük malzemeye 503 mm yükseklikten serbest ağırlık düşürme ile yaptığı testler sonucunda elastik bölgenin bittiği anda gerilmenin 110 kPa, gerinimin ise %8 olduğunu belirlemiştir. Ayrıca Öztürk (2008), yoğunluğu 58 kg/cm^3 olan DYPE köpük malzeme için gerilme düzlüğünün gerinim %25 olduğunda sonlandığını tespit etmiştir. Her üç test için de doğrusal elastik bölge, gerilme düzlüğü ve yoğunlaşma bölgesinin başlangıcında malzemenin mekanik davranışı değişmemiştir. Katman düzlemine dik darbe yüklemesi altındaki XLPE30 köpük malzeme ilk test esnasında en az özgül enerjinin soğurulan ikinci teste göre yalnızca %0,72 daha fazla enerji soğurmuştur. Bu sonuç katmanlı XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine dik yüklemelerde şekilsel geri kazanımının iyi olduğunu ve darbe yüklemesi ile hücre duvarlarında kayda değer plastik deformasyon olmadığını göstermektedir (Şekil 6.4). XLPE30 malzemenin

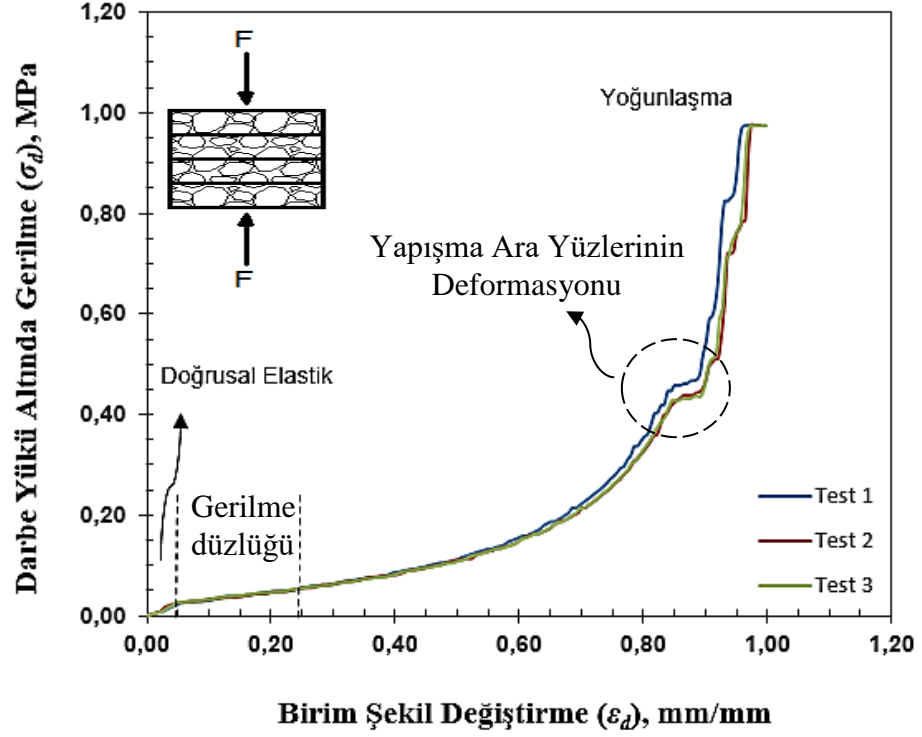
katman düzlemine dik yüklemesi için ilk test esnasında soğurulan özgül enerji miktarı son testte soğurduğu enerji miktarından yalnızca %0,5 fazladır.



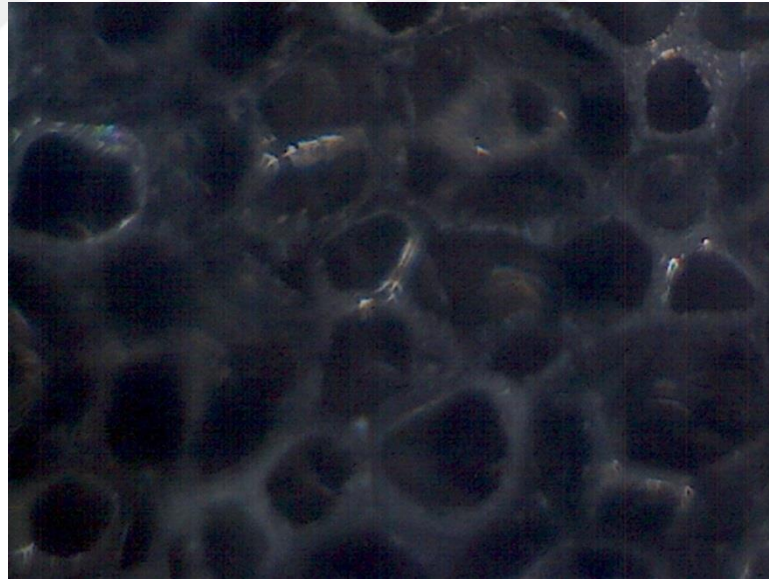
Şekil 6.2 LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değişirme grafiği.



Şekil 6.3 LD29 köpük malzemenin deforme olmuş gözenekli iç yapısı.



Şekil 6.4 XLPE30 Katmana dik köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.



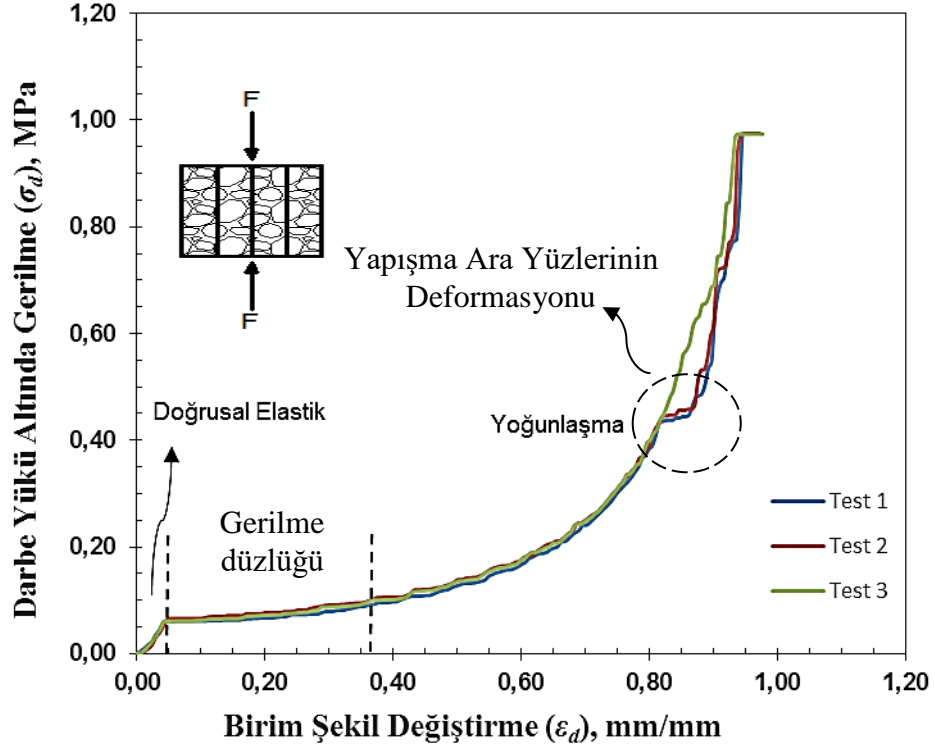
Şekil 6.5 XLPE30 köpük malzemenin gözenekli iç yapısı.

XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine paralel darbe yüklemesi altında elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise katman düzlemine dik yükleme sonuçlarında olduğu gibi malzemenin her bir yükleme için gerilme – şekil değiştirme grafiğinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir (Şekil 6.6). Bu yükleme türünde doğrusal

elastik bölge yine birim şekil değiştirme %5 olana kadar devam etmiştir. Gerilme düzlüğü ise birim şekil değiştirme %37 olana kadar devam etmiştir. Her üç test için de doğrusal elastik bölge ve gerilme düzlüğü bölgesinde malzemenin mekanik davranışı değişmemiştir. Yoğunlaşma bölgesinde ise ilk iki testte eşdeğer davranış elde edilmiş ve belirli bir noktada sabit gerilme altında hızlı şekil değiştirme meydana gelmiştir. Şekil 6.6'da çember ile işaretlenen bu noktada yapışma ara yüzlerinde mikro burkulmaların, kalıcı deformasyonların veya iç yırtılmaların meydana geldiği düşünülmüştür. Üçüncü testte ise yapışma ara yüzlerinin bu etkisi olası yırtılmalar ile tamamen elimine edilmiş ve meydana gelen deformasyonlar malzeme içerisinde düzgün dağılmıştır. Bu sonuç katmanlı XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine dik yüklemelerde şekilsel geri kazanımının iyi olduğunu ve darbe yüklemesi ile hücre duvarlarında kayda değer plastik deformasyon olmadığını göstermektedir. Ancak yapıştırma ara yüzlerinin neden olduğu düşünülen ve grafik üzerinde çember ile işaretlenen sapma katmanlı DYPE köpük malzemenin ağırlık düşürmeli darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının tek katmanlı köpük malzemeden farklı olduğunu göstermektedir. Katman düzlemine paralel darbe yüklemesi altındaki XLPE30 köpük malzeme ilk test esnasında en az özgül enerjinin soğurulan ikinci teste göre yalnızca %1,67 daha fazla enerji soğurmuştur.

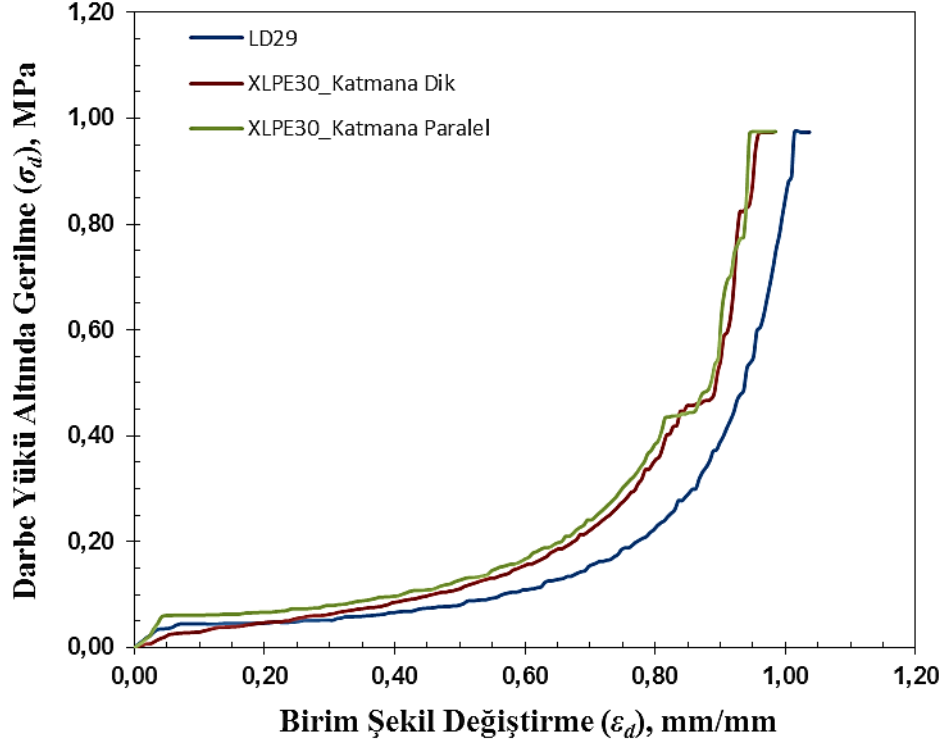
Çizelge 6.1 Ağırlık Düşürmeli Darbe Testlerinde Soğurulan Özgül Enerji

Numune	Özgül Enerji (kJ/m ³)		
	Test 1	Test 2	Test 3
LD29	5,3899	5,1107	5,1098
XLPE_Katmana Dik	5,0881	5,0515	5,0620
XLPE_Katmana Paralel	5,0441	4,9600	5,0079



Şekil 6.6 XLPE30 Katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değiştirme grafiği.

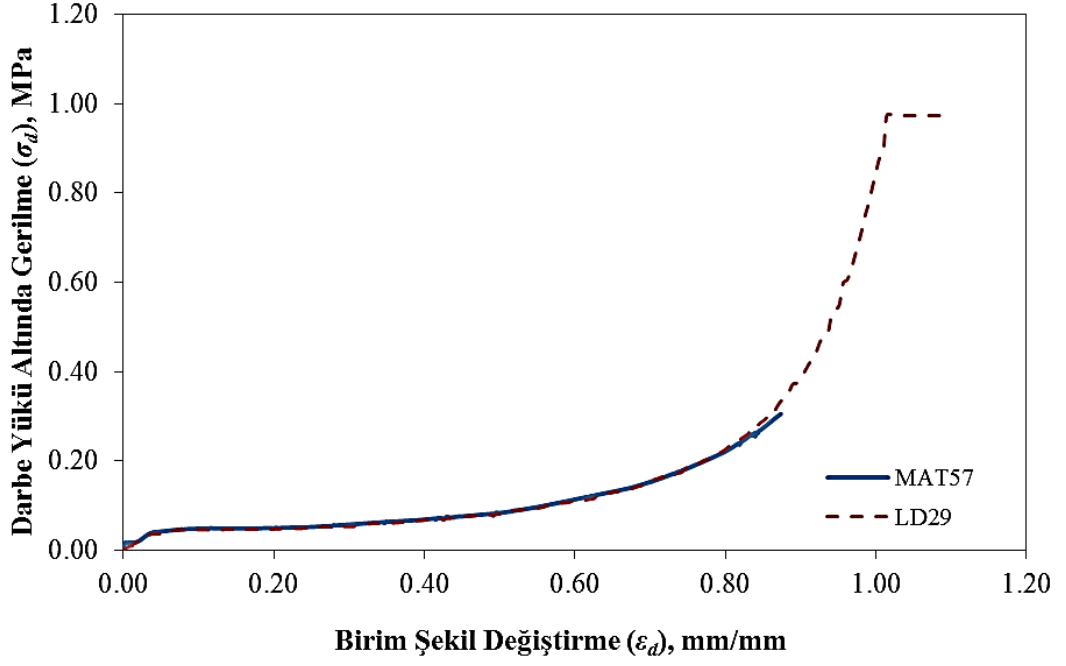
Her üç numunenin darbe yük altındaki ilk testlerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.7’de verilmiştir. LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi ile katmanlı XLPE30 köpük malzemenin katmana dik ve katmana paralel darbe yüklemeleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde katmanlı köpük malzemenin gerilme düzlüğünde ve yoğunlaşma bölgesinde birim şekil değiştirme için LD29 köpüğe göre daha yüksek gerilmeye ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bununla birlikte her üç numune türünün deformasyon süresinde soğurduğu özgül enerji değerleri birbirine çok yakındır (Çizelge 6.1). LD29 köpük malzeme darbe yüklemesi altında katmanlı XLPE30 köpüğün katman düzlemine dik yükleme ile soğurduğu özgül enerjiden yalnızca %6,42 daha fazla enerji elde etmiştir.



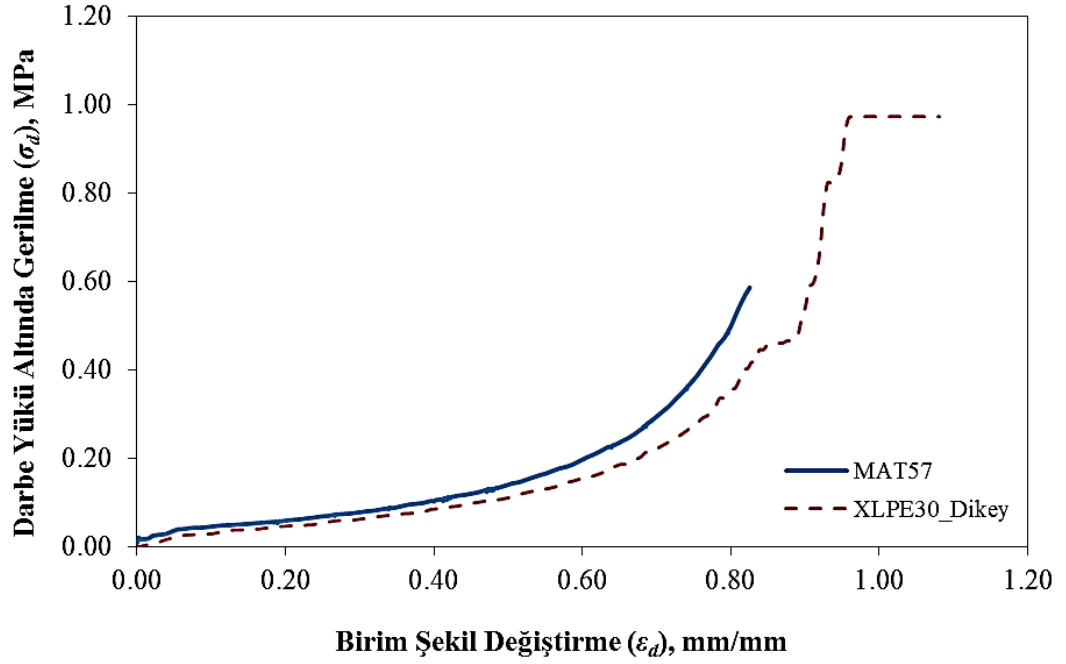
Şekil 6.7 LD29, XLPE30 Katmana dik ve XLPE30 katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki gerilme – şekil değişirme grafiği.

6.3. Sayısal Sonuçlar

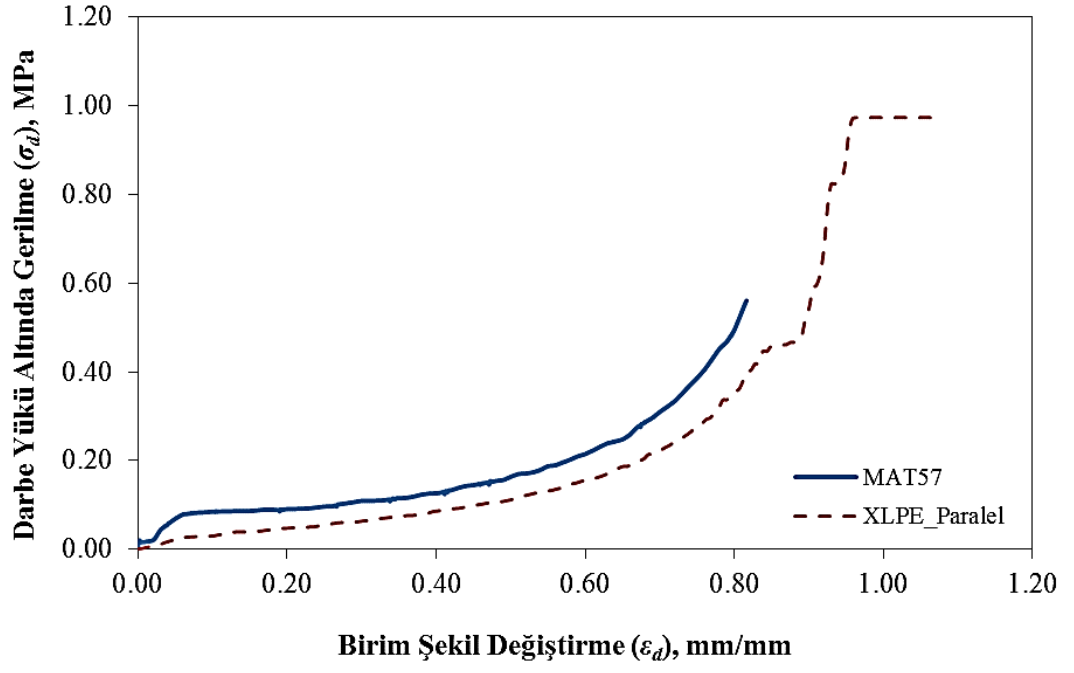
Sonlu elemanlar analizinde MAT 57 olarak seçilen köpük malzemenin analizi Ağırlık Düşürmeli Darbe Test düzeneğini sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapılmıştır. Yapılan çözümler LD29 köpük malzeme, XLPE30 katmana dik köpük malzeme ve XLPE30 katmana paralel köpük malzemeye ait test sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.8 – 6.10). Sayısal çözümlerde LD29 köpük malzemenin gerilme – şekil değişirme davranışı başarı ile modellenmiştir ve sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile tutarlılık göstermiştir. Yapılan deneyler ile sayısal çözümler karşılaştırıldığında elastik bölgede ve plato bölgesinde tam bir uyum elde edilmiştir. XLPE30 köpük malzemenin sayısal sonuçlarına bakıldığında ise hem katman düzlemine dik yüklemenin hem de katman düzlemine paralel yüklemenin sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçları tam olarak yansıtamamıştır. Özellikle katmanların yapışma ara yüzlerinin neden olduğunu tahmin ettiğimiz ve gerilme – şekil değişirme grafiğinin yoğunlaşma bölgesinde sapma meydana getiren mekanizmalar sayısal çözümlere yansıtamamıştır.



Şekil 6.8 LD29 köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.



Şekil 6.9 XLPE30 katmana dik köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.



Şekil 6.10 XLPE30 katmana paralel köpük malzemenin darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışının sayısal modellenmesi.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tek katmanlı (LD29) ve katmanlı (XLPE30) DYPE köpük malzemelerin statik yük ve ağırlık düşürmeli darbe yükü altında gerilme – şekil değiştirme davranışlarının incelendiği bu tez çalışmasında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- LD29 köpük malzeme ve XLPE30 köpük malzemenin statik yük altında göstermiş oldukları gerilme-şekil değiştirme karakteristiği benzerdir.
- Statik yük altında LD29 köpük malzeme, XLPE30 köpük malzemedan %6,01 daha fazla enerji soğurmuştur.
- LD29 köpük malzemenin ağırlık düşürmeli darbe yüklemesi altında hücre duvarlarında kalıcı deformasyonlar oluştuğu ve tekrarlanan testlerde bu malzeme tarafından soğurulan enerji miktarının düştüğü görülmüştür.
- LD29 köpük malzemenin hücre duvarlarında oluşan kalıcı deformasyonlar bu malzemenin şekilsel geri kazanımının da olumsuz etkilendiği sonucunu ortaya çıkarmıştır.
- LD29 köpük malzemenin deneysel gerilme – şekil değiştirme davranışı MAT 57 malzeme modeli ile tutarlı bir şekilde sayısal olarak da analiz edilmiştir.
- XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine dik ve paralel olarak ağırlık düşürmeli darbe yüklemesi altındaki gerilme şekil değiştirme davranışlarının LD29 köpük malzeme ile benzer olduğu görülmüştür.
- XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine dik olarak tekrarlanan ağırlık düşürmeli darbe yüklemeleri altında soğurduğu enerji miktarındaki kayıp, LD29 köpük malzemedede oluşan kaybın 1/10'i kadardır.
- XLPE30 köpük malzemenin katman düzlemine paralel olarak tekrarlanan ağırlık düşürmeli darbe yüklemeleri altında soğurduğu enerji miktarındaki kayıp, LD29 köpük malzemedede oluşan kaybın 1/3'i kadardır.
- Ağırlık düşürmeli darbe yüklemesi ile XLPE30 köpük malzemenin yapışma yüzeylerinde mikro burkulmalar, kalıcı deformasyonlar ve iç yırtılmalar oluşmuştur. Yapışma yüzeylerindeki bu olumsuzluklar gerilme – şekil değiştirme eğrisinin yoğunlaşma bölgesinde sapmaya neden olmuştur.

- XLPE30 köpük malzemenin hem katman düzlemine dik hem de katman düzlemine paralel ağırlık düşürmeli darbe yüklemeleri sonucunda şekilsel geri kazanımının LD29 köpük malzemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.
- XLPE30 köpük malzemenin hem katman düzlemine dik hem de katman düzlemine paralel olarak gerçekleştirilen sayısal gerilme – şekil değiştirme çözümlemesi, test sonuçları ile uyumlu değildir.

Bu tez çalışmasında ülkemizde üretimi olmayan kalınlığı yüksek DYPE köpük malzemenin ve ısıl birleştirme ile elde edilmiş katmanlı DYPE köpük malzemenin statik basma ve ağırlık düşürmeli darbe yüklemeleri altındaki mekanik davranışları kıyaslanmış olup katmanlı DYPE köpüklerin basma yüklerinin yataklanması gereken uygulamalarda tek katmanlı DYPE köpüklerin yerine kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- Apostol, D.A., Constantinescu, D.M., Temperature and speed of testing influence on the densification and recovery of polyurethane foams, *Mechanics of Time-Depend Materials*, 17, 111-136, 2013.
- ASTM D 1596 Standard test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material, West Conshohocken, 2003.
- Avelle, M., Belingardi, G., Montanini, R., Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram, *International Journal of Impact Engineering*, 25, 455-472, 2001.
- Bezazi, A., Scarpa, F., Mechanical behaviour of conventional and negative poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading, *International Journal of Fatigue*, 29, 922-930, 2007.
- Bezazi, A, Scarpa, F., Tensile fatigue of conventional and negative poisson's ratio open cell pu foams, *International Journal of Fatigue*, 31, 488-494, 2009.
- Bilkhu, S.S., Founas, M., Nusholtz, G.S., Material modelling of structural foams in fea using compressive uniaxial and triaxial data, *SAE Technical Paper Series*, 930434, 1-7, 1993.
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., Li, Z.X., Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene, *Materials and Design*, 69, 170-180, 2015.
- Chou, C.C., Zhao, Y., Lim, G.G., Song, G.S., A constitutive model for polyurethane foams with strain-rate and temperature effects. *SAE Technical Paper Series*, 980967, 1-12, 1998.
- Christian, K., Rapid rotational foam molding of polyethylene integral-skin foamed core moldings, Master Thesis, Ontario, The Faculty of Engineering and Applied Science Mechanical Engineering University of Ontario Institute of Technology, 2009.
- Croop, B., Hubert, L., Selecting material material models for the simulation of foams in LS-DYNA, Salzburg, Avusturya, 14-15 Mayıs 2009.
- De Vries, D.V.W.M., Characterization of polymeric foams, Eindhoven University of Technology, 2009.

Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Multi-Axial Yield Behaviour of Polymer Foams, *Acta Materiala*, 49, 1859-1866, 2001.

“Deu” Erişim adresi:

<http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/mme4044PolymerApplications/PolymerFoamsLecture2-2015.pptx>., Erişim Tarihi: 21.10.2016.

“Durfoam” Erişim adresi: <http://www.durfoam.com/sss.php> , Erişim Tarihi: 15.10.2016.

Eaves, D., *Handbook of Polymer Foams*, Shropshire: Rapra Technology Limited, 2004.

Faruque, O., Liu, N., Chou, C.C., Strain rate dependent foam constitutive modelling and applications, *SAE Technical Paper Series*, 971076, 221-229, 1997.

“Foam Injection Molding” Erişim adresi:

http://www.isco.com/WebProductFiles/Applications/105/Application_Notes/Foam%20Injection%20Molding.pdf, Erişim Tarihi: 05 Ekim 2016.

Gedler, G., Antunes, M., Realinho, V., Velasco, J.I., Novel polycarbonate-graphene nanocomposite foams prepared by co2 dissolution, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 31, 96, 2012.

Gilchrist, A., Mills, N.J., Impact deformation of rigid polymeric foams: Experiments and fea modeling, *International Journal of Impact Engineering*, 8, 767-786, 2001.

Hallström, S., Juntikka, R., Weight-Balanced drop test method for characterization of dynamic properties of cellular materials, *International Journal of Impact Engineering*, 30, 541-554, 2004.

Jebur, Q.H., Harrison, P., Guo, Z., Schubert, G., Ju, X., Navez, V., Characterisation and modelling of a transversely isotropic melt-extruded low-density polyethylene closed cell foam under uniaxial compression, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 226, 2168-2177, 2011.

Koohbar, B., Kidane, A ., Lu, W.Y., Characterizing the constitutive response and energy absorption of rigid polymeric foams subjected to intermediate-velocity impact, *Polymer Testing*, 54, 48-58, 2016.

Krundaeva, A., Bruyne, G.D., Gagliardi, F., Paepegem, W.V., Dynamic compressive strength and crushing properties of expanded polystyrene foam for different strain rates and different temperatures, *Polymer Testing*, 55, 61-68, 2016.

- Landrock, A.H., Handbook of plastic foams types, properties, Manufacture and Applications, New Jersey: Noyes Publications, 1994.
- Lee, S.T, Park, C.B., Ramesh, N.S., Polymeric Foams: Science and Technology, CRC Press, 2007.
- Lee, S.T., Ramesh, N.S., Polymeric foams mechanisms and materials, Florida: CRC Press LLC, 2004.
- Liu, Q., Subhash, G., Gao, X., A parametric study on crushability of open-cell structural polymeric foams, Journal of Porous Materials, 12, 233-248, 2005.
- Machado, G.C., Alves, M.K., Rossi, R., Silva Jr, C.R.A., Numerical modeling of large strain behavior of polymeric crushable foams, Applied Mathematical Modelling, 35, 1271-1281, 2011.
- Moreu, M.Y., Mills, N.J., Impact compression of polystyrene foam pyramids, International Journal of Impact Engineering, 28, 653-676, 2003.
- Ouellet, S., Cronin, D., Worswick, M., Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions, Polymer Testing, 25, 731-743, 2006.
- Öztürk, U.E., Mechanical behavior of low density polymeric foams under multiple loading and unloading, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- Öztürk, U.E., Anlaş, G., Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams, Materials&Design, 30, 15-22, 2009.
- Park, S.B., Lee, C.S., Choi, S.W., Kim, J.H., Bang, C.S., Lee, J.M., polymeric foams for cryogenic temperature application: temperature range for non-recovery and brittle-fracture of microstructure, Composite Structures 136, 258-269, 2016.
- Petel, O.E., Ouellet, S., Frost, D.L., The elastic-plastic behaviour of foam under shock loading, Shock Waves, 23, 55-67, 2013.
- Pop-Iliev, R., Lee, K.H., Chew, Y.C., Mark, C.B., Processing finecelled recyclable cba-based polyolefin foams in compression foam molding, Antec, 1177-1181, 2009.
- Romero, P.A., Zheng, S.F., Cuitino, A.M., Modeling the dynamic response of visco-elastic open-cell foams, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 56, 1916-1943, 2008.

“Rotoworldmag” Erişim adresi: <https://rotoworldmag.com/about-rotomolding/>,

Erişim Tarihi: 21.10. 2016

- Shen, Y., Golnaraghi, F., Plumtree, A., Modelling compressive cyclic stress–strain behaviour of structural foam, *International Journal of Fatigue*, 23, 491-497, 2001.
- Slik, G., Vogel, G., Chawda, V., Material model validation of a high efficient energy absorbing foam, 5th LS-Dyna Forum, Ulm, 2006.
- Song, B., Chen, W., Yanagita, T., Frew, D.J., Temperature effects on dynamic compressive behavior of an epoxy syntactic foam, *Composite Structures*, 67, 289-298, 2005.
- Song, B., Chen, W., Lu, Y., Compressive mechanical response of a low-density epoxy foam at various strain rates, *Journal of Materials Science*, 42, 7502-7507, 2007.
- TS 4594 EN ISO 3386-1 Gözenekli, esnek polimer maddeler- basınç altında gerilme/şekil değiştirme özelliklerinin tayini- bölüm 1: düşük yoğunluklu maddeler, Ankara, 2000.
- Viot, P., Beani, F., Lataaillade, J.L., Polymeric foam behavior under dynamic compressive loading, *Journal of Materials Science*, 40, 5829-5837, 2005.
- Walter, T.R., Richards, A.W., Subhash, G., A Unified Phenomenological Model for Tensile and Compressive Response of Polymeric Foams, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 131, 1-6 2009.
- Yang, L.M., Shim, V.P.W., A Visco-Hyperelastic Constitutive description of elastomeric foam, *International Journal of Impact Engineering*, 30, 1099-1110, 2004.
- Yetgin, S.H., Otomotiv sektörü için polimer köpük malzeme üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, Sakarya: T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- Yetgin, S.H., Ünal, H., Polimer esaslı köpük malzemeler, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17, 2008.
- Yonezu, A., Hirayama, K., Kishida, H., Chen, X., Characterization of the compressive deformation behavior with strain rate effect of low-density polymeric foams, *Polymer Testing*, 50, 1-8, 2016.

Zhang, J., Lin, Z., Wong, A., Kikuchi, N., Li, V.C., Yee, A.F., Nusholtz G.S.,
Constitutive modeling and material characterization of polymeric foams,
Transactions of the ASME, 119, 284-291, 1997.

“Zotefoams” Erişim adresi: <http://azote.zotefoams.com/item/all-categories/low-density-polyethylene/ld29>., Erişim Tarihi: 15.10.2016.



ÖZGEÇMİŞ

- 1. Adı Soyadı** : Erkut MELEMENCİ
2. Doğum Tarihi : 02/03/1980
3. Ünvanı : Makine Mühendisi
4. Öğrenim Durumu : Yüksek Lisans

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen	İçel Anadolu Öğrt. Lisesi	1998
Lisans	Makine Mühendisliği	Gazi Üniversitesi	2003
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Osm. Korkut Ata Üni.	-

İş Tecrübesi

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Bakım Şefi	C.P. Standart Gıda San.Tic.A.Ş.	2003-2005
Satış Mühendisi	Wolf Isı ve Klima A.Ş.	2005-2007
Ar-Ge Mühendisi	Temsa Global San. Tic.A.Ş.	2007-2016
Proje Mühendisi	Amylum Nişasta San.Tic.A.Ş.	2016-devam