



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BAL PETEĞİ YAPILI HİBRİT  
MALZEMELERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Tuğba Selcen ATALAY KALSEN**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Eylül-2023  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Tuğba Selcen ATALAY KALSEN tarafından hazırlanan “Bal Peteği Hibrit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 01/09/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof.Dr. Mesut UYANER

.....

#### Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Hakan Burak KARADAĞ

.....

#### Üye

Doç.Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

#### Üye

Doç.Dr. Memduh KARA

.....

#### Üye

Doç.Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Tuğba Selcen ATALAY KALSEN

Tarih: 04/09/2023

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### BAL PETEĞİ YAPILI HİBRİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tuğba Selcen ATALAY KALSEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ  
Doç.Dr. Yasin Ramazan EKER

2023, 112 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ  
Prof.Dr. Mesut UYANER  
Doç.Dr. Hakan GÖKMEŞE  
Doç.Dr. Memduh KARA  
Doç.Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Hafif ve dayanımlı, enerji sönmüleme özelliği yüksek alüminyum bal peteği malzemeler ve polimer köpükler gözenekli malzeme grubunun en önemli iki üyesidir. Günümüzde, bu malzemelerin hibrit kullanımı havacılık, savunma, biyomedikal, ulaşım gibi çeşitli kritik uygulama alanlarında giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, farklı hücre boyutu, folyo kalınlığı ve yüksekliğe sahip alüminyum bal peteği yapılar içerisinde yerinde üretim (*in-situ*) tekniği ile etilen vinil asetat (EVA) köpük oluşturularak hibrit malzemeler üretilmiştir. EVA dolgusunun mekanik özelliklere etkisi aynı parametrelere sahip dolgusuz bal peteği yapılarla mukayese edilerek incelenmiştir. Çalışmaların sonucunda, tespit edilen en uygun sıcaklık ve sürelerde köpürtülen EVA dolgusunun alüminyum hücre duvarlarına yapıştığı gözlenmiştir. Termoplastik doğası sayesinde dolgulu malzemelerin, basma yükü sonrası geri yaylanma özelliği tespit edilmiştir. 14,17 mm hücre boyutu, 50 µm folyo kalınlığı ve 6 mm yüksekliğe sahip EVA köpük dolgulu yapıda basma yükü kaldırıldıktan sonra %70 oranında geçici deformasyon oranı sağlanmıştır. Ayrıca, bal peteğine ait daha büyük hücre boyutlarında, daha yüksek geri yaylanma oranları tespit edilmiştir. Bu çalışmada, bal peteği yapısına ait geometrik parametrelerin, düzlem dışı basma testlerinden elde edilen pik gerilim, kritik gerilim, plato gerilimi, yoğunlaşma gerinimi gibi karakteristik değerlendirme ölçütlerine etkisi incelenmiştir. Hücre boyutu arttıkça, pik gerilme ve plato gerilme değerleri azalmaktadır. Artan alüminyum folyo kalınlığı ise pik gerilme değerini arttırmıştır. EVA köpük dolgusu ise yapının maksimum yük taşıma kapasitesinin ve plato gerilmesinin artmasını sağlamıştır. Dolgusuz ve EVA dolgulu yapılarına ait mekanik özelliklere etki eden en önemli parametrenin, folyo kalınlığının, serbest duvar uzunluğuna oranı ( $t/l$ ) olarak belirlenmiştir. Artan  $t/l$  oranı ile plato gerilmesi, pik gerilmesi ve hacim başına absorbe edilen enerji değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, en yüksek  $t/l$  oranına sahip alüminyum bal peteği malzemesi dolgusuz ve dolgulu olmak üzere panel haline getirilerek elde edilen yapının dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla ağırlık düşürme testi gerçekleştirilmiştir. EVA köpük üretim optimizasyonu ve hammadde analizi için termogravimetrik analiz ve diferansiyel taramalı kalorimetre (TGA, DSC) kullanılmıştır. Mekanik testler sonrasında oluşan hasarlar, elektron mikroskobu aracılığı ile incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum bal peteği, Basma testi, Düşük hızlı darbe testi, Etilen Vinil Asetat, Geri yaylanma

## ABSTRACT

### Ph.D THESIS

## INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HONEYCOMB HYBRID MATERIALS

Tuğba Selcen ATALAY KALSEN

### THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL ENGINEERING

**Advisors: Asst.Prof.Dr. Hakan Burak KARADAĞ  
Assoc.Prof. Yasin Ramazan EKER**

**2023, 112 Pages**

#### Jury

**Asst.Prof.Dr. Hakan Burak KARADAĞ  
Prof.Dr. Mesut UYANER  
Assoc.Prof. Hakan GÖKMEŞE  
Assoc.Prof. Memduh KARA  
Assoc.Prof. Mehmet Turan DEMİRCİ**

Lightweight polymer foams and aluminium honeycomb materials with high strength and energy absorption capacity are significant two members of cellular materials. The importance of using these materials as a hybrid is increasing in various critical industries such as aviation, defense, biomedical, and transportation. In this thesis, in-situ EVA foam-filled aluminum honeycomb hybrid materials with different cell sizes, foil thicknesses, and heights were produced. The effects of EVA foam on mechanical properties were investigated by comparing it with unfilled honeycomb specimens with the same geometrical parameters. According to the results, EVA filling which is foamed at certain parameters such as temperature, and time showed a strong interaction between aluminum cell walls. In-situ EVA foamed aluminum honeycombs showed spring-back characteristics thanks to their thermoplastic nature. EVA foamed sample with 14.17 mm cell size, 50  $\mu\text{m}$  foil thickness, and 6 mm height showed 70% temporary recovery after compression force was removed. In addition, it is obtained that bigger cell size of honeycomb lead to higher spring back ratio. In this study, the effects of geometrical parameters of honeycombs on characteristics obtained from compression test such as peak strength, critical strain, plateau strength, and densification strain were investigated. Peak strength and plateau strength decreased as cell sizes increased. Peak strength also increased as the foil thickness of aluminum was increased. The maximum load-carrying capacity and plateau strength of the structure also increased thanks to EVA foam filling. The most efficient parameter was obtained as the  $t/l$  ratio which is the ratio of foil thickness and free wall length for mechanical properties of both filled and unfilled structures. It is determined that plateau strength, peak strength, and absorbed energy per unit volume increased when  $t/l$  ratio increased. Moreover, the impact behavior of unfilled and EVA foam-filled samples with the highest  $t/l$  ratio was investigated under dynamic conditions via the drop weight test. Thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimeter (DSC) were used for the optimization of EVA foam production. Micro observations of damaged specimens after compression tests were done via scanning electron microscope.

**Keywords:** Aluminium honeycomb, compression test, ethylene vinyl acetate foam, low velocity impact test, spring back

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yanımda olan ve kıymetli bilgilerini benimle paylaşan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ'a ve eş danışman hocam Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, tez süresince yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Mesut UYANER'e minnetlerimi sunarım. Doktora çalışmam boyunca her zaman desteklerini hissettiğim ve sürecin daha kolay gerçekleşmesini sağlayan değerli mesai arkadaşım Öğr. Gör. Eda GÜMÜŞ'e, değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Muhammed İhsan ÖZGÜN, Arş. Gör. Dr. Ahmet Burçin BATIBAY'a ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan POLAT'a ve Dr. Veysel Murat BOSTANCI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübesi ile her zaman yoluma ışık tutan Prof. Dr. Haluk BİNGÖL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her durumda yanımda olan, çalışma süresince karşılaştığım zorluklarla mücadele etmemi sağlayan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli ailem Mehmet Duran ATALAY, Melek ATALAY ve değerli eşim Ozan KALSEN'e teşekkür ederim.

Tuğba Selcen ATALAY KALSEN  
KONYA-2023

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Bal Peteği Malzemeler (Honeycomb).....	2
1.1.1. Bal Peteği Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	3
1.1.2. Alüminyum Bal Peteği Malzemelerin Mekanik Özellikleri .....	5
1.2. Polimer Köpükler.....	7
1.2.1. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri .....	7
1.2.2. Polimer Köpüklerin Mekanik Özellikleri .....	8
1.2.3. Etilen Vinil Asetat (EVA) Köpük.....	9
1.3. Polimer Dolgulu Bal Peteği Yapılar .....	10
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>12</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>18</b>
3.1. Materyal .....	18
3.2. Hibrit Malzeme Üretimi.....	20
3.3. Mekanik Testler .....	22
3.3.1. Basma Testi.....	22
3.3.2. Düşük Hızlı Darbe Testi .....	25
3.4. Karakterizasyon .....	26
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>27</b>
4.1. EVA Köpük Üretim Optimizasyonu.....	27
4.2. Basma Testi Sonuçları .....	30
4.2.1. Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği .....	30
4.2.2. EVA Köpük Dolgulu Alüminyum Bal Peteği .....	38
4.2.3. Hücre Boyutu Etkisi.....	45
4.2.4. Folyo Kalınlığı Etkisi.....	56
4.2.5. Folyo Kalınlığı Serbest Duvar Uzunluğu Oranının (t/l) Etkisi.....	67

4.2.6. EVA Köpük Etkisi .....	75
4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları .....	77
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>89</b>
5.1. Sonuçlar .....	89
5.2. Öneriler .....	90
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>91</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>95</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

S: hücre boyutu  
l: kenar uzunluğu  
t: folyo kalınlığı  
 $h_c$ : hücre yüksekliği  
 $\rho^*$ : gözenekli malzemenin yoğunluğu  
 $\rho_s$ : katının yoğunluğu  
F: Kuvvet  
A: Yüzey alanı  
 $h_0$ : Testi öncesi numune yüksekliği  
 $\Delta h$ : Testi öncesi ve sonrası numune yüksekliğindeki değişim  
 $\sigma$ : Gerilme  
 $\varepsilon$ : Gerinim  
 $\sigma_{c0}$ : Pik gerilme  
 $\varepsilon_{c0}$ : Kritik gerinim değeri  
 $E_f$ : Enerji verimliliği  
 $\varepsilon_a$ : Anlık gerinim  
 $\sigma_a$ : Anlık gerilme  
 $\varepsilon_d$ : Yoğunlaşma başlangıç gerinimi  
 $\sigma_{pl}$ : Plato gerilmesi  
 $U_{pl}$ : Hacim başına absorbe edilen enerji  
 $h_{bs0}$ : Basma yükü altında numune yüksekliği  
 $h_{bs1}$ : basma yükü kaldırıldıktan sonra numune yüksekliğini  
t: zaman

### Kısaltmalar

EVA: Etilen Vinil Asetat  
DCP: Dikünil Peroksit  
AZD: Azodicarbonamid  
ZnO: Çinko oksit  
TG: Termogram  
DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Bal peteği birim hücresine ait geometrik parametreler (Kee Paik vd., 1999) ..	3
Şekil 1.2. Altıgen üretimi a) Genişletme tekniği b) Kıvrırma tekniği (Bitzer, 1997).....	4
Şekil 1.3. Esneme-baskın yapıların gerilme-gerinim diyagramı (Ashby, 2005) .....	5
Şekil 1.4. Düzlemiçi ve düzlemdışı yüklenme eksenlerine ait şematik gösterim (Gibson & Ashby, 1997).....	6
Şekil 1.5. Bal peteği sandviç yapı (Aydın, 2013).....	6
Şekil 1.6. Köpürme prosesine ait şematik diyagram (Jin vd., 2019).....	7
Şekil 1.7. Polimer köpüklerin şematik basma gerilim-gerinim diyagramı (Eaves, 2004)	9
Şekil 1.8. EVA kimyasal gösterimi .....	9
Şekil 2.1. Köpük dolgulu ve dolgunsuz panele ait gerilim-gerinim eğrisi (Nia & Sadeghi, 2010) .....	16
Şekil 3.1. Hibrit malzeme üretim prosesi .....	20
Şekil 3.2. Hibrit malzeme üretimi ve pişirme esnasında kullanılan a) kontrol ünitesi ve b) ısı plakaları .....	21
Şekil 3.3. Levha yapıştırma süreci a) yapıştırıcı karışımının hazırlanması b) aplikatör c) yapıştırıcının levhaya sürülmesi d) ısı plakaları üzerinde kütleme işlemi.....	21
Şekil 3.4. Enerji verimliliği ve gerilme-gerinim eğrisine ait şematik gösterim .....	24
Şekil 3.5. Ağırlık düşürme test cihazı.....	25
Şekil 4.1. EVA ve tolüende çözünmüş EVA'ya ait a) DSC eğrileri b) TG eğrileri .....	28
Şekil 4.2. Dikünil peroksit'e ait DSC ve TG Eğrisi.....	28
Şekil 4.3. AZD ve ZnO ile karışımına ait a) DSC eğrileri b) TG eğrileri .....	29
Şekil 4.4. Dolgunsuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)	33
Şekil 4.5. Alüminyum hücre duvarlarının burkulmasına ait makro ve elektron mikroskopu görüntüleri (5,20mm-70µm-6mm) .....	33
Şekil 4.6. Dolgunsuz 5,20mm-70µm-6mm ve 14,17mm-50µm-6mm bal peteği malzemelerinin basma öncesi ve sonrası görüntüleri .....	34
Şekil 4.7. Dolgunsuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)	35
Şekil 4.8. Dolgunsuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm) .....	36
Şekil 4.9. Dolgunsuz 5,20mm-70µm-12mm bal peteği malzemesinin basma öncesi ve sonrası görüntüleri .....	36
Şekil 4.10. Dolgunsuz 5,20mm-70µm bal peteği malzemelerinin basma testi sonrası elektron mikroskopu görüntüleri a) h: 6mm b) h: 9mm c) h:12 mm .....	37
Şekil 4.11. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)	40
Şekil 4.12. Basma testi öncesi ve sonrası EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerine ait görüntüler a) 5,20 mm-70 µm-6mm b) 14,17 mm-50 µm-6mm.....	41
Şekil 4.13. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)	42
Şekil 4.14. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm) .....	42
Şekil 4.15. Basma testi sonrası EVA köpük dolgulu 5,20 mm hücre boyutu, 70 µm folyo kalınlığına sahip malzemelere ait SEM görüntüleri a) h:6 mm b) h:9 mm c) h:12 mm .....	44
Şekil 4.16. Dolgunsuz bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun pik gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	46

<b>Şekil 4.17.</b> Dolgulu bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun pik gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	47
<b>Şekil 4.18.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun kritik gerinime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	48
<b>Şekil 4.19.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun kritik gerinime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	49
<b>Şekil 4.20.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun plato gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	50
<b>Şekil 4.21.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun plato gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	51
<b>Şekil 4.22.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	52
<b>Şekil 4.23.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	53
<b>Şekil 4.24.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	55
<b>Şekil 4.25.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı .....	56
<b>Şekil 4.26.</b> Dolgusuz bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının pik gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	57
<b>Şekil 4.27.</b> Dolgulu bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının pik gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	58
<b>Şekil 4.28.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının kritik gerinime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	59
<b>Şekil 4.29.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının kritik gerinime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	60
<b>Şekil 4.30.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının plato gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	62
<b>Şekil 4.31.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının plato gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	63
<b>Şekil 4.32.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	64
<b>Şekil 4.33.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	65
<b>Şekil 4.34.</b> Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	66
<b>Şekil 4.35.</b> Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	67
<b>Şekil 4.36.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının pik gerilime etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm .....	69

<b>Şekil 4.37.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının kritik gerinime etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm .....	71
<b>Şekil 4.38.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının plato gerilmesine etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm .....	72
<b>Şekil 4.39.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının yoğunlaşma başlangıç gerinimine etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm.....	73
<b>Şekil 4.40.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm.....	75
<b>Şekil 4.41.</b> Hücre boyutunun geri yaylanma oranına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı.....	76
<b>Şekil 4.42.</b> Folyo kalınlığının geri yaylanma oranına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu .....	77
<b>Şekil 4.43.</b> Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri (Dolgunsuz 5,20mm-70µm-6mm) a) 33 J b) 50 J c) 66 J d) 83 J e) 100 J.....	79
<b>Şekil 4.44.</b> Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri (Dolgunsuz 5,20mm-70µm-6mm).....	80
<b>Şekil 4.45.</b> Farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri (Dolgunsuz 5,20mm-70µm-6mm).....	82
<b>Şekil 4.46.</b> Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri (Dolgulu 5,20mm-70µm-6mm) a) 33 J b) 50 J c) 66 J d) 83 J e) 100 J f) 117 J g) 133 J.....	83
<b>Şekil 4.47.</b> Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri (Dolgulu 5,20mm-70µm-6mm).....	85
<b>Şekil 4.48.</b> Farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri (Dolgulu 5,20mm-70µm-6mm).....	88

## TABLO LİSTESİ

<b>Çizelge 3.1.</b> Alüminyum bal peteği malzemesine ait geometrik parametreler.....	18
<b>Çizelge 3.2.</b> Polimer köpük üretiminde kullanılan maddeler ve kimyasal yapıları.....	19
<b>Çizelge 4.1.</b> Dolgusuz bal peteği çekirdek malzemelere ait t/l oranları ve yoğunluklar	68
<b>Çizelge 4.2.</b> Numunelere uygulanan darbe enerjisi, vurucu ucun hızı ve ağırlığın bırakıldığı yükseklik değerleri .....	78
<b>Çizelge 4.3.</b> Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış panellere ait yüzey hasar bölgesi görüntüsü (Dolgusuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm) .....	81
<b>Çizelge 4.4.</b> Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış malzemelere ait ön yüzey ve arka yüzey görüntüsü (Dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm).....	85
<b>Çizelge 4.5.</b> Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış malzemelere ait kesit görüntüleri (Dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm) .....	87

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle beraber yüksek mekanik dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı, aşınma direnci ve estetik görünümü ile her geçen gün kompozit malzemelere ilgi artmaktadır. Yoğunluk başına düşen dayanım olarak ifade edilen özgül dayanımın yüksek olması ve enerji sönümlenme kabiliyeti gibi seçici özellikleri ise; şüphesiz ki hafif malzeme tasarımı, üretimi ve uygulamaları konusunda yapılan çalışmalara itici güç niteliğindedir. Örnek olarak otomotiv sektörü ele alındığında, araçların hafif malzemelerden yapılması yakıt sarfiyatını azaltarak, zor koşullarda (engebeli yol vb.) hareket kabiliyetini arttırmaktadır. Bu sayede enerji verimliliği artırılır ve zararlı gazların doğaya yayılımı azaltılmış olur. Ekolojik etkinin yanı sıra, tasarlanan hafif malzemelerin yüksek enerji sönümlenme yeteneği sayesinde herhangi bir çarpışma veya üretimi esnasında alacağı darbelerle karşı araç bileşenlerinin hasara uğraması minimize edilerek güvenilirliğini de arttırmaktadır.

Enerji absorpsiyon ve ağırlık azaltma uygulamaları, savunma, inşaat, havacılık, ulaşım ve biyomedikal endüstrilerinde giderek önem kazanmaktadır. Bunun gibi kritik uygulamalar için gözenekli malzeme grubu, sahip olduğu mekanik, termal, akustik ve elektromanyetik özellikler açısından ilgi odağı haline gelmiştir(Y. Sun & Li, 2018). Gözenekli malzemeler, hücrelerin kenarlarını ve yüzeylerini oluşturan, birbirleri ile bağlantılı katı iskelet ağından meydana gelmektedir. Poligonların iki boyutta dizilimleri ile düzlemi kaplayarak paketlenen yapılar, iki boyutlu gözenekli malzemeleri temsil etmektedir(Gibson & Ashby, 1997). Bu tip yapılar, bal peteği malzemeler adı verilmektedir. Buna ek olarak, üç boyutta polihedral hücrelerin boşluğu kaplaması ile oluşan yapılar ise üç boyutlu gözenekli malzemeleri temsil eden “köpük” adı verilmektedir(Gibson & Ashby, 1997). Gözenekli malzemeler, yüksek enerji sönümlenme kabiliyetine ve buna ek olarak güçlü termal ve ısı yalıtım özelliğine sahiptir. Gözenekli yapıların en karakteristik özelliği ise katı ve gaz fazlarını içermesi sebebiyle hafif olmasıdır. Gözenekli yapılar ait morfolojik ve topografik yapının yanı sıra, gaz boşluklarının yüzeyinde bulunan ve katı kısmını oluşturan malzemenin özellikleri de yapının doğrudan fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir.

İyi korozyon ve oksidasyon direncine, yüksek sünekliğe, düşük yoğunluğa ve nispeten düşük maliyete sahip olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, hafif malzemeler alanında önemli bir yere sahiptir. Özellikle alüminyum alaşımları kullanılarak yapılan, genelde altıgen şeklinde bir dizi açık hücreden oluşan bal peteği yapısına sahip malzemeler, yüksek özgül dayanımı ve enerji sönümlenme özelliği ile öne

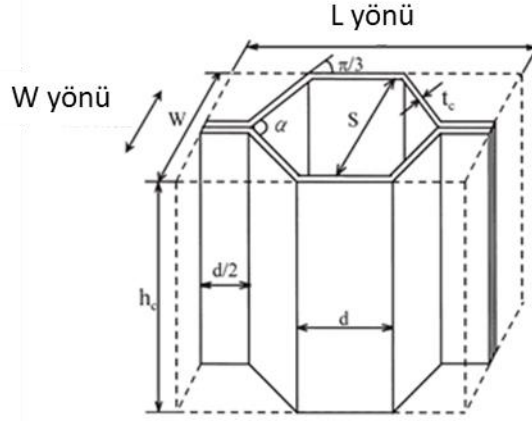
çıkmaktadır. Alt ve üst yüzey olmak üzere iki plaka arasına yapıştırıcı yardımıyla yerleştirilen bal peteği çekirdek malzemesi ile oluşturulan sandviç yapılar, düşük yoğunluğa sahiptir ve gereksinim duyulan özelliklere göre farklı konfigürasyonlarda imal edilebilmektedir (Bitzer, 1997). Alüminyum bal peteği yapıların, çeşitli mühendislik alanlarına hitap eden mekanik özellikleri sayesinde son yıllarda kullanımını giderek artmaktadır (Ciepielewski vd., 2022).

Modern teknoloji sayesinde havacılık ve uzay, otomotiv, savunma sanayi gibi kritik uygulama alanlarında yer edinmiş bir diğer hafif malzeme grubu polimer esaslı köpüklerdir (Eaves, 2004). İçerdiği gaz boşlukları sayesinde düşük yoğunluğa ve yüksek özgül dayanıma sahip olan polimer köpükler, aynı zamanda düşük üretim maliyetlidir. Polimer köpüklerin bir diğer avantajı içerisindeki boşluk oranının kontrol edilebilir, yoğunluğu ayarlanabilir ve bu şekilde farklı uygulama alanlarına yönelik imal edilebilir olmasıdır (Jin vd., 2019).

Gözenekli malzeme grubunun en önemli iki üyesi olan bal peteği malzemelerin ve polimer köpüklerin hibrit kullanımı ile üretilecek olan yeni malzemeler şüphesiz ki bu malzemelerin statik ve dinamik koşullar altında mekanik davranışlarını geliştirecek ve yeni uygulama alanlarında kullanımına olanak sağlayacaktır.

### **1.1. Bal Peteği Malzemeler (Honeycomb)**

Bal peteği malzemesi, birbiri ile birleştirilmiş çok ince levhalardan oluşan bir dizi açık hücre içerir. Genellikle çekirdek malzemesi olarak iki ince, yoğun ve güçlü levhalar arasına yerleştirilerek sandviç panellerde kullanılmaktadır (Bitzer, 1997). Bal peteği, yüksek mekanik dayanım, düşük termal iletkenlik, iyi akustik özellikler sunmaktadır. Bal peteği hücreleri, kare ve üçgen şekillerinin yanı sıra en yaygın olarak altıgen şeklinde üretilmektedir. Altıgen hücrelerin periyodik diziliminden oluşan yapı, sahip olduğu simetri sayesinde boşluksuz bir şekilde maksimum hacim kaplayabilmektedir. Bu sayede altıgen yapıyla, istenen ürün boyutları için en az malzeme kullanılmaktadır (Engin, 2011). Altıgen ağı; alüminyum, paslanmaz çelik ve titanyum gibi metalik malzemelerden veya cam fiber, Nomex, polikarbonat, Kraft kağıt gibi metalik olmayan malzemelerden de üretilmektedir. Altıgen yapıya sahip bal peteği malzemesine ait karakteristik geometrik parametreler Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Bal peteği birim hücresine ait geometrik parametreler (Kee Paik vd., 1999)

Şekil 1.1’de hücre boyutu S, kenar uzunluğu d veya l, folyo kalınlığı  $t_c$ , hücre yüksekliği ise  $h_c$  olarak sembolize edilmiştir. Malzemenin dayanımı ve kullanılabilirliği Şekil 1.1’de verilmiş olan parametreler ile ilişkilidir. Farklı konfigürasyonlara sahip bal peteği üretilebilmesi, geniş yelpazede değişen mekanik özelliklere sahip ve farklı uygulama alanlarına hitap eden malzemelerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Hücre malzemelerin özelliklerine etki eden en önemli yapısal karakteristik parametrelerden biri de bağıl yoğunluktur (Gibson & Ashby, 1997). Bağıl yoğunluk, hücre malzemenin yoğunluğunun, hücrelerin yapılmış olduğu malzemenin yoğunluğuna oranıdır ve eşitlik 1’de verilmiştir.

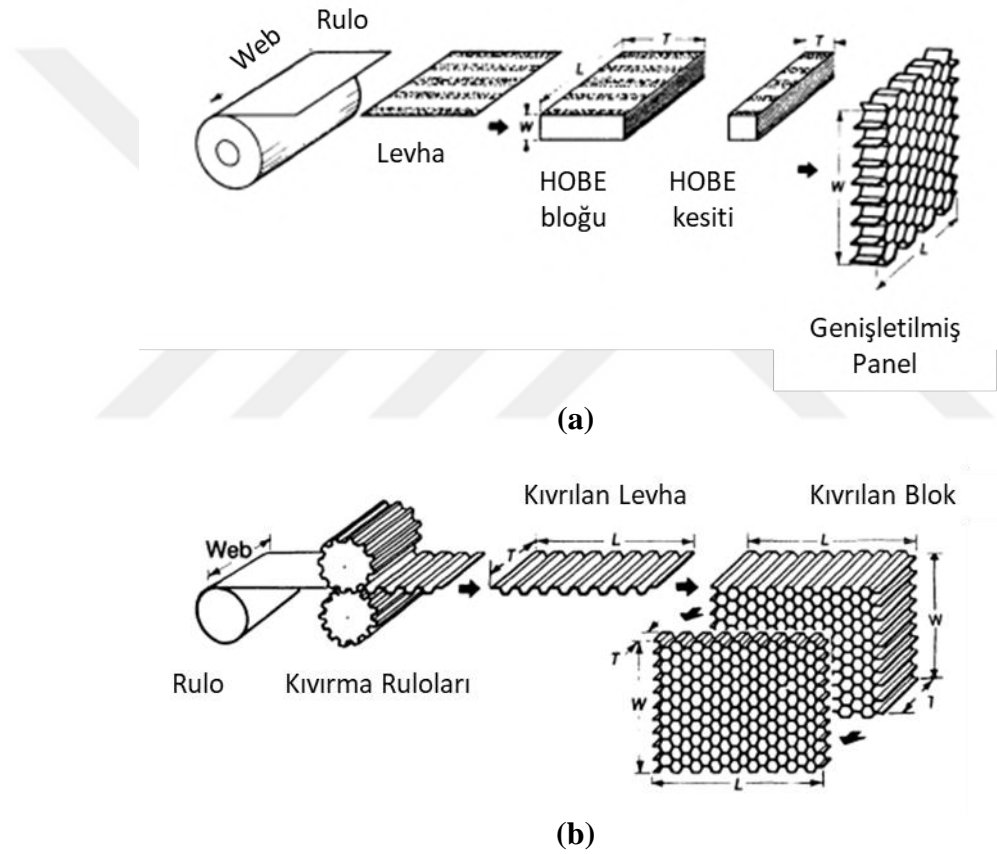
$$\text{bağıl yoğunluk} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de gözenekli malzemenin yoğunluğu  $\rho^*$  olarak, malzemenin imal edildiği katının yoğunluğu ise  $\rho_s$  olarak sembolize edilmiştir. Bağıl yoğunluk, altıgen alüminyum bal peteği malzemelerde hücre duvarı kalınlığının hücre boyutuna oranı ile ilişkilidir. Bir diğer deyişle, malzeme elde edilirken kullanılan alüminyum folyo kalınlığının, üretilen hücre boyutuna oranı malzemenin bağıl yoğunluğunun bir ölçütüdür.

### 1.1.1. Bal Peteği Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Bal peteği malzemeler, çift duvarlı (node) bölgelerin birleştirilme yöntemine göre yapıştırma, direnç kaynağı, lehimleme, difüzyon ile bağlama ve termal füzyon olmak üzere beş farklı yöntem ile üretilebilmektedir. Ancak, çoğu ticari olarak üretilen (%95)

bal peteği malzemesinde, levhalar arasındaki bağlantılar bir yapıştırıcı yardımıyla yapılmaktadır(Bitzer, 1997). Farklı kalınlığa sahip levhalardan, altıgen bal peteği malzemesi üretimi için ise genişletme (expansion) ve kıvrıma (corrugation) olmak üzere iki farklı teknik kullanılmaktadır(Bitzer, 1997). Şekil 1.2a'da şematize edilmiş olan genişletme tekniğinde, folyoların üzerine ilk olarak şeritler şeklinde yapıştırıcı uygulanmaktadır. Şerit çizgileri boyunca birbirine yapıştırılan levha bloğuna, genişletme öncesi bal peteği (HOBE) adı verilmektedir. HOBE bloğu, yapıştırıcının kurlenmesi için basınç altında yeterli sıcaklıkta pişirilir. İstenilen kalınlıklarda bloktan parça kesilerek genişletilmesi ile yapıştırıcı sürülen bölgelerde çift folyo altıgen yapıya sahip panel elde edilmiş olur.

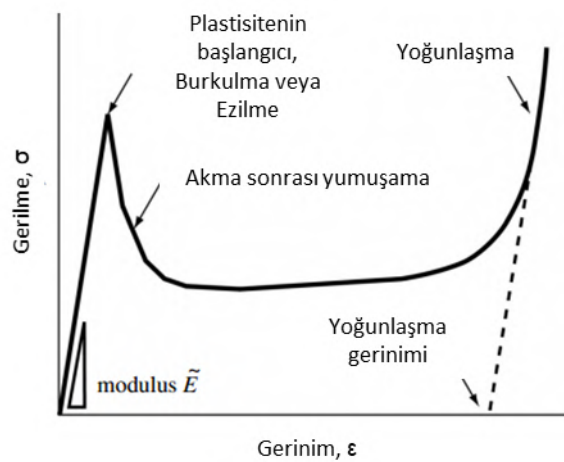


Şekil 1.2. Altıgen üretimi a) Genişletme tekniği b) Kıvrıma tekniği (Bitzer, 1997)

Kıvrıma tekniğinde ise Şekil 1.2b'de verilmiş olan oluklu yapıya sahip merdaneler yardımı ile levha kıvrılır. Kıvrılmış levhaların bağlantı noktalarına yapıştırıcı sürülerek, fırında kurlenir(Bitzer, 1997).

### 1.1.2. Alüminyum Bal Peteği Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Günümüzde birçok seramik, metal ve polimer köpükler üretilmekte ve arzu edilen mekanik gereksinimleri karşılayacak şekilde dizayn edilebilmektedir. Yapılar, hücre topolojisi ve şekline göre eğme/bükülme-baskın (bending-dominated) ve esneme-baskın (stretch-dominated) olmak üzere iki gruba ayrılır(Ashby, 2005). Esnemenin baskın olduğu gözenekli malzemelere ait basma yükleri neticesinde elde edilen gerilme gerinim diyagramı temelde üç bölümden oluşur. Bunlar; düşük gerinim değerlerinde lineer-elastik deformasyon bölgesi, neredeyse sabit gerilme olarak ilerleyen plato bölgesi ve hücre duvarlarının birbirine tamamen temas ettiği yoğunlaşma bölgesidir(Ashby & Medalist, 1983).

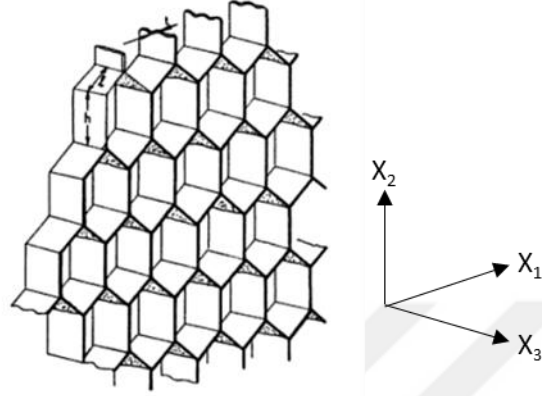


Şekil 1.3. Esneme-baskın yapıların gerilme-gerinim diyagramı (Ashby, 2005)

Şekil 1.3'den görüleceği üzere, yükleme sonrası ilk olarak yapıyı oluşturan iskelet deforme olur. Akmanın başlangıcı olarak kabul edilen bu gerilme değerinde, hücre duvarları burkulur (buckling). Burkulmanın ardından akma sonrası yumuşama bölgesi başlamaktadır. Enerji absorpsiyon uygulamaları için yoğunlaşma bölgesine kadar olan platonun uzun ve düz olması beklenir.

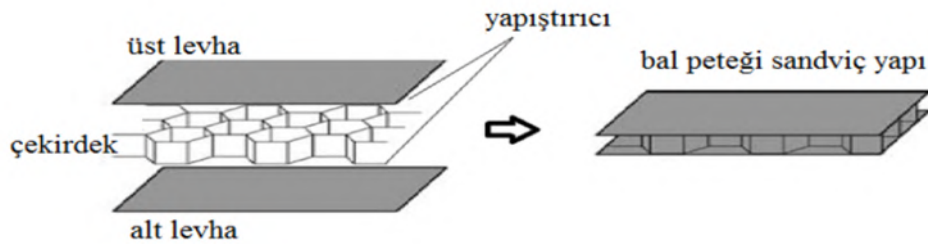
Hücre malzemelere ait yapısal özellikler, yapı iskeletini oluşturan malzemenin özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk ve kristal yapısı ile nispeten kolay işlenebilir olması sebebiyle alüminyum, altıgen yapı bal peteği malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bal peteği malzemesi olarak genellikle maksimum servis sıcaklığı  $175^{\circ}\text{C}$  olan 3003, 5052, 5056 ve nispeten yüksek sıcaklıklar ( $216^{\circ}\text{C}$ ) için 2024 alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Bitzer, 1997). Şekil 1.2'de verilmiş olan üretim prosesleri sebebiyle, altıgen şekle sahip bal peteği malzemelere ait her bir birim hücrenin iki duvarında, yapıştırıcı yardımıyla tutunan çift

folyo mevcuttur. Hücre duvar kalınlıklarındaki heterojenlik, malzemenin mekanik özelliklerinin yöne bağımlı olmasına sebep olur. Şekil 1.4’de altıgen yapılı bal peteği malzemesi ve yükleme eksenleri verilmiştir. Malzemenin  $X_1$  (W yönü) ve  $X_2$  (L yönü) düzlemlerinde uygulanan yüklerde ve  $X_3$  (T yönü) uygulanan kuvvetlere verdiği tepki sırasıyla düzlem içi ve düzlem dışı özellikler olarak adlandırılır.



Şekil 1.4. Düzlemiçi ve düzlemdışı yükleme eksenlerine ait şematik gösterim (Gibson & Ashby, 1997)

Bal peteği malzemeler, genellikle iki rijit plaka arasında çekirdek malzeme olarak kullanılmaktadır. Plakaların, uygun yapıştırıcı ile çekirdeğe yapıştırılması sonucunda karakteristik mekanik özelliklere sahip sandviç yapılar elde edilebilmektedir. Düzlem dışı basma yükleri altında dayanımı yüksek olması sebebiyle genellikle plakalar arasında T yönünde yerleştirilir. Sandviç yapılar, yüzey plakalar, çekirdek malzeme ve yapıştırıcı olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 1.5’te sandviç yapıya ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 1.5. Bal peteği sandviç yapı (Aydın, 2013)

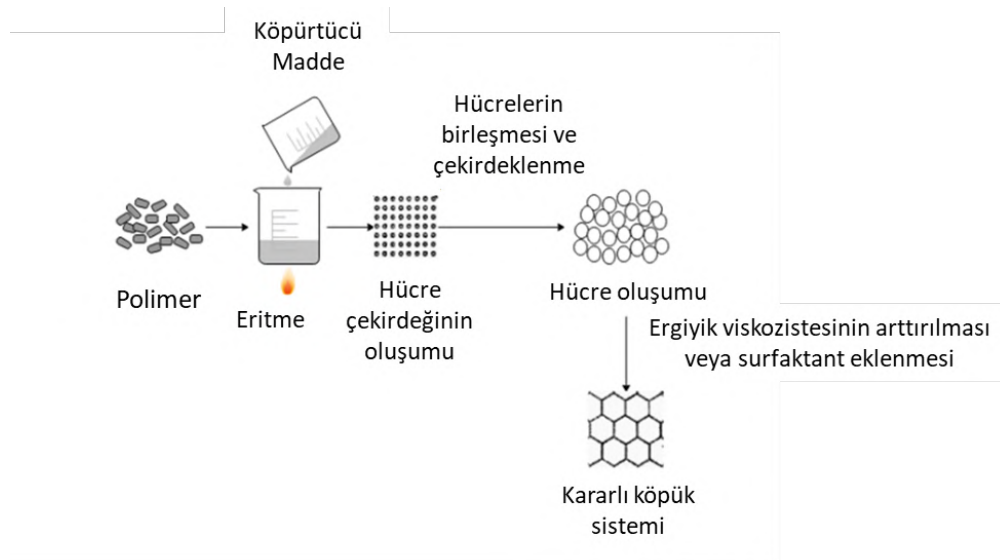
Uygulama alanına göre sandviç yapılarda yüzey levhası olarak alüminyum alaşımları, çelikler, titanyum ve kompozit malzemeler kullanılabilir (Kee Paik vd., 1999). Aynı zamanda farklı malzemelerden yapılmış olan farklı şekillere sahip çekirdek malzemeleri de kullanılabilir. Ancak en yaygın olarak, altıgen şeklindeki ince folyolardan oluşan bal peteği kullanılır (Kee Paik vd., 1999).

## 1.2. Polimer Köpükler

Hücresel malzeme ailesinden olan birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılan ve çeşitli özellikler sunan gruplarından biri de polimer köpüklerdir. Polimer köpükler, bir polimer matrisle çevrili gaz boşluklarını içeren düşük yoğunluklu malzemelerdir. Yığın polimer malzemelerle karşılaştırıldığında, polimer köpüğün düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtımı, iyi ses yalıtımı, yüksek özgül dayanım ve korozyon direnci gibi birçok avantajı vardır(Jin vd., 2019). Polimer köpükler; üretilmiş oldukları polimerin doğasına göre termoplastik (polietilen, polipropilen vb.) veya termoset (poliüretan, epoksi vb.) köpükler olarak sınıflandırılabilir. Benzer şekilde, mekanik özelliklerine göre esnek veya rijit; bağıl yoğunluklarına göre düşük veya yüksek yoğunluklu; hücre tipine göre açık veya kapalı gözenekli olmak üzere farklı parametreler ile de gruplandırılabilir(Ruiz-Herrero vd., 2017). Polimer köpükler, sahip olduğu elastik özellikler, kimyasal direnç, mekanik dayanım, yalıtım özellikleri sayesinde paketlenme, otomotiv, biyomedikal, termal izolasyon, elektrik ve elektronik havacılık gibi geniş uygulama alanlarında yer edinmiştir.

### 1.2.1. Polimer Köpük Üretim Yöntemleri

Polimer köpük üretiminde en yaygın yöntemler, sıcak sıvı polimer içerisinde gaz kabarcıklarının dağıtılması ve bu kabarcıkların büyüyerek kararlı hale getirilmesi, ardından malzemenin katılaştırılması aşamalarını içermektedir.



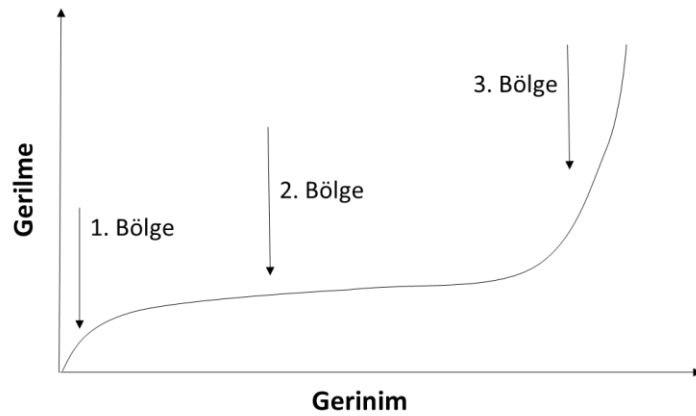
Şekil 1.6. Köpürme prosesine ait şematik diyagram (Jin vd., 2019)

Sıcak polimerin reolojisi ve yüzey gerilimine bağlı olarak proses sonucunda elde edilen köpük açık veya kapalı hücreli olabilmektedir. Gaz kabarcıklarının oluşumu,

sıvının mekanik olarak karıştırılması veya çeşitli köpürtücü ajanlar yardımı ile gerçekleşmektedir. Köpürtücü ajanlar, gaz salınması mekanizmasına göre kimyasal ve fiziksel olarak iki gruba ayrılmaktadır. İnorganik azot, karbondioksit, su, hava ve organik pentan, heksan, dikloroetan gibi ajanlar fiziksel köpürtücü sınıfındadırlar(Jin vd., 2019). Bu maddeler ile polimer herhangi bir kimyasal reaksiyona girmez. Gerekli sıcaklık ve basınç koşulları optimize edilerek, tamamen fiziksel proseslerle köpürtme sağlanır. Kimyasal köpürtücü maddeler, genellikle katı formdadır. Termal bozunma veya kimyasal reaksiyon ile gaz salınımı sağlanır. Bikarbonat, karbonat ve nitrit içeren inorganik maddeler ise termal olarak bozularak kimyasal köpürtücü olarak kullanılırlar. Kararlı gaz çıkışı, homojen köpük ve iyi dağılılabirlik sunan organik köpürtücüler ise izosiyanat bileşenleri (reaktif), termal olarak bozulan azo köpürtücü maddeler kimyasal köpürtücü grubunda bulunmaktadır(Jin vd., 2019).

### **1.2.2. Polimer Köpüklerin Mekanik Özellikleri**

Polimer köpüklerin mekanik özellikleri, köpüğün yoğunluğuna, gözenek boyutuna, gözenek türüne ve malzeme çeşidine bağlıdır(Dalongeville vd., 2017). Bütün köpüklere ait basma gerilim-gerinim diyagramları üç bölgeden oluşmaktadır. Basma gerilim-gerinim diyagramına ait şematik gösterim Şekil 1.7’de verilmiştir. Birinci bölge, lineer Hookian davranışı temsil etmektedir. Bu bölgede lineer elastik davranış, hücre duvarlarının eğilmesi (bending) ile kontrol edilmektedir. Kapalı hücreli köpüklerin içerdiği gaz basıncı sebebiyle hücre duvarlarının gerilmesi (stretch) de söz konusudur. İkinci bölge ise hücre duvarlarının burkulması ile başlar ve hücrelerin ardı ardına çökmeye başlaması ile plato şeklinde devam eder (Dalongeville vd., 2017). Bu bölge, hücrelerin plastik deformasyonunu içerdiğinden aynı zamanda malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin de bir ölçütüdür. Son olarak, basma yükleri altında hücre duvarlarının birbirine temas etmeye başlaması ile yoğunlaşma bölgesi adı verilen üçüncü bölge oluşur. Bu bölgede gerilme, sınırlı basma gerinim aralığında diyagramdan görüleceği üzere keskin bir şekilde artar. Kullanılan polimer köpüğün yoğunluğu arttıkça, 1.bölgeden elde edilen Young modülü ve plato gerilimi artmaktadır. Yoğunlaşma ise daha düşük bir gerinim değerinde başlamaktadır. Aynı zamanda, kapalı hücreli köpüklerde hücre içindeki gaz basıncı, plato ve yoğunlaşma bölgelerini daha çok etkilemektedir(Eaves, 2004).

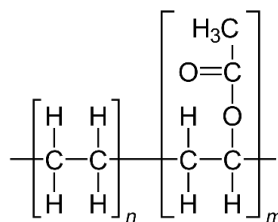


Şekil 1.7. Polimer köpüklerin şematik basma gerilim-gerinim diyagramı (Eaves, 2004)

Polimer köpükler, enerji absorpsiyon uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Elastomerik köpüklerde, darbe ile yapıya aktarılan enerji köpüğe ait hücrelerin elastik olarak burkulması ile depolanır ve darbe sonrası tekrar salınır. Polistiren gibi gevrek köpüklerde ise darbe enerjisi, hücrelerin kırılması ve ezilmesine harcanır. Plastik köpüklerde ise enerji, hücrelerin plastik akışı ile absorbe edilir. Örneğin, kapalı hücrelere sahip polietilen köpüklerde ilk darbeye plastik olarak deformasyona uğrayan hücreler, yük kaldırıldıktan belli bir sonra geri yaylanma gösterirler(Eaves, 2004). Bunun sebebi, kapalı hücrelerin içerisinde bulunan gazlar yük altında sıkışmakta ve hücresel matriste depolanan potansiyel enerji sayesinde hücrelere geri çekilmektedir(Kuncir vd., 1990). Bu sayede çoklu darbe yükleri içeren uygulama alanlarında kullanılabilir.

### 1.2.3. Etilen Vinil Asetat (EVA) Köpük

Etilen vinil asetat kopolimeri (EVA), etilen ve vinil asetat tekrarlayan birimlerini içeren yapıştırıcı, kaplama, kablo endüstrisi, ses yalıtımı, güneş pili kapsülleri, ayakkabı malzemesi endüstrisi gibi çeşitli alanlarda sıkça kullanılan polimer grubudur(Yetgin vd., 2016). Şekil 1.8’de EVA kimyasal gösterimi verilmiştir. EVA kopolimerinin yoğunluk, kimyasal direnç gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri vinil asetat içeriğine bağlıdır. Elde edilmek istenen vinil asetat içeriğine göre farklı üretim teknikleri ve bu içerik miktarına bağlı olarak farklı kullanım alanları vardır.



Şekil 1.8. EVA kimyasal gösterimi

Polietilenden farklı olarak EVA kopolimerde yoğunluk vinil asetat içeriği ile ilişkilidir (%2-50) (Henderson, 1993). Vinil asetat içeriği, kopolimerin polimer segmentleri tarafından oluşan kristalin bölgelerin bozulmasına sebep olur(Henderson, 1993; Verdejo, 2004). %40 vinil asetat içeriğinin üzerinde kopolimer tamamen amorfudur. Düşük kristalinite, yüksek esneklik sağlar ancak düşük sertliğe sebep olur. Aynı zamanda yüksek vinil asetat içeriği, EVA'nın polaritesini artırarak, plastikleştirici ve köpükleştirici maddelerle uyum sağlamasını kolaylaştırır(Verdejo, 2004). Koşu ayakkabılarında genellikle %18-22 aralığında vinil asetat içeriğine sahip EVA kullanılır(Verdejo, 2004).

Günümüzde çeşitli uygulama alanlarında spesifik dayanımı yüksek malzeme ihtiyacı artmaktadır. Bu alanlarda Etilen vinil asetat kopolimeri yaygın olarak kauçuk ile karıştırılarak köpük formunda kullanılır. EVA köpük, düşük yoğunluklu polietilenden daha yüksek esnekliğe sahiptir. Aynı zamanda, üretim esnasında eklenen çapraz bağlayıcı ajanlar yardımıyla yapı, yüksek sıcaklığa daha dirençli hale getirilir. Endüstride EVA köpüklerin üretiminde, köpürtücü ajan, çapraz bağlayıcı, köpük hızlandırıcı, yağlayıcı ve dolgu malzemeleri kullanılmaktadır.

### **1.3. Polimer Dolgulu Bal Peteği Yapılar**

Bal peteği çekirdek malzemesine sahip sandviç yapılar, düşük ağırlık ve yüksek dayanımları ile günümüzde birçok uygulama alanında yer edinmişlerdir. Bu malzeme grubunda yapılan son çalışmalar, çekirdek malzeme içerisine yapılan polimer dolgunun enerji absorpsiyon kapasitesini arttırdığı ve polimerin özelliklerine bağlı olarak diğer mekanik özelliklerin de geliştirilebileceği yönündedir (Nia & Sadeghi, 2010). Polimer malzemeler üretimi kolay, özellikleri iyileştirilebilirdir. Polimerin özellikleri, yapısal bileşenlerine bağlıdır. Günümüzde polimerlerin üretim teknikleri ve nanoteknoloji sayesinde yapılan katkılar ile geniş yelpazede özellik gereksinimlerine karşılık verilebilmektedir. Araştırmacılar, kritik uygulama alanlarında kendine yer edinmiş yüksek özgül dayanımlı malzemelerin enerji sönmleme kabiliyetlerini geliştirmek amacıyla hafif metalik/polimerik köpüklerden yararlanmışlardır. Bu çalışmalar çoğunlukla ince cidarlı tüp malzemelerin içerisine honeycomb veya polimerik dolgu ile desteklenmesi suretiyle yapılmıştır(Duarte vd., 2019; Zarei & Kröger, 2007). Bazı çalışmalar, köpük dolgusunun, yapının çarpma dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir(Hanssen vd., 2000; Seitzberger vd., 2000). Ancak, altıgen yapıya sahip

alüminyum malzemelerin, polimer köpük ile desteklenmesi hususunda deneysel çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

Bu çalışma kapsamında, alüminyum bal peteği çekirdek malzemesine sahip sandviç yapılar içerisine düşük yoğunluklu, polimer esaslı EVA köpüklerin dolgu malzemesi olarak kullanılması ile enerji absorblama yeteneği modifiye edilmiş hibrit malzemeler üretilecektir. Deneysel çalışmalar ile geometrik ve kimyasal parametreleri optimize edilen hibrit malzemeler, otomotiv, havacılık ve uzay başta olmak üzere birçok alanın ihtiyaçlarını karşılayabileceği ve ülkemizde henüz gelişmekte olan polimer dolgulu gözenekli yapılar hususundaki çalışmalara katkı sağlaması beklenmektedir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Wu ve Jjiang (1997), farklı hücre boyutu ve yüksekliğe sahip 5052 ve 5056 alüminyum alaşımlarından üretilmiş altıgen yapılı bal peteği malzemelerin düzlem dışı basma ve yüksek hızlı darbe yükleri altında hasar davranışlarını incelemiştir(E. Wu & Jjiang, 1997). Hücre boyutu azaldıkça, malzeme daha yüksek yüklerde plastik deformasyona uğramaktadır. Çalışma neticesinde, iyi bir enerji absorbe edici malzeme için düşük hücre boyutuna, düşük hücre yüksekliğine ve yüksek dayanıma sahip altıgen malzeme kullanımı önerilmiştir.

Wilbert vd. (2011), 9,53 mm hücre boyutu ve 15,9 mm yüksekliğe sahip alüminyum 5052-H39 alaşımına sahip altıgen yapılı bal beteği malzemesinin quasi static düzlem dışı basma yüklemeleri altındaki burkulma ve hasar davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Belli bir yük altında hücreler burkulmaktadır ve bu yükün ötesinde malzeme nispeten daha düşük gerilmeler altında deformasyona uğrayarak katlanma eğilimine girmektedir. Hücre duvarlarında ardışık şekilde gerçekleşen burkulma ve katlanma süreci neticesinde yükleme altında malzemede bir gerilim osilasyonu meydana geldiği belirtilmiştir(Wilbert vd., 2011).

Xu vd. (2012), farklı gerinim hızlarında gerçekleştirilen düzlem dışı basma testlerinde, Al 5052-H39 alaşımına sahip bal peteği malzemesine ait numune boyutu, hücre boyutu ve bağıl yoğunluk parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Artan numune boyutu ile düzlem dışı basma yükleri altında elde edilen ortalama plato kuvvetinin arttığını belirtmişlerdir. Yüksek gerinim hızlarında, malzemeye ait yoğunlaşma gerinim değeri artmıştır. Ayrıca, duvar kalınlığının hücre kenar uzunluğuna oranı olarak belirtilen  $t/l$  oranının malzemenin dinamik özellikleri üzerinde önemli etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir(Xu vd., 2012) . Benzer şekilde, Mertani vd. (2019) Al 3003 H18 alaşımından imal edilmiş altıgen yapılı bal peteği çekirdek malzemelerine ait hücre boyutu ve numarası, çekirdek yoğunluğu, numune boyutu parametrelerinin düzlem dışı basma davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışma neticesinde, artan numune boyutu ile ezilme kuvvetinin arttığını ve düşük hücre boyutlarında enerji absorpsiyon kapasitesinin arttığını belirtmişlerdir(Mertani vd., 2019).

Khan ve ark. (2012), Al 3003 alaşımından imal edilmiş 8.2mm hücre boyutuna sahip altıgen bal peteği çekirdek malzemesini üç farklı yönde basma testine tabi tutmuşlardır. Malzeme, en yüksek dayanımı düzlem dışı yöndeki yüklemelerde göstermiştir. Düzlem içi yüklemelerde ise deformasyon süresinde malzeme, şerit

yönünde (L), genişletme yönüne (W) kıyasla iki kat daha fazla enerji absorbe etmiştir(Khan vd., 2012). Bu ve diğer çalışmalarda (Gibson & Ashby, 1997; Mohr & Doyoyo, 2003) da belirtildiği gibi bal peteği malzemesine ait farklı yapısal konfigürasyonlar, malzemenin anizotropik olmasına sebep olmaktadır. Düzlem dışı yani  $X_3$  yönünde (Şekil 1.4) malzemeye ait elastiklik modülü ve akma gerilimi düzlem içi yönünden daha yüksektir. Khan ve ark. (2013) yaptıkları bir başka deneysel ve nümerik çalışmada, artan alüminyum bal peteği çekirdek malzemesine ait numune boyutu ile düzlem içi mekanik özelliklerin değişmediğini belirtmişlerdir. Artan hücre boyutu ile mekanik dayanımın düştüğünü ve buna ek olarak duvar kalınlığındaki artışı ile daha iyi mekanik özellikler sağlanabildiğini belirtmişlerdir(Khan & Wang, 2013).

Ashab vd. (2015) gerinim hızı etkisini incelemek amacıyla alüminyum bal peteği çekirdek malzemelerini, düzlem dışı basma ve indentasyon testine tabii tutmuşlardır. Yırtılmanın (tearing) etkisi ile indentasyonda ortalama plato gerilimi ve toplam yayılan enerji, basmada elde edilen değerlerden daha yüksek bulunmuştur. Aynı zamanda bu değerlerin artan gerinim hızları ve artan numune yoğunluğu ile arttığını belirtmişlerdir(Ashab vd., 2015).

Paik vd. (1999) A3003-H19 altıgen çekirdek malzemesi ve A5083-H321 alüminyum yüzey levhası kullanarak elde ettikleri sandviç yapıların dayanım karakteristiğini belirlemek amacıyla üç noktadan eğme, burkulma/çökme testi (düzlem içi basma) ve yanal basınç altında ezilme testi gerçekleştirmişlerdir. Çekirdek kalınlığı arttıkça, plastik deformasyon başlangıcı gecikmiş ve malzemenin dayanımı artmıştır. Ayrıca, düzlem içi basma yükleri altında da sandviç panelde kullanılan çekirdek malzemenin yüksekliği, basma dayancına etki eden önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Ancak, çekirdek yüksekliği arttıkça yük altındaki sandviç yapılarda tabakalar arası ayrılma oluşmakta ve çökme meydana geldiğini belirtmişlerdir(Kee Paik vd., 1999).

Khan (2006), yaptıkları çalışmada A3003 alaşımından imal edilmiş farklı kalınlıkta altıgen yapılı çekirdek malzemelerin yüzeylerine alüminyum levha veya cam fiber tabaka yerleştirerek düzlem içi ve düzlem dışı basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma neticesinde, sandviç yapıya ait basma dayancının çekirdek kalınlığından ziyade birincil olarak yüzey levhasına bağlı olduğunu; ince alüminyum levha ile oluşturulan sandviç yapıların kalın cam fiber levhalılara göre daha yüksek basma dayancına sahip olduğu ortaya konulmuştur(Khan, 2006).

Akil Hazizan ve Cantwell (2003), cam fiber/epoksi kumaş yüzey katmanı kullanılarak farklı yükseklikte altıgen alüminyum çekirdek malzemesi ile sandviç malzemelerini eğilme, kayma, indentasyon ve düşük hızlı darbe testine tabi tutmuşlardır(Akil Hazizan & Cantwell, 2003). Sun vd. (2021) daha kapsamlı olarak düşük hızlı darbe testinde, altıgen alüminyum çekirdek malzemesi ile oluşturulan sandviç yapılarıdaki yüzey levha kalınlığı, çekirdek yüksekliği, hücre boyutu ve alüminyum film kalınlığı gibi kritik yapısal parametrelerin etkilerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmaya göre darbe sonrası yüzey levhası ve çekirdekte darbe bölgesinde yoğunlaşan lokalize mod ve eğilme sebebiyle üst levhada kıvrılma, arka levhada şişme ve bütün çekirdek malzemenin hasara uğradığı mod olmak üzere iki çeşit hasar modu gözlemlenmiştir. Sandviç yapıda oluşacak hasar modunun, esasen levha kalınlığı, hücre boyutu ve film kalınlığına bağlı olduğunu, hücre yüksekliğinin ise önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Artan levha kalınlığı ile perforasyon eşik enerjisinin arttığı ve buna ek olarak küçük hücre boyutu ve kalın folyo kalınlıklarında düşük delinme direnci tespit edilmiştir(G. Sun vd., 2021).

Gözenekli malzemeler grubunun önemli bir diğer üyesi olan polimer köpükler ise farklı uygulama alanları için uygun mekanik özellikler sunabilmektedir. Bureau vd. (2005) farklı yoğunluklardaki polietilen (PE) köpükleri basma ve darbe testine tabi tutmuşlardır ve neticesinde düşük hücre boyutlarında, elastisite (basma) modülünün arttığını tespit etmişlerdir. Aynı yoğunluk, farklı hücre boyutlarına sahip numunelerin de araştırıldığı çalışmada, yoğunluk/ortalama hücre çapı ( $\rho/d$ ) oranının, polimer köpüklerin özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir katsayı olabileceğini belirtmişlerdir(Bureau vd., 2005).

Gong vd. (2005) benzer bağıl yoğunluklara ancak farklı gözenek boyutlarına sahip polyster üretan köpüklere iki yönde basma testi uygulamışlardır. Farklı hücre boyutu dağılımı yapıdaki basma davranışının yöne bağımlı olmasına sebep olduğu ancak hücre boyutu küçüldükçe yapıdaki anizotropinin azaldığı belirtilmiştir. Çalışmada aynı zamanda, polimer köpüğe ait viskoelastik özelliklerin saptanması amacıyla farklı gerinim hızlarında basma testi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, artan gerinim hızıyla malzemeden elde edilen başlangıç modülünün, maksimum yük taşıma kapasitesinin ve plato geriliminin arttığı belirlenmiştir(Gong vd., 2005).

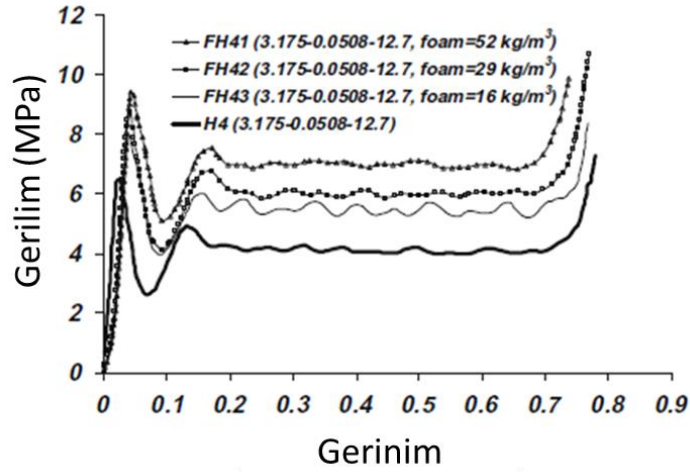
Yao vd. (2012) orta yoğunluk lineer orta yoğunluklu polietilen kullanılarak azodikarbonamid kimyasal köpürtücü ajan yardımı ile basınçlı kalıplama yöntemi kullanılarak farklı yoğunluk profiline sahip polietilen köpükler elde etmişlerdir. Elde

edilen köpüklere uygulanan çekme ve üç noktadan eğme testleri sonucunda köpüğe ait ortalama yoğunluktan ziyade yoğunluk gradyeninin çekme modülü ve eğilme modülü üzerinde etkili bir parametre olduğu belirtilmiştir(Yao & Rodrigue, 2012).

Rajput vd. (2019), ticari olarak temin ettikleri polimetakrilimid (PMI), poliüre/polivinil klorür (IPN) ve polietilen tereftalat (PET) köpükleri ve bu köpüklerden elde edilen sandviç yapılara düzlem dışı basma testi uygulamışlardır. Çalışma neticesinde, test esnasında alınan yer değiştirme ölçümlerinin alındığı noktalar basma modülünün değişkenlik gösterdiği ve ayrıca numune boyutu büyüdükçe basma çeneleri ile arasında oluşan sürtünme sebebiyle daha yüksek basma modülü elde edildiği tespit edilmiştir(Rajput vd., 2019).

Literatürde yapılan çalışmalara göre statik ve dinamik şartlar altında polimer köpüğe ait mekanik özellikler, matrisi oluşturan polimerin doğasına, köpüğün yoğunluğuna, hücre morfolojisine ve numune boyutu ile ilişkilidir(Rodríguez-Pérez, 2005). Polimer malzeme seçimi ve köpük üretim prosesleri gerekli özelliklerin elde edilmesi için büyük önem arz etmektedir.

Alüminyum bal peteği malzemeleri ve polimer köpüklerin özellikleri, bu iki malzemenin bir arada kullanılması ile oluşturulan dolgulu bal peteği malzemeleri çalışmalarının önünü açmıştır. Nia ve ark. 2010 yılında yaptıkları çalışmada, farklı yoğunluklara (52, 29, 16 kg/m<sup>3</sup>) sahip poliüretan köpük dolgusunun, yarı-statik basma yüklemesi altında bal peteği çekirdek hücrelerine sahip alüminyum panellerin plastik davranışına etkisini incelemişlerdir(Nia & Sadeghi, 2010). Deneysel olarak yürütülen çalışmada, dayanım ve enerji sönümleme kapasitesini belirlemek amacıyla yapılan testlerde, farklı hücre boyutları, farklı duvar ve panel kalınlıklarına sahip bal peteği malzeme kullanmışlardır. Örnek olarak, 3,175 mm hücre boyutuna, 0,0508 mm hücre duvarı kalınlığına ve 12,7 mm panel kalınlığına sahip dolgusuz bal peteği malzemesi (H4) ve aynı geometrik parametrelere sahip 16, 29, 52 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki polimer dolgulu bal peteği malzemesinin (FH41, FH42, FH43) gerilim-gerinim eğrisi Şekil 2.1'da verilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, köpük dolgulu panellere ait ortalama çarpma dayanımı ve enerji absorpsiyon kapasitesi artmıştır. Ayrıca bütün testlerde köpük dolgulu panellerin ortalama çarpma dayanımı, dolgusuz bal peteği ve köpük dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Daha ince hücre kalınlığına sahip dolgusuz bal peteği malzemelerin düşük dayanımları, köpük dolgusu ile tolere edilebileceği belirlenmiştir (Nia & Sadeghi, 2010).



Şekil 2.1. Köpük dolgulu ve dolgunsuz panele ait gerilim-gerinim eğrisi (Nia & Sadeghi, 2010)

Nia ve Sadeghi 2013 yılında yaptıkları bir başka çalışmada, 3,175 ve 4,76 mm hücre boyutu, 0,0508 mm hücre duvarı kalınlığı ve 19,05 mm panel kalınlığına sahip alüminyum bal peteği malzemeleri içerisine 16, 29 ve 52 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip poliüretan köpük dolguları yaparak üretilen malzemelerin basma davranışına gerinim hızının etkisini incelemiştirler. Gerinim hızları, 0,0022 s<sup>-1</sup> - 5,25 s<sup>-1</sup> - 10,5 s<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, altıgen çekirdek malzemeli panellerin ortalama çarpma dayanımının gerinim hızından önemli oranda etkilendiği gözlemlenmiştir. Dolgunsuz bal peteği malzemelerine ait plato geriliminin, polimer dolgulu örneklerle kıyasla gerinim hızına bağlı daha dikkate değer artış sergilediği belirlenmiştir (Alavi Nia & Sadeghi, 2013).

Mahmoudabadi ve Sadeghi (2009), statik ve dinamik yükler altında 40 ve 90 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip poliüretan dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait mekanik davranışı incelemiştirler. Deneysel çalışma kapsamında yapılan yarı-statik basma ve düşük hızlı darbe testleri sonucunda, köpük dolgulu malzemelere ait pik yükünün ortalama çarpma yüküne oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu oranın, dolgu olarak kullanılan poliüretan köpüğün artan yoğunluğu ile azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dolgunsuz bal peteği malzemesi ile kıyaslandığında, dolgulu yapıların ortalama çarpma dayanımının %30 arttığı belirtilmiştir (Mahmoudabadi & Sadighi, 2009).

Liu ve ark. (2017), 0,062 mm hücre duvarı kalınlığına, 6,2 mm hücre uzunluğuna sahip AA3003 alaşımından imal edilmiş bal peteği malzemesini diğer çalışmalardan farklı olarak 20, 40, 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki genişletilmiş polipropilen köpük (EPP) ile doldurmuşlardır. Elde edilen polimer köpük dolgulu malzemenin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla aksel ve yatay yükleme ile yarı-statik şartlarda basma testi

yapmışlardır. Çalışmanın neticesinde, eksenel yükleme koşullarında dolgulu bal peteği malzemesinin pik dayanımı, ortalama çarpma dayanımı ve toplam enerji absorpsiyon miktarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, yatay yükleme koşullarında artan köpük yoğunluğu ile absorbe edilen enerji ve spesifik enerji absorpsiyon miktarının arttığı tespit edilmiştir(Liu vd., 2017).

Zhang ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, Liu ve ark. (2017)'de parametreleri belirtilen EPP köpük dolgulu alüminyum bal peteği hücrelere sahip malzemelerin dinamik darbe yükleri altında mekanik davranışını incelemişlerdir. Düşük hızlı darbe testi neticesinde, dolgusuz petek malzemelere kıyasla EPP dolgulu bal peteği yapılara ait darbe karakteristiğinin olumlu yönde bir artış sergilediğini belirtmişlerdir(Zhang vd., 2019).

Mohamadi ve ark. (2021), elastomerik malzemelerin yüksek darbe direnci ve viskoelastik sönümlenme kabiliyetine vurgu yaparak, bu amaçla elastomerik poliüretan malzemesi dolgulu alüminyum bal peteği malzemesi üretmişlerdir. Polimere farklı oranlardaki cam mikrobalon takviyesinin etkisinin de incelendiği çalışmada, dolgulu malzemeler basma ve düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, elastomer dolgulu malzemelerin enerji absorpsiyon oranının yarı statik şartlar altında %20 arttığı, ancak spesifik enerji absorpsiyon oranına önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Cam mikrobalon takviyesinin ağırlığı düşürerek, enerji absorpsiyon kabiliyetini arttırdığı ve buna ek olarak dolgu malzemesi ile üretilen bal peteklerinde kalıcı deformasyonun nispeten düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, enerji absorber olarak elastomer bazlı köpüklerin dolgu olarak kullanılmasının neticesinde darbe sonrası dahi malzemenin enerji sönümlenme kabiliyetinin halen mevcut olduğu belirtilmiştir(Mohamadi vd., 2021).

Alüminyum bal peteği hücrelere sahip malzemelerde dolgu maddesi olarak polimer köpüklerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, literatürün poliüretan ve polipropilen ile sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır. Polimer köpük dolgulu bal peteği malzemelere ait gerek mekanik gerekse diğer karakteristik özellikleri incelenerek, havacılık-uzay, savunma, otomotiv ve diğer kritik uygulama alanlarına uygun hafif malzemeler üretmek büyük önem arz etmektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Tez kapsamında farklı yükseklik, folyo kalınlığı ve farklı hücre boyutuna sahip alüminyum 3005 H19 alaşımından üretilmiş altıgen yapılı alüminyum bal peteği çekirdek malzemeleri Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnşaat Panel San. Tic. Ltd. Şti. şirketinden temin edilmiştir. Temin edilmiş olan malzemelere ait geometrik parametreler ve yoğunluk değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Alüminyum bal peteği malzemesine ait geometrik parametreler

HC No	Hücre Boyutu (mm)	Folyo Kalınlığı (mm)	Yükseklik (mm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	t/l oranı (mm/mm)
1	5,2	0,05	6		
1	5,2	0,05	9	69,76	0,0167
1	5,2	0,05	12		
1	5,2	0,07	6		
1	5,2	0,07	9	97,66	0,0233
1	5,2	0,07	12		
2	6,78	0,05	6		
2	6,78	0,05	9	53,50	0,0128
2	6,78	0,05	12		
2	6,78	0,07	6		
2	6,78	0,07	9	74,90	0,0179
2	6,78	0,07	12		
3	8,66	0,05	6		
3	8,66	0,05	9	41,89	0,01
3	8,66	0,05	12		
3	8,66	0,07	6		
3	8,66	0,07	9	58,64	0,0140
3	8,66	0,07	12		
3	8,66	0,1	6		
3	8,66	0,1	9	83,78	0,02
3	8,66	0,1	12		
4	10,39	0,05	6		
4	10,39	0,05	9	34,91	0,0083
4	10,39	0,05	12		
4	10,39	0,07	6		
4	10,39	0,07	9	48,88	0,0117
4	10,39	0,07	12		
4	10,39	0,1	6		
4	10,39	0,1	9	69,83	0,0167
4	10,39	0,1	12		
5	14,17	0,05	6		
5	14,17	0,05	9	25,60	0,0061


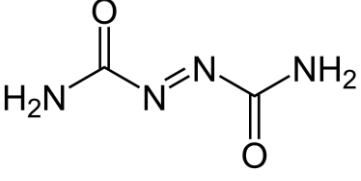

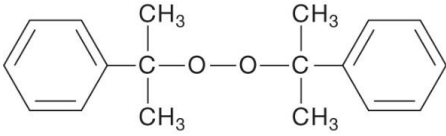

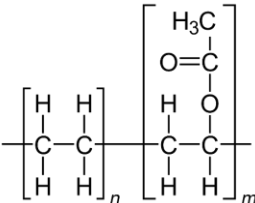

5	14,17	0,05	12		
5	14,17	0,07	6		
5	14,17	0,07	9	35,84	0,0086
5	14,17	0,07	12		
5	14,17	0,1	6		
5	14,17	0,1	9	51,20	0,0122
5	14,17	0,1	12		

Sandviç malzeme yapımında ise 5754 alüminyum alaşımından üretilmiş 0,5 mm kalınlığa sahip levhalar ve iki bileşenli poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır.

Ticari EVA köpük üretimlerinde kullanılan, düşük maliyetli ve prosese uygun olan kimyasallar seçilmiştir. Polimer köpük için GREENFLEX ML 50 etilen vinil asetat kopolimer granülleri temin edilmiş olup, teknik verilerine göre ergime sıcaklığı 83 °C, yoğunluğu 0,941 g/cm<sup>3</sup> ve vinil asetat içeriği %19'dur. Köpürtücü madde olarak termal olarak bozulan azodikarbonamid ve aktivatör olarak çinko oksit kullanılmıştır. Çıkan gazların homojenliğinin sağlanması, daha kararlı hale getirilmesi ve malzemenin daha dayanımlı olması amacıyla çapraz bağlayıcı olarak dikünil peroksit kullanılmıştır.

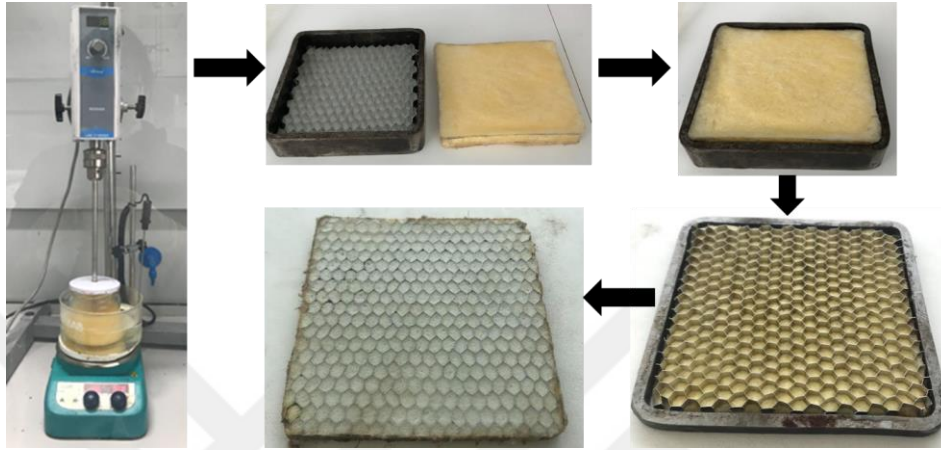
**Çizelge 3.2.** Polimer köpük üretiminde kullanılan maddeler ve kimyasal yapıları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Polimer köpük üretiminde kullanılan maddeler ve kimyasal yapıları

Kimyasal İsmi	Kimyasal Gösterimi	Görünümü
Çinkooksit (ZnO)	<b>ZnO</b>	
Azodikarbonamid (AZD)		
Dikünil peroksit (DCP)		
Etilen Vinil Asetat Kopolimeri (EVA)		

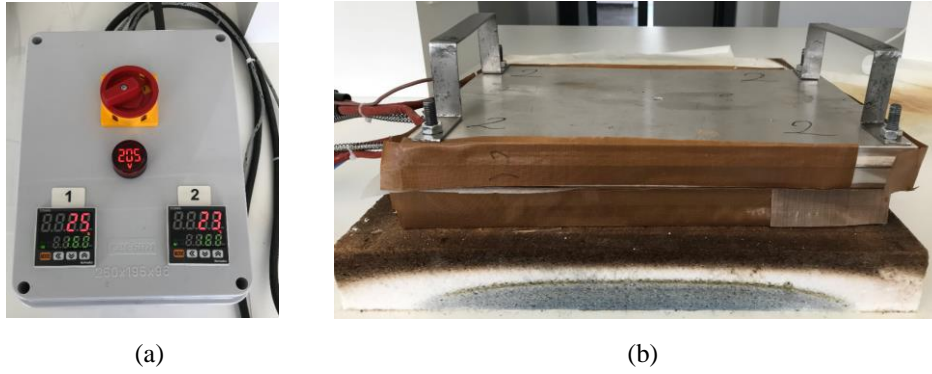
### 3.2. Hibrit Malzeme Üretimi

Hibrit malzeme üretim prosesi; katkı maddeleriyle homojen karışmış bir EVA karışım elde etme, ardından kalıplar ile şekil verme, boş bal peteği malzemesine yerleştirilmesi ve EVA karışımının uygun sıcaklık ve sürede yerinde köpürtülmesi işlemlerini içermektedir. Prosese ait şematik gösterim Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Hibrit malzeme üretim prosesi

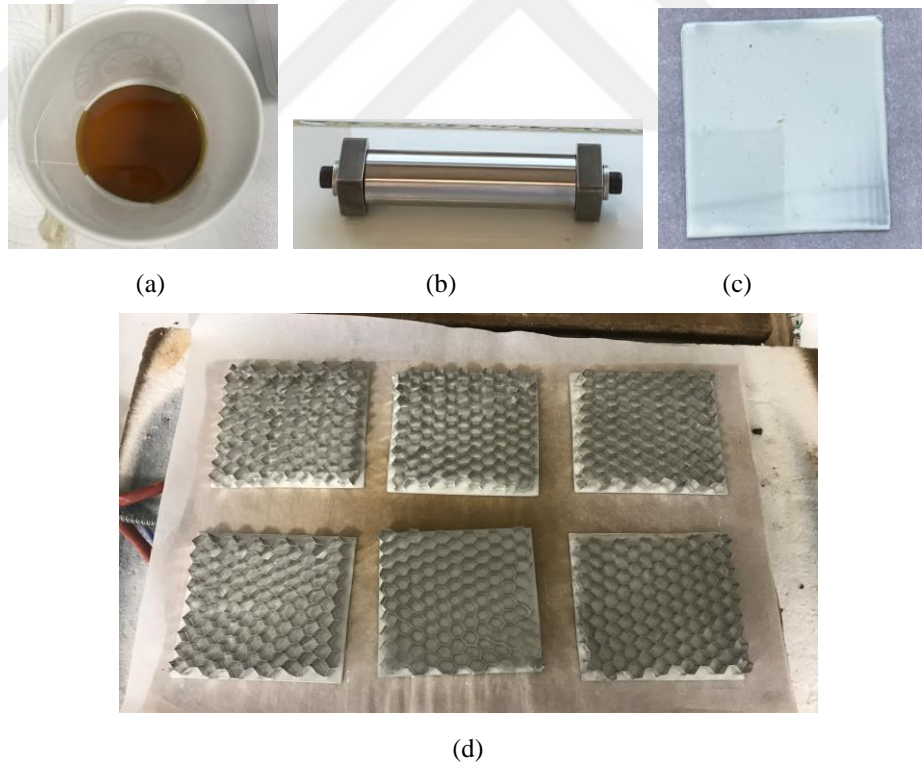
EVA köpük dolgululu alüminyum bal peteği çekirdek malzemelerin üretimi için öncelikle EVA kopolimerinin tolüen içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Çözünme işlemi, 80°C sıcaklıkta gerçekleştirilerek ardından dikünil peroksit (Ağ.%1), azodikarbonamid (Ağ.%3) ve çinko oksit (Ağ.%3) eklenerek mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Homojen karışım elde edildiğinde, EVA çözeltilisinden tolüen uzaklaştırılarak EVA hamuru elde edilmiştir. Elde edilen EVA karışım, kopolimerin yumuşama sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa ısıtılıp bal peteği malzemesine merdane yardımıyla doldurulmuştur. Karışım içerisindeki kalıntı solventlerden arınması için bir gün süre ile oda sıcaklığında dinlendirilmiştir. Ardından, EVA karışım içerisinde bulunan çapraz bağlayıcı ve köpürtücü maddelerin aktivasyonu için 160°C sıcaklıkta 1 saat süre ile kapalı sistem içerisinde pişirilmiştir. Pişirme işlemi için özel olarak tasarlanmış PID kontrollü ısı plakaları kullanılmıştır. Isı plakaları ve kontrol ünitesi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hibrit malzeme üretimi ve pişirme esnasında kullanılan a) kontrol ünitesi ve b) ısı plakaları

Hibrit malzeme üretim esnasında kullanılan boş alüminyum bal peteği malzemeleri ve EVA köpük dolgulı malzemeler hassas terazide tartılarak bir dijital kumpas yardımıyla çekirdek yüksekliği ve kenar uzunlukları kayıt altına alınmıştır.

Tez kapsamında, optimum parametrelere sahip altıgen bal peteği malzemesi belirlenerek sandviç kompozit yapı elde edilmiştir. Levha yapıştırma prosesi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Levha yapıştırma süreci a) yapıştırıcı karışımının hazırlanması b) aplikatör c) yapıştırıcının levhaya sürülmesi d) ısı plakaları üzerinde kürlleme işlemi

3005 H19 alaşımına sahip alüminyum bal peteği malzemeleri (dolgulı ve dolgusuz) uygun boyutlarda kesilerek üst ve alt yüzeyine levhalar yerleştirilerek,

yapıştırıcı yardımıyla yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının uygulanması esnasında film kalınlığı kontrolü için özel olarak imal edilmiş aplikatör (Şekil 3.3b) kullanılmış olup, küreleme işlemleri ısı plakaları ile yapılmıştır. Panel yapımı için öncelikle iki bileşenli sıvı poliüretan esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır. Ağırlıkça 4:1 olacak şekilde A bileşeni üzerine kürleyici olan B bileşeni eklenerek karışım hazırlanmıştır (Şekil 3.3a). Oda sıcaklığında cam baget yardımıyla karıştırılan karışımdan bir miktar alınarak kesilen levhalar üzerine koyulmuş ve silindirik aplikatör yardımıyla yaş yapıştırma kalınlığı 400µm olacak şekilde sürülmüştür. Ardından yapıştırıcı sürülmüş levha altta kalacak şekilde bal peteği malzemesi yerleştirilerek, ısı plakasında 80°C’de 15 dakika pişirilmiştir. Bu işlem, aynı şekilde diğer levhanın yapıştırılması için de uygulanmış olup neticesinde panel elde edilmiştir.

### 3.3. Mekanik Testler

Aynı geometrik parametrelere sahip alüminyum bal peteği ve EVA köpük dolgulu hibrit çekirdek malzemeler öncelikle basma testine tabi tutulmuştur. Basma testi neticesinde elde edilen veriler ışığında optimum geometriye sahip çekirdek malzeme belirlenerek, levhalar yardımıyla sandviç panel üretilmiştir. Üretilmiş olan dolgusuz ve EVA köpük dolgulu sandviç yapılara düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır.

#### 3.3.1. Basma Testi

Basma testleri, SCHIMADZU marka AGS-X serisi üst çenesi hareketli olan basma cihazı ile düzlem dışı yükleme koşullarında oda sıcaklığında 3 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde, numune yükseklikleri ve kenar uzunlukları dijital kumpas yardımıyla ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Basma testi neticesinde elde edilen kuvvet- yer değiştirme verileri orijinal numune boyutları dikkate alınarak eşitlik 2 ve eşitlik 3’e göre hesaplanarak gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

F; uygulanan basma kuvvetini (N), A; kuvvete dik yönde bulunan başlangıç yüzey alanını (mm<sup>2</sup>), h<sub>0</sub>; basma testi öncesi numune ait yüksekliği (mm), Δh; basma testi

öncesi ve sonrası numune yüksekliğindeki değişimi (mm),  $\sigma$ ; gerilmeyi (MPa),  $\epsilon$ ; gerinimi sembolize etmektedir. Farklı parametrelere sahip dolgunsuz ve dolgulu çekirdek malzemelerden her bir parametre için üçer adet numune test edilmiştir.

### 3.3.1.1. Basma Testi Değerlendirme Ölçütleri

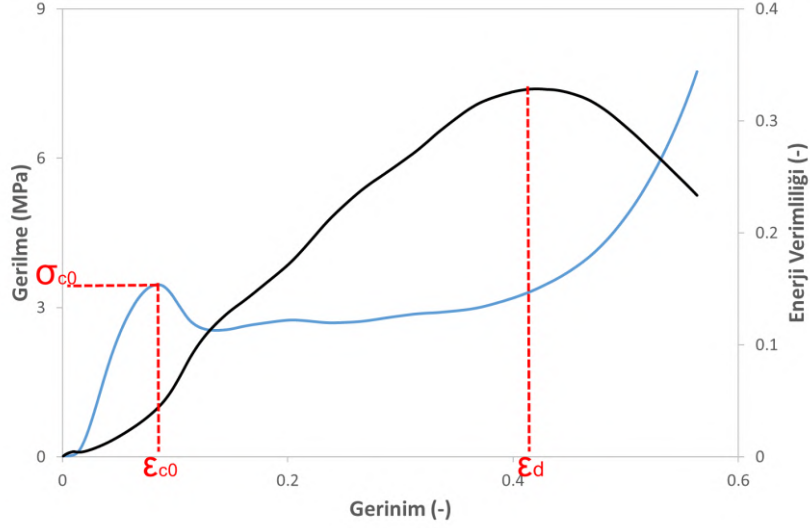
Basma testi sonrasında test edilen malzemeye ait bazı karakteristik değerler elde edilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi alüminyum bal peteği malzemesine ait basma sonucu elde edilen gerilme-gerinim diyagramlarında üç bölge mevcuttur. Bu bölgelerden birincisi, gerilimin gerinim ile yaklaşık olarak doğrusal arttığı ilk aşamadır. İkinci bölge ise, gerilmenin geniş bir gerinim aralığında nispeten sabit ilerlediği plato bölgesidir. Üçüncü aşama ise, gerilmenin hızla arttığı yoğunlaşma (densifikasyon) bölgesidir. Başlangıç basma aşaması olan ve birinci bölgede ifade edilen ilk pik gerilim değeri ( $\sigma_{e0}$ ), akma dayanımını temsil etmektedir (Y. Sun & Li, 2018). Bu gerilime denk gelen gerinim değeri ( $\epsilon_{e0}$ ) ise çökmenin (collapse) başladığı gerinim değeri olarak kabul edilmektedir ve plato bölgesinin başlamış olduğu gerinimi temsil etmektedir. Platonun bittiği bölge ise, başlangıç yoğunlaşma gerinimi tayini için büyük önem arz etmektedir.

Literatürde yoğunlaşma gerinimi için formüller bulunmakta ancak polimer dolgulu bal peteği malzemelerin bağıl yoğunluğunun hesaplanmasının zor olması sebebiyle enerji verimliliği gibi farklı metotlar sunulmuştur (Avalle vd., 2001; Gibson & Ashby, 1997; Li vd., 2006; Tan vd., 2002). Bu çalışmada, enerji verimliliği metodu kullanılarak (Eşitlik 4 ve 5), başlangıç yoğunlaşma gerinimi bulunmuştur.

$$E_f = \frac{\int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma_a} \quad (4)$$

$$\frac{dE_f(\epsilon_a)}{d\epsilon_a} = 0 \quad 0 \leq \epsilon_a \leq 1 \quad (5)$$

$E_f$ , enerji verimliliğini,  $\epsilon_a$ ; gerinimi,  $\sigma_a$ ;  $\epsilon_a$  gerinim değerindeki anlık gerilim değerini ifade etmektedir. Enerji verimliliği parametresinin maksimum olduğu gerinim değeri, başlangıç yoğunlaşma gerinimi olarak ifade edilir ve  $\epsilon_d$  ile sembolize edilir. Örnek olarak Şekil 3.4'te polimer dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim eğrisi ve bu eğriye ait enerji verim grafiği verilmiştir.



**Şekil 3.4.** Enerji verimliliği ve gerilme-gerinim eğrisine ait şematik gösterim

Şekil 3.4'te, aynı zamanda gerilme-gerinim eğrisi üzerinde ilk burkulmanın gerçekleştiği çökme başlangıç gerinimi ( $\epsilon_{c0}$ ) ve bu gerinim değerine tekabül eden, yük taşıma kapasitesini temsil eden pik gerilim ( $\sigma_{c0}$ ) bölgesi de işaretlenmiştir. Başlangıç çökme gerinimi ( $\epsilon_{c0}$ ) ve yoğunlaşma başlangıç gerinimi ( $\epsilon_d$ ) arasında bulunan plato bölgesindeki ortalama gerilim değeri ( $\sigma_{pl}$ ) Eşitlik 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\epsilon_{c0}}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_d - \epsilon_{c0}} \quad (6)$$

Basma kuvvetleri altında yoğunlaşma bölgesinin başlangıç noktasına kadar, malzemenin hacim başına absorbe ettiği plastik enerji ( $U_{pl}$ ), Eşitlik 7'ye göre hesaplanmıştır.

$$U_{pl} = \int_{\epsilon_{c0}}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (7)$$

Basma testi sonrasında EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerde basma yükleri kaldırıldığında geri yaylanma davranışı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, geçici deformasyon oranını ifade eden geri yaylanma (%) Eşitlik 8'e göre hesaplanmıştır.

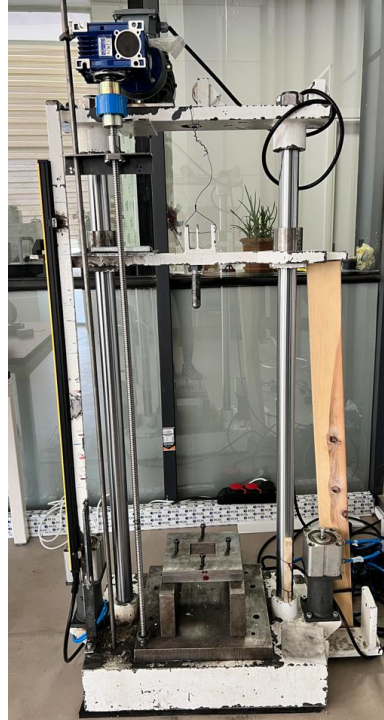
$$\text{geri yaylanma (\%)} = \frac{h_{bs1} - h_{bs0}}{h_0} \times 100 \quad (8)$$

Eşitlik 8’de verilmiş olan,  $h_0$ ; basma öncesi numuneye ait ortalama yüksekliği (mm),  $h_{bs0}$ ; basma yükü altında numune yüksekliği (mm),  $h_{bs1}$ ; basma yükü kaldırıldıktan sonra ölçülen numune yüksekliğini (mm) temsil etmektedir. Bu sayede, numune yüksekliği başına düşen geçici deformasyon oranı (%) elde edilmektedir.

Numuneler sırası ile kullanılan çekirdek malzemenin hücre boyutu, folyo kalınlığı ve yükseklik değeri yazılarak kodlanmıştır.

### 3.3.2. Düşük Hızlı Darbe Testi

EVA köpük dolgulu bal peteği malzemelerin darbe davranışlarını incelemek amacıyla, basma testi sonuçları değerlendirilerek optimum özelliklere sahip sandviç malzemesine düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır. Basma testi neticesinde belirlenen hücre boyutu, çekirdek yüksekliği ve folyo kalınlığına sahip dolgulu bal peteği malzemeler, 5754 alüminyum alaşımından imal edilmiş 0,5 mm kalınlığındaki levhalar ile sandviç panel haline getirilmiştir. Elde edilen malzemelere düşük hızlı darbe testi, yarı küresel uca sahip vurucu uç yardımı ile ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’te ağırlık düşürme test cihazına ait görüntü verilmiştir. Ağırlık düşürme test cihazında, vurucu uç (impactor) olarak yarı küresel uç kullanılmış olup toplam ağırlık ünitesi 17 kg. ağırlığındadır. Tekrarlı darbelerden kaçınmak amacıyla, vurucu ucun malzemeye ilk temasından sonra ağırlık ünitesi metal aparat yardımı ile tutulmuştur.



Şekil 3.5. Ağırlık düşürme test cihazı

Darbe testi süresince, vurucu uç yanında bulunan yük hücresi yardımıyla kuvvet verileri elektronik aksama iletilerek Signal Express programı ile işlenmiştir. Elde edilen kuvvet-zaman (F-t) verileri ise Uyaner (2000) tarafından hazırlanmış kinetik analizler gerçekleştirilerek kuvvet-deplasman, enerji-zaman, ivme-zaman, hız-zaman grafikleri elde edilmiştir (Uyaner, 2020). Darbe testi sonrası sandviç panellere ait ön ve arka yüzeyleri ve dolgu malzemelerin darbe bölgesinden kesit alınarak görüntülenmiştir.

### 3.4. Karakterizasyon

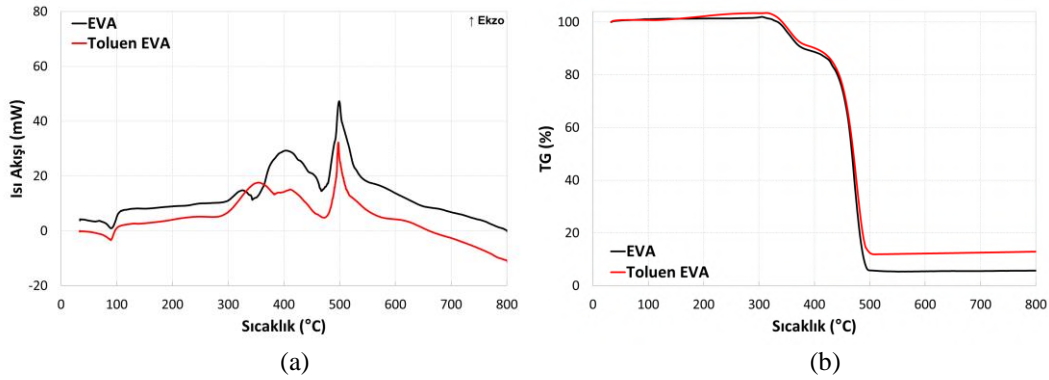
Üretilen hibrit malzemelerde mikroyapısal görüntüleme için HITACHI marka SU1510 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu, bir elektron kaynağı vasıtasıyla gönderilen ve malzeme üzerinden yansıyan, malzemenin topografik ve morfolojik özellikleri ile ilişkili ikincil elektronların dedekte edilmesi prensibine dayanır. Bu sayede, hem üretilen malzemedeki gözeneklerin, hem de bal peteği hücresi ve dolgu malzemesi ara yüzeyinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Mekanik testler öncesi ve sonrasında alüminyum bal peteği malzemesine ait farklı yönlerden kesit alınarak altın paladyum ile kaplanmasının ardından mikroskopta ikincil ve geri saçılan elektronlar yardımıyla inceleme yapılmıştır.

Yerinde EVA köpük üretim prosesinin optimizasyonu için Setaram Labsys Evo modele sahip eş zamanlı diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) cihazı kullanılmıştır. Etilen vinil asetat kopolimeri ve tolüen içerisinde çözünmüş EVA granülleri 20 mL/dk gaz akışı ile azot ortamında 25°C-800°C sıcaklık aralığında 10°C/dk ısıtma hızında termal analize tabi tutulmuştur. DCP, AZD ve AZD ZnO katkı maddelerinin ise termal karakterizasyonu için aynı ortamda 400°C sıcaklığa çıkılmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

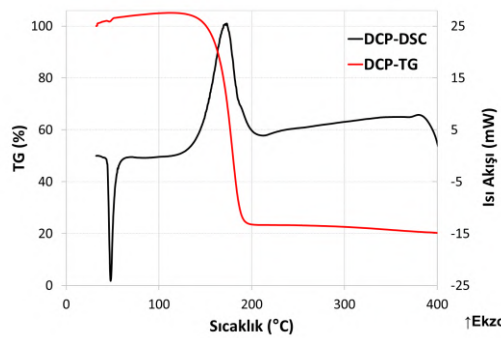
### 4.1. EVA Köpük Üretim Optimizasyonu

EVA köpük üretim prosesi kapsamında öncelikle üretim esnasında kullanılacak yöntemlerin uygunluğu ve köpürtücü ajan, çapraz bağlayıcı gibi maddelerin bozunma sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla termal analiz gerçekleştirilmiştir. EVA kopolimeri ve eklenen diğer malzemelerin homojen karıştırılması için EVA öncelikle tolüen içerisinde çözülmüştür. Bu çözünme mekanizmasının, EVA kopolimerine ait yapıya etkisini gözlemlemek amacıyla Şekil 4.1'de EVA (Şekil 4.1a) ve Toluen EVA (Şekil 4.1b) olarak kodlanmış malzemelerin DSC ve TG eğrisi verilmiştir. Şekil 4.1a'da saf EVA'ya ait DSC eğrisinde 56°C ve 88°C sıcaklıkta iki adet ardışık endotermik pik görülmektedir. Bu sıcaklıklarda TG eğrisinde herhangi bir ağırlık değişimi gözlemlenmemektedir. Belirtilmiş olan ikili endotermik pik, EVA'da bulunan iki farklı kristalin yapının bulunması ile ilişkilidir(Agroui vd., 2006). Düşük sıcaklıktaki (56°C) pik, vinil asetat içeriğinin etilen yapıya entegrasyonu sonucu oluşturduğu hatalı ve küçük kristalitlerin erimesi ve nispeten yüksek sıcaklıktaki ergime piki ise, daha büyük ve düzenli kristal yapının erimesi sebebiyle oluşmaktadır (L. Lu vd., 1994; Polanský vd., 2013). Sonuç olarak, farklı kristal morfolojisi sebebiyle kompleks çoklu ergime endotermi elde edilmiştir (Bistac vd., 1998). Şekil 4.1b'den görüleceği üzere, tolüende çözülmüş EVA malzemesine ait DSC eğrisinde de 90°C sıcaklıkta endotermik pik görülmektedir. Bu durum neticesinde, çözülmüş ve çözücüsü uzaklaştırılmış EVA'nın morfolojisinde ve termal kararlılığında bir değişim gözlenmediği söylenebilir. EVA'ya ait DSC ve TG eğrisinde yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ardışık bozunma reaksiyonları ve sonucunda ağırlık kaybı gerçekleşmektedir. EVA, 300 °C – 400 °C sıcaklık aralığında asetik asit oluşumu ve 400 °C – 700 °C aralığında ise polimer ana zincirinin bozunması neticesinde ekzotermik reaksiyonlar ile bozunmaktadır(Allen vd., 2000).



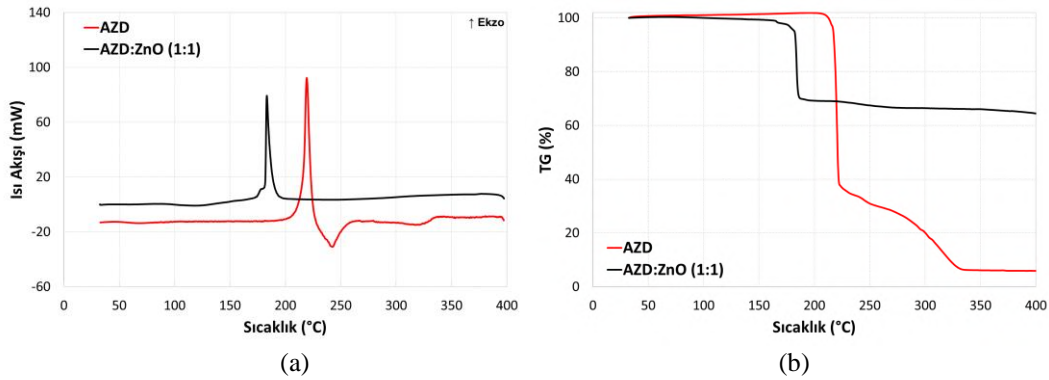
Şekil 4.1. EVA ve tolüende çözülmüş EVA'ya ait a) DSC eğrileri b) TG eğrileri

Şekil 4.2'de çapraz bağlayıcı olarak kullanılan dikünil peroksit (DCP) ait DSC ve TG eğrisi verilmiştir. 49 °C sıcaklıkta ergimekte ve 125 °C – 200 °C sıcaklık aralığında ise ekzotermik reaksiyon sonucunda termal bozunmaya uğramaktadır. Termal bozunma neticesinde %80 oranında ağırlık kaybı meydana gelmektedir. DCP'nin ana bozunma ürünleri, içeriğindeki empüritelere bağlı olarak dimetil fenil karbinol asetofenon ve metandır (K. T. Lu vd., 2010; K. W. Wu vd., 2006).



Şekil 4.2. Dikünil peroksit için DSC ve TG Eğrisi

Şekil 4.3'te köpürtücü ajan olarak kullanılmış olan azodikarbonamid (AZD) ve ağırlıkça 1:1 oranında karıştırılmış olan AZD ve çinko oksit (ZnO) karışımına ait DSC eğrileri (Şekil 4.3a) ve TG eğrileri (Şekil 4.3b) verilmiştir. Şekil 4.3'ten görüleceği üzere sadece AZD, 220 °C sıcaklıkta ekzotermik reaksiyon sonucunda termal bozunmaya uğrayarak, ilk aşamada ağırlığının %66'sını kaybetmektedir. Ancak, çinko oksit ve AZD karışımına ait eğrilere bakıldığında (Şekil 4.3), 160 °C sıcaklıkta başlayarak 200 °C sıcaklığa aralığında termal bozunmanın gerçekleştiği görülmektedir. ZnO'nun eklenmesi ile AZD'ye ait bozunma sıcaklığı düşürülmüştür. ZnO, AZD'nin termal bozunması için gerekli olan aktivasyon enerjisini düşürerek proses sıcaklığının azalmasına yardımcı olmaktadır (Afrinaldi vd., 2021).



Şekil 4.3. AZD ve ZnO ile karışımına ait a) DSC eğrileri b) TG eğrileri

Endüstride yaygın olarak kullanılan EVA köpük üretim proseslerinde, çapraz bağlayıcı, köpürtücü ajan ve aktivatör olarak kullanılan ek maddelerin reaksiyon sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta karışım hazırlanmakta ve daha sonra sıcak presler yardımıyla köpürtme işlemi yapılmaktadır. Yukarıda belirtilmiş olan hammaddelere ait termal analizler dikkate alındığında, farklı morfolojileri içeren EVA kopolimeri, düşük ergime sıcaklığı ile köpürtme işlemleri için büyük avantaj sağlamaktadır. Köpürtme prosesi esnasında, kimyasal köpürtme ajanı olarak kullanılan AZD sayesinde üç aşamalı bir genişleme söz konusudur. Bunlar sırası ile köpük başlangıcı yani çekirdeklenme, köpüğün büyümesi ve stabilizasyonudur. Çekirdeklenme aşamasında, AZD ve ZnO karışımının bozunma sıcaklığında, her bir partikül yüzeyinde gaz salınmaktadır (Marcilla vd., 2008). Yeterli molekülün toplanması ile gaz ve polimer arasında köpüğün bir parçası olarak mikro gözenekler oluşur. Bu ara yüzeye doğru difüze olan gaz molekülleri, polimer filmi genişleterek çekirdeklenmeyi başlatırlar. Köpük, kritik boyuta ulaştığında, AZD'den salınan gazlar hızlıca içerisine difüz ederek, büyümesine yardımcı olurlar. Bu büyüme, köpük stabilize olana kadar veya ergimiş polimer hücre duvarları yırtılana dek devam etmektedir (Marcilla vd., 2008). Köpürme prosesinde, çekirdeklenme ve büyüme öncesinde gaz, polimerin içerisinde iyice çözünmelidir. Ayrıca, matrisi oluşturan polimerin, büyüyen köpüğe ait iç gaz basıncına dayanıklı olması gerekmektedir (Marcilla vd., 2008). Köpürtme işlemi esnasında, ergiyik polimer duvarların dayanımının artırılması amacıyla çapraz bağlayıcı ajan olarak DCP kullanılmaktadır. DCP'ye ait zayıf peroksi bağları sayesinde, termal bozunma sıcaklığı üzerinde serbest radikal polimerizasyonunu başlatmaktadır (Duh vd., 2017). Bu sayede hem köpürtme prosesi esnasında eriyik polimer dayanımı artırılmış olmakta ve aynı zamanda elde edilmiş

olan nihai köpüğün, daha yüksek dayanım, termal direnç, solvent direnci ve aşınma direncine sahip olması sağlanmaktadır(Bianchi vd., 2009).

Tez kapsamında, EVA köpük alüminyum bal peteği malzemeleri içerisinde yerinde köpürtülmüştür. Bunun için EVA'nın ağırlıkça %1 oranında DCP, %3 oranında ise AZD ve ZnO içeren polimer karışımı hazırlanmıştır. Hammaddelere ait termal analiz değerlendirmeleri neticesinde alüminyum bal peteği içerisine yedirilen hamur karışımı kapalı hacimde 160 °C sıcaklıkta 1 saat süresince köpürtme prosesine tabi tutulmuştur. Yapılan ön deneyler sonucunda, EVA köpük karışımı belirtilen proses koşulları ve katkı maddeleri ile başlangıç hacminin yaklaşık 2,47 katına çıkmaktadır. Alüminyum çekirdek malzemeye ait her bir geometrik parametreye göre EVA karışım miktarı (gram) belirlenerek proses sonrası zımparalamaya ihtiyaç duyulmadan yerinde üretim yapılması sağlanmıştır.

## 4.2. Basma Testi Sonuçları

Dolgusuz ve EVA köpük dolgulu bütün alüminyum bal peteği malzemelerine ait yükseklik, ağırlık ve kenar uzunlukları gibi özellikleri kayıt altına alınarak basma testine tabi tutulmuştur. Basma testleri neticesinde öncelikle dolgu ve dolgusuz malzemelere ait gerilme-gerinim eğrileri tespit edilerek, elektron mikroskobu yardımı ile basma sonrası oluşan hasar analizi yapılmıştır. Sonrasında, düzlem dışı basma yükleri altında davranışı temsilen pik gerilim, kritik gerinim, plato gerilimi, yoğunlaşma gerinimi ve hacim başına absorbe edilen enerji gibi karakteristik basma kriterleri belirlenmiştir. Belirtilen basma değerlendirme ölçütlerinin her birine, alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutu, folyo kalınlığı, folyo kalınlığının serbest duvar uzunluğuna oranı gibi kritik geometrik parametrelerin etkisi incelenmiştir. Son olarak da düzlem dışı basma testi neticesinde elde edilen değerlendirme ölçütlerine EVA köpük dolgusunun etkisi incelenmiştir.

### 4.2.1. Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği

Şekil 4.4'de 6 mm yüksekliğe sahip 5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm hücre boyutuna ve 50 µm, 70 µm, 100 µm folyo kalınlıklarına sahip dolgusuz alüminyum bal peteği malzemelerinin düzlem dışı basma testinden elde edilen gerilme-gerinim diyagramı verilmiştir. Şekil 4.4'de görüleceği üzere, gerilme, artan gerinim değeri ile lineer olarak artmaktadır. Bu bölgede hücre duvarları ilk olarak elastik deformasyona uğrayarak eğilme (bending) gösterir. Belli gerilme değerine ulaştığında,

alüminyum hücre duvarları burkulur. Hücre duvarlarında burkulmanın meydana geldiği bölgede, plastik eklem (hinge) adı verilen bölgesel eklem noktaları oluşmaktadır(E. Wu & Jiang, 1997). Düzlem dışı basma testi esnasında burkulma gerçekleştiikten sonra test durdurulmuş ve alüminyum bal peteği malzemesinin L ve W yönünden görüntülenmiştir. Burkulmanın gerçekleştiği bölgeye ait elektron mikroskobu görüntüsü her iki yön için de Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'de görüleceği üzere, yüksek gerilmeler neticesinde alüminyum hücre duvarlarında aksenal dalgalar oluşarak lokalize olmuştur. Şekil 4.5'de W yönü incelendiğinde ise, eğilme sebebiyle katlanma öncesi eklem oluşumu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda, tek duvarların birleşme noktalarında, boşluklar oluşmaktadır. Burkulmanın etkisi ile tek duvarların birleşim bölgesinde oluşan bu boşluklar, artan gerilmeler neticesinde bölgesel katlanmaya ve gerilme değerinde düşüşe sebep olmaktadır(Wilbert vd., 2011).

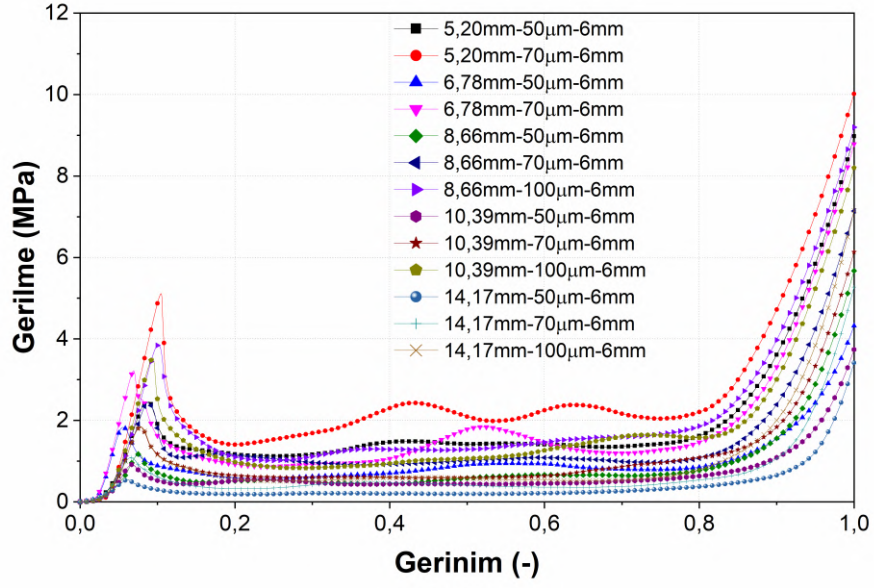
Şekil 4.4'ten görüleceği üzere dolgusuz yapılarda, hücre duvarlarının burkulması ile gerilme değeri düşmektedir. Bu bölgede, hücre duvarlarında oluşan plastik eklemler, lokal eğilme momenti hareketleri sebebiyle dönmeye ve bunun neticesinde artan yük ile birbirlerine yaklaşılmaya başlarlar(E. Wu & Jiang, 1997). Eklemlerin birbiri ile temas etmesi ile hücre duvarlarında katlanma oluşur. Katlanmanın oluştuğu bölge gerilme gerinim diyagramlarında lokal minimum nokta olarak adlandırılır(Ciepielewski vd., 2022). Burkulma sonrasında gerçekleşen katlanmanın oluşması sonucunda meydana gelen gerilme değerinin düşmesi, yapının yük altında kararlılığının bir ölçütüdür. Burkulma ile gerilme değerinin düşmesi, aynı zamanda akma sonrası yumuşama olarak adlandırılır ve yapının yük taşıma kapasitesinde kararsızlığa sebep olduğu için istenmemektedir.

Lokal minimum noktasında oluşan katlanma sonrasında, düzlem dışı basma yükleri altında malzemeye ait gerilme değeri artmaktadır. Gerilmenin artışı, yeni plastik eklemlerin oluşması ve burkulmanın gerçekleşmesi ile gerilme-gerinim diyagramında yeni lokal maksimum nokta oluşumuna sebep olur. İlk aşamadan sonra oluşan eklem ve burkulma ikiliğine, burkulmadan ziyade çökme adı verilmektedir(E. Wu & Jiang, 1997). İlk lokal maksimum gerilme noktası sonrasında alüminyum hücre duvarlarında yukarıda bahsedilmiş olan mekanizma ile bir dizi katlanma süreci gerçekleşmektedir. Ardışık katlanmalar ile gerçekleşen çökme davranışının sergilendiği bölgeye, plato bölgesi adı verilmektedir. Burada bahsedilen lokal maksimum ve minimum noktaları 70 µm folyo kalınlığı ve 5,22 mm, 6,78 mm hücre boyutlarından oluşan dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesinin gerilme-gerinim eğrilerinin plato bölgesinde açıkça görülmektedir.

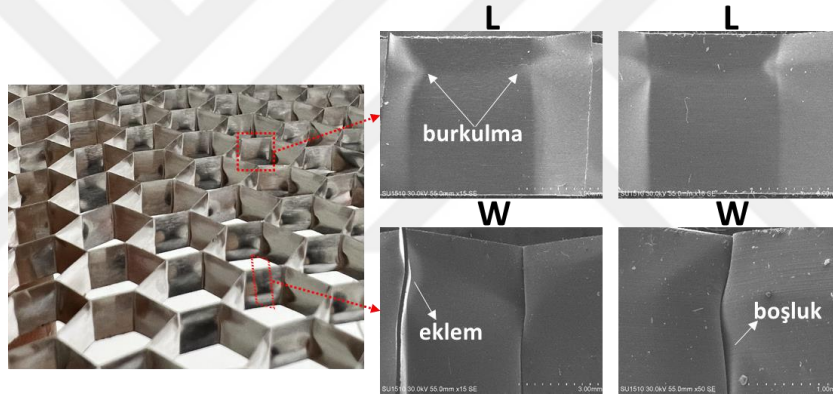
Nispeten daha rijit duvar kalınlığına ve daha fazla hücre duvarına sahip dolgusuz bal peteklerinin eğrisinin plato bölgesinde bir gerilme dalgalanması meydana gelmektedir. Plato bölgesinde gerçekleşen hücre duvarlarındaki eklem oluşumları, malzemenin ilk burkulmanın olduğu gerilme değerinden daha düşük gerilmelerde gerçekleşmektedir. Katlanma neticesinde malzemenin plastik deforme olmuş kısımları, yapının yoğunluğunu arttırmaktadır. Tamamen katlanmış olan alüminyum hücre duvarları, karşılıklı olarak birbirine temas etmeye başlaması ile gerilme değeri hızla artmaktadır. Yapıya ait rijitliğin aniden artması ile yoğunlaşma bölgesi başlamakta ve hücrelerin tamamen kapanması ile sonlanmaktadır.

Şekil 4.4'te görüleceği üzere, 6 mm yüksekliğe sahip dolgusuz bal peteklerinin gerilme gerinim eğrileri üzerindeki maksimum gerilme noktası 5,20 mm hücre boyutu, 70  $\mu$ m folyo kalınlığına sahip malzemede en yüksek gerilme değerine sahiptir. Pik gerilmenin ardından başlayan plato gerilmesi de diğer parametrelere sahip yapılara göre daha yüksektir. Ancak, hücre boyutunun düşük olması sebebiyle daha fazla alüminyum duvarların bulunması ve buna ek olarak folyo kalınlığının yüksek olması sebebiyle de daha rijit duvarların varlığı nispeten daha düşük gerinim değerlerinde yoğunlaşmanın başlamasına neden olmaktadır.

6 mm yüksekliğe ve bu yükseklik grubunun yoğunluğu en düşük olan 14,17 mm hücre boyutu, 50  $\mu$ m folyo kalınlığına sahip dolgusuz yapının düzlem dışı basma testinden elde edilen gerilme-gerinim eğrisinde, burkulmanın olduğu maksimum gerilme noktası (pik gerilim), düşük gerilme değerlerinde gerçekleşmiştir. Bu noktadan sonra oluşan lokal minimum nokta arasında düşük gerilme farklılıkları mevcuttur. Bir diğer deyişle, yapının yük taşımada gösterdiği kararlılık diğerlerine göre daha yüksektir. Maksimum ve minimum gerilme noktasındaki farklılığın az olması, düşük yoğunluk sebebiyle alüminyum hücre duvarlarında oluşan plastik eklemlerin hızla temas halinde olmaları sebebiyledir(Wilbert vd., 2011).

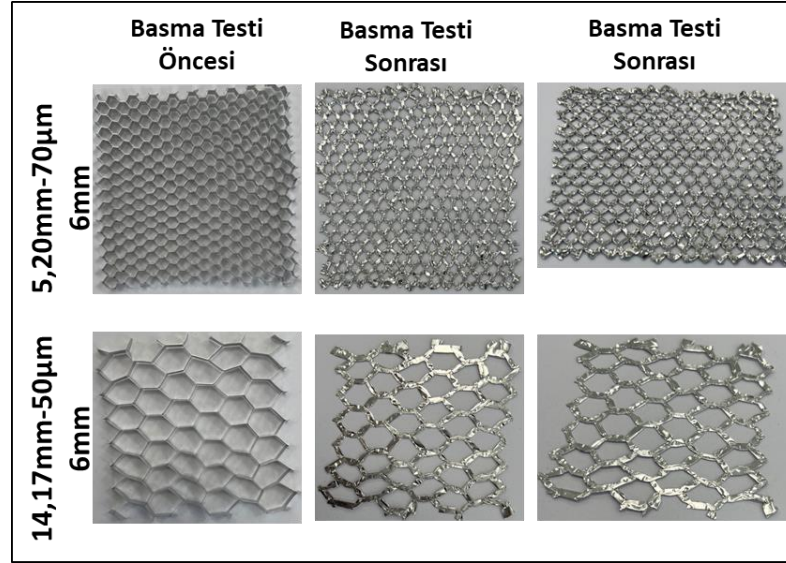


Şekil 4.4. Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)



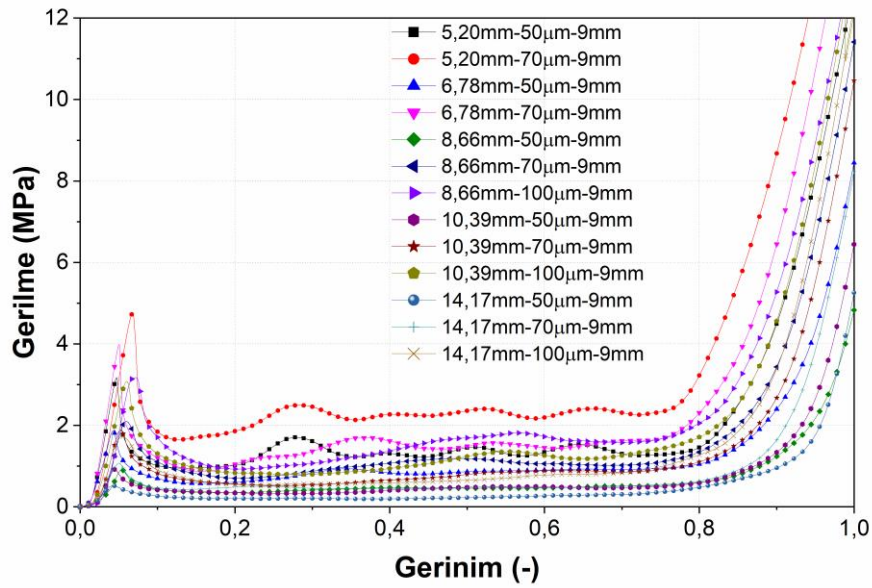
Şekil 4.5. Alüminyum hücre duvarlarının burkulmasına ait makro ve elektron mikroskobu görüntüleri (5,20mm-70µm-6mm)

Şekil 4.6'da dolgusuz 5,20mm-70µm-6mm ve 14,17mm-50µm-6mm bal peteği malzemelerinin basma öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6'dan görüleceği üzere her iki dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesinde de basma testi sonrasında hücre duvarları katlanarak, hücrelerin birbirlerine yaklaşmasına sebep olmuştur. Yüksek gerilmeler neticesinde yoğunlaşan çekirdek malzeme, enerji absorpsiyon kapasitesini tamamen yitirerek rijit gözenekli bir plaka haline gelmiştir.



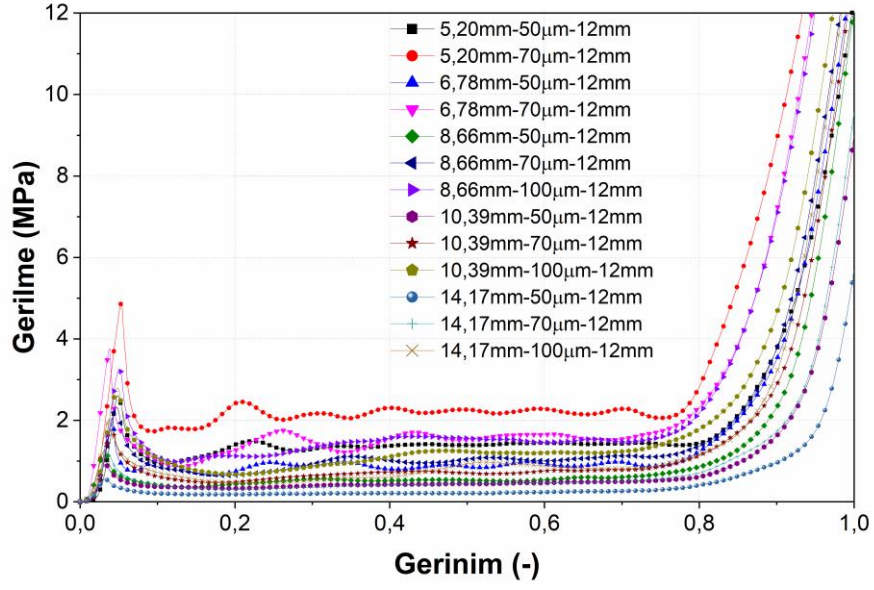
Şekil 4.6. Dolgusuz 5,20mm-70µm-6mm ve 14,17mm-50µm-6mm bal peteği malzemelerinin basma öncesi ve sonrası görüntüleri

Şekil 4.7’de 9 mm yüksekliğe sahip dolgusuz alüminyum bal peteği malzemelerinin düzlem dışı basma testinden elde edilen gerilme-gerinim diyagramları verilmiştir. Şekil 4.7’ye göre 5,20 mm hücre boyutuna sahip 70 µm folyo kalınlığındaki dolgusuz malzeme, diğer numunelere göre yüksek gerilme değerlerinde burkulmaya uğramıştır. Yoğunlaşmanın nispeten daha düşük gerinim değerlerinde gerçekleştiği Şekil 4.7’den açıkça görülmektedir. 9 mm yükseklikteki dolgusuz 5,20 mm-50µm, 6,78mm-70µm ve 8,66mm-100µm hücre boyutu ve folyo kalınlığına sahip malzemelerde de gerilme dalgalanmaları tespit edilmiştir. Ancak, 6 mm yükseklikteki dolgusuz malzemeye ait gerilme gerinim eğrisinde (5,20 mm-70µm) (Şekil 4.6) burkulma sonrası belirgin şekilde iki dalga ve bunlara ait pikler mevcuttur. 9 mm yüksekliğe sahip malzemeye ait eğriye bakıldığında, plato bölgesinde 4 adet dalga ve bunlara ait 4 pik noktası mevcuttur. Daha önce bu dalgalanmaların, eklem oluşumu ve katlanma mekanizması ile ilişkili olduğu belirtilmişti. Alüminyum bal peteği malzemesinin yüksekliği arttıkça, plato bölgesinde bulunan dalga sayısı artmakta ancak şiddeti azalmaktadır.

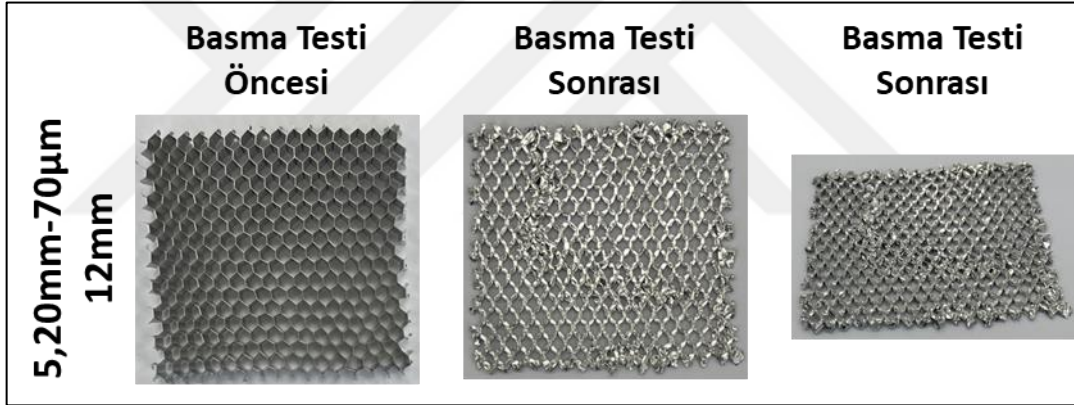


Şekil 4.7. Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)

Şekil 4.8’de 12 mm yüksekliğine sahip dolgusuz alüminyum bal peteği malzemelerine ait gerilme gerinim eğrileri verilmiştir. 5,20 mm hücre boyutuna ve 70  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığına sahip malzemenin gerilme gerinim eğrisinin plato bölgesinde 6 adet dalga ve bunlara ait pik noktaları görülmektedir. Diğerlerine göre daha fazla ve daha rijit alüminyum duvarlara sahip malzemelerin kıyaslanması neticesinde; artan bal peteği yüksekliği ile gerilme dalgalanmasının nispeten arttığı söylenebilmektedir. Bu gerilme dalgalanmalarındaki çeşitlilik, bal peteği malzemesine ait üretim hataları veya geometrik kusurlar sebebiyle de ortaya çıkabilmektedir. Şekil 4.9’da 5,20 mm hücre boyutu 70  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığı ve 12 mm yüksekliğe sahip bal peteği malzemesine ait basma testi öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir. Basma sonrası görüntüsü incelendiğinde, altıgenlerin deformasyon deseninde düzensizlik olduğu görülmektedir. Bu desen düzensizliğine, bazı geometrik hataların ve malzemede bulunan bütün alüminyum hücre duvarlarının homojen deformasyona uğramaması neticesinde karşılaşılmaktadır.

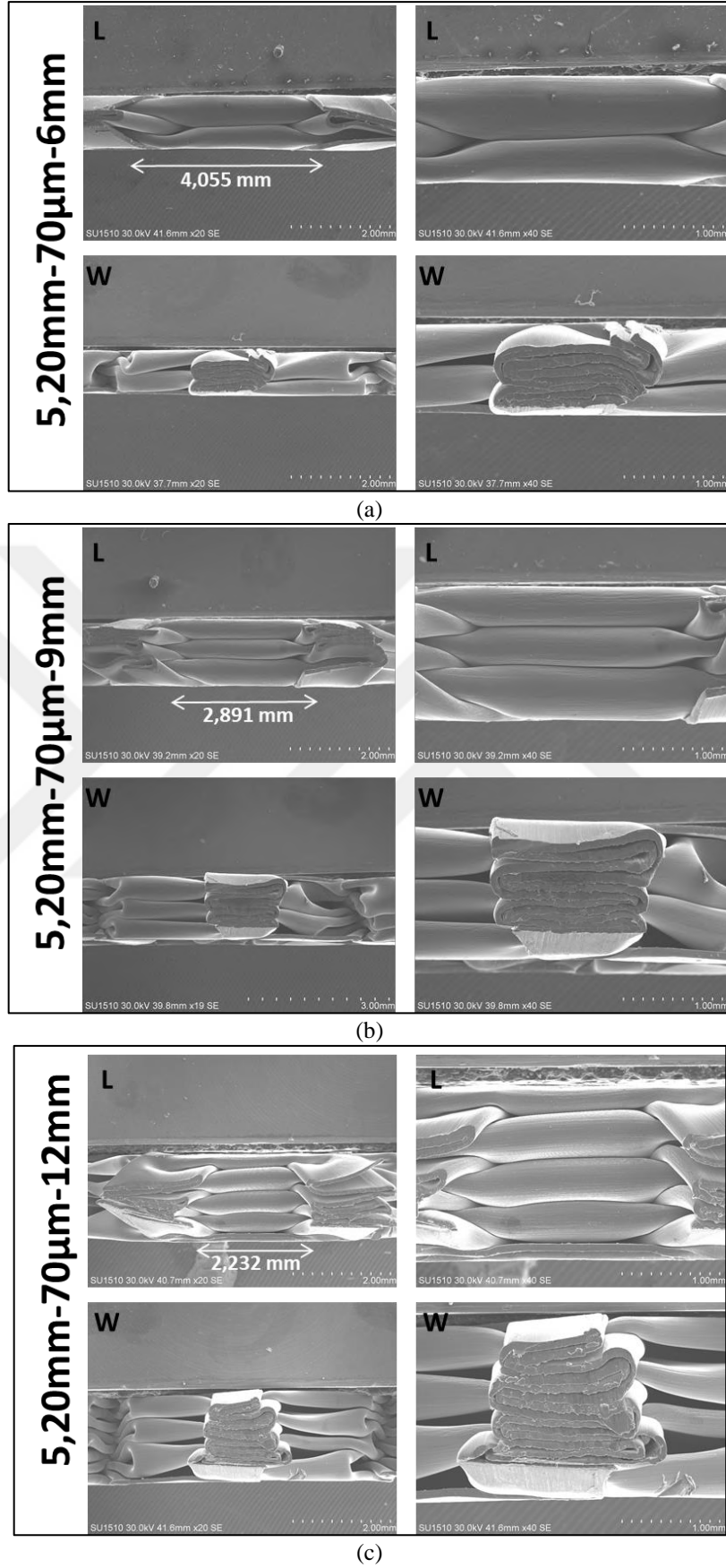


Şekil 4.8. Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm)



Şekil 4.9. Dolgusuz 5,20mm-70µm-12mm bal peteği malzemesinin basma öncesi ve sonrası görüntüleri

Düzlem dışı basma testi sonrasında malzeme üzerinden yük kaldırılmış ve hasar analizi için numuneden L ve W yönlerinde kesit alınmıştır. Basma testi sonrası 5,20 mm hücre boyutu ve 70 µm folyo kalınlığına sahip dolgusuz malzemelere ait elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.10'da (h:6 mm, 9mm, 12 mm) verilmiştir. Şekil 4.10'dan görüleceği üzere L yönünde çift duvar (node) kısmında katlanan bölüm, bal peteği malzemesi yüksekliği arttıkça kısalmaktadır. Aynı zamanda, yüksekliğin artması ile daha fazla katlanma meydana gelmektedir. Bu durum, yükseklik arttıkça gerilme gerinim eğrilerindeki lokal minimum ve maksimum noktaların daha fazla oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.10. Dolgusuz 5,20mm-70 $\mu$ m bal peteği malzemelerinin basma testi sonrası elektron mikroskobu görüntüleri a) h: 6mm b) h: 9mm c) h:12 mm

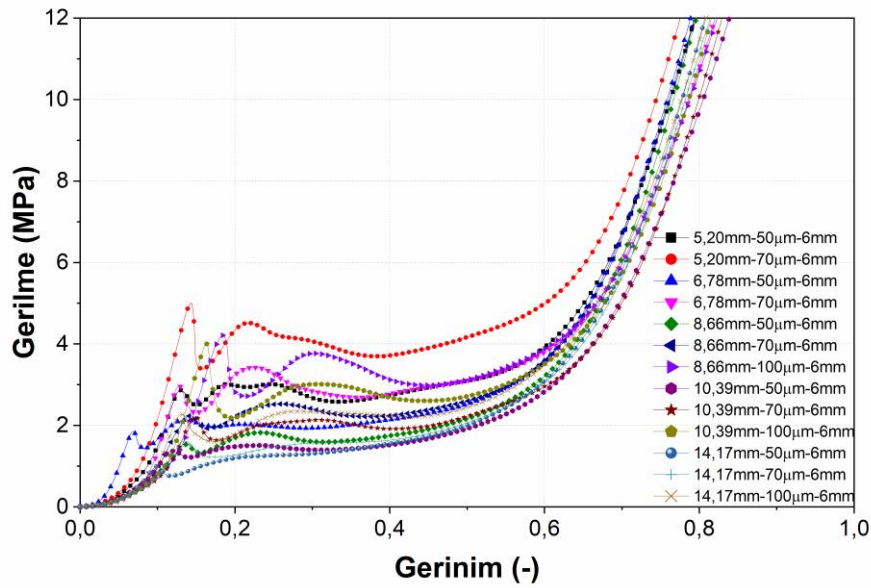
#### 4.2.2. EVA Köpük Dolgulu Alüminyum Bal Peteği

EVA köpük dolgulu bal peteği malzemeler, dolgusuz malzemelere benzer şekilde hazırlanarak yarı statik basma testine tabi tutulmuştur. Basma test cihazından elde edilen kuvvet ve yer değiştirme verileri, kumpas yardımı ile ölçülen ve ortalaması alınan EVA dolgulu malzemelerin yüksekliği ve kuvvetin etki ettiği alan bilgileri ile güncellenerek gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.11’de EVA köpük ile doldurulmuş olan 6 mm yüksekliğe sahip 5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm ve 14,17 mm hücre boyutundaki 50 µm, 70 µm ve 100 µm folyo kalınlığındaki alüminyum bal peteği malzemelere ait gerilme-gerinim diyagramları verilmiştir. Şekil 4.11’de görüleceği üzere EVA köpük dolgulu malzemelere ait gerilme gerinim eğrilerinde de gerilmenin gerinim ile nispeten doğrusal arttığı elastik bölge, gerilmenin maksimum nokta olarak belirginleştiği ve daha sonra düştüğü pik gerilme bölgesi bunu takiben gerilmenin gerilme ile nispeten sabit olduğu plato bölgesi ve nihayetinde gerilmenin düşük gerinim aralıklarında keskin olarak arttığı yoğunlaşma bölgesi gözlemlenmektedir. Dolgusuz malzemeler ile nispeten benzer trend sergileyen gerilme-gerinim diyagramlarından EVA köpük dolgulu yapıların yarı statik şartlarda yük taşıma trendinin esas olarak alüminyum bal peteğinin deformasyonu tarafından baskın olduğu söylenebilmektedir. Örneğin, tez kapsamında kullanılmış olan en rijit bal peteği malzemesi grubunu temsil eden 5,20 mm hücre boyutu ve 70 µm folyo kalınlığına sahip malzeme ele alındığında; ilk olarak alüminyum hücre duvarının burkulması ile ilişkili olan pik gerilmenin benzer değerlerde (5 MPa) olduğu gözlemlenmektedir. Ancak 6 mm yüksekliğe sahip malzemeler için ilk burkulma sonrasında, gerilme değeri dolgusuz malzemede 1,39 MPa değerine düşerken, EVA köpük dolgulu malzemede ise 3,54 MPa değerine düşmüştür. Pik gerilme sonrasında ilk karşılaşılan lokal minimum noktasındaki bu artış, EVA dolgusunun bal peteği malzemesinin yük taşımadaki kararlılığını arttırdığı söylenebilir. Alüminyum hücre duvarları arasında bulunan EVA köpük, basma kuvvetleri altında burkulma hücre duvarlarına destek teşkil ederek, eklem nokta uzantılarının birbirine yaklaşmasını ve gerilmenin daha fazla düşmesini engellemektedir. Aynı zamanda, alüminyum hücre duvarları arasında sınırlı bir hacimde bulunan EVA köpük, viskoelastik ve termoplastik doğası gereğince kısıtlı bir sıkıştırılabilirliğe sahiptir (Mohamadi vd., 2021). Bunun neticesinde, gerilme değerinin düşmesini sınırlandırarak, daha yüksek gerinim değerlerinde yeni bir eklem oluşumunu sağlamaktadır. İlk lokal minimum nokta sonrasında EVA köpük dolgulu malzemeye ait gerilme değeri hızla artarak dolgusuz malzemelerde karşılaşılmayan pik gerilme değerine yakın yeni yüksek bir lokal

maksimum nokta oluşmuştur. Bu noktada gerilmenin yüksek olmasının sebebi, basma yüklerinin etkisi ile kapanan ve sıkışan gözenekler neticesinde EVA köpüğün kısmen yoğunlaşmaya başlamasıdır. İlk burkulma sonrasında oluşan yeni eklemler arasında kısmen yoğunlaşmış EVA köpük bulunması, katlanma mekanizması için gereken gerilme değerini yukarı çekerek, dayanımı arttırmıştır. Benzer keskin bölgesel maksimum ve minimum noktalar, diğer malzemelere kıyasla daha rijit alüminyum duvarlara ve daha yüksek yoğunluğa sahip 8,66 mm hücre boyutlu ve 100 µm folyo kalınlığındaki dolgulu bal peteği malzemesine ait eğride de açıkça görülmektedir.

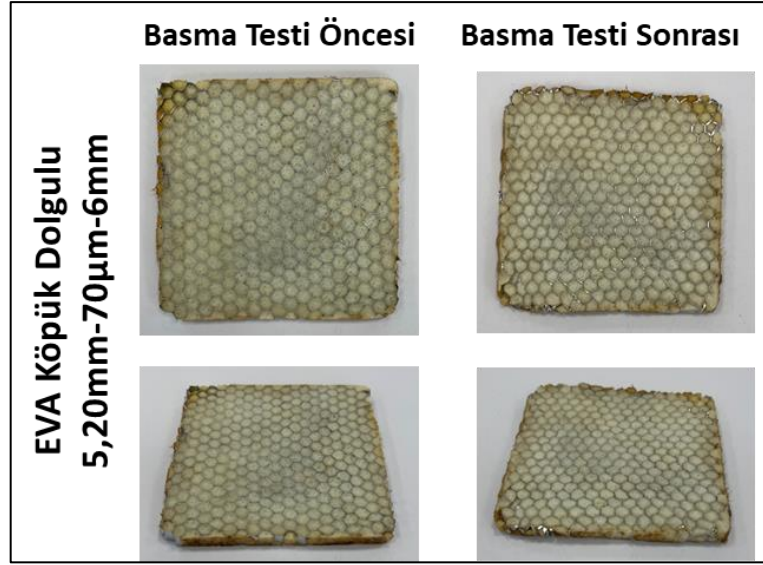
Düşük yoğunluğa sahip 14,17 mm hücre boyutu ve 50 µm folyo kalınlığına sahip alüminyum bal peteği malzemesinden imal edilen EVA köpük dolgulu yapıda ise dolgusuz malzemeye kıyasla net bir pik gerilim gözlemlenmemiş ve aksine plato bölgesinin pik gerilme değerinden daha yüksek gerilme seviyelerinde devam ettiği gözlemlenmiştir. Bahsedilen durum için 6 mm yüksekliğe sahip 14,17 mm hücre boyutunda ve 50 µm folyo kalınlığındaki dolgusuz ve dolgulu malzemeler kıyaslanabilir. Belirtilen geometrik parametrelerdeki dolgusuz malzemede pik gerilme 0,55 MPa iken, plato gerilmesi ortalama olarak 0,24 MPa değerlerinde devam etmektedir. EVA köpük dolgulu aynı malzemede ise pik gerilme değeri 1,04 MPa değerinde iken alüminyum duvarların ardışık katlanma mekanizmasını içeren plato bölgesinde ise gerilme değeri 1,33 MPa olarak tespit edilmiştir. Plato bölgesinin, ilk burkulma gerilmesinin daha üzerinde bir gerilme değeri ile devam etmesi malzemenin yük taşıma kapasitesinin arttığını ve buna istinaden yük altında daha kararlı olduğunu ispat etmektedir. EVA köpük dolgusunun kararlılık artırma etkisi, nispeten düşük yoğunluktaki alüminyum bal peteği malzemelerde kullanıldığında daha belirgin hale gelmektedir. EVA köpüğün, yüksek yoğunluğa sahip alüminyum bal peteği malzemelerinin kullanımında ise yapı yarı statik şartlarda uygulanan düzlem dışı basma yükleri altında deforme olsa dahi yüksek gerilme değerlerine dayanabilmekte ve yük kapasitesinde önemli bir değişim gözlemlenmemektedir.

EVA köpüğün, bal peteği malzemelerinde kullanımının bir sonucu olarak Şekil 4.11'de görüleceği üzere yoğunlaşma başlangıcı daha düşük gerilim değerlerinde gerçekleşmektedir. Bu durum, alüminyum hücre duvarları arasında bulunan EVA köpüğün, yapının yük altında daha fazla şekil değişimini engellemesi ve köpük ile yoğunluğu artan malzemenin yük altında düşük gerilim değerlerinde yoğunlaşmaya başlamasına sebep olması ile açıklanabilir.

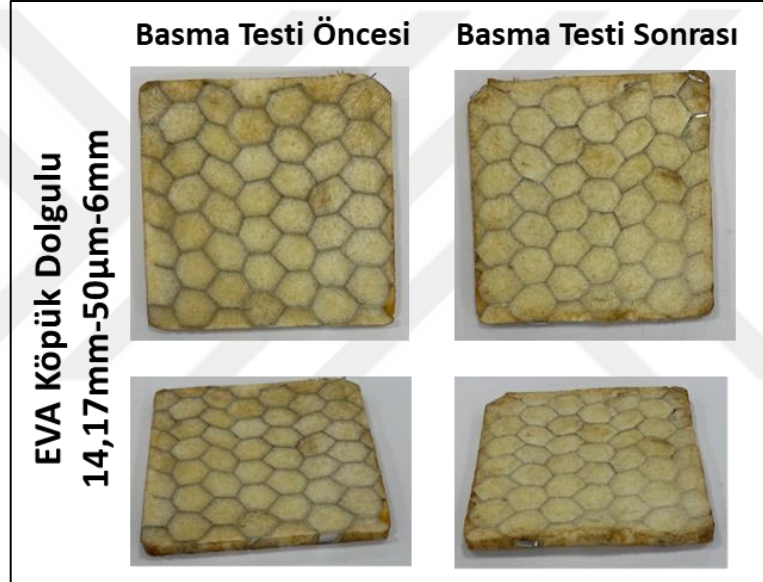


Şekil 4.11. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)

EVA köpük dolgulu malzemelerin sunduğu en önemli avantaj, yük kaldırıldıktan sonra yapının halen enerji sönümlenme kabiliyetine sahip olmasıdır. Şekil 4.12’de 6 mm yüksekliğe sahip 5,20 mm-70 µm ve 14,17 mm-50 µm hücre boyutu-folyo kalınlığı parametrelerindeki alüminyum bal peteği malzemelerinden imal edilmiş EVA köpük dolgulu yapıların basma öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.12’den görüleceği üzere, düzlem dışı basma yükleri uygulandığında dolgulu yapıda bulunan alüminyum hücre duvarları katlanmıştır. Basma yüklerinin kaldırılması ile hibrit yapıda bulunan EVA köpük kısmı geri yaylanarak yapının bütünlüğünü korumasını sağlamıştır. Bu durum, 14,17 mm hücre boyutuna sahip malzemede daha belirgin gözlemlenmektedir. Basma testi öncesinde eşit yükseklikteki EVA köpük ve alüminyum hücre duvarları basma testi sonrasında belirginliğini yitirerek EVA köpüğün daha belirginleşmesine sebep olmuştur. 6 mm yüksekliğe sahip bal peteği malzemesi kullanılarak üretilmiş olan EVA köpük dolgulu malzemeler, basma yükleri kaldırıldıktan sonra EVA köpük bulunan kısımlardan kumpas yardımı ile ölçülmüş ve neticesinde 5,20 mm hücre boyutu için (Şekil 4.12a) 4,605 mm; 14,17 mm hücre boyutu için ise 5,36 mm nihai yükseklik elde edilmiştir (Şekil 4.12b). Basma süresince katlanma mekanizması sonlanan alüminyum hücre duvarları göz önüne alındığında, büyük deformasyonlar sonrasında EVA köpüğe ait viskoelastik özellikler yapının bütünlüğünü korumasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, farklı geometrik parametrelere sahip alüminyum malzemelerde farklı geri yaylanma karakteristiğinin olduğunu göstermektedir.



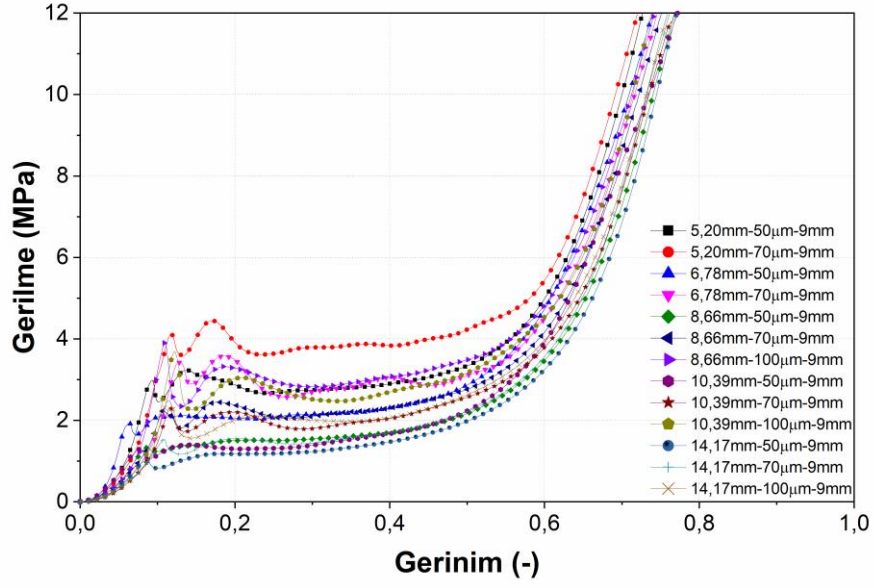
(a)



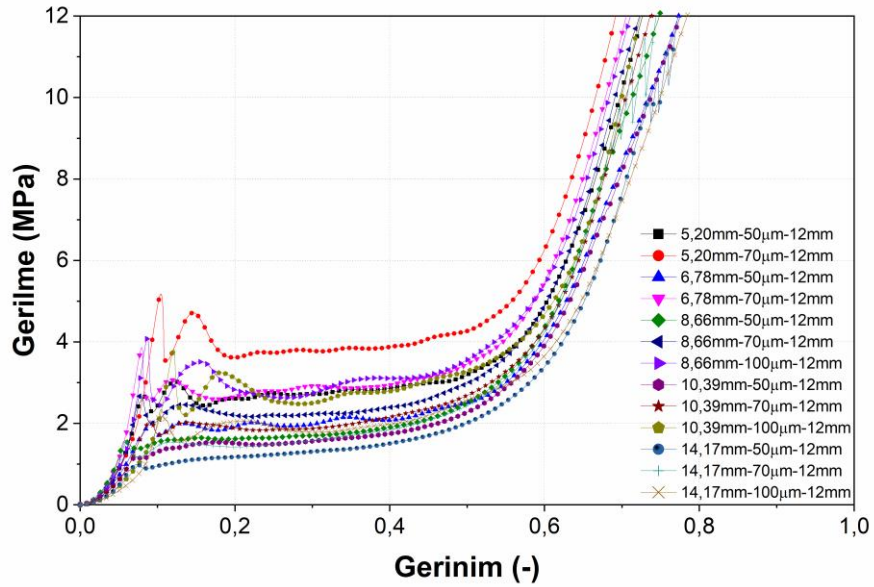
(b)

**Şekil 4.12.** Basma testi öncesi ve sonrası EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerine ait görüntüler a) 5,20 mm-70  $\mu$ m-6mm b) 14,17 mm-50  $\mu$ m-6mm

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de bütün hücre boyutu ve folyo kalınlıklarına ve sırasıyla 9 mm ve 12 mm yüksekliklere sahip alüminyum bal peteği malzemelerinden imal edilmiş EVA köpük dolgulu yapıların düzlem dışı basma testinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te görüleceği üzere 5,20 mm hücre boyutu ve 70  $\mu$ m folyo kalınlığına sahip EVA köpük dolgulu malzemenin eğrisine ait plato bölgesinin, Şekil 4.11’de verilmiş olan 6 mm yüksekliğe göre daha stabil olduğu tespit edilmiştir. Rijit alüminyum duvarları arasında bulunan EVA köpük sayesinde çekirdeğe ait yükseklik arttıkça, gerilme dalgalanmaları düzenlenmiştir.



Şekil 4.13. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)

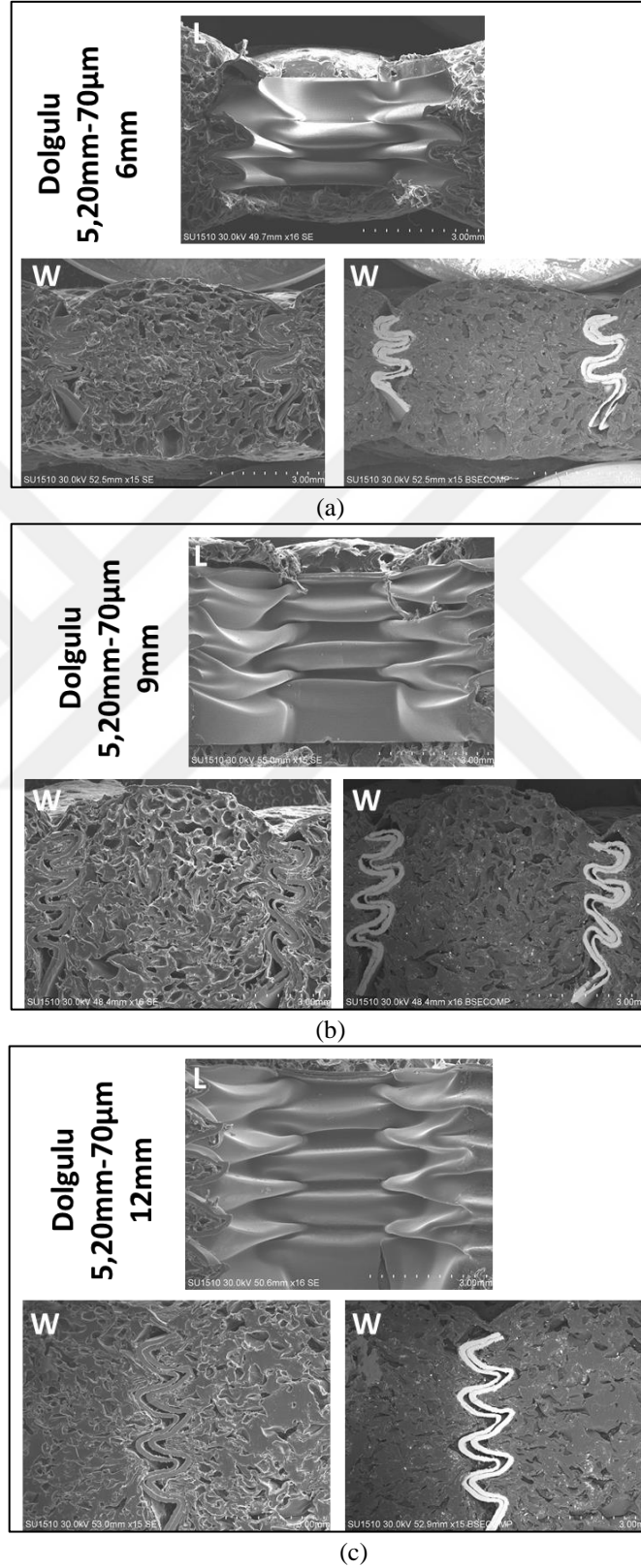


Şekil 4.14. Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm)

Basma testi sonrasında oluşan hasarın incelenmesi amacıyla 5,20 mm hücre boyutu, 70  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığına sahip alüminyum bal peteği malzemesinin 6 mm, 9 mm ve 12 mm yüksekliğindeki EVA köpük dolgulu malzemelerden kesit alınmış ve elektron mikroskopunda incelenmiştir. Şekil 4.15'te 5,20 mm-70 $\mu\text{m}$  malzemesi ve 6 mm, 9 mm, 12 mm yükseklikleri için L ve W yönünden çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.15'ten görüleceği üzere basma yükleri altında yoğunlaşan bal peteği malzemeler, basma

yükleri kaldırdıktan sonra EVA köpük kısımlarından bir miktar geri yaylanmıştır. W yönünde çekilmiş olan geri saçılan elektron görüntülerinde ise, katlanan alüminyum duvarların bu geri yaylanmayı engellediği görülmektedir. Bunun yanı sıra, EVA köpüğe ait gözenekler basma yüklerinin etkisi ile deforme olmakta ve kısmen kapanmaktadır. 6 mm ve 9 mm yüksekliğe sahip malzemeye ait W yönündeki ikincil elektron görüntüleri ele alındığında ise, yüzeye yakın bölgelerde gözeneklerin kısmen şekillerini koruduğu gözlemlenmektedir. EVA köpüğe ait gözenekler, basma yüklerinin etkisi ile sıkışır. Bu sıkışma anında açık gözeneklerden diğer gözeneklere bir gaz akışı olur. Kapalı gözeneklerde ise gaz sıkışmakta ve polimer duvarlara baskı uygulamaktadır. Bu baskı neticesinde, polimer duvarlarda esneme bir diğer deyişle elastik deformasyon meydana gelmektedir. Polimer köpüğe ait hücre duvarları kalın ise gaz içeride kalmakta ya da duvarlar ince ise gaz difüze olmaktadır (Kuncir vd., 1990). Basma yükleri kaldırıldığında ise, hücre içerisinde sıkışan gaz neticesinde esneyen polimer hücre duvarları eski haline dönmekte ve gaz tekrar hücre içlerine çekilmektedir. EVA köpük için gerçekleşen bu tersine deformasyon mekanizması, yüzeye yakın bölgelerde kısmen daha kolay gerçekleşmektedir. Bu sebeple yüzeye yakın bölgelerde EVA köpüğe ait gözenekler şekillerini muhafaza edebilmekte ve yapının yeni yüklere karşı direncini arttırmaktadır. Katlanan alüminyum hücre duvarları ise, viskoelastik özellik gösteren EVA köpüğe kıyasla daha rijit davranmakta ve arasında kalan EVA köpüğe ait gözeneklerin geri yaylanmasını engellemektedir. Ancak dolgunsuz malzemeler ile kıyaslandığında, alüminyum hücre duvarı katlarının arasında bulunan EVA köpükler hem basmaya karşı direnç oluşturmakta hem de basma sonrası bir miktar geri yaylanma sağlamaktadır. Bu durum dolgunsuz ve dolgulu malzemelere ait L yönü görüntülerinden de anlaşılabilir. Örneğin dolgunsuz malzemede alüminyum hücre duvarları katları arasında tam temas varken, EVA dolgulu yapılarda ise bu katlar arasında mesafe bulunmaktadır. Altıgenin çift duvar kalınlığına sahip kenarının bitişiğinde bulunan duvarlar, EVA köpüğün varlığı ile daha az sıkışarak katların arasında mesafe olmasına sebep olmaktadır. Buna ek olarak, W yönündeki görüntüler incelendiğinde ise, dolgunsuz malzemelere kıyasla katlara ait dalga boylarının arttığı ve genliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun neticesinde, EVA köpük dolgulu malzeme basma yükleri altında yoğunlaşsa dahi yük kaldırıldıktan sonra bir miktar geri yaylanarak yapıya ait bütünlüğün korunmasını sağlamaktadır. Bu tez kapsamında yük kaldırıldıktan sonra malzemenin geçici deformasyon oranını temsil eden %geri yaylanma oranı farklı

geometrik parametreler için hesaplanmış ve EVA Köpük Etkisi başlığı altında detaylı bir şekilde incelenmiştir.



**Şekil 4.15.** Basma testi sonrası EVA köpük dolgulu 5,20 mm hücre boyutu, 70 µm folyo kalınlığına sahip malzemelere ait SEM görüntüleri a) h:6 mm b) h:9 mm c) h:12 mm

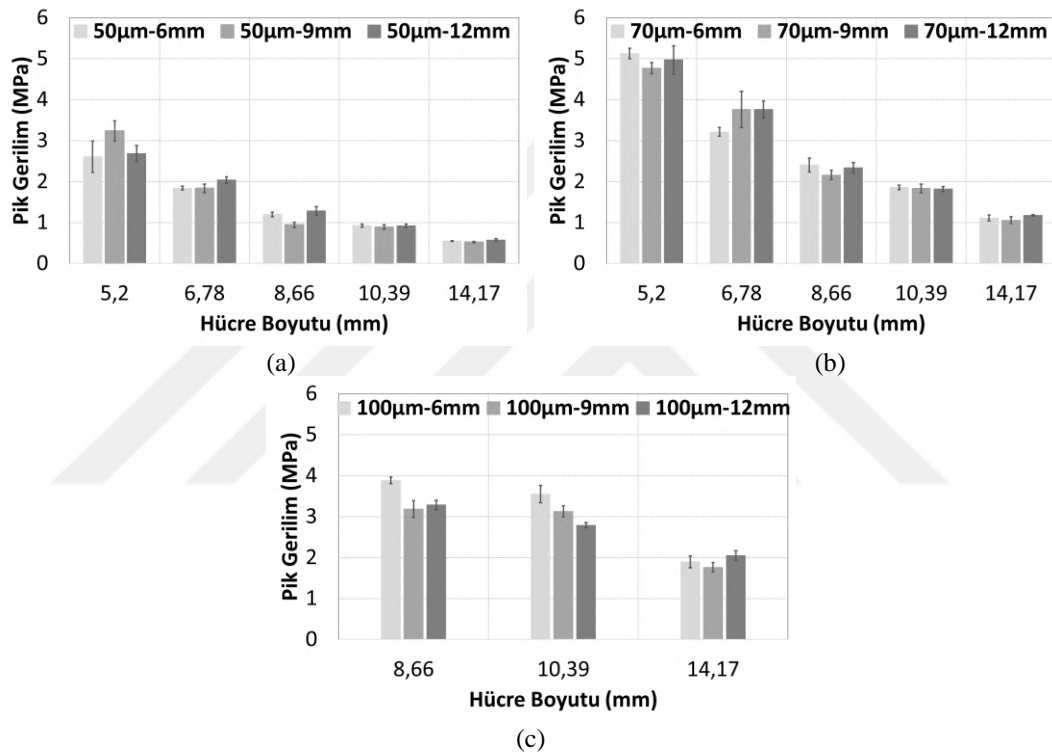
### 4.2.3. Hücre Boyutu Etkisi

#### 4.2.3.1. Pik Gerilim

Düzlem dışı basma yükleri altında, alüminyum bal peteğine ait hücre duvarları ilk olarak burkulur. İlk burkulmadan sonra duvar eski dayanımını kaybederek, daha düşük gerilmelerde deformasyona uğramaya devam eder. İlk olarak plastik deformasyona uğradığı yani burkulduğu gerilim noktasına pik gerilim adı verilir. Pik gerilim aynı zamanda malzemenin taşıdığı maksimum yük kapasitesini belirlemektedir. Farklı hücre boyutlarına sahip dolgusuz alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinin düzlem dışı basma testinden elde edilen pik gerilim verileri Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.16'da hücre boyutu etkisini incelemek amacıyla aynı folyo kalınlığına sahip malzemelere ait farklı yükseklikler aynı grafik üzerinde verilmiştir. Şekil 4.16'dan görüleceği üzere, 50µm, 70µm ve 100µm folyo kalınlığına sahip numunelerde hücre boyutu büyüdükçe pik gerilim değeri düşmektedir. Örneğin, 6 mm yüksekliğe, 50µm folyo kalınlığına ve sırasıyla 5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm hücre boyutuna sahip dolgusuz alüminyum bal peteği malzemelerinde sırasıyla 2,61 MPa, 1,84 MPa, 1,20 MPa, 0,93 MPa, 0,55 MPa pik gerilim değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.16a). 6 mm yüksekliğe sahip 5,20mm hücre boyutlu bal peteği malzemesinin, hücre boyutu 6,78 mm'ye genişletildiğinde pik gerilim yaklaşık %29,54 oranında azalmaktadır. Benzer şekilde, hücreler 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm boyutuna yükseltilirken pik gerilim, 5,20 mm boyuta sahip malzemeye göre yaklaşık olarak sırasıyla %54,17, %64,52, %78,98 oranında düşmektedir. 70 µm folyo kalınlığı ve 6 mm yüksekliğe sahip alüminyum bal peteği malzemelerinde hücre boyutu 5,20 mm'den 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm'ye yükseldiğinde ise sırasıyla %37,34, %53,14, %63,74, %78,35 oranında düşmektedir (Şekil 4.16b). Benzer folyo kalınlığı ve yüksekliğe sahip dolgusuz alüminyum bal peteği malzemelerinde, hücre boyutu arttırıldıkça, düzlem dışı basma yükleri altında ilk burkulma daha düşük gerilme değerlerinde meydana gelmektedir.

Pik gerilim değerlerinde, farklı yüksekliklere sahip malzemelere ait herhangi bir trend gözlemlenmemiştir. Malzemeler test öncesinde çerçeve olarak kullanılan belli boyutlara sahip kalıp malzemesi içerisine manuel olarak kesilip yerleştirilmiştir. Bu malzemeler daha sonra çerçeve içerisinden çıkarılmış, basma testine tabi tutulmuştur. Gerek temin edilmiş olan bal peteği malzemesindeki geometrik farklılıklar ve düzensizlikler gerek manuel kesim yapılmasının neticesinde tek parametre için gerçekleştirilen testlerde numuneler, farklı sayıda hücre duvarı içermektedir. Özellikle

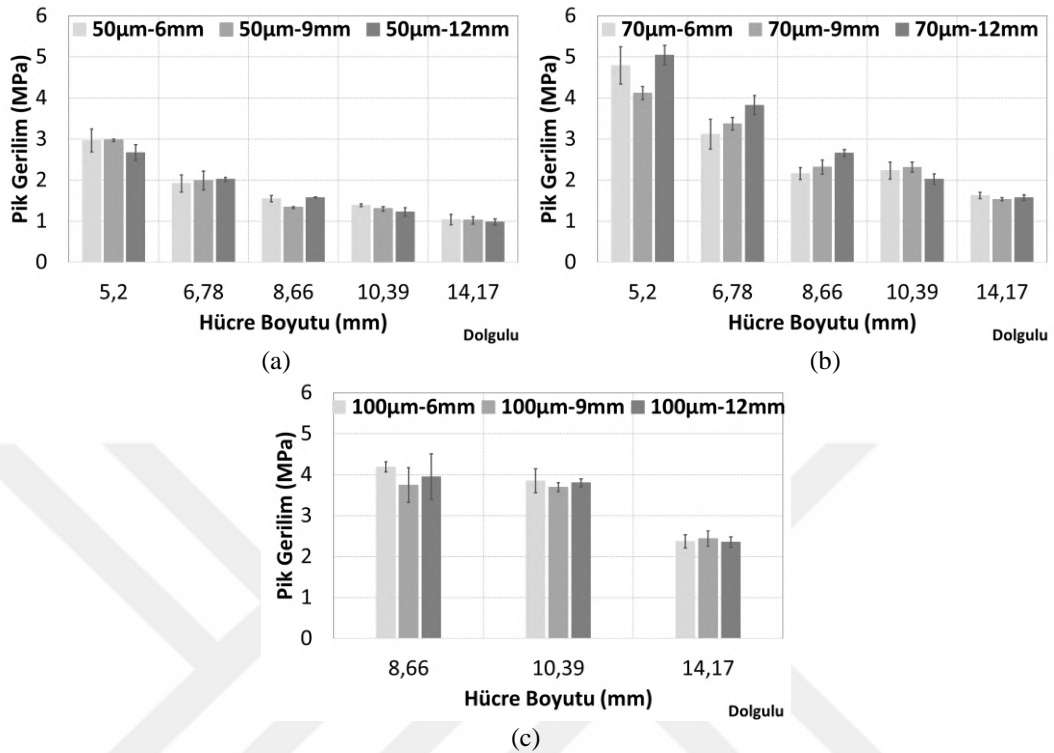
kenar kısımlarda bulunan altıgen şeklini tamamlamamış hücreler, sabit folyo kalınlığına ve hücre boyutuna sahip aynı yükseklikteki malzemelere ait pik gerilim değerlerinde sapmalar meydana getirmiştir. Şekil 4.16'da görüleceği üzere, üretim esnasında meydana gelen bu geometrik farklılıklar düşük hücre boyutlarında daha belirgin hale gelmiştir. Ancak, standart sapma değerleri göz önüne alındığında bu malzemelere ait değerlerin benzer aralıkta olduğu dikkat çekmektedir. Hücre boyutu küçüldükçe, test edilen malzemeye ait hataların daha baskın olduğu ve büyük hücre boyutlarında malzemenin nispeten daha kararlı bir yük taşıma trendine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.16. Dolgusuz bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun pik gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerine ait hücre boyutunun düzlem dışı basma testi neticesinde elde edilen pik gerilim değerlerine etkisi Şekil 4.17'de verilmiştir. 6 mm yükseklik ve 50µm folyo kalınlığındaki 5,20 mm hücre boyutlu EVA köpük dolgulu bal peteği malzemesinde hücre boyutu 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm'ye arttırıldığında pik gerilim sırasıyla %35,17, %47,81, %53,20, %65,03 oranında azalmıştır (Şekil 4.17a). Dolgulu yapılarda da hücre boyutu arttıkça pik gerilimde bir azalma söz konusudur. Ancak, özellikle 8,66mm, 10,39mm ve 14,17mm hücre boyutuna sahip dolgusuz ve dolgulu yapılar kıyaslandığında, pik gerilimdeki düşme oranının azaldığı tespit edilmiştir. Bu malzemelerde, alüminyum hücre duvarları

arasında bulunan EVA köpük dolgusu, duvarların burkulması için gereken gerilim değerini arttırarak, yapının maksimum yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.

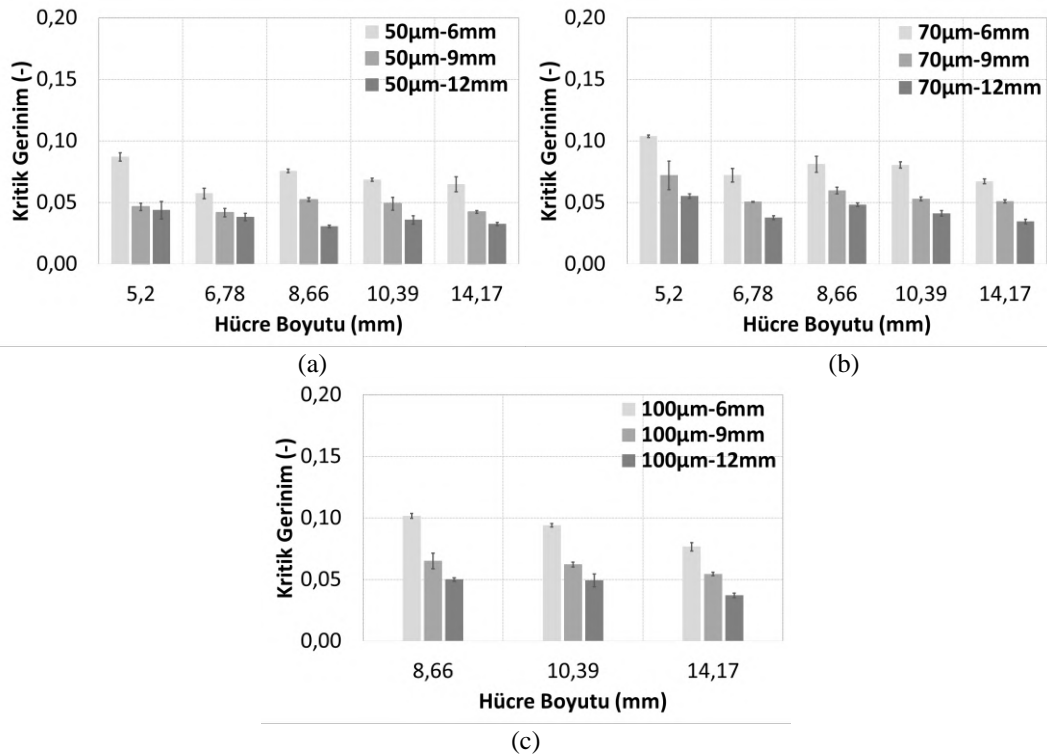


Şekil 4.17. Dolgulu bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun pik gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

#### 4.2.3.2. Kritik Gerinim

Alüminyum hücre duvarlarında ilk burkulmanın meydana geldiği ve pik gerilme olarak adlandırılan değere tekabül eden gerinim, kritik gerinim olarak tanımlanmaktadır. Burkulma esnasında malzemeye ait kritik gerinim değeri ne kadar yüksekse, yük altında malzeme yüksekliğinin orijinal numune yüksekliğine göre büyük değişimleri neticesinde burkulma gerçekleştiği söylenebilir. Bu sebeple kritik gerinim, aynı zamanda alüminyum hücre duvarlarının burkulması için gerekli olan boyut toleransının bir ölçütüdür. Diğer yandan, yüksek kritik gerinim oranları alüminyum hücre duvarlarının daha yüksek şekil değiştirme miktarı sonrasında burkulduğu anlamına da gelmektedir. Şekil 4.18'de 50 µm, 70 µm, 100 µm folyo kalınlıklarına ve 6 mm, 9 mm, 12 mm yüksekliklere sahip dolgusuz alüminyum bal peteği çekirdek malzemelerine ait hücre boyutlarının kritik gerinim değerlerine etkisi verilmiştir. Şekil 4.18'den görüleceği üzere, hücre boyutu ile kritik gerinim arasında net bir etki trendi mevcut değildir. 5,20 mm hücre boyutuna sahip malzemelerde, nispeten daha yüksek gerinim değerlerinde ilk burkulma gerçekleştiği söylenebilir.

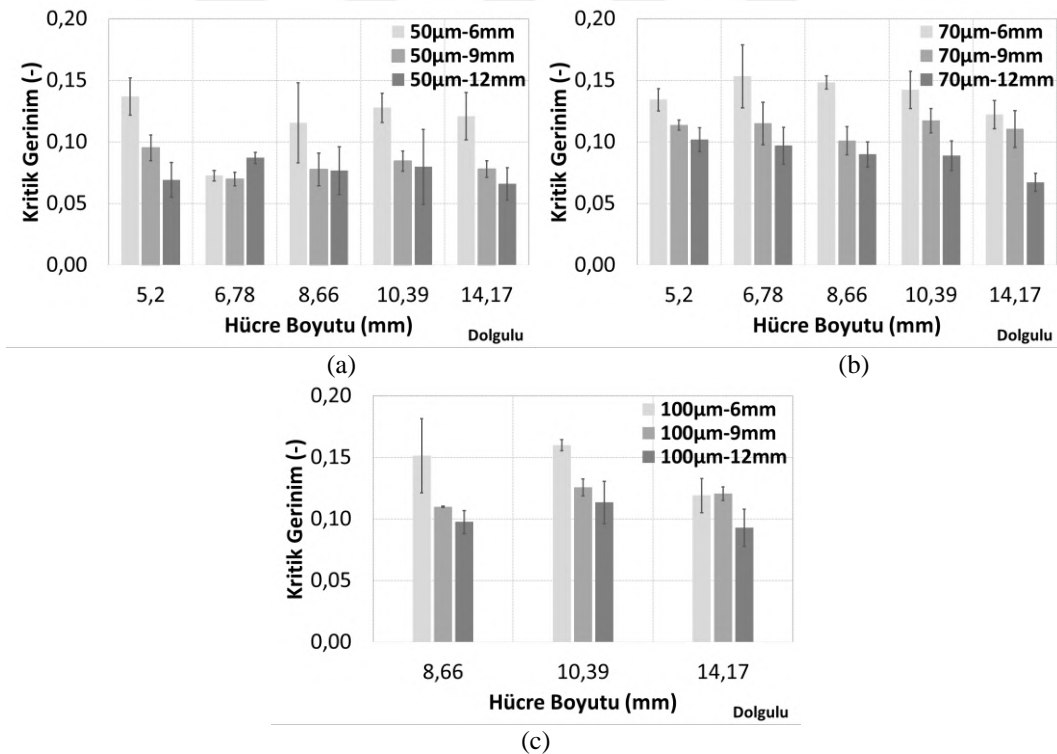
Bütün hücre boyutları göz önüne alındığında, bal peteği malzemesinin yüksekliği arttıkça kritik gerinim değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. 8,66 mm hücre boyutuna ve 100  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığına sahip alüminyum bal peteği malzemesinde çekirdek yüksekliği (kalınlığı), 6 mm'den 9 mm ve 12 mm'ye yükseltildiğinde, kritik gerinim değeri sırası ile %35,99 ve %50,85 oranında azalma göstermiştir (Şekil 4.18c). Kritik gerinim değeri hesaplanırken, basma yükleri altındaki malzemedeki boyut değişimi, orijinal numune yüksekliğine bölünmektedir. Bu doğrultuda, deformasyon esnasında numune yüksekliğindeki azalma, orijinal numune boyutu ile normalize edilir. Ancak, numune yüksekliği 6 mm'den 9 mm ve 12 mm'ye yükseltildiğinde orijinal numune boyutunda sırası ile %50 ve %100 olarak artmaktadır. Bu artış oranı, kritik gerinim değerinin artan yükseklik ile azalma oranlarından farklıdır. Bu durum, burkulma esnasında deforme olan alüminyum hücre duvarı ve numune yüksekliği arasında lineer bir ilişki olmadığını ortaya koymaktadır. Ancak, bal peteği malzemesi için düşük numune yüksekliği kullanmak, burkulma oluşumunun daha geniş aralıkta boyut değişimini içermesi sebebiyle gerinim toleransını arttırdığı söylenebilir.



Şekil 4.18. Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun kritik gerinime etkisi a) 50  $\mu\text{m}$  b) 70  $\mu\text{m}$  c) 100  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığı

Şekil 4.19'da EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun kritik gerinim değerine etkisi verilmiştir. Şekil 4.19'dan görüleceği üzere

EVA köpük dolgusu, kritik gerinim değerlerini arttırmıştır. Diğer bir deyişle, alüminyum hücre duvarları, EVA köpüğün etkisi ile daha yüksek gerinim değerlerinde ilk burkulmaya uğramıştır. Kritik gerinim değerleri, dolgusuz malzemelerde olduğu gibi EVA köpük dolgulu malzemelerde de hücre boyutu ile belli bir trende bağlı değişim göstermemiştir. Bunun yanı sıra, aynı malzemelere ait kritik gerinim değerlerinin ortalama kritik gerinim değerlerine göre sapmasının yüksek olduğu Şekil 4.19'dan açıkça görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi burkulmanın meydana geldiği kritik gerinim değeri, basma öncesi numune yüksekliğine göre hesaplanmaktadır. Dolgulu malzeme üretim prosesinin bir neticesi olarak, bir miktar polimer köpük alüminyum hücre duvarları yüksekliğini aşmaktadır. Basma testinde, gerinim değerleri hesaplanırken orijinal numune yüksekliği kullanılmıştır. Ancak çekirdek yüksekliğini aşan polimer köpük, düzlem dışı basma yükleri altında düşük gerilmelerde deformasyona uğrayarak, gerinim değerlerinin dolgusuz yapılara göre artmasına ve aynı parametrelere ait yapılarda kısmen daha yüksek sapsmalara sebep olduğu tespit edilmiştir.



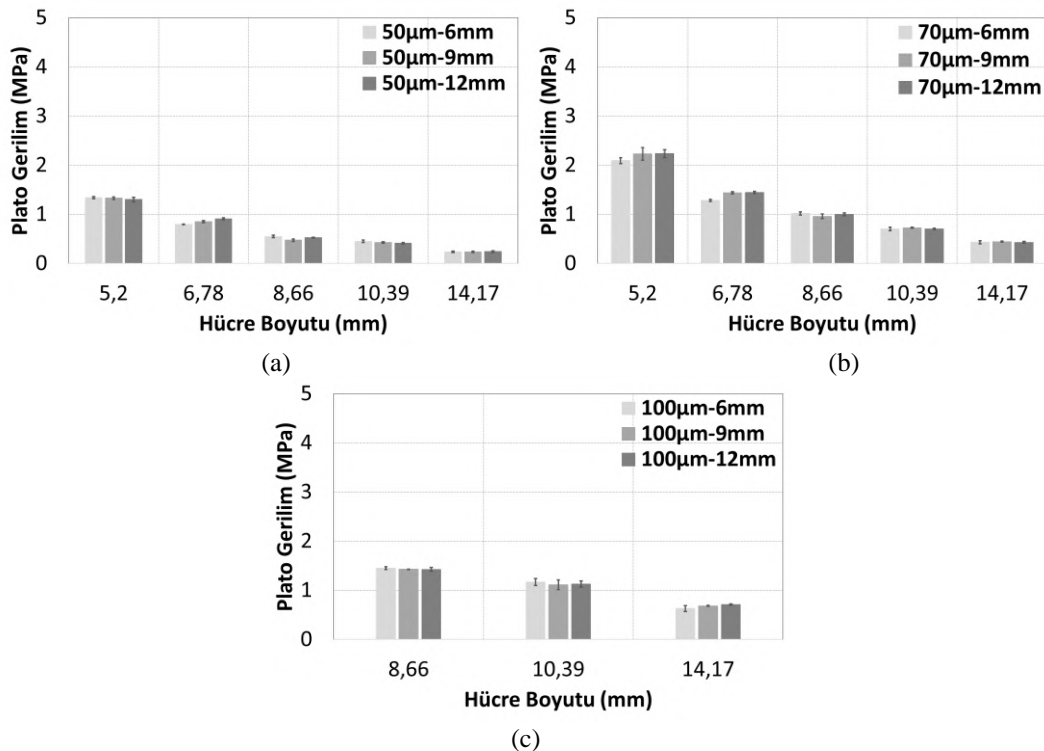
Şekil 4.19. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun kritik gerinime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

#### 4.2.3.3. Plato Gerilimi

Plato gerilimi, alüminyum hücre duvarlarının ilk burkulmasından hemen sonra duvarlardaki ardışık katlanmanın sürdüğü ve yoğunlaşmanın başladığı gerinim değerine

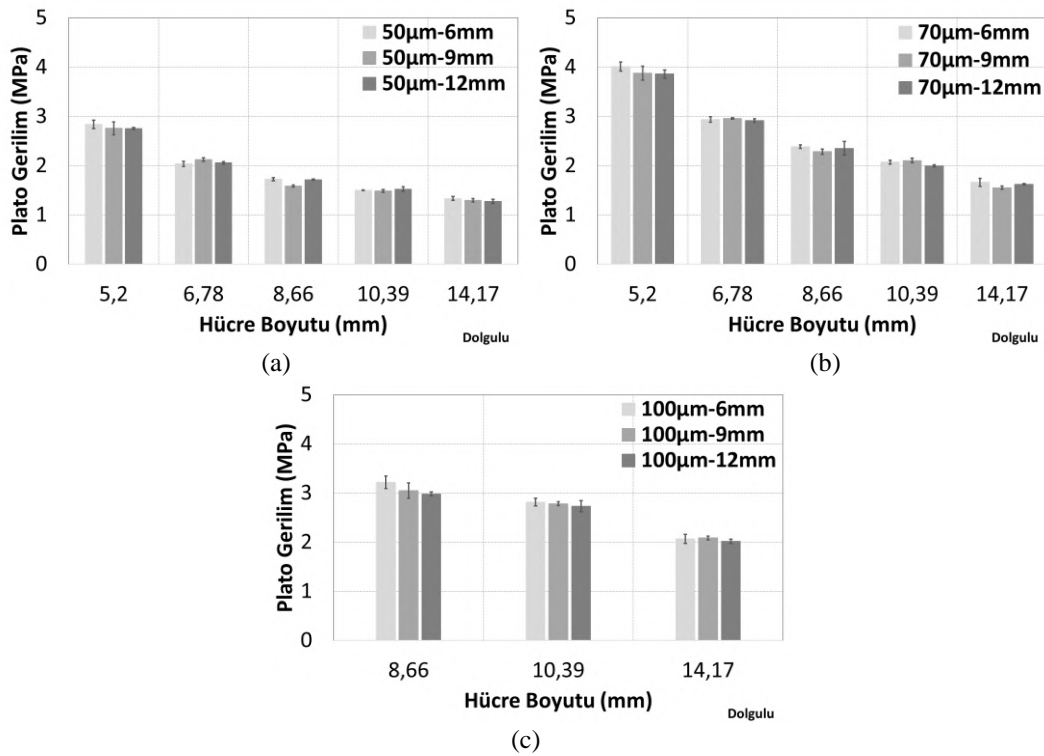
kadar devam eden bölgeye ait ortalama gerilme değeridir. Plato gerilimi, yarı statik basma testlerinden elde edilen, yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin önemli bir ölçütüdür.

Şekil 4.20’de dolgunsuz yapılara ait hücre boyutunun plato gerilime etkisi verilmiştir. Şekil 4.20’de görüleceği üzere, alüminyum bal peteğine ait hücre boyutu küçüldükçe, dolgunsuz yapılarda daha yüksek plato gerilmesi elde edilmiştir. 50  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığına, 6 mm yüksekliğe sahip dolgunsuz bal peteği malzemesine ait yapıda hücre boyutu 5,2 mm iken plato gerilmesi 1,34 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.20a). Aynı folyo kalınlığı ve yükseklikteki 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm ve 14,17 mm hücre boyutuna sahip malzemelerde ise sırası ile 0,80 MPa, 0,55 MPa, 0,45 MPa ve 0,24 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.20a) . Hücre boyutu arttıkça 5,20 mm hücre boyutuna sahip numuneye göre plato gerilmesinde sırası ile %40,53, %58,73, %66,32 ve %82,41 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, hücre boyutunun küçülmesi ile birim alana düşen alüminyum hücre duvarının artışı ile açıklanabilir. Aynı zamanda, yapının yoğunlaşması sebebiyle malzemenin deforme olması için gereken basma yükü artmaktadır. Düzlem dışı basma yükleri altında daha fazla hücre duvarının ardışık katlanması neticesinde plato gerilmesi yükselmiş ve yapının sahip olduğu enerji absorpsiyon kapasitesi azalan hücre boyutu ile artmıştır.



Şekil 4.20. Dolgunsuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun plato gerilime etkisi a) 50  $\mu\text{m}$  b) 70  $\mu\text{m}$  c) 100  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığı

Şekil 4.21’de EVA köpük dolgulı alüminyum bal peteği malzemelerine ait hücre boyutunun plato gerilmesine etkisi verilmiştir. Dolgusuz yapılar da görülen hücre boyutunun büyümesi ile plato gerilmesinin düşmesi trendi, dolgulu malzemelerde de gözlemlenmiştir. Benzer trend, dolgulu yapılar da enerji absorpsiyon kapasitesinin alüminyum hücre duvarları tarafından güçlü bir şekilde kontrol edildiğinin de bir göstergesidir. 50 µm folyo kalınlığı, 6 mm yüksekliğe ve 5,20 mm hücre boyutuna sahip EVA dolgulu yapıda plato gerilmesi 2,84 MPa olarak elde edilmiştir. Hücre boyutu arttıkça plato gerilmesi sırası ile 2,04 MPa, 1,73 MPa, 1,50 MPa ve 1,33 MPa değerlerine düşmüş, benzer şekilde 5,20 mm hücre boyutuna göre %28,21, %39,13, %46,95 ve %53,01 oranında azalma tespit edilmiştir. Ancak, hücre duvarlarının katlanması esnasında hücre duvarları arasında bulunan EVA köpük dolgusu, katlanma için gereken gerilme değerini artırarak yapının enerji absorpsiyon kapasitesini yükseltmiştir. EVA köpük sayesinde, 50 µm folyo kalınlığı, 6 mm yüksekliği ve 5,20 mm hücre boyutundaki dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait plato gerilmesine (1,34 MPa) neredeyse eş değer gerilmeye sahip 14,17 mm alüminyum hücre boyutunda (1,33 MPa) yapı elde edilmiştir (Şekil 4.21a).

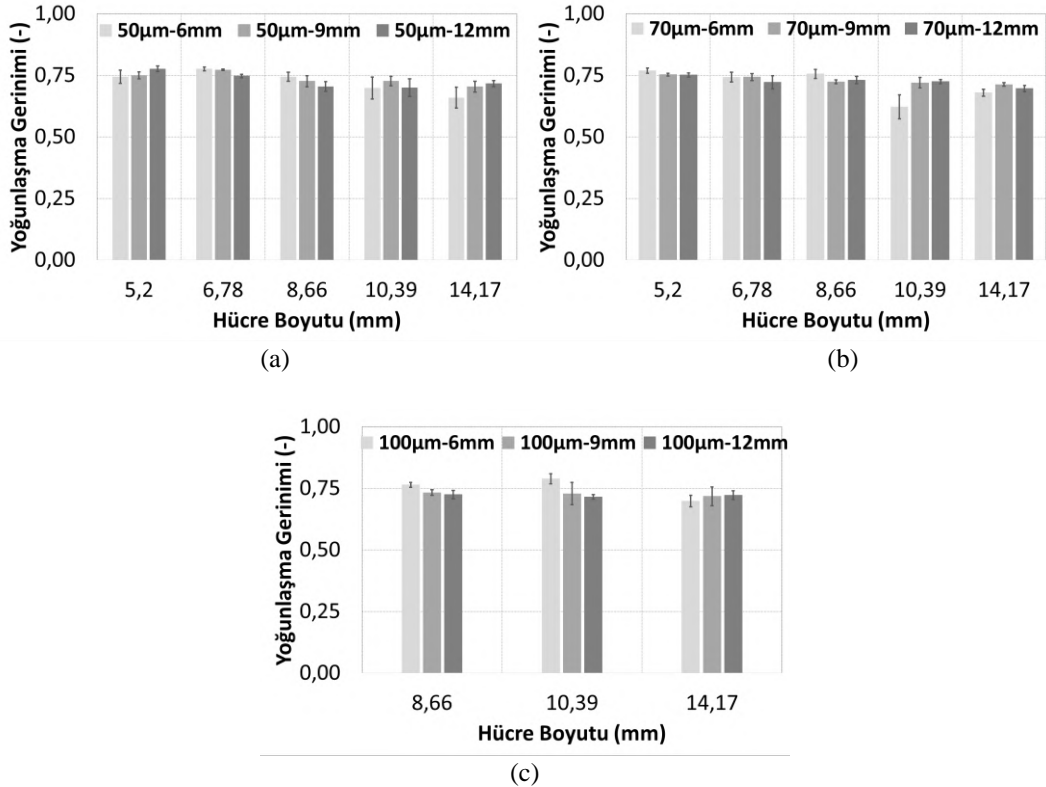


Şekil 4.21. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun plato gerilime etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

#### 4.2.3.4. Yoğunlaşma Gerinimi

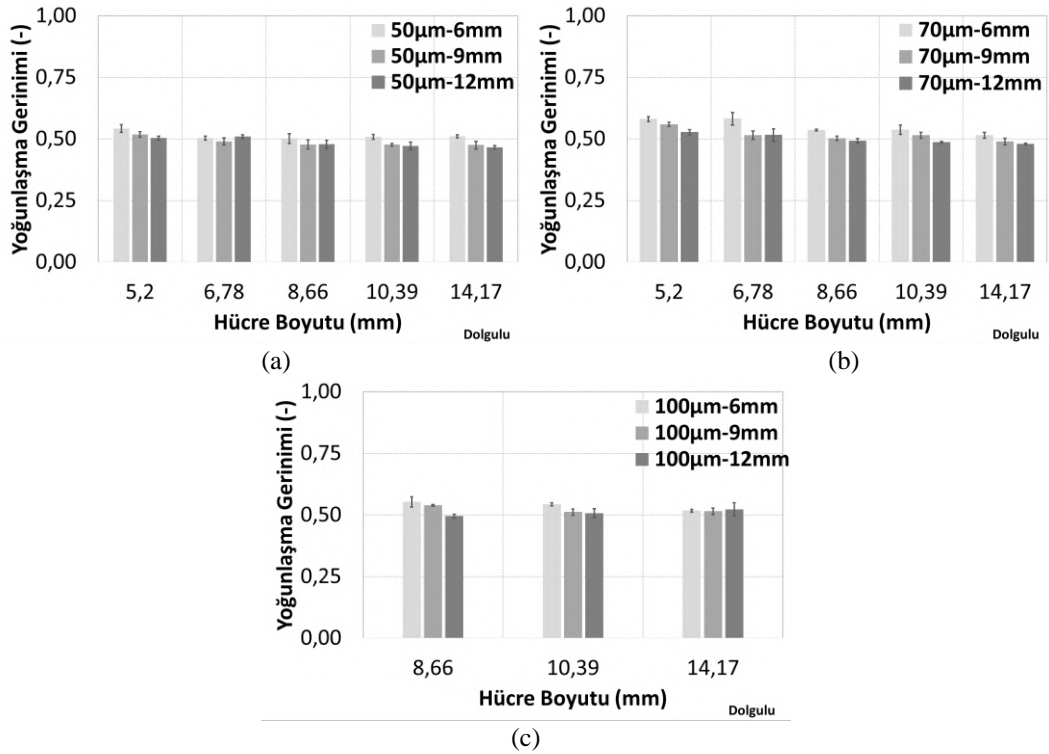
Basma yükleri altındaki alüminyum hücre duvarları plato bölgesi boyunca katlanmaktadır. Katlanma sürecinin sonunda belli bir gerinim değerinde, yapıdaki hücre duvarları birbirleri ile temas etmeye başlar ve yoğunluğun artması ile gerilim-gerinim diyagramında gerilim, keskin bir şekilde yükselmektedir. Yoğunlaşma bölgesinin başladığı gerinim değeri, yoğunlaşma gerinimi olarak adlandırılır. Yoğunlaşma gerinim değerinden sonraki bölgede, malzemeye verilen enerji sönmelenemez ve aktarılabildir. Bu sebeple, yoğunlaşma gerinimi özellikle enerji absorpsiyon uygulamalarında büyük önem arz etmektedir.

Şekil 4.22’de dolgusuz bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi verilmiştir. Her bir folyo kalınlığı ve bal peteği yüksekliği dikkate alındığında, hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak, yoğunlaşma, malzemenin %74’ü deforme olduktan sonra başlamışken; 14,17 mm hücre boyutuna sahip malzeme de ise yoğunlaşma %66 şekil değişimi sonrasında başlamaktadır. Dolayısı ile hücre boyutu arttıkça yoğunlaşma gerinim değerinin azaldığı ve hücre boyutları arasındaki fark büyüdükçe bu etkinin gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 4.22. Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 50 μm b) 70 μm c) 100 μm folyo kalınlığı

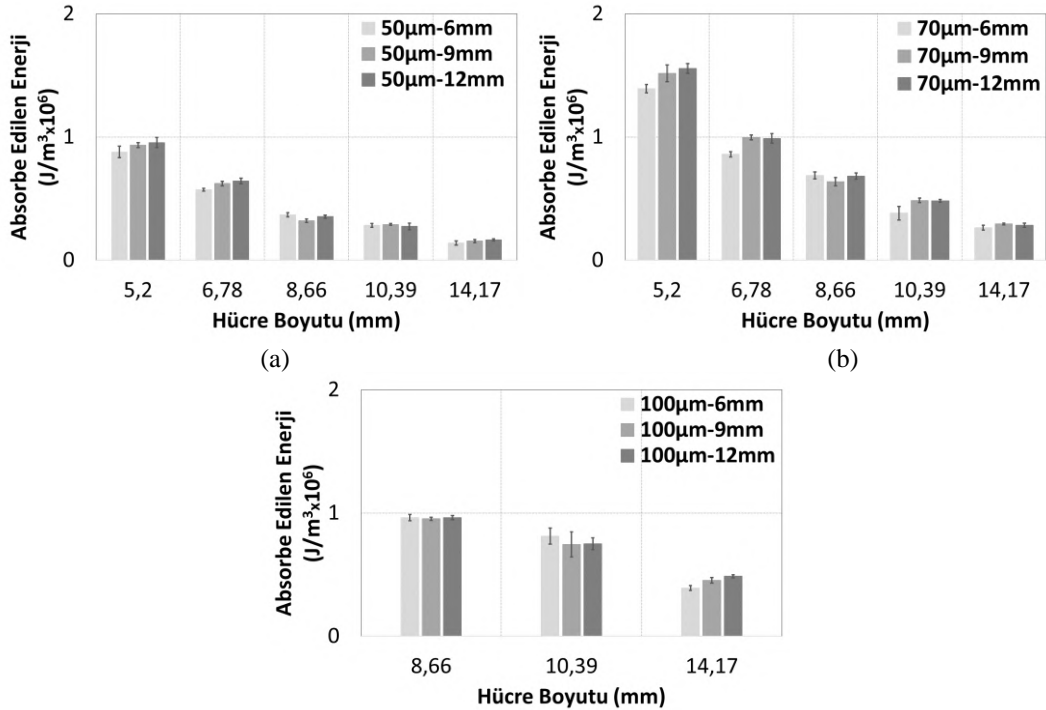
Şekil 4.23’de EVA köpük dolgulu bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi verilmiştir. Şekil 4.23’e göre EVA köpük dolgusu ile dolgusuz yapıya göre yoğunlaşma gerinim değerleri düşmüş ve yoğunlaşma daha düşük deformasyon oranlarında başlamıştır. 50 µm folyo kalınlığı, 6 mm yüksekliğe sahip 5,20 mm hücre boyutundaki EVA köpük dolgulu bal peteği malzemesinde yoğunlaşma gerinimi, 0,54 (mm/mm) olarak elde edilmiştir (Şekil 4.23a). EVA köpük dolgusu ile yapıya ait başlangıç yoğunluğu artmaktadır. Plato bölgesi süresince, alüminyum duvarları katlanmakta ve EVA köpüğe ait gözenekler basma yükleri neticesinde esnemektedir. Bu esnada EVA köpük kapalı gözenekleri içerisinde bulunan gaz sıkışarak, polimer hücre duvarlarına basınç uygulamaktadır. Dolgusuz yapıya göre malzemenin daha yoğun olması, hücre duvarlarının birbirine temas etmesini için gereken deformasyon oranını düşürmüştür ve dolayısı ile yoğunlaşma gerinim değerini azaltmıştır. 14,17 mm hücre boyutu, 50 µm folyo kalınlığı ve 6 mm yüksekliğe sahip dolgulu alüminyum bal peteği malzemesinde ise yoğunlaşma gerinim değeri 0,51 olarak elde edilmiştir. Genel olarak, dolgulu yapılarda da alüminyum bal peteği hücre boyutu büyüdükçe, yapıya ait yoğunlaşma gerinim değeri düşmektedir.



Şekil 4.23. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

#### 4.2.3.5. Absorbe Edilen Enerji

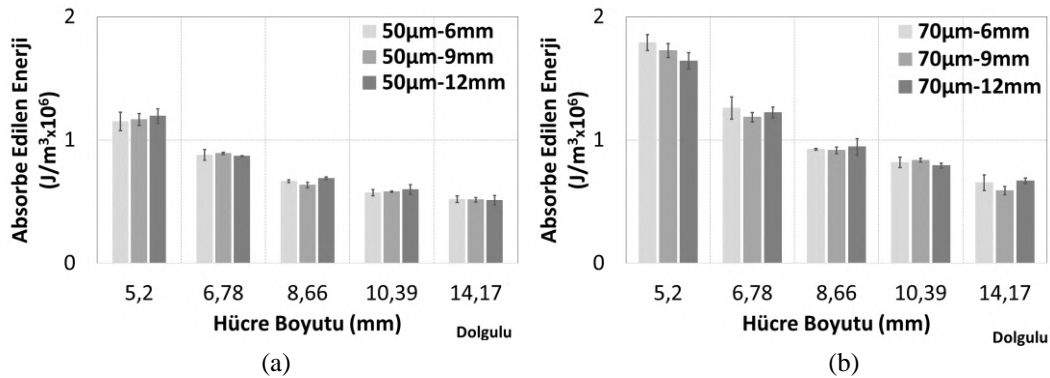
Düzlem dışı basma testinden elde edilen gerilme-gerinim diyagramlarında, alüminyum hücre duvarlarının ilk olarak burkulması (kritik gerinim) ve yoğunlaşmanın başladığı gerinim değeri arasındaki bölgedeki eğrinin altında kalan hesaplanarak, malzemede test esnasında hacim başına absorplanan enerji değerleri ( $J/m^3 \times 10^6$ ) tespit edilmiştir. Kritik gerinim ve yoğunlaşmanın başladığı gerinim arasında kalan bölgede, alüminyum malzeme, ardışık katlanma mekanizması sayesinde plastik deformasyona uğramaktadır. Şekil 4.24'de dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun, hacim başına absorplanan enerji değerine etkisi verilmiştir. 50  $\mu m$  folyo kalınlığına ve 6 mm yüksekliğe sahip 5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm hücre boyutlu dolgusuz malzemelerde hacim başına absorplanan enerji sırası ile 0,88, 0,57, 0,37, 0,28 ve 0,14  $J/m^3 \times 10^6$  olarak elde edilmiştir (Şekil 4.24a). Bal peteği malzemesinin hücre boyutu büyüdükçe, absorplanan enerji miktarı azalmıştır. Örneğin, 6 mm yüksekliğe ve 50  $\mu m$  folyo kalınlığına sahip malzemede hücre boyutu 5,20 mm'den 14,17 mm'ye yükseltildiğinde, absorplanan enerji miktarı %84,05 oranında azalmıştır (Şekil 4.24a). Hücre boyutunun küçülmesi ile yapı daha yoğun hale gelmekte ve buna ek olarak daha fazla alüminyum hücre duvarı ile desteklenmektedir. Bu sebeple, bal peteği malzemesinin hücre boyutunun yapıda absorplanan enerji miktarını önemli derecede etkilemektedir.

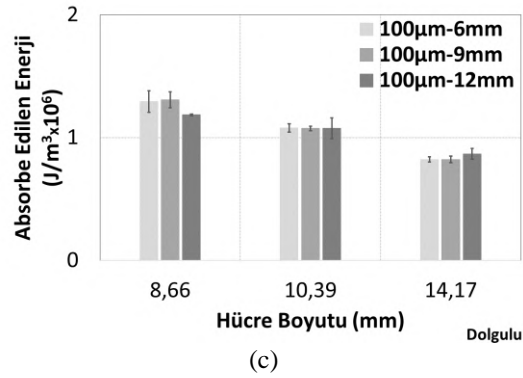


(c)

**Şekil 4.24.** Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

Şekil 4.25’de EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun hacim başına absorplanan enerji miktarına etkisi verilmiştir. Şekil 4.25’den görüleceği üzere dolgusuz yapılar göre, EVA köpük dolgulu malzemelerin basma yükleri altında daha fazla enerji absorbe ettiği söylenebilmektedir. 50 µm folyo kalınlığı, 6 mm yüksekliğe sahip sırası ile 5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm ve 14,17 mm hücre boyutuna sahip malzemelerde sırası ile 1,15-0,88-0,67-0,57-0,52  $J/m^3 \times 10^6$  enerji absorplanmıştır (Şekil 4.25a). EVA köpük dolgulu malzemelerde de dolgusuz malzemelere benzer şekilde, hücre boyutu küçüldükçe, absorplanan enerji miktarı artmıştır. Ancak, hücre boyutunun etkisi dolgusuz malzemelere göre nispeten azalmıştır. 50 µm folyo kalınlığı ve 6 mm yüksekliğe sahip malzemede hücre boyutu 5,20 mm’den 14,17 mm’ye düşürüldüğünde, hacim başına absorplanan enerji miktarı %54,81 oranında azalmıştır(Şekil 4.25a). Bu azalma oranı, dolgusuz malzemelerde belirlenmiş olan aynı geometrik parametrelere sahip bal peteği malzemesinde belirlenmiş olan orana (%84,05) göre nispeten daha düşüktür. Her ne kadar absorplanan enerji miktarı alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutuna önemli derecede bağlı olsa da, EVA köpüğe ait deformasyon ve köpüğün hücre duvarlarını desteklemesi ile yapının enerji absorpsiyon kapasitesi artmıştır. Buna ek olarak, daha fazla EVA köpük kullanılmış olan yüksek hücre boyutlu alüminyum bal peteği malzemelerinde bu etki daha açık şekilde gözlemlenebilmektedir.



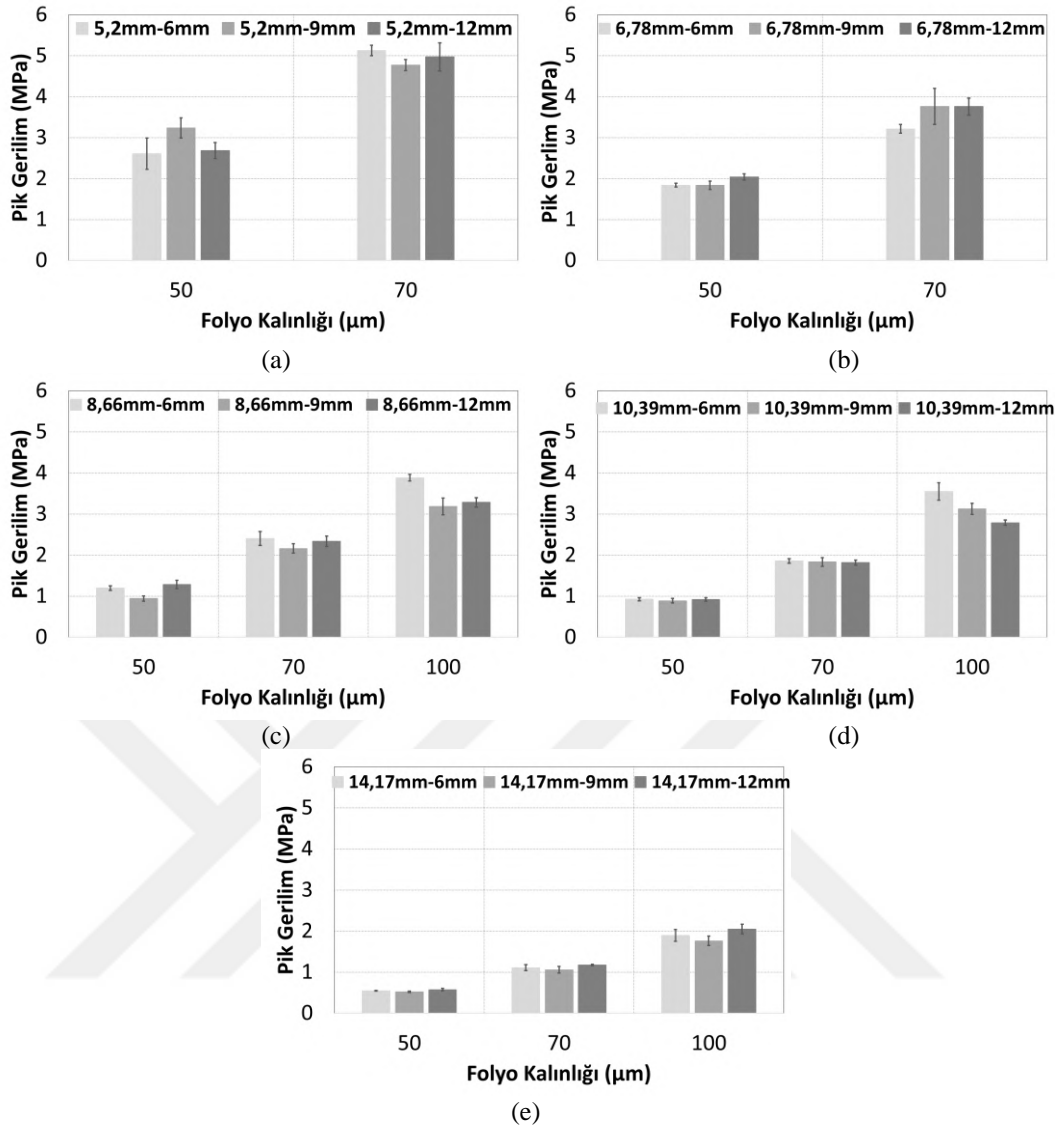


Şekil 4.25. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

#### 4.2.4. Folyo Kalınlığı Etkisi

##### 4.2.4.1. Pik Gerilim

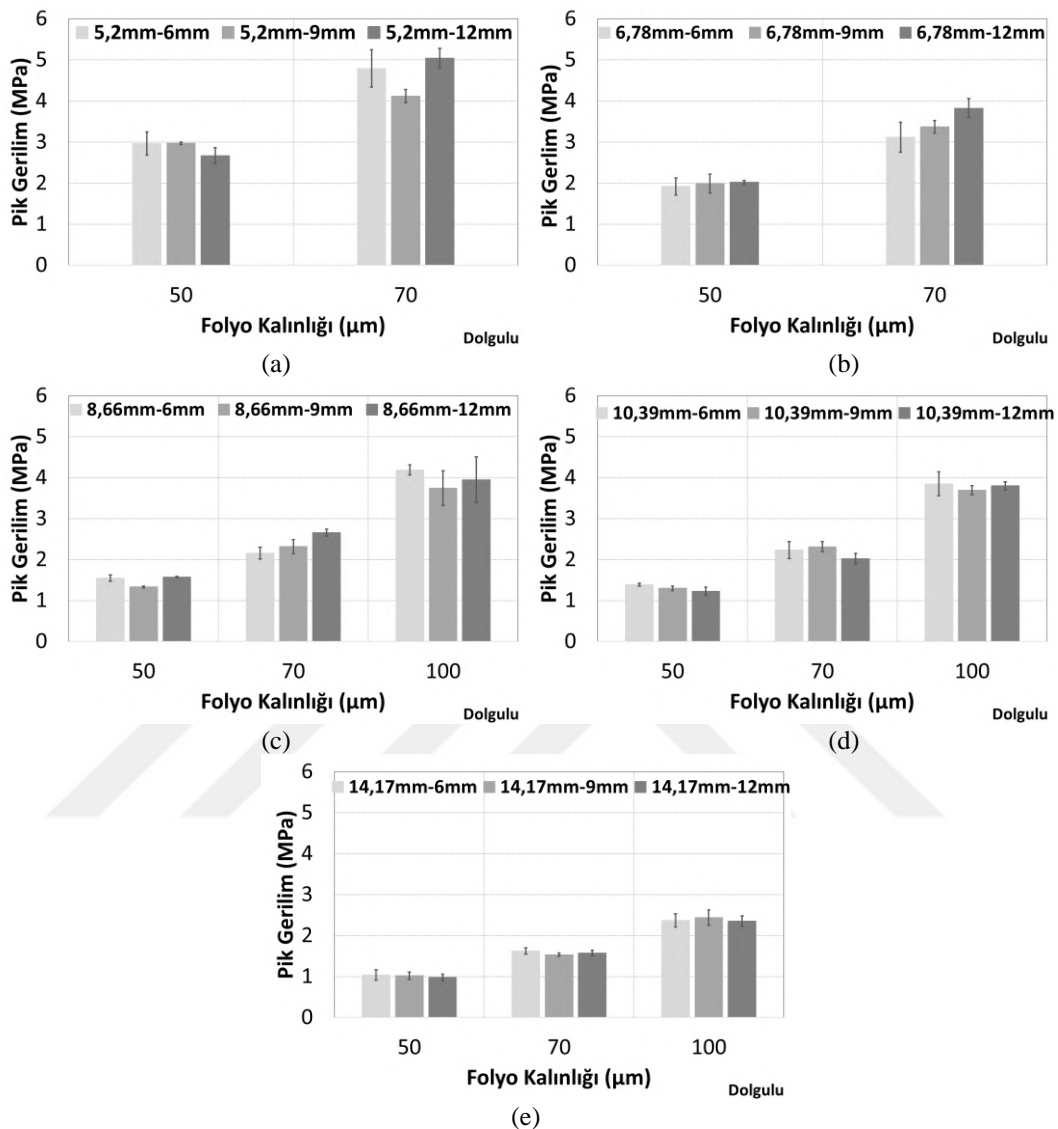
Dolgusuz bal peteği çekirdek malzemelerinin imal edildiği alüminyum folyo kalınlığının pik gerilime etkisi Şekil 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.26'da malzemeler hücre boyutlarına göre sınıflandırılmıştır. Alüminyum folyo kalınlığı arttıkça, hücre duvarlarının burkulması için gereken gerilme değeri artmaktadır. Pik gerilmedeki bu artış, 6 mm, 9mm ve 12 mm yüksekliğe sahip bütün bal peteği malzemelerde görülmektedir. 5,20 mm hücre boyutuna sahip malzemed, folyo kalınlığı 50µm'den 70µm'ye arttırıldığında, pik gerilim 6 mm yükseklik için 2,61 MPa'dan %96,53 oranında artarak 5,13 MPa'a yükselmiştir (Şekil 4.26a). Folyo kalınlığı etkisi belirgin şekilde 100µm folyodan imal edilmiş 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm hücre boyutuna sahip bal peteği malzemelerinde görünmektedir. 10,39 mm hücre boyutuna ve 6 mm yüksekliğe sahip dolgusuz malzemelerin basma testinden elde edilen pik gerilim değerleri 50 µm, 70 µm ve 100 µm folyo kalınlıkları için sırasıyla 0,93 MPa, 1,86 MPa, ve 3,55 MPa olarak elde edilmiştir(Şekil 4.26d). Folyo kalınlığı 50 µm'den 70 ve 100 µm'ye arttırıldığında pik gerilim 50 µm'ye göre sırası ile %100,86 ve %283,38 oranında artmıştır. Dolgusuz bal peteği malzemesinde folyo kalınlığının, malzemenin düzlem dışı basma yüklemelerinde burkulma direncini önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. Dolgusuz bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının pik gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

EVA köpük dolgulu bal peteği çekirdek malzemelerinde alüminyum folyo kalınlığının etkisi Şekil 4.27’de verilmiştir. Şekil 4.27’e göre alüminyum folyo kalınlığı arttıkça, pik gerilim değerleri artmıştır. 5,20 mm hücre boyutuna ve 6 mm yüksekliğe sahip EVA köpük dolgulu malzemede pik gerilim, folyo kalınlığı 50 µm’den 70 µm’ye arttırıldığında 2,97 MPa’dan 4,79 MPa değerine %61,54 oranında yükselmiştir(Şekil 4.27a). 10,39 mm hücre boyutu ve 6 mm yüksekliğe sahip EVA köpük dolgulu alüminyum malzemelere ait folyo kalınlığı 50 µm, 70 µm ve 100 µm için sırası ile 1,39 MPa, 2,23 MPa, 3,85 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.27d). Bu malzeme için 50 µm folyo kalınlığı 100µm’ye arttırıldığında pik gerilim değeri %177,37 artmıştır. Aynı geometrik parametreler için dolgusuz ve EVA dolgulu bal peteği malzemeler kıyaslandığında, folyo kalınlığı etkisinin dolgusuz yapılarda daha belirgin bir artışa sebep

olduğu ve EVA köpük dolgulı malzemelerde ise pik gerilmedeki artışın nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir.

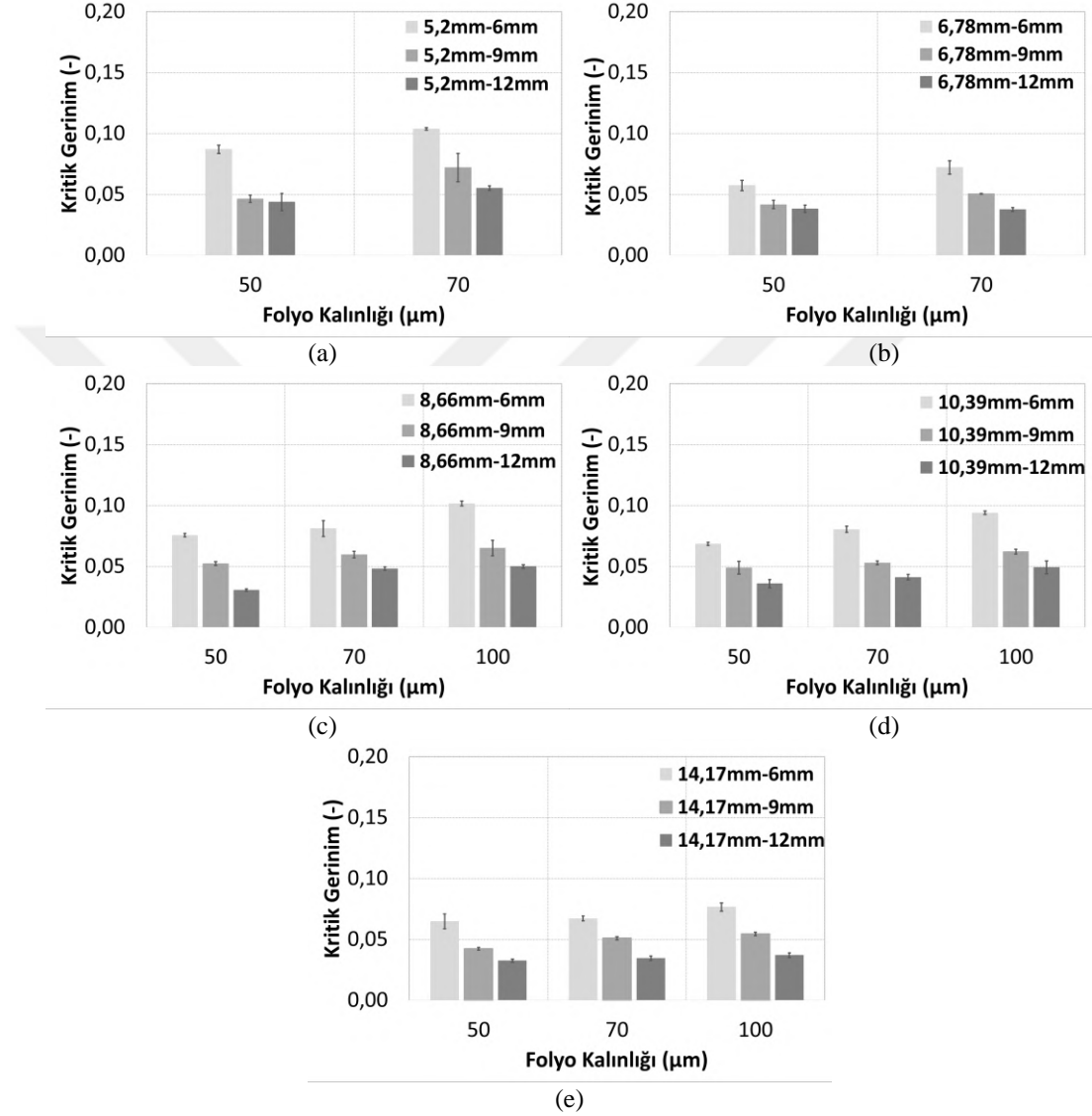


Şekil 4.27. Dolgulu bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının pik gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

#### 4.2.4.2. Kritik Gerinim

Alüminyum folyo kalınlığının, dolgusuz bal peteği malzemelere ait kritik gerinim değerlerine etkisi Şekil 4.28’de verilmiştir. Şekil 4.28’de 5,2 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm ve 14,17 mm hücre boyutlarına sahip, 6 mm, 9mm ve 12 mm yüksekliklerindeki dolgusuz alüminyum bal peteklerine ait kritik gerinim değerleri, folyo kalınlığı arttıkça artmaktadır. Örneğin, 10,39 mm hücre boyutu ve 6 mm yüksekliğe sahip dolgusuz malzemede folyo kalınlığı 50  $\mu\text{m}$ ’dan 70  $\mu\text{m}$  ve 100  $\mu\text{m}$ ’ye arttırıldığında, kritik

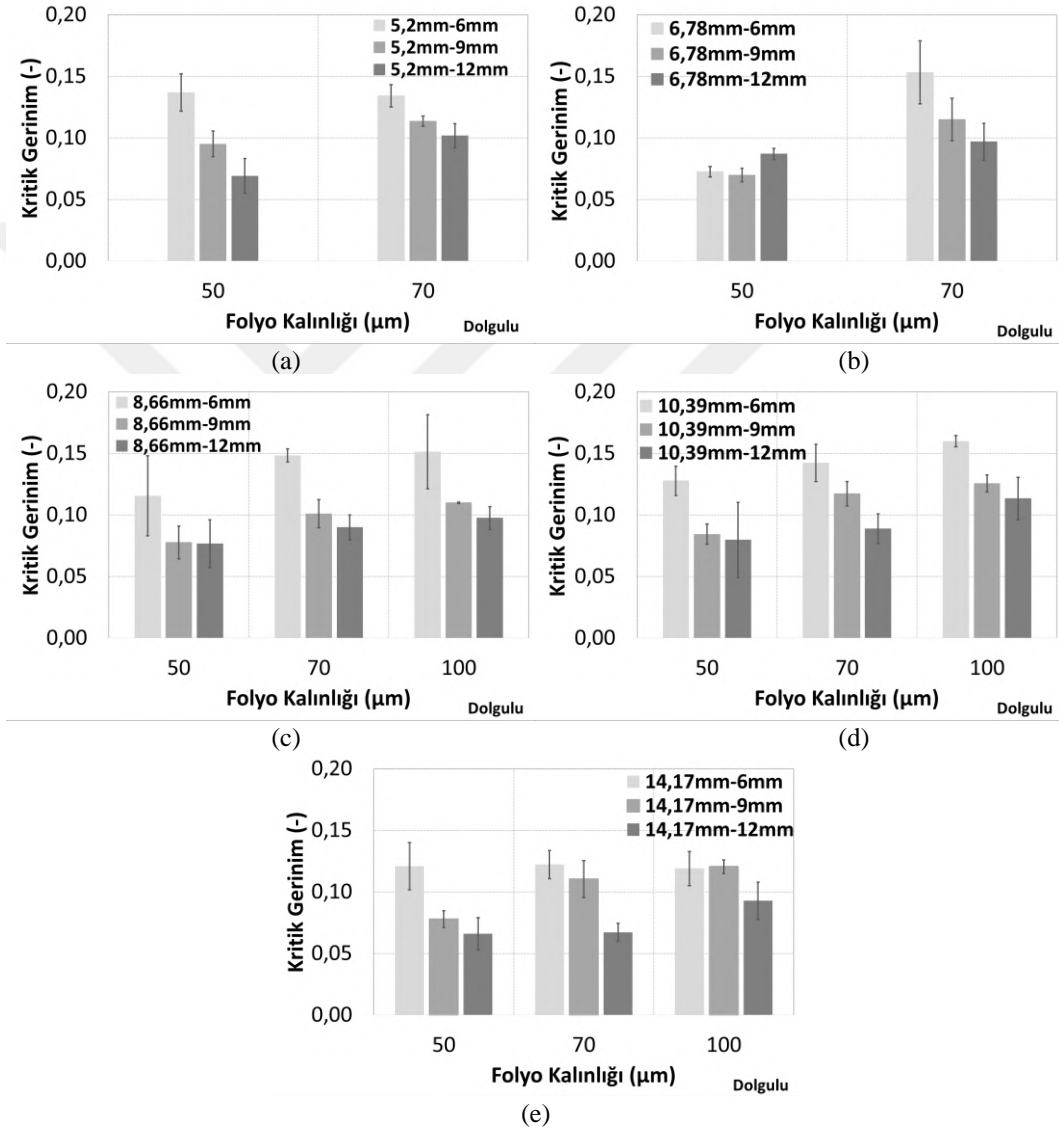
gerinim sırası ile %17,66 ve %37,47 oranında artmıştır (Şekil 4.28d). Folyo kalınlığının artması ile alüminyum hücre duvarlarında daha yüksek gerinim değerlerinde burkulma meydana gelmiştir. Başlangıç numune yüksekliğine göre, malzemede burkulma öncesi daha fazla şekil değişimi meydana gelmiştir.



Şekil 4.28. Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının kritik gerinime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

Şekil 4.29’da EVA köpük dolgulu bal peteği malzemelerine ait folyo kalınlıklarının kritik gerinime etkisi verilmiştir. Dolgulu malzeme yüzeylerinde bulunan EVA köpük fazlalıkları daha önce belirtildiği gibi yüksek sapsmalara sebep olduğu için, kritik gerinim değerlerine ait trendin dolgusuz malzemelere göre kısmen gölgelemesine sebep olmaktadır. Etki trendinin nispeten belirgin olduğu 10,39 mm hücre boyutu ve 6 mm yüksekliğe sahip malzemede folyo kalınlığı 50  $\mu\text{m}$ ’den 70  $\mu\text{m}$  ve 100  $\mu\text{m}$ ’ye

arttırıldığında, kritik gerinim değerinde %11,39 ve %25,14 oranında bir artış gözlemlenmektedir (Şekil 4.29d). Kritik gerinim artış oranındaki azalma, alüminyum hücre duvarları arasındaki EVA köpüğün, artan folyo kalınlığı etkisi ile ilk burkulmaya kadar olan şekil değişimini nispeten engellediği söylenebilmektedir. Ancak genel olarak EVA köpük, bütün geometrik parametrelere sahip alüminyum yapılar, burkulmanın gerçekleştiği birim şekil değiştirme miktarını ötelemiştir.

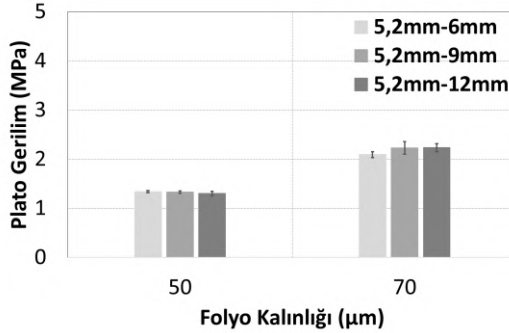


Şekil 4.29. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının kritik gerinime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

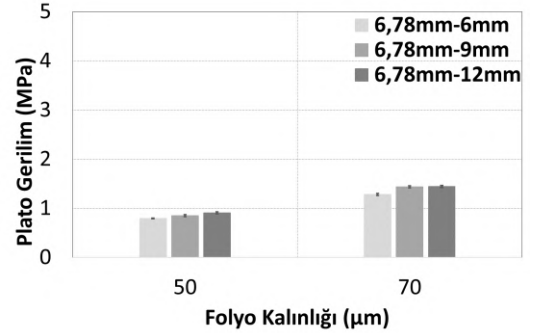
#### 4.2.4.3. Plato Gerilimi

Bal peteği malzemesinin imal edildiği alüminyum folyo kalınlığı, deformasyon esnasında duvarlarda ardışık burkulmalar ve katlanmalar gerçekleştiği için önemli parametrelerden biridir. Şekil 4.30'de dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait

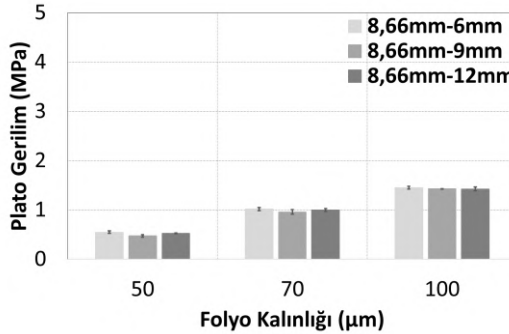
folyo kalınlığının plato gerilmesine etkisi verilmiştir. Şekil 4.30'a göre folyo kalınlığı arttıkça, plato gerilmesi artmaktadır. 8,66 mm hücre boyutuna sahip 6 mm yüksekliğindeki dolgunsuz malzemede plato gerilmesi 50  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığında plato gerilmesi 0,55 MPa iken, folyo kalınlığı 70  $\mu\text{m}$  ve 100  $\mu\text{m}$ 'ye yükseltildiğinde sırası ile 1,02 MPa ve 1,45 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.30c). 50  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığından elde edilen plato gerilmesine göre %85,21 ve %163,73 artış sağlanmıştır. Düzlem dışı basma yükleri altında, alüminyum hücre duvarlarında burkulma sonrasında ardışık olarak burkulma ve bu burkulma noktalarının birbirlerine temas etmesi ile katlanma olmaktadır. Folyo kalınlığının artması, alüminyum duvarların rijitliğini artırarak katlanma için gereken gerilme miktarını arttırmaktadır. Bu durum, benzer şekilde folyo kalınlığının artması ile yapıya ait yoğunluğun artması ile de açıklanabilir. Bal peteği malzemesine ait yükseklik değıştikçe yapıda yoğunluk değışimi olmamaktadır. Bu sebeple, her bir hücre boyutu ve folyo kalınlığı değeriendirildiğinde 6 mm, 9 mm ve 12 mm yüksekliklere sahip malzemelerde hemen hemen aynı plato gerilme değeri elde edilmiştir.



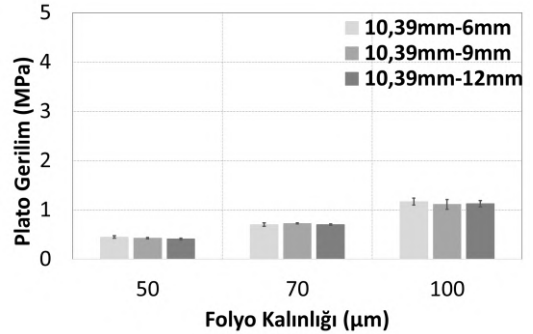
(a)



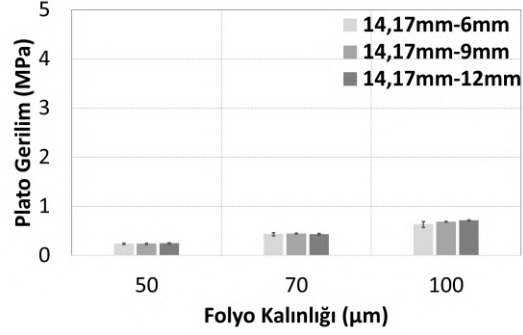
(b)



(c)



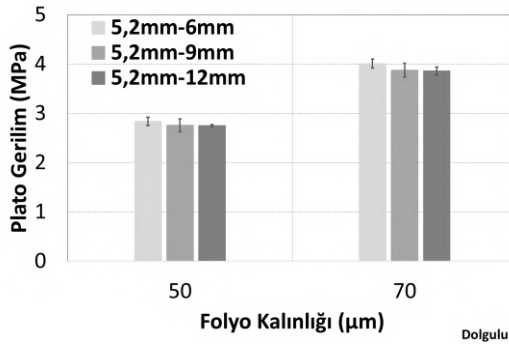
(d)



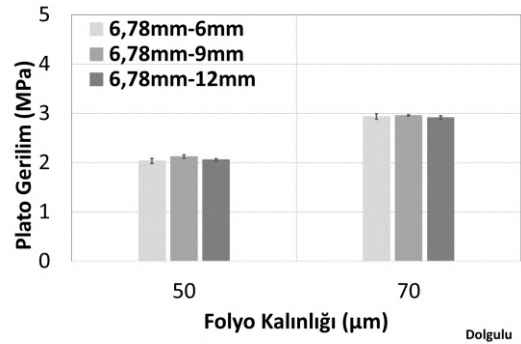
(e)

Şekil 4.30. Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının plato gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

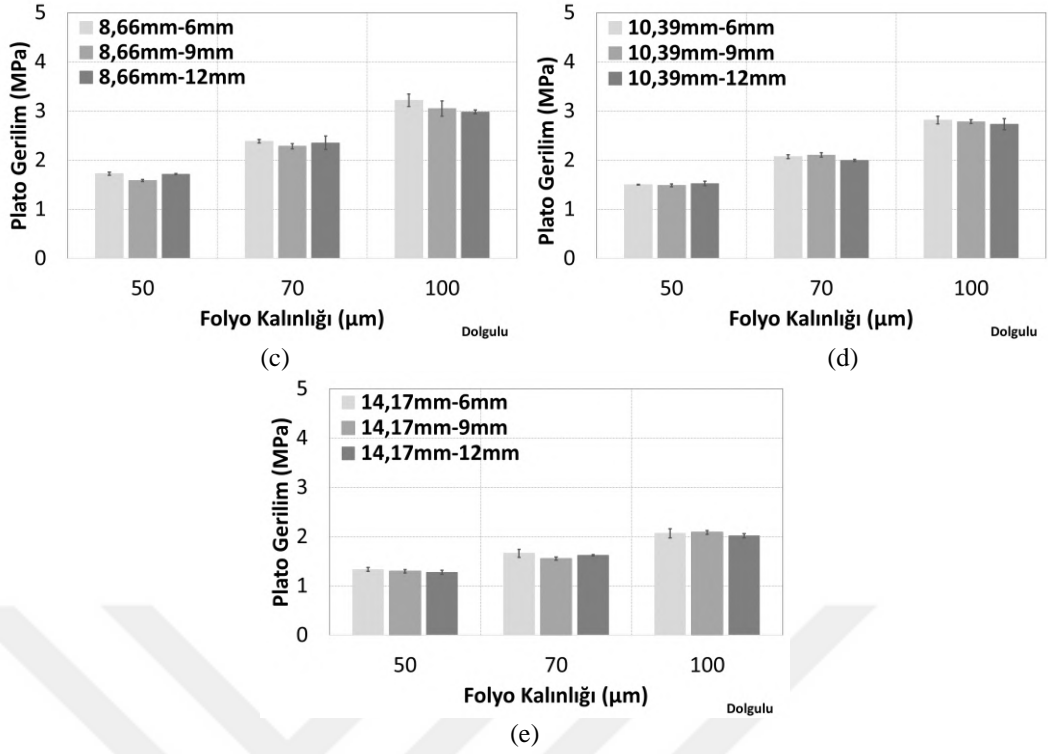
Şekil 4.31’de EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının plato gerilimlerine etkisi verilmiştir. Şekil 4.31’den görüleceği üzere benzer geometrik parametrelere sahip dolgulu yapılarda, dolgusuz yapılara göre plato gerilmesinin arttığı tespit edilmiştir. 8,66 mm hücre boyutu, 6 mm yüksekliğe sahip bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığı 70 µm ve 100 µm’ye arttırıldığında basma testinden elde edilen plato gerilme değeri, 1,73 MPa’dan sırası ile 2,39 MPa ve 3,22 MPa’a yükselmiştir(Şekil 4.31c). 50 µm folyo kalınlığına (8,66 mm hücre boyutu, 6 mm yükseklik için) göre kalınlık 70 µm ve 100 µm’ye yükseltildiğinde plato gerilme %38,24 ve %86,56 oranında artmaktadır. Alüminyum hücre duvarları arasında bulunan EVA köpük dolgusu, folyo kalınlığının etkisini nispeten azaltmış ve yapının deformasyon esnasında daha kararlı olmasını sağlamıştır.



(a)



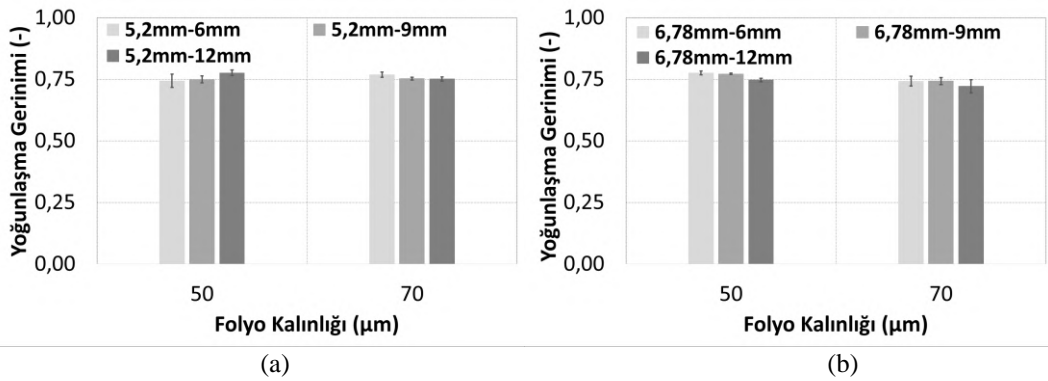
(b)

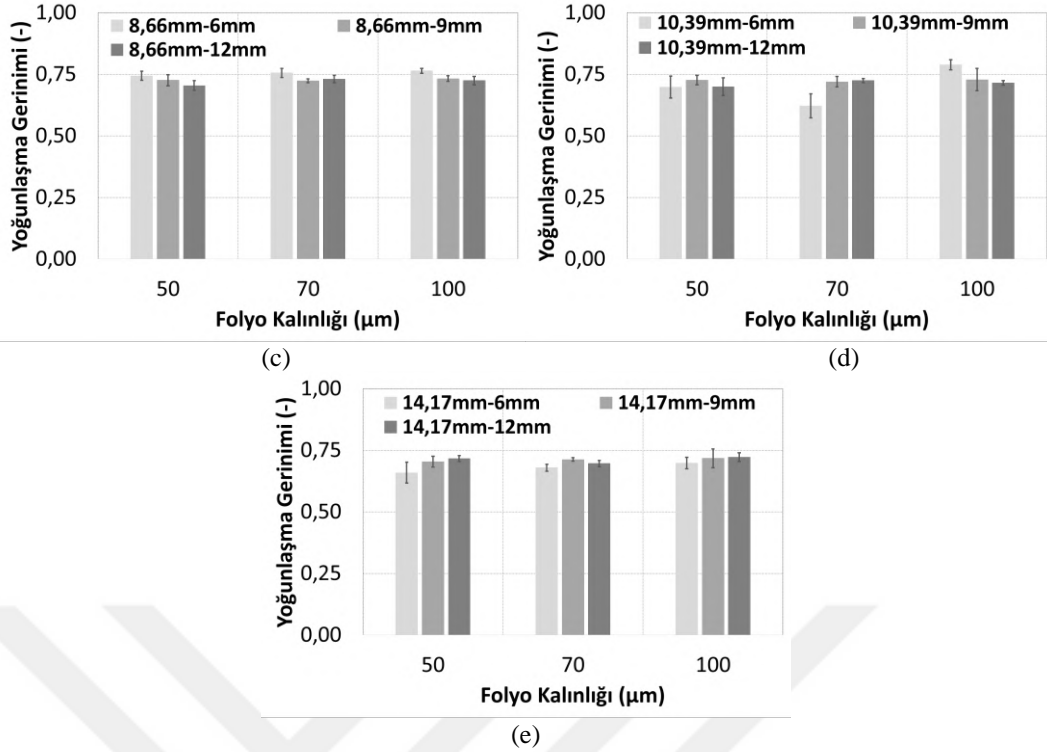


Şekil 4.31. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının plato gerilime etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

#### 4.2.4.4. Yoğunlaşma Gerinimi

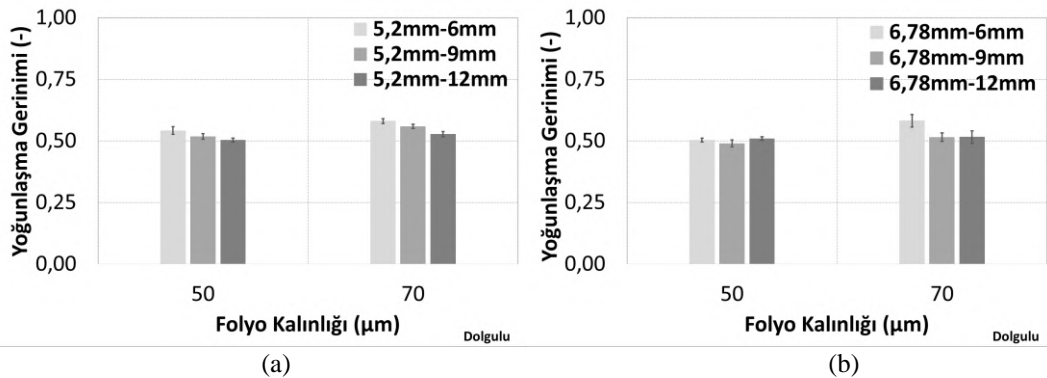
Dolgunsuz alüminyum bal peteği malzemelerin basma testinden elde edilen verilere göre yoğunlaşma gerinim değerlerine alüminyum hücre boyutunun etkisi Şekil 4.32’de verilmiştir. Şekil 4.32’den görüleceği üzere aynı hücre boyutuna sahip malzemelerde, folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi gözlemlenmemiştir. 9 mm yüksekliğe ve 10,39 mm hücre boyutuna sahip dolgunsuz malzemede 50 µm, 70 µm ve 100 µm için yoğunlaşma gerinimi sırası ile 0,73, 0,72 ve 0,73 olarak elde edilmiştir(Şekil 4.32d).

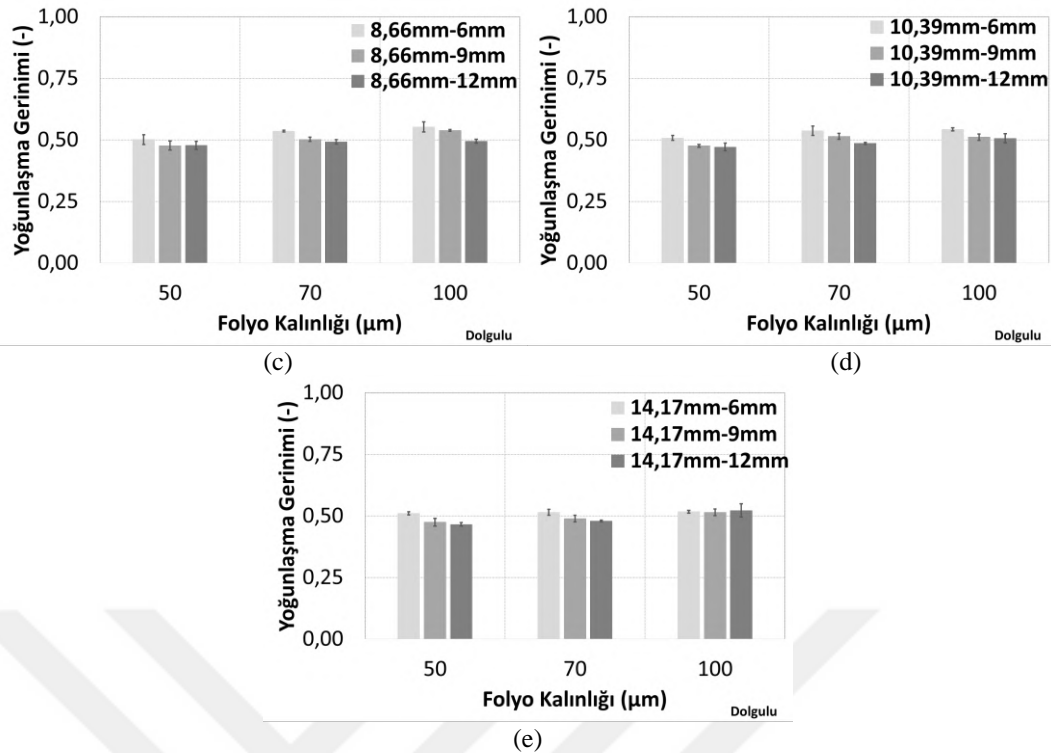




**Şekil 4.32.** Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

Şekil 4.33'te EVA köpük dolgulı alüminyum bal peteği malzemelerine ait folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi verilmiştir. Folyo kalınlığının, dolgusuz malzemelerde olduğu gibi EVA köpük dolgulı yapılarda da önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. 70 µm ve 100 µm folyo kalınlığına, 10,39 mm hücre boyutuna ve 9 mm yüksekliğe sahip dolgulı malzemede yoğunlaşma gerinimi 0,51 (mm/mm) olarak elde edilmiştir (Şekil 4.33d).

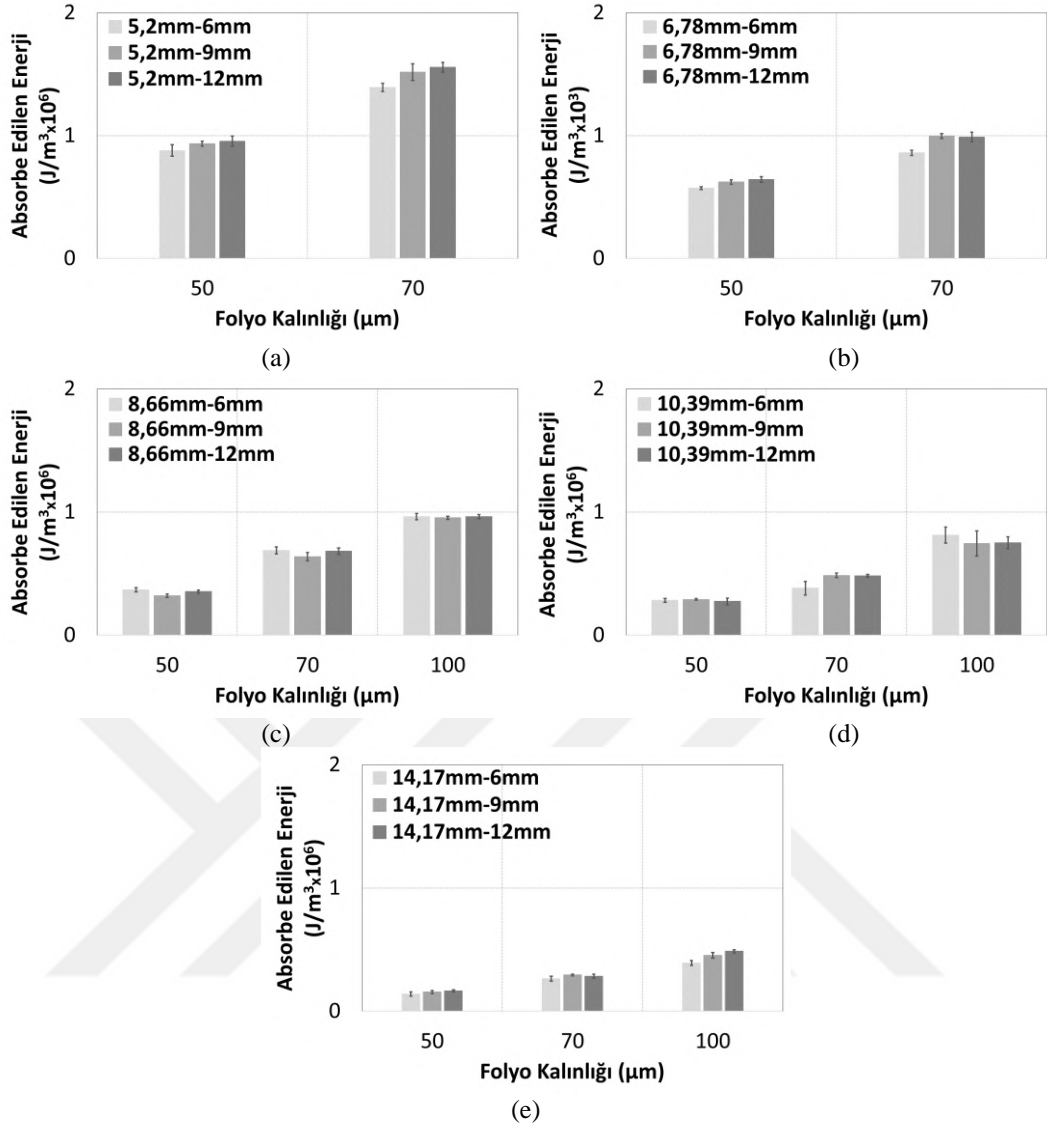




Şekil 4.33. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının yoğunlaşma gerinimine etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

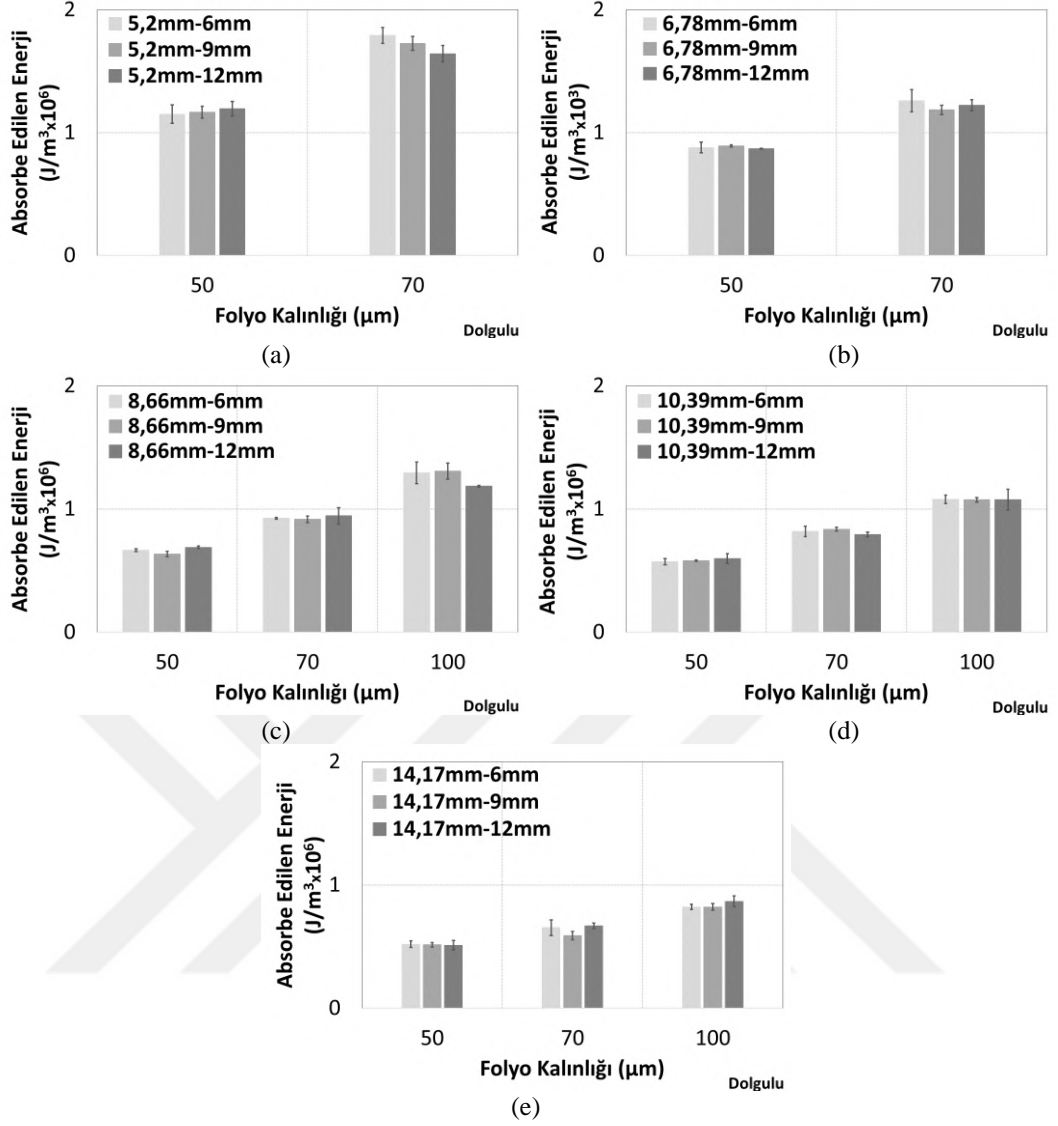
#### 4.2.4.5. Absorbe Edilen Enerji

Şekil 4.34'te dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi bütün hücre boyutları için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.34'ten görüleceği üzere alüminyum folyo kalınlığının artması ile yapının basma yükleri altında absorpladığı enerji miktarı artmaktadır. 6 mm yüksekliğe, 8,66 mm hücre boyutuna sahip dolgusuz malzemede folyo kalınlığı 50 μm, 70 μm ve 100 μm'de hacim başına absorbe edilen enerji sırası ile 0,37, 0,69 ve 0,96 J/m<sup>3</sup> × 10<sup>6</sup> olarak elde edilmiştir (Şekil 4.34c). Folyo kalınlığı 50 μm'den 70 μm ve 100 μm'ye arttırıldığında enerji miktarında %86,92 ve %161,41 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Folyo kalınlığının artması ile yapıda bulunan alüminyum hücre duvarlarının rijitliği artmış ve bu sayede deforme olması için gereken enerji miktarı yükselmiştir. Dolgusuz yapılarda, bal peteği malzemesinin imal edildiği alüminyum folyo kalınlığının, hacim başına absorbe edilen enerji miktarına önemli derecede etkisi vardır.



Şekil 4.34. Dolgusuz alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

Şekil 4.35'te EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının absorbe edilen enerji miktarına etkisi verilmiştir. Dolgusuz yapılara benzer şekilde, artan alüminyum folyo kalınlığı ile yapıda absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır. 8,66 mm hücre boyutu ve 6 mm yüksekliğe sahip dolgulu malzemede folyo kalınlığı 50 μm iken  $0,67 \text{ J/m}^3 \times 10^6$  olarak elde edilmiştir (Şekil 4.35c). Folyo kalınlığı 50 μm'den 70 μm ve 100 μm'ye yükseltildiğinde ise sırası ile %38,83 ve %94,25 oranında artarak yapılar  $0,92$  ve  $1,29 \text{ J/m}^3 \times 10^6$  enerji absorbe etmişlerdir (Şekil 4.35c). EVA köpüğün varlığı, folyo kalınlığının absorbe edilen enerji miktarına etkisini nispeten azaltmıştır.



Şekil 4.35. Dolgulu alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının hacim başına absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

#### 4.2.5. Folyo Kalınlığı Serbest Duvar Uzunluğu Oranının (t/l) Etkisi

Alüminyum bal peteği malzemelerine ait mekanik özellikler, daha önce de belirtildiği üzere bal peteğinin geometrik parametrelerine sıkı sıkıya bağlıdır. Bal peteği malzemesinin imal edilmiş olduğu alüminyum folyo kalınlığının (t) ve altıgen hücreye ait bir kenar uzunluğunu temsil eden serbest duvar uzunluğuna (l) oranı t/l olarak ifade edilebilir. Bu oran malzemenin yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Çizelge 4.1’de tez çalışması kapsamında çalışılan dolgusuz bal peteği malzemelere ait t/l oranları küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Çizelge 4.1’den görüleceği üzere, t/l oranları, malzemelere ait hücre boyutu ve folyo kalınlığına göre farklı dizilim göstermektedir. Örneğin, 5,20 mm hücre boyutu ve 50 μm folyo kalınlığına sahip bal peteği malzemesinin t/l oranı 0,016654 iken 10,39 mm hücre boyutu ve 100 μm folyo kalınlığına sahip malzemede

0,01667 (mm/mm) olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, artan t/l oranı ile lineer olarak alüminyum bal peteği malzemesi yoğunluğu artmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Dolgusuz bal peteği çekirdek malzemelere ait t/l oranları ve yoğunluklar

Hücre Boyutu-Folyo Kalınlığı	t/l (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
14,17 mm - 50 µm	0.006112	25.60
10,39 mm – 50 µm	0.008335	34.91
14,17 mm – 70 µm	0.008556	35.84
8,66 mm – 50 µm	0.01	41.89
10,39 mm – 70 µm	0.011669	48.88
14,17 mm - 100 µm	0.012223	51.20
6,78 mm – 50 µm	0.012773	53.50
8,66 mm – 70 µm	0.014	58.64
5,20 mm – 50 µm	0.016654	69.76
10,39 mm – 100 µm	0.01667	69.83
6,78 mm – 70 µm	0.017882	74.90
8,66 mm – 100 µm	0.02	83.78
5,20 mm – 70 µm	0.023315	97.66

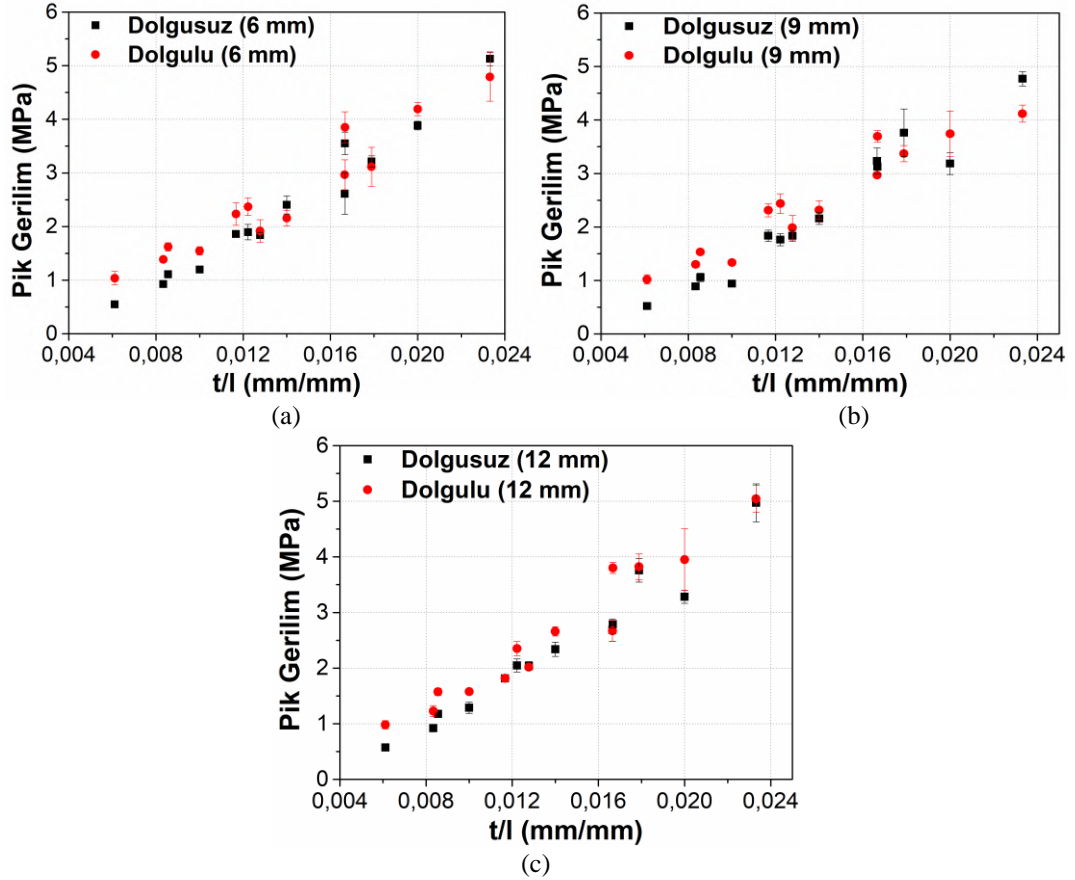
Dolgusuz ve EVA köpük dolgulu alüminyum yapılara ait basma testinden elde edilen karakteristik kriterler, t/l oranına göre her bir yükseklik için ayrı ayrı incelenmiştir. Yüksek t/l oranının, yüksek yoğunluğu temsil ettiği göz önünde bulundurularak yoğunluk etkisi ayrıca incelenmemiştir.

#### 4.2.5.1. Pik Gerilim

Dolgusuz ve EVA köpük dolgulu bal peteği malzemelere ait t/l oranlarının (mm/mm) basma testi neticesinde elde edilen pik gerilim değerlerine etkisi Şekil 4.36'da incelenmiştir. Folyo kalınlığının serbest duvar uzunluğuna oranı, çekirdek malzemenin yüksekliğinden bağımsız bir değerdir. Bu sebeple tez kapsamında kullanılan 6 mm, 9 mm ve 12 mm olmak üzere üç farklı çekirdek yüksekliği için ayrı çizimler yapılmıştır. Şekil 4.36'da görüleceği üzere, artan t/l oranı ile malzemelerin pik gerilim değerleri artmıştır. Dolgusuz malzemelerde bu artış trendi daha belirgindir. 0,006112 mm/mm t/l oranına sahip 14,17 mm hücre boyutlu 6 mm yüksekliğindeki ve 50 µm folyo kalınlığındaki dolgusuz bal peteği malzemesinin basma testi neticesinde 0,55 MPa pik gerilme elde edilirken, 0,016654 mm/mm t/l oranına sahip dolgusuz malzeme (5,20 mm hücre boyutu, 70 µm folyo kalınlığı, 6 mm yükseklik) 5,13 MPa pik gerilme elde edilmiştir (Şekil 4.36a). Dolgusuz 6 mm yükseklikteki malzeme, yoğunluğu ve t/l oranı yaklaşık %281 oranında arttırıldığında, pik gerilme değeri %832 oranında artmıştır. Yoğunlukları ve t/l oranları birbirine oldukça yakın olan 5,20 mm hücre boyutu, 50 µm folyo kalınlığına ve 10,39 mm hücre boyutu ve 100 µm folyo kalınlığına sahip dolgusuz malzeme

kıyaslandığında;  $t/l$  oranları ve yoğunlukları arasında yaklaşık %0,1 oranında bir değişim olmaktadır.  $t/l$  oranının pik gerilmeye etkisinin incelendiği Şekil 4.36'dan görüleceği üzere; bütün çekirdek yüksekliklerinde (6 mm, 9 mm, 12 mm) nispeten yüksek  $t/l$  oranı ve yoğunluğa sahip 10,39 mm-100  $\mu$ m malzemede pik gerilme değerleri artış göstermiştir. Bir diğer deyişle, yoğunluk ve  $t/l$  oranı yaklaşık %0,1 artarken, 6 mm yükseklikteki dolgunsuz malzemede pik gerilme değeri yaklaşık %36 oranında artmaktadır. Bu durum, çekirdek malzemeyi oluşturan alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığı ve serbest duvar uzunluğu oranının pik gerilme üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ifade etmektedir.

Dolgunsuz malzemelerde karşılaşılan artış trendi, EVA köpük dolgulı malzemelerde de görülmektedir. EVA köpük dolgulı 6 mm yükseklik, 50  $\mu$ m folyo kalınlığı ve 14,17 mm hücre boyutuna sahip malzemede, 1,04 MPa pik gerilim elde edilirken; 70  $\mu$ m folyo kalınlığına ve 5,20 mm hücre boyutuna sahip dolgulı malzemede %360 artarak 4,79 MPa olarak elde edilmiştir(Şekil 4.36a).

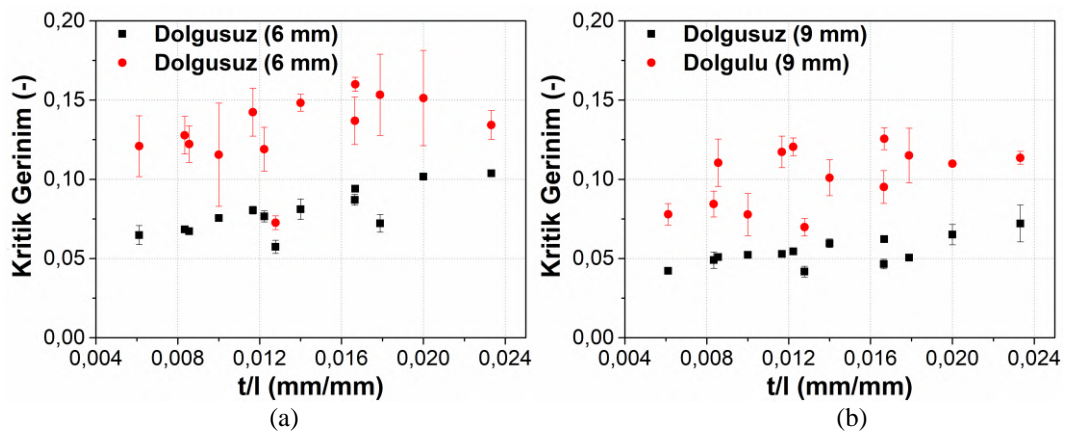


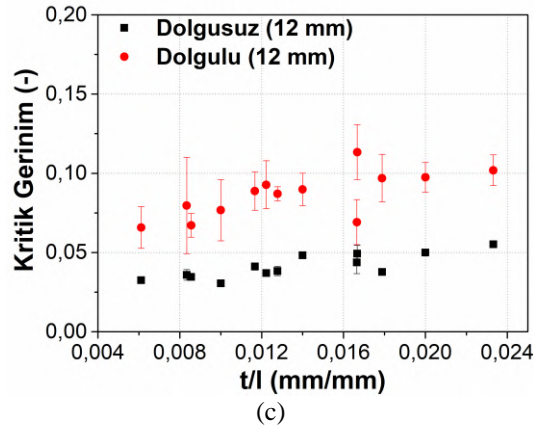
Şekil 4.36. Alüminyum bal peteği malzemesine ait  $t/l$  oranının pik gerilime etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm

#### 4.2.5.2. Kritik Gerinim

Basma yükleri altında ilk olarak alüminyum hücre duvarlarının burkulduğu nokta olarak tanımlanan pik gerilme noktasına tekabül eden kritik gerinim değerleri tespit edilmiştir. Şekil 4.37’de hem dolgulu hem de dolgusuz bal peteği malzemesine ait t/l oranının kritik gerinim değerlerine etkisi verilmiştir. Şekil 4.37’den görüleceği üzere, dolgusuz malzemelere ait kritik gerinim değerleri, artan t/l oranı ile artmaktadır. 12 mm yüksekliğe sahip, 5,20 mm hücre boyutu 70 µm folyo kalınlığındaki dolgusuz malzemede 0,102 (mm/mm); 14,17 mm hücre boyutu ve 50 µm folyo kalınlığına sahip dolgusuz malzemede 0,066 (mm/mm) olarak elde edilmiştir(Şekil 4.37c). Dolgusuz malzemeye ait yoğunluk ve t/l oranı %281 oranında artarken, kritik gerinim değeri %54,54 oranında artış göstermektedir. Artan t/l oranı ile alüminyum hücre duvarları daha yüksek gerinim değerlerinde burkulmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu nispeten yüksek malzemelerde alüminyum hücre duvarlarının burkulması, daha fazla şekil değişimi neticesinde gerçekleşmektedir.

EVA köpük dolgulu malzemelerde ise alüminyum hücre duvarları dolgusuz malzemelere göre daha yüksek gerinim değerlerinde burkulmaya uğramaktadır. Önceki bölümlerde, kritik gerinim değerinin orijinal numune boyutu esas alınarak hesaplandığı ve EVA köpük dolgusunun bazı bölgelerde alüminyum yüksekliğini aşması neticesinde kritik gerinim değerlerine ait standart sapmanın yüksek çıkabildiği belirtilmişti. Yüksek hata payı sebebiyle, alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının kritik gerinim değerine etkisinde net bir eğilim gözlemlenememiştir. Ancak aynı t/l oranına sahip bal peteği malzemelerde EVA köpüğün, kritik gerinim değerini arttırdığı tespit edilmiştir.



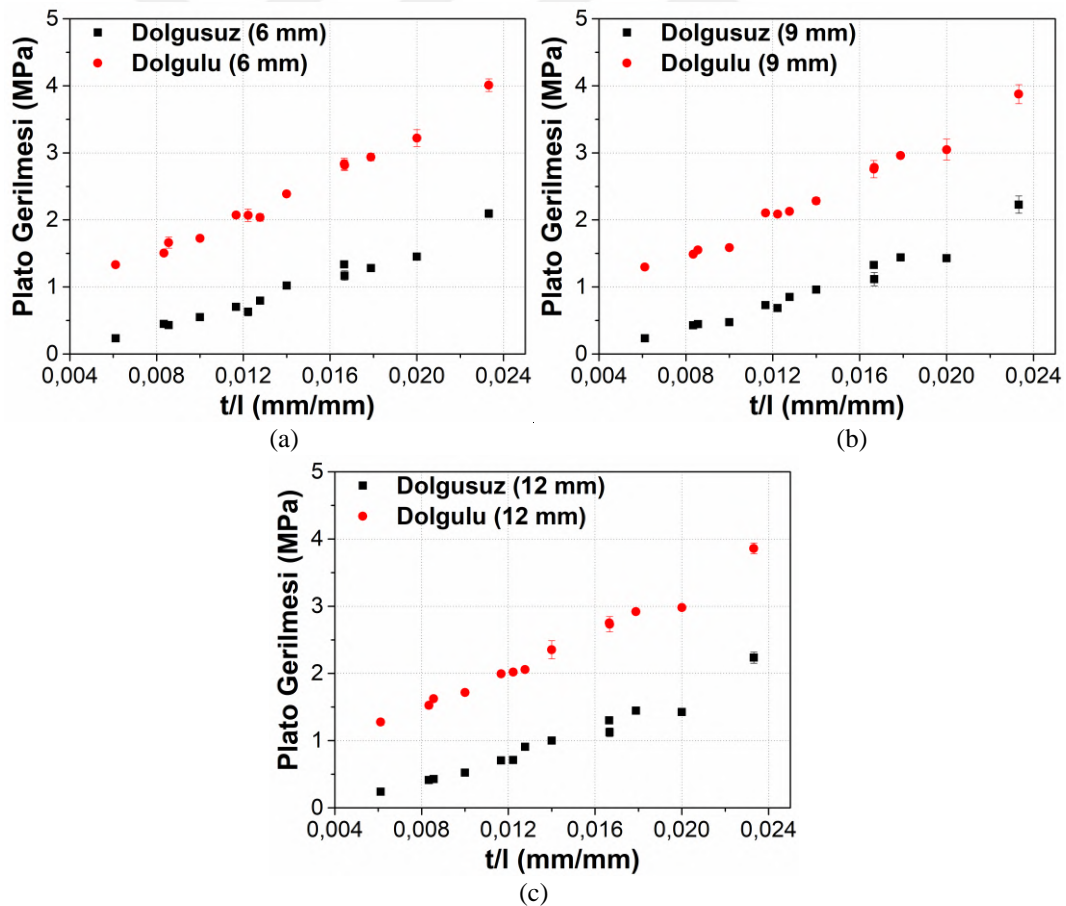


Şekil 4.37. Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının kritik gerinime etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm

#### 4.2.5.3. Plato Gerilimi

Düzlem dışı basma yükleri altında alüminyum duvarları öncelikle burkulmakta ve daha sonra ardışık katlanma mekanizması ile plastik deformasyona uğramaktadır. Burkulma başlangıcından yoğunlaşma başlangıç gerinimine kadar malzeme plato gerilmesi adı verilen neredeyse sabit bir gerilme altında deforme olmaktadır. Plato gerilmesi, daha önce bahsedildiği gibi yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Plato gerilmesi, alüminyum bal peteği malzemelerin önemli yapısal parametresi olan t/l oranı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 4.38’de dolgunsuz ve EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerin t/l oranının plato gerilmesine etkisi verilmiştir. Şekil 4.38’e göre dolgulu ve dolgunsuz malzemelerde t/l oranı arttıkça, plato gerilmesi artmıştır. 6 mm yükseklikteki 14,17 mm hücre boyutu ve 50 µm folyo kalınlığına sahip dolgunsuz malzemede plato gerilmesi 0,24 MPa olarak tespit edilirken, 5,20 mm hücre boyutu ve 70 µm folyo kalınlığına sahip dolgunsuz malzemede ise 2,09 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.38a). t/l oranı yaklaşık olarak %281 artarken; plato gerilmesi %770 oranında artmıştır. Alüminyum bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığı / altıgen kenar uzunluğu oranı (t/l) arttıkça malzemenin yoğunluğu artmaktadır. Yoğunluğu artan malzemede alüminyum hücre duvarlarının ardışık katlanması için daha fazla gerilme değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da bal peteği yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin artmasını sağlamaktadır. Xu ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada artan t/l oranı ile basma neticesinde elde edilen plato gerilme değerinin arttığını belirtmişlerdir (Xu vd., 2012). Benzer durum, dolgulu malzemelerde de gözlemlenmektedir. Alüminyum hücre duvarları arasında bulunan EVA köpük, dolgunsuz malzemeler ile kıyaslandığında genel olarak plato gerilmesini arttırmıştır. Köpük, dolgulu malzemede deformasyon için gerekli gerilme miktarını arttırarak, malzemenin daha

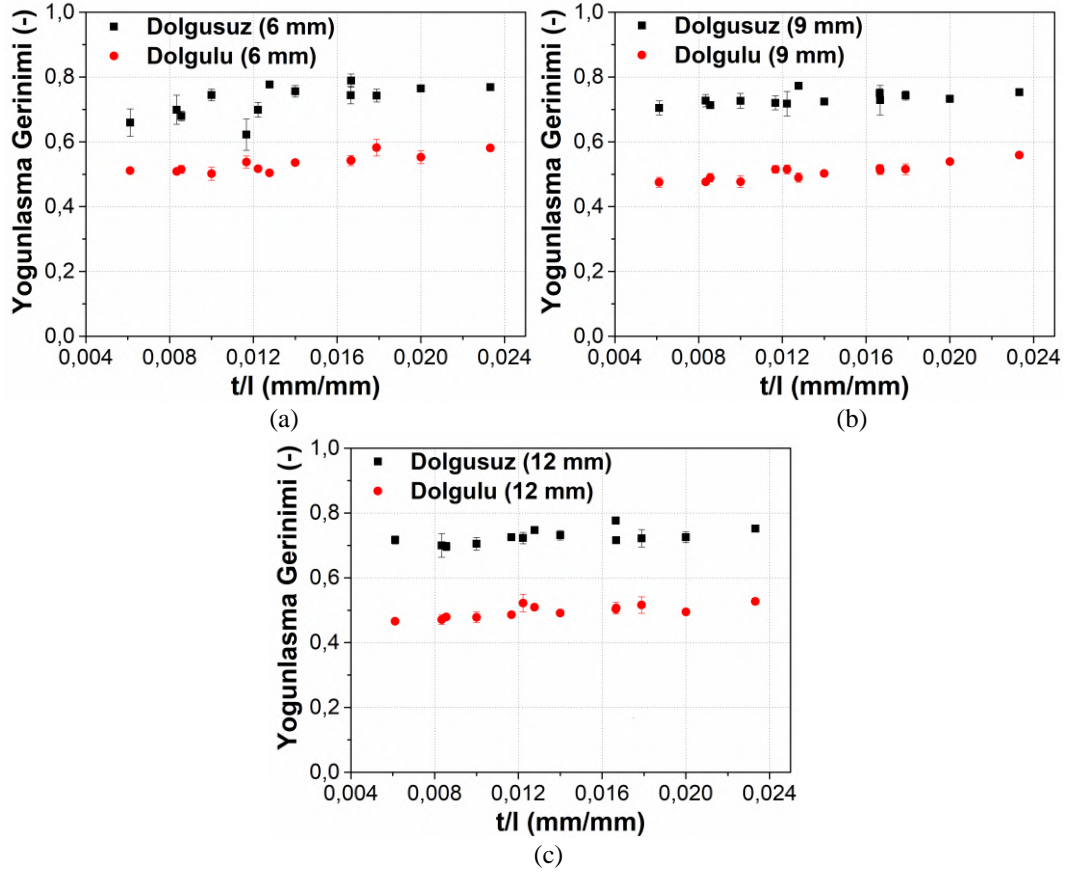
dayanımlı olmasını sağlamıştır. Aynı zamanda, EVA köpük dolgunun yanı sıra, alüminyum bal peteği yapısına ait t/l oranının da plato gerilmesine olumlu etkisi mevcuttur. EVA köpük dolgululu malzemede ise t/l oranı %281 oranında artırıldığında, plato gerilmesi %113,5 oranında artmaktadır. EVA köpük dolguluda tespit edilen bu artış oranı, dolgusuz malzemelere göre daha azdır. Bir diğer deyişle EVA köpük dolgusu, t/l oranı etkisini azaltmakta yapıda başka deformasyon mekanizmalarının olmasını sağlamaktadır. Bu durum için 5,20 mm hücre boyutuna, 50 µm folyo kalınlığına sahip malzeme ile 10,39 mm hücre boyutu, 100 µm folyo kalınlığına sahip benzer yoğunluk ve t/l oranına sahip alüminyum bal peteği malzemesinden imal edilen dolgusuz ve dolgululu malzemeler kıyaslanabilir. Şekil 4.38'de 6 mm, 9 mm ve 12 mm yüksekliklere ve t/l oranı yaklaşık 0,01667 olan bu malzemelere ait plato gerilmesi değerlerine bakıldığında; dolgusuz malzemelerde yaklaşık %14'lük bir fark olduğu ancak EVA köpük dolgusu ile bu farkın yaklaşık %0,7 oranına düştüğü gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.38. Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının plato gerilmesine etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm

#### 4.2.5.4. Yoğunlaşma Gerinimi

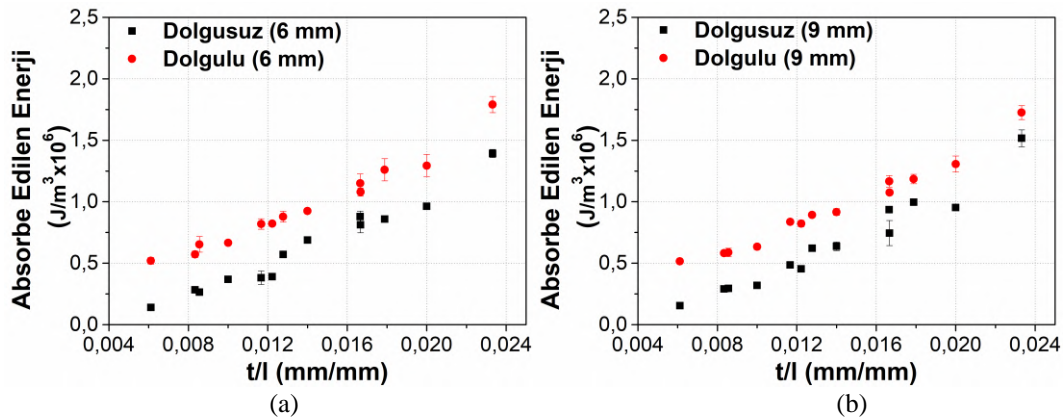
Basma testi esnasında, ardışık olarak katlanan alüminyum hücre duvarları belli gerinim değerinde karşılıklı olarak birbirlerine temas etmeye başlamaktadır. Yoğunlaşma başlangıç gerinimi olarak adlandırılan bu değer, aynı zamanda plato bölgesinin sonlandığı ve gerilmenin hızla artması ile sonuçlanmaktadır. Şekil 4.39’da dolgusuz ve EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerine ait  $t/l$  oranının yoğunlaşma başlangıç gerinimine etkisi verilmiştir. Şekil 4.39’dan görüleceği üzere, dolgusuz ve dolgulu alüminyum bal peteği malzemesinin  $t/l$  oranının yoğunlaşma başlangıç gerinimine önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Dolgusuz malzemeler, ortalama %73 şekil değişimi sonrasında yoğunlaşmaya başlamaktadır. Ancak, EVA köpük dolgusu ile artan yoğunluk sebebiyle, köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemeler yaklaşık olarak %52 şekil değişimi sonrasında yoğunlaşmaya başlamaktadır. Alüminyum hücre duvarları arasında EVA köpük bulunması yapının basma yüklerine karşı daha kararlı olmasını sağlamıştır.

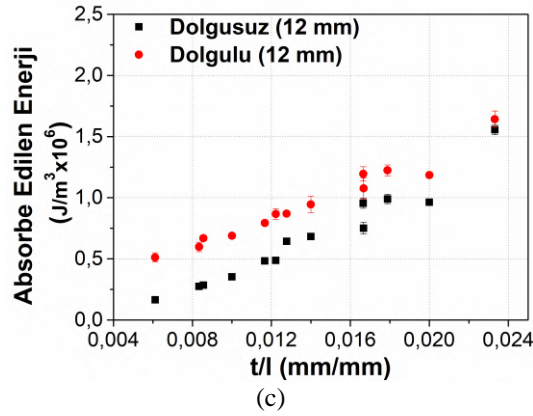


Şekil 4.39. Alüminyum bal peteği malzemesine ait  $t/l$  oranının yoğunlaşma başlangıç gerinimine etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm

#### 4.2.5.5. Absorbe Edilen Enerji

Düzlem dışı basma testlerinde elde edilen gerilme-gerinim diyagramlarının altında kalan bölge daha önce de belirtildiği gibi malzemede hacim başına absorbe edilen enerjiyi temsil etmektedir. Hacim başına absorbe edilen plastik enerji için alüminyum hücre duvarlarının burkulması ile başlayan kritik gerinim ve yoğunlaşma başlangıç gerinimi ile arasında kalan bölge göz önüne alınmıştır. Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının dolgulu ve dolgusuz malzemelerde absorbe edilen enerji miktarına etkisi Şekil 4.40'ta verilmiştir. Şekil 4.40'ta verildiği üzere, dolgulu ve dolgusuz malzemelerin her ikisinde de t/l oranı arttıkça hacim başına absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır. 6 mm yüksekliğe sahip 14,17 mm hücre boyutuna ve 50 µm folyo kalınlığına sahip dolgusuz malzemede  $0,140 \text{ J/m}^3 \times 10^6$  enerji absorbe edilirken, 5,20 mm hücre boyutu ve 70 µm folyo kalınlığına sahip dolgusuz malzemede  $1,393 \text{ J/m}^3 \times 10^6$  enerji absorbe edilmiştir (Şekil 4.40a). Bu malzemelerde t/l oranı %281 oranında artmasının bir neticesi olarak hacim başına absorbe edilen enerji, %894 oranında artmıştır. Benzer durum, EVA köpük dolgulu malzemelerde de gözlemlenmektedir. t/l oranının %281 artması ile 6 mm yükseklik için dolgulu malzemelerde de absorbe edilen enerji %245 oranında artmaktadır. EVA köpük dolgusu, kısmen t/l oranı etkisini sönmüştür. Ancak, EVA köpük dolgusu malzemede absorbe edilen enerji miktarını arttırarak, dolgusuz yapılara göre enerji absorpsiyon kapasitesini arttırmasını sağlamıştır.





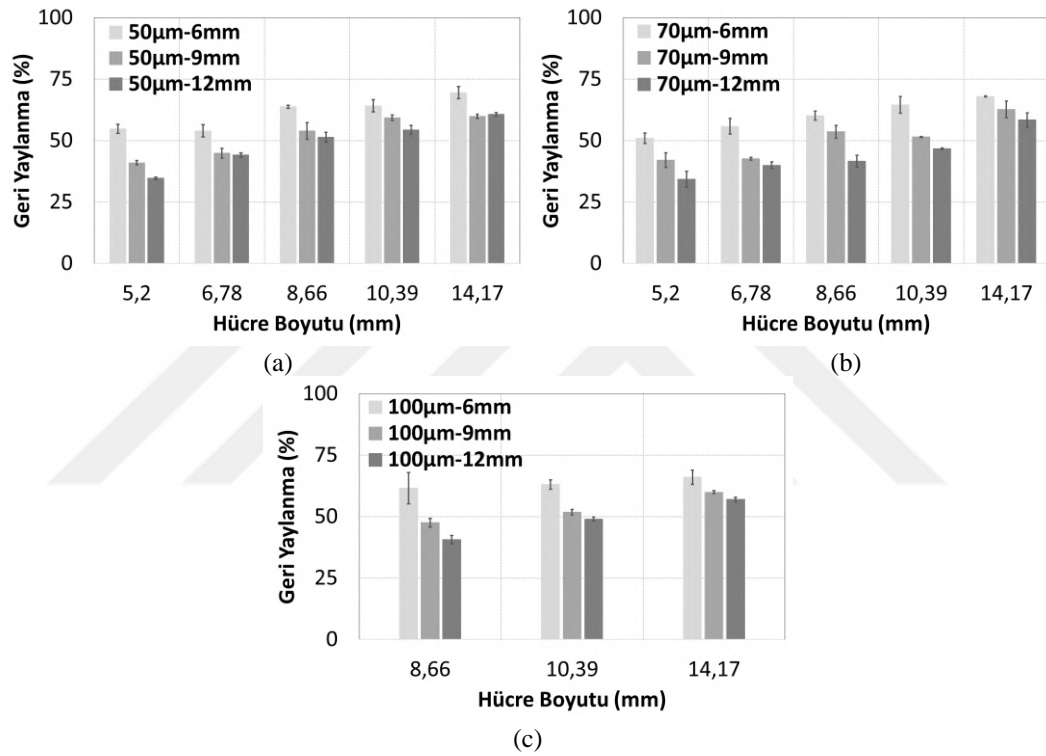
Şekil 4.40. Alüminyum bal peteği malzemesine ait t/l oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi a) h: 6 mm b) h: 9 mm c) h: 12 mm

#### 4.2.6. EVA Köpük Etkisi

Alüminyum bal peteği malzemesine ait geometrik parametrelerin, pik gerilme, kritik gerinim, plato gerilme, yoğunlaşma başlangıç gerinimi gibi hem dolgusuz hem de EVA köpük dolgulu malzemelerin karakteristik basma kriterlerine etkisi önceki başlıklarda sunulmuştur. Aynı zamanda, EVA köpük dolgusunun bu kriterlere etkisine de değinilerek yorumlanmıştır. Bu başlık altında, EVA köpüğün en önemli sonuçlarından biri olan geri yaylanma oranları incelenmiş ve alüminyum bal peteği malzemesine ait geometrik parametreler ile ilişkilendirilmiştir.

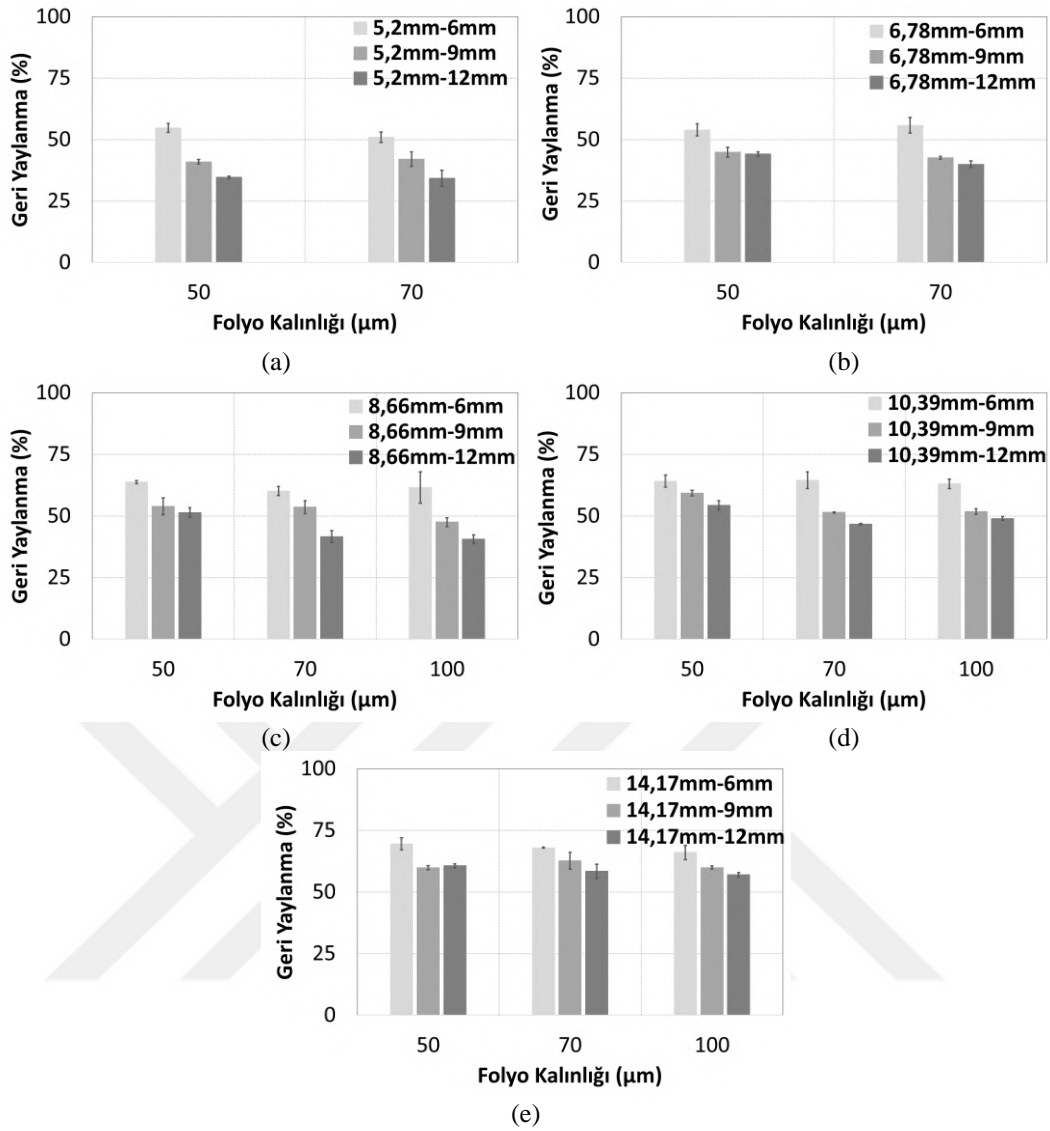
Şekil 4.41'de alüminyum bal peteği malzemesine ait hücre boyutunun, EVA köpük dolgulu yapıların basma testi sonrasında elde edilen geri yaylanma oranlarına etkisi verilmiştir. Şekil 4.41'den görüleceği üzere Al bal peteği hücre boyutu arttıkça geri yaylanma oranı artmıştır. 12 mm yükseklikte ve 50 µm folyo kalınlığındaki EVA köpük dolgulu malzemede; hücre boyutu 5,20 mm'den sırası ile 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm ve 14,17 mm hücre boyutuna yükseltildiğinde, geri yaylanma oranları sırası ile %27,42, %48,21, %56,90 ve %75,11 oranında artış göstermiştir(Şekil 4.41a). Geri yaylanma oranı aynı zamanda malzemede basma testinde geçici deformasyon oranını temsil etmektedir. Hücre boyutu büyüdükçe yapıda EVA köpük miktarı artmaktadır ve EVA köpüğün yapıdaki sürekliliği daha fazladır. Aynı zamanda, deforme olmuş alüminyum bal peteği miktarı da azalmıştır. Bunun neticesinde, EVA köpüğe göre nispeten daha rijit yapıda bulunan katlanmış alüminyum duvarlarının daha az bulunduğu 14,17 mm hücre boyutlu (50 µm folyo kalınlığı, 12 mm yükseklik) malzemede geri yaylanma oranı yaklaşık %60,65 olarak elde edilmiştir. Bir başka tespit edilen nokta ise yükseklik azaldıkça geri yaylanma oranı artmasıdır. Aynı malzemede 6 mm yükseklik için ise %69,53 geri yaylanma oranı elde edilmiştir. Yükseklik ve geri yaylanma oranı arasındaki bu ters orantı

bütün hücre boyutuna sahip malzemeler için de geçerlidir. Basma yükleri altında EVA köpük hücreleri içerisindeki gazlar sıkışmakta ve hücre duvarlarını deforme etmektedir. Basma yükleri kaldırıldığında ise plastik malzemede depolanan potansiyel enerji, hücreleri tekrar doldurmak için gazları geri çekmeye başlar (Kuncir vd., 1990). Zamana bağlı bu mekanizma sayesinde basma sonrasında malzemede bir geri yaylanma oluşmaktadır. Köpük yüksekliği azaldıkça, bu gaz akışı daha kısa mesafeler için daha kolay sağlanmaktadır. Bunun neticesinde, EVA köpük dolgululu bal peteği malzemelerin yüksekliği azaldıkça, geri yaylanma oranı artmaktadır.



Şekil 4.41. Hücre boyutunun geri yaylanma oranına etkisi a) 50 µm b) 70 µm c) 100 µm folyo kalınlığı

Şekil 4.42’de Al bal peteği malzemesine ait folyo kalınlığının, basma testi sonrası EVA köpük dolgululu malzemelerin geri yaylanma oranlarına etkisi verilmiştir. Şekil 4.42’ye göre folyo kalınlığı arttıkça, geri yaylanma oranı az miktarda azalmaktadır. Folyo kalınlığının olumsuz etkisi, nispeten yüksek çekirdek yüksekliğine sahip (12 mm) malzemelerde daha belirgindir. Basma esnasında katlanmış olan Al hücre duvarları, folyo kalınlığı arttıkça daha rijit hale gelmektedir. Bu rijitlik sebebiyle, basma yükleri kaldırıldıktan sonra deforme olmuş EVA köpüğe ait gözenekler eski haline gelememekte ve geri yaylanma oranını azaltmaktadır.



Şekil 4.42. Folyo kalınlığının geri yaylanma oranına etkisi a) 5,20 mm b) 6,78 mm c) 8,66 mm d) 10,39 mm e) 14,17 mm hücre boyutu

### 4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

Ağırlık düşürme testi için basma testleri neticesinde plato gerilmesi ve hacim başına düşen enerji miktarının diğer geometrik parametrelere sahip yapılardan daha yüksek olarak elde edilen 6 mm yüksekliğe, 70µm folyo kalınlığı ve 5,20 mm hücre boyutuna sahip alüminyum bal peteği çekirdek malzemeleri kullanılmıştır. Belirtilen geometrilere sahip bal peteği malzemeleri dolgunsuz ve EVA köpük dolgululu olarak üst ve alt alüminyum levhalar kullanılarak sandviç panel haline getirilmiştir. Testte kullanılan numuneler 90 mm x 90 mm ölçülerine sahiptir. Düşük hızlı darbe testlerinin gerçekleştirildiği ağırlık düşürme test cihazında vurucu ucun hızı, ağırlık ünitesinin bulunduğu yükseklikteki sahip olduğu potansiyel enerjinin, numune ile çarpma anındaki

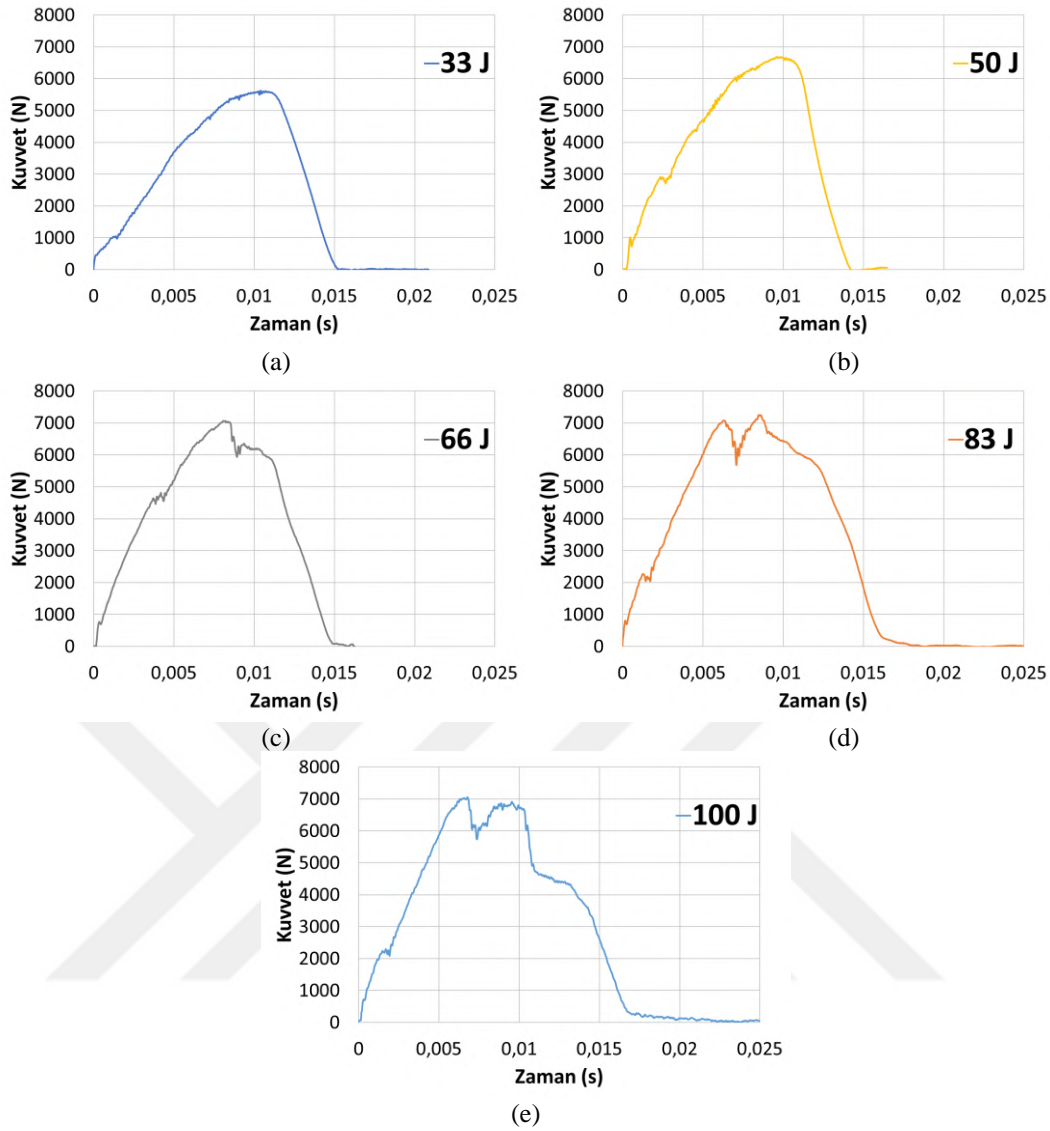
kinetik enerjiye eşit olduğu kabulü yapılarak hesaplanmıştır. **Çizelge 4.2**'de, numunelere uygulanan darbe enerjisi, vurucu ucun hızı ve bırakıldığı yükseklik değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Numunelere uygulanan darbe enerjisi, vurucu ucun hızı ve ağırlığın bırakıldığı yükseklik değerleri

Darbe Enerjisi (Joule)	İlk Temas Hızı (m/s)	Yükseklik (cm)
33	1.98	20
50	2.426	30
66	2.801	40
83	3.132	50
100	3.431	60
116	3.706	70
133	3.962	80

Ağırlık düşürme testinde belirli yükseklikten bırakılan vurucu ucun, numuneye temas etmesi ile temas yüzeyinde yerel bir deformasyon oluşturmaktadır. İlk temas anından itibaren, temas kuvveti artmaktadır. Temas kuvvetinin artması, ilk temas hızının azalmasına sebep olmaktadır. Darbe süresinde etki eden temas kuvvetinin neticesinde temas yüzeyinde sıkışma meydana gelmektedir. Başlangıçtaki kinetik enerji, temas yüzeyindeki deformasyonlara harcanarak malzemede bir sıkıştırma oluşturmaktadır. Sıkışma süreci, kuvvet maksimum noktaya ulaştığında sonlanmakta ve hız sıfırlanmaktadır. Sıkışmanın sonlandığı sürede, geri bırakma aşaması başlamaktadır. Geri bırakma aşamasında, iç enerjinin elastik kısmı salınarak vurucu ucun nüfuziyet bölgesinden ayrılmasını sağlamaktadır. Bu aşamada, temas kuvveti düşmeye başlar.

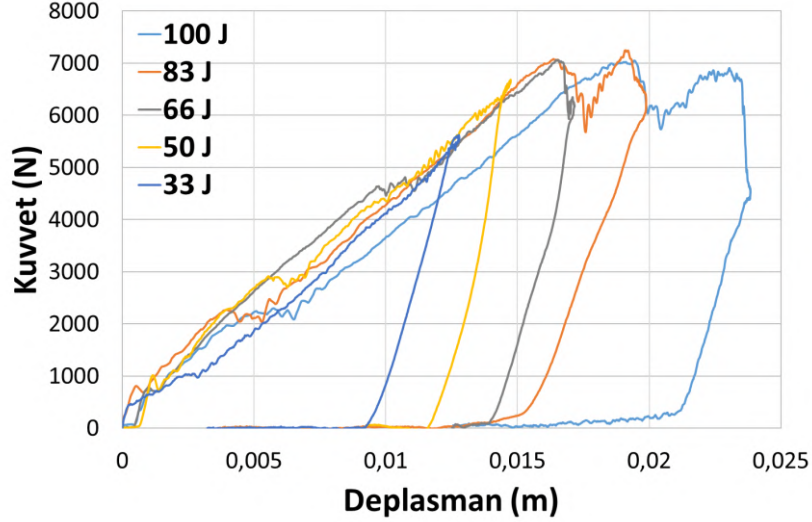
Şekil 4.43'te Dolgusuz 5,20mm-70µm-6mm alüminyum bal peteği parametrelerine sahip sandviç panele farklı enerji seviyelerinde uygulanan ile ağırlık düşürme testi sonrası elde edilen kuvvet-zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.43'te görüleceği üzere, bütün enerji seviyelerinden elde edilen eğrilerde sıkışma aşamasında temas kuvveti artmaktadır. Maksimum kuvvete ulaşma sürecinde, eğride bulunan salınımlar sandviç malzemede hasar oluştuğunun bir göstergesidir (Kara, 2012). Darbe enerjisi arttıkça, maksimum temas kuvveti artmaktadır.



**Şekil 4.43.** Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri (Dolgunuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm) a) 33 J b) 50 J c) 66 J d) 83 J e) 100 J

Şekil 4.44'te farklı darbe enerjilerinin dolgunuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm parametrelerine sahip sandviç yapıya uygulanması neticesinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.44'te görüleceği üzere, vurucunun malzeme yüzeyine temas etmesi ile kuvvet artmış ve malzemede çökme başlamaktadır. Bu yer değiştirme, kuvvetin en yüksek değerine kadar devam etmekte ve belli bir deplasman değerinden sonra geri bırakma aşaması başlamıştır. Darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet artmakta ve maksimum kuvvetin tekabül ettiği deplasman değeri (mm) artmaktadır. Dolgunuz 5,20 mm-70  $\mu$ m-6 mm alüminyum bal peteği çekirdek malzemesi ve 0,5 mm kalınlığındaki alüminyum levhalardan oluşan sandviç panellere uygulanan 83 J ve 100 J darbe enerjilerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinde iki adet maksimum kuvvet noktası gözlemlenmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, sandviç malzemelerin alt ve üst yüzeyinde iki rijit tabaka ve orta kısmında ise gözenekli çekirdek

malzeme bulunmaktadır. 83 J ve 100 J darbe enerjilerinde sırası ile 0,016557 m ve 0,019462 m deplasman değerlerinde ilk maksimum temas kuvveti elde edilmiştir. Ancak nüfuziyetin devam etmesi ile vurucu uç çekirdeğin altında bulunan rijit levha ile temas etmekte ve neticesinde temas kuvveti ikinci bir maksimum değere ulaşmaktadır.




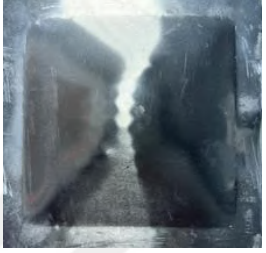








Şekil 4.44. Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri (Dolgusuz 5,20mm-70µm-6mm)

Çizelge 4.3'te farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış dolgusuz 5,20mm-70µm-6mm panellere ait yüzeylerin hasar bölgeleri görüntüleri verilmiştir. Ön yüzey, vurucu ucun numunede ilk olarak temas ettiği bölgeyi, arka yüzey ise çekirdek malzemenin diğer tarafındaki levhayı temsil etmektedir. Çizelge 4.3'ten görüleceği üzere, darbe enerjisi arttıkça, dolgusuz sandviç panelin ön yüzeyindeki plastik deformasyon artmaktadır. Aynı zamanda, artan darbe enerjisi ile temas yüzeyindeki deformasyon bölgesi genişlemekte ve panelde bulunan üst levhada yırtılmaya ve perforasyona sebep olmaktadır. 66 J ve daha yüksek enerji seviyelerinde ön yüzey levhasında yırtılmalar görülmektedir. 83 J ve 100 J darbe enerjisinde ise, daha önce Şekil 4.44'te de bahsedildiği gibi arka levhada delinme söz konusudur. Arka levhadaki bu deformasyon neticesinde, kuvvet-deplasman eğrisinde ikinci bir maksimum kuvvet piki gözlemlenmektedir.

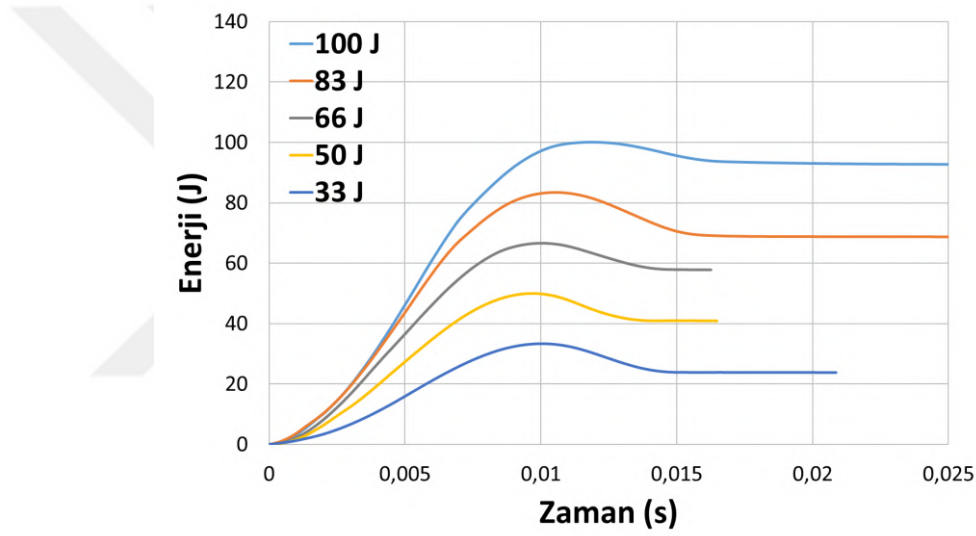
Darbe testi sonrası, dolgusuz sandviç malzemelerde çekirdek ve levhalar arasında ayrılma (delaminasyon) meydana gelmesi ve altıgen çekirdek malzemeye ait hücrelerin levhasız kesilmesi yüksek deformasyona sebep olması neticesinde malzemelerden kesit görüntüsü alınamamıştır.

**Çizelge 4.3.** Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış panellere ait yüzey hasar bölgesi görüntüsü  
(Dolgunsuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)

Darbe Enerjisi	Ön Yüzey	Arka Yüzey
33 J		
50 J		
66 J		
83 J		
100 J		

Ağırlık düşürme testlerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri, vurucu ucun temas etmesi ile başlayan sıkışma ve geri bırakma süreçlerine dair önemli bilgiler vermektedir. Belirli hızda numuneye çarpan vurucu uç, numune yüzeyinden sekme durumunda, bütün enerji malzeme tarafından yutulmamaktadır. Darbe enerjisinin absorbe edilemeyen kısmı, vurucu ucun yüzeyden geri sekmesi için harcanmaktadır. Şekil 4.45'te farklı enerji

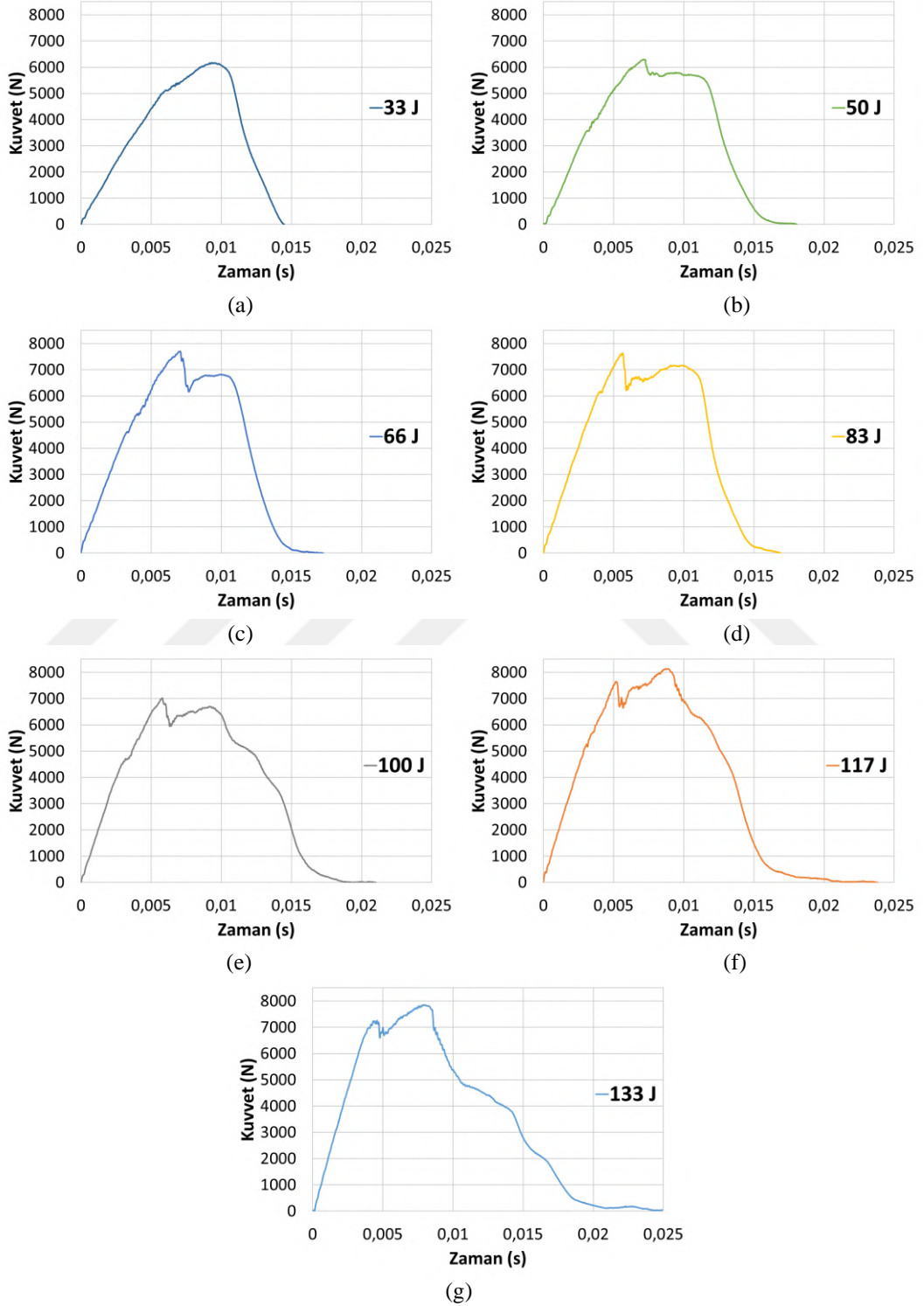
seviyelerinden elde edilmiş olan dolgusuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm malzemesi için enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.45'te yukarıda bahsedilmiş olan geri sekme davranışı gözlemlenmektedir. Uygulanan darbe enerjisine tekabül eden bir maksimum noktanın ötesindeki sürelerde geri sekme sebebiyle enerji düşmekte ve nihayetinde lineer şekilde devam etmektedir. Maksimum enerji noktası, uygulanan darbe enerjisini ve buna ek olarak lineer bölgedeki enerji seviyesi ise malzemenin test süresince absorbe ettiği enerjiyi temsil etmektedir. Darbe enerjisi ve yutulan enerji arasında kalan bölge ise geri tepme enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.45'te dolgusuz panellere uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzeme tarafından yutulan enerji artmaktadır. Bunun sonucunda malzemede daha fazla plastik deformasyon ve buna bağlı olarak oluşan hasar artmaktadır.



Şekil 4.45. Farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri (Dolgusuz 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)

EVA köpük dolgulu sandviç panel üretimi için 5,20 mm hücre boyutu, 70  $\mu$ m folyo kalınlığı ve 6 mm yüksekliğe sahip alüminyum bal peteği çekirdek malzemeler kullanılarak EVA köpük ile yerine doldurulmuştur. Elde edilen EVA köpük dolgulu yapılar alt ve üst yüzeylerine 0,5 mm levha yapıştırılarak sandviç panel haline getirilmiştir. Dolgulu yapıların ağırlık düşürme testlerinde, dolgusuz yapılara ek olarak 117 J ve 133 J darbe enerji seviyeleri de test edilmiştir. Şekil 4.46'da EVA köpük dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm malzemeleri için farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.46'da görüleceği üzere, vurucu ucun yüzeye temas etmesi ile temas kuvveti artmış ve bir süre sonra düşmeye başlamıştır. Darbe enerjisi arttıkça, ilk maksimum kuvvet artmıştır. 50 J darbe enerji seviyesi için gözlemlenen, ilk maksimum kuvvetin bir miktar düşüşünden sonra oluşan plato, daha yüksek enerji

seviyelerinde pik formunu almış ve yeni bir yerel maksimum noktası oluşturmuştur. Artan darbe enerjisi ile ikinci yerel maksimum kuvvet noktasında da artış gözlemlenmektedir.

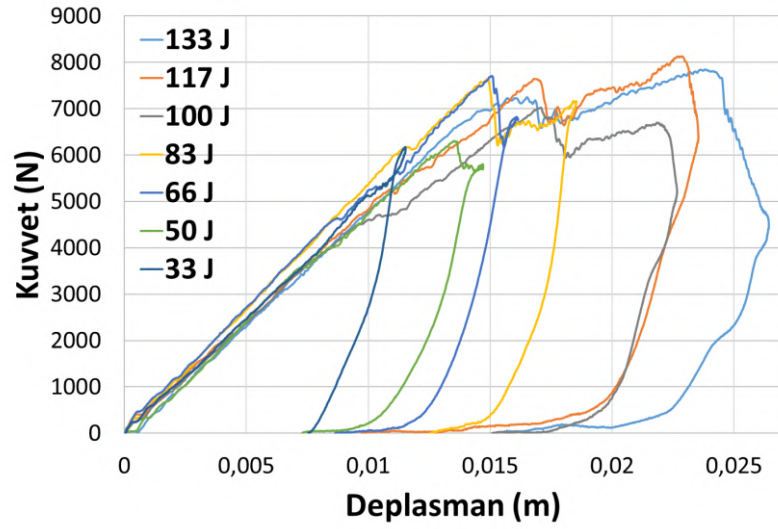


Şekil 4.46. Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri (Dolgu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)  
a) 33 J b) 50 J c) 66 J d) 83 J e) 100 J f) 117 J g) 133 J

Şekil 4.47’de EVA köpük dolgulu 5,20mm-70µm-6mm sandviç paneller için farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Vurucu ucun numuneye teması ile malzemelerde çökme başlamış ve belli deplasman değerine kadar kuvvet artmaya devam etmektedir. Darbe enerjisi arttıkça numunedeki çökme miktarı artmaktadır. 117 J ve 133 J darbe enerji seviyelerinde ilk kuvvet maksimum değerini aşan ikinci bir kuvvet maksimumu olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, vurucu ucun ilk teması ile ön levhanın hasara uğraması ve devam eden nüfuziyet neticesinde arka levhaya ulaşarak yeni bir direnç ile karşılaşması ile açıklanabilir. Bu durum

Çizelge 4.4’te verilmiş olan dolgulu 5,20mm-70µm-6mm için farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış malzemelere ait ön yüzey ve arka yüzey görüntülerinden de açıkça görülmektedir.

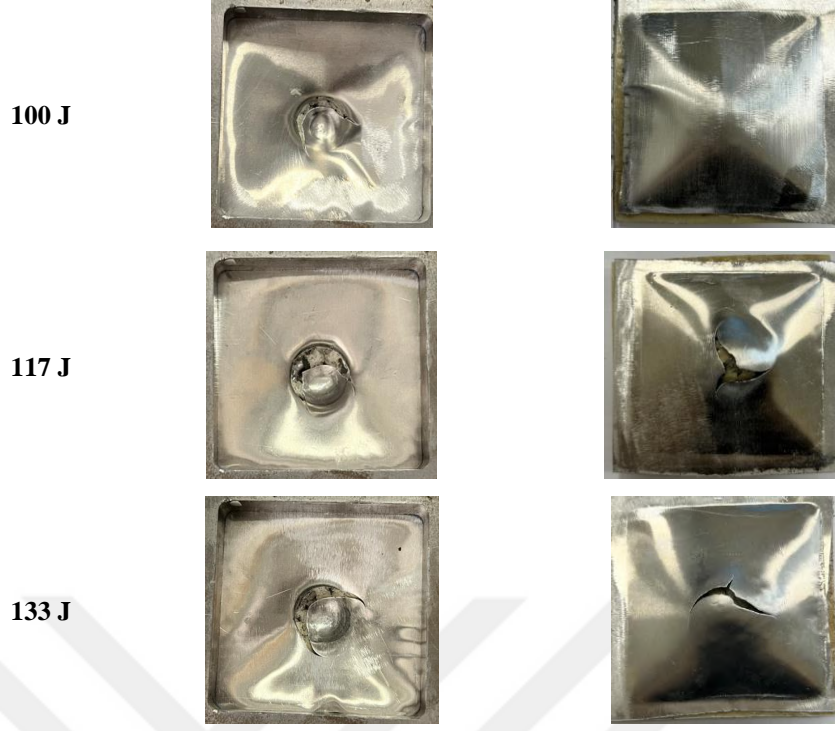
Çizelge 4.4’te görüleceği üzere darbe enerji seviyesi arttıkça malzemenin ön yüzeyinde bulunan hasar bölgesi büyüyerek yırtılmalara sebep olmaktadır. Düşük darbe enerjisinde ise ön yüzey çarpma bölgesinde daha lokalize hasar alanı olduğu gözlemlenmektedir. 117 J ve 133 J enerji seviyelerinde numunenin arka levhasında darbenin etkisi ile çatlama ve yüksek plastik deformasyon meydana gelmiştir. Bu bölgelerde rijit levhanın zarar görmesi ile çekirdek malzeme ve levha arasındaki rijit yapıştırıcı tabakasında kırıklar meydana gelmektedir. Yapıştırma tabakasındaki bu hasar, geri yaylanma davranışına sahip EVA köpük dolgulu yapı ile deformasyona uğramış rijit alüminyum levhanın ayrılmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.47. Farklı enerji seviyelerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri (Dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)

Çizelge 4.4. Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış malzemelere ait ön yüzey ve arka yüzey görüntüsü (Dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)







Darbe Enerjisi	Ön Yüzey	Arka Yüzey
33 J		
50 J		
66 J		
83 J		



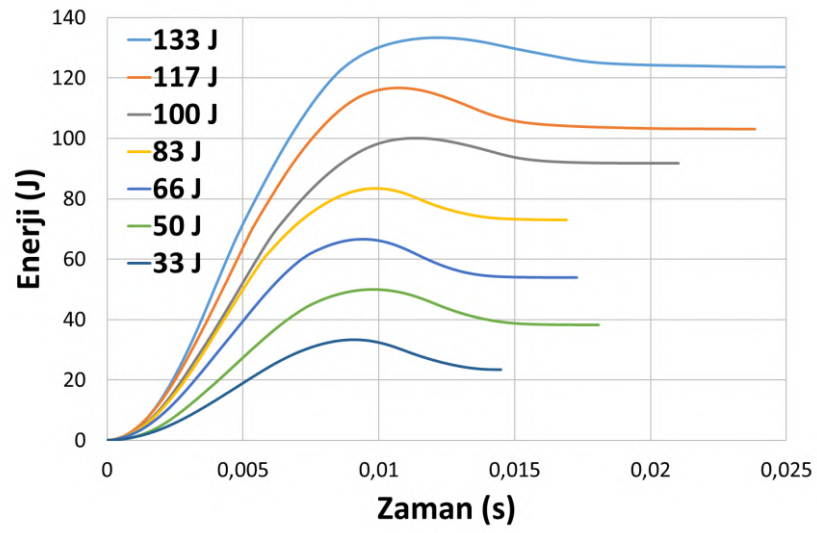
Çizelge 4.5'te farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış dolgulu 5,20mm-70µm-6mm malzemelerinin ait kesit görüntüleri verilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere, darbe esnasında vurucu uç ile numune ara yüzeyinde meydana gelen basınç, ön levhada plastik deformasyona sebep olmaktadır. Bu plastik deformasyonun sonucu olarak da ön levhada yırtılma ve çökmeler meydana gelmektedir. Benzer şekilde, numunenin alt tarafında bulunan levhada da darbeye bağlı deformasyonlar oluşmaktadır. Ancak vurucu ucun darbe sonrası geri çekilmesi ile deforme olan EVA köpüğe ait gözeneklere tekrar gaz geri çekilmekte ve köpükte geri yaylanma olmaktadır. Sandviç panelin çekirdek malzemesini oluşturan EVA köpükte gözlemlenen bu davranış, levha ve çekirdek malzeme arasında uyumsuzluğa ve neticesinde tabakalar arası ayrılmaya (delaminasyon) sebep olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, darbe sonrası çekirdek malzemeler yüzey levhalarından ayrılarak kesit alınmıştır. Çizelge 4.5'te görüleceği üzere darbe enerjisi arttıkça, çekirdek malzemesindeki hasar bölgesi derinleşmekte ve büyümektedir. 33 J darbe enerjisinde ise EVA köpük dolgulu çekirdek malzemesine ait alüminyum hücre duvarlarında vurucu ucun temas ettiği bölgede burkulmalar meydana gelmiştir. Ancak, geri yaylanma özelliği gösteren EVA köpük sayesinde yapı halen enerji absorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Geri yaylanma neticesinde yapı, bütünlüğünü korumakta ve nispeten düşük çökme miktarına sahiptir.

Şekil 4.48’de dolgulu 5,20mm-70µm-6mm sandviç panel için farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.48’den görüleceği üzere EVA köpük dolgulu panellere uygulanan darbe enerjisinin bir kısmı geri sekme için harcanmaktadır. Malzemenin absorbe ettiği enerji miktarı, artan darbe enerjisi ile artmaktadır. 33 J darbe enerjisinin %88’i; 133 J darbe enerjisinin ise yaklaşık olarak %93’ü malzeme tarafından absorbe edilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış malzemelere ait kesit görüntüleri (Dolgulu 5,20mm-70µm-6mm)

Darbe Enerjisi	Kesit Görüntüsü
33 J	
50 J	
66 J	
83 J	
100 J	
116 J	

133 J



Şekil 4.48. Farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri (Dolgulu 5,20mm-70 $\mu$ m-6mm)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında farklı hücre boyutları (5,20 mm, 6,78 mm, 8,66 mm, 10,39 mm, 14,17 mm), folyo kalınlıkları (50  $\mu$ m, 70  $\mu$ m, 100  $\mu$ m) ve yüksekliklere (6 mm, 9 mm, 12 mm) sahip alüminyum bal peteği malzemeler kullanılarak; dolgusuz ve EVA köpük dolgulu çekirdek yapıların düzlem dışı basma davranışları incelenmiştir. Basma testi sonrasında belirlenen parametreye (5,20 mm-70  $\mu$ m-6 mm) sahip dolgulu ve dolgusuz bal peteği malzemesinden elde edilen sandviç paneller farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur.

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında EVA köpük üretimi, tolüen içerisinde polimeri çözündürme aşamasını içermektedir. Çapraz bağlayıcı, köpürtücü ajan ve aktivatör gibi maddeleri, çözelti içerisinde aglomerasyona yol açmadan karışabilmekte ve neticesinde homojen EVA köpük elde edilmesi sağlanmıştır. EVA köpük karışımında, ağırlıkça %1 DCP, %3 AZD ve %3 ZnO kullanılması, alüminyum bal peteği malzemesinde bulunan yapıştırıcılara zarar vermeyecek sıcaklıkta (160 °C) köpürme işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. EVA formülizasyonuna ait köpürme sıcaklığı termal analiz yöntemleri ile desteklenmiş ve belirlenen karışımın 160°C sıcaklıkta 1 saat pişirilmesi neticesinde hacmen 2,47 katına çıktığı tespit edilmiştir. EVA köpüğün bal peteği malzemesi içerisinde yerinde üretimi, alüminyum hücre duvarları ve EVA köpük arasında verimli bir etkileşimle sonuçlanmıştır.

Dolgusuz alüminyum bal peteği çekirdek malzemelerin düzlem dışı basma testleri neticesinde, yükseklik arttıkça elde edilen gerilme gerinim diyagramlarına ait plato bölgelerinde dalgalanma sayısının arttığı tespit edilmiştir. Değişken yüksekliklerde en belirgin etkinin kritik gerinim değerinde olduğu ve artan yükseklik ile kritik gerinim değerinin azaldığı belirlenmiştir. Hücre boyutu büyüdükçe, maksimum yük taşıma kapasitesini temsil eden pik gerilme değeri düşmüştür. Ancak, artan folyo kalınlığı pik gerilmenin yükselmesini sağlamıştır. Plato gerilmesi ise artan hücre boyutu ile azalmıştır.

EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemelerinin basma testi neticesinde, hücre boyutu arttıkça pik gerilme azalmaktadır. Ancak, düşme oranı dolgusuz yapılara nazaran daha düşüktür. EVA köpük dolgusu, duvarların burkulması için gereken gerilim değerini arttırarak, yapının maksimum yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Buna ek olarak, Alüminyum hücre duvarlarının katlanması için gereken gerilme değerini arttırmış ve plato gerilmesini yükseltmiştir. EVA köpük, yapının daha

düşük gerinim değerlerinde yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Ancak, aynı geometrik parametrelere sahip dolgusuz yapılara kıyasla daha yüksek plato gerilmesi değerleri sağlaması sebebiyle yapının hacim başına absorbe ettiği enerji miktarını arttırmıştır. EVA köpük dolgulu alüminyum bal peteği malzemeler, içerdiği gözenekli yapı sayesinde basma sonrasında karakteristik geri yaylanma özelliği göstermiştir. Artan hücre boyutu ile geri yaylanma oranı artmıştır. Düşük yüksekliklere sahip yapılarda ise geçici deformasyon oranını temsil eden geri yaylanma miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Alüminyum bal peteği malzemelerinin düzlem dışı basma testlerinden alüminyum folyo kalınlığının serbest duvar uzunluğu oranının ( $t/l$ ) dolgulu ve dolgusuz malzemelerin her ikisinde de önemli etkisinin olduğu belirlenmiştir. Artan  $t/l$  oranı ile her iki yapıdan elde edilmiş pik gerilme, plato gerilmesi ve hacim başına absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır. Bu sebeple en yüksek  $t/l$  oranına sahip 6 mm yükseklikteki, 70  $\mu\text{m}$  folyo kalınlığındaki ve 5,20 mm hücre boyutundaki alüminyum bal peteği malzemesi, EVA köpük dolgulu ve dolgusuz olmak üzere ağırlık düşürme testi için seçilmiştir.

Ağırlık düşürme testleri neticesinde, artan darbe enerji seviyesi arttıkça, sandviç panellerin absorbe ettiği enerji miktarı ve deplasman değeri artmaktadır. Dolgusuz yapılarda 83 J darbe enerjisinde arka levhada hasar oluşurken, EVA köpük dolgulu panellerde ise 117 J darbe enerjisinde oluşmuştur. Dolgusuz ve dolgulu panellerin her ikisinde de darbe sonrası delaminasyon hasarı meydana gelmiştir.

## 5.2. Öneriler

Ağırlık düşürme testlerinde, darbenin etkisi ile ayrılan çekirdek ve yüzey levha tabakaları için yüzey levhasında pürüzlülük artırılmalıdır. Polimer köpük dolgulu yapılarda ise zımparadan kaçınılmalı, kapalı hacimde köpürtme yapılmalı ve yapıştırıcının köpükte bulunan gözeneklere nüfuz etmesi engellenmelidir. Panel elde edilirken uygulanan yapıştırıcı kalınlığı, polimer köpük dolgulu malzemelerin varlığı da değerlendirilerek düşürülebilir. Efektif bir panel yapımı için yapıştırıcı polimer köpük ve metal ile uyumlu seçilmelidir. Buna ek olarak, dinamik koşullar altında viskoelastik özellik gösteren dolgulu yapılar için yüzey levhası seçimi, delaminasyonu önlemek amacıyla çekirdek malzeme ile uyumlu olmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

- Afrinaldi, B., Vicarneltor, D. N., Rudianto, R. P., Hakim, A. R., & Muslim, O. F. (2021). Influence of Zinc Oxide Addition on Azodicarbonamide Thermal Decomposition in the Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Foaming Release. *Materials Science Forum*, 1028, 234–239. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.1028.234>
- Agroui, K., Maallemi, A., Boumaour, M., Collins, G., & Salama, M. (2006). Thermal stability of slow and fast cure EVA encapsulant material for photovoltaic module manufacturing process. *Solar energy materials and solar cells*, 90(15), 2509–2514.
- Akil Hazizan, M., & Cantwell, W. J. (2003). The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure. *Composites Part B: Engineering*, 34(8), 679–687. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00089-1)
- Alavi Nia, A., & Sadeghi, M. Z. (2013). An experimental investigation on the effect of strain rate on the behaviour of bare and foam-filled aluminium honeycombs. *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 748–756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.006>
- Allen, N. S., Edge, M., Rodriguez, M., Liauw, C. M., & Fontan, E. (2000). Aspects of the thermal oxidation, yellowing and stabilisation of ethylene vinyl acetate copolymer. *Polymer Degradation and Stability*, 71(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00111-7)
- Ashab, A. S. M., Ruan, D., Lu, G., Xu, S., & Wen, C. (2015). Experimental investigation of the mechanical behavior of aluminum honeycombs under quasi-static and dynamic indentation. *Materials & Design*, 74, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.004>
- Ashby, M. F. (2005). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15–30. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2005.1678>
- Ashby, M. F., & Medalist, R. F. M. (1983). The mechanical properties of cellular solids. *Metallurgical Transactions A*, 14(9), 1755–1769. <https://doi.org/10.1007/BF02645546>
- Avalle, M., Belingardi, G., & Montanini, R. (2001). Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *International Journal of Impact Engineering*, 25(5), 455–472. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00060-9)
- Aydın, M. R. (2013). *Köpük Dolgulu Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Titreşim Analizi*. yüksek lisans tezi, fen bilimleri enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bianchi, O., Fiorio, R., Martins, J. N., Zattera, A. J., Scuracchio, C. H., & Canto, L. B. (2009). Crosslinking Kinetics of Blends of Ethylene Vinyl Acetate and Ground Tire Rubber. *Journal of Elastomers & Plastics*, 41(2), 175–189. <https://doi.org/10.1177/0095244308095015>
- Bistac, S., Kunemann, P., & Schultz, J. (1998). Crystalline modifications of ethylene-vinyl acetate copolymers induced by a tensile drawing: effect of the molecular weight. *Polymer*, 39(20), 4875–4881.
- Bitzer, T. (1997). *Honeycomb Technology* (1. baskı). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5856-5>
- Bureau, M. N., Champagne, M. F., & Gendron, R. (2005). Impact-compression-morphology relationship in polyolefin foams. *Journal of cellular plastics*, 41(1), 73–85.
- Ciepielewski, R., Gieleta, R., & Miedzińska, D. (2022). Experimental Study on Static and

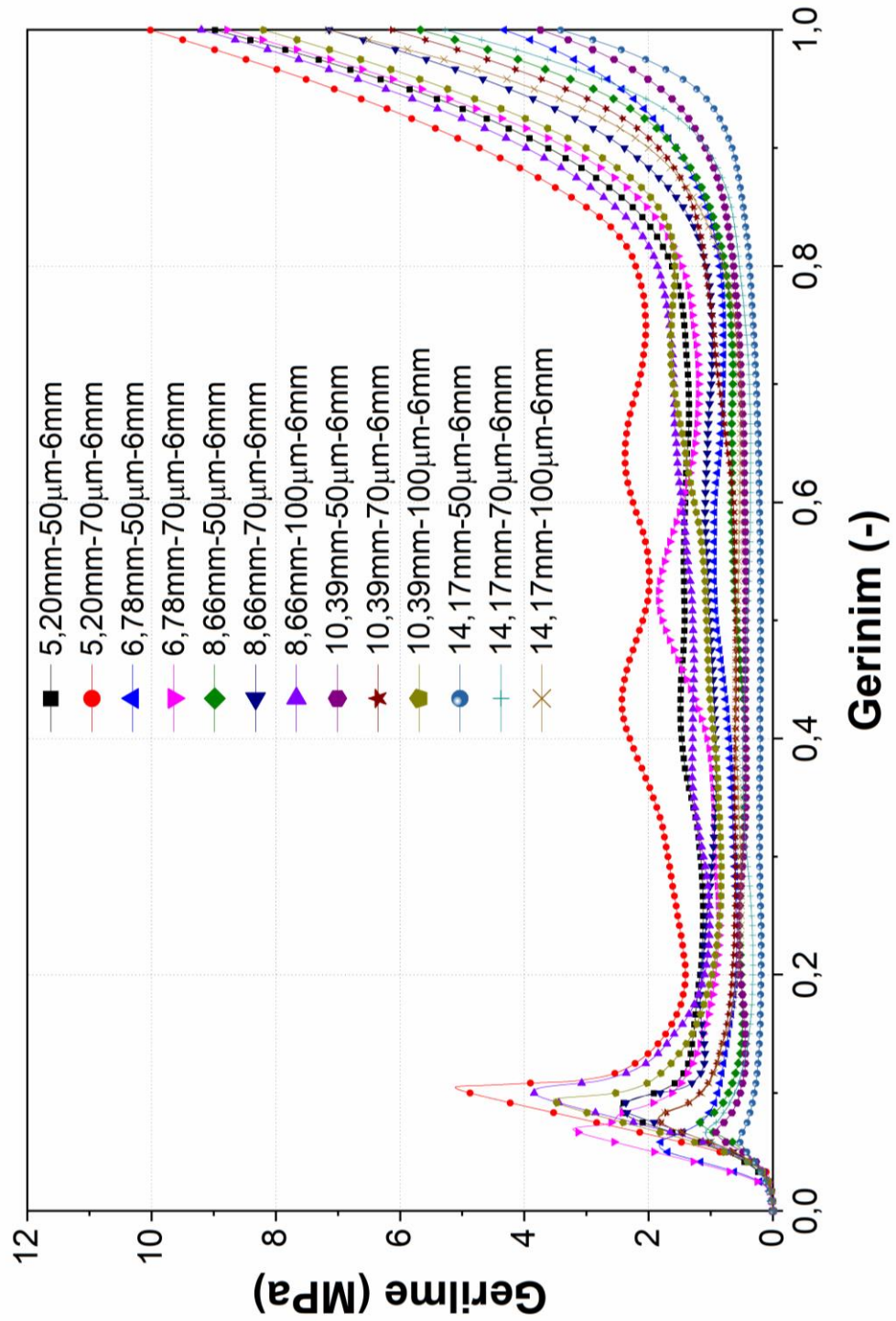
- Dynamic Response of Aluminum Honeycomb Sandwich Structures. *Materials*, 15(5), 1793. <https://doi.org/10.3390/ma15051793>
- Dalongeville, G., Dabo, M., Gauthier, C., & Roland, T. (2017). *Mechanical properties of polymer foams: influence of the internal architecture on the stiffness*.
- Duarte, I., Krstulović-Opara, L., Dias-de-Oliveira, J., & Vesenjak, M. (2019). Axial crush performance of polymer-aluminium alloy hybrid foam filled tubes. *Thin-Walled Structures*, 138, 124–136.
- Duh, Y.-S., Kao, C.-S., & Lee, W.-L. W. (2017). Chemical kinetics on thermal decompositions of dicumyl peroxide studied by calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 1089–1098. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5797-8>
- Eaves, D. (2004). *Handbook of polymer foams*. iSmithers Rapra Publishing.
- Engin, Z. B. (2011). *Balpeteği sandviç kompozitlerin darbe davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular solids: Structure and properties. İçinde *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition* (2. baskı). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Gong, L., Kyriakides, S., & Jang, W. Y. (2005). Compressive response of open-cell foams. Part I: Morphology and elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, 42(5–6), 1355–1379. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2004.07.023>
- Hanssen, A. G., Langseth, M., & Hopperstad, O. S. (2000). Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International journal of impact engineering*, 24(5), 475–507.
- Henderson, A. M. (1993). Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 9(1), 30–38. <https://doi.org/10.1109/57.249923>
- Jin, F.-L., Zhao, M., Park, M., & Park, S.-J. (2019). Recent trends of foaming in polymer processing: A review. *Polymers*, 11(6), 953.
- Kara, M. (2012). Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kee Paik, J., Thayamballi, A. K., & Sung Kim, G. (1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 35(3), 205–231. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(99\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00026-9)
- Khan, M. K. (2006). Compressive and lamination strength of honeycomb sandwich panels with strain energy calculation from ASTM standards. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 220(5), 375–386. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO76>
- Khan, M. K., Baig, T., & Mirza, S. (2012). Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Materials Science and Engineering: A*, 539, 135–142. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2012.01.070>
- Khan, M. K., & Wang, Q. (2013). Experimental and finite element based investigations of in-plane and out-of-plane properties of aluminum honeycomb. *Applied Mechanics and Materials*, 275–277, 111–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.111>
- Kuncir, E. J., Wirta, R. W., & Golbranson, F. L. (1990). Load-bearing characteristics of polyethylene foam: An examination of structural and compression properties. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 27(3), 229–238. <https://doi.org/10.1682/jrrd.1990.07.0229>
- Li, Q. M., Magkiriadis, I., & Harrigan, J. J. (2006). Compressive strain at the onset of

- densification of cellular solids. *Journal of cellular plastics*, 42(5), 371–392. <https://doi.org/10.1177/0021955X06063519>
- Liu, Q., Fu, J., Wang, J., Ma, J., Chen, H., Li, Q., & Hui, D. (2017). Axial and lateral crushing responses of aluminum honeycombs filled with EPP foam. *Composites Part B: Engineering*, 130, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.041>
- Lu, K. T., Chu, Y. C., Chen, T. C., & Hu, K. H. (2010). Investigation of the decomposition reaction and dust explosion characteristics of crystalline dicumyl peroxide. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(5), 356–365. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2010.06.003>
- Lu, L., Alamo, R. G., & Mandelkern, L. (1994). Lamellar thickness distribution in linear polyethylene and ethylene copolymers. *Macromolecules*, 27(22), 6571–6576.
- Mahmoudabadi, M. Z., & Sadighi, M. (2009). A study on metal hexagonal honeycomb crushing under quasi-static loading. *World Academy of Science, Engineering and Technology* (53), 677–681.
- Marcilla, A., García-Quesada, J. C., Beltran, M. I., & Ruiz-Femenia, R. (2008). Study of the formulations and process conditions in the crosslinking of polyethylene foams at atmospheric pressure. *Journal of applied polymer science*, 107(3), 2028–2037.
- Mertani, B. M. B., Keskes, B., & Tarfaoui, M. (2019). Experimental Analysis of the Crushing of Honeycomb Cores Under Compression. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3), 1628–1638. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3852-2>
- Mohamadi, Y., Ahmadi, H., Razmkhah, O., & Liaghat, G. (2021). Axial crushing responses of aluminum honeycomb structures filled with elastomeric polyurethane foam. *Thin-Walled Structures*, 164, 107785. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2021.107785>
- Mohr, D., & Doyoyo, M. (2003). Nucleation and propagation of plastic collapse bands in aluminum honeycomb. *Journal of Applied Physics*, 94(4), 2262–2270. <https://doi.org/10.1063/1.1592010>
- Nia, A. A., & Sadeghi, M. Z. (2010). The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study. *Materials & Design*, 31(3), 1216–1230. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.030>
- Polanský, R., Pinkerová, M., Bartůňková, M., & Prosr, P. (2013). Mechanical behavior and thermal stability of EVA encapsulant material used in photovoltaic modules. *Journal of Electrical Engineering*, 64(6), 361–365.
- Rajput, M. S., Burman, M., Köll, J., & Hallström, S. (2019). Compression of structural foam materials—Experimental and numerical assessment of test procedure and specimen size effects. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(1), 260–288.
- Rodríguez-Pérez, M. Á. (2005). Crosslinked Polyolefin Foams: Production, Structure, Properties, and Applications. *Advances in Polymer Science*, 184, 97–126.
- Ruiz-Herrero, J. L., Estravis, S., & Rodríguez-Perez, M. A. (2017). Polymeric Foams. *Çinde Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (ss. 1–39). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0471238961.06150113192108.a01.pub2>
- Seitzberger, M., Rammerstorfer, F. G., Gradinger, R., Degischer, H. P., Blaimschein, M., & Walch, C. (2000). Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures*, 37(30), 4125–4147.
- Sun, G., Huo, X., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2021). On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. *Composites Part*

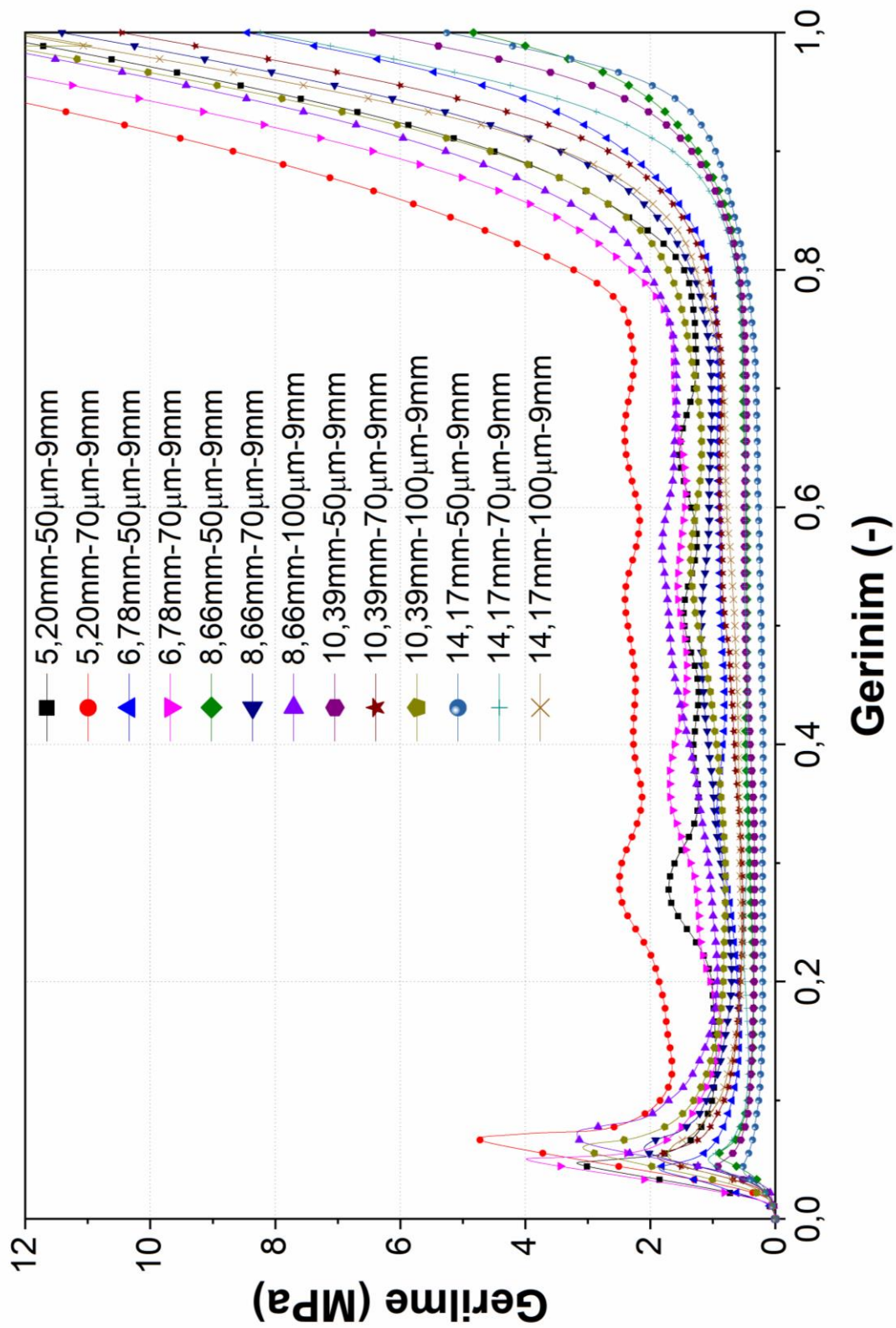
- B: Engineering, 216, 108881.*  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108881>
- Sun, Y., & Li, Q. M. (2018). Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *International Journal of Impact Engineering, 112*, 74–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006>
- Tan, P. J., Harrigan, J. J., & Reid, S. R. (2002). Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam. *Materials science and technology, 18*(5), 480–488. <https://doi.org/10.1179/026708302225002092>
- Uyaner, M. (2020). *Test to Graph*. Mendeley Data, V2. <https://doi.org/10.17632/gydhpktxjk.2>
- Verdejo, R. (2004). *Gas loss and durability of EVA foams used in running shoes*. University of Birmingham.
- Wilbert, A., Jang, W. Y., Kyriakides, S., & Floccari, J. F. (2011). Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb. *International Journal of Solids and Structures, 48*(5), 803–816. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2010.11.014>
- Wu, E., & Jiang, W. S. (1997). Axial crush of metallic honeycombs. *International Journal of Impact Engineering, 19*(5–6), 439–456. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00004-3)
- Wu, K. W., Hou, H. Y., & Shu, C. M. (2006). Thermalphenomena studies for dicumyl peroxide at various concentrations by DSC. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 83*(1), 41–44. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-6983-2>
- Xu, S., Beynon, J. H., Ruan, D., & Lu, G. (2012). Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs. *Composite Structures, 94*(8), 2326–2336. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.02.024>
- Yao, J., & Rodrigue, D. (2012). Density Graded Polyethylene Foams Produced by Compression Moulding Using a Chemical Blowing Agent. *Cellular Polymers, 31*(4), 189–206. <https://doi.org/10.1177/026248931203100401>
- Yetgin, S. H., Ünal, H., & Şanlı, P. (2016). Etilen-Vinil-Asetat (EVA)/Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE) Polimer Karışımının Köpük Oluşumuna Enjeksiyon Proses Şartlarının Etkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 16*, 187-195.
- Zarei, H. R., & Kröger, M. (2007). Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes. *International Journal of Crashworthiness, 12*(3), 255–264.
- Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., & Fang, J. (2019). Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam. *Composites Part B: Engineering, 156*, 17–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.043>

## EKLER

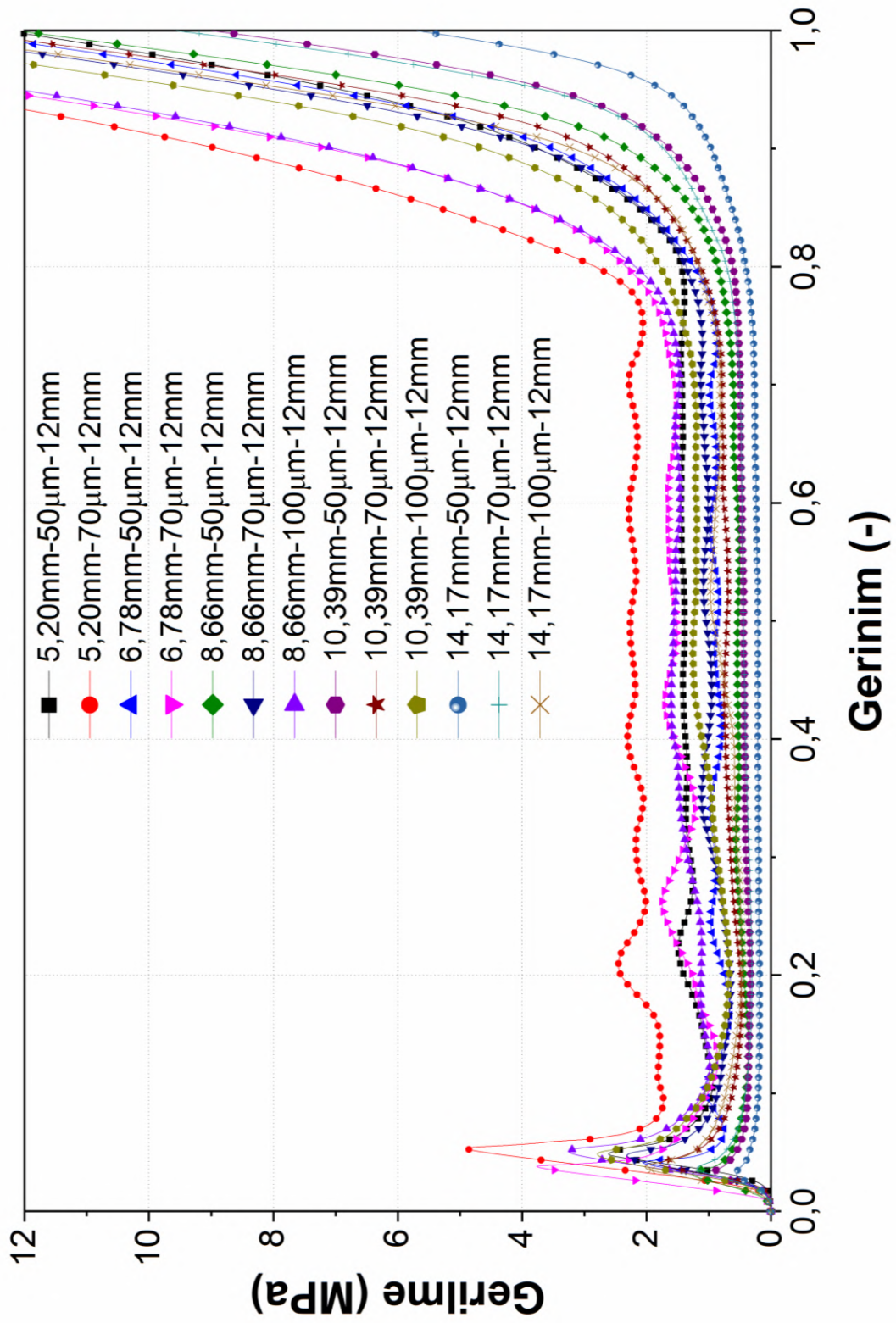
EK-1 Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)



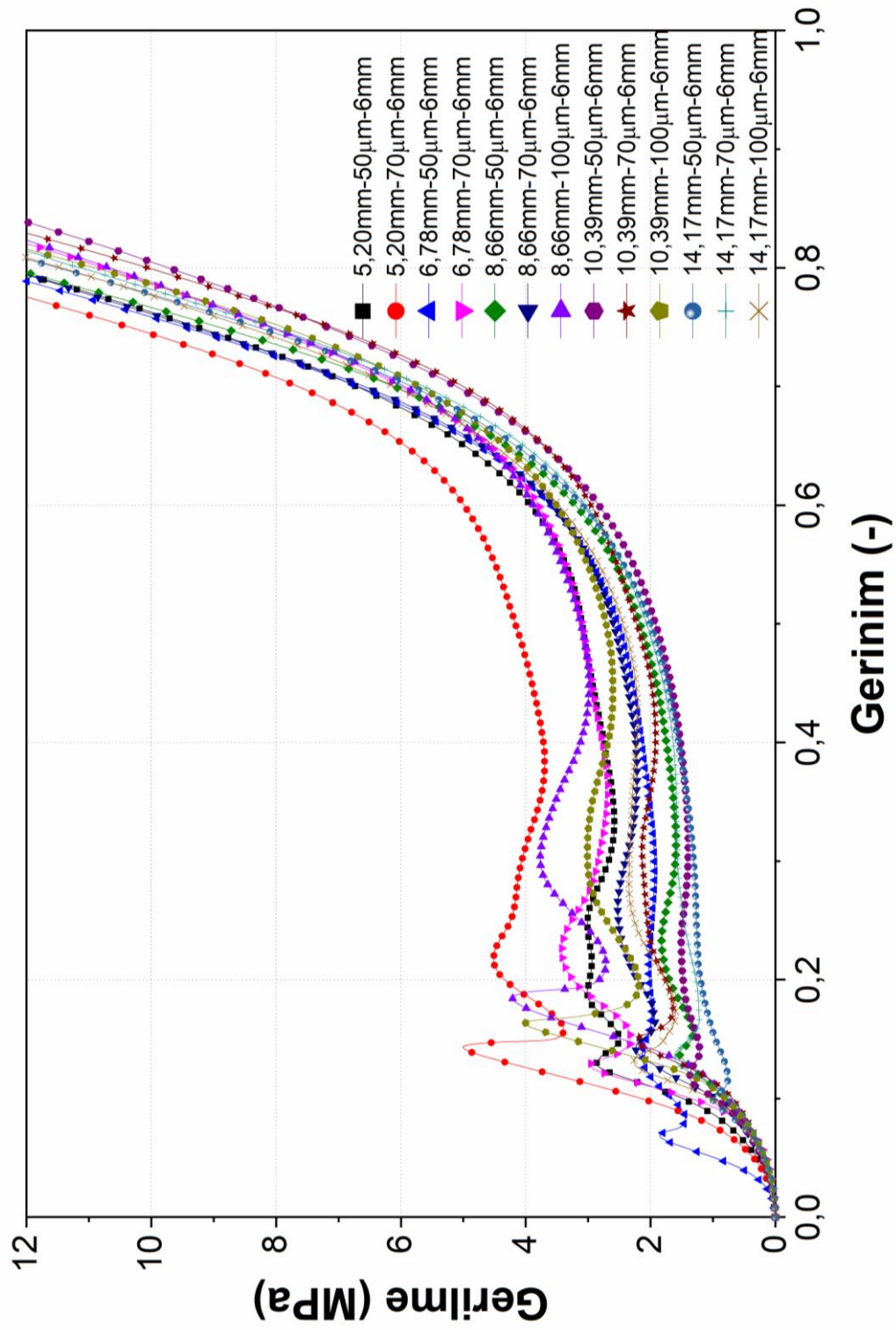
EK-2 Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)



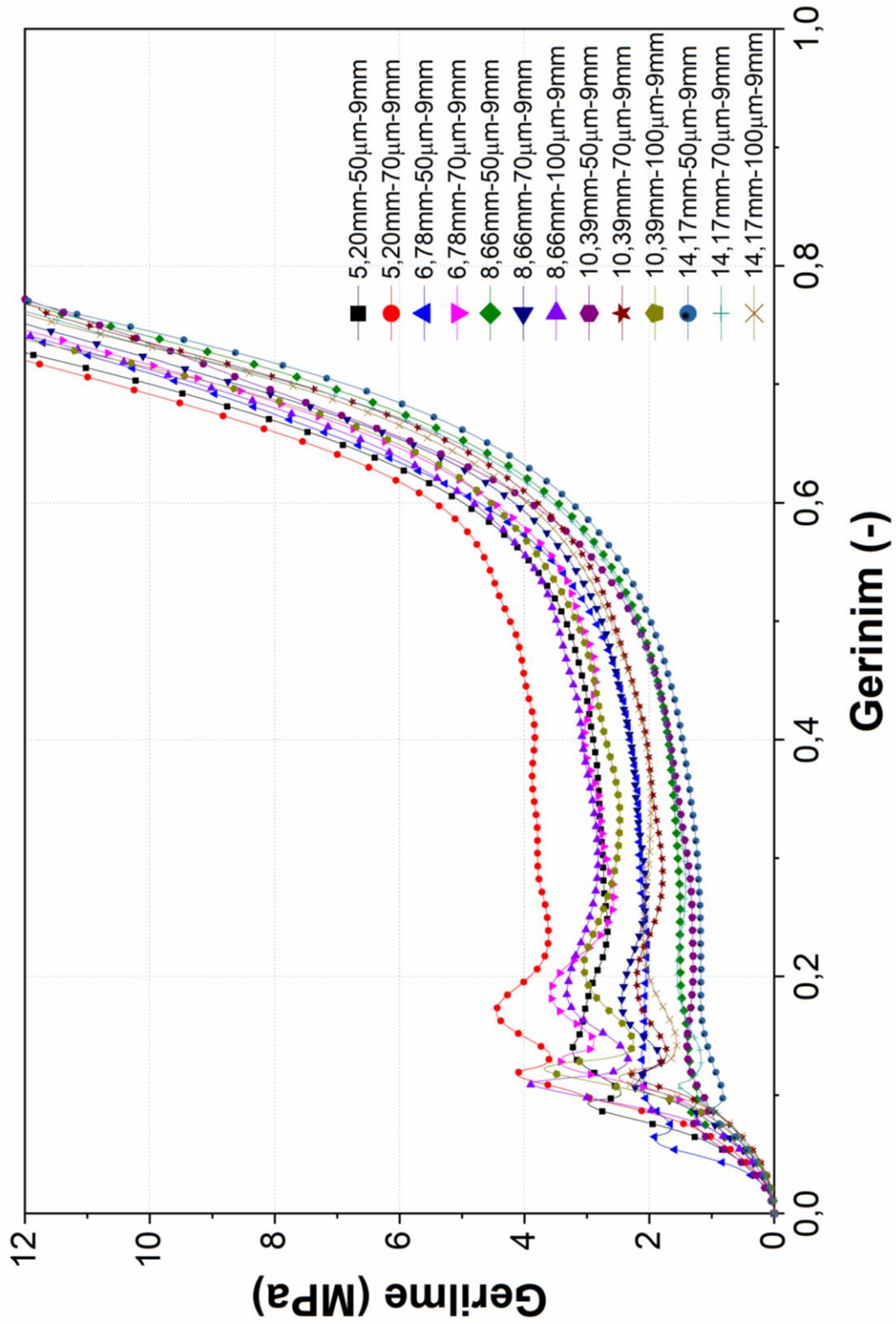
EK-3 Dolgusuz bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm)



EK-4 Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 6 mm)



EK-5 Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 9 mm)



EK-6 Dolgulu bal peteği malzemesine ait gerilme-gerinim diyagramı (h: 12 mm)

