



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**POLİMER DOLGULU BAL PETEĞİ HİBRİT
YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Muhammed İhsan ÖZGÜN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed İhsan ÖZGÜN tarafından hazırlanan “POLİMER DOLGULU BAL PETEĞİ HİBRİT YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 12/09/2024 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. Memduh KARA

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üy. Hakan Burak KARADAĞ

.....

Üye

Prof. Dr. Mesut UYANER

.....

Üye

Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

.....

Üye

Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 211451003 no’lu proje ile desteklenmiştir.

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.

Muhammed İhsan ÖZGÜN
Tarih: 12.09.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

POLİMER DOLGULU BAL PETEĞİ HİBRİT YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Muhammed İhsan ÖZGÜN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

2024, 116 Sayfa

Jüri

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

Bal Peteği yapılar hafiflik ve mekanik dayanım açısından tercih edilen yapısal tasarımlardır. Bal peteği sandviç panel tasarımları, havacılık, savunma ve lojistik gibi hafiflik ve sağlamlığın ön plana çıktığı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, değişen hücre boyutu, folyo kalınlığı ve yükseklik ölçülerinde imal edilen alüminyum bal peteği sandviç panellere darbe yüklerinin sandviç yapılarında meydana getirdiği kalıcı hasar oluşumunu azaltmak amacıyla ani yüklemelerde viskoelastik davranış gösteren silikon esaslı polimer olan RTV-2 köpük haline getirilerek hibrit bir yapı oluşturulmuştur. RTV-2, oda sıcaklığında kürlenmiş bir polimer olmasına karşın alüminyum bal peteği içerisinde gerçekleştirilen köpük üretim süreci ile birleştirilerek termal olarak kürlenmesi sağlanmıştır. RTV-2 polimer köpük yapısı, deneysel çalışmalar ile belirlenen ağırlıkça % 20 oranında düşük saflıkta (%80 safiyette) grafit ilavesi ile mekanik özellikler açısından modifiye edilmiştir. Belirtilen bal peteği geometrik parametrelerinde köpük dolgusu yapılan ve yapılmayan sandviç panel numuneler, düzlem dışı basma, makro indentasyon ve düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Basma testlerinde dolgulu numunelerde daha az burkulma hasarı meydana gelmiştir. Yarı küresel uç ile yapılan makro indentasyon testlerinde sandviç panellerin hasar oluşum mekanizması değişmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinde RTV-2 polimer köpük dolgusu, alüminyum bal peteği sandviç panellerde penetrasyon için gereken enerji miktarını artırmıştır. RTV-2 polimer yapısına ilave edilen grafitin moleküler düzeyde etkileşimi Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ile analiz edilmiş, dinamik mekanik analiz (DMA) ve termogravimetrik analiz (TGA) ile köpürtme sürecinin parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum bal peteği, Düşük hızlı darbe, Perforasyon, Polimer dolgu

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF POLYMER-FILLED HONEYCOMB HYBRID STRUCTURES

Muhammed İhsan ÖZGÜN

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. Dr. Yasin Ramazan EKER

2024, 116 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Hakan Burak KARADAĞ

Prof. Dr. Memduh KARA

Prof. Dr. Mesut UYANER

Assoc. Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Honeycomb structures are the preferred structural designs for lightness and mechanical strength. Honeycomb sandwich panel designs are frequently chosen in aviation, defense, and logistics applications, where lightness and robustness come to the fore. Within the scope of this thesis study, a hybrid structure was formed by foaming RTV-2. This silicone-based polymer shows viscoelastic behavior in sudden loads into RTV-2 foam to reduce the formation of permanent damage caused by impact loads on aluminum honeycomb sandwich panels manufactured in varying cell sizes, foil thickness, and height dimensions. Although RTV-2 is a room-temperature curing polymer, it is thermally cured by combining it with the foam production process in an aluminum honeycomb. The RTV-2 polymer foam structure was modified in terms of mechanical properties with the addition of 20 wt% low-purity graphite (80% purity) determined by experimental studies. Sandwich panel specimens with and without foam filling at the specified honeycomb geometrical parameters were subjected to out-of-plane compression, macro indentation, and low velocity impact tests. In compression tests, less buckling damage occurred in filled specimens. In macro indentation tests with a semi-spherical tip, the damage mechanism of the sandwich panels changed.

Keywords: Aluminum honeycomb, Low velocity impact, Perforation, Polymer filling

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ danışmanlığında hazırlanarak Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora Tezi olarak sunulmuştur.

Tez çalışmam süresince benden yardımlarını esirgemeyen bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ'a eş danışman hocam Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER'e şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamda kıymetli bilgilerini benimle paylaşan, yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Mesut UYANER'e minnetlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca desteklerini her zaman hissettiğim değerli hocam Fatih ERCİ'ye, kıymetli arkadaşım Dr. Arş. Gör. Ahmet Burçin BATIBAY'a, ve Arş. Gör. Abdulkadir PEKTAŞ'a değerli mesai arkadaşım Dr. Arş. Gör. Tuğba Selcen ATALAY KALSEN'e, teşekkürü bir borç bilirim. Maddi ve manevi desteklerinden ötürü Öğr. Gör. Dr. Onur GÖK'e teşekkür ederim.

Her durumda yanımda olan, benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen anneme, babama, kardeşlerime ve eşimin ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Hayat yolculuğumda bana eşlik eden ve hayatımın her alanında olduğu gibi çalışmam süresince de karşılaştığım zorluklarla mücadele etmemi sağlayan, bana her konuda güvenen, her daim destek olan, heyecanımı paylaşan, değerli eşim Ümmü ÖZGÜN'e sonsuz teşekkürler. Ve hayattaki şükür sebeplerim canım çocuklarım Hande ve Mustafa Selim. Sizi her zaman seven ve düşünen bir babanız olduğunuzu bilmenizi isterim. İyi ki varsınız.

Muhammed İhsan ÖZGÜN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Bal Peteği Sandviç Yapılar	2
1.1.1. Alüminyum Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları	3
1.1.2. Alüminyum Bal Peteği Yapıların Mekanik Açından İncelenmesi	4
1.1.2.1. Statik Şartlarda Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışı	5
1.1.2.2. Düşük Hızlı Darbe Şartlarında Alüminyum Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışı.....	6
1.2. Polimer Yapılar.....	12
1.2.1. Termoplastikler.....	13
1.2.2. Termosetler	14
1.2.3. Elastomerler	15
1.2.4. Polimerlerin Mekanik Özellikleri	15
1.2.5. Polimerlerde Viskoelastik Davranış	17
1.2.6. Polimer Köpük Üretimi ve Polimer Köpüklerin Mekanik Özellikleri	19
1.3. Silikon Esaslı Polidimetilsiloksan (PDMS) Polimer Yapılar	23
1.3.1. PDMS Polimer Üretimi ve Kullanımı	24
1.3.2. PDMS Polimer Çeşitleri	25
1.3.3. Silikon Polimer Yapılarda Kurlleme (Vulkanizasyon).....	26
1.3.4. Silikon Polimerlere Yapılan Katkılar	28
1.3.5. Silikon Polimer Yapıların Mekanik Özellikleri.....	29
1.3.6. Silikon Polimer Köpük Yapılar ve Kullanımı	30
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Kullanılan Materyaller	35
3.1.1. Alüminyum Bal Peteği Sandviç Yapılar.....	35
3.1.2. RTV-2 Silikon Polimer	36
3.1.3. Modifiye Edici Malzeme Seçimi ve Grafit.....	37
3.1.4. Azodikarbonamid (AZD).....	38

3.2.	Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Hibrit Malzeme Üretimi	39
3.3.	Polimer Köpük Karakterizasyon	42
3.3.1.	Polimer Köpük Malzemelerde Sertlik Ölçümü	42
3.3.2.	Dinamik-Mekanik Analiz (DMA)	44
3.3.3.	Termogravimetrik Analiz (TGA).....	45
3.3.4.	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi	46
3.3.5.	Raman Spektroskopisi	46
3.3.6.	Piknometre Yoğunluk Ölçümü	47
3.4.	Mekanik Testler	48
3.4.1.	Basma Testleri	48
3.4.2.	Makro İndentasyon Testleri	50
3.4.3.	Düşük Hızlı Darbe Testleri	50
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	52
4.1.	Silikon Polimer (RTV-2) Köpük Üretim Süreci	52
4.1.1.	RTV-2 Polimer Seçimi	52
4.1.2.	RTV-2 Köpük Modifikatör Seçimi	54
4.1.3.	Modifikatör Olarak Seçilen Grafitin Karakterizasyonu.....	54
4.1.4.	Modifikatör Olarak Kullanılan Grafitin Partikül Boyutunun Etkisi	57
4.1.5.	Modifikatör Olarak Kullanılan Grafit Katkı Miktarının Belirlenmesi	61
4.2.	Dolgulu ve Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Çekirdek Yoğunlukları	66
4.3.	Basma Test Sonuçları	68
4.3.1.	Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçları	69
4.3.2.	Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçları.....	71
4.3.3.	Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	73
4.4.	Makro İndentasyon Test Sonuçları	76
4.4.1.	Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçları.....	76
4.4.2.	Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçları	78
4.4.3.	Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	80
4.5.	Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları	82
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
5.1	Sonuçlar	93
5.2	Öneriler	94
6.	KAYNAKLAR	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- σ : gerilme
 E : Elastik Modülü
 \hat{U} : İç Enerji
 δ : deformasyon
 t : zaman
 δ_f : son şekil değiştirme
 F_c : azami kuvvet
 δ_c : azami şekil değiştirme
 t_f : temas süresi
 V : vurucu hızı
kN: kilo Newton
mm: milimetre
ms: milisaniye
J: Joule
 h_f : panel levha kalınlığı
 h_c : çekirdek yüksekliği
M: vurucu kütlesi
 R_i : vurucu çapı
 R_c : temas yarıçapı
 α : deformasyon açıklığı
 R_p : hedef açıklığı
P: yük
 u : deplasman
 ε : gerinim
 σ_{PL} : orantısal limit gerilimi
 ε_{PL} : orantısal limit gerinimi
 T_g : camsı geçiş sıcaklığı
 T_m : ergime sıcaklığı
MPa: mega paskal
g: gram
 cm^3 : santimetre küp
 η : enerji absorpsiyon verimliliği
 ε_{cd} : yoğunlaşma başlangıç gerinimi
 g : yerçekimi ivmesi
H: yükseklik
 h'' : numunenin geçici deformasyon ortadan kalktıktan sonra ölçülen yüksekliği
 h' : numunenin basma yükü altındaki azami deformasyonda ölçülen yüksekliği
 h_0 : numunenin basma testi öncesi yüksekliği
V: hacim
D: çap
N: Newton (kuvvet birimi)
Si: silisyum elementi
O: oksijen elementi
C: karbon elementi
Cl: klor elementi
Me: metil (CH_3)

Ti: titanyum elementi

μm : mikrometre

W: genişlik

T: kalınlık

L:uzunluk

Kısaltmalar

HOBE: Genişleme Öncesi Bal Peteği (Honeycomb Before Expansion)

PDMS: Polidimetil Siloksan

dk: dakika

TGA: Termogravimetrik Analiz

DMA: Dinamik Mekanik Analiz

RTV: Oda Sıcaklığında Kürlenebilen Silikon Polimer (Room Temperature Vulcanized)

HTV: Yüksek Sıcaklıkta Kürlenebilen Silikon (High Temperature Vulcanized)

OBSH: Oksi Benzen Sulfonil

DPT: Dinitroso Penta Metil Tetramin

PVC: Poli Vinil Klorür

FTIR: Fourier Dönüşümlü Infrared Spektroskopisi

SBR: Stiren Bütadien Kauçuk (Styren Butadien Rubber)

LSR : Sıvı Silikon Kauçuk Polimer (Liquid Silicon Rubber)

a.u. : arbitrary unit (rastgele birim)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1. Altıgen geometriye sahip bal peteği yapısı (Bitzer, 1997).....	2
Şekil 1. 2. Bal peteği yapısı (Bitzer, 1997).....	3
Şekil 1. 3. Bal peteği üretimi a) Genişletme ile üretim b) Hadvelendirme ile üretim (Wadley, 2006)	4
Şekil 1. 4. Bal peteği hücreleri ve yük maruziyet doğrultuları (X_1 ve X_2 düzlem içi, X_3 düzlem dışı) (Gibson & Ashby, 1997).....	5
Şekil 1. 5. Hücreli veya hücreyel yapılarda akma sonrası yumuşama gösteren malzemelerde basma yükleri altında gerilim-gerinim davranışları a) esneme-baskın kafes yapıları, b) eğilme-baskın kafes yapıları (Zhong et al., 2023)	6
Şekil 1. 6. a) Normal F temas kuvvetine bağlı deformasyon miktarı b) temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi (Stronge, 2018)	7
Şekil 1. 7. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki kuvvet-deplasman (çökme) (F-d) değişimi (Sayer, 2009)	8
Şekil 1. 8. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki kuvvet-zaman (F-t) değişimi (Sayer, 2009).....	9
Şekil 1. 9. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki enerji-zaman (E-t) değişimi (Sayer, 2009).....	9
Şekil 1. 10. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki Hız-zaman (V-t) değişimi (Sayer, 2009).....	10
Şekil 1. 11. Sandviç panel yapıları için düşük hızlı darbe modeli (Chai & Zhu, 2011). 10	
Şekil 1. 12. Darbe yüküne maruz kalan kompozit sandviç panel için yük/deplasman eğrisinin aşamaları (Chai & Zhu, 2011)	11
Şekil 1. 13. Bal peteği sandviç yapılarda hasar gelişim mekanizmaları a) kalın çekirdekli, b)ince çekirdekli (Raju et al., 2008)	12
Şekil 1. 14. a) Polietilenin birim yapısı, b) polietilenin zincir gösterimi (A. Kumar & Virginia, 2003).....	13
Şekil 1. 15. Termoplastik zincir yapıları a) doğrusal, b) dallanmış (Brinson & Brinson, 2015).....	14
Şekil 1. 16. Termoset zincir yapıları a) düşük yoğunluklu çapraz bağlanma, b) yüksek yoğunluklu çapraz bağlanma (ağ yapısı) (Brinson & Brinson, 2015)	14
Şekil 1. 17. Elastomer zincir yapıları ve kısmi çapraz bağlar (Davidson & Goulbourne, 2017)	15
Şekil 1. 18. Farklı polimer gruplarının gerilim-gerinim davranışları (Brinson & Brinson, 2015).....	16
Şekil 1. 19. Polimerlerin akma sürecinde Considère tanımı (Brinson & Brinson, 2015)	17
Şekil 1. 20. Polimerlerin akma dayanımına (iç akma) a) sıcaklık, b) deformasyon hızının etkisi (Brinson & Brinson, 2015).....	17
Şekil 1. 21. Sürünme testlerinde elastik, viskoz ve viskoelastik davranış a) sabit gerilim, b) sabit gerinim (Lakes, 2009).....	18
Şekil 1. 22. Farklı moleküler düzene sahip polistiren polimerin DMA analizi a) kristalin polistiren, b) düşük yoğunluklu çapraz bağlanmaya sahip polistiren, c) amorf polistiren (Brinson & Brinson, 2015)	19
Şekil 1. 23. Kimyasal olarak köpürtülmüş kauçuk bileşiklerinin genleşme davranışı ve küreleşmesi (Michaeli & Sitz, 2010).....	20
Şekil 1. 24. Polimer köpük basma davranışı ve enerji absorpsiyonu verimliliği (Rahimidehghan & Altenhof, 2023)	21
Şekil 1. 25. Anizotropik polimer köpük yapılarında hücre genişlemesine paralel ve dik yönde basma davranışı (Rahimidehghan & Altenhof, 2023)	22

Şekil 1. 26. Kapalı hücreli hücrelerde basma ile oluşan çekme gerilmeleri (Lorna J. Gibson, 1999).....	22
Şekil 1. 27. Polimer köpük yapılarında düşük hızlı darbe hasarı ve kaydedilen temas kuvveti-zaman grafiği (Rizov, 2007).....	23
Şekil 1. 28. Polidimetilsiloksan birim molekül yapısı (González Calderón et al., 2020)	24
Şekil 1. 29. RTV-2 polimerin kürlenme mekanizmaları a) katılma b) yoğunlaşma (Alexander Grolmuss, 2007).....	27
Şekil 1. 30. HTV-2 Polimerin peroksit ile kürlenme mekanizması (Alexander Grolmuss, 2007)	28
Şekil 1. 31. Unimodal ve bimodal ağ yapıların gerili-gerinim eğrileri (Jurásková et al., 2020).....	29
Şekil 1. 32. Kürlenme derecesine göre köpürme süreci (Shimbo et al., 2004)	30
Şekil 3. 1. a) RTV-2 E-25 kalıp silikonu ve kürleyici ajan b) RTV-2 ve kürleyici ajan karışımı	36
Şekil 3. 2. Modifikasyonda kullanılan “döküm grafiti”	37
Şekil 3. 3. Eleme işleminde kullanılan Retsch AS 200 marka model elek.....	38
Şekil 3. 4. Köpürtme ajanı olarak kullanılan AZD.....	39
Şekil 3. 5. Azo dikarbonamidin termal bozunma reaksiyonu (Charoeythornkhajhornchai et al., 2017)	39
Şekil 3. 6. Polimer köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panel üretim şeması	40
Şekil 3. 7. a) Köpük dolgusu olarak kullanılacak PDMS, AZD ve grafit karışımı, b) Uygun miktarda karışımın ile bal peteği hücrelerinin doldurulması, c) Etüv içerisinde eş zamanlı köpürtme ve kütleme.....	41
Şekil 3. 8. a) Poliüretan yapıştırıcının aplikatör ile tatbiki, b) Yapıştırıcının kürlenmesi için kullanılan ısıtma plakaları ve kontrol ünitesi.....	41
Şekil 3. 9. a) Fazla miktarda köpük dolgusunun çarpılmaya uğrattığı tek tarafı kapalı alüminyum bal peteği yapı, b) Uygun miktarda köpük dolgusu yapılan düzgün numune	42
Şekil 3. 10. Shore A ve Shore D ölçüm metotları için kullanılan batıcı uçlar (Vian & Denton, 2018)	43
Şekil 3. 11. Shore F polimer köpük sertliği ölçüm durometresi.....	43
Şekil 3. 12. Perkin&Elmer DMA 8000	45
Şekil 3. 13. Bal peteği yoğunluk ölçümü için kullanılan şablon (Bitzer, 1997).....	48
Şekil 3. 14. Alüminyum bal peteği basma testi	49
Şekil 3. 15. Alüminyum bal peteği makro penetrasyon testi a) temas, b) penetrasyon..	50
Şekil 3. 16. Düşük hızlı darbe testlerin kullanılan cihaz	51
Şekil 4. 1. Azodikarbonamide (AZD) ait TGA analizi.....	52
Şekil 4. 2. Farklı sertlik değerlerine sahip RTV-2 polimerlerin köpürtülmesi.....	53
Şekil 4. 3. %0,3 AZD, %2 kürleştirici ajan ve RTV-2 E-25 karışımına ait TGA analizi	53
Şekil 4. 4. RTV-2 polimer köpükler	54
Şekil 4. 5. Saf grafit ve “döküm grafiti” TGA analizi	55
Şekil 4. 6. a) Saf grafit b) “döküm grafiti” partikül boyut dağılımı	55
Şekil 4. 7. “Döküm grafiti” eşleştirilmiş XRD paterni.....	56
Şekil 4. 8. a) Saf grafit b) “döküm grafiti” SEM görüntüleri (1000x büyütme oranında)	56
Şekil 4. 9. “Döküm Grafit” külü.....	57
Şekil 4. 10. Grafit tozların 500x büyütmede SEM görüntüleri a) 0-20 µm, b)20-32 µm, c) 50-100 µm, d) referans saf grafit tozu	58

Şekil 4. 11. Farklı partikül boyutuna sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait FTIR analiz sonuçları.....	59
Şekil 4. 12. Modifikatör olarak kullanılan grafit tozların Raman analizi spektrumları..	60
Şekil 4. 13. Farklı partikül boyutuna sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait TGA sonuçları.....	61
Şekil 4. 14. 20-32 µm partikül boyutuna sahip grafit katkısı ile değişen katkı oranlarında üretilen RTV-2 polimer köpük numuneler	62
Şekil 4. 15. 20-32 µm partikül boyutuna sahip grafit katkısı ile değişen katkı oranlarında üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin Shore F sertlik değeri	62
Şekil 4. 16. Farklı katkı oranına sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait FTIR analiz sonuçları.....	63
Şekil 4. 17. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin depo ve kayıp elastik modülü	63
Şekil 4. 18. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin depo ve kayıp elastik modülü efektif artış oranları.....	64
Şekil 4. 19. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin köpürme yönüne dik kesitten 40x büyütme ile alınan SEM görüntüleri a) katkısız, b) % 5, c)% 10, d)% 15, e)% 20, f)% 25, g)% 30, h) % 20 referans grafit	65
Şekil 4. 20. %20 grafit katkı oranı ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunenin köpürme yönüne paralel kesitten 45x büyütme ile alınan SEM görüntüsü	66
Şekil 4. 21. Farklı miktarda grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait TGA sonuçları.....	66
Şekil 4. 22. Alüminyum bal peteği çekirdeğinde hücre boyutu ve folyo kalınlığına bağlı RTV-2 köpük dolgusu ile yoğunluk artışı	67
Şekil 4. 23. Polimer dolgulu bal peteği hücrelerde hücre boyutu ve yüksekliğe göre dolgu ağırlığı.....	68
Şekil 4. 24. Hücre boyutu 5.2 mm, çekirdek yüksekliği 8 mm, folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı basma testi sonrasında panelin kesit görüntüsü	69
Şekil 4. 25. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	69
Şekil 4. 26. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	70
Şekil 4. 27. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	71
Şekil 4. 28. Hücre boyutu 5.2 mm, çekirdek yüksekliği 8 mm, folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı basma testi sonrasında panelin kesit görüntüsü	71
Şekil 4. 29. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	72
Şekil 4. 30. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	72
Şekil 4. 31. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 µm ve70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri	73
Şekil 4. 32. Boş bal peteği sandviç panellerin geçici deformasyon miktarı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi.....	73
Şekil 4. 33. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin geçici deformasyon miktarı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	74
Şekil 4. 34. Boş bal peteği sandviç panellerin basma dayanımı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	74

Şekil 4. 35. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin basma dayanımı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	75
Şekil 4. 36. Boş bal peteği sandviç panellerin basma spesifik absorpsiyonu enerjisi (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	75
Şekil 4. 37. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin basma spesifik absorpsiyonu enerjisi (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	76
Şekil 4. 38. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı makro indentasyon sonrasında panelin kesit görüntüsü	77
Şekil 4. 39. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri.....	77
Şekil 4. 40. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri.....	78
Şekil 4. 41. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri.....	78
Şekil 4. 42. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan dolgulu alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı makro indentasyon sonrasında panelin kesit görüntüsü	79
Şekil 4. 43. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri	79
Şekil 4. 44. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri	79
Şekil 4. 45. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri	80
Şekil 4. 46. Boş bal peteği sandviç panellerin makro indentasyon spesifik enerji absorpsiyonu (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	81
Şekil 4. 47. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin makro indentasyon spesifik enerji absorpsiyonu (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	81
Şekil 4. 48. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgusuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgusuz d) 70 µm-dolgulu	82
Şekil 4. 49. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgusuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgusuz 66.7 J, (d) dolgulu 50.03 J, (h) dolgulu 66.7 J.....	83
Şekil 4. 50. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgusuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgusuz d) 70 µm-dolgulu	83
Şekil 4. 51. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgusuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgusuz 66.7 J, (d) ve (h) dolgulu 66.7 J	84
Şekil 4. 52. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgusuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgusuz d) 70 µm-dolgulu	84
Şekil 4. 53. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgusuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) dolgusuz 66.7 J, (d) dolgulu 66.7 J, (g) dolgusuz 83.38, (h) dolgulu 83.38 J	85

Şekil 4. 54. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	85
Şekil 4. 55. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.3 J, (d) ve (h) dolgulu 50.3 J	86
Şekil 4. 56. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	86
Şekil 4. 57. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J, (g) dolgunsuz 50.03 J, (h) dolgulu 83.38 J	87
Şekil 4. 58. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	87
Şekil 4. 59. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J, (h) dolgunsuz 83.38 J	88
Şekil 4. 60. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	88
Şekil 4. 61. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) ve (h) dolgulu 50.03 J	89
Şekil 4. 62. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	89
Şekil 4. 63. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J ve (h) dolgulu 83.38 J.....	90
Şekil 4. 64. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu	90
Şekil 4. 65. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 100.06 J ve (h) dolgulu 66.7 J.....	91
Şekil 4. 66. Boş bal peteği sandviç panellerin düşük hızlı darbe penetrasyon spesifik enerji absorpsiyonu, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi	91
Şekil 4. 67. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin düşük hızlı darbe penetrasyon spesifik enerji absorpsiyonu, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi.....	92

TABLO LİSTESİ

Çizelge 3. 1. Kullanılan alüminyum bal peteğine ait geometrik parametreler	35
Çizelge 3. 2. Düşük hızlı darbe enerji seviyeleri	51
Çizelge 4. 1. Farklı modifikatörlerin köpük sertlik değerine etkisi.....	54
Çizelge 4. 2. “Döküm Grafit” külünün XRF analiz sonuçları.....	57
Çizelge 4. 3. Sınıflandırılan grafit tozların ortalama partikül boyut değerleri ve BET yüzey alanları.....	57
Çizelge 4. 4. Grafit tozların %10 Ağ. Katkısında RTV-2 Köpük Shore F Değeri	58
Çizelge 4. 5. Modifikatör olarak kullanılan grafit tozların Raman parametreleri	60
Çizelge 4. 6. Ağırlıkça %20 “döküm grafiti” ve referans grafit katılarak üretilen RTV-2 köpüğün depo ve kayıp elastik modülü	64
Çizelge 4. 7. Dolgunsuz bal peteği çekirdek Bitzer (1997) yoğunlukları	67
Çizelge 4. 8. Dolgulu bal peteği çekirdek yoğunlukları	67

1. GİRİŞ

Uydu ve uçaklar gibi hava araçları, yüksek hıza sahip trenler ve hızlı deniz taşıtları gibi hafif tasarımların önem arz ettiği taşıma sistemlerinde tasarım ve inşaa için, yapısal ağırlıktan tasarruf, en önemli hususlardan biridir. Bu gereksinimi karşılamak için malzeme kalınlığını azaltmak yerine sıklıkla sandviç yapı haline getirilerek yapısal parçalar içi boşaltılarak üretilir. Sandviç panel yapı, bir çekirdek malzeme ile ayrılan ince iki karşılıklı katmandan oluşur. Sandviç yüzeyler için potansiyel malzemeler, özel görev gereksinimine bağılı olarak alüminyum alaşımları, yüksek gerilimli çelikler, titanyum ve kompozit yapılar şeklinde üretilebilir. Sandviç yapıların üretiminde çeşitli tipte çekirdek şekilleri ve çekirdek malzemesi uygulanmıştır. Bunlar arasında, cephelere dik altıgen hücreler şeklinde çok ince folyolardan oluşan bal peteğı çekirdek en popüler olanıdır. Korozyon direnci ve şekil alabilme kabiliyeti sebebi ile folyo ve ince panel üretiminde kullanılan alüminyum, bal peteğı geometrisi şeklinde üretilmeye elverişlidir. Bilhassa 3003, 5052 ve 5056 kalite alüminyum alaşımları ticari olarak alüminyum bal peteğı üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir (Bitzer, 1997).

Sandviç yapı, mükemmel yapısal verimlilik, yani yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlar. Sandviç yapının sunduğı diğer avantajlar, kaynağın ortadan kaldırılması, üstün yalıtım kalitesi ve tasarımın çok yönlülüğüdür. Sandviç yapı kavramı çok yeni olmasa da son on yılda öncelikle yapıların dayanıksız kısımları için birim hacimde en az ağırlık artışı sağladığından büyük ölçüde benimsenmiştir. Dinamik olarak yüklenmiş yapılar, sandviç yapı tasarımı ile üretildiğinde eğilme dayanımı artırıldığından yapısal bütünlük daha fazla korunabilmektedir (Bitzer, 1997).

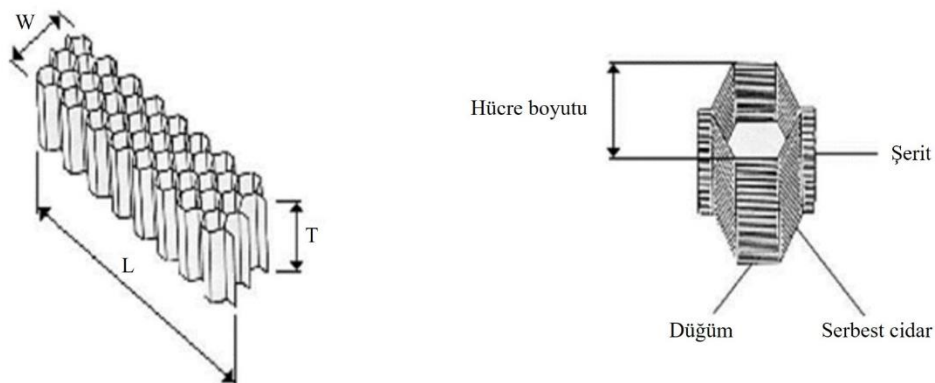
Polimer köpük yapılar, ısı-ses yalıtımı ve darbelere karşı koruyucu ambalaj üretiminde günlük hayatımızda yer bulmuştur. Köpük yapılar, üç boyutlu hücreli yapılar olarak tanımlanabilir. Hücreler, birbiri ile bağlantılı olarak katı fazın sadece hücre kenarlarında bulunduğu açık hücre yapılı morfolojide olduğu gibi gaz fazın katı faz tarafından yalıtıldığı kapalı hücre morfolojisinde de olabilmektedir. Kapalı ya da açık hücreli olmak malzeme açısından mekanik davranışı etkileyen bir ayrımdır (Gibson & Ashby, 1997). Bazı polimer grupları yüksek özgül mukavemetinden ötürü sandviç panel arasına tatbik edilerek stratejik yapı elemanı rolünü üstlenebilmektedir (Zhang et al., 2019a). Polimer köpük yapıları katkılamak suretiyle kolayca modifiye edilebildiklerinden, köpürtme suretiyle düşen mekanik özellikleri de bu yolla dengelenebilmektedir (Antunes

& Velasco, 2014). Köpürtme süreçlerinde hücre boyutu, köpürtme ajanlarının miktarıyla kontrol edilerek farklı uygulamalara yönelik olarak üretilebilmektedir.

Alüminyum bal peteği sandviç yapısı ile oluşturulan hibrit yapı örneklerine; ızgara çerçeveli sandviç yapılar, çok katmanlı tasarımlar ve takviye edilmiş sandviç yapılar örnek verilebilmektedir (Thomas & Tiwari, 2019). Bu örneklerin dışında, alüminyum bal peteği yapıların polimer köpük ile doldurularak darbe, basma ve eğilme dayanımı artırılabilir. Polimer yapıdaki köpük dolgusu ile alüminyum bal peteği yapılarla hibrit bir sandviç form oluşturularak kalıcı deformasyon oranının azaltılabilmesi mümkündür. Ağırlık artışına oranla enerji absorpsiyon miktarındaki artış, bal peteği yapılarda köpük dolgu ilavesi ile dinamik şartlarda bile iki katına varan değerlere ulaşabilmektedir (Burlayenko & Sadowski, 2010; Zhang et al., 2019b).

1.1. Bal Peteği Sandviç Yapılar

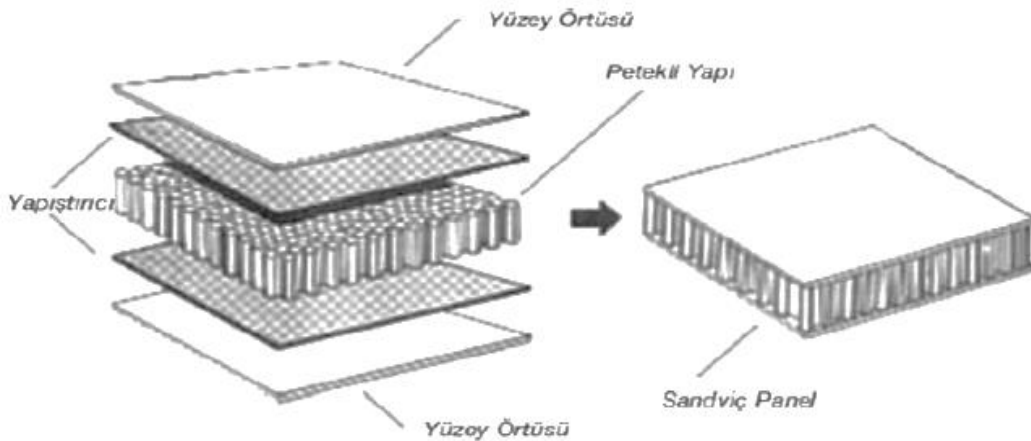
Ara katmanı bal peteği şeklinde olan sandviç panel yapılar, özellikle çarpma sonucu ortaya çıkan enerjinin absorbe edildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren yapılarda kullanılır. Sandviç yapıların iç ve dış tabakaları arasına yerleştirilen bal peteği şeklindeki çekirdek kısım sayesinde atalet momenti ve eğilme dayanımında artış sağlanır. Petek geometrisi, uygulanan yük altında ezilir. Bununla birlikte petek geometrisindeki sandviç yapı, yüksek basma mukavemeti/ağırlık oranına sahiptir (Thomas & Tiwari, 2019). Alüminyumdan imal edilmiş bal peteği geometrisine sahip sandviç panel levhalar, enerji absorpsiyonunu sağlamak amacı ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Spesifik bir örnek olarak Apollo 11 uzay aracının iniş modülünde şok emici olarak alüminyum petek kullanıldığı bilinmektedir (Gibson & Ashby, 1997).



Şekil 1.1. Altigen geometriye sahip bal peteği yapısı (Bitzer, 1997)

Paslanmaz çelik petek yapılar ise nükleer santraller gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında alüminyum bal peteği sandviç panel kullanılmıştır. Bal peteği çekirdek yapısı ve tek bir altıgen hücre Şekil 1’de gösterilmiştir (Bitzer, 1997).

Altıgen hücre yapısında en geniş hacimde en düşük yüzey alanı sağlanmaktadır. Sandviç yapılar, bal peteği yapısının yapıştırılması ile Şekil 2’deki gibi elde edilir. Alüminyum bal peteği yapılarda yaygın olarak epoksi ya da fenolik reçineler tercih edilmektedir (Bitzer, 1997; Thomas & Tiwari, 2019).



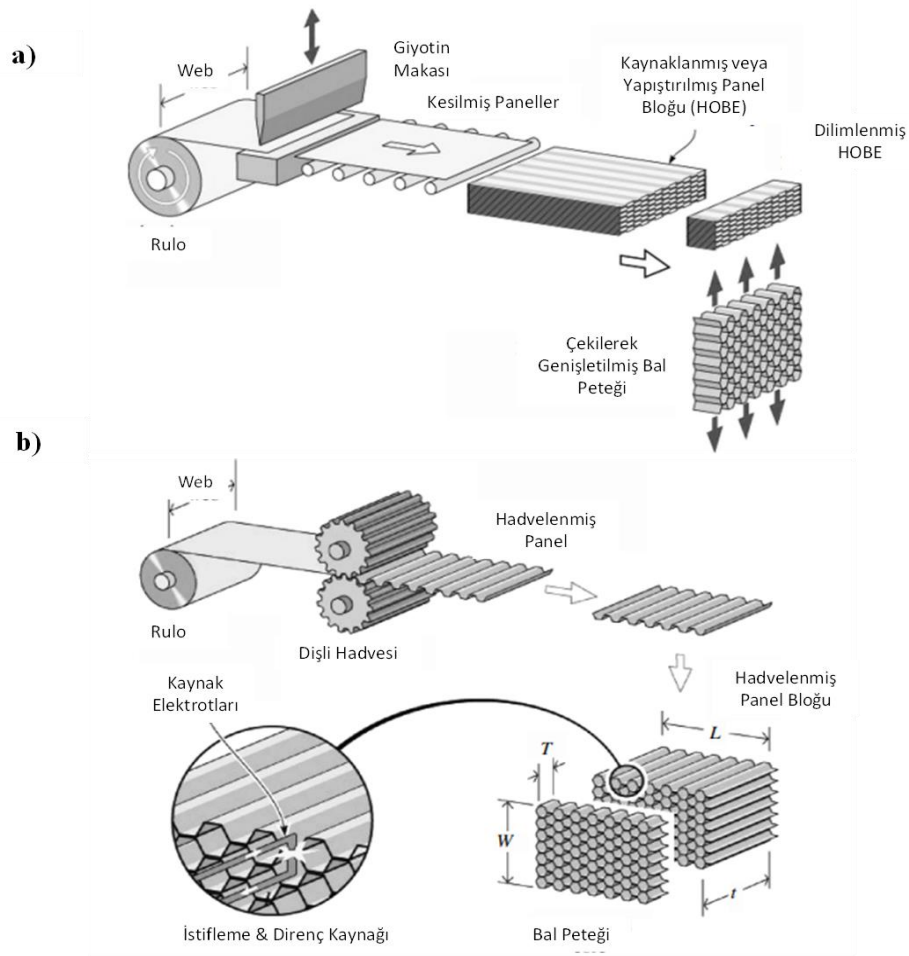
Şekil 1. 2. Bal peteği yapısı (Bitzer, 1997)

1.1.1. Alüminyum Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları

Metalik malzeme kullanılarak imal edilen bal peteği yapıların üretim metotları incelendiğinde, yöntemlerin birleştirme üzerine kurulduğu görülmüştür. Birleştirme işlemi, yapıştırma, lehimleme, difüzyon kaynağı, direnç kaynağı ve termal birleştirme metotları ile yapılabilmektedir. Yapıştırıcı ile birleştirme en verimli yöntem olup kitlesel ölçüde üretim bu şekilde yapılmaktadır. Lehimleme ve direnç kaynağı ile birleştirme, son ürünün yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak olması durumunda tercih edilmektedir (Bitzer, 1997).

Yapıştırıcıyla birleştirilen bal peteği yapılarında genişletme (expansion) ile üretim ve hadvelendirme (corrugation) ile üretim kullanılan tekniklerdendir. Bu iki teknik Şekil 1.3a ve b’de üretim akış şeması ile verilmiştir. Genişletme ile üretimde rulodan kesilerek hazırlanan paneller, belli aralıklarda yapıştırıcı uygulaması ile istenilen sayıda istiflenir ve basınçla birlikte yapıştırıcının (epoksi veya fenolik bazlı) kurlenmesi sağlanır. HOBE (**H**oneycomb **B**efore **E**xpansion) olarak da isimlendirilen bu blok, istenilen ölçülerde dilimlenir. HOBE yapısı el ile veya makine yardımı ile açılarak bal peteği örüntü yapılı

panel elde edilir. Hadve tekniğinde ise rulodan kesilen levhalar, dişlilerin arasında şekillendirilerek hadveli (oluklu) panel yapısı elde edilir. Bu aşamadan sonra hadveli panellerin temas eden kısımları yapıştırma veya kaynakla birleştirilir ve istenilen bal peteği kalınlığında dilimlenerek petek yapısı elde edilir. Hadve tekniği ile üretim, kalınlık değeri yüksek folyo kullanıldığında tercih edilmekte olup yüksek sıcaklığa maruz kalan kaynaklı bal peteği üretiminde de endüstriyel üretim açısından verimlidir (Thomas & Tiwari, 2019; Wadley, 2006).



Şekil 1. 3. Bal peteği üretimi a) Genişletme ile üretim b) Hadvelendirme ile üretim (Wadley, 2006)

1.1.2. Alüminyum Bal Peteği Yapılarının Mekanik Açından İncelenmesi

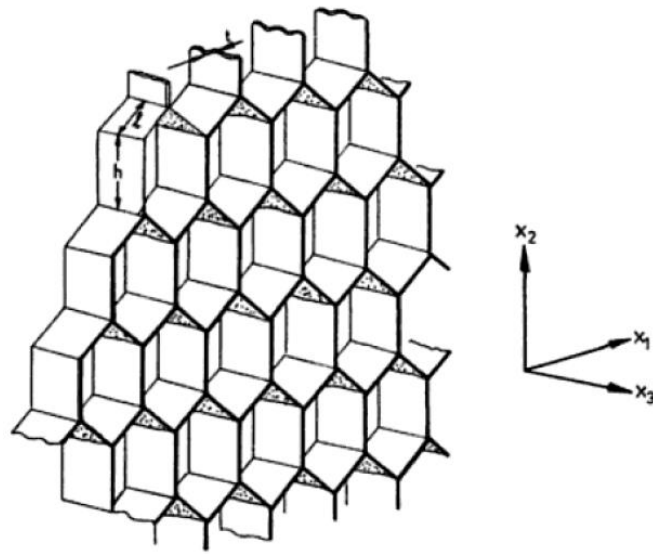
Bal peteği panel yapılar, aynı malzeme ve duvar kalınlığına sahip monolitik panellere oranla daha iyi darbe direncine sahiptir. Ayrıca basınç yüklerine köpük

yapılardan daha iyi dayanır. Hücre şekli, hücre boyutu ve hücre duvarı kalınlığı gibi çeşitli geometrik parametreler, yapının statik, dinamik şok, eğilme veya kesme yüklemesi gibi farklı yükleme türleri altındaki performansını etkiler.

Rijit plakalar ile sandviç haline getirilmiş alüminyum bal peteği düşük maliyetli hafif yüzey elemanı olarak enerji absorblayıcı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bal peteği sandviç panel yapılar, birim ağırlığa oranla köpük sandviç yapılardan daha fazla yüksek darbe absorpsiyonu enerjisine sahiptir (G. Sun et al., 2021; Thomas & Tiwari, 2019). Alüminyum alaşımlarından üretilen petek yapılarda mekanik açıdan izlenen parametreler, genellikle ortalama ezilme kuvveti, ezilme verimliliği, strok verimliliği, spesifik enerji absorpsiyonu, birim ezilme uzunluğu başına absorbe edilen enerji ve toplam enerji absorpsiyonu şeklindedir. Bu parametreler, bir yapının hem quasi-statik hem de dinamik testlerde enerji absorbe etme kapasitesini değerlendirmek için mevcut çalışmalarda kullanılmıştır. Bununla birlikte, balistik limit ve delinme enerjisi gibi kavramlar, dinamik şartlarda mermiye karşı alüminyum bal peteği petek sandviç panelin performansını karakterize etmek için kullanılmıştır (Thomas & Tiwari, 2019).

1.1.2.1. Statik Şartlarda Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışı

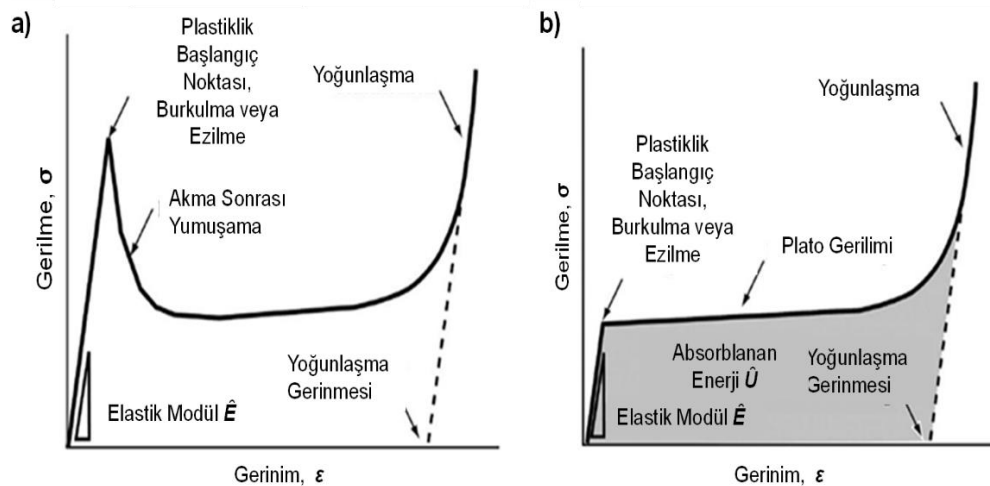
Alüminyum bal peteği sandviç yapılar, Şekil 1.4' te gösterildiği üzere düzlem dışı (X_3 doğrultusunda) ve düzlem içi (X_1 ve X_2 doğrultularında) yüklere maruz kalabilirler. Alüminyum bal peteği hücreleri düzlem içi doğrultularda basma testine tabi tutulursa, çekirdek bölümünde duvarlar elastik bir deformasyon göstererek bükülmeye başlar.



Şekil 1. 4. Bal peteği hücreleri ve yük maruziyet doğrultuları (X_1 ve X_2 düzlem içi, X_3 düzlem dışı) (Gibson & Ashby, 1997)

Kritik gerinim sonrasında hücreler ortam şartlarına bağlı olmak kaydı ile elastik burkulma, plastik akma, sürünme ya da gevrek kırılma gösterebilir. Düzlem içi doğrultularda basma esnasında oluşan çökme, karşılıklı duvarların teması ile sona erer, ardından yapının yoğunluğu ile birlikte dayanımda artış meydana gelir. Düzlem dışı yüklemelerde bal peteği çekirdek yapıları düzlem içi gerilmelerden daha yüksek elastik modülüne ve çökme gerilmesine sahiptir (Gibson & Ashby, 1997).

Bal peteği yapılar, düzlem içi (X_1 ve X_2 doğrultularında) bası yüklerine maruz kaldıklarında eğilme-baskın davranış gösterirlerken düzlem dışı yüklemelerde (X_3 doğrultusunda) esneme-baskın davranış gösterir (Habib et al., 2017; Yu et al., 2023). Eğilme-baskın yapılarda, gerilim-gerinim eğrisinde, akma sonrası yumuşama gözlenmezken esneme-baskın yapılarda azami dayanım noktasından sonra plastik bölgede akma sonrası yumuşama görülebilmektedir. Şekil 1.5'te bu durum, hücreli veya hücreli yapılar da izlenebilecek bir durumdur (Ashby, 2006; Zhong et al., 2023).



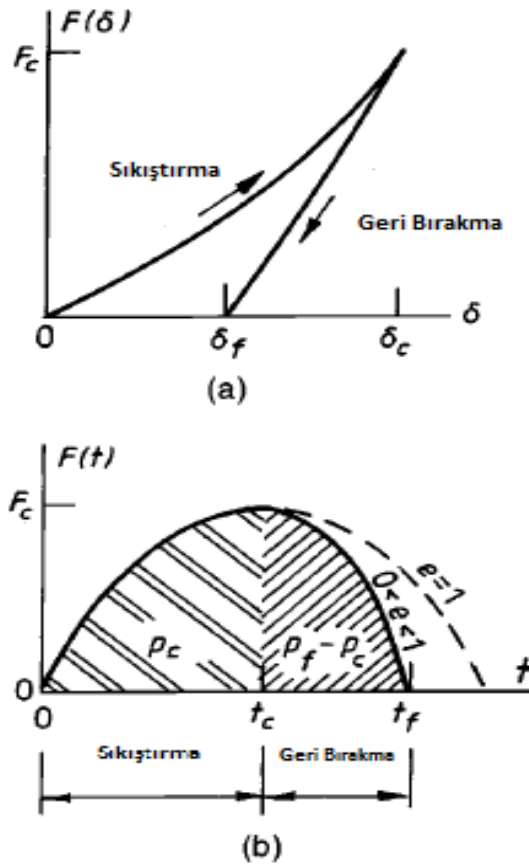
Şekil 1.5. Hücreli veya hücreli yapılarda akma sonrası yumuşama gösteren malzemelerde basma yükleri altında gerilim-gerinim davranışları a) esneme-baskın kafes yapıları, b) eğilme-baskın kafes yapıları (Zhong et al., 2023)

1.1.2.2. Düşük Hızlı Darbe Şartlarında Alüminyum Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışı

Malzemelerde darbe etkisi çok kısa sürelidir ve vurucu hızı 1 ila 10 m/s olan hızlardaki düşük hızlı darbelerde temas süresi milisaniyeler mertebesindedir. Malzemenin darbeye karşı olan cevabı ile meydana gelen hasarlar, kullanılan malzeme türü ile ilgilidir. Sandviç yapılar darbe yüklerinde kolay hasar alabilmektedir (Crupi et al., 2013). Meydana gelen hasarlar, gözle görülen veya neticesi malzemenin kullanımı ile birlikte ortaya

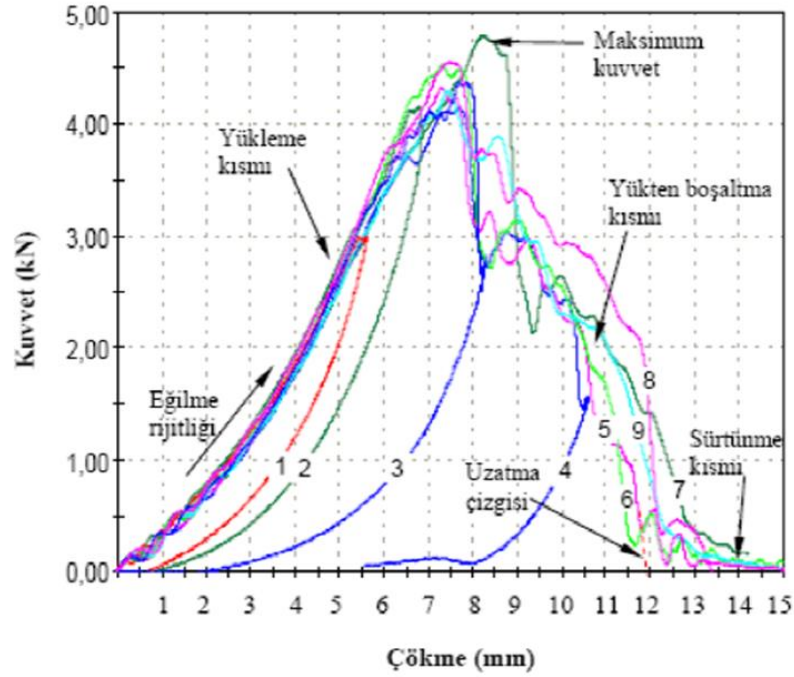
çıkabilecek görünür olmayan hasarlar şeklinde oluşabilir. Bu görünür hasar tipi ve görünmez hasar tipi, malzemenin mukavemet, sertlik ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu özelliklerde meydana gelen değişim sandviç panel yapılarında malzeme seçimi ve tasarım parametrelerini belirleyen faktörler niteliğindedir (Crupi et al., 2014).

Darbe süresince temas anından başlayarak azami deformasyon ya da tam penetrasyon olana kadar temas noktasında birbirine zıt iki kuvvet meydana gelir. Şekil 1.6a'da görüldüğü üzere kuvvet azami deformasyon sürecinde en yüksek değerine ulaşır. Süratin sıfır olduğu noktada kuvvet azalmaya başlar. Eğer penetrasyon meydana gelmemiş ise darbe sürecinde kuvvetin maksimum olduğu noktadan sonra cisimler, sıkışmanın da etkisi ile birbirinden belirli izafi hızlar ile ayrılır. Şekil 1.6b'de görüldüğü üzere kuvvet, kalıcı deformasyonun olduğu noktaya kadar bir azalma gösterir. Hedef malzemedeki elastik süreç tamamlandığında vurucu cisme kinetik enerjinin bir kısmı geri iade edilir (Stronge, 2018).



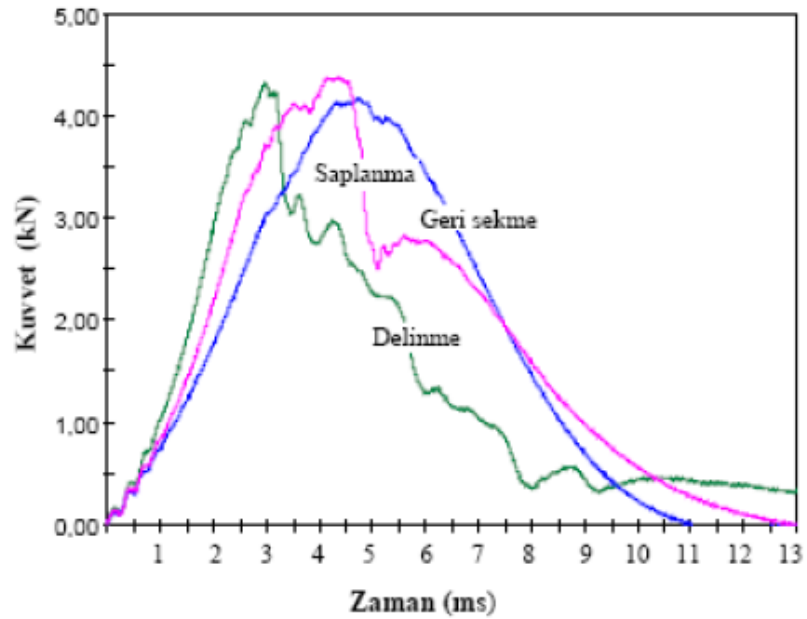
Şekil 1. 6. a) Normal F temas kuvvetine bağlı deformasyon miktarı b) temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi (Stronge, 2018)

Düşük hızlı darbe uygulamalarında farklı enerji seviyelerinde vurucu uç ile hedef malzeme arasındaki ilişki kuvvet-deplasman (F-d), kuvvet-zaman (F-t) ile birlikte hız-zaman (V-t) ve enerji-zaman (E-t) grafiklerinden tespit edilebilmektedir. Bu grafikler ile birlikte vurucunun geri sekme yanında saplanma ve delip geçme gibi iki özel durumu daha belirlenebilmektedir. Şekil 1.7’de verilen kuvvet-deplasman eğrilerinde 1,2,3,4 no’lu durumlarda vurucu belli bir deformasyon sonrasında numuneden geri sekerek darbe enerjisinin bir kısmını hedef malzemeye aktarmıştır. Bu eğrilerin altında kalan alan genişledikçe absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır. 5 no’lu durumda kuvvet-deplasman eğrisi açık bir forma gelmiş olup perforasyon meydana gelmiştir. 5 no’lu durum saplanma olarak kabul edilirse 6, 7, 8 ve 9 no’lu durumlarda delip geçme söz konusudur (Sayer, 2009).



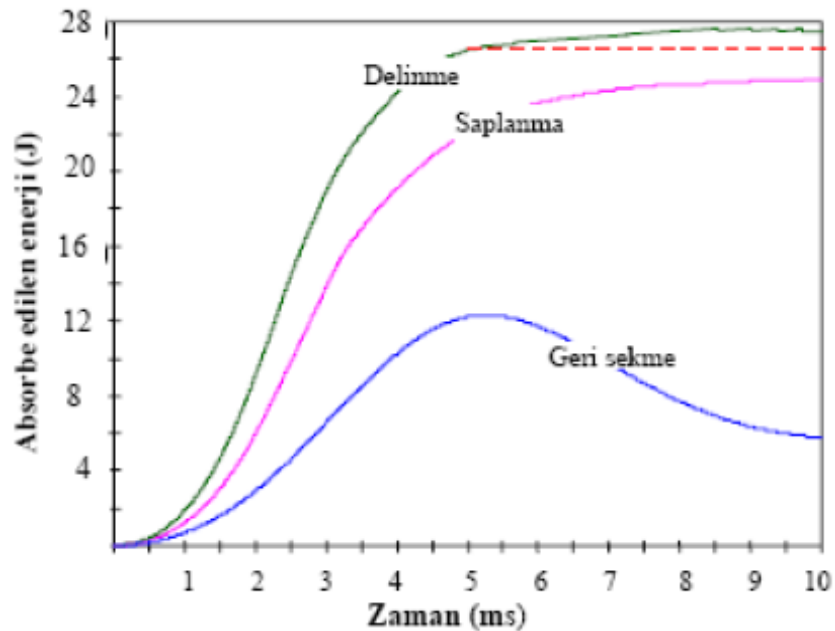
Şekil 1. 7. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki kuvvet-deplasman (çökme) (F-d) değişimi (Sayer, 2009)

Şekil 1.8’de verilen kuvvet-zaman (F-t) eğrilerinde vurucu ucun geri sekmesi durumunda eğri görünümü paraboliktir. Saplanma ve delinme eğrilerinde maksimum kuvvet değerinden sonra eğri simetrisi bozulmuştur. Delinme durumunda vurucu uç ile hedef malzeme arasında sürtünme olduğundan kuvvet değeri sıfırı göstermemiştir. Şekil 1.9’da verilen enerji-zaman (E-t) grafiğinde vurucu uçtan hedef malzemeye enerji aktarımı ile ilgili olarak üç özel durum da belirlenebilir.

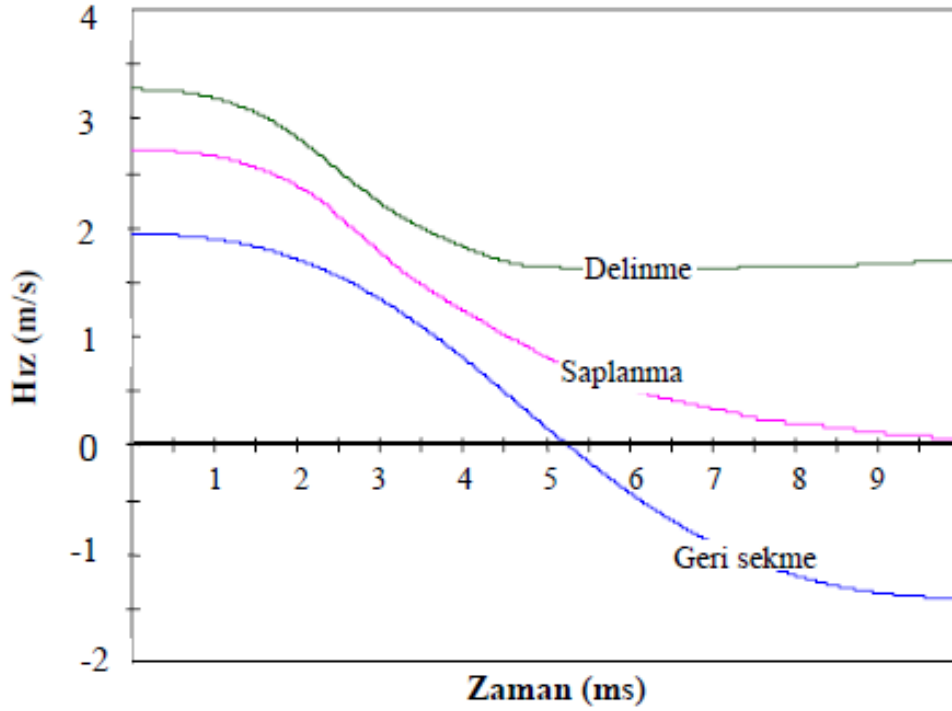


Şekil 1. 8. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki kuvvet-zaman (F-t) değişimi (Sayer, 2009)

Geri sekme durumunda kinetik enerjinin bir kısmı vurucu tertibata iade edilirken saplanmada enerjini tamamı, delinmede ise bir kısmı tüketilmiş olur. Şekil 1.10'da verilen hız-zaman (V-t) grafiğinde ise geri sekme durumunda hız vektörünün yönü ve büyüklüğü değişirken saplanma durumunda sıfırlanmış, delinmede ise hız yönü aynı kalmakla beraber şiddeti azalmıştır (Sayer, 2009).

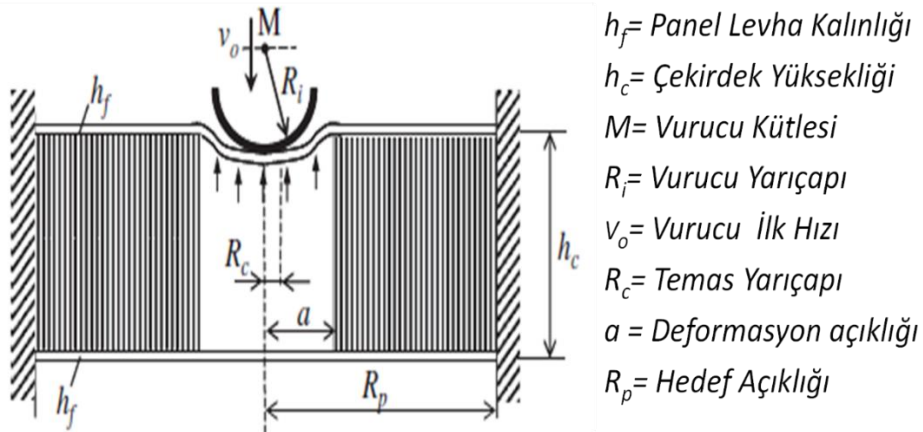


Şekil 1. 9. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki enerji-zaman (E-t) değişimi (Sayer, 2009)



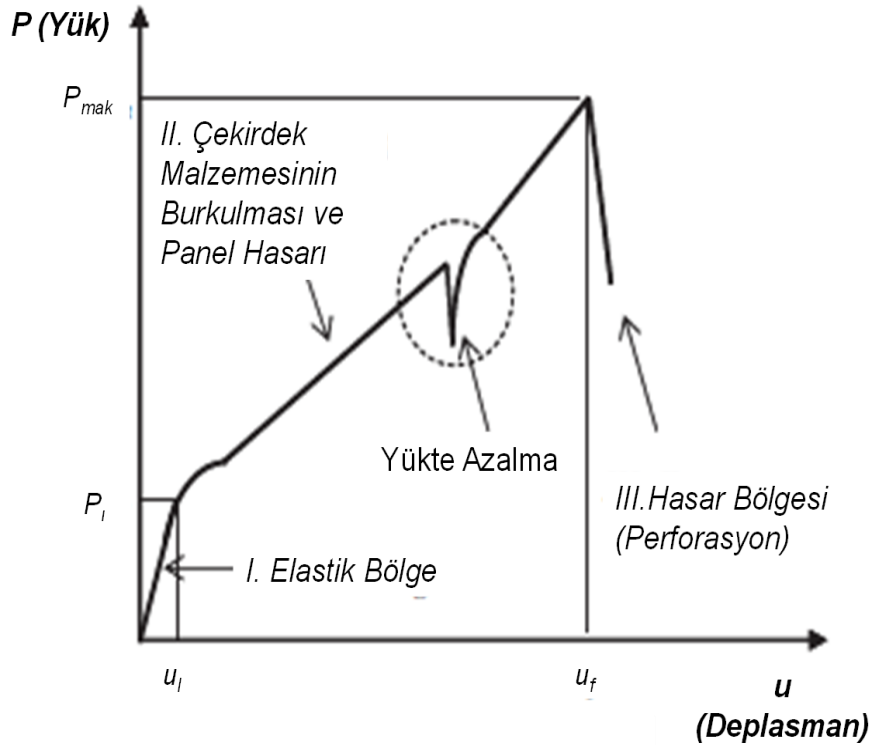
Şekil 1. 10. Artan enerji seviyelerine göre vurucunun üzerindeki Hız-zaman (V-t) değişimi (Sayer, 2009)

Düşük hızlı darbe çalışmalarında en çok kullanılan yaklaşım Şekil 1.11’de modellenmiştir. Bu modelde yarı küresel uç şeklinde pürüzsüz bir çarpma tertibatı kullanılmıştır. Küresel uçlu çarpma tertibatında temas noktasında gerilim yoğunlaşması meydana geldiğinden düz uçlu çarpma tertibatlarından daha ziyade araştırma konusu olmuştur (Zhou et al., 2007). Vurucu tertibatın ucunun çap değeri hasar modlarının oluşumunda etkin olup düşük çaplı durumlarda panellerde membran gerilmesi artarken, vurucu çapı arttıkça çekirdek kısmında ezilme, daha belirgin bir hasar modu olarak karşımıza çıkmaktadır (Raju et al., 2008).



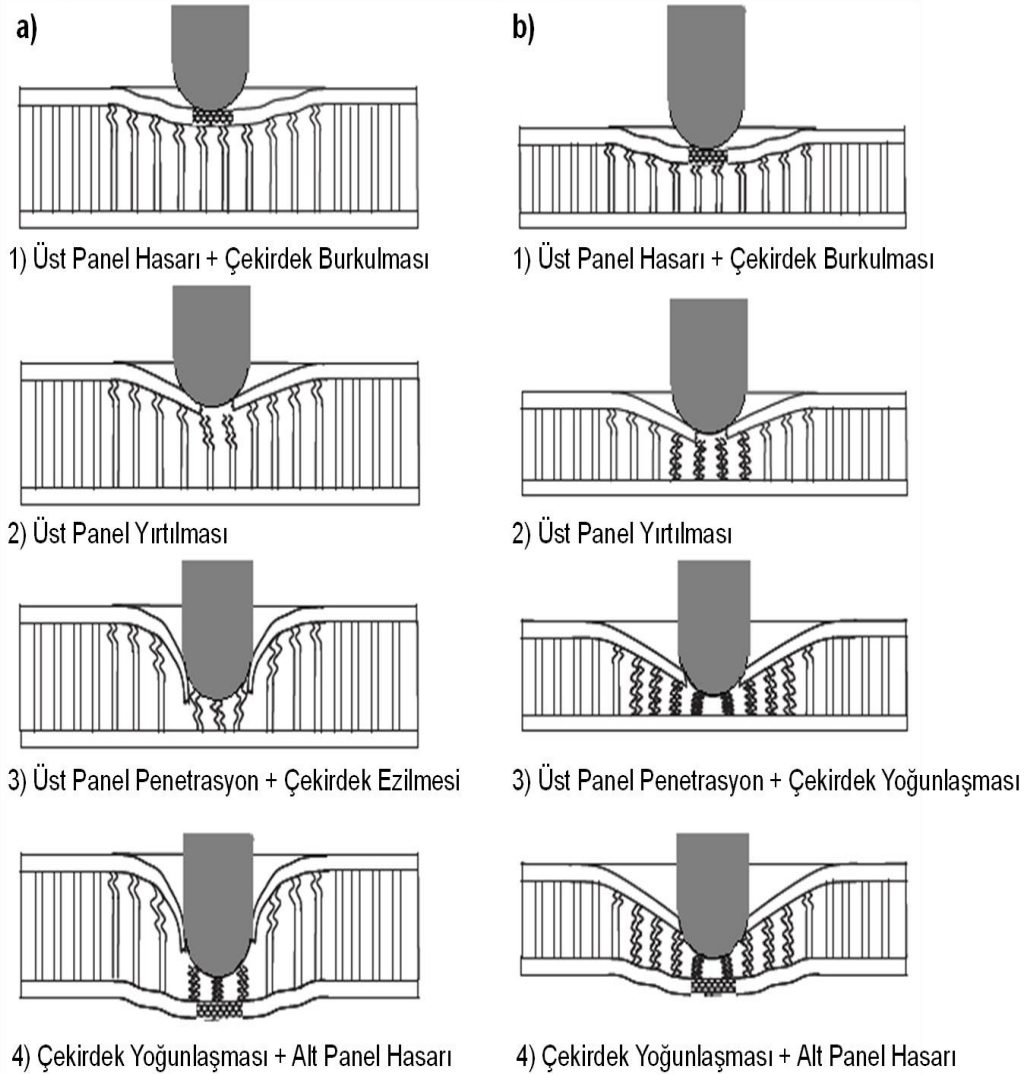
Şekil 1. 11. Sandviç panel yapıları için düşük hızlı darbe modeli (Chai & Zhu, 2011)

Sandviç yapılarda vurucu uç girintisi arttıkça enine gerilmelerde artış meydana gelmesiyle çekirdek yapısının davranışı kendini gösterir. Alüminyum bal peteği sandviç yapılarda düzlem dışı olarak uygulanan düşük hızlı darbe yükleri altında, darbe bölgesinde bal peteği şeklindeki çekirdek yapının duvarlarında burkulma hasarı meydana gelir (Abrate, 1997). Şekil 1.12’de verilen düşük hızlı darbe yükleri altında sandviç panellerde deplasman eğrisinde ilk aşamada panel ve çekirdek bileşenleri elastik bir davranış gösterir. Bu aşamada ortaya görünür bir hasar çıkmaz. İkinci aşamada ise yapı lineer olmayan plastik bir davranış sergiler. Çekirdek yapısında burkulma meydana gelir ve üst panel tabakasında bölgesel bir hasar belirgin bir şekilde oluşur. Üst paneldeki membran gerilmesi etkisi ile darbe kuvveti bir hayli yükselir. Bu süreçte yapısal çatlak oluşumu ile kuvvette azalma meydana gelir. Azami kuvvet değerine kadar kuvvet artışı devam eder. Maksimum yük değeri, ikinci aşamanın başladığı başlangıç yük değeri P_i değerinden çok büyüktür. Üçüncü aşamada üst levhada perforasyon meydana gelirse sandviç panelin yük taşıma kapasitesi hızlı bir şekilde düşer. Tam penetrasyon olmaz ise vurucu uç geride hasar bırakarak seker (Chai & Zhu, 2011).



Şekil 1. 12. Darbe yüküne maruz kalan kompozit sandviç panel için yük/deplasman eğrisinin aşamaları (Chai & Zhu, 2011)

Düşük hızlı darbe yüklerinin etkisi altında sandviç panellerde hasar gelişiminde etkin olan hasar modları, çekirdek kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Raju ve Smith tarafından yapılan bir çalışmada, çekirdek kalınlığının etkisi Şekil 1.13'de aşamaları ile verilmiştir. Kalınlık kıyasında çekirdek yoğunluğu belirleyicidir. İnce çekirdekli sandviç panellerin çekirdeğinde yoğunlaşma (konsolidasyon) gözlemlenirken kalın çekirdekli sandviç panel yapılarında üst panel hasarı ile birlikte çekirdek ezilmeye devam eder (Raju et al., 2008).

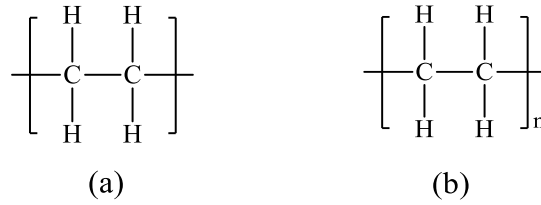


Şekil 1. 13. Bal peteği sandviç yapılarda hasar gelişim mekanizmaları a) kalın çekirdekli, b)ince çekirdekli (Raju et al., 2008)

1.2. Polimer Yapılar

Polimer terimi makro yapıdaki moleküllerden oluşan madde yapılarına verilen isimdir. Monomer olarak ifade edilen temel molekül yapıların kimyasal reaksiyon sonucu yapısal olarak tekrarlı birleşmesinden polimer yapılar elde edilir. Yapısal birim olan

monomer yapıları birbirlerine ağırlıklı olarak kovalent bağlar ile bağlanır. Şekil 1.14'te polietilen polimerin birim yapısı ve uzun zincir gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. 14. a) Polietilenin birim yapısı, b) polietilenin zincir gösterimi (A. Kumar & Virginia, 2003)

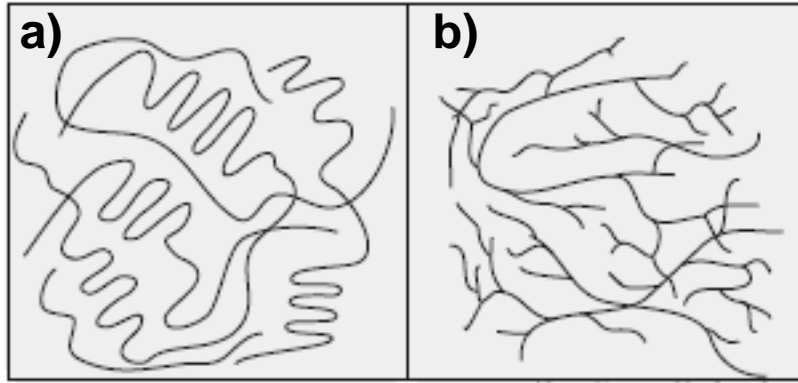
Başlangıçta kauçuk gibi doğal malzemeler polimer yapıları olarak kullanılsa da petrol endüstrisinin gelişmesi ile birçok alanda türevlendirilmiş ve farklı cevaplara ihtiyaç verebilir hale gelmiştir. Doğal kauçuk ile birlikte ipek, yün ve pamuk yaygın kullanılan doğal polimerlere örnek verilebilirken benzer şekilde günlük hayatta çokça karşımıza çıkan naylon ve akrilikler sentetik polimerlere birer örnektir. Polimerler mühendislik malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Elastik özellikleri, kolayca şekillendirilmeleri ve bazı polimer türlerin geri dönüştürülerek kullanılabilmesi gibi özellikler polimerlerin mühendislik çalışmalarında kendine geniş ölçüde yer bulmasını sağlamıştır (A. Kumar & Virginia, 2003).

Polimerler, ana zincir elementine, menşesine, sentezlenme biçimine ve moleküller arası dağılıma göre sınıflandırılabilir. Polimerler mekanik özellikleri açısından incelendiğinde moleküller arası kuvvetler çerçevesinde termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak belirgin üç başlık altında toplanabilir. Bu sınıflandırmada kimyasal yapı farklılığı aynı zamanda termal davranış ve işlenebilirlik açısından da belirleyici niteliktedir (A. Kumar & Virginia, 2003).

1.2.1. Termoplastikler

Termoplastikler polimer türleri içerisinde en yaygın kullanılanıdır. Moleküler yapısından ötürü tekrar ısıtılarak şekillendirilebilir niteliktedir. Yeniden şekillendirme uzun polimer zincir yapılarında bir hasar oluşmadığı sürece tekrarlanabilir. Spagetti yapısını andıran ve birbiri ile çok sık kesişmeyen polimer zincirleri ısının etkisiyle birbiri üzerinden kayabilir. Bu zincir yapısı, Şekil 1.15'te şematik olarak verilmiştir. Termoplastik polimer zincir yapıları ana zincir üzerinde farklı morfolojilerde uzun veya kısa dallanma

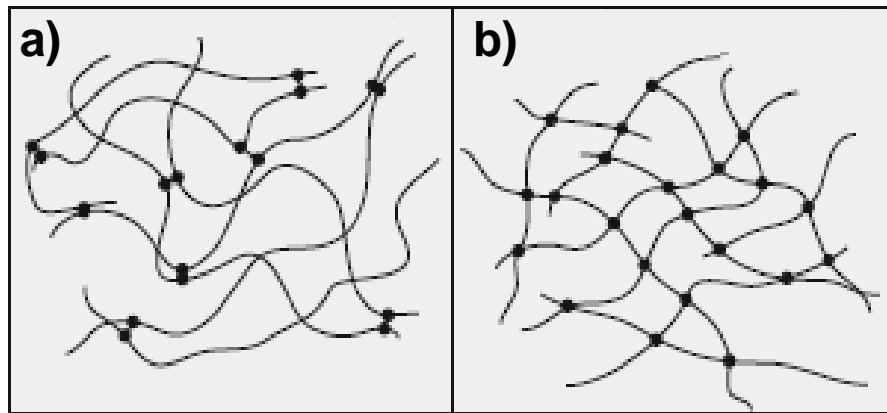
gösterebilir. Polietilen, polistiren ve polivinil klorür (PVC) en çok karşılaşılan termoplastik polimer yapılarına örnek verilebilir (Brinson & Brinson, 2015).



Şekil 1. 15. Termoplastik zincir yapıları a) doğrusal, b) dallanmış (Brinson & Brinson, 2015)

1.2.2. Termosetler

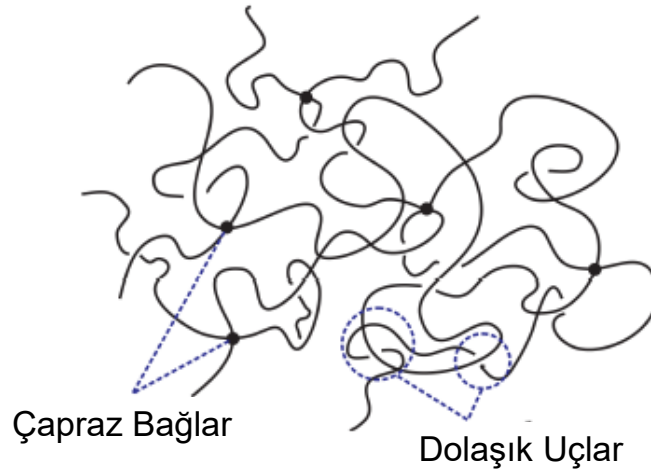
Termoset bileşenleri kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelirken uzun polimer zincirleri arasında çapraz bağ oluşur. Reaksiyon sırasında meydana gelen ısı, üç boyutlu bağ oluşumuna sebebiyet verir. Başlangıç madde veya karışımları bir kalıpta ısı ve basınç altında polimerleşme ile şekillendirme sonrasında tekrar ısıtma ile akışkan hale getirilerek termoset yapısı yeniden şekillendirilemez. Termoset reaksiyonların geri dönüşü mümkün değildir. Termoset polimerlerin zincir yapı şemaları Şekil 1.16'da şematik olarak gösterilmiştir. Zincirler arası çapraz bağlanma miktarı polimer başlangıç maddesi ve polimerleşme şartları ile değişebilmektedir. Melamin ve bakalit, günlük kullanımda en çok karşılaşılan termoset polimer yapılarıdır (Campo, 2008).



Şekil 1. 16. Termoset zincir yapıları a) düşük yoğunluklu çapraz bağlanma, b) yüksek yoğunluklu çapraz bağlanma (ağ yapısı) (Brinson & Brinson, 2015)

1.2.3. Elastomerler

Elastomer yapıları termoplastik polimer yapıları ile termoset yapıları arasında bir yere sahip olup iki yapının da özelliğini gösterir (Campo, 2008). Elastomerler yüksek esnekliğe sahip genellikle amorf yapıda polimerlerdir. Elastiklik özelliği elastomerlerde molekül zincirleri arasındaki oldukça zayıf Van Der Waals bağlarıyla açıklanabilir. Uzunluğunun en az iki katı kadar uzama gösterebilir ve gerilimin kaldırılmasıyla hızlı bir şekilde eski boyutuna dönerler. Şekil 1. 17'de verildiği üzere zayıf moleküller arası kuvvetle birlikte az miktarda zincirler arası çapraz bağlanmanın elastomerlerde elastik şekil değiştirme için bulunması beklenir. Ancak belirli bir miktardan daha fazla çapraz bağlanma elastik deformasyon miktarını sınırlayabilmektedir (Gent, 2019).



Şekil 1. 17. Elastomer zincir yapıları ve kısmi çapraz bağlar (Davidson & Goulbourne, 2017)

Elastomer yapıların moleküler düzenlenmesi çapraz bağlar göz önüne alındığında termoset polimer yapıların alt grubu olarak nitelendirilebilir. Bununla birlikte termoplastik ve termoset yapıların blok kopolimer yapıda düzenlendiği termoplastik elastomer yapılar da mevcuttur. Polistiren-poli bütadien (SBR), poliüretan ve polidimetil siloksan (PDMS) yaygın kullanılan elastomerlere örnek verilebilir (Brinson & Brinson, 2015).

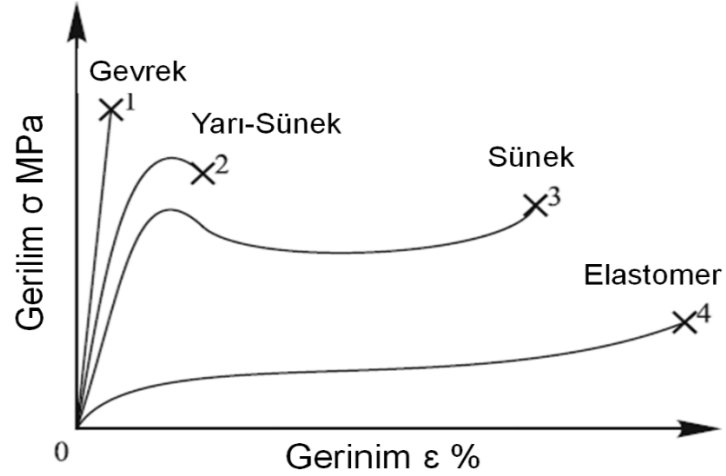
1.2.4. Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Polimer türü, molekül ağırlığı, kristallik oranı, polimer karışımları, kimyasal katkı maddeleri, renklendirici türü ve miktarı, darbe modifikatörü, dolgu maddeleri ve takviyeler polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini etkiler. Bu özellikler aynı zamanda polimer

malzeme üretim sürecinden, test protokollerinden, test tekniklerinden ve özellik değeri raporlamasından da etkilenir. Bileşenlerin çoğu farklı kalitede olduğundan polimer malzemelerin farklı özelliklere sahip olması muhtemeldir. Polimer matrisleri, mineraller, geri dönüşüm fiberler gibi çeşitli varyasyonlara sahip malzemeler içerebilir. Özellikle mineral maddeler, dolgu veya takviye edici katkıları olarak çeşitlilik gösterebilmektedir (Campo, 2008).

Her bir polimer malzeme belirli karakteristik özelliklerine ve ihtiyaca göre kendine uygulama alanı bulur. Mekanik özellikler malzeme seçim ve tasarımında önemli rol oynar (Brinson & Brinson, 2015; Campo, 2008).

Polimer yapılar için yapılabilecek quasi-statik şartlarda üniversal çekme testi malzemenin sünek-gevrek davranışını ve elastik gerinim miktarını belirleyebilmektedir. Şekil 1.18'de gerilim-gerinim eğrisi ile polimer türlerinin quasi-statik şartlardaki davranışı şematik olarak verilmiştir. Bu grafikte gevrek malzemeye epoksi, yarı sünek malzemeye polimetilmetakrilat, sünek malzemeye polikarbonat ve elastomere ise üretan örnek verilebilir (Brinson & Brinson, 2015).

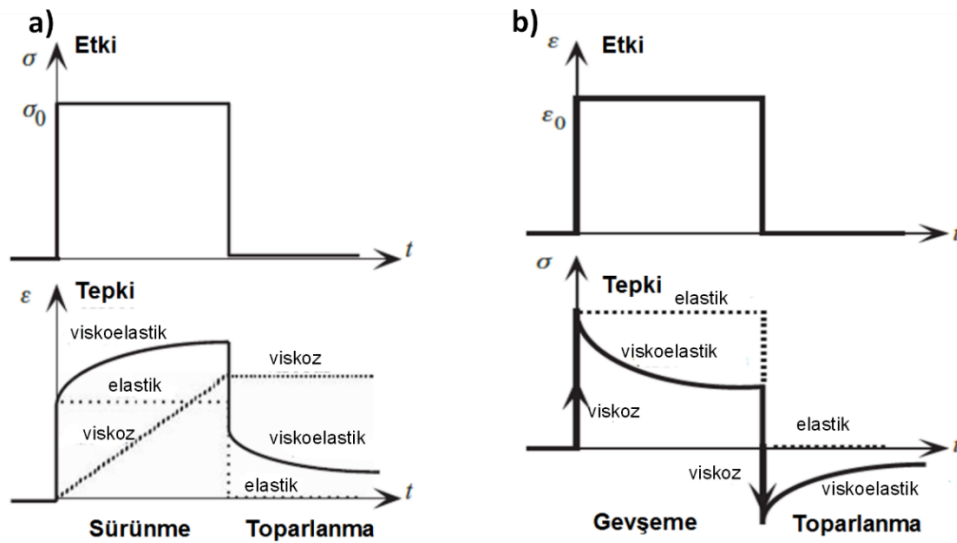


Şekil 1. 18. Farklı polimer gruplarının gerilim-gerinim davranışları (Brinson & Brinson, 2015)

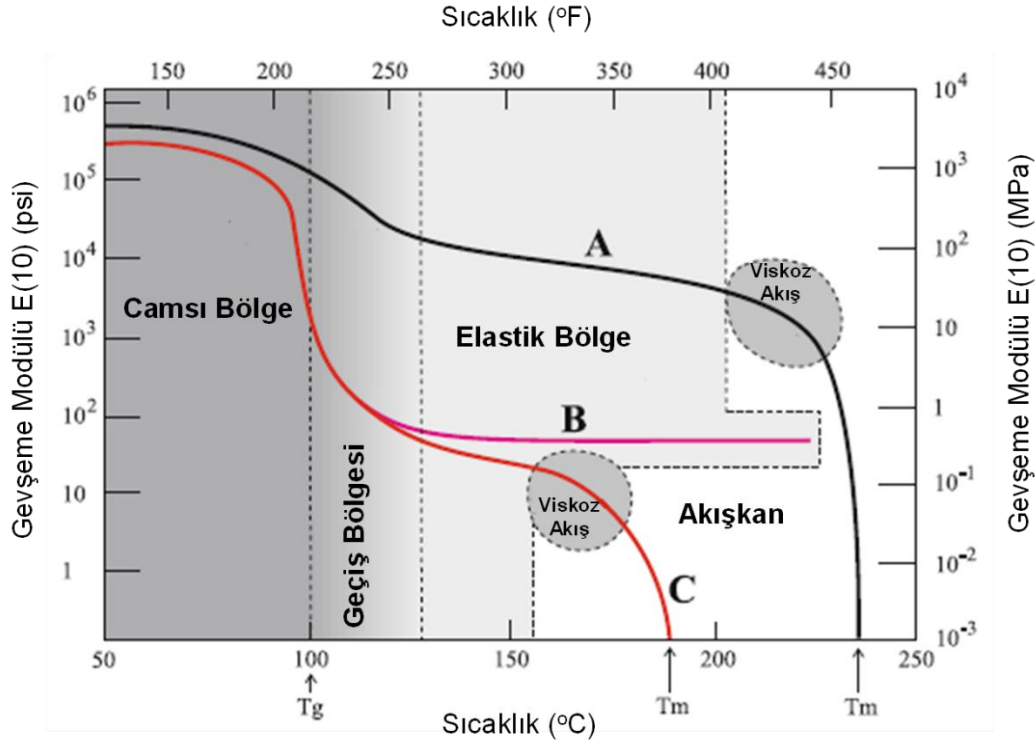
Sünek polimerlerin gerilim-gerinim davranışları incelendiğinde akma noktası belirgin bir nokta olmadığından farklı yaklaşımlar ile akma noktası belirlenebilir. Şekil 1.19'da verilen iç akma noktası ile orantısal limit noktası, yaygın olarak akma noktası kabul edilir. Bununla birlikte dış akma noktası da Considère tanımı ile gerinim değeri olarak $\epsilon = \frac{L}{l}$ olduğunu noktadan gerilim-gerim eğrisine tanjant çizerek belirlenebilir (O'Connell & McKenna, 2002).

viskoz bir akış sergileyerek üzerindeki gerilimin zamanla azalmasına olanak tanır (Brinson & Brinson, 2015). Viskoelastik davranış sürünme ve sürünme sonrası toparlanma testleri ile test belirlenebilir. Şekil 1.21'de elastik, viskoz ve viskoelastik malzemelerin sabit gerilim ve gerinim değerine karşı tepkisi ortaya konulmuştur. Yapılan sürünme testlerinde viskoelastik malzemeler sabit bir gerilim veya gerinim değerinde malzemedeki viskoz akışa bağlı kalıcı deformasyon miktarına kadar azalma gösterir (Lakes, 2009).

Viskoelastik davranış polimer yapının moleküler dinamik davranışı ile ilgilidir. Dinamik koşullar altında polimerlerin mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Dinamik mekanik analiz (DMA) yardımı ile zincir yapıdaki moleküllerin izafi hareketinin geniş ölçekte değerlendirilmesi mümkündür. Viskoelastik davranışlarının temelini de moleküler düzeydeki izafi hareketler oluşturur. Şekil 1.22'de farklı moleküler yapılara ait polistiren polimerin artan sıcaklık ile ilişkili olarak dinamik mekanik analiz ile elde edilen elastik davranış değişimi verilmiştir. Polimer yapıları doğrudan ergimediyğinden camsı geçiş sıcaklığından viskoz akış aralığında viskoelastik davranış sergiler (Brinson & Brinson, 2015).



Şekil 1. 21. Sürünme testlerinde elastik, viskoz ve viskoelastik davranış a) sabit gerilim, b) sabit gerinim (Lakes, 2009)



Şekil 1. 22. Farklı moleküler düzene sahip polistiren polimerin DMA analizi a) kristalin polistiren, b) düşük yoğunluklu çapraz bağlanmaya sahip polistiren, c) amorf polistiren (Brinson & Brinson, 2015)

1.2.6. Polimer Köpük Üretimi ve Polimer Köpüklerin Mekanik Özellikleri

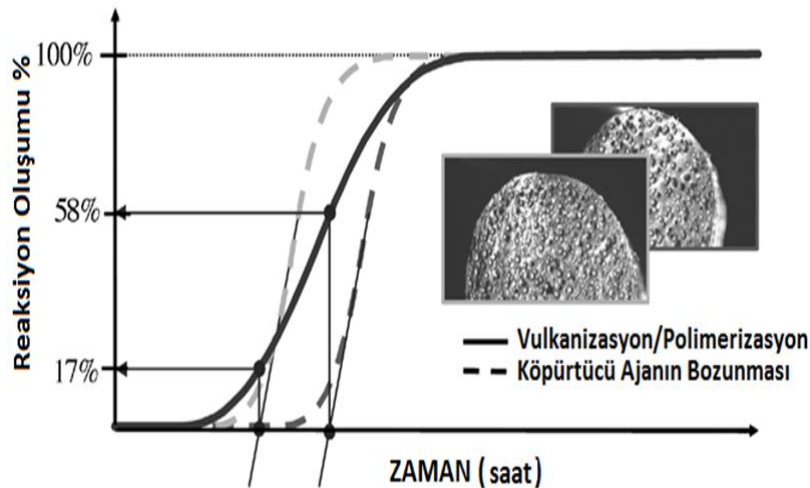
Köpük yapıda malzemelerin kullanımında yalıtım ve sönümleyici özellikleri ön plana çıkmaktadır. Eğer tasarım elverişli ise malzemenin köpük haline getirilerek kullanımı ağırlık azalması yönünden de bir kazanımdır. Polimer köpükler de endüstriyel kullanımda birçok uygulamada kendine önemli bir yer edinmiştir. Genellikle, düşük yoğunluk, birim ağırlık başına yüksek dayanım, iyi bir ısıl yalıtım ve iyi bir enerji sönümlene kabiliyetinden dolayı yapı panellerinin iç kısımları, ambalaj malzemeleri, mobilya ve yataklarda iç dolgu malzemeleri, otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Yaygın kullanımlara örnek vermek gerekirse poliüretan köpükler mobilyalarda, araba yastıklarında, spor aletlerinde ve yalıtımda tercih edilirken polipropilen köpükler taşımacılıkta ve havacılıkta termal dayanımı ve şok dayanımından dolayı tercih edilmektedir (Jin et al., 2019).

Polimer köpük malzemeler yoğunluklarına, sertlik değerlerine ve hücre yapısına göre sınıflandırılır. Polimer köpükler, 0.1 g/cm³ yoğunluktan düşük ise yüksek hücreli köpük, 0.1-0.4 g/cm³ arası orta hücreli köpük ve 0.4 g/cm³ yoğunluktan yüksek ise düşük hücreli köpük olarak kabul edilir. Sertlik değerine göre sınıflandırmada 68.6-686 MPa

elastik modülü değeri belirleyicidir. Bu iki değer arasında polimer köpükler orta sertlik değeri ile ifade edilirken 68.6 MPa değerinden küçük elastik modüle sahip polimer köpükler yumuşak, 686 MPa değerinden yüksek elastik modülüne sahip polimer köpükler sert olarak nitelendirilmektedir. Hücre morfolojisine göre sınıflandırma açık hücre ve kapalı hücreli şeklindedir. Açık hücreli yapılarda hücreler birbiri ile bağlantılı olup dış ortama açılabilir (Jin et al., 2019).

Polimerlerde köpürtme süreçleri mekanik, kimyasal ve fiziksel olmak üzere üç farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Mekanik olarak polimer yapısı hızlı karıştırma yöntemi ile fiziksel olarak ise hızlı gaz fazına geçen N_2 , CO_2 gibi bileşikler kullanılarak hazırlanabilmektedir. Kimyasal olarak polimer köpük üretimi, sıvı haldeki polimere katılan kimyasal köpürtme ajanının termal bozunması veya reaksiyon sonucu açığa gaz fazında ürün çıkması ile sağlanabilir. Kimyasal köpürtme ajanı olarak termal bozunma yöntemi ile azo, nitro ve alkil hidrazid yapılar kullanılmaktadır (Jin et al., 2019).

Polimerizasyon ve köpürtme eş zamanlı başlatılan bir reaksiyon olursa polimer yapıda farklı morfolojiler ortaya çıkabilmektedir. Polimer yapının kabuklaşmasıyla hücrelerin düzensiz dağılımını veya yetersiz hücre oluşumunu görmek mümkündür. Düzgün bir geometri ve homojen hücre dağılımı için uygun ısıtma metodu gereklidir. Şekil 1.23'de polimerizasyon reaksiyonu ile birlikte *in-situ* şartlarda yapılan köpürtme prosesi ve reaksiyon oluşum miktarı verilmiştir. Homojen bir yapının oluşması için polimerizasyon ve köpürtme reaksiyonları dengeli olmak durumundadır (Michaeli & Sitz, 2010).

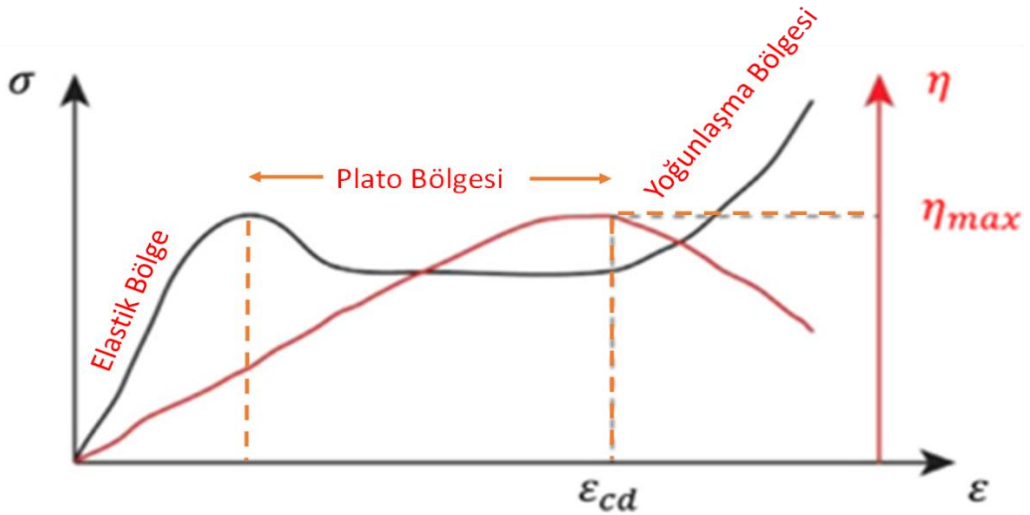


Şekil 1. 23. Kimyasal olarak köpürtülmüş kauçuk bileşiklerinin genleşme davranışı ve kürleşmesi (Michaeli & Sitz, 2010)

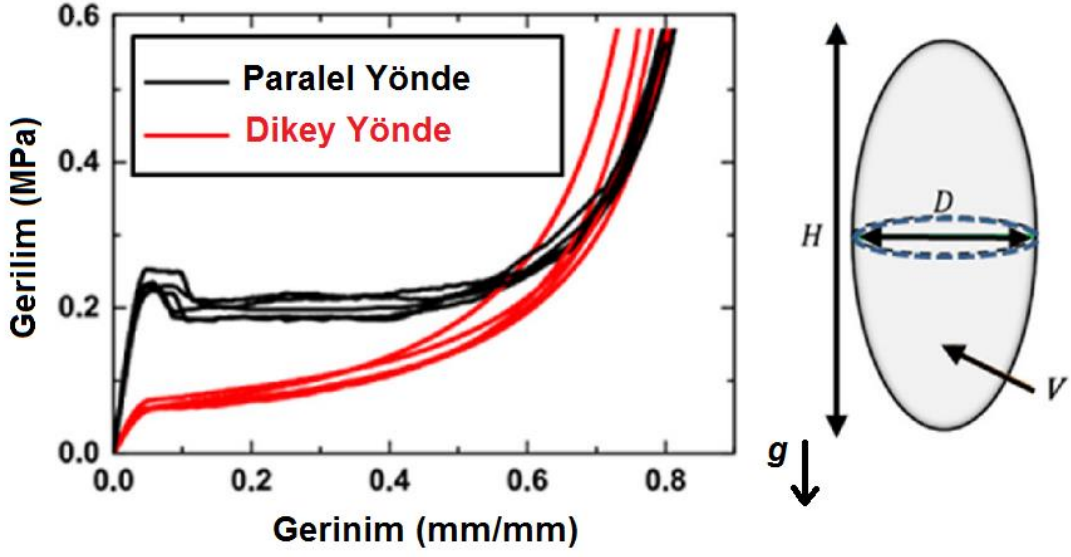
Polimer köpük yapılar quasi-statik basma şartlarında homojen etki göstermez. Basma esnasında oluşan delaminasyon bu geçişlerde kendini göstermektedir (Ramsteiner et al., 2001).

Polimer köpük malzemelerden mekanik açıdan istenen basma yüklerine karşı direnç ve yüksek enerji absorpsiyonudur. Köpük malzemelerin hücre morfolojisi (kapalı veya açık hücreli olma), hücre miktarı ile polimer malzemesi basma direncini etkileyen temel faktörlerdir. Polimer köpük malzeme Şekil 1.24’de gösterildiği gibi basma gerilimi altında bir miktar elastik davranış sergiler. Azami dayanım geriliminden sonra hücrelerin çökmeye başladığı bir plato gerilmesine erişilir. Polimer hücre yapıların çökmesi ile köpük yapı yoğunlaşmaya başlar ve gerilim değerinde hızlı bir artış meydana gelir. Basma gerilimi altında polimer köpükler için, uygulanan gerilim artışına karşılık gerinimdeki artış ile “enerji absorpsiyonu verimliliği (η)” belirlenebilir. Belirli bir noktadan (ϵ_{cd} =yoğunlaşma başlangıç gerinimi) sonra enerji absorpsiyonu miktarındaki artış azalmıştır.

Hücre şekli küresel değil hücre dağılımı da heterojen ise yapı anizotropik bir davranış gösterir. Hücre genişleme yönüne bağlı olarak yöne bağımlı bir davranış sergileyebilir. Gaz fazın polimer matris içerisinde dağıtımına bağlı olarak çoğunlukla yerçekimine etkisi ile gaz fazı, statik koşullarda yer çekimi ivmesine (g) paralel (H yüksekliği doğrultusunda) bir şekilde kolonsal şekil alabilir. Şekil 1.25’de genişlemeye paralel ve dik yönde anizotropik polimer köpük yapıların basma gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir (Rahimidehgolan & Altenhof, 2023).

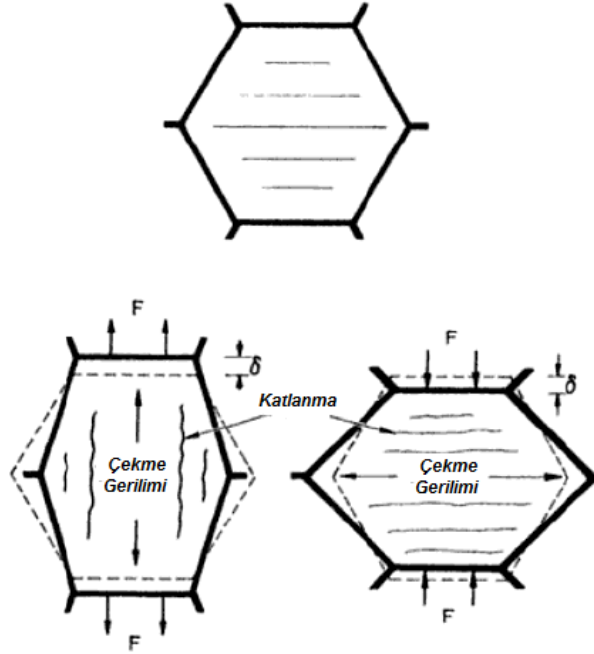


Şekil 1. 24. Polimer köpük basma davranışı ve enerji absorpsiyonu verimliliği (Rahimidehgolan & Altenhof, 2023)



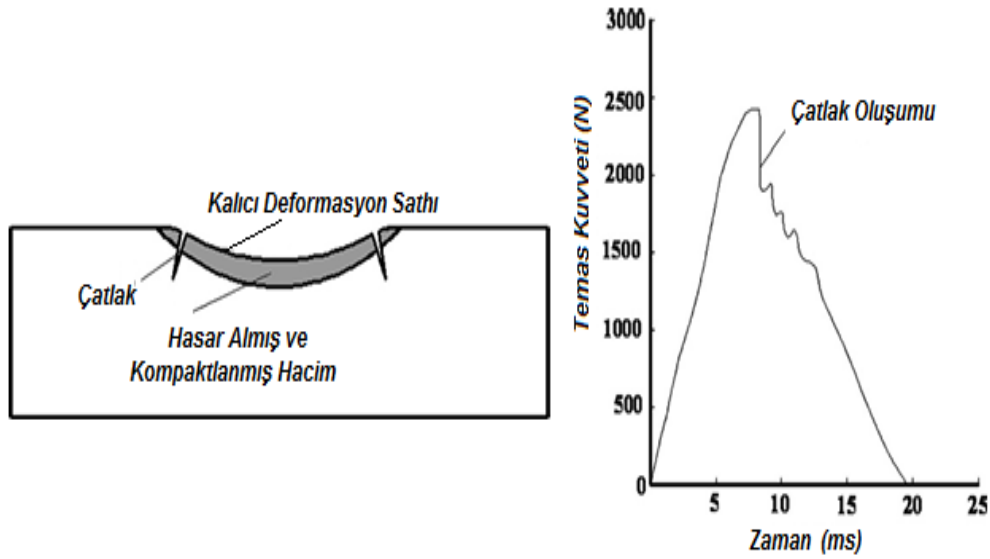
Şekil 1. 25. Anizotropik polimer köpük yapılarında hücre genişlemesine paralel ve dik yönde basma davranışı (Rahimidehgolan & Altenhof, 2023)

Kapalı hücreli köpük yapılarında basma mukavemeti aynı yoğunluktaki açık hücreli yapılara göre daha fazladır. Kapalı hücreli köpükte hücre belirli bir doğrultuda basma etkisi ile deformasyona uğrarken deformasyona dik doğrultuda da çekme gerilmesi oluşur. Şekil 1.26'de görüldüğü üzere ikincil olarak meydana gelen çekme gerilmesi kendisine dik yöndeki basma yükü ile oluşan deformasyonu azaltıcı etki gösterir (Lorna J. Gibson, 1999).



Şekil 1. 26. Kapalı hücreli hücrelerde basma ile oluşan çekme gerilmeleri (Lorna J. Gibson, 1999)

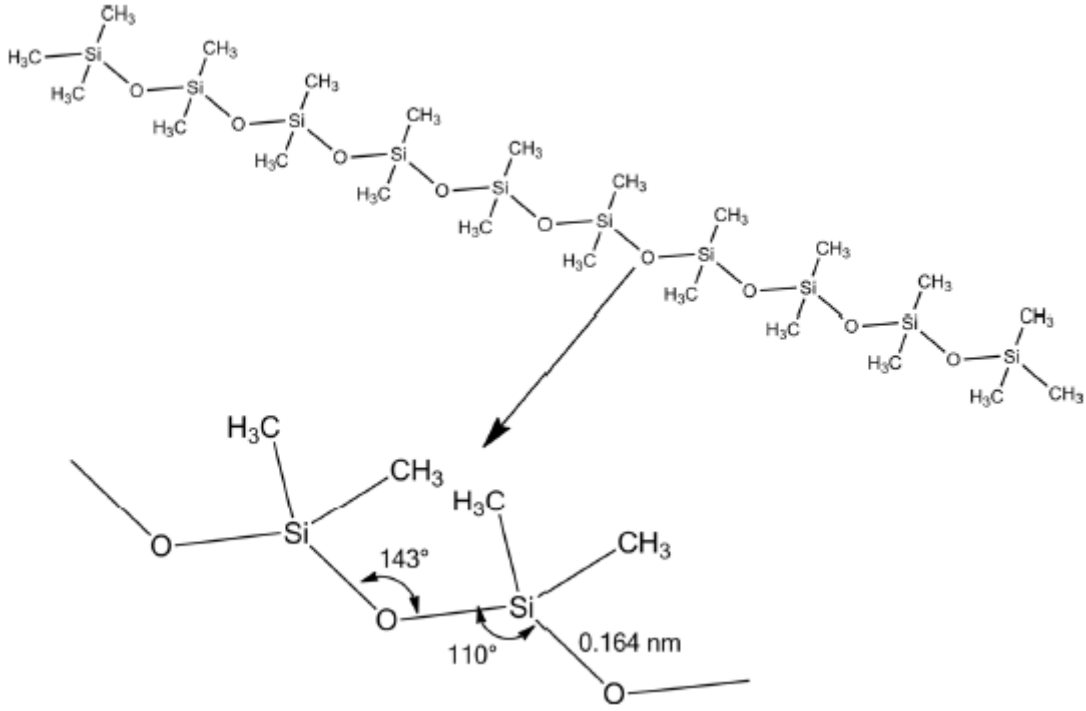
Polimer köpük yapılarında darbe yükleri altında hücreler burkularak katlanır ve yüksek oranda deformasyona uğrar. Bu süreçte polimer köpüğün yoğunluğuna ve türüne bağlı olarak kalıcı olarak bölgesel yoğunlaşma ve çatlak oluşumları gözlemlenir. Çatlak veya yırtılma oluşumları, deformasyon bölgesinde polimer yapının bölgesel olarak kopma dayanımını geçtiği noktalarda görülür. Bu noktada sinyalde temas kuvveti için ani bir düşüş kaydedilir. Darbe almış hasar bölgesi ve darbe esnasında kaydedilen temas kuvvetine ait grafik, Şekil 1.27’de verilmiştir (Rizov, 2007).



Şekil 1. 27. Polimer köpük yapılarında düşük hızlı darbe hasarı ve kaydedilen temas kuvveti-zaman grafiği (Rizov, 2007)

1.3. Silikon Esaslı Polidimetilsiloksan (PDMS) Polimer Yapılar

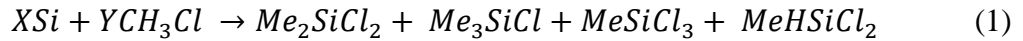
Silikon polimer yapılar ana zincir yapısında karbon atomu yerine silisyum yarı metali ve oksijen atomu bulunduran elastomer yapılardır. Şekil 1.28’da birim molekül yapısı verilen polidimetilsiloksan (PDMS), yarı inorganik yapıda bir polimerdir. İnorganik bir ana zincir olmasına rağmen bu ana zincire organik molekül olan “metil” (CH_3) yapıları bağlıdır. Ticari ismi PDMS olan polimer, siloksan, sıvı silikon, Dimetikon ve E900 adları ile de anılır. Camsı geçiş sıcaklığının $-125^{\circ}C$ gibi düşük bir değerde olması, karbon yerine silisyum esaslı ana zincir yapısıdır. Ayrıca ana zincir yapısının kırık bir yapıda olması, Si – O (1.63 Å) bağ uzunluğunun C – C (1.54 Å) bağ uzunluğundan fazla olması zincir yapısının daha esnek olmasını sağlamıştır (Fincan, 2015; Zeigler & Fearon, 1989).



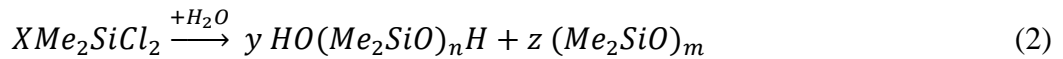
Şekil 1. 28. Polidimetilsiloksan birim molekül yapısı (González Calderón et al., 2020)

1.3.1. PDMS Polimer Üretimi ve Kullanımı

PDMS oda sıcaklığında çok düşük buhar basıncına sahip kokusuz bir sıvıdır. Silikon esaslı bu polimerin başlangıç ana maddesi metalurjik saflıkta SiO_2 tozudur. Metalurjik saflıktaki SiO_2 tozu, akışkan yatakta metil klorit buharı (CH_3Cl) ile 250-300 °C bakır katalizörlüğünde (1) no'lu denklemde verildiği üzere dimetildiklorosilane elde edilir (Shit & Shah, 2013).



Müller-Rochow Prosesi olarak adlandırılan bu reaksiyon %85-90 verimle gerçekleşir. Reaksiyonun yan ürünleri olarak farklı silan yapıları oluşur. Polimerleşmeyi sağlayabilecek olan dimetildiklorosilan bileşiği karışım içerisinde uzun destilasyonlar ile ayrılır. Dimetildiklorosilan bileşiği (2) no'lu denklemde verilen reaksiyonda verildiği gibi hidrolize edilerek ve yıkanarak oligomer yapıda dimetil siloksan elde edilir (Shit & Shah, 2013).



Oligomer yapıdaki moleküller asit veya baz varlığında uzun zincirli polimer yapılarına dönüşebilirler. Tepkimeler, kullanılan katalizöre ve miktarına göre katılma veya yoğunlaşma şeklinde meydana gelebilmektedir.

Silikon esaslı polimerler, organik yapıdaki diğer elastomer yapılara göre yüksek termal dayanım, kimyasal stabilite, elektrik yalıtımı, aşınma direnci, atmosferik şartlara dayanıklılık ve ozon direnci sergiler. Bu benzersiz özelliklerinden ötürü havacılıkta, askeri alanda, elektronik alanda ve biyolojik olarak stabil olduğu için medikal malzeme yapımında tercih edilir. Diğer polimer yapıların içerisine yüzey modifiye edici katkı maddesi olarak katılır. Alev geciktirici özelliği sebebiyle de birçok polimere ilavesi yapılır (Fincan, 2015; Pusztai, 2013; Shit & Shah, 2013).

1.3.2. PDMS Polimer Çeşitleri

Silikon polimerler, sıvı silikon kauçuklar (LSR) ve vulkanize olan polimerler olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Sıvı silikon yapıların yağlayıcı, cendere sistemlerinde mekanik iletim sıvısı ve ısı transfer sıvısı olarak kullanımı mevcuttur. Sıvı silikonlarda çapraz bağlanma mevcut değildir (Pusztai, 2013).

Elastomer yapıdaki polimer silikonlar vulkanizasyon süreçlerine göre adlandırılır. Tek bileşene sahip silikon polimerler kapalı tüp içerisinde hava ile teması kesilmiş şekilde paketlenmiştir. Bu polimer karışımı nem varlığında hızlı bir şekilde hidrolize olup atmosferik şartlarda vulkanizasyonu gerçekleştirir. Oda sıcaklığında vulkanize olan tek bileşenli polimer yapı RTV-1 (**R**oom **T**emperature **V**ulcanized-1) olarak isimlendirilen bu sınıf sağlık ve inşaat sektöründe sızdırmazlık elemanı olarak kullanımı mevcuttur (Pusztai, 2013).

Çapraz bağlanma biçimi oda sıcaklığında iki bileşenli olan silikon polimerler RTV-2 (**R**oom **T**emperature **V**ulcanized-2) iki bileşenin karıştırılması ile katılma veya yoğunlaşma reaksiyonları gösterirler. Bu bileşenlerden biri sıvı silikon polimer diğeri çapraz bağlanmayı sağlayan katalizördür. Karışım istenilen sonuç ürün ve belirlenmiş reçetelere göre verilen oranlarda yapılır. Medikal kullanıma uygun karışımlar ortopedik cerrahi süreçlerde, kalıp malzemesi olarak ve farklı ihtiyaçlara cevap veren dolgu malzemesi yapımında, elektronik yapıların koruma işlevinde kapsül elemanı olarak tercih edilir (Pusztai, 2013).

Yüksek sıcaklıkta vulkanize olan HTV (**H**igh **T**emperatute **V**ulcanized) silikon polimer yapılar ekstrüzyon yolu ile üretim ve kalıplama süreçlerinde mamul üretimi için

tercih edilir. HTV yapıları, uzun siloksan zincirleri ile düşük konsantrasyonda vinil grupları içerir (Pusztai, 2013).

1.3.3. Silikon Polimer Yapılarda Kürleme (Vulkanizasyon)

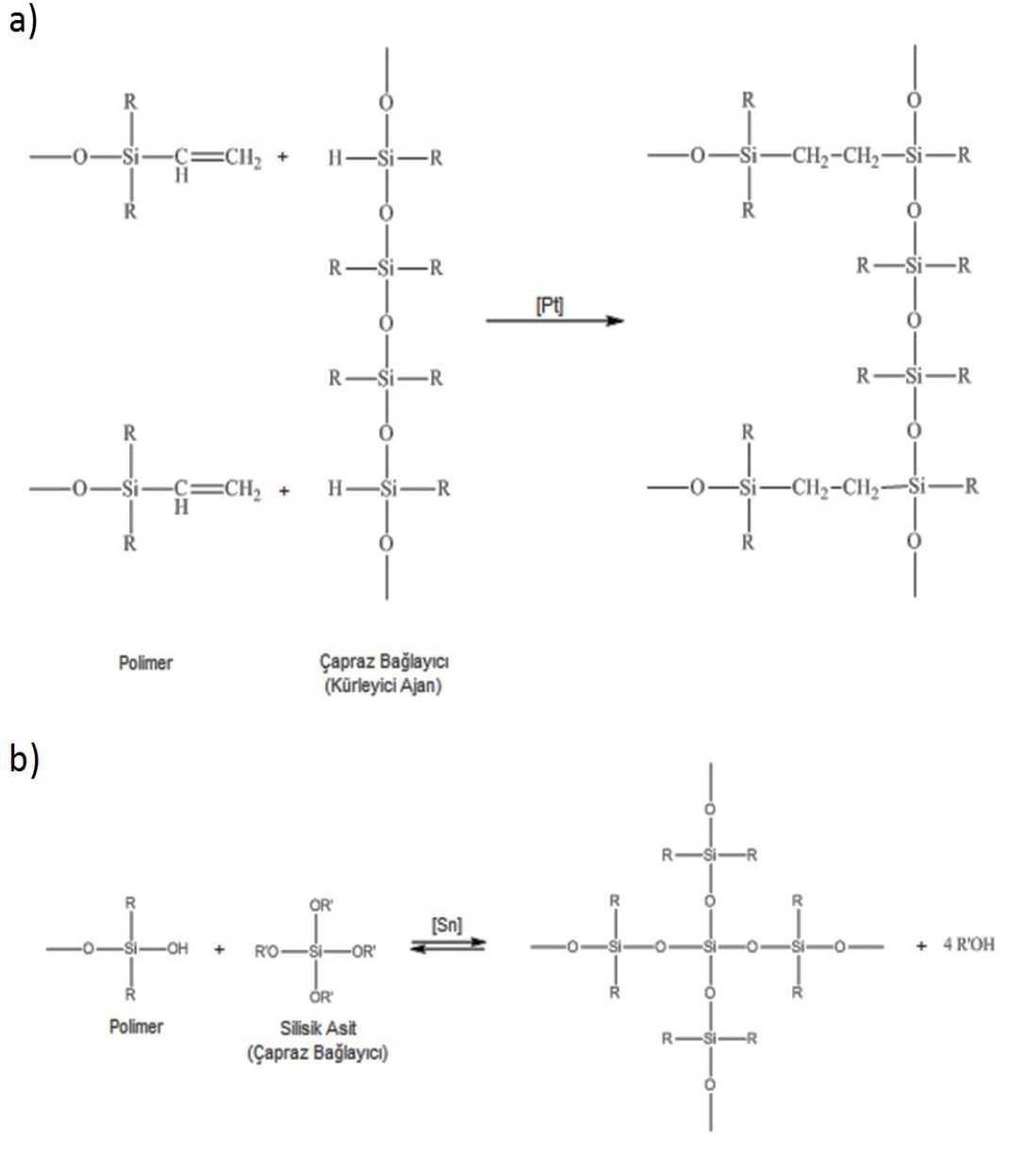
Silikon yapıların kürlenmesi işlemi uzun polimer zincirler arasında çapraz bağların oluşumunu ifade eder. Sıvı silikon yapılar, katalizör olarak peroksit içeren benzoil peroksit, 2,4-diklorobenzoil peroksit, *t*-bütil perbenzoat ve dikumil peroksit gibi bileşikler ile kürlenebilir. Vinil yapıları içeren silikon polimerleri, alkil içeren peroksitli katalizörler eşliğinde kürleme daha başarılı sonuçlar verebilmektedir. Bunun yanında vinil içeren silikon polimerler için platin içerikli katalizörler ile kürleme yapılabilmektedir. Literatürde katalizör kullanımı olarak zikredilenlerden başka spesifik çalıştırılabilir katalizörler arasında stearik asit, trifloroasetik asit, dibütilamin, tetra metilamonyum hidroksit, piperidin, kalay oktonoat, kalay risinoleat, kobalt hekzoat, zirkonyum asetoasetat, dibütiltin dilaureat, dioktiltin dimaleinat bileşikleri de bulunmaktadır (Shit & Shah, 2013; Thurlow, 1976).

Isıtma ile yapılan kürleme işlemlerinde yırtılma direnci daha yüksek ürün elde edilir. Kürleyici ajan ile hazırlanan karışımlar uzun raf ömrüne sahip değildir. Bu sebeple kullanma öncesinde hazırlanan karışımlara istenen form, bekletilmeden verilmelidir. Sıvı silikon kauçuklar, katalizörleri ile karıştırıldıktan sonra 200 °C 'de birkaç dakika bekletildikten sonra kürleme işlemi tamamlanır. Tek bileşenli RTV'de (RTV-1) sıvı silikon karışımı fonksiyonel bağlanmaya hazır olarak atmosferik nem ile çapraz bağ oluşumunu tetiklenerek kürleme meydana gelmektedir. İki bileşenli RTV'de (RTV-2) katalizör verilen reçete oranlarında sıvı silikon ile karıştırılır. Katalizör miktarı, ortam nemi ve sıcaklık kürlenme hızını etkileyen faktörlerdir. Sıcaklık, çapraz bağlanmayı artırırken, aşırı nem kürlenmeyi yavaşlatmaktadır. Katalizör miktarı kürlenme hızını artırmakta ve zincir yapısını etkileyerek artan miktarla birlikte doğrusal zincir yapısından halkasal bağlanmalara doğru evrilmektedir (Jurásková et al., 2020; Shit & Shah, 2013).

Kürleme olarak platin içerikli katalizörler kullanıldığında vinil uç bileşiği içeren PDMS ortamında katılma tepkimeleri meydana gelir. Platin katalizörler, reaksiyon sırasında zamanla yavaşlama özelliğinden (inhibasyon) ve pahalı olmasından ötürü kalay (Sn) içerikli katalizör kullanımı daha yaygındır. Kalay katalizörlüğünde alkoksisilan bağlayıcı varlığında kondensasyon reaksiyonları gerçekleşir. Ancak kalay

katalizörlüğünde uzun zincirler oluşumunun yanında kısa zincir bağlanmaları da meydana gelmektedir (Jurásková et al., 2020).

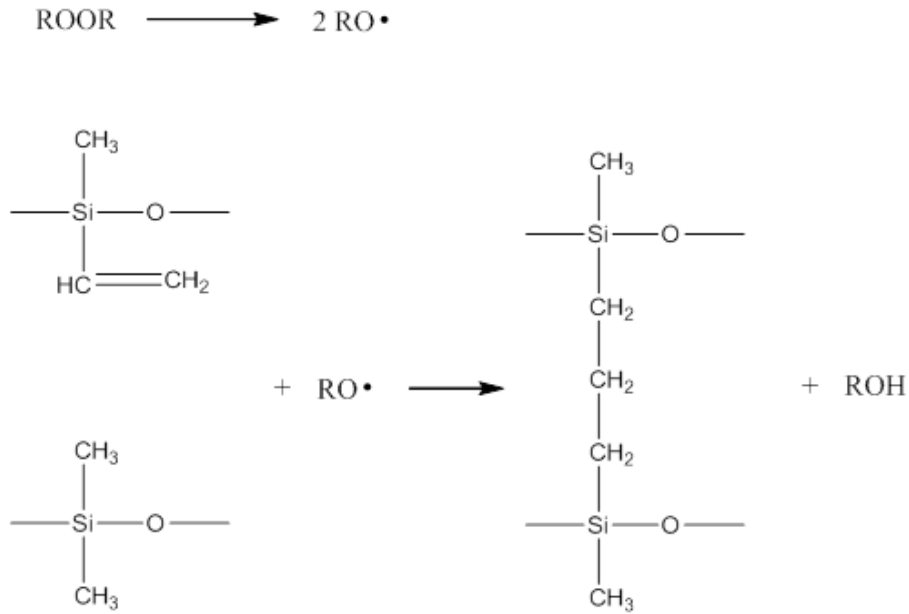
Şekil 1.29'da silikon esaslı RTV-2 polimer zincirlerin çapraz bağlanma reaksiyonları verilmiştir. Platin katalizör kullanımı katılma tepkimelerine yönelik iken kalay içeren organik yapılar yoğunlaşma tepkimeleri için kullanılır (Alexander Grolmuss, 2007).



Şekil 1. 29. RTV-2 polimerin kürlenme mekanizmaları a) katılma b) yoğunlaşma (Alexander Grolmuss, 2007)

Yüksek sıcaklık ile peroksit kullanılarak kürlenmiş silikon esaslı polimer yapıları olan HTV-2 polimerlerin kürlenmesi için yüksek sıcaklık veya radyasyon ile serbest radikallerin üretilmesi gereklidir. Şekil 1. 30'da HTV-2 silikon esaslı polimer zincirlerin

kürlenme mekanizmasına ait reaksiyonlar verilmiştir. Vinil grupları ilavesi ile vulkanizasyon, mekanik olarak daha üstün özelliklere sahip olabilmektedir (Alexander Grolmuss, 2007)



Şekil 1. 30. HTV-2 Polimerin peroksit ile kürlenme mekanizması (Alexander Grolmuss, 2007)

1.3.4. Silikon Polimerlere Yapılan Katkılar

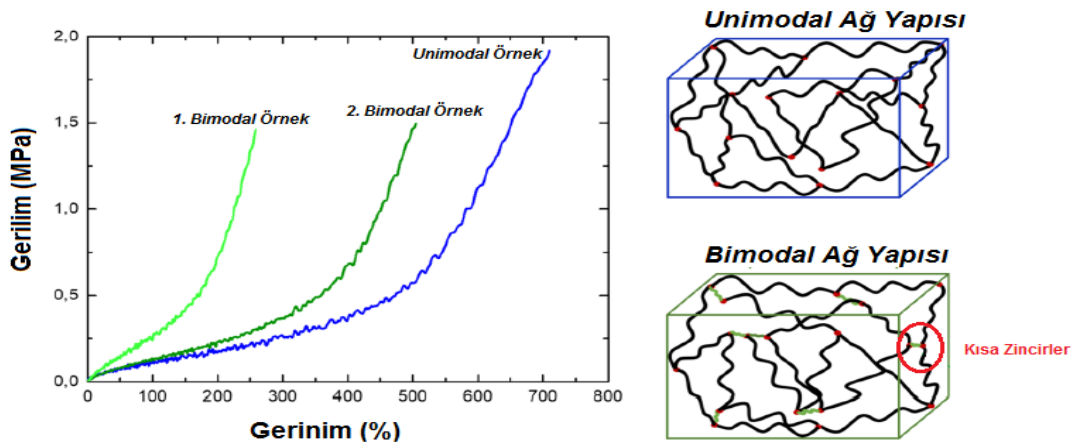
Silikon polimer yapılarına mekanik özelliklerini geliştirmek ve renklendirmek amacı ile katkı yapılmaktadır. Silikon polimerlere 10-40 nanometre boyutlarında “*fume silika*” ilavesi dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. SiO₂ polimerin ana zincir yapısında da bulunduğundan moleküler düzeyde uyum sağlar. Silikon polimer yapılarının alev dayanımı doğal kauçuk elastomere göre yüksektir. Karbon siyahı ilavesi ile silikon polimerlerin alev geciktirici özelliği daha ileri seviyelere çıkabilmektedir. Karbon siyahı ilavesi yanında alüminyum trihidrat ve çinko bileşikleri ilavesi ile de alev geciktirme özelliği artırılabilir. Karbon siyahı katkı yapıldığı birçok polimerde elektriksel iletkenliği artırmaktadır. Demir (II) oksit termal stabilite için, TiO₂ ve diğer organometalik bileşikler pigment olarak silikon polimerlere ilave edilmektedir (Shit & Shah, 2013).

Dolgu maddeleri karıştırma esnasında yalancı kürleşme ile aşırı viskoz bir davranış (sürünme sertleşmesi) sergilemesine sebep olur. Katkı maddelerin yanında kolay karışmayı sağlayabilmek için yalancı kürlemeyi elimine edebilecek ilave katkıları yapılabilmektedir (Liu et al., 2007; Shit & Shah, 2013).

1.3.5. Silikon Polimer Yapıların Mekanik Özellikleri

Polidimetil siloksan polimer zincirleri sarmal yapıda ve ana zincirde Si-O arasındaki elektronegatiflik farkı olduğundan moleküller arası etkileşim zayıftır. Zayıf etkileşim, silikon polimer yapılara yüksek elastikiyet ve sıkıştırılabilirlik sağlar. Yapıyı dolgu maddeleri ve çapraz bağlanmayı artırıcı ajanlar ile modifiye ederek dayanımı artırmak mümkündür. Dolayısı ile kürlenme süreci mekanik özellikler açısından son derece hassastır. Silikon polimerler oda sıcaklığında çok düşük basma dayanımı sergiler. Böylelikle kendi boylarının 2-3 katı kadar uzayabilirler. Shore A polimer sertlik ölçüm skalasında sertlik değeri 40-60 aralığındadır (Shit & Shah, 2013; Verheyen et al., 2017).

Silikon polimer yapıların kürlenme süreci, mekanik özellikler açısından son derece etkindir. Kullanılan katalizör ve silikon bileşiği çapraz bağlanmayı belirler. Söz konusu durumda platin içerikli katalizör bileşikler kullanıldığında homojen uzun zincirli bağlanmaların olduğu unimodal bağlanma biçimi ortaya çıkar. Kalay içeren katalizörler varlığında çapraz bağlanma sürecinde hem uzun hem de kısa zincir yapılar barındıran an bimodal yapı ortaya çıkar. Yapıda uzun zincirlerin yanında kısa zincirlerin varlığı daha yüksek elastik modülü ve daha düşük kopma gerilimine sebep olur. Bununla birlikte hem unimodal hem de bimodal ağ yapısına sahip silikon polimerler gerilim uygulandığında hasar oluşumu öncesinde gerinim sertleşmesi gösterir. Şekil 1.29'da unimodal ağ yapısı ile birlikte iki adet bimodal ağ yapısına sahip silikon polimer yapılara ait çekme gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir. Bimodal ağ yapısına sahip silikon polimer örneklerinde kısa zincir miktarı daha fazla olan örnek (1. Bimodal Örnek) diğer bimodal örneğe (2. Bimodal Örnek) göre daha yüksek elastik modülüne sahiptir (Jurásková et al., 2020; Verheyen et al., 2017)

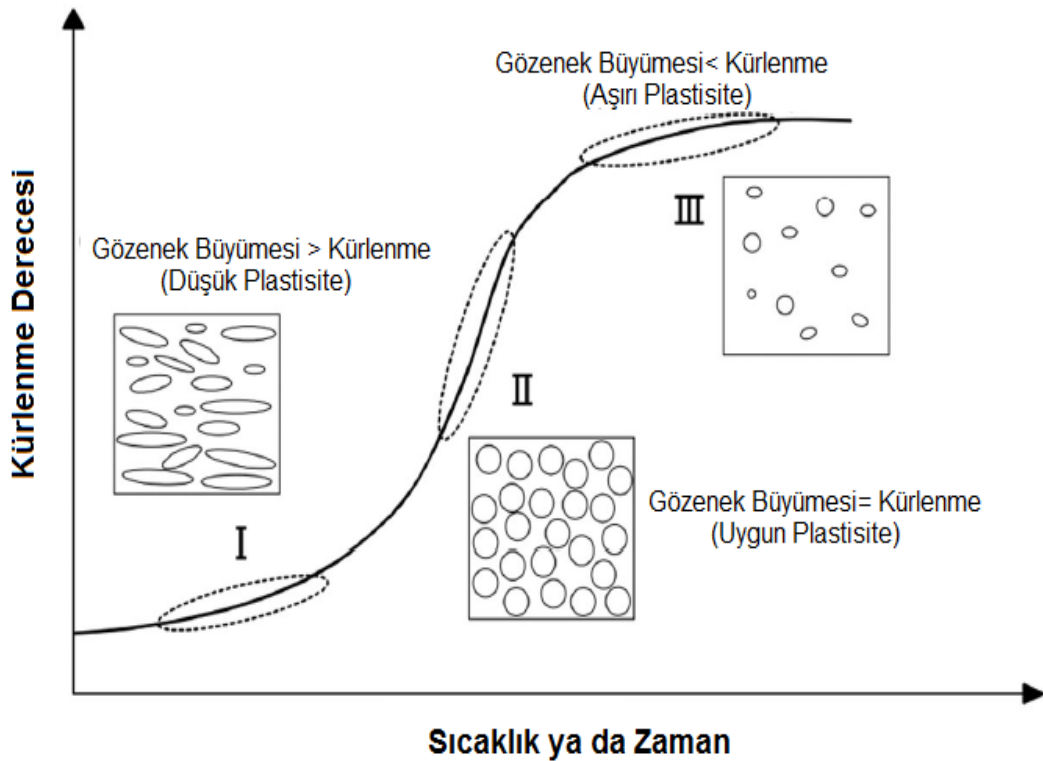


Şekil 1. 31. Unimodal ve bimodal ağ yapıların gerili-gerinim eğrileri (Jurásková et al., 2020)

1.3.6. Silikon Polimer Köpük Yapılar ve Kullanımı

Silikon polimer köpükler, mükemmel ısı-ses yalıtımı, düşük sıkıştırma, yüksek elastikiyet ve yüksek şok emici özelliklerinden ötürü spor koruma, mobilya, oyuncak, otomobil, yüksek hızlı tren, uçak ve füzelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Belirtilen bu geleneksel kullanımlarının yanında mekanik enerji toplama, akıllı tepki gibi teknolojik kullanımlarda da ön plana çıkmaktadır. Oda sıcaklığında kürlenmiş silikon polimer yapılarında köpürtme yöntemi olarak uçucu bileşikler veya diğer fiziksel köpürtme yöntemleri kullanılırken yüksek sıcaklıkta kürlenmiş silikon polimerler için ısı ile aktifleşen köpürtme ajanları uygundur (Lee et al., 1977; Zhai et al., 2022).

Kürleme (vulkanizasyon) ile birlikte köpürtme işlemi eş zamanlı olarak yapıyor ise hem köpürtme veriminde hem de mekanik özelliklerinde kayba sebep olmadan uygun koşullar sağlanmalıdır. Şekil 1.30'daki grafikte verildiği üzere hücrelerin aşırı ve dengesiz büyümesi mekanik özellikleri kötüleştireceği gibi hızlı bir kürlenmede de köpürme verimini düşürecektir (Zhai et al., 2022).



Şekil 1. 32. Kürlenme derecesine göre köpürme süreci (Shimbo et al., 2004)

Köpürtme işlemlerinde kimyasal köpürtücü ajan kullanımı geleneksel bir yöntemdir. Fiziksel ve mekanik köpürtme yöntemleri ile köpük üretiminde hücre boyut kontrolü daha kolaydır ve bu yöntemler çevresel etkiler bakımından daha temizdir. Ancak kimyasal köpürtme yöntemlerine nazaran kurulum maliyeti fiziksel ve mekanik köpürtme yöntemlerinin daha fazladır. Geleneksel yöntem olan kimyasal köpürme süreçleri bu açıdan caziptir. Kimyasal köpürtücü ajan olarak sodyum bikarbonat, p-toluensülfonil semikarbazid, 5-fenil tetrazol, 4,4-oksidibensensülfonil hidrazid (OBSH), dinitroso pentametilen tetramin (DPT) ve azodikarbonamid (AZD) bilinen kimyasallardandır (Charoeythornkhajhornchai et al., 2017; Zhai et al., 2022).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Roudbeneh ve arkadaşları (2019) tarafından farklı yoğunluk değerlerine sahip poliüretan köpük dolgulu alüminyum bal peteği yapılarına düzlem dışı doğrultuda balistik şartlarda enerji absorpsiyonunu incelemiştir. Bu çalışma neticesinde balistik test düzeneğinde 137 kg/m^3 yoğunluğa sahip polüren köpük ile doldurulmuş alüminyum bal peteği sandviç panelin spesifik enerji absorpsiyonu boş bal peteği sandviç panele göre %24 artış sağlamıştır (Hassanpour Roudbeneh et al., 2019).

Burlayenko ve Sadowski (2010) tarafından yapılan çalışmada, polivinil klorür (PVC) köpük ile doldurulmuş alüminyum bal peteği sandviç panellerin elastik davranışı nümerik olarak modellenmiştir. PVC köpük dolgunun boş alüminyum bal peteğine göre düzlem dışı doğrultuda %15- %24 arasında, düzlem içi doğrultuda %100 ila %130 arasında bir artış sağlayabileceği sonucuna varılmıştır (Burlayenko & Sadowski, 2010).

Thomas ve Tiwari (2019) tarafından yapılan derleme çalışmada alüminyum bal peteği yapıların düşük, orta ve yüksek hızlı darbe şartlarında enerji absorpsiyonu ile eğme davranışları incelenmiştir. Alüminyum bal peteği sandviç panel yapılarına uygulana yüklerin düzlem doğrultusuna, bal peteği geometrisine bağlı ve göreceli yoğunluğun etkili bir parametre olduğu sonucuna varmışlardır (Thomas & Tiwari, 2019).

Sun ve diğerlerinin (2021) alüminyum bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe dayanımı incelemiştir. Bu çalışmada penetrasyon süreci ve penetrasyon enerji eşiği ile enerji absorpsiyonu karakteristiği göz önüne alınmıştır. Alüminyum bal peteği sandviç panel parametrelerine göre düşük hızlı darbe yükleri altın iki tip hasar modu belirlenmiştir. Bölgesel penetrasyonun olduğu hasar durumu, yüksek yoğunluklu ve panel kalınlığı ince yapılarda görülürken, düşük yoğunluğa sahip ve kalın panel levha ile sandviçlenmiş versiyonlarda enerji absorpsiyonu belirli bir oranda sabit kalır ve levha eğilme davranışı hâkimdir (G. Sun et al., 2021).

Foo ve diğerleri (2007), alüminyum bal peteği sandviç paneller üzerinde düşük hızlı darbe davranışları ile ilgili yapmış oldukları deneysel ve nümerik analizler sonucunda absorbe edilen enerjinin sandviç panel çekirdek yoğunluğundan bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte yüksek yoğunluklu ve kalın folyoya sahip panellerin hasara karşı daha toleranslı olduğu belirtilmiştir (Foo et al., 2008).

Goldsmith ve Sakman (1992), alüminyum bal peteği ile ilgili olarak yapmış oldukları darbe yükleri altında dayanımı birim ezilme başına absorbe edilen enerji ile ilişkilendirmiştir. En avantajlı hasar modeli olarak perforasyon ile birlikte yüksek oranda

yoğunlaşma ile oluşan azami küresel deformasyon şekli olduğu sonucuna varmışlardır (Goldsmith & Sackmant, 1992).

Kim ve arkadaşları (2006) alüminyum bal peteği sandviçlerin düşük hızlı darbe yükleri altında yapmış olduğu çalışmada, vurucu ağırlığı, darbe hızı ve hücre genişliği parametre olarak değerlendirilmiştir. Vurucu ağırlığındaki artış ile hasar bölgesi genişlerken vurucu hızındaki artış dar bölgede hasarın yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Altıgen hücrelerin uzun kenarına gelen darbeler, karşı kısa kenara gelen darbelerden daha az hasara sebep olmuştur (Kim et al., 2006).

Belingardi ve diğerleri (2003) polimer köpük dolgulu cam elyafla güçlendirilmiş epoksi tabakalı sandviçlerin statik ve dinamik davranışları ile ilgili yapmış olduğu çalışmada kapalı hücreli polimer köpük yapının açık hücreli yapılara nazaran daha üstün dayanım sergilediği statik şartlarda gerilme hızının anlamlı bir etkisi olmadığı ortaya konulmuştur. Sandviç yapının polimer köpük çekirdek malzemesinin dayanımının birincil etkili parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Belingardi et al., 2003).

Barkoula ve diğerlerinin (2016) karbon fiber takviyeli ve cam fiber takviyeli alüminyum kompozit panel sandviç levhalara uygulanan düşük hızlı darbe davranışına ait çalışmada, cam fiber takviyeli alüminyum sandviç paneller ile karbon fiber takviyeli alüminyum sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Cam fiber takviyeli alüminyum sandviç paneller, darbe enerjisini plastik deformasyon ve delaminasyon ile absorblarken karbon fiber takviyeli alüminyum sandviç levhalarda perforasyon ile absorblandığı görülmüştür (Jaroslaw et al., 2016).

Herup ve Palazotto (1998) 4, 8, 16, 32 ve 48 katman sayılarına sahip grafit-epoksi karışımı tabakalar ile sandviç haline getirilen Nomex bal peteği çekirdeğine sahip yapının statik indentasyon ve düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında statik penetrasyon ve darbe yükleri altında ortaya çıkan hasar benzerlik göstermektedir. Ancak statik penetrasyon testlerinde hasarın başladığı kuvvet değerinin darbeye ortaya çıkan kuvvetlerden düşük olduğu görülmüştür. Bilhassa tabaka kalınlığı artığında statik penetrasyon ile darbe penetrasyon kuvvetleri arasındaki fark açılmıştır (Herup & Palazotto, 1998).

Saifullah vd. (2020) yılında yapmış olduğu çalışmada lineer yoğunluklu polietilen sandviç ve çekirdek malzemesi olarak köpük yapıda lineer yoğunluklu polietilen yapısının düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Çekirdek ve sandviç panel kalınlıkları parametre olarak değerlendirilmiş ve çekirdek kalınlığına nazaran panel kalınlığının

artırılması penetrasyon ve kırılma enerjilerini iki katından fazla oranda artırmıştır (Saifullah et al., 2020).

Hino ve diğerlerinin (2010) alüminyum bal peteği sandviç panel üzerinde quasi-statik şartlarda yapılan üç nokta eğme test sonrasında meydana gelen geri yaylanma etkisini incelemişlerdir. Çalışma bağlamında artan deformasyon miktarına karşılık geri yaylanma oranındaki artışın azaldığı gözlenmiştir. Bu artış oranındaki azalmanın kalıcı plastik deformasyon miktarından kaynaklandığı belirtilmiştir (Hino et al., 2010).

Solmaz ve arkadaşları (2010) tarafından alüminyum bal peteği sandviç panel yapısının poliüretan köpükle takviyesi sonucu basma yükleri altında bal peteği çekirdek yapısının hücre çeperlerinin burkulma dayanımı nümerik olarak araştırılmıştır. Çalışma neticesinde geniş hücre yapısına sahip bal peteği hücre duvar kalınlığı birincil etki parametre olduğu sonucuna varılırken, köpük dolgusunun burkulma dayanımını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Solmaz, Murat Yavuz; Şanlıtürk, 2010).

Mertani ve diğerlerinin (2018) yapmış olduğu çalışmada sandviç panel ile bütünleştirilmemiş alüminyum bal peteği çekirdeklerinin burkulma davranışı incelenmiştir. Hücre genişliğinin azalması ile ezilme kuvvetini artırmış ve numune yüksekliğindeki artış enerji emilim miktarını artırmıştır (Mertani et al., 2019).

Literatürde bal peteği yapıların quasi-statik şartlarda indentasyona karşı göstermiş olduğu davranış ile düşük hızlı darbe sürecinde bal peteği yapılarındaki sıkışma davranışları modellenenilmektedir. Yang ve Qiao (2008) yapmış olduğu alüminyum bal peteği sandviç yapıların quasi-statik şartlarda indentasyonu çalışmasında çökme gradyanı üzerinden hasar oluşum süresince meydana gelen üç yükleme bölgesi (başlangıç çekirdek akma kuvveti, genel geçiş kuvveti ve nihai hasar kuvveti) belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe ile ilişkili olarak vurucu kütleinin momentumundan kaynaklamayan basma ve plastisite etkisi ortaya konmuştur. (Yang & Qiao, 2008).

Zhang ve diğerlerinin (2019) yapmış olduğu genleştirilmiş polipropilen köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışında boş alüminyum pal peteği sandviç panellere oranla basma yükleri altında deformasyon miktarı azalmış ortalama basma mukavemetinde artış görülmüştür. Darbe yükleri altında dolgulu bal peteği sandviç yapılarda düşük hızlarda spesifik enerji absorpsiyonu (SEA) miktarı düşerken yüksek hızlarda spesifik enerji absorpsiyon (SEA) miktarı artış göstermiştir (Zhang et al., 2019a).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Materyaller

Tez çalışması kapsamında kullanılan sarf malzemeler ve analizleri verilmiştir.

3.1.1. Alüminyum Bal Peteği Sandviç Yapılar

Tez çalışmasında kullanılan 3005 H19 alaşımından üretilen alüminyum bal peteği çekirdek malzemeleri farklı yükseklik, hücre boyutu ve folyo kalınlığına sahiptir. Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnşaat Panel San. Tic. Ltd. Şti. şirketinden temin edilen malzemelere ait veriler Çizelge 3.x’de verilmiştir. Numuneleri sandviç panel haline getirmek için 1002 alüminyum alaşımından elde edilmiş olan 0,5 mm kalınlığında levhalar ve iki bileşenden oluşan poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır.

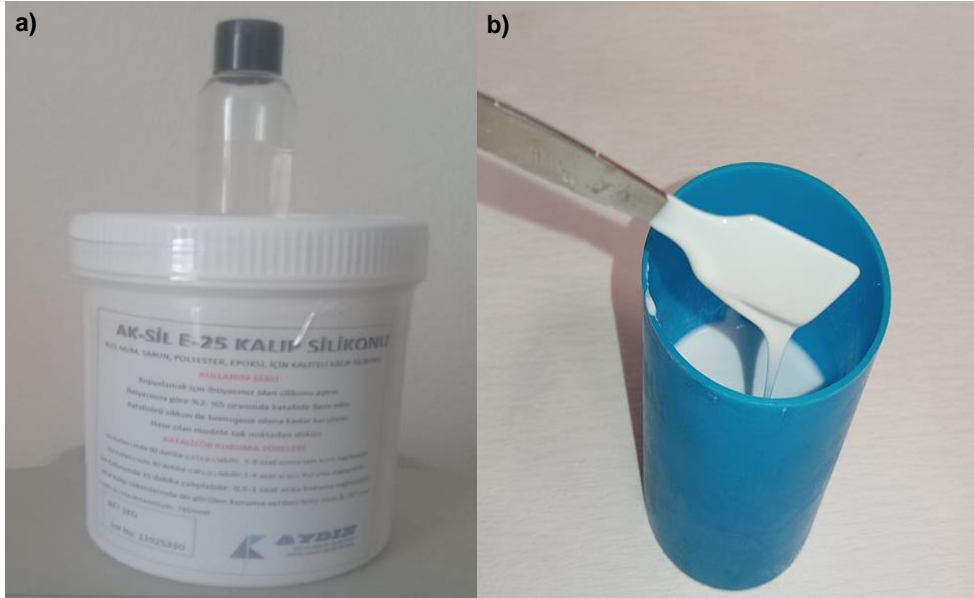
Çizelge 3. 1. Kullanılan alüminyum bal peteğine ait geometrik parametreler

Hücre Boyutu (mm)	Folyo Kalınlığı (µm)	Çekirdek Yüksekliği (mm)
5.2	50	4
5.2	50	8
5.2	50	12
5.2	70	4
5.2	70	8
5.2	70	12
8.66	50	4
8.66	50	8
8.66	50	12
8.66	70	4
8.66	70	8
8.66	70	12
10.39	50	4
10.39	50	8
10.39	50	12
10.39	70	4
10.39	70	8
10.39	70	12

3.1.2. RTV-2 Silikon Polimer

RTV-2 olarak isimlendirilen silikon esaslı polimer, oda sıcaklığında viskoelastik davranış sergiler. Silikon esaslı bu polimer yüksek şok emici özelliğe sahiptir ve -50 ila 300 °C arasındaki koşullarda kullanılabilir (Shit & Shah, 2013; Zhai et al., 2022).

RTV-2, oda sıcaklığında kürlenene iki bileşenli (**R**oom **T**emperature **V**ulcanized-2) PDMS polimeridir. Çalışma kapsamında kullanılan Şekil 3.1’de gösterilen RTV-2 Aydın Kompozit San. Tic. Ltd. tarafından Ak-Sil marka kalıp silikonudur. Firma bünyesinde E-5, E-10, E-15, E-20, E-25 ve E-50 kodlara sahip RTV-2 ürünler bulunmaktadır. Ürünlerdeki “E” kodu endüstriyel ölçekte kullanılan sınıfı ifade ederken kodlardaki sayı değerleri o kodlu polimer için kürlenme sonrası Shore A sertlik değerini ifade etmektedir. Ön çalışmalar neticesinde aynı firmadan temin edilen E-10, E-25 ve E-50 ile polimer köpük üretimleri yapılmış ve RTV-2 kalıp silikon malzemesi alüminyum bal peteği içerisinde “*in-situ*” şartlarda, köpürtülme ve kürlenme beraber yapıldığından köpük homojenizasyonu açısından en uygun sertlik skalasına sahip polimerin E-25 olduğu görülmüştür. RTV-2 E-25 kalıp silikonu, küreleştirici ajanı (Piperidin) ile beraber satılmaktadır. Ağırlıkça %2 küreleyici ajan ilavesi 90 dakikalık çalışma süresi sağlamakta ve bu süreden sonra akıcılık kaybolmaktadır. Kullanım kılavuzunda tavsiye edilen %2 küreleyici ajan ilavesi homojen köpürme süreci için olumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 3. 1. a) RTV-2 E-25 kalıp silikonu ve küreleyici ajan b) RTV-2 ve küreleyici ajan karışımı

3.1.3. Modifiye Edici Malzeme Seçimi ve Grafit

RTV-2 yapısını modifiye etmek ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacı ile farklı malzemeler modifiye edici olarak yapıya ilave edilmiştir. Literatürde en çok kullanılan modifiye edici olarak ağırlıkça % 10 oranında SiO₂ (CAS No: 7631-66-9), TiO₂ (CAS No: 13463-67-7), Al₂O₃ (EtiAlu 305) ve “döküm grafiti” katkı olarak denenmiş ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir (V. Kumar et al., 2021). SiO₂ (CAS No: 7631-66-9), TiO₂ (CAS No: 13463-67-7), Nanografi Nano Technology A.Ş. firmasından, Al₂O₃ (EtiAlu 305) Eti Alüminyum A. Ş. Firmasından temin edilmiştir. “Döküm grafiti” olarak kullanılan malzeme MRT Döküm Malzemeleri LTD. ŞTİ. firmasından temin edilmiştir. Shore F sertlik değerinde en çok artış sağlayan grafit tercih edilmiştir. Şekil 3.2’de gösterilen modifikasyonda kullanılan grafit, toz formunda ortalama 36 µm partikül boyutuna sahip ~% 80 safiyette metal döküm endüstrisinde kullanılan “döküm grafiti” olarak isimlendirilen grafit türüdür.



Şekil 3. 2. Modifikasyonda kullanılan “döküm grafiti”

PDMS köpüğün hazırlanma sürecinde kullanılan grafit partikül boyut yönünden 20 µm altı, 20-32 µm arası ve 50-100 µm arası olarak sarsak elekte eleme yöntemi ile sınıflandırılmıştır. Eleme işleminde kullanılan Retsch AS 200 marka model elek Şekil 3.3’te verilmiştir. Belirtilen aralıklardaki partikül boyut değerlerine sahip grafit tozları ile PDMS modifikatörü olarak kullanılmıştır. Harcı alem olarak kullanılan döküm grafitindeki safsızlıkların etkisinin belirlenebilmesi amacıyla Nanografi Nano Technology A.Ş. firmasından temin edilen %99.99 saflıkta ortalama 17 µm partikül boyutuna sahip grafit tozu (CAS: 7782-42-5) referans olarak alınmıştır. Referans numune haricinde, gramaj olarak fazla miktarda kullanımdan ötürü nispeten düşük saflıkta olan “döküm grafiti” kullanılmıştır. Grafit tozu, RTV-2’den elde edilecek köpük yapısını modifiye etmek ve

mekanik etkilere karşı daha direngen hale getirmek için kullanılmıştır. Ham “*döküm grafitinin*” elenmesi ile ayrılan grafit tozlarına, partikül boyut analizi, BET yüzey alanı ölçümü ve TGA analizi yapılmıştır. Grafit partiküllerinin morfolojisi HITACHI SU 1510 marka model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Partikül boyut ölçümü Cilas-1190 marka model cihazda alkolde disperse edilerek yaş metotla ölçülmüştür. Elenen tozların yüzey alanı ölçümü 4 saat vakum altında 80 °C’de kurutulduktan sonra Quantachrome – Quadrasorb Evo 4 marka model cihaz ile yapılmıştır. “*Döküm grafiti*” yakma sonrasında kalan külün XRF analizi yapılmıştır.



Şekil 3. 3. Eleme işleminde kullanılan Retsch AS 200 marka model elek

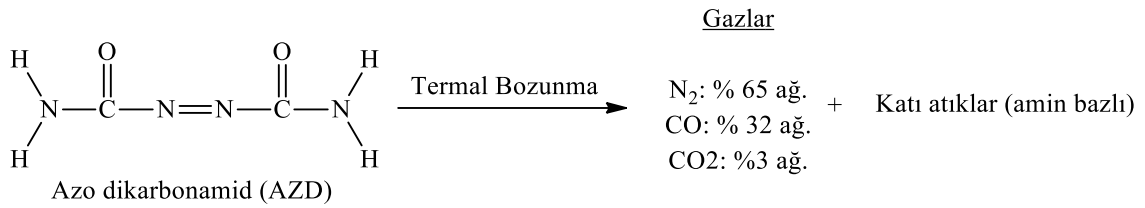
Mekanik özelliklerin geliştirilmesi için katkı yapılan grafit miktarı, kullanılan PDMS polimerin (kürleyici ajan hariç) ağırlığının % olarak 5, 10, 15, 20, 25, 30 kadarı ilave edilmiş ve uygun katkı oranı belirlenmiştir.

3.1.4. Azodikarbonamid (AZD)

Şekil 3.4’te verilen azodikarbonamid (AZD) kimyasal köpürtme ajanı olarak kullanılmıştır. Kauçuk esaslı malzemelerin köpürtülmesinde yaygın olarak kullanılır. Köpürme mekanizması olarak AZD, 200 °C civarında Şekil 3.5’de verilen reaksiyonda olduğu üzere termal bozunma göstererek azot, karbon monoksit ve karbondioksit gazları açığa çıkararak ani bir genişleme gösterir. Reaksiyon sonucunda oluşan amin bazlı yan ürünler kauçuk yapısının kürlenmesine katkıda bulunarak kürlenmiş köpük yapıdaki kauçuğun bulk yoğunluğunu artırmaktadır (Charoeythornkhajhornchai et al., 2017).



Şekil 3. 4. Köpürtme ajanı olarak kullanılan AZD

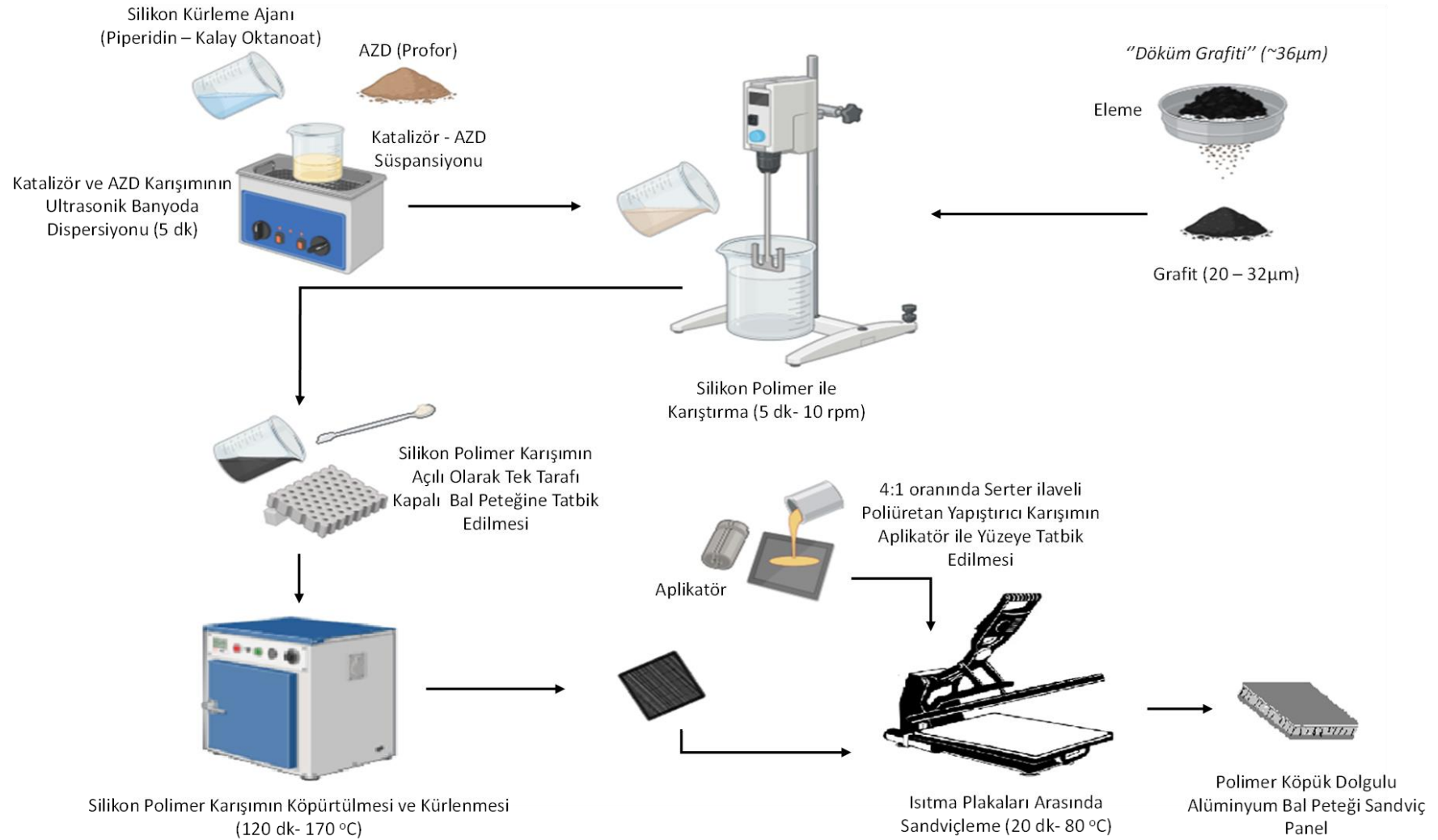


Şekil 3. 5. Azo dikarbonamidin termal bozunma reaksiyonu (Charoeythornkhajhornchai et al., 2017)

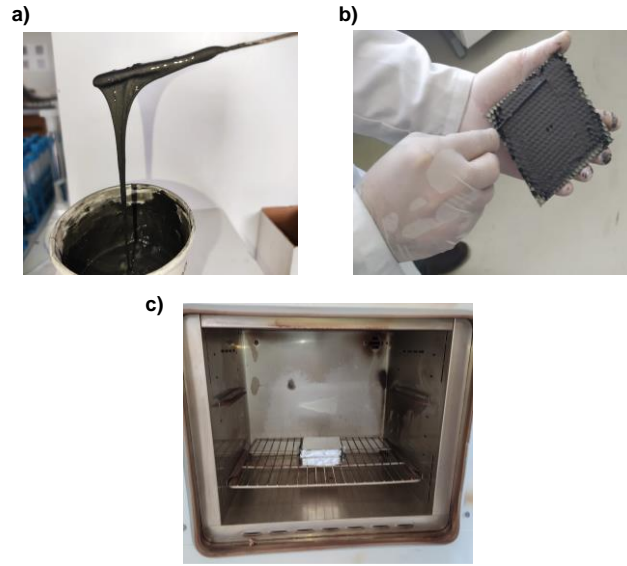
3.2. Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Hibrit Malzeme Üretimi

Alüminyum bal peteği yapılarında, mekanik etkiler sonucunda kalıcı deformasyon ve hasarın azaltılması için polidimetilsiloksan (PDMS) bazlı RTV-2 köpük ile doldurulmuştur. Şekil 3.6'da alüminyum bal peteği içerisinde polimer köpük üretim şeması verilmiştir. RTV-2 köpüğün hazırlanma sürecinde kullanılan grafit partikül boyut yönünden 20 µm altı, 20-32 µm arası ve 50-100 µm arası olarak sarsak elekte eleme yöntemi ile sınıflandırılmıştır. Köpürtücü ajan AZD'nin viskoz yapıdaki sıvı silikon polimer yapısı içerisinde olabildiğince homojen dağılabilmesi için silikon polimer katalizörü içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika süre ile disperse edilmiştir.

Kürlenmemiş PDMS viskoz bir yapıda olduğundan AZD kürleyici ajan içerisinde disperse edilip karışıma ilave edilmiştir. Yapılan ön denemeler sonucunda kullanılan AZD miktarı PDMS ağırlığının % 0,3'ü ve kullanılan kürleyici ajan oranı PDMS ağırlığının %2'si kadardır. Şekil 3.6'da ve Şekil 3.7'de gösterildiği gibi hazırlanan PDMS, grafit ve AZD karışımı, tek yönden alüminyum levha ile kapatılmış alüminyum bal peteği içerisine dökülerek Nüve FN055 marka model etüv içerisinde 170 °C 'de 120 dakika süre boyunca eş zamanlı olarak kürlenmiş ve köpürtülmüştür. Köpürme oranının bal peteği karışım miktarı ile ayarlanarak çekirdek yüksekliği miktarınca olmasına özen gösterilmiştir.



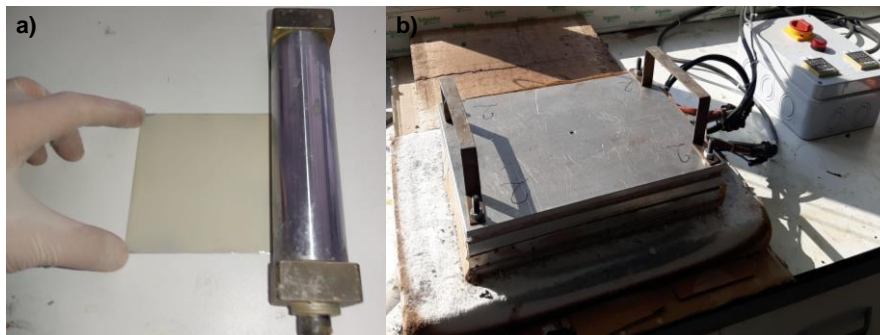
Şekil 3. 6. Polimer köpük dolgulu alüminyum bal Peteği sandviç panel  retim Şeması



Şekil 3. 7. a) Köpük dolgusu olarak kullanılacak PDMS, AZD ve grafit karışımı, b) Uygun miktarda karışımın ile bal peteği hücrelerinin doldurulması, c) Etüv içerisinde eş zamanlı köpürtme ve kürlenme

Alt tarafından kapatılmış alüminyum bal peteği içerisinde çekirdek içerisinde termal yöntemle köpürtme işlemi yapıldıktan sonra, Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnşaat Panel San. Tic. Ltd. Şti. şirketinden iki bileşene sahip poliüretan yapıştırıcı temin edilmiştir. Aynı firma tarafından alüminyum bal peteğinin sandviç haline getirilmesinde kullanılan poliüretan yapıştırıcı ve kürleyici ajanı, firma tarafından uygulana reçete ile 4:1 oranında hazırlanarak yine firma tarafından uygulanan proses şartlarında 20 dakika süre ile 80 °C sıcaklıkta PID ünitesi ile kontrol edilen ısıtma plakaları arasında yapıştırılmıştır. Panellerin yüzeye tatbik edilmesinde kalınlık kontrolü sağlayan aplikatör kullanılmıştır. Poliüretan yapıştırıcının iki bileşeni ile hazırlanan karışım, kürlenme öncesi kalınlığı 400 µm olarak homojen olarak Şekil 3.8’de gösterildiği gibi tatbik edilmiştir.

Alüminyum bal peteği içerisinde köpürtülen dolgu morfolojisi, HITACHI SU 1510 marka model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir.

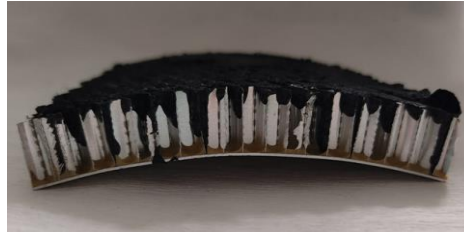


Şekil 3. 8. a) Poliüretan yapıştırıcının aplikatör ile tatbiki, b) Yapıştırıcının kürlenmesi için kullanılan ısıtma plakaları ve kontrol ünitesi

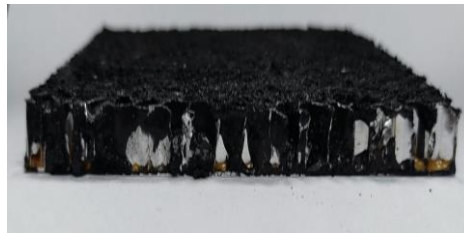
3.3. Polimer Köpük Karakterizasyon

Alüminyum bal peteği, PDMS köpük yapısı ile mekanik özellikler açısından statik ve dinamik kuvvetlere karşı deformasyon direncini artırmak için dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. RTV-2 polimeri, çeşitli katkıları ile modifiye edilmiştir. Malzemenin köpürtülmesi ile ağırlık artışı azaltılmıştır. Alüminyum bal peteği içerisine, grafit takviyeli RTV-2 köpük dolgusu yapılırken karışım için belirlenen reçete, dolgunun homojen bir şekilde kabarması göz önüne alınmıştır. Homojen olmayan kabarmalar bal peteği yapılarında çarpımalara sebep olmuştur. Bu çarpılma örneği ve düzgün numune Şekil 3.9'da verilmiştir.

a)



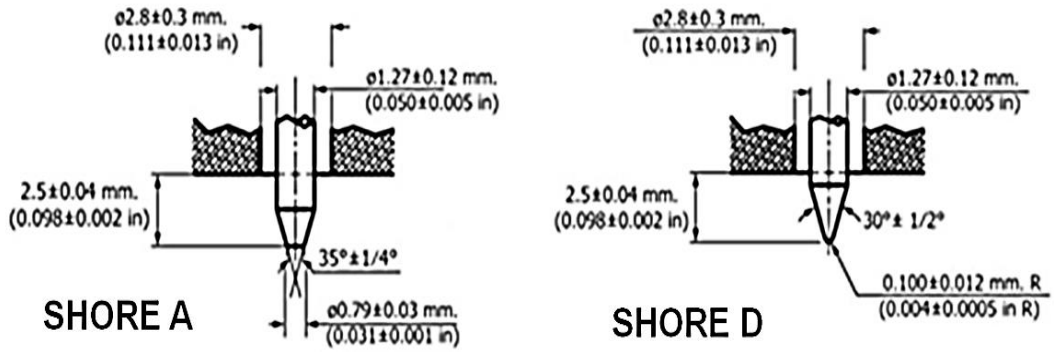
b)



Şekil 3. 9. a) Fazla miktarda köpük dolgusunun çarpılmaya uğrattığı tek tarafı kapalı alüminyum bal peteği yapısı, b) Uygun miktarda köpük dolgusu yapılan düzgün numune

3.3.1. Polimer Köpük Malzemelerde Sertlik Ölçümü

Polimerler metallere farklı olarak “Shore” sertlik değeri olarak ifade edilen bir yay kuvvetine karşılık numune üzerinde meydana gelen deformasyon miktarı ile ilintili olan sertlik ölçüm metodlarına haiz “durometre” ile sertlik ölçümleri yapılır. Yumuşak polimerler Shore A metodu ile sert olan polimer yapılarda Shore D skalası kullanılır. Shore D ile ölçümlerde sertlik değeri 20’ nin altında geldiği durumda Shore A skalasında ölçümüne, Shore A ölçümlerinde ise 90’ nin üstünde değerler ölçülmesi durumunda Shore D ölçümüne geçilir (Salih Hakan YETGİN, 2012).



Şekil 3. 10. Shore A ve Shore D ölçüm metotları için kullanılan batıcı uçlar (Vian & Denton, 2018)

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere köpük malzemeler için Shore A ve D ölçüm yöntemleri ile yapılacak olursa batıcı uçların hücre içerisine girmek ihtimalinden dolayı, köpük malzemelerde özelleşmiş sertlik ölçüm yöntemi olan Shore F kullanılmıştır. Shore-F ile köpük malzemelerin ölçümünde kullanılan durometre ölçüm alanı 55 mm çapında batıcı uç çapı 25 mm'dir. Ölçüm Aralığı 0-100 olup yay kuvveti 550 mN ila 4300 mN aralığındadır. Ölçülen malzeme kalınlığı 25-30 mm aralığında olmalıdır. Bu aralığa girmeyen numune kalınlıklarında, ara yüzey düz olmak koşulu ile üst üste konularak ölçüm yapılabilir. Şekil 3.10'da Shore F durometre örneği ve batıcı ucu gösterilmiştir.



Şekil 3. 11. Shore F polimer köpük sertliği ölçüm durometresi

Shore F ölçüm metodu ile alüminyum bal peteği dolgusu geliştirilen köpük malzeme için kullanılacak modifiye edici ajanların köpük malzemeye kazandırdığı deformasyon direnci ölçülmüştür. Shore F ölçüm sonuçları ön değerlendirme kıstası olarak ele alınmıştır.

3.3.2. Dinamik-Mekanik Analiz (DMA)

Dinamik mekanik analiz quasi-statik şartlardan farklı olarak malzemenin dinamik şartlardaki etkisini belirleme amacı ile kullanılır. Ölçüm yapılacak numune tutucu tablalara bağlandıktan sonra sinüzoidal bir gerilim ile hareket sağlanır. Bu harekete karşılık malzemenin şekil değiştirmeye cevabı ölçümlenir. Denklem 3 ve Denklem 4'te verilen, malzemenin depo modülü (E' – storage modulus) ve kayıp modülü (E'' – loss modulus) belirlenerek malzemenin dinamik davranışı karakterize edilebilir. Malzemenin viskozitesine ve elastikliğine bağlı olarak harekette bir faz farkı oluşur. Varsayım olarak, faz farkının " $\delta=0^\circ$ " (sıfır derece) olduğu ölçüm sonucunda malzeme tamamen elastik, faz farkının " $\delta=90^\circ$ " (doksan derece) olduğu ölçüm sonucunda malzeme tamamen viskoz addedilir. Gerçek sonuçlarda malzeme davranışsal olarak bu iki özelliğin arasında viskoelastik (akma durumunda viskoplastik) kategoridedir. Bu durum sürtünmesiz ortamda, enerji iletim kaybı olmaksızın plastik bir topun belirli bir yükseklikten atılmasına karşılık tekrar aynı yüksekliğe çıkmaması ile tasvir edilebilir. Yükseklik farkı plastik topun şekil değiştirmesine harcanmış olup harcama miktarı kayıp modülü ile ilişkilidir. Topun zıplayarak tekrar çıktığı yükseklik ise depo modülü ile ilişkilendirilir. Kayıp modülünün depo modülüne oranlanması ile elde edilen değer, faz farkının tanjant değeri (Denklem 5) olup bu değer en yüksek olduğu nokta enerji absorpsiyonunun da en yüksek olduğu noktadır. Bu nokta aynı zamanda amorf katıların sıcaklıkla birlikte sıvı hale geçmeden önceki camsı geçiş noktası olarak da kabul edilebilmektedir (Cimavilla-Román et al., 2021).

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos(\delta) \quad (3)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin(\delta) \quad (4)$$

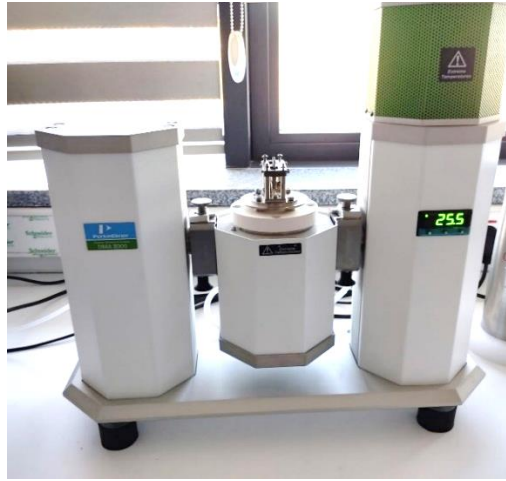
$$\tan(\delta) = \frac{E''}{E'} \quad (5)$$

Köpük malzemelerdeki birincil ve ikincil elastik modülleri değişen frekans, gerinim kuvvet ve sıcaklıkla ilişkisi test edilebilmektedir. Tez kapsamında modifiye edici ajan olarak seçilen grafit ile üretilen köpük numunelerin prizmatik numuneler kesitleri, basma

yükleri altında 50 mikrometre deformasyonda, 1Hz frekansta oda sıcaklığında (23 °C) ve 5 dakika süre ile test edilmiştir. DMA analizleri Şekil 3.11’de verilen BİTAM bünyesinde bulunan Perkin&Elmer DMA 8000 marka model cihazda gerçekleştirilmiştir.

Katkı miktarlarının artışına karşılık efektif elastik modülü artışı hesaplanarak uygun miktar belirlenmiştir. Efektif artış formülü, Denklem 6’da verilmiştir.

$$\text{Efektif Artış} = 100 * (E_{son} - E_{ilk})/E_{ilk} \quad (6)$$



Şekil 3. 12. Perkin&Elmer DMA 8000

3.3.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analizler (TGA), malzemelerin termal dayanımı ile ilişkilidir. Polimer malzemelere yapılan ilavelerin matris malzemesi ile etkileşimine bağlı olarak malzemenin bozunma sıcaklığı değişebilmektedir. Katkı maddesi, polimer matris ile moleküler düzeyde kimyasal veya fiziksel anlamda güçlü bir etkiye girdi ise katkılanmış polimerin bozunma sıcaklığı artmış dolayısı ile termal dayanımı da iyileşme göstermiş olur (Chigwada et al., 2008).

Döküm grafiti olarak tanımlanan safsızlık içeren grafit tozu ile referans olarak kullanılan yüksek saflıktaki grafit tozun termal stabilitesini ve kül miktarını ölçmek amacı ile TGA analizleri, oda sıcaklığından 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 20 ml teknik karışım (%79 N₂, %21 O₂) gazı altında 1000 °C sıcaklığa çıkılarak yapılmıştır.

Alüminyum bal peteği içerisinde “*in-situ*” şartlarda RTV-2 köpük üretimi 170 °C sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden azodikarbonamidin (AZD) termal bozunma sıcaklığını

belirlemek amacı ile TGA analizi, oda sıcaklığından 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 20 ml azot gazı altında 300 °C sıcaklığa çıkılarak yapılmıştır.

Farklı partikül boyutlarına sahip grafit katkıların RTV-2 polimer köpük içerisindeki termal davranışı ölçmek amacı ile TGA analizleri, oda sıcaklığından 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 20 ml N₂ gazı altında 600 °C sıcaklığa çıkılarak yapılmıştır.

Farklı miktardaki grafit katkıların RTV-2 polimer köpüğün termal davranışına etkisini görmek amacı ile TGA analizleri, oda sıcaklığından 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 20 ml N₂ gazı altında 800 °C sıcaklığa çıkılarak yapılmıştır.

TGA analizleri Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan SETARAM LabSYS EVO marka model cihazda gerçekleştirilmiştir.

3.3.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi, elektromanyetik spektrumun 12500 cm⁻¹ ila 10 cm⁻¹ dalga sayısı aralığını kapsayan bir kimyasal karakterizasyon tekniği olup tahribatsız yöntemdir. Bu spektral aralık, yakın kızılötesi (12500 cm⁻¹- 4000 cm⁻¹), orta kızılötesi (4000 cm⁻¹- 200 cm⁻¹) ve uzak kızılötesi (200 cm⁻¹- 10 cm⁻¹) olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Orta kızılötesi bölgede bulunan 1200- 600 cm⁻¹ aralığı, organik ve birçok inorganik bileşik için moleküler yapıyı belirleyen “parmak izi” görevi görür. Moleküler düzeyde matris ve katkı etkileşimi, kristal oranı gibi yapısal analizler mümkündür. Bununla birlikte Sinyallerin hangi bağ türlerine ve etkileşime karşılık geldiği iyi bir şekilde çözümlenmelidir (Ramírez-Hernández et al., 2019).

FTIR spektrometresi dolgu olarak kullanılan polimer köpüğe yapılan grafit katkısının, moleküler düzeyde polimer matris ile etkileşimi ölçülmüştür. FTIR analizleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM merkez laboratuvarı bünyesinde bulunan Thermo Scientific – Nicolet iS20 marka model FTIR spektrometresi ile 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ölçülmüştür.

3.3.5. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisinde moleküler yapıların titreşimleri ölçülerek moleküllerin “yapısal parmak izlerinin” belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Monokromatik ışık kaynağından gelen ve maddede uyarma sağlayamayacak kadar düşük enerjili foton, molekül yapısı ile etkileşime girdiğinde saçılma üç farklı yolla gerçekleşmektedir. Foton

elastik olarak saçılmaya uğrayabileceği gibi elastik olmayan saçılma da meydana gelir. Elastik saçılmada foton enerjisini korurken elastik olmayan saçılmada molekül ile enerji alışverişi olmaktadır. Elastik olmayan saçılmada moleküle enerji veren foton Stokes saçılmasına, molekülden enerji alan foton Anti-Stokes saçılmasına uğrar. Molekül yapılarında genellikle oda sıcaklığında temel hallerinde olduğundan Stokes saçılması gerçekleşme ihtimali ve yoğunluğu daha fazladır. Bu sebeple Raman spektrumunda genellikle Stokes saçılmaları kullanılır (Hazle et al., 1990).

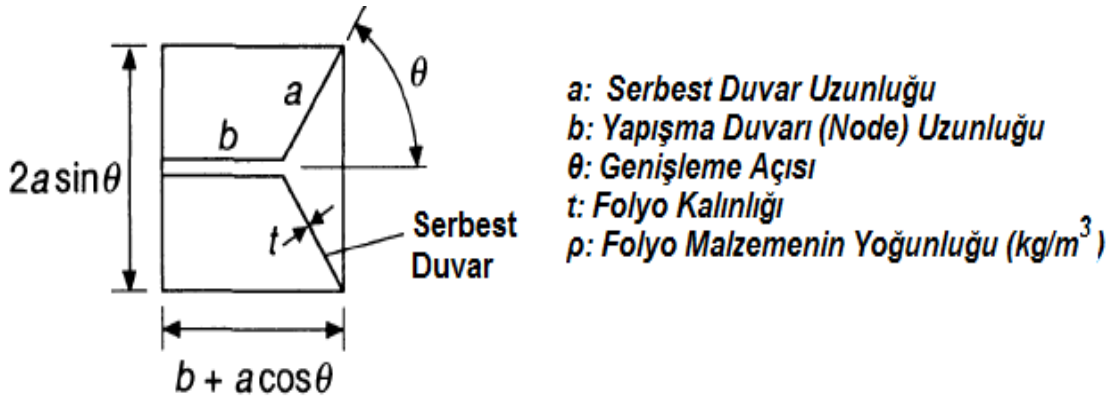
Raman spektroskopisi ile FTIR spektroskopisi ile belirlenemeyen diğer yapısal farklılıkları ortaya koyabilmektedir. Tez çalışması kapsamında modifiye edici ajan olarak kullanılan grafit tozların Raman spektrumları alınarak karşılaştırılmıştır. Grafit tozların Raman spektrumlarında G bandı ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) ile D₁ bandı (1350 cm^{-1}) ele alınmıştır. G bandı grafit yapısının sp² hibritleşmesi gösteren kristalin yapısının varlığını gösterirken D bandı, kusur, tane sınırı, fonksiyonel grup veya yapısal düzensizliğin varlığıyla ilgili olan grafit pullarının kenarları gibi kusurlu veya düzensiz bir grafit formun varlığını temsil eder (Inam et al., 2020). Değişen partikül boyutlarında kullanılan grafit tozların kristal yapıdaki kusurları Raman spektrumunda D bandı şiddetinin G bandı şiddetine oranlanması ile orantısal olarak tespit edilmiştir. Yapısal kusurların modifikasyona etkisi incelenmiştir.

Raman analizleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM merkez laboratuvarı bünyesinde bulunan Renishaw inVia Reflex marka model konfokal Raman mikroskopunda spektrometresi ile 532 nm dalga boyunda lazer kullanılarak ölçülmüştür.

3.3.6. Piknometre Yoğunluk Ölçümü

Alüminyum bal peteği sandviç yapıları ile tasarlanacak yapılarda kullanılacak malzeme miktarı statik hesaplar için kullanılır. Birim hacim başına ya da iki boyutlu olarak kullanılan malzemeler için birim alan başına ağırlık miktarı belirlenmelidir. Şekil 3.12 ve Denklem 7'de verilen yaklaşım ile bal peteği yapılarda çekirdek kısmının yoğunluğu, Bitzer teorik yoğunluk hesabı bulunabilir (Bitzer, 1997).

$$\text{Çekirdek Yoğunluğu} = \frac{1.54t\rho}{b} \quad (7)$$



Şekil 3.13. Bal peteği yoğunluk ölçümü için kullanılan şablon (Bitzer, 1997)

Dolgulu alüminyum bal peteği çekirdek kısımlarının yoğunluk ölçümleri ASTM D3574-01 yoğunluk ölçüm standardına göre Micromeritics – Accupyc2 1340 marka model helyum piknometresinde 100 cm³ hacimde sandviç panel levhalar olmadan dolgulu çekirdeğin yoğunluğu ölçülmüştür.

3.4. Mekanik Testler

Tez kapsamında, dolgunsuz alüminyum bal peteği sandviç panel yapılar ile RTV-2 köpük dolgulu olarak üretilen alüminyum bal peteği sandviç panel yapılara basma testi quasi-statik şartlarda makro indentasyon testleri yapılmış ve ağırlık düşürme yöntemi ile yapılan düşük hızlı darbe uygulanmıştır.

3.4.1. Basma Testleri

Çalışma kapsamında basma testleri için Shimadzu markasına ait AGS-X serisi üst çenesi hareketli olan bir cihaz kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de belirtilen parametrelere sahip 0.5 mm panel ile sandviçlenmiş bal peteği yapıların boş ve RTV-2 köpük dolgulu numunelere yapılan basma testleri, ASTM C365 standardına göre oda sıcaklığında, düzlem dışı yükleme şartlarında 0.5 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Testlerin öncesinde her bir numunenin kenar uzunlukları ve yükseklikleri dijital bir kumpas yardımıyla ölçülmüş ve universal test cihazı TRAPEZIUMX 1.5.1 programına girilmiştir. Şekil 3.13 ‘te verildiği şekli ile basma çeneleri arasında yapılan basma testi sonucunda elde edilen kuvvet – yer değiştirme verileri ve numunenin orijinal boyutları dikkate alınarak denklem 8 ve denklem 9’e göre hesaplanmış ve böylece gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Basma testleri sonrasında geçici deformasyon miktarı ise denklem 10 ile tanımlanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (9)$$

$$\text{geçici deformasyon (\%)} = \frac{h'' - h'}{h_0} \times 100 \quad (10)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde, σ (MPa); gerilme, F (N); uygulanan basma kuvveti, A (mm²) ise; kuvvete dik yönlü olarak bulunan başlangıç yüzey alanı, ε ; gerini, Δh (mm); numunedeki basma testinden önce ve sonra elde edilen yüksekliklerin farkı, h_0 (mm) ise; basma testinden önce numunenin yüksekliğini ifade etmektedir. Geçici deformasyon için yapılan hesaplamada h'' geçici deformasyon ortadan kalktıktan sonra ölçülen yükseklik ve h' ise basma yükü altındaki azami deformasyonda ölçülen yüksekliktir (Y. Sun & Li, 2018).

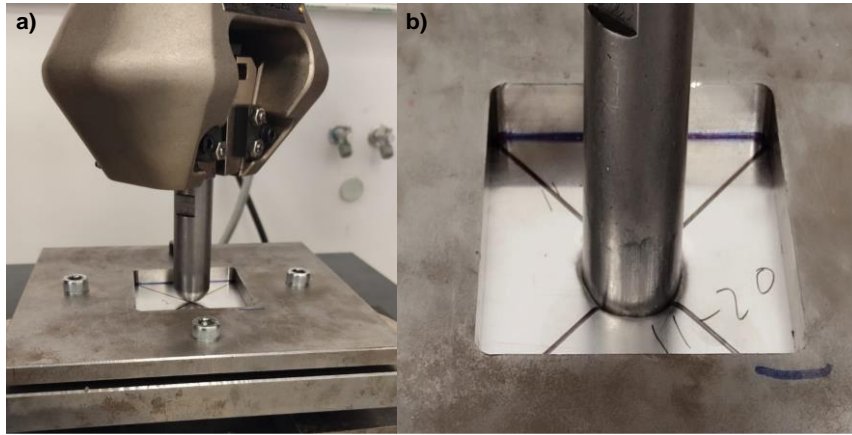
Farklı parametre değerlerine sahip olan dolgunsuz ve PDMS dolgulu çekirdek malzemelerin her bir parametresi için üçer tane numune ile test tekrar edilmiştir.



Şekil 3. 14. Alüminyum bal peteği basma testi

3.4.2. Makro İndentasyon Testleri

Makro indentasyon testleri, düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan 1 inçlik (~25,4 mm) yarı küresel vurucu uç, Şekil 3.14'te gösterildiği gibi Shimadzu markasına ait AGS-X marka model cihazın çenesine takılmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. İndentasyon ile penetrasyona uğratılacak numune yarı küresel geometrideki ucun delebileceği şekilde ortalanmış ve mesnetlenmiştir. Üiversal test cihazı TRAPEZIUMX 1.5.1 programından alınan kuvvet – deplasman eğrileri altında kalan alanın integrasyonu ile statik şartlarda penetrasyon için gereken enerji miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 3. 15. Alüminyum bal peteği makro penetrasyon testi a) temas, b) penetrasyon

3.4.3. Düşük Hızlı Darbe Testleri

Çizelge 3.1'de belirtilen özelliklere sahip 100 mm x 100 mm alüminyum bal peteği sandviç panel yapıların boş ve RTV-2 köpük dolgulu numuneler, düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur. Darbe testi 17 kg vurucu ağırlığına sahip Şekil 3.15' verilen ağırlık düşürme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Vurucu ucu olarak delme ve kesme etkilerinden kaçınmak için yarı küresel vurucu (~25.4 mm) uç kullanılmıştır. Vurucu ucun tekrarlı surette vurmaması için test esnasında ilk vuruştan sonra vurucu ünite metal profille yakalanmıştır. Darbe testlerinde 10 cm yükseklikten (16,67 Joule) başlanarak tam penetrasyonun sağlandığı yüksekliğe kadar 10'ar cm aralıklarla numune darbe yüklerine maruz bırakılmıştır. Darbe esnasında vurucu uç kısmında bulunan sensör yardımı ile alınan sinyal, sinyal yükseltici ünite ile birlikte yükseltilerek Signal Express programında işlenmiştir.



Şekil 3. 16. Düşük hızlı darbe testlerin kullanılan cihaz

Signal Express programı ile alınan kuvvet – zaman (F-t) verileri, Uyaner tarafından (2020) hazırlan program ile kuvvet – yer değiştirme (F-d), ivme – zaman (a-t) ve enerji – zaman (E-t) verilere ait grafikler elde edilmiştir (Uyaner, 2020). Darbe testleri sonrası numuneler hasar bölgelerinden kesilerek hasar bölgesi fotoğrafı çekilmiştir ve hasar bölgesinde meydana gelen hasar modları incelenmiştir.

Çizelge 3. 2. Düşük hızlı darbe enerji seviyeleri

Vurucu Yüksekliği (metre)	Vurma Enerjisi (Joule)	Vuruş Hızı (m/s)
0.1	16.677	1.4007
0.2	33.354	1.9809
0.3	50.031	2.4261
0.4	66.708	2.8014
0.5	83.385	3.1320
0.6	100.062	3.43103

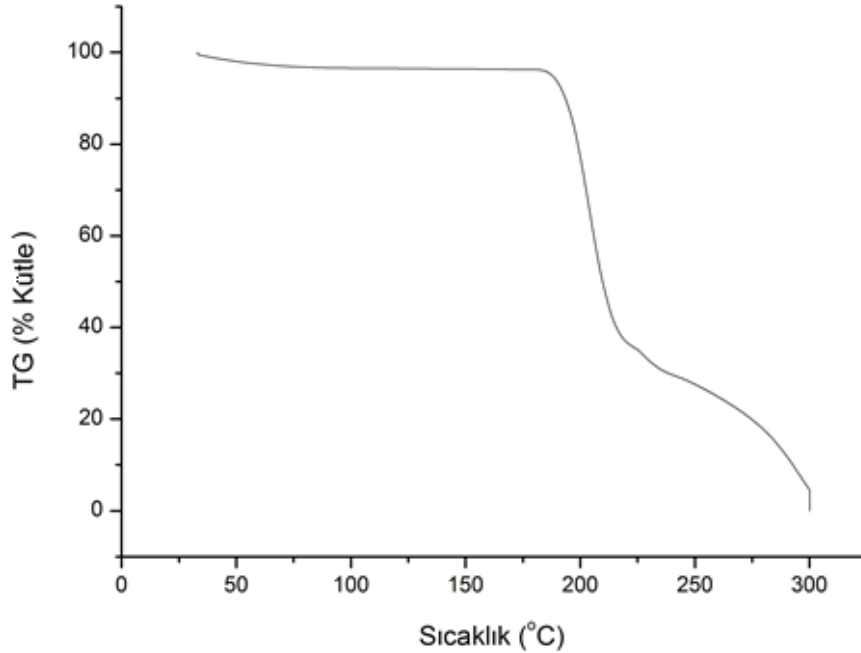
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Silikon Polimer (RTV-2) Köpük Üretim Süreci

4.1.1. RTV-2 Polimer Seçimi

Tez çalışması kapsamında RTV – 2 köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panellerinde kullanılan köpük üretim süreci ile ilgili parametrelerin belirlenmesinde rol oynayan karakterizasyon sonuçları verilmiştir.

Köpürtme ajanı olarak kullanılan AZD miktarı, kullanılan RTV-2 miktarının ağırlıkça %0,1, %0,2 ve %0,5 oranlarında denemesi yapılmıştır. Ağırlıkça %0,1 AZD kullanımında yeterli köpürmeyi sağlayamazken %0,5 AZD ilavesinde homojen olmayan ve bileşen köpükler ile reaksiyona girmeden kalan AZD kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 4.1’de azodikarbonamide (AZD) ait TGA analizi verilmiştir. Analiz, azot atmosferinde oda sıcaklığından 300 °C’ye 10 °C /dakika ısıtma hızı ile ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. 175 °C’de başlayan bozunma, 200 °C’de azami hızda meydana gelmiştir.



Şekil 4. 1. Azodikarbonamide (AZD) ait TGA analizi

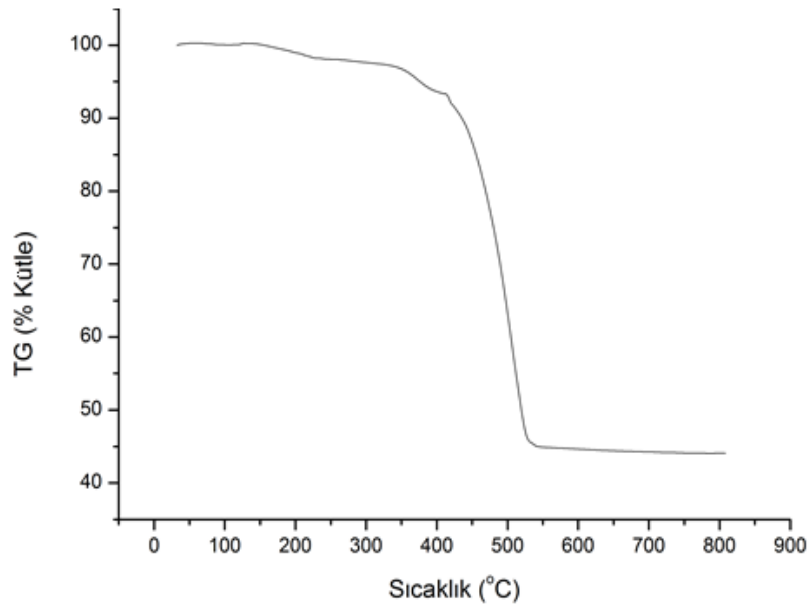
Yüksek şok emici özelliğinden dolayı seçilen polidimetilsiloksan esaslı RTV-2 polimeri, farklı sertlik değerlerine sahiptir. E-25 olarak satılan Shore A sertlik değeri 25±2 olan polimer, köpük yapımı için uygulanabilir ve homojen sonuçlar vermesinden ötürü

tercih edilmiştir. Şekil 4.2’de E-10, E-25 ve E-50 polimerleri ağırlıkça %0,3 AZD ile üretilen köpük numuneler gösterilmiştir. E-10 kodlu RTV-2 yapısında aşırı köpürme ile birlikte homojen olmayan hücre dağılımı mevcut olup E-50 kodlu numunede verimli bir köpürme meydana gelmemiştir.



Şekil 4. 2. Farklı sertlik değerlerine sahip RTV-2 polimerlerin köpürtülmesi

Şekil 4.3’de, %0,3 AZD, %2 kürleştirici ajan ve RTV-2 E-25 karışımına ait TGA analizi verilmiştir. Analiz, teknik hava (%79 N₂, %21 O₂) atmosferinde oda sıcaklığından 800 °C’ye 10 °C /dakika ısıtma hızı ile ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. TG- sıcaklık eğrisinde 250 °C’ye kadar uçucu ve AZD nin yapıdan uzaklaşması, 300°C’den sonra polimerin bozunmaya başlaması görülmektedir.



Şekil 4. 3. %0,3 AZD, %2 kürleştirici ajan ve RTV-2 E-25 karışımına ait TGA analizi

4.1.2. RTV-2 Köpük Modifikatör Seçimi

RTV-2 E-25 polimer köpük üretiminde kullanılan grafit, SiO₂ (CAS No: 7631-66-9), rutil fazında TiO₂ (CAS No: 13463-67-7) ve Al₂O₃ (EtiAlu 305) katkıların mekanik özelliklere etkisi ve matris ile etkileşimi karakterize edilmiştir. Katkısız RTV-2 polimer köpük ve modifikatör katkılı RTV-2 polimer köpükler Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu bağlamda üç farklı numuneden 5 farklı noktadan Shore F sertlik değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4.1 de verildiği üzere Shore F değerini en fazla artıran döküm grafiti olmuştur.



Şekil 4. 4. RTV-2 polimer köpükler

Çizelge 4. 1. Farklı modifikatörlerin köpük sertlik değerine etkisi

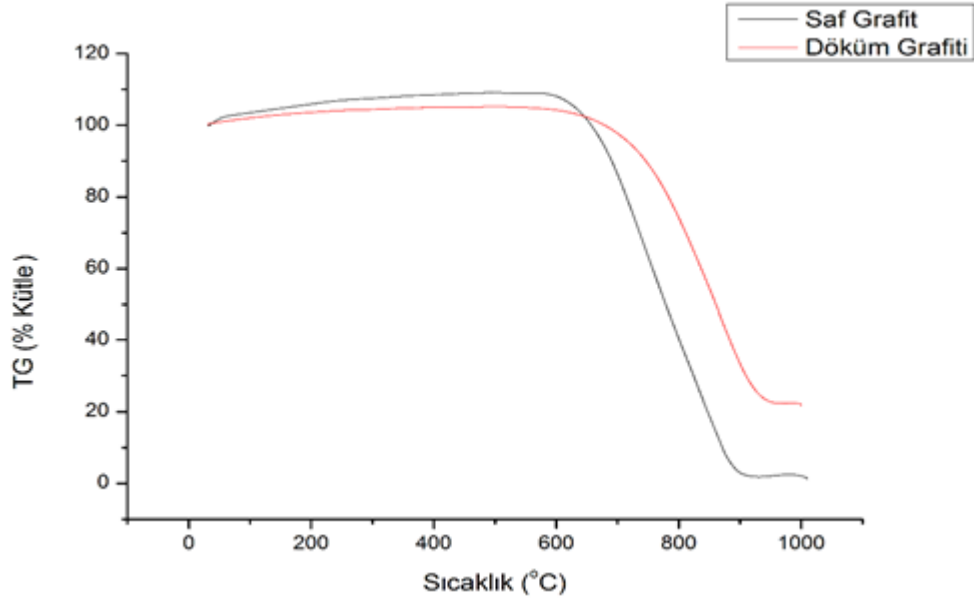
Modifikatör Adı	Katkılandığı Köpük Numune Ortalama Shore F Değeri	Partikül Boyutu (µm)	Yoğunluk Değeri (g/cm ³)
Katkısız RTV-2	60	-	1.06-1.2
SiO ₂	66	44.42	2.2 – 2.6
TiO ₂	62	1.10	4.23
Al ₂ O ₃	63	55.20	3.90 – 3.95
Döküm Grafiti	70	44.78	2.23
Referans Grafit Tozu (CAS: 7782-42-5)	78	17.4	2.26

4.1.3. Modifikatör Olarak Seçilen Grafitin Karakterizasyonu

Polimer köpük sertlik değerini en fazla artıran “döküm grafiti” ve referans olarak alınan saf grafitin, partikül boyut analizi, kristal yapı analizi (XRD), termal gravimetri analizi (TGA) yapılarak karakterize edilmiştir. Yakma sonrasında kalan “döküm grafiti” külüne kimyasal içerik analizi (XRF) analizi yapılmıştır. Helyum piknometresi ile “döküm grafitinin” görünür yoğunluğu 2.23 g/cm³ olarak ölçülmüştür.

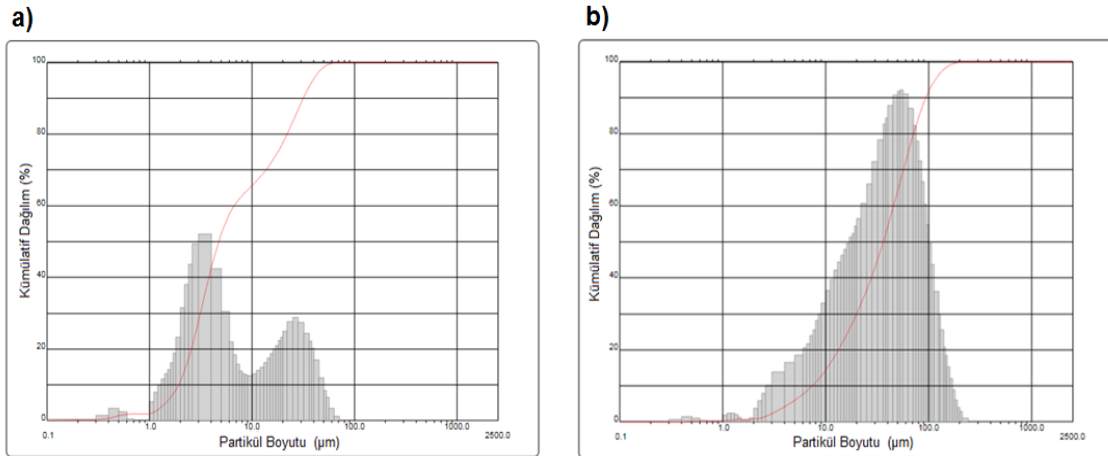
Şekil 4.5'te saf grafit ve “döküm grafitinin” TGA analizi verilmiştir. Teknik hava karışımında (%79 N₂, % 21 O₂) oda sıcaklığından 1000 °C sıcaklığa 10 °C /dakika ısıtma hızı ile yapılan analizde, saf grafit tükenirken “döküm grafiti” ağırlıkça %20 civarında kül

bırakmıştır. Bununla birlikte yanma reaksiyonu, saf grafitte 651 °C’de başlarken “*döküm grafitinde*” 736 °C’de başlamıştır.



Şekil 4. 5. Saf grafit ve “döküm grafiti” TGA analizi

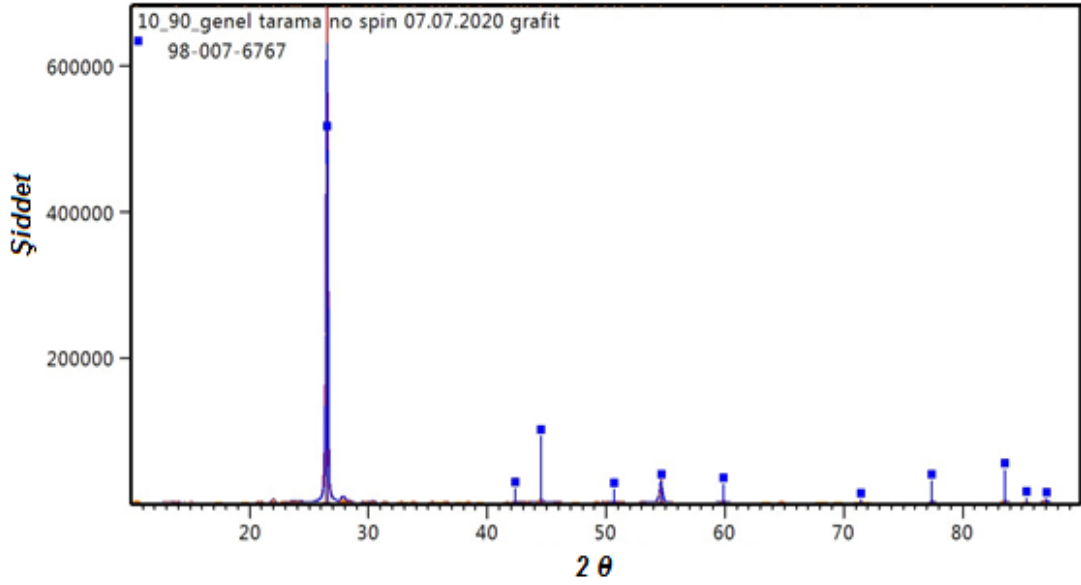
Şekil 4.6’te saf grafitte ve “*döküm grafitine*” ait partikül boyut dağılımı verilmiştir. Ortalama partikül boyutu saf grafitte 17.4 µm civarında iki tepeli bir dağılım gösterirken “*döküm grafiti*” yaklaşık değeri 44 µm olarak tespit edilmiş olup tek tepeli bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4. 6. a) Saf grafit b) “döküm grafiti” partikül boyut dağılımı

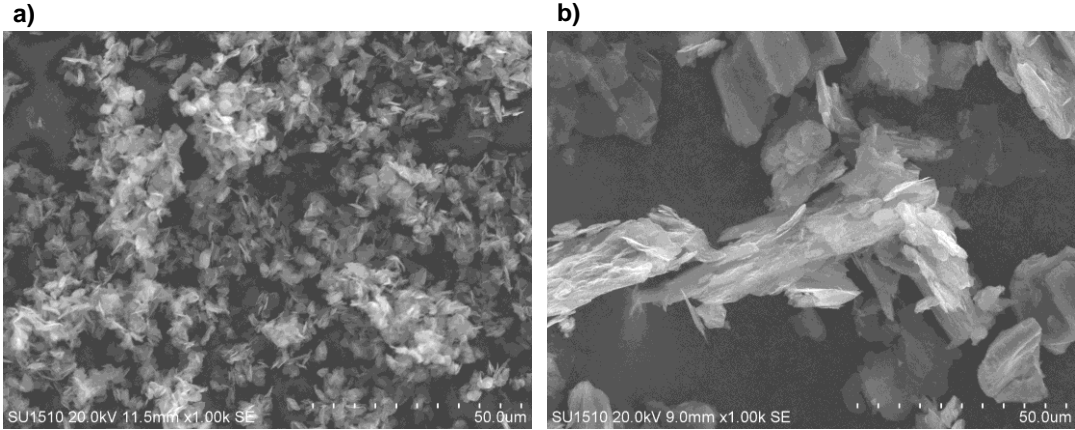
“Döküm grafitin” moleküler dizilimi X ışınları kırınımı (XRD) analizi yapılmış ve High Score veri tabanından 98-007-6767 no’lu ICSD kart numarası ile eşleştirilmiş,

malzemenin safsızlık içeren grafit yapısı olduğu belirlenmiştir. Eşleştirilen XRD paterni Şekil 4.7’te verilmiştir.



Şekil 4. 7. “Döküm grafiti” eşleştirilmiş XRD paterni

“Döküm grafiti” ve saf grafitte ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.8’te verilmiştir. Her iki türe ait görüntüde 1000x büyütmede grafitin pulsu yapısı görülürken, saf grafit pulları daha ince yapıdadır.



Şekil 4. 8. a) Saf grafit b) “döküm grafiti” SEM görüntüleri (1000x büyütme oranında)

Termogravimetrik analiz (TGA) ile “döküm grafiti” içeriğinde ağırlıkça yaklaşık %20 oranında kül olduğu saptanmıştır. “Döküm grafitinin” 1000 °C’de yakılması sonrasında Şekil 4.9’da elde edilen kül içeriğinin elementel analizi enerji dağılımlı Rigaku NEX-CG marka model XRF cihazı ile elementel içerik tespit edilmiştir. Elementel sonuçların

dağılımı Çizelge 4.2’de verilmiştir. Külün demir içeriğinden dolayı kırmızı renk aldığı söylenebilir.



Şekil 4. 9. “Döküm Grafit” külü

Çizelge 4. 2. “Döküm Grafit” külünün XRF analiz sonuçları

Element	Kütlece %	İstatistiksel Hasta	Belirlenebilme Limiti
Si	3.56	0.0069	0.015
Fe	2.09	0.0023	0.0009
Al	0.943	0.0055	0.0044
Ca	0.835	0.005	0.001
S	0.67	0.0013	0.0004
Mg	0.241	0.007	0.0113
K	0.161	0.0031	0.003
Zr	0.094	0.0009	0.0002
Ti	0.062	0.0009	0.0008

4.1.4. Modifikatör Olarak Kullanılan Grafitin Partikül Boyutunun Etkisi

Modifiye edici katkı olarak kullanılan “döküm grafitinin” geniş olan partikül boyutu eleme yöntemi ile 0-20 μm , 20-32 μm ve 50-100 μm değerlerine sınıflandırılmıştır. Böylelikle modifikasyonda partikül boyut etkisi de incelenmiştir. Çizelge 4.3’te, referans grafit tozu ve elenmemiş “döküm grafiti” ile birlikte “döküm grafitinden” elenerek sınıflandırılan grafit tozlarının partikül boyutlarına ait ortalama partikül boyutu değerleri ile BET yüzey alanları verilmiştir. Partikül boyutu azaldıkça yüzey alanı orantısal olarak artış göstermektedir.

Çizelge 4. 3. Sınıflandırılan grafit tozların ortalama partikül boyut değerleri ve BET yüzey alanları

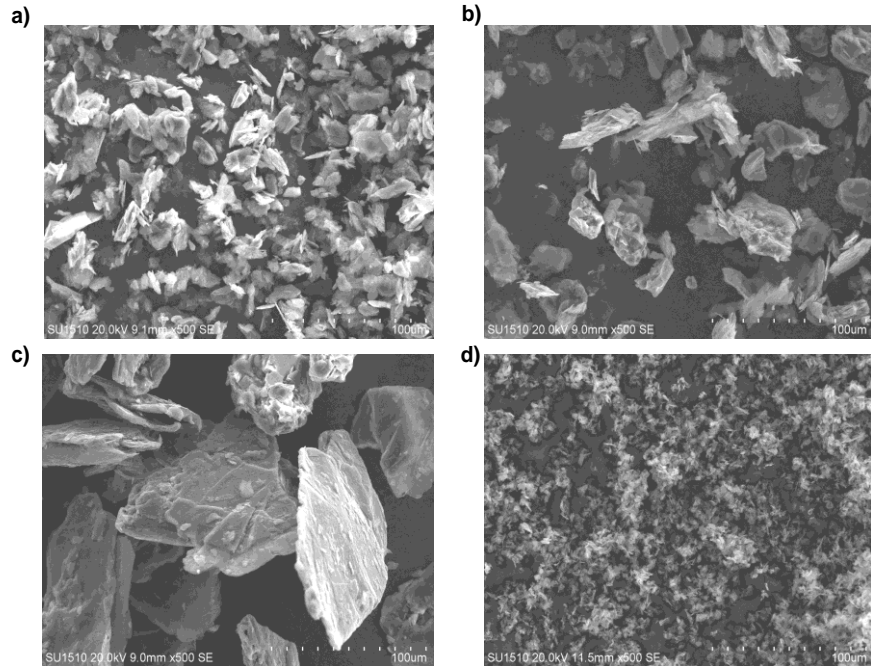
Elek Aralığı	Ortalama Partikül Boyutu (μm)	BET yüzey alanı (g/m^2)
Tava-20 μm	15.98	2.836
20-32 μm	27.14	1.668
50-100 μm	86.28	0.852
Elenmemiş Döküm Grafiti	44.78	1.880
Referans Grafit Tozu (CAS: 7782-42-5)	17.4	8.691

Grafit partikülleri, Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere yüzeyleri düz pulsu yapılar şeklindedir. Toz malzemenin yüzey alanı, katkı yapıldığı polimer matris içerisinde moleküler düzeydeki etkileşim göz önüne alındığında önemli bir parametre oldu görülecektir. Çizelge 4.4'te “*döküm grafitinin*”, elenen grafit tozları ve referans saf grafit tozunun kullanıldığı ağırlıkça %10 oranında katkı yapılarak üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin Shore F Değerleri verilmiştir. Partikül boyutu azaldıkça katkı yapıldığı polimer köpük numunenin sertliğinde bir miktar artış görülmüştür.

Çizelge 4. 4. Grafit tozların %10 Ağ. Katkısında RTV-2 Köpük Shore F Değeri

Elek Aralığı	%10 Ağ. Katkısında RTV-2 Köpük Shore F Değeri
Tava-20 μm	71
20-32 μm	69
50-100 μm	68
Elenmemiş Döküm Grafiti	70
Referans Grafit Tozu (CAS: 7782-42-5)	78

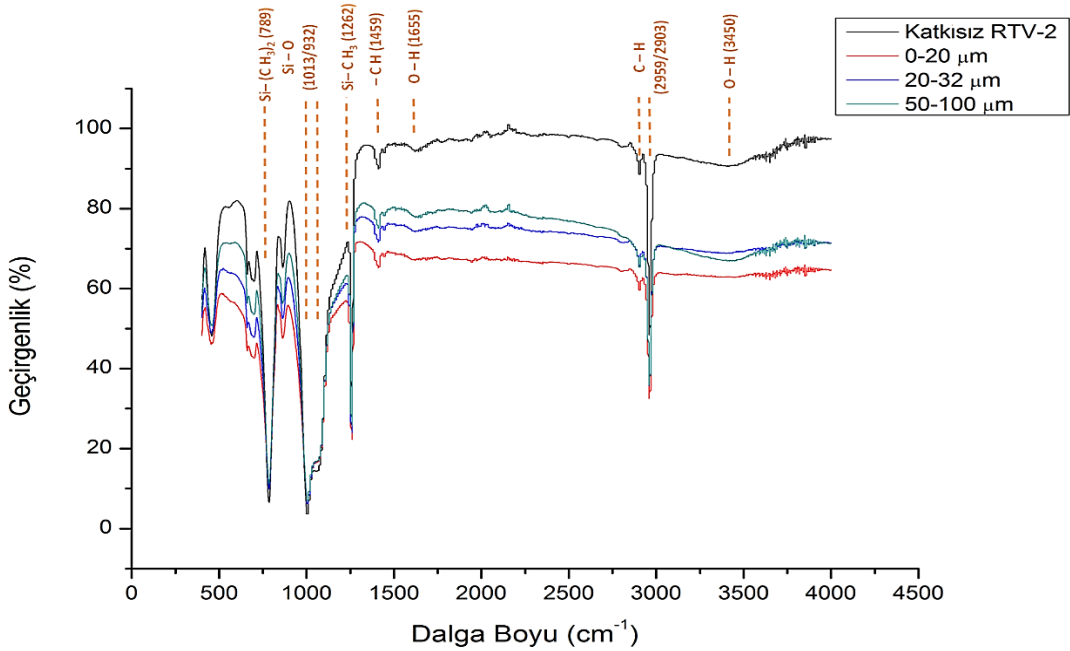
Eleme ile sınıflandırılan grafitler ve referans olarak kullanılan saf grafit (CAS: 7782-42-5), taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile 500x büyütme ile görüntülenmiş partikül morfolojilerine ait görüntüler Şekil 4.10'de verilmiştir. Referans olarak alınan saf grafit partiküllerine karşılık eleme işlemi ile sınıflandırılan 0-20 μm ve 20-32 μm partikül boyutları çubuksu şekle yakındır.



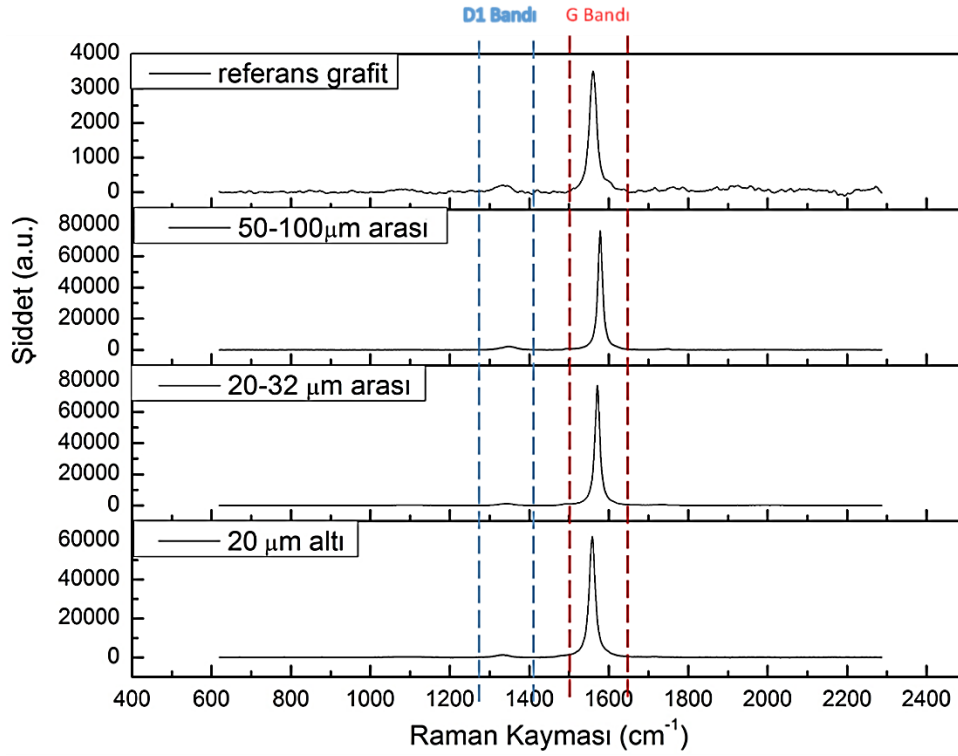
Şekil 4. 10. Grafit tozların 500x büyütmede SEM görüntüleri a) 0-20 μm , b)20-32 μm , c) 50-100 μm , d) referans saf grafit tozu

BET yüzey alanı ölçümleri ve SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde azalan partikül boyutuna karşılık, polimer matris molekülleri ile grafit partikülleri arasındaki temas alanında artış mümkündür. Fiziksel veya kimyasal bir etkileşimin oluşup oluşmadığına FTIR spektroskopisi ile bakılmıştır.

Eleme yöntemi ile sınıflandırılan grafit tozları ve referans grafit tozu (CAS: 7782-42-5), RTV-2 içerisine ağırlıkça Shore F sertlik değerinde belirlenen miktar olarak %10 oranında ilave edilerek katkı ile polimer matrisin etkileşim FTIR analizi ile incelenmiştir. Şekil 4.11’de sınıflandırılan partikül boyutlarındaki grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait FTIR analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar çerçevesinde 789 cm^{-1} civarında ve 1649 cm^{-1} , 2903 cm^{-1} dalga boyu civarındaki piklerin geçirgenlik değerlerinde azalma dolayısı ile etkileşim miktarında artış meydana gelmiştir. PDMS ana zincirine bağlı radikal grupların titreşim ve sallanma (rocking) hareketlerinden kaynaklı absorptans artışı mevcuttur. Bu durumda modifiye edici katkı partikülleri ile PDMS polimer zincirleri arasında fiziksel bir etkileşim olduğunun kanıtıdır (Hamouni et al., 2019; Nour et al., 2012; Ruan et al., 2023). En düşük partikül boyutuna sahip grafit tozları olan 0-20 μm aralığında polimer molekülleri ile grafit partikülleri arasındaki etkileşim en fazladır. Ancak RTV-2’ye katkı esnasında karıştırma sırasında topaklanma, uçuşma ve RTV-2’nin yalancı kütleme ile kalıplamanın zorlaşması gibi sebeplerden ötürü 20-32 μm aralığından RTV-2 köpük üretimine devam edilmiştir.



Şekil 4. 11. Farklı partikül boyutuna sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait FTIR analiz sonuçları



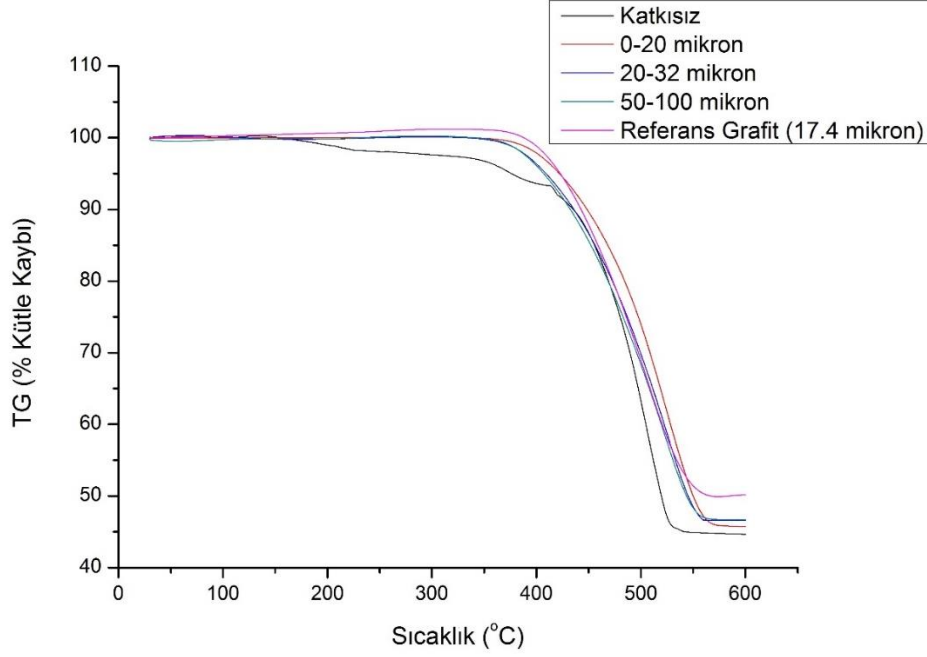
Şekil 4. 12. Modifikatör olarak kullanılan grafit tozların Raman analizi spektrumları

Şekil 4.12’de modifikatör olarak kullanılan grafit tozlarının Raman analizi spektrumları verilmiştir. Şekil 4.12’deki grafiklere ait pik şiddet değerleri Çizelge 4.5’te verilmiştir. Grafiklerde belirgin olarak gözlenen G ve D₁ banları incelendiğinde D₁ bandındaki pik değerinin G bandı pik değerlerine oranlandığında elde edilen I_{D1}/I_G oranı, ölçülen partiküller için rölatif bir kusur oranını verilebilmektedir. D₁ bandı şiddetindeki artış π valans bandında oluşan boşlukların arttığı anlamına gelmekte olup polimer radikali olan CH- π etkileşimini artırmaktadır. CH- π etkileşimi PDMS zinciri (RTV-2) ile grafit partikülünün zayıf yüzey etkileşimi oluşturduğunun kanıtıdır (Bokobza et al., 2015; Couzi et al., 2016).

Çizelge 4. 5. Modifikatör olarak kullanılan grafit tozların Raman parametreleri

Elek Aralığı	Ortalama Partikül Boyutu (μm)	BET yüzey alanı (g/m^2)	I_G	I_{D1}	I_{D1}/I_G
Tava-20 μm	15.98	2.836	62054.92	1228.81	0.020
20-32 μm	27.14	1.668	77210.75	1166.77	0.015
50-100 μm	86.28	0.852	76417.82	2146.71	0.028
Referans Grafit Tozu (CAS: 7782-42-5)	17.4	8.691	3505.42	204.12	0.058

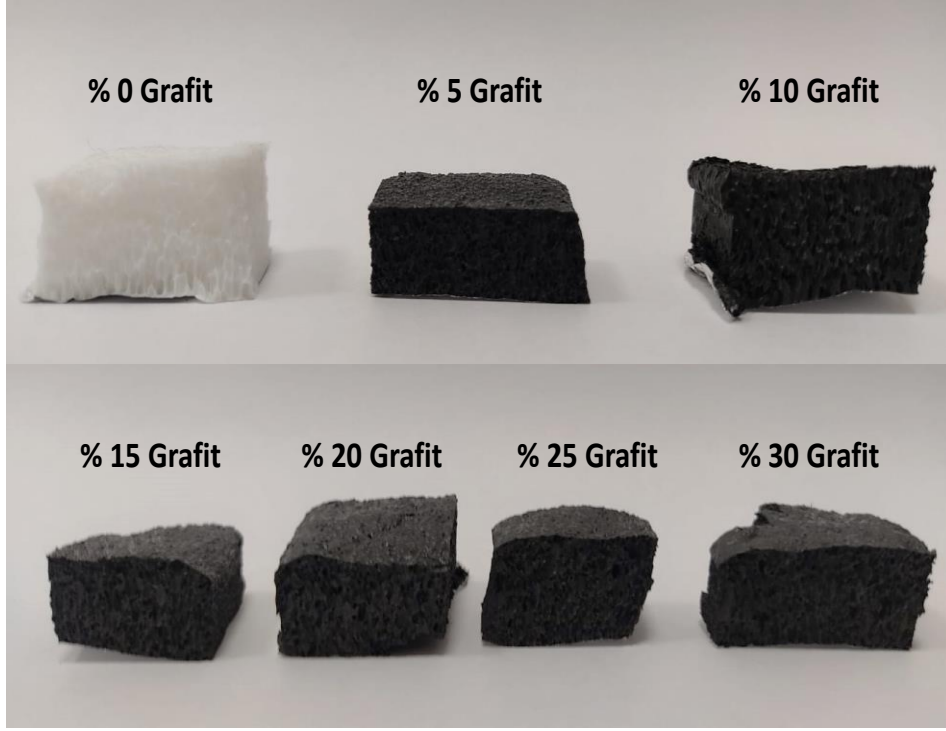
Şekil 4.13’de verilen azot atmosferinde oda sıcaklığından 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 600 °C sıcaklığa çıkılarak yapılan TGA analizi incelendiğinde “*döküm grafitinden*” eleme ile elde edilen grafit katkıları, katkısız RTV-2 köpüklere referans saf grafit katkıdan daha fazla termal dayanım artışı sağlamıştır. Bununla birlikte kütle kaybı, referans grafit takviyeli köpüğün termal analizinde daha azdır. 0-20 µm aralığındaki eleme grafit tozu katkısı, RTV-2 polimer köpüğün termal bozunma sıcaklığını 50 °C civarında artırmıştır.



Şekil 4. 13. Farklı partikül boyutuna sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait TGA sonuçları

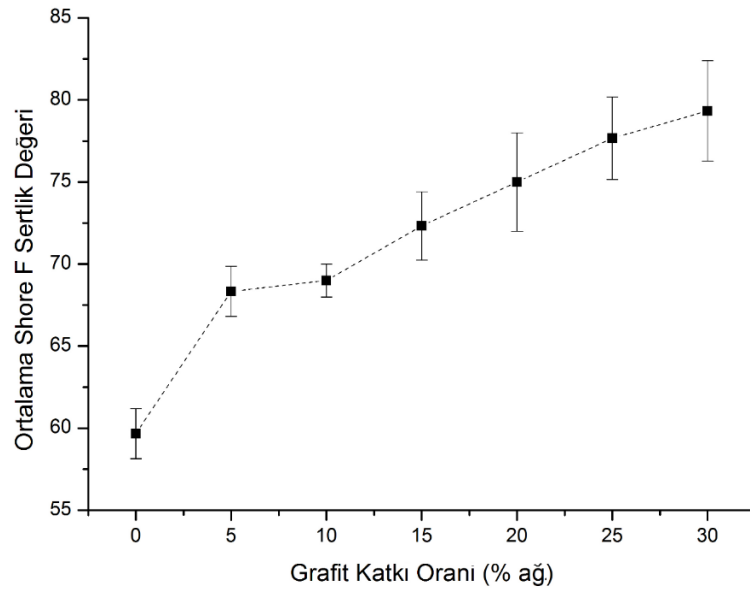
4.1.5. Modifikatör Olarak Kullanılan Grafit Katkı Miktarının Belirlenmesi

Partikül boyut değeri olarak 20-32 µm aralığında seçilen grafit tozu için katkı miktarının etkisi %5, 10, 15, 20, 25, 30 olacak şekilde belirlenmiştir. Grafit (döküm grafiti) miktarındaki artışla daha maliyetli olan RTV-2 polimerine dolgu olarak kullanımı ile polimer köpük üretimi daha ekonomik hale getirilmiştir. Şekil 4.14’de üretilen “*döküm grafiti*” katkılı ve katkısız RTV-2 köpük numuneleri verilmiştir.



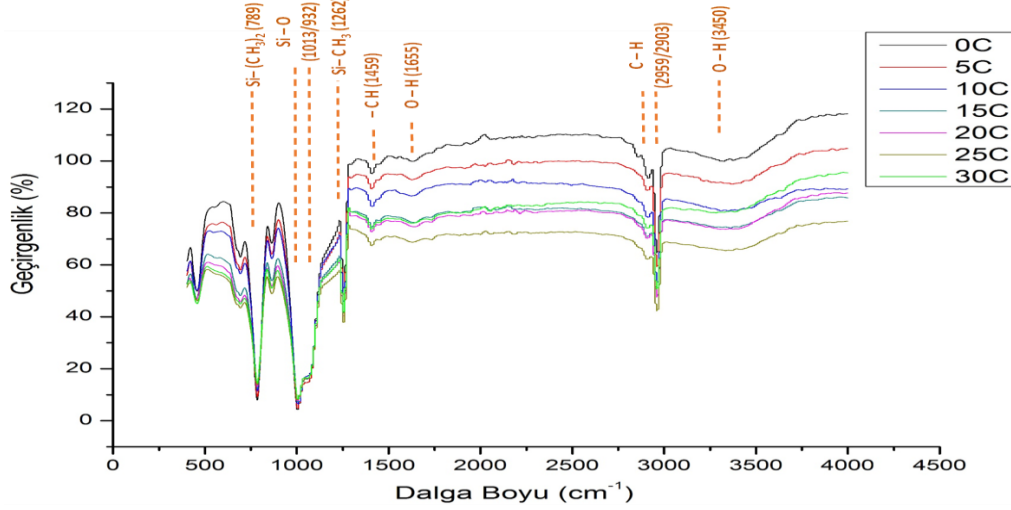
Şekil 4. 14. 20-32 μm partikül boyutuna sahip grafit katkısı ile değişen katkı oranlarında üretilen RTV-2 polimer köpük numuneler

RTV-2 polimer köpüğe yapılan grafit katkı miktarının Shore F sertlik değerine etkisi Şekil 4.15'te verilmiştir. Ölçümler üç farklı numuneden 5 tekrarlı olarak alınmıştır. Artan grafit katkısına karşılık Shore F değerinde artış görülmüştür.



Şekil 4. 15. 20-32 μm partikül boyutuna sahip grafit katkısı ile değişen katkı oranlarında üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin Shore F sertlik değeri

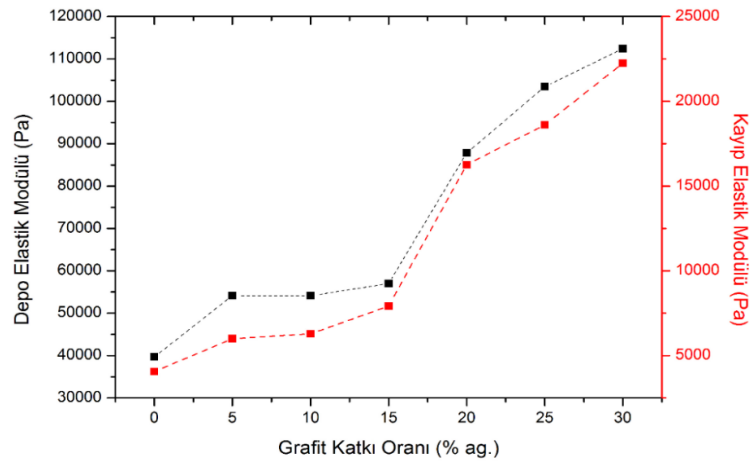
Şekil 4.16’da artan grafit oranı ile birlikte Si-(CH₃)₂ ve C-H bağlarındaki absorbands değerlerinde artış meydana gelmiş ancak ağırlıkça % 25 grafit ilavesi ile birlikte doygunluğa ulaşmıştır (Nour et al., 2012).



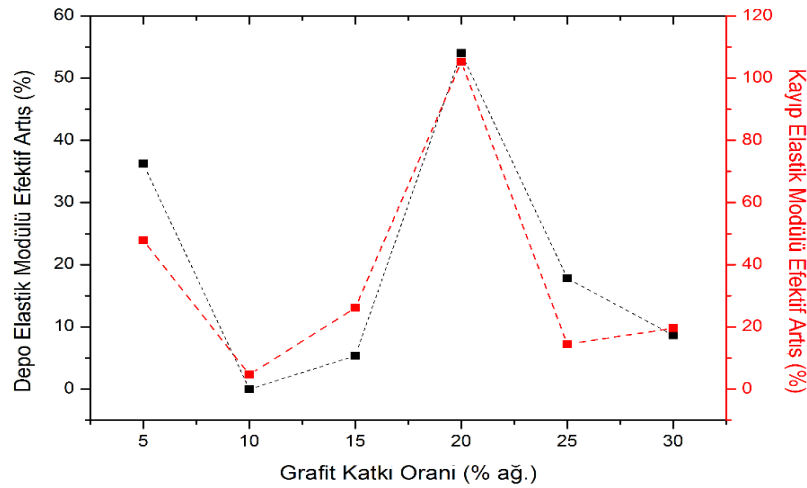
Şekil 4. 16. Farklı katkı oranına sahip grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait FTIR analiz sonuçları

Artan grafit katkı oranı ile birlikte köpük malzemenin DMA analizi ile deformasyon miktarı 50 µm, frekans değeri 1 Hz olarak oda sıcaklığı şartlarında elastik modülünde meydana gelen artış miktarı Şekil 4.17’te gösterilmiştir. Elastik modülündeki artış, % 20 grafit katkısından sonra azalan miktarda olmuştur.

Şekil 4.18’de artan grafit miktarının DMA analizi sonucunda elde edilen depo ve kayıp elastik modüllerine olan katkısı gösterilmiştir. Burada % 20 grafit ilavesinin azami efektif katkı sağladığı görülmüştür.



Şekil 4. 17. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin depo ve kayıp elastik modülü



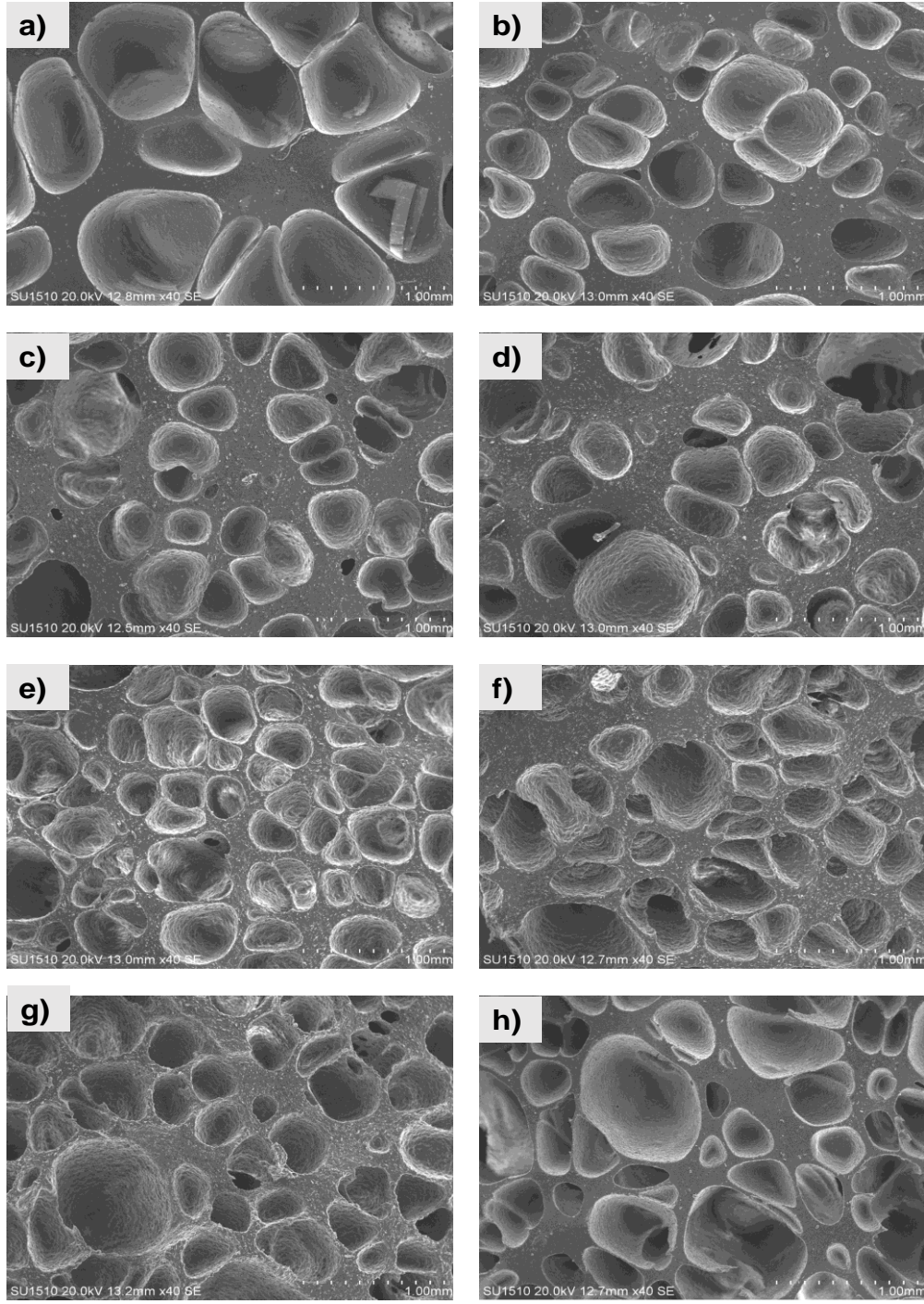
Şekil 4. 18. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin depo ve kayıp elastik modülü efektif artış oranları

Çizelge 4.6’te, “döküm grafitinden” elenmiş 20-32 μm partikül aralığındaki tozdan ağırlıkça % 20 katılarak üretilen RTV-2 köpük ile referans grafitten ağırlıkça %20 katılarak üretilen RTV-2 köpüğe ait depo ve kayıp elastik modülleri verilmiştir. Depo elastik modülü miktarı referans grafitte göre safsızlık miktarınca daha azdır.

Çizelge 4. 6. Ağırlıkça %20 “döküm grafiti” ve referans grafit katılarak üretilen RTV-2 köpüğün depo ve kayıp elastik modülü

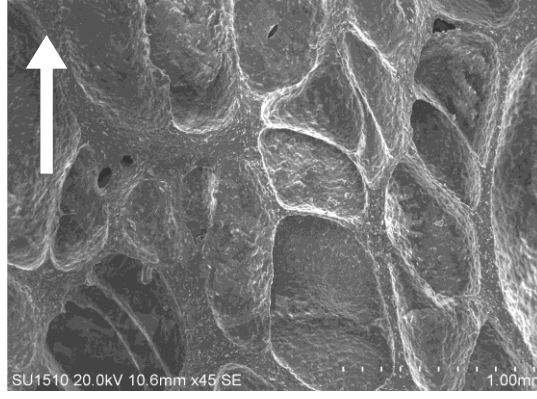
İlave Edilen Grafit Türü	Depo Elastik Modülü (Pa)	Kayıp Elastik Modülü (Pa)
20-32 μm döküm grafit tozu	87626.79	16281.52
Referans Grafit Tozu (CAS: 7782-42-5)	101139.82	28474.24

Döküm grafiti” ilavesi ile üretilen RTV-2 köpüklere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş fotoğrafları incelenerek grafit katkısının polimer matrise olan etkisi araştırılmıştır. Artan grafit miktarı ile matrisin grafit etkisi ile daha kaba bir hal aldığı görülmektedir. Ağırlıkça %20 oranında katılan referans grafitin matris tarafından daha iyi zarfladığı Şekil 4.19h’da görülmektedir.



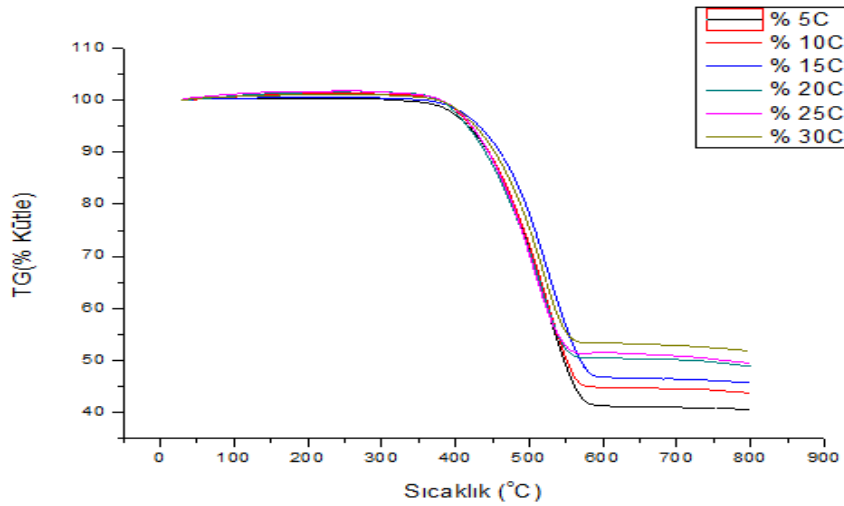
Şekil 4. 19. Değişen grafit katkı oranları ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunelerin köpürme yönüne dik kesitten 40x büyütme ile alınan SEM görüntüleri a) katkısız, b) % 5, c) % 10, d) % 15, e) % 20, f) % 25, g) % 30, h) % 20 referans grafit

Şekil 4.20’de köpürme yönüne paralel olarak kesilen %20 grafit (elenmiş döküm grafiti) katkılı RTV-2 polimer köpük numunenin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. 45x büyütmedeki görüntüde hücrelerin köpürme yönünde genişlediği görülmektedir. Köpürme yönü beyaz okla gösterilmiştir.



Şekil 4. 20. %20 grafit katkı oranı ile üretilen RTV-2 polimer köpük numunenin köpürme yönüne paralel kesitten 45x büyütme ile alınan SEM görüntüsü

Belirlenen grafit katkı miktarlarında üretilen RTV-2 polimer köpüklerin TGA analizi yapılarak termal dayanımları ve bozunmadan kalan madde miktarı karşılaştırılmıştır. Şekil 4.21’de verilen kütle kaybı-sıcaklık eğrilerinde görüldüğü üzere, artan katkı oranı ile birlikte bozunma sıcaklığında Katkısız RTV-2 polimer köpük haricinde önemli bir artış olmazken bozunmadan sonra kalan madde miktarı artmıştır. Ağırlıkça %5 grafit ilavesi termal dayanım artışı için yeterli olmuştur. Bozunma sonrası kalan madde miktarındaki artışın sebebi olarak da grafitin, polimer içerisinde RTV-2 polimer tarafından hapsedilmesi gösterilebilir.



Şekil 4. 21. Farklı miktarda grafit tozları katılarak üretilmiş RTV-2 köpük dolgu malzemesine ait TGA sonuçları

4.2. Dolgulu ve Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Çekirdek Yoğunlukları

Mekanik testler öncesinde alüminyum bal peteği yapıların yoğunluk değerleri, dolgusuz çekirdeklerin Bitzer (1997) yoğunluk hesabı ile teorik olarak Çizelge 4.7’de, dolgulu çekirdeklerin ise ASTM D3574-01 yoğunluk ölçüm standardına göre helyum

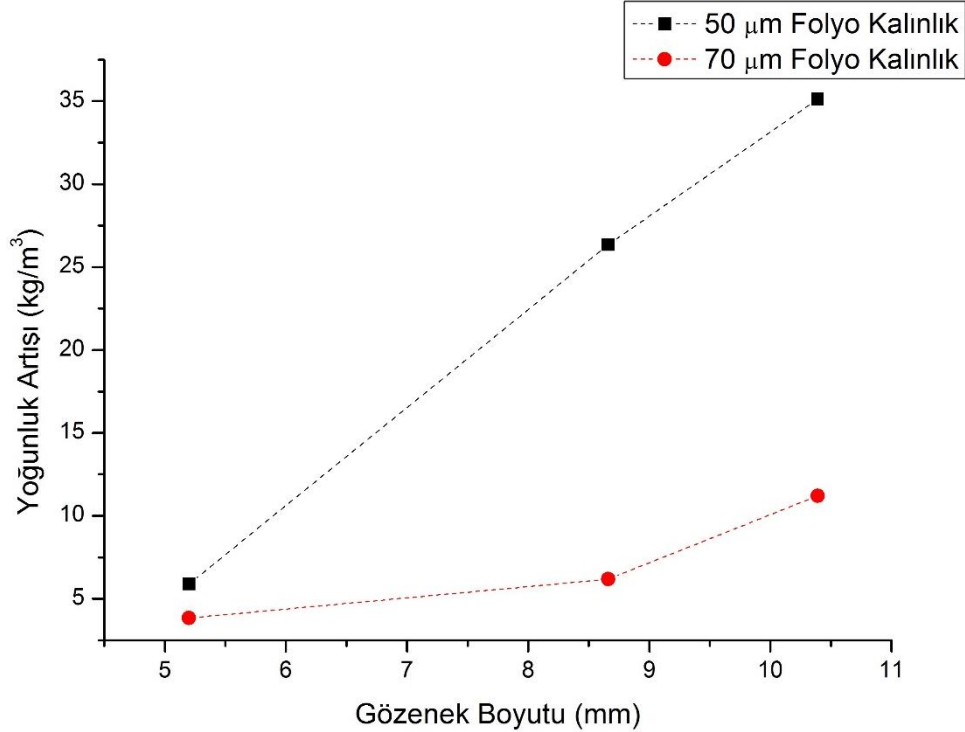
piknometresi ile ölçülen yoğunlukları Çizelge 4.8’de verilmiştir (Bitzer, 1997). Şekil 4.22’de alüminyum bal peteği çekirdeğinde hücre boyutu ve folyo kalınlığına bağlı RTV-2 köpük dolgusu ile yoğunluk artış grafiği verilmiştir. Hücre boyutundaki artış ile polimer köpük dolgu miktarı arttığından daha fazla artış göstermiştir.

Çizelge 4. 7. Dolgusuz bal peteği çekirdek Bitzer (1997) yoğunlukları

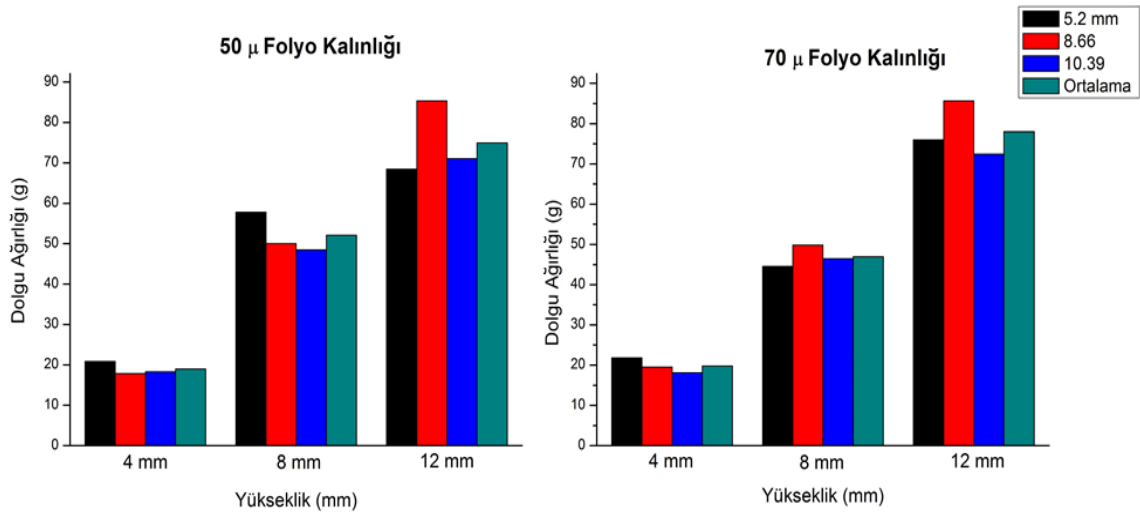
Hücre Boyutu	Folyo Kalınlığı	Bitzer Yoğunluk Değeri (kg/m ³)
5.2	50	70.018
5.2	70	98.025
8.66	50	42.043
8.66	70	58.860
10.39	50	35.042
10.39	70	49.059

Çizelge 4. 8. Dolgulu bal peteği çekirdek yoğunlukları

Hücre Boyutu	Folyo Kalınlığı	Piknometre Yoğunluk Değeri (kg/m ³)
5.2	50	75.901
5.2	70	101.863
8.66	50	68.387
8.66	70	65.037
10.39	50	70.161
10.39	70	60.269



Şekil 4. 22. Alüminyum bal peteği çekirdeğinde hücre boyutu ve folyo kalınlığına bağlı RTV-2 köpük dolgusu ile yoğunluk artışı



Şekil 4. 23. Polimer dolgulu bal peteği hücrelerde hücre boyutu ve yüksekliğe göre dolgu ağırlığı

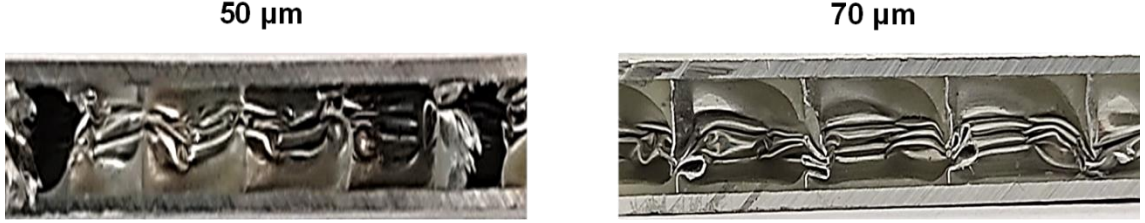
Alüminyum bal peteği hücrelerin grafit ile modifiye edilmiş RTV-2 polimer köpük ile doldurulması ile meydana gelen ağırlık artışı çekirdek yüksekliğine göre farklılık göstermiştir. Hücre boyutu ve folyo kalınlığı parametreleri açısından dolgu ağırlıkları yakın değerlerdedir. Şekil 4. 23'te görüldüğü üzere grafit modifiyeli RTV-2 köpük dolgu, çekirdek yüksekliği 4 mm olan sandviç yapılarda yaklaşık 20 gram, 8 mm olan yapılarda 50 gram ve 12 mm olan sandviç yapılarda 75 gram ortalama artışa sebep olmuştur.

4.3. Basma Test Sonuçları

Alüminyum bal peteği malzemesi için elde 0.5 mm/dakika hızla ASTM C365 standardına göre yapılan düzlem dışı basma testleri sonucunda gerilme-şekil değiştirme diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlar, üç bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgelerden birincisinde gerilim ile gerinim yaklaşık olarak doğrusal artmıştır. İkinci bölge plato bölgesinde geniş bir gerinim aralığında gerilmenin sabit olarak ilerlemiş ve burkulmalar meydana gelmiştir. Üçüncü bölgede ise gerilme hızla artmış ve bir yoğunlaşma (densifikasyon) bölgesi oluşmuştur. Pik gerilme değerinde oluşan ilk hasardan sonra plato bölgesinde başka hasar modlarına da rastlanmıştır. Alüminyum bal peteği yapısı azami etkin enerji noktasına kadar burkulmaya devam etmiştir. RTV-2 köpük dolgusunun, alüminyum bal peteği sandviç panellerin basma testlerinden alınan pik gerilimine, yoğunlaşma enerjisine ve spesifik enerji absorpsiyonu miktarına etkisi karşılaştırılmıştır. Alüminyum bal peteği sandviç panellere düzlem dışı basma testlerinde 5.2, 8.66 ve 10.39 mm hücre açıklığı, 50µm ve 70 µm folyo kalınlığı ile 4 mm, 8 mm, 12 mm çekirdek yüksekliği parametre olarak seçilmiştir.

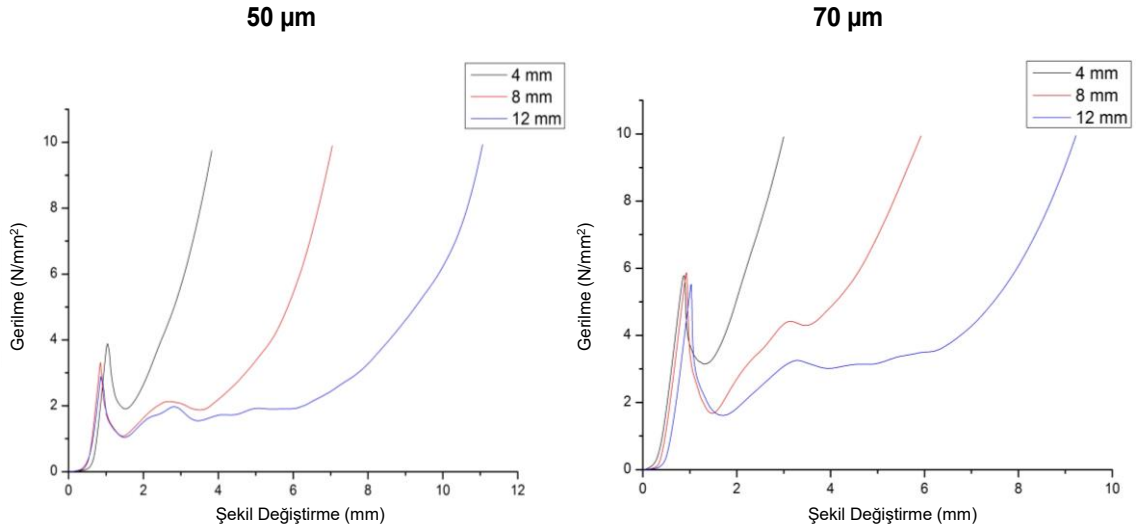
4.3.1. Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçları

Dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç panellerde düzlem dışı basma gerilmesi altında petek kısmın hücre duvarları Şekil 4.24’de görüldüğü üzere burkulmaya uğrar. Folyo kalınlığı burkulma bölgelerinde eklem genişliğini değiştirmiştir.



Şekil 4. 24. Hücre boyutu 5.2 mm, çekirdek yüksekliği 8 mm, folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı basma testi sonrasında panelin kesit görüntüsü

Hücre boyutu 5.2 mm, folyo kalınlığı 50 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç panellere yapılan düzlem dışı basma testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.25’de verilmiştir. Çekirdek yüksekliğinin artışı ile birlikte burkulma sonucu katlanma sayısı artmıştır.

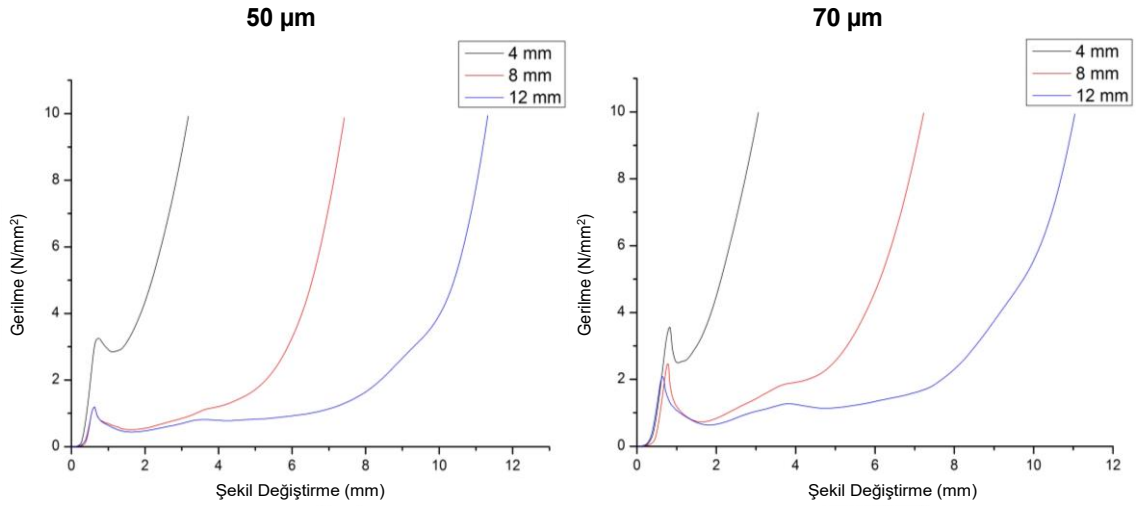


Şekil 4. 25. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri

Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrilerinde pik gerilimi, değeri çekirdek yüksekliği en az olan bal peteği numunede daha fazladır. Bal peteği hücre duvarları burkulma hasarı göstermektedir. Çekirdek yüksekliği meydana gelen hasar modu sayısı artmaktadır. Şekil 4.25’de folyo kalınlığı 70 µm olan dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç panellere

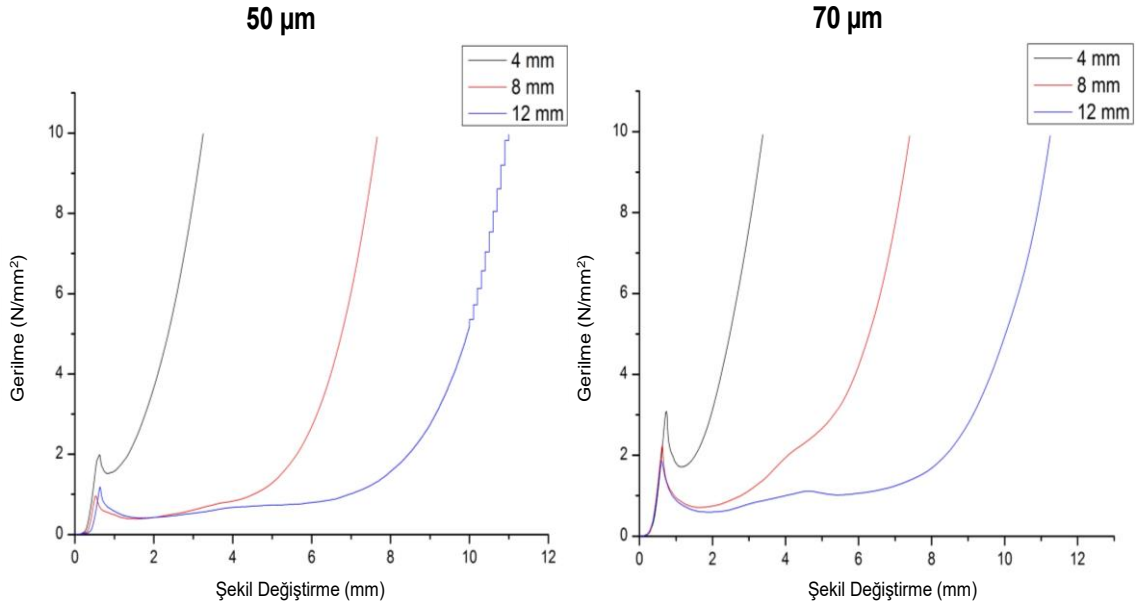
yapılan düzlem dışı basma testi gerilim-gerinim eğrilerinde meydana gelen burkulma sayısındaki artış çekirdek yüksekliği ile paralellik göstermektedir. Hücre duvarlarının kalın olmasından dolayı yoğunlaşma gerini daha düşüktür.

Şekil 4.26'da hücre boyutu arttıkça pik gerilim değerleri azalmıştır. 5.2 mm hücre boyutundaki artan çekirdek yüksekliği arttıkça hasar oluşum sayısı artmıştır. Folyo kalınlığı 70 μm olan numunelerde yoğunlaşma, daha düşük şekil değiştirme miktarında başlamıştır.



Şekil 4. 26. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri

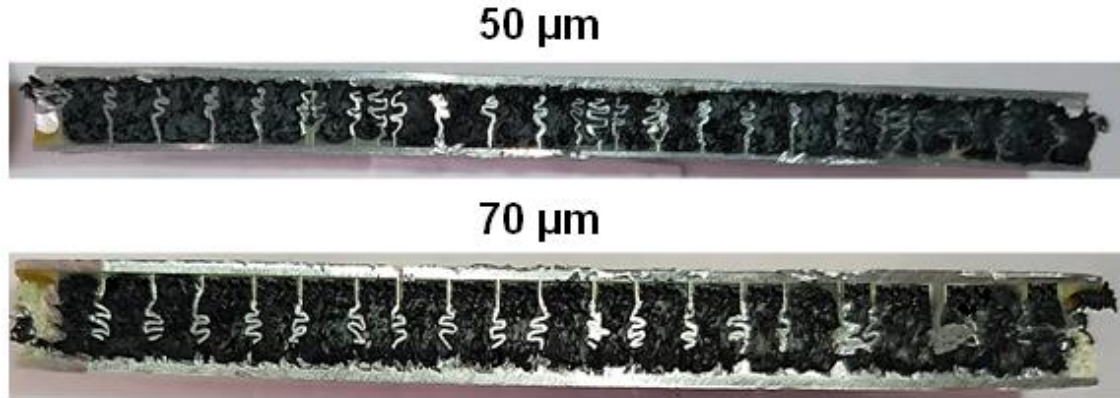
Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, hücre boyutu 10.39 mm olan alüminyum bal peteği yapılar pik gerilim değerleri 5.2 ve 8.66 mm değerlerine sahip hücre boyutundaki bal peteği yapılardan daha düşüktür. Pik gerilmesindeki şekil değiştirme değerinden sonra oluşan ikincil piklerin sayısı da artan hücre boyutu ile azalmıştır.



Şekil 4. 27. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri

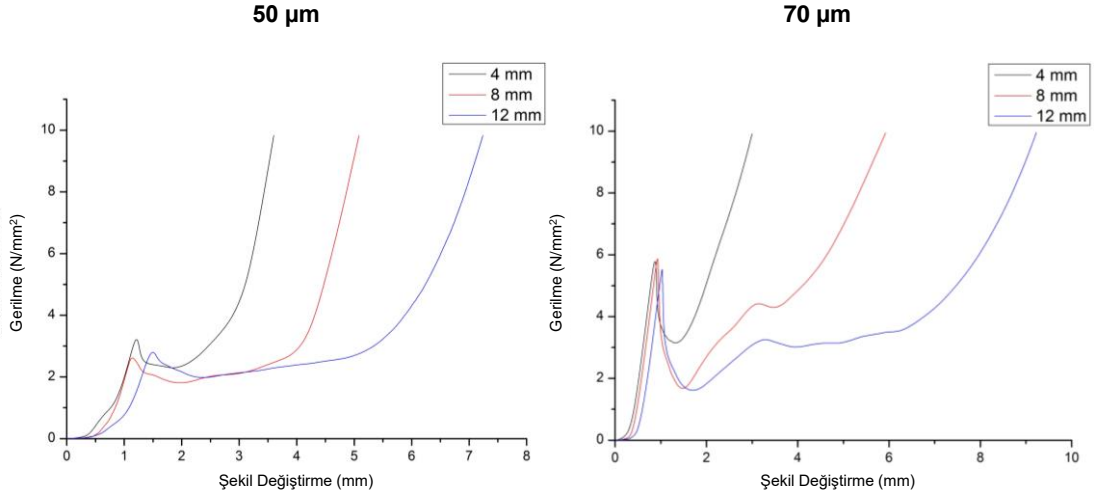
4.3.2. Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçları

RTV-2 köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panellere yapılan düzlem dışı basma testinde bal peteği sandviç paneller, Şekil 4.28’de de görüldüğü üzere dolgunun etkisi ile daha az yoğunlaşma göstermiştir.



Şekil 4. 28. Hücre boyutu 5.2 mm, çekirdek yüksekliği 8 mm, folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgulu alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı basma testi sonrasında panelin kesit görüntüsü

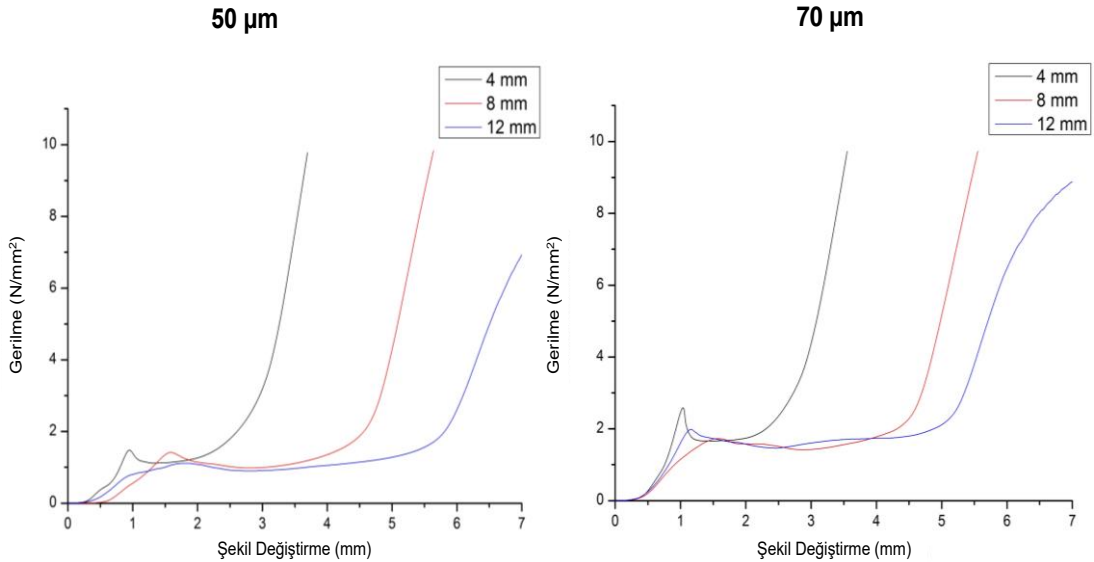
Şekil 4.29’da verilen hücre boyutu 5.2 mm dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrilerinde pik gerilim değerlerinde bir miktar azalırken pik gerilim değerine karşılık gelen şekil değiştirme miktarı artmıştır. Hızlı gerilim artışına kadar plato bölgelerinde görülen ikincil tepe sayısı (ikincil hasar oluşumları) azalmıştır.



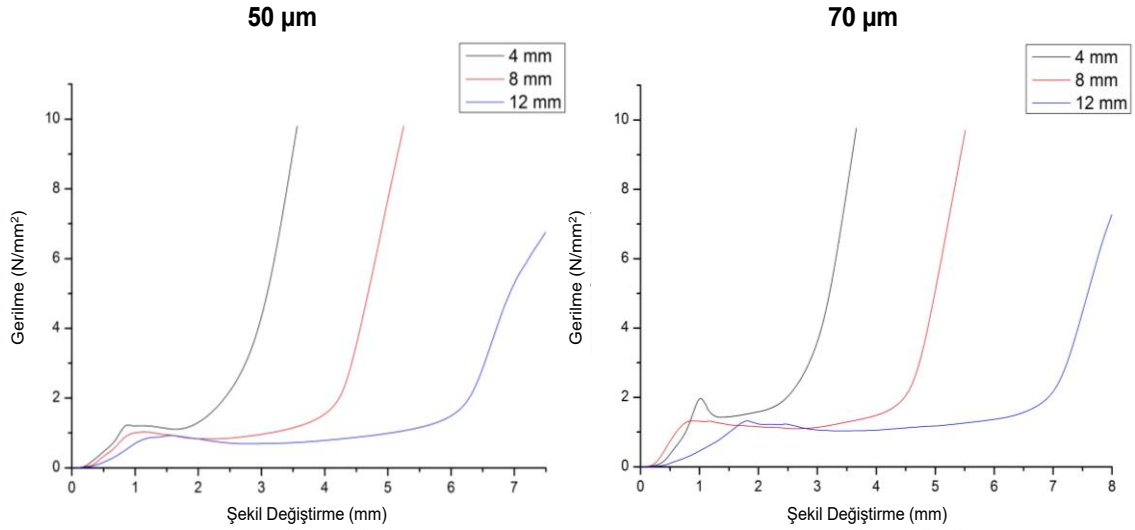
Şekil 4. 29. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.30'da 8.66 mm hücre boyutuna sahip dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, dolgusuz muadillerine nazaran daha düşük pik gerilim değerlerinde kalıcı deformasyona uğramıştır. Bununla birlikte pik gerilim değerindeki şekil değiştirme miktarı artmıştır.

Hücre boyutu 10.39 mm alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.31'de verilmiştir. Artan hücre boyutu ile birlikte sandviç panelin pik gerilim değeri ile plato gerilim değeri birbirine yaklaşmıştır.



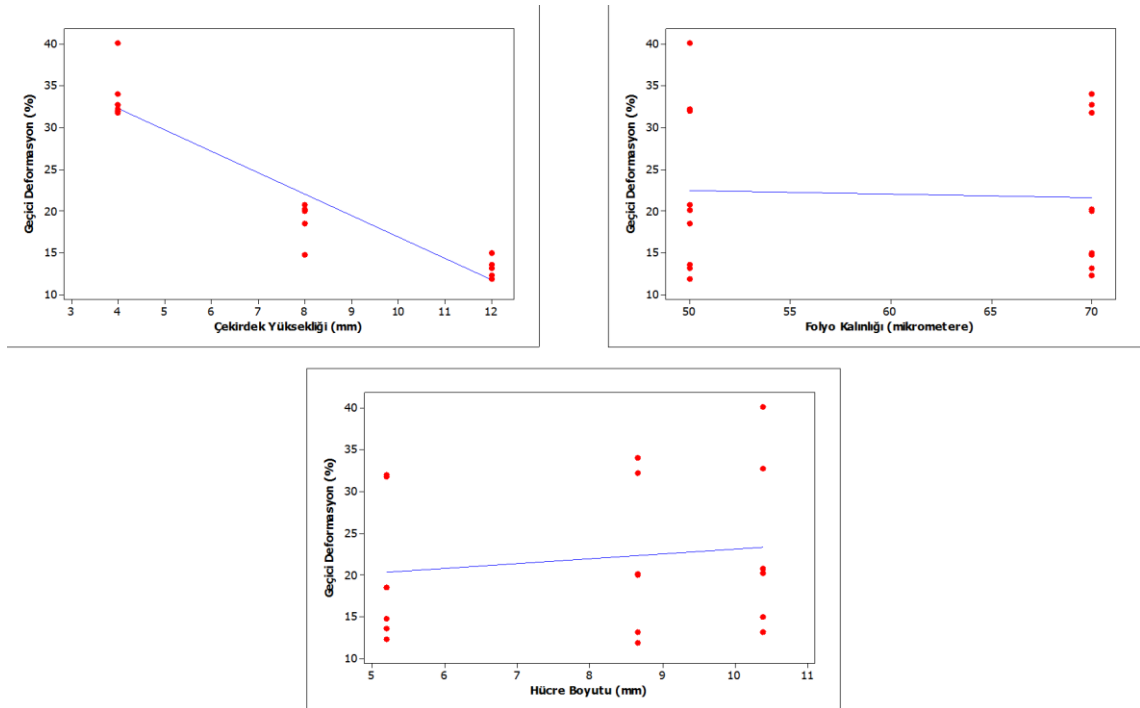
Şekil 4. 30. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değiştirme eğrileri



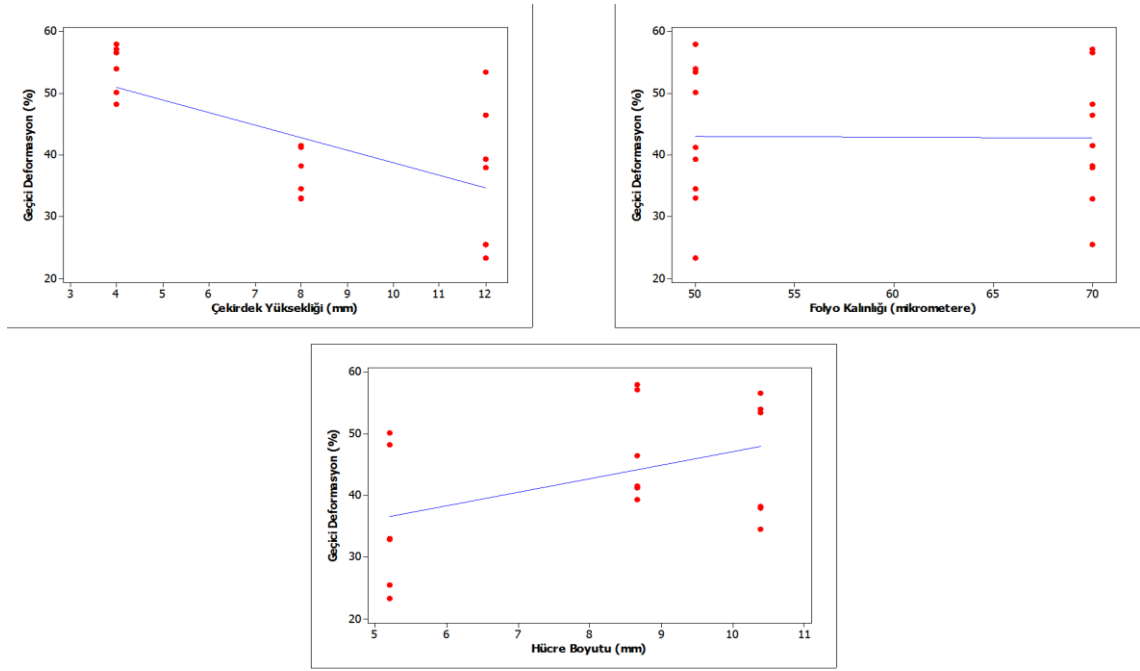
Şekil 4. 31. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgulu alüminyum bal peteği basma gerilim-şekil değişirme eğrileri

4.3.3. Alüminyum Bal Peteği Basma Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Basma testlerinin tamamlanmasından sonra yapılan yükseklik ölçümlerinde boş ve dolu numunelerin geçici deformasyon miktarı ölçülmüş ve Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'teki grafiklerde parametreler ile ilişkisi verilmiştir. Yüksek hücre boyutu ve düşük çekirdek yüksekliğinde geçici deformasyon miktarı artma eğilimindedir.

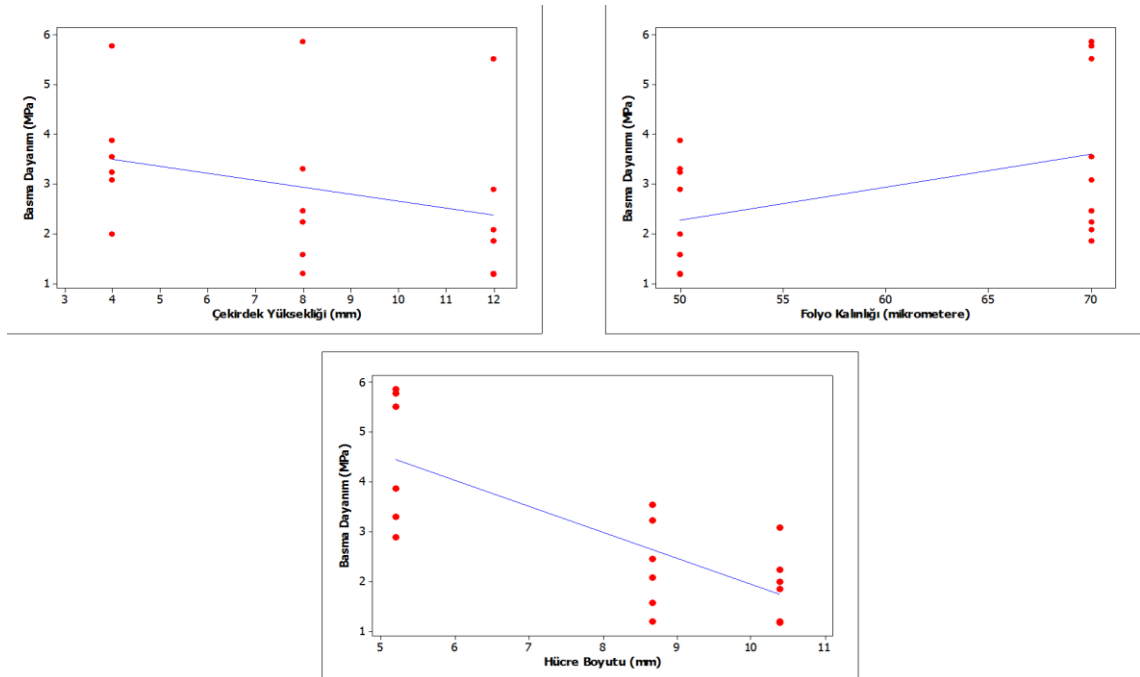


Şekil 4. 32. Boş bal peteği sandviç panellerin geçici deformasyon miktarı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

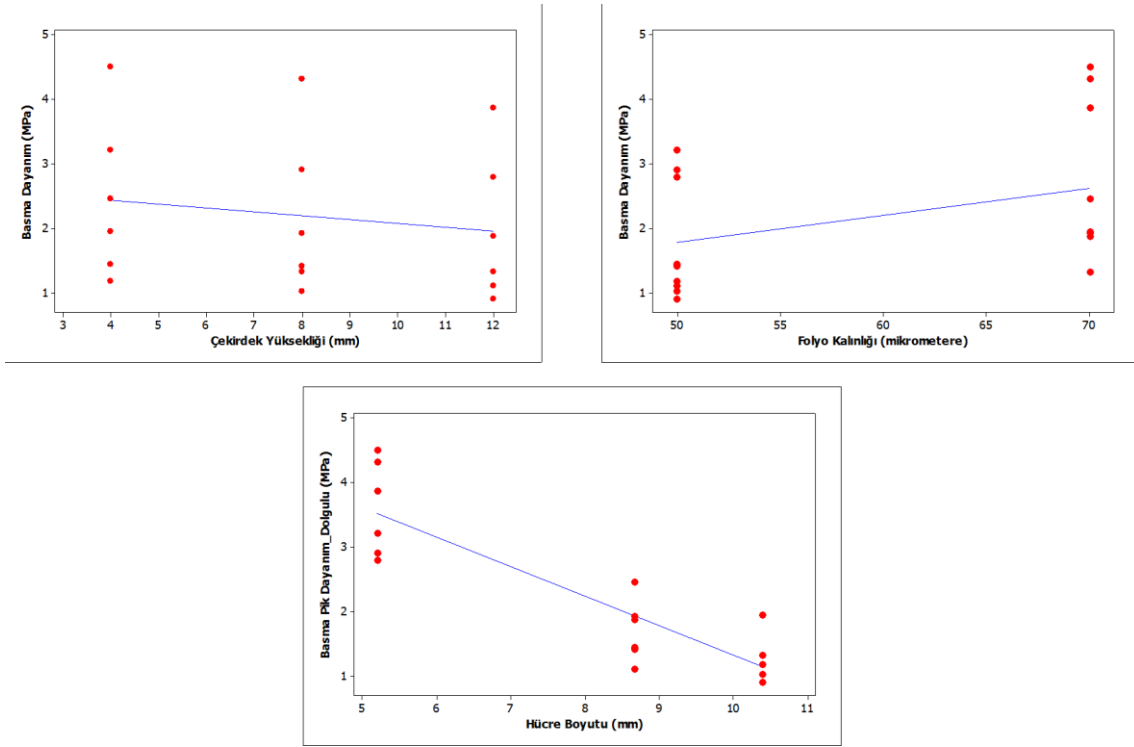


Şekil 4. 33. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin geçici deformasyon miktarı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

Basma testleri sonucunda elde edilen basma gerilim-gerinim eğrileri incelenerek sandviç panellerin basma mukavemetlerin hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ile ilişkileri incelenmiş ve Şekil 4.34 Şekil 4.35'te verilmiştir. Basma dayanımı, düşük hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ile artış göstermiştir.

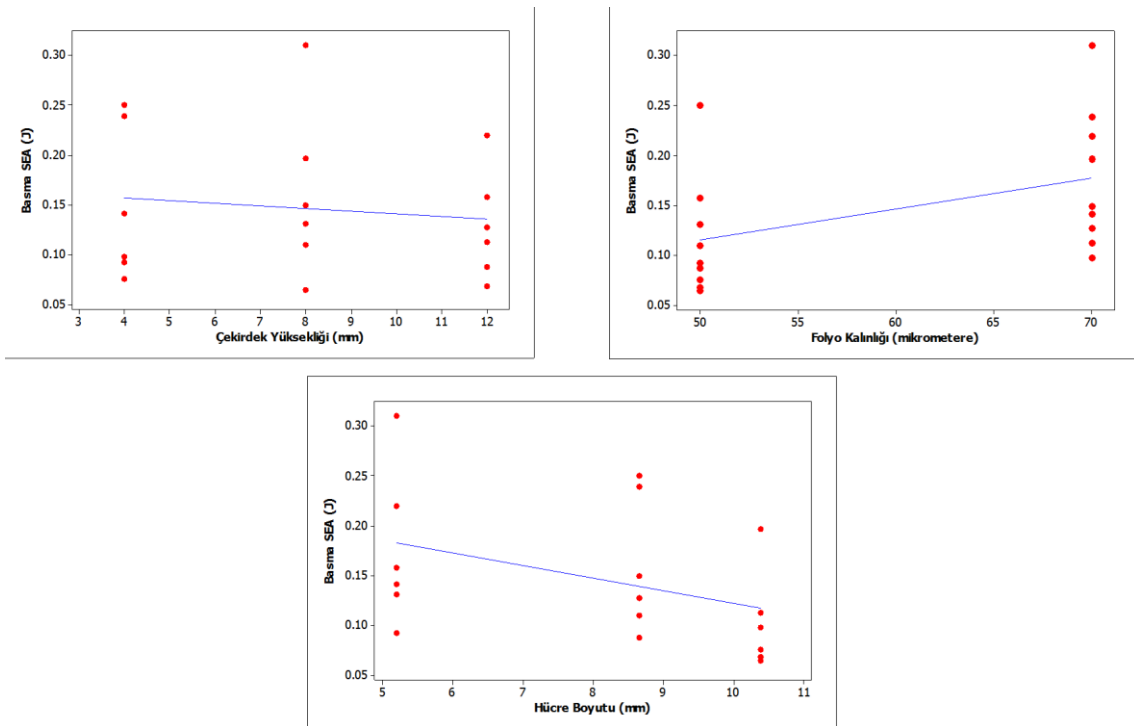


Şekil 4. 34. Boş bal peteği sandviç panellerin basma dayanımı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

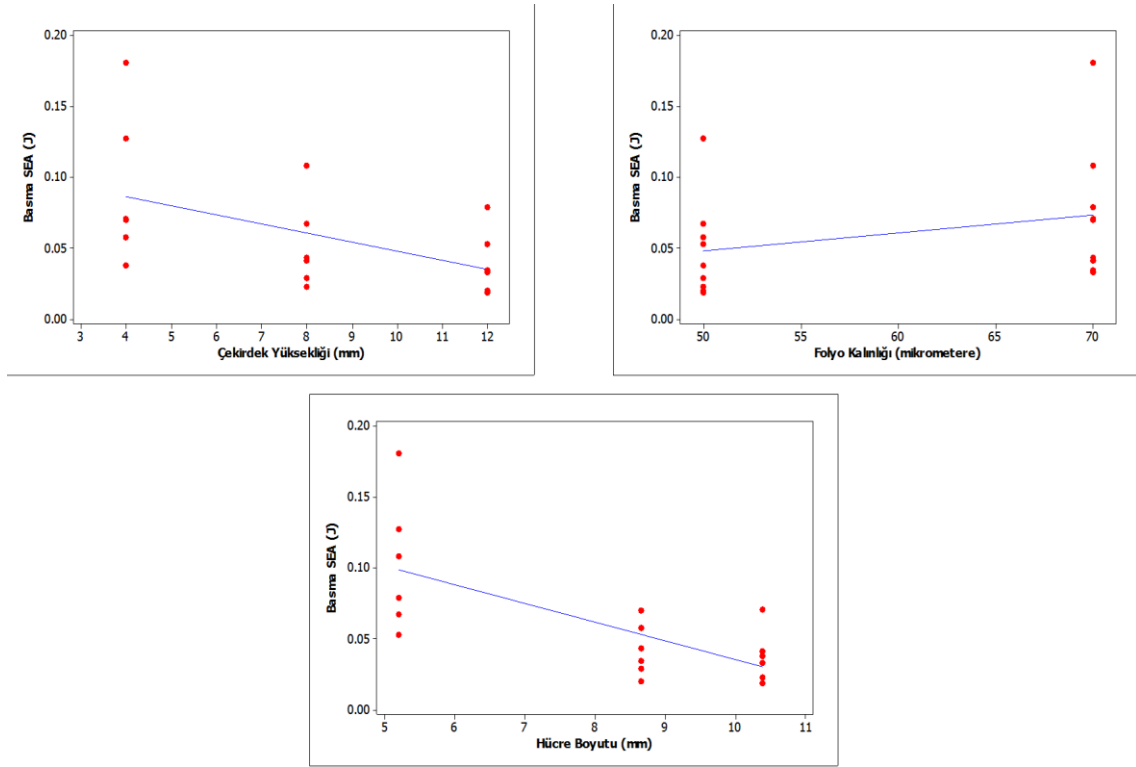


Şekil 4. 35. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin basma dayanımı, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

Spesifik enerji absorpsiyonu (yoğunlaşma başlangıç gerinim değerine kadar) değerler hesaplanmış ve Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4. 36. Boş bal peteği sandviç panellerin basma spesifik absorpsiyonu enerjisi (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi



Şekil 4. 37. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin basma spesifik absorpsiyonu enerjisi (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

4.4. Makro İndentasyon Test Sonuçları

Makro indentasyonda 1 inç (~25.4 mm) çapında yarı küresel uç kullanılarak, quasi-statik şartlarda 2 mm/ dakika hızla dört tarafından mesnetlenmiş alüminyum bal peteği sandviç panel, basma yükleri altında penetrasyon gerçekleştirilmiştir. Üniversal basma test cihazında kuvvet ve şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

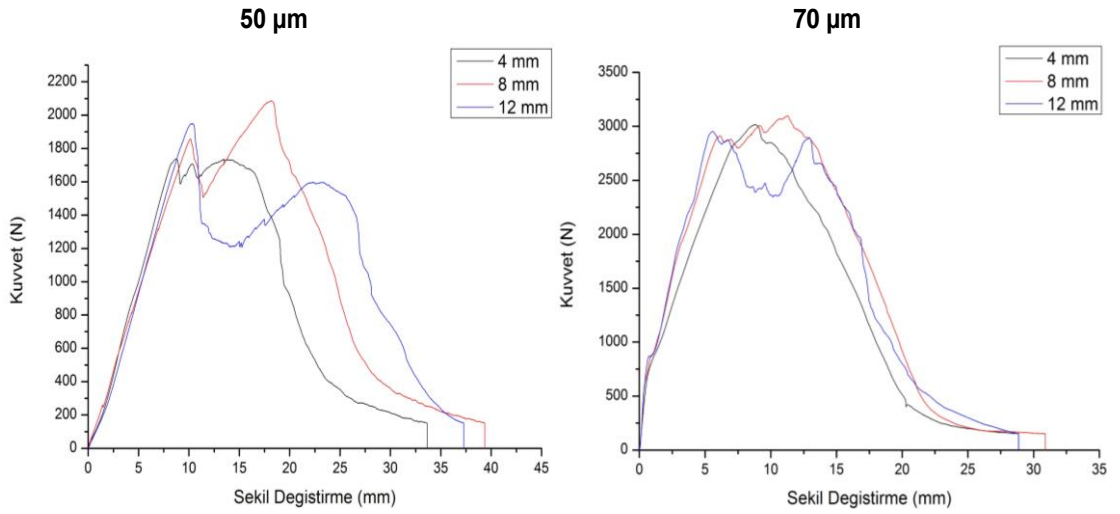
4.4.1. Dolgusuz Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçları

Makro indentasyon testlerinde dört tarafından mesnetlenmiş dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç paneller bölgesel bir deformasyonla penetrasyona uğramıştır. Şekil 4.38’de görüldüğü üzere, dolgusuz alüminyum bal peteği sandviç panellerde hasar, batıcı uç çapı ile sınırlı kalmıştır. Hasar bölgesi çevresinde hücre duvarlarının burkulması ve eğilme sınırlıdır.



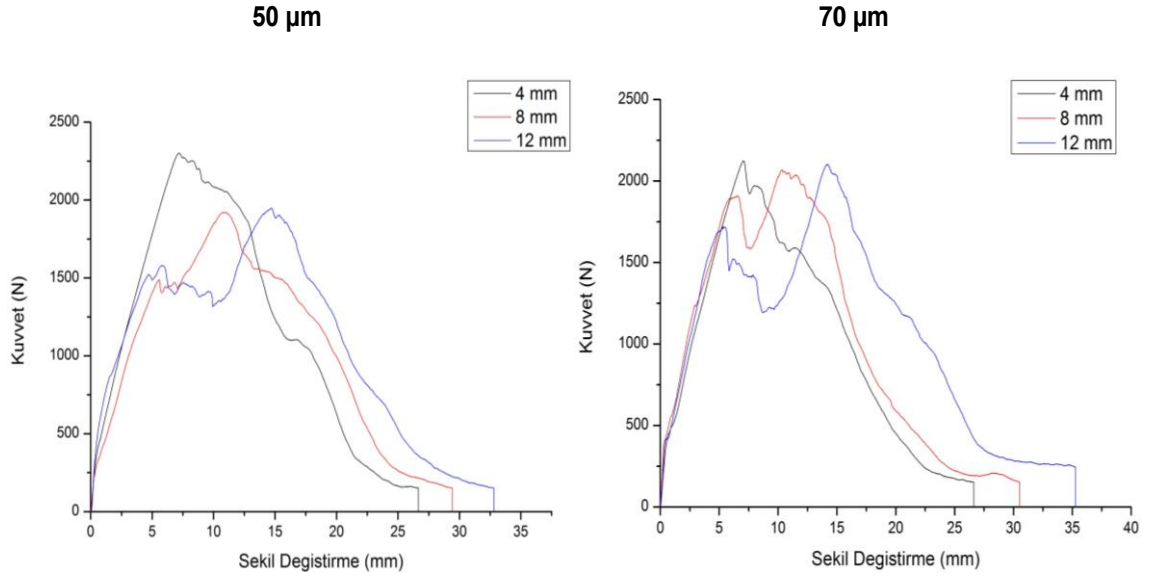
Şekil 4.38. Hücresi boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı makro indentasyon sonrasında panelin kesit görüntüsü

Şekil 4.39’da verilen, 5.2 mm hücre boyutuna sahip alüminyum bal peteği sandviç panellerin makro indentasyonu ile elde edilen kuvvet-şekil değiştirme grafiklerinde, batıcı ucun batma derinliğine bağlı olarak yoğunlaşmanın etkileri görülmektedir. Artan çekirdek yüksekliği yoğunlaşma sürecini geciktirmiştir. Folyo kalınlığındaki artış, batmaya karşı direnci artırmıştır.

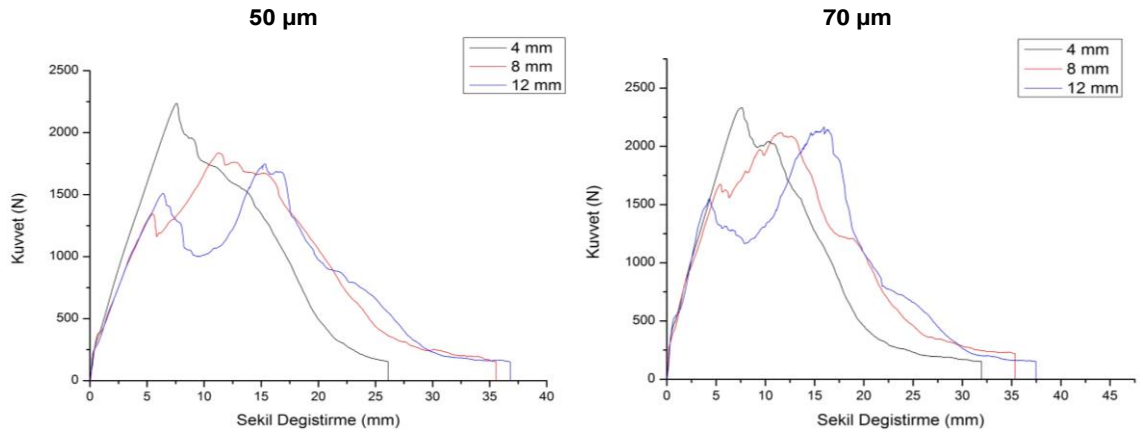


Şekil 4.39. Hücresi boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilen kuvvet-şekil değiştirme grafiklerinde çekirdek yüksekliği 4mm olan sandviç panellerde batıcı uç çapından dolayı yoğunlaşma etkileri 8 mm ve 12 mm yükseklikteki paneller kadar belirgin değildir.



Şekil 4. 40. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri



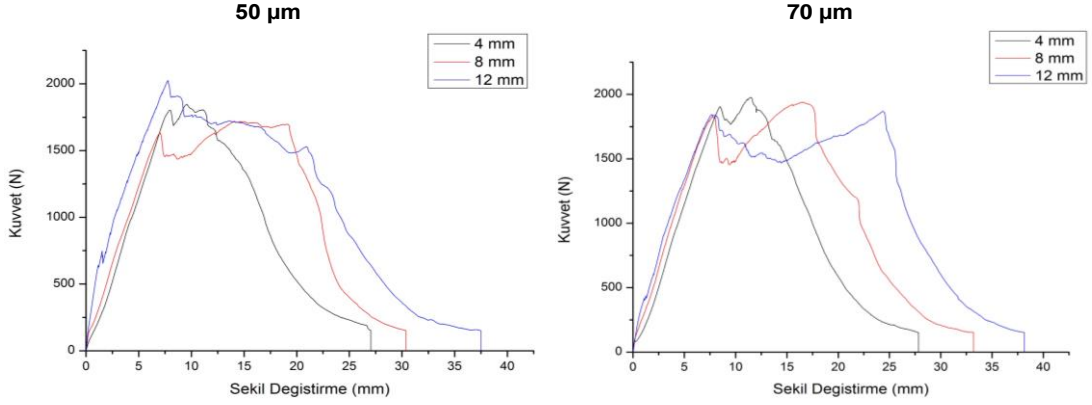
Şekil 4. 41. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgunsuz alüminyum bal peteği makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri

4.4.2. Polimer Dolgulu Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçları

Polimer dolgulu bal peteği yapılar da makro indentasyon sonucu penetrasyon ile birlikte eğilme de belirgin olarak oluşmuştur. Şekil 4.42’de hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 μm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan dolgulu alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı makro indentasyon sonrasında panelin kesit görüntüsü verilmiştir. Dolgulu sandviç panel penetrasyonla birlikte eğilme davranışı göstermiştir.

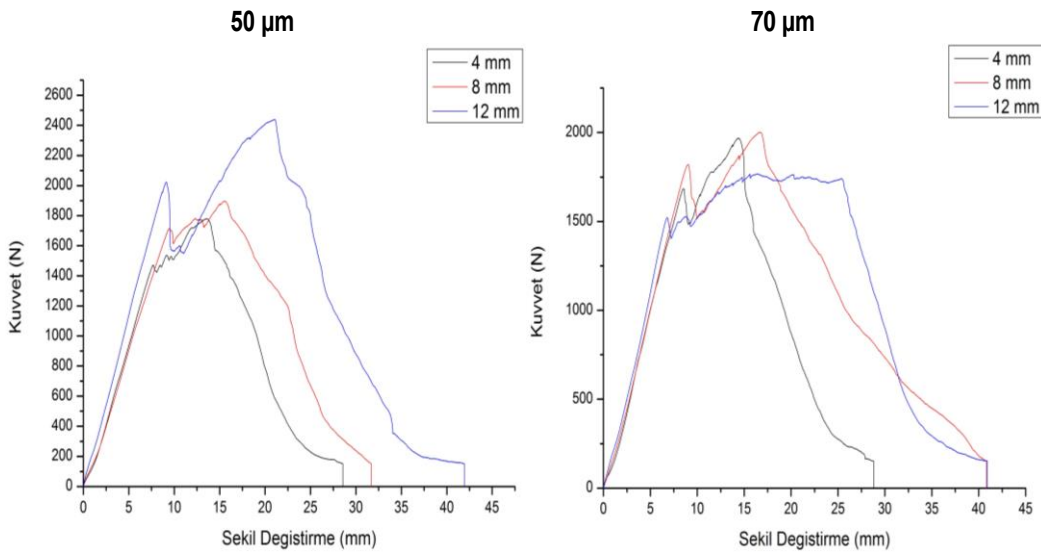


Şekil 4. 42. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan dolgulu alüminyum bal peteği sandviç düzlem dışı makro indentasyon sonrasında panelin kesit görüntüsü



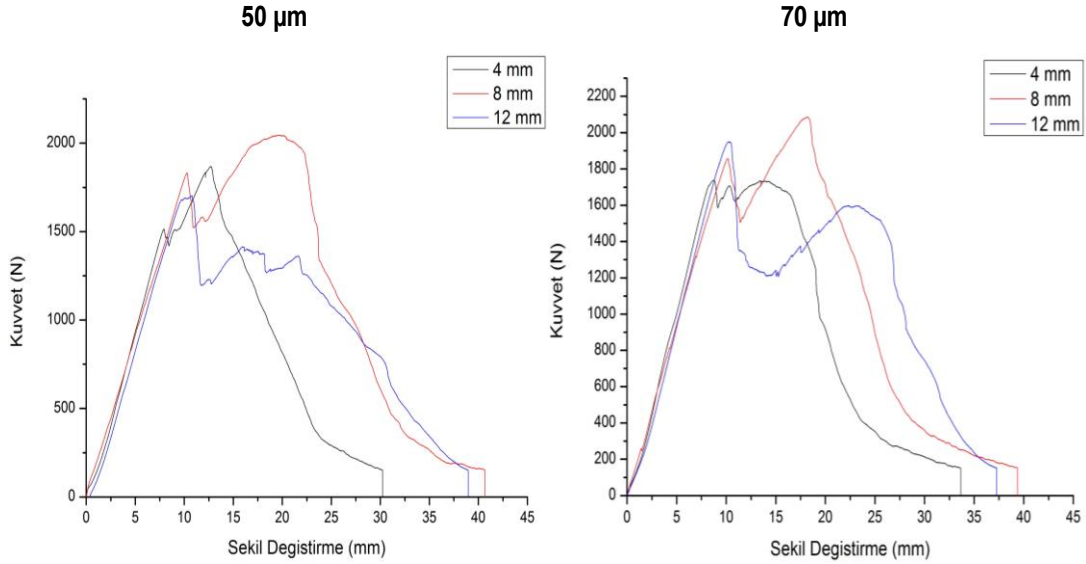
Şekil 4. 43. Hücre boyutu 5.2 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri

Hücre boyutundaki artış ile dolgulu panellerde ilk hasar oluşumundan sonra polimer yırtılmaya karşı direnç göstermiştir. 4mm çekirdek kalınlığına sahip alüminyum bal peteği sandviç panellerde köpük dolgusu ile birlikte Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de görüldüğü üzere kuvvet-şekil değiştirme eğrisinde ikincil bir pik gözlenmemiştir.



Şekil 4. 44. Hücre boyutu 8.66 mm folyo kalınlığı 50 µm ve 70 µm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değiştirme eğrileri

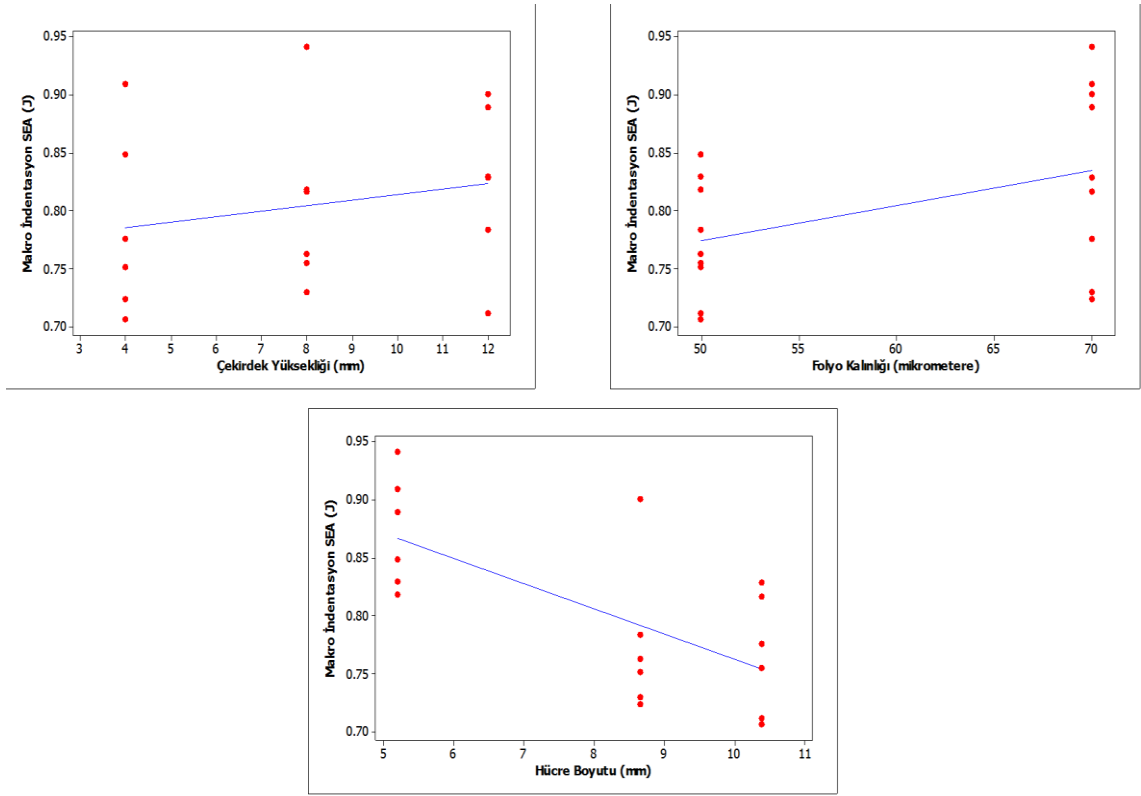
Şekil 4.45’de 50 μm folyo kalınlığında 8 mm çekirdek yüksekliğinde, 70 μm folyo kalınlığında 4 ve 12 mm çekirdek yüksekliğinde ilk hasar oluşumundan sonra etkin bir yoğunlaşma ve yırtılma direncinden dolayı, panel topyekûn eğilme davranışı göstermiştir.



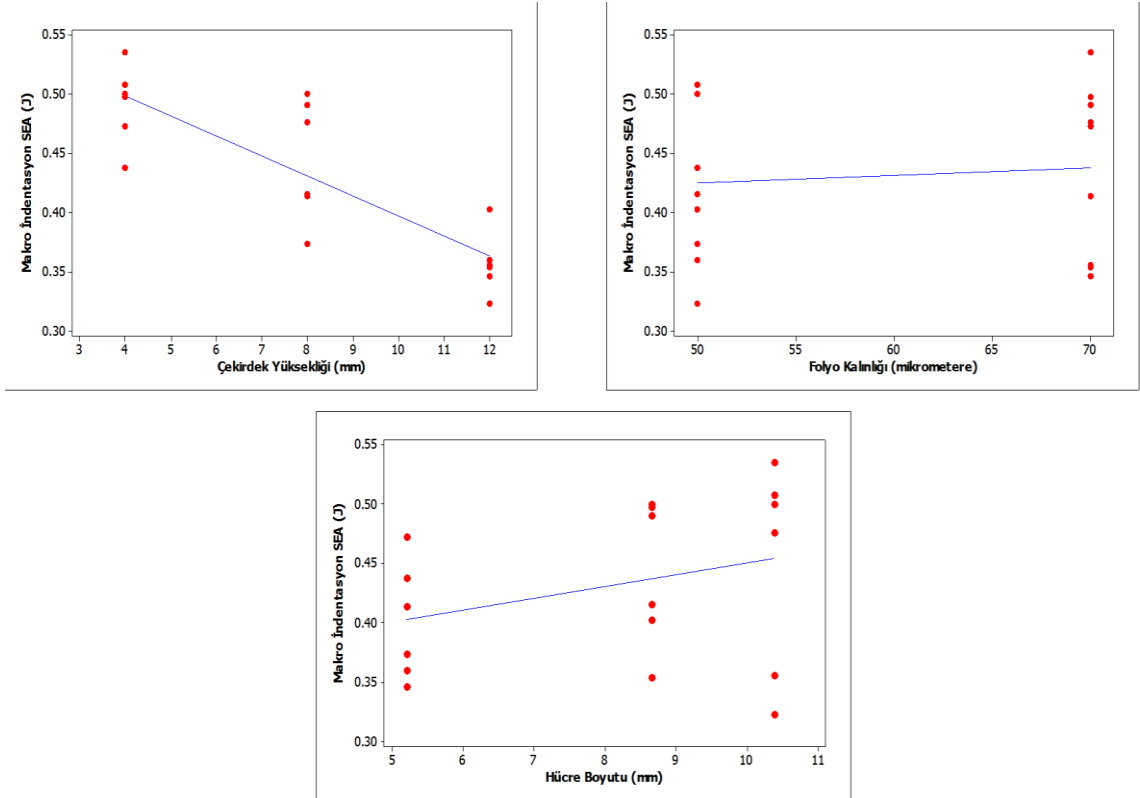
Şekil 4. 45. Hücre boyutu 10.39 mm folyo kalınlığı 50 μm ve 70 μm olan dolgulu alüminyum bal peteği düzlem dışı makro indentasyon kuvvet-şekil değıştirme eğrileri

4.4.3. Alüminyum Bal Peteği Makro İndentasyon Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Makro indentasyon testlerinin tamamlanmasından sonra kuvvet – yer değıştirme eğrileri altında kalan alanlar hesaplanarak spesifik enerji absorpsiyonu (SEA) miktarı bulunmuştur. Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’deki grafiklerde makro indentasyon testlerinde numunelerin absorbladığı enerji miktarının hücre boyutu, çekirdek yüksekliği ile ilişkisi verilmiştir. Polimer köpük dolgusu ile birlikte spesifik enerji absorpsiyonu, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği açısından asgari değerlerden azami değerlere evrilmiştir.



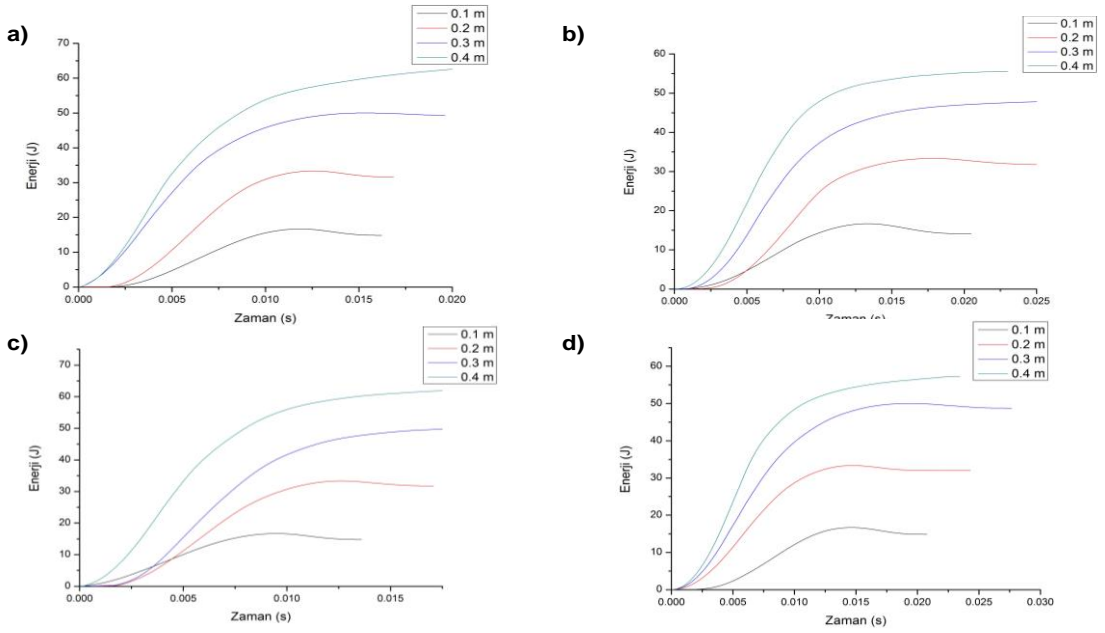
Şekil 4. 46. Boş bal peteği sandviç panellerin makro indantasyon spesifik enerji absorpsiyonu (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi



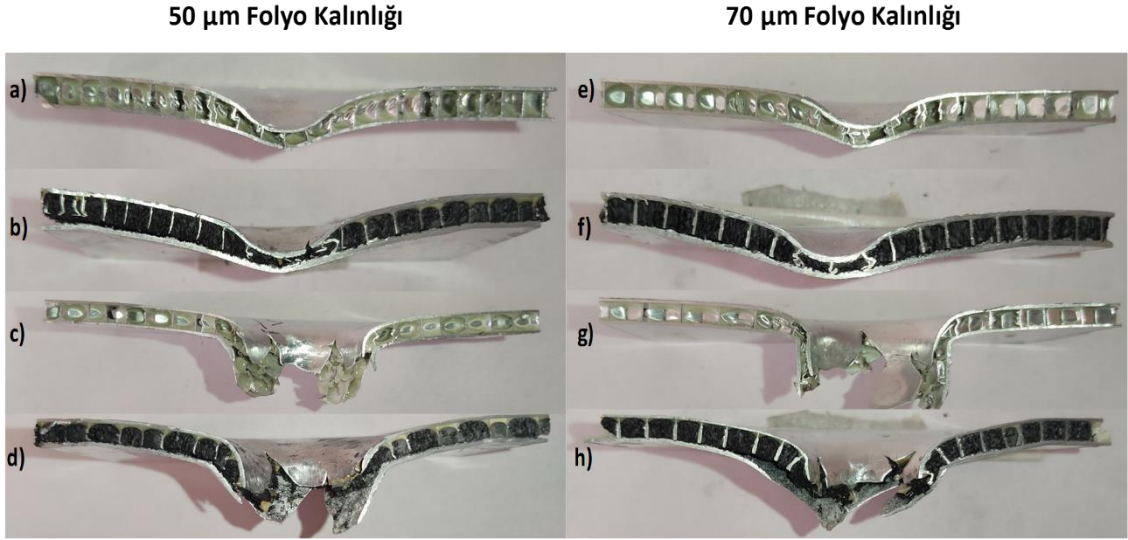
Şekil 4. 47. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin makro indantasyon spesifik enerji absorpsiyonu (SEA), hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

4.5. Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları

Düşük hızlı darbe testleri 1inç (~25.4 mm) yarı küresel uç ile 17 kg ağırlığındaki vurucu tertibatın düşürülmesi ile yapılmıştır. Şekil 4.48’de hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan panellere ait darbe enerji zaman eğrileri ile Şekil.41’de darbe numunelerin hasar kesitlerine ait fotoğraflara yer verilmiştir. Köpük dolgulu panellerin darbe süresince temas süresi artmıştır. Şekil.49’da verilen darbe hasar kesitlerinde artan folyo kalınlığı ile birlikte hasar bölgesi daralmıştır. Bu parametrelerde köpük dolgu ile üretilen numunelerde, deformasyon bölgesinden itibaren eğilmeye başlamıştır. Bal peteği hücre duvarlarındaki burkulma azalmıştır.

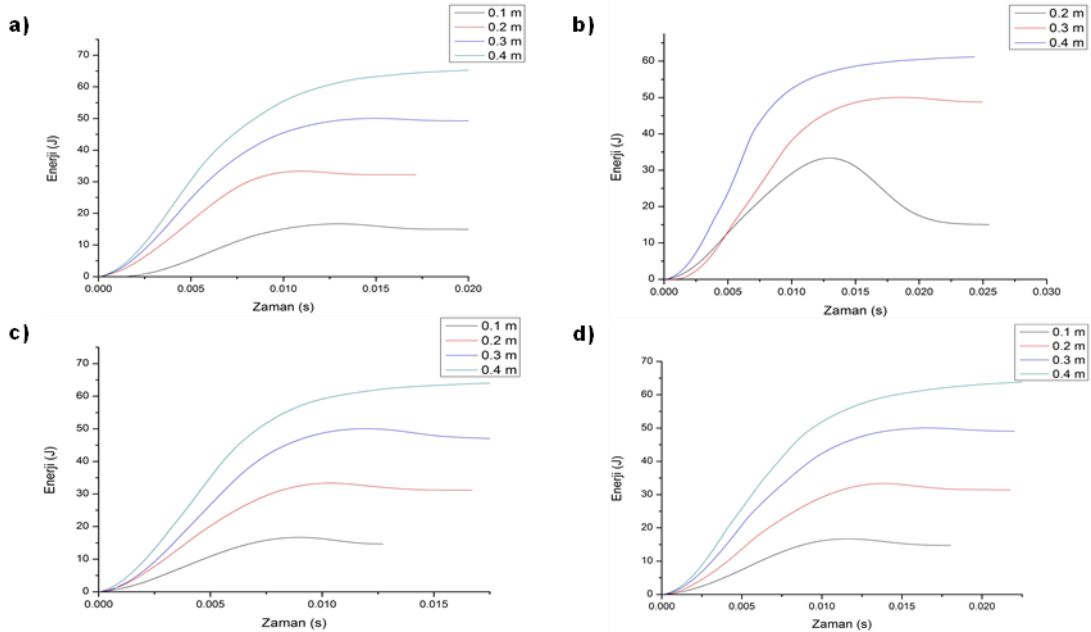


Şekil 4. 48. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunuz d) 70 µm-dolgulu

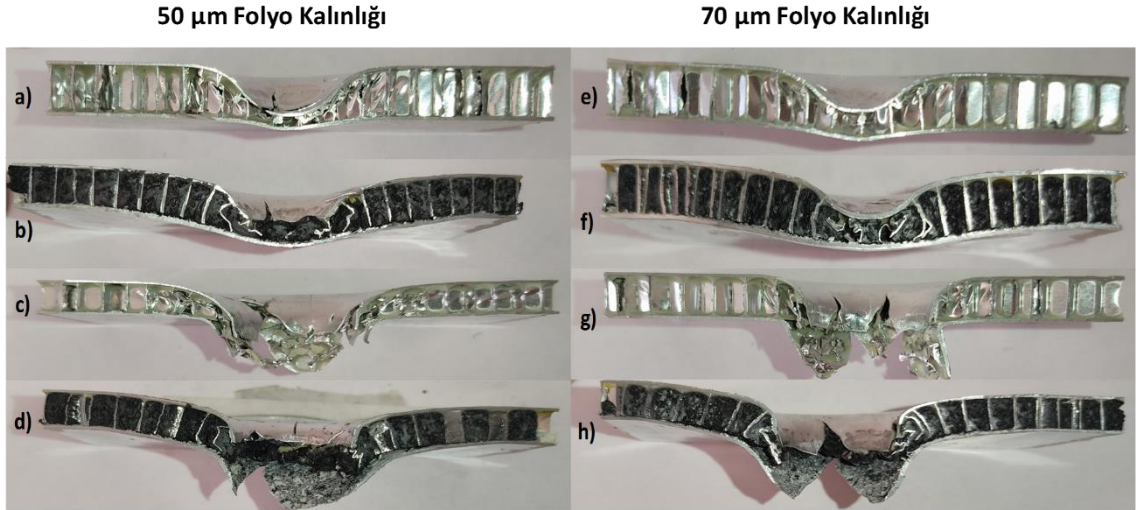


Şekil 4. 49. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 66.7 J, (d) dolgulu 50.03 J, (h) dolgulu 66.7 J

Şekil 4.50’de enerji- zaman eğrileri ile Şekil 4.51’de darbe hasar kesit görüntüsü verilen 5.2 mm hücre boyutu 8 mm çekirdek yüksekliğine sahip panellerde, köpük dolgulu paneller vurucu uç için tramlen etkisi oluşturmuştur. Artan folyo kalınlığı ile birlikte hasar bölgesi daralmıştır. Dolgulu numunelerde bal peteği çekirdek hücre duvarlarında burkularak hasar gören hücre, darbe ile penetrasyona uğrayan bölge ile sınırlı kalmıştır.

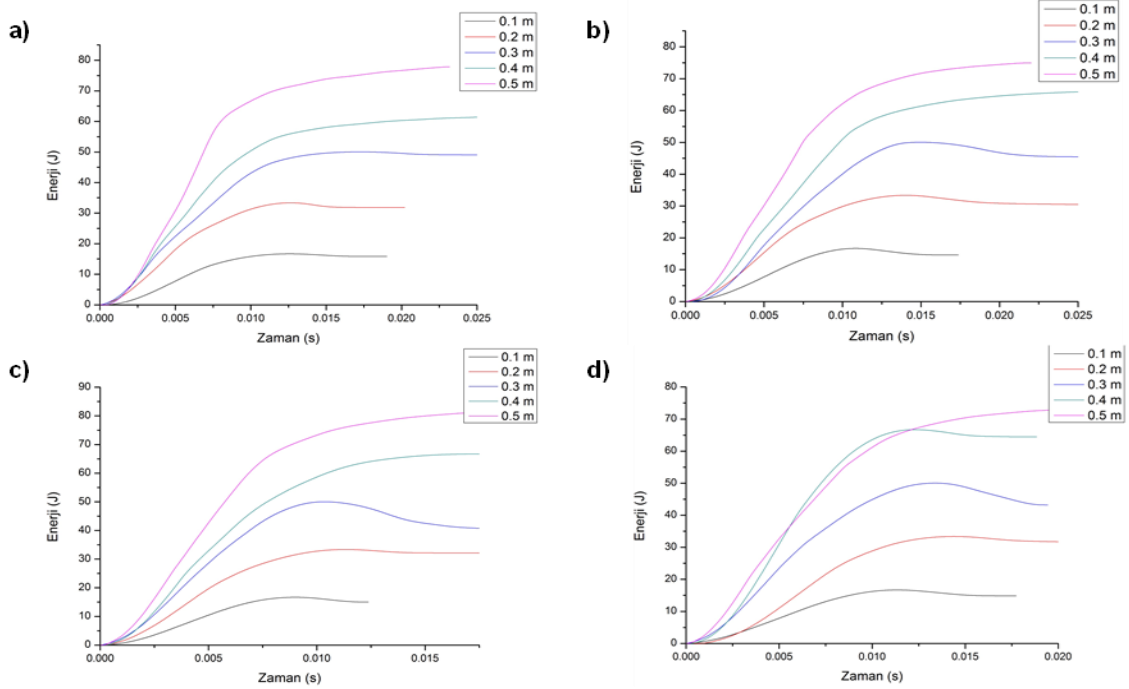


Şekil 4. 50. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

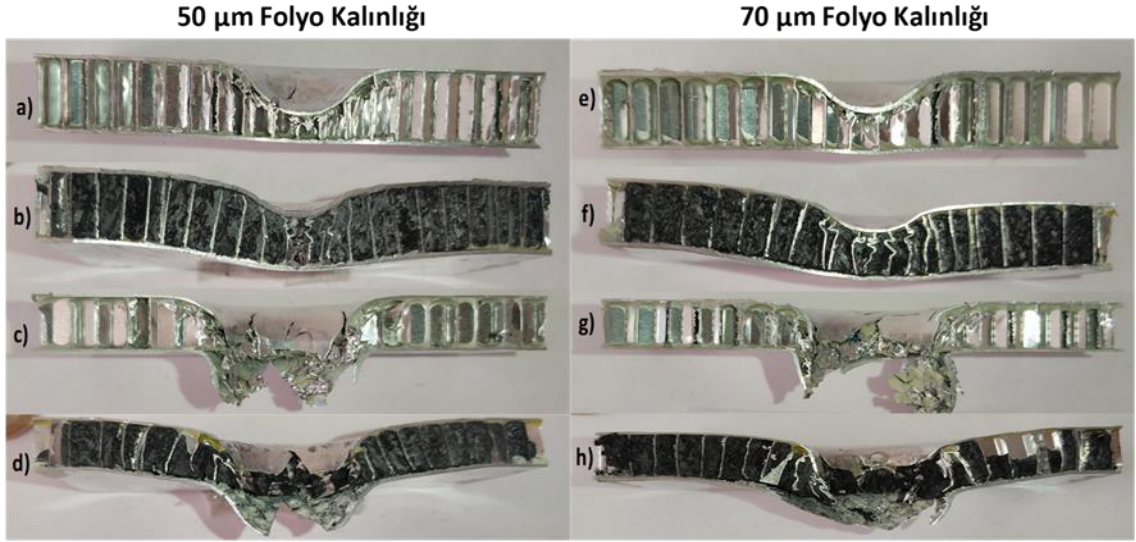


Şekil 4. 51.Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 66.7 J, (d) ve (h) dolgulu 66.7 J

Şekil 4.52’de enerji-zaman grafikleri ve Şekil 4.53’te hasar kesit görüntüleri verilen 5.2 mm hücre açıklığına ve 12 mm çekirdek yüksekliğine sahip sandviç panellerde, artan folyo kalınlığı hasara uğrayan alanı daraltmış olup dolgulu olarak üretilen numunelerde deformasyon derinliğinde azalma meydana gelmiştir. Dolgulu numunelerde darbe hasarı alt plakaya kadar hasrın iletilmesine sebep olmuş, hasar bölgesi etrafında numuneyi eğmiştir.

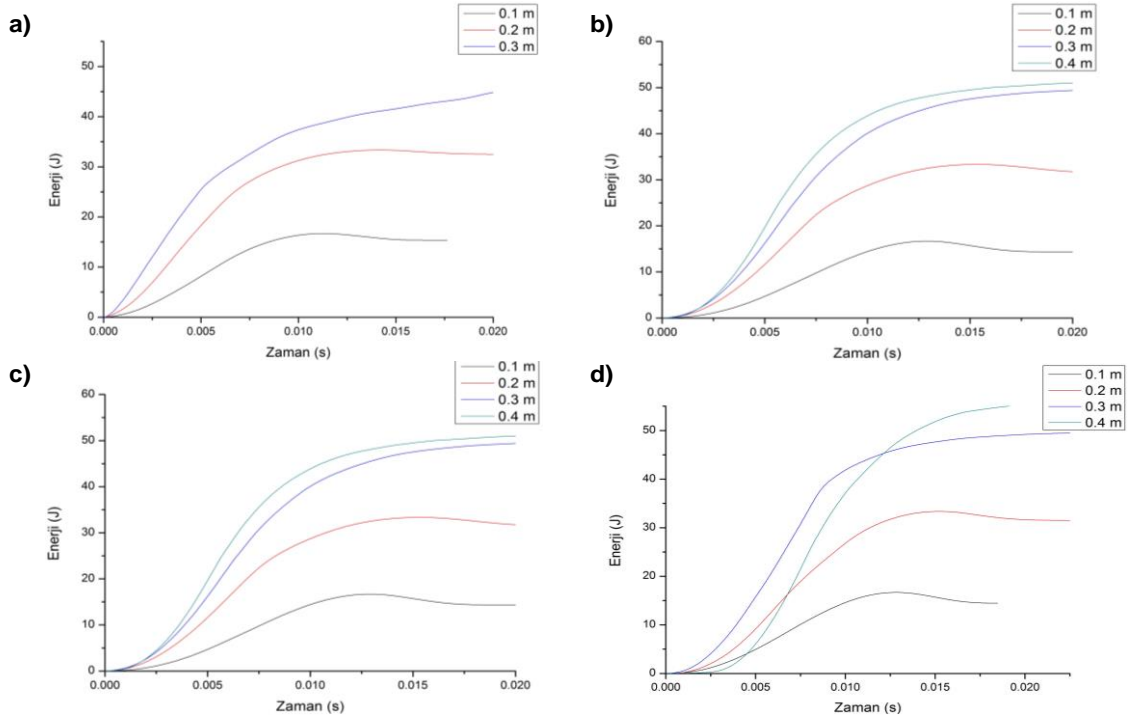


Şekil 4. 52. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

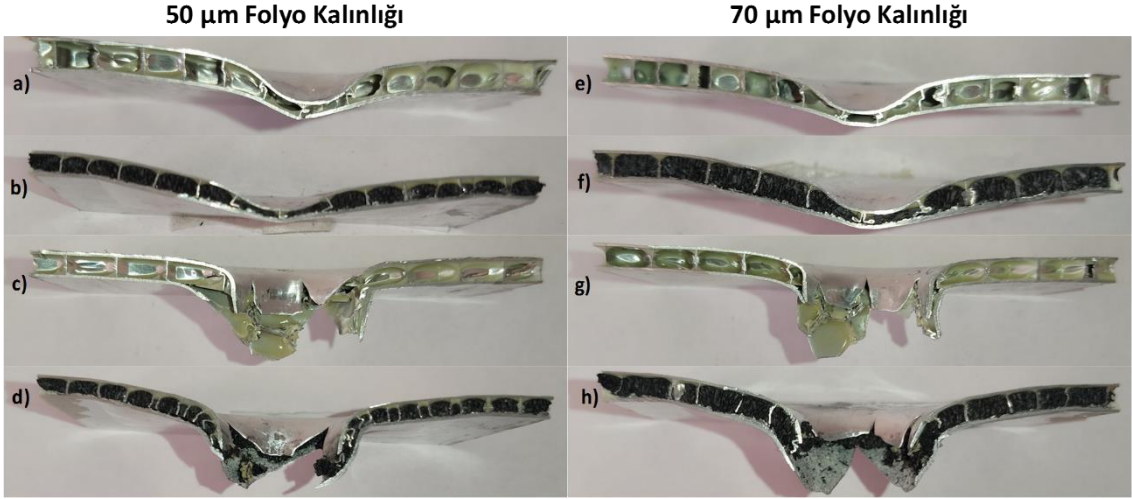


Şekil 4. 53. Hücre boyutu 5.2 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) dolgunsuz 66.7 J, (d) dolgulu 66.7 J, (g) dolgunsuz 83.38, (h) dolgulu 83.38 J

Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testinden elde edilen Şekil 4.54'te enerji-zaman grafikleri ile Şekil 4.55'te verilen hasar kesit görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde dolgulu numunelerin penetrasyonu için gerekli enerji miktarı artmaktadır. Artan folyo kalınlığı hasar bölgesinin genişliğini azaltırken numuneyi darbe yönünde eğerek burkulan hücre duvarı sayısını azaltmıştır.

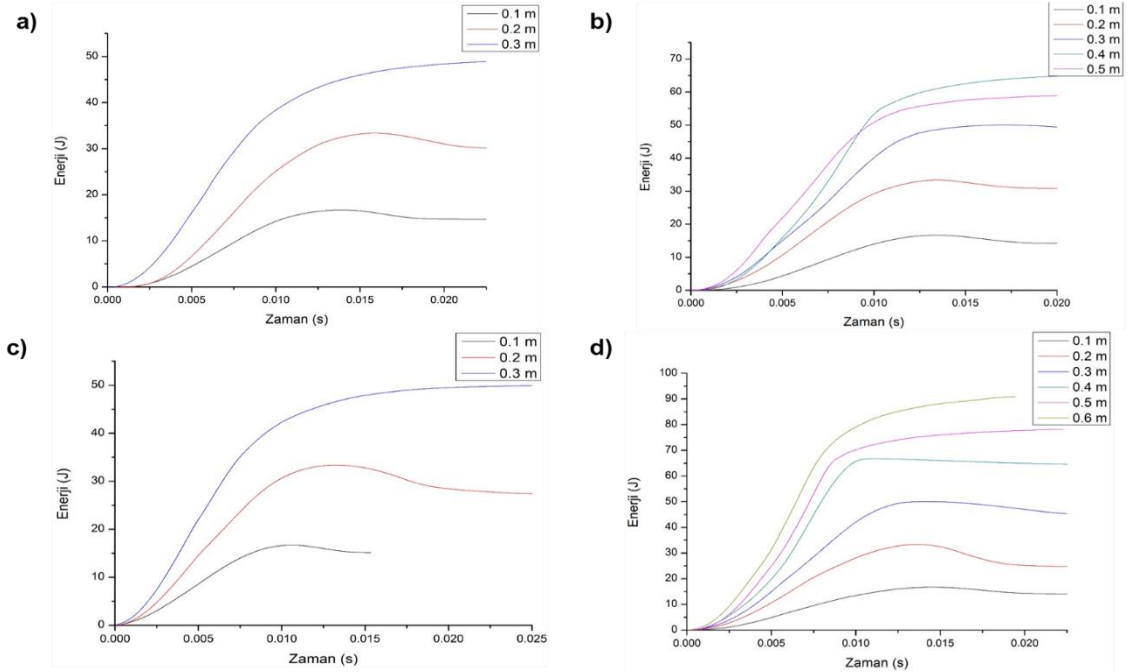


Şekil 4. 54. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

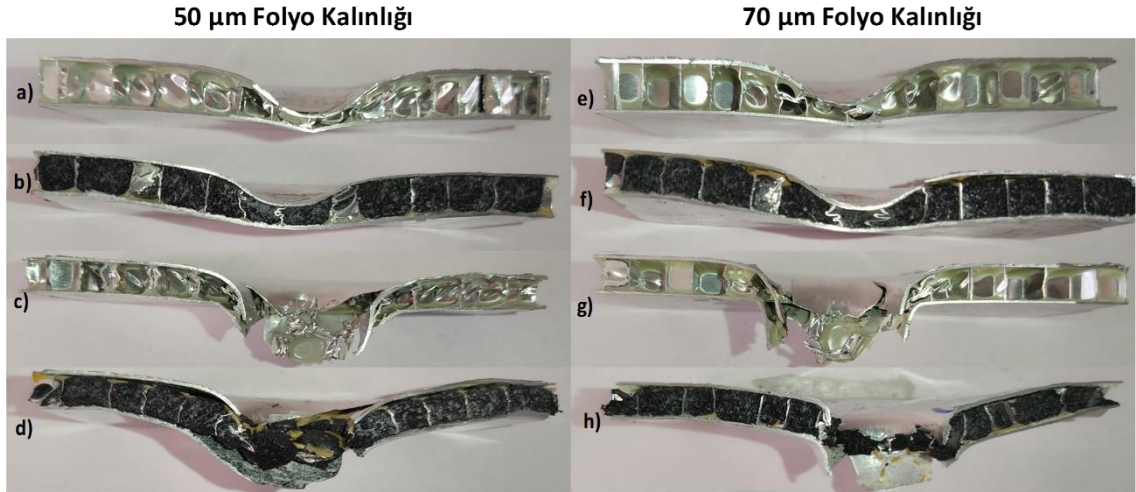


Şekil 4. 55. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgusuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgusuz 50.3 J, (d) ve (h) dolgulu 50.3 J

Şekil 4.56’da verilen hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji-zaman eğrilerinde, polimer dolgunun sandviç panellerin pentrasyonu için gereken enerji miktarını artırdığı gözlenmiştir. Şekil 4.57’de dolgulu numunelerin pentrasyon sürecinde hasar bölgesinde kısmi delaminasyonlar ile karşılaşmıştır.

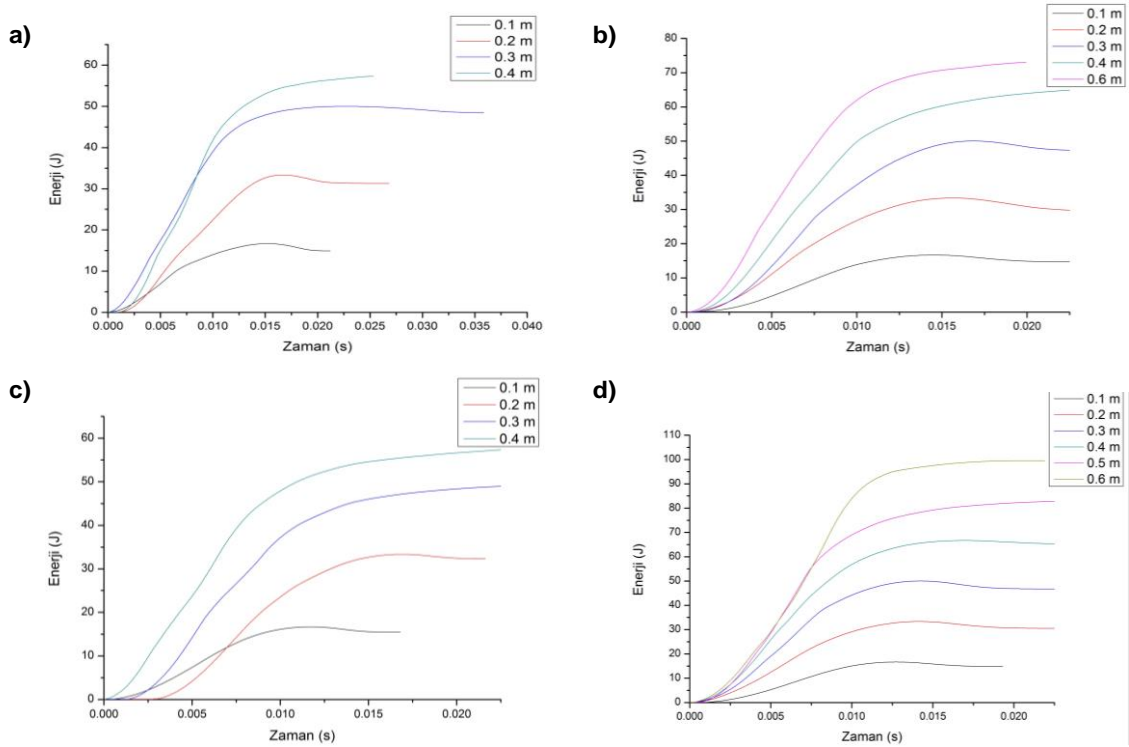


Şekil 4. 56. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgusuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgusuz d) 70 µm-dolgulu

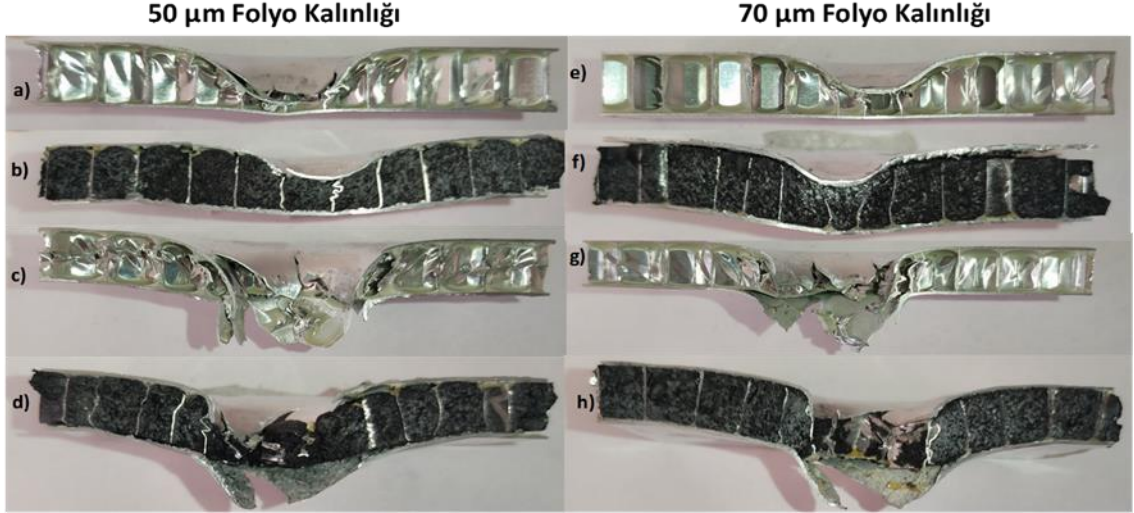


Şekil 4. 57. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J, (g) dolgunsuz 50.03 J, (h) dolgulu 83.38 J

Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testlerinden elde edilen Şekil 4.58'deki enerji-zaman grafikleri ile Şekil 4.59'da verilen hasar kesit görüntüleri incelendiğinde, dolgunun etkisi ile birlikte penetrasyon için gereken enerji miktarında artış gözlenmiştir. Dolgunsuz numuneler, darbe yükleri altında ezilirken dolgulu numuneler eğilmektedir.

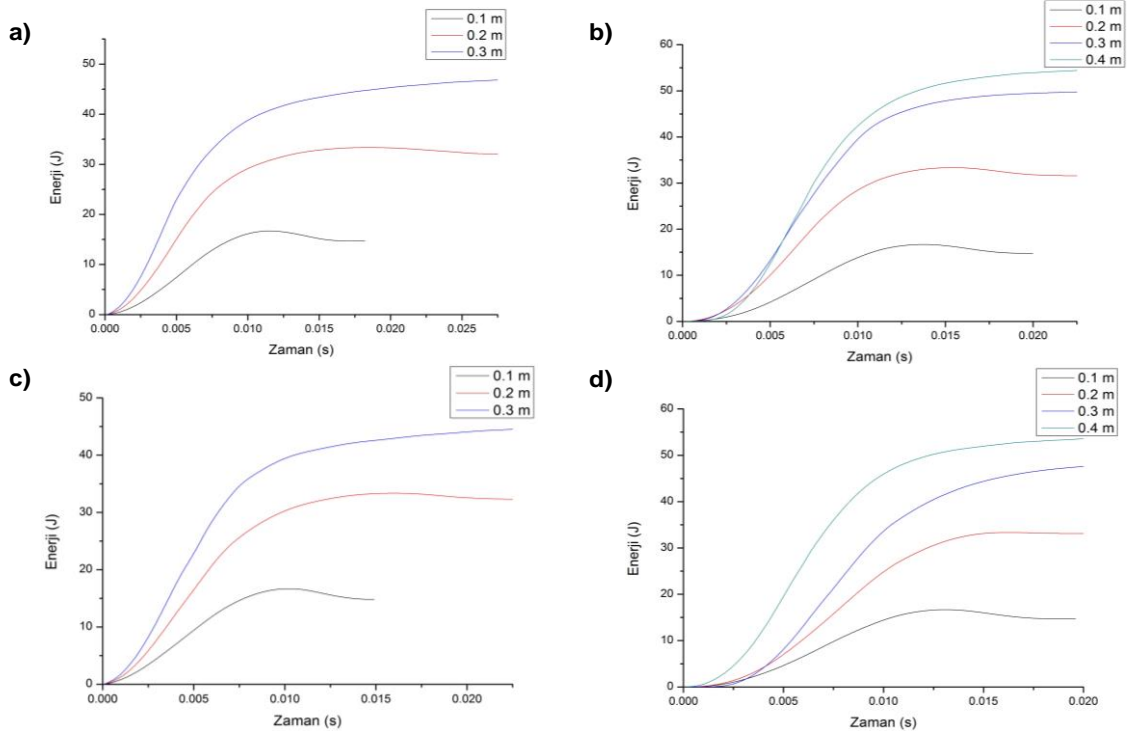


Şekil 4. 58. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

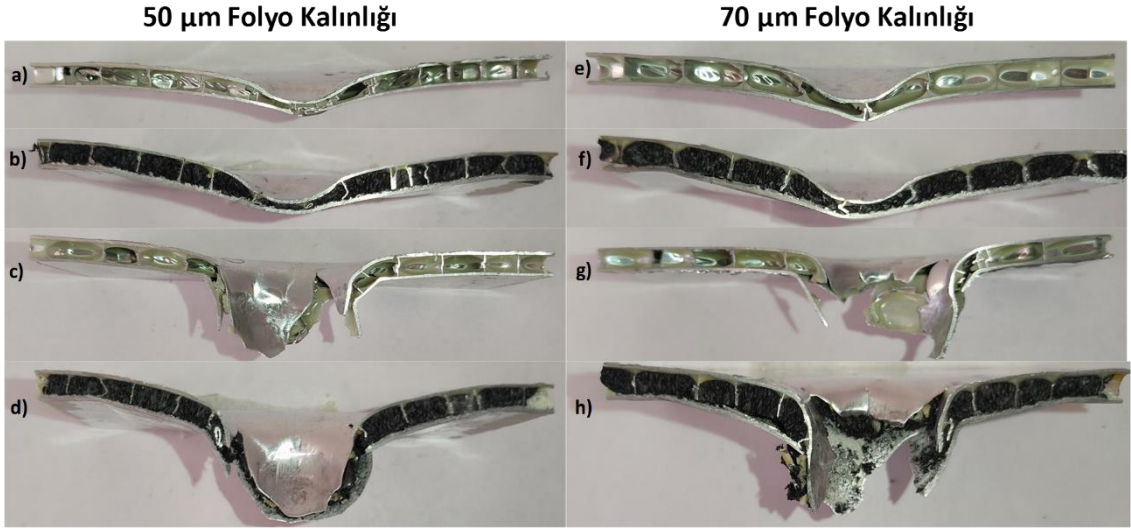


Şekil 4. 59. Hücre boyutu 8.66 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J, (h) dolgunsuz 83.38 J

Şekil 4.60'da 10.39 mm hücre açıklığına ve 4 mm çekirdek yüksekliğine sahip alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri incelendiğinde polimer dolgunun etkisi ile penetrasyon için gereken enerji miktarında artış olduğu görülmüştür. Şekil 4.61'de malzemenin en düşük darbe yükünde bile yırtılarak hasar aldığı dolgu ile bunun önüne geçildiği görülmektedir.

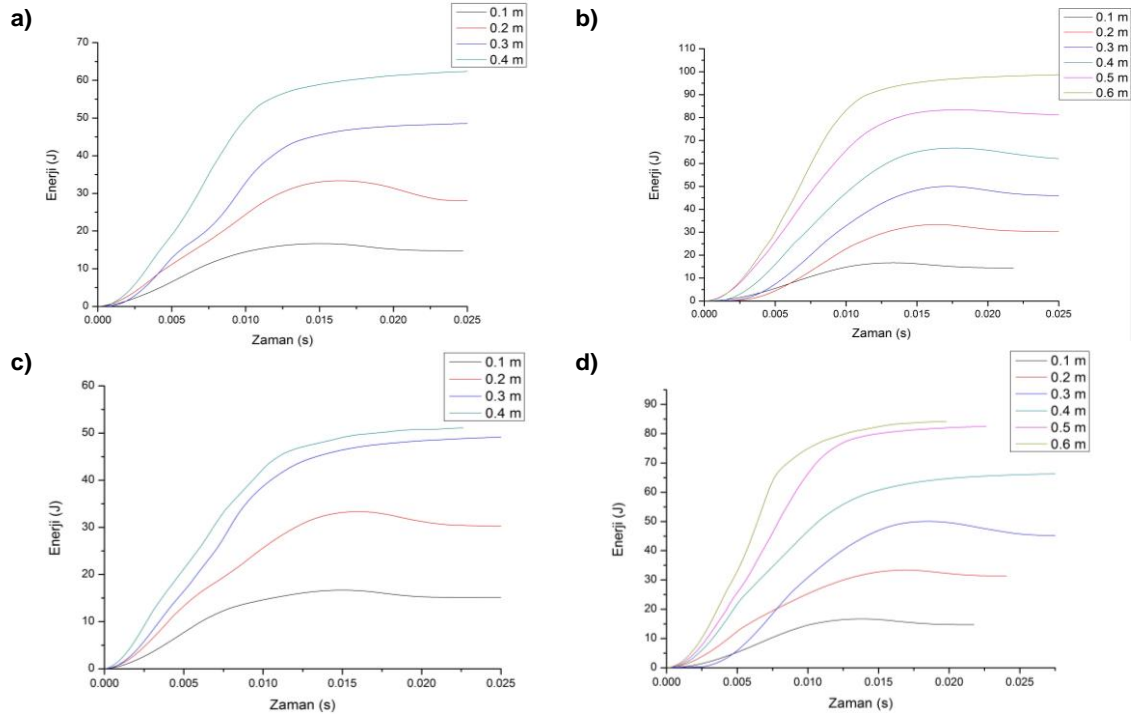


Şekil 4. 60. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

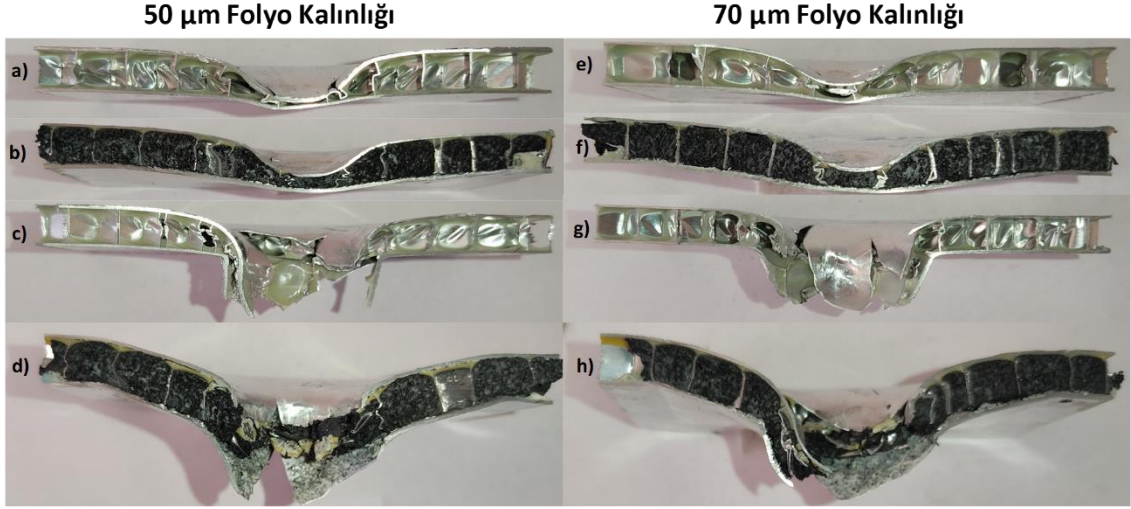


Şekil 4. 61. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 4 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) ve (h) dolgulu 50.03 J

Şekil 4.62’de hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm sandviç panellere ait enerji-zaman eğrilerinde polimer dolgunun darbe penetrasyon direncini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Şekil 4.63’de görüldüğü üzere artan folyo kalınlığı ve numunenin dolgulu olması darbe ile oluşan hasarı lokal hale getirmiştir.

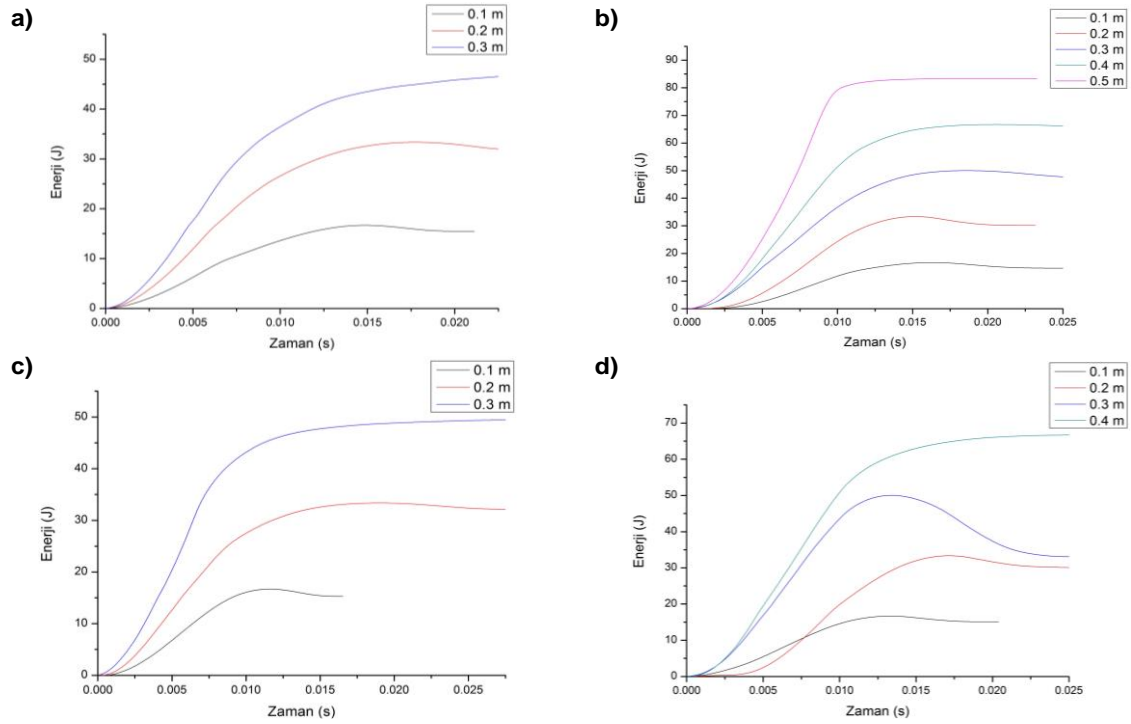


Şekil 4. 62. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

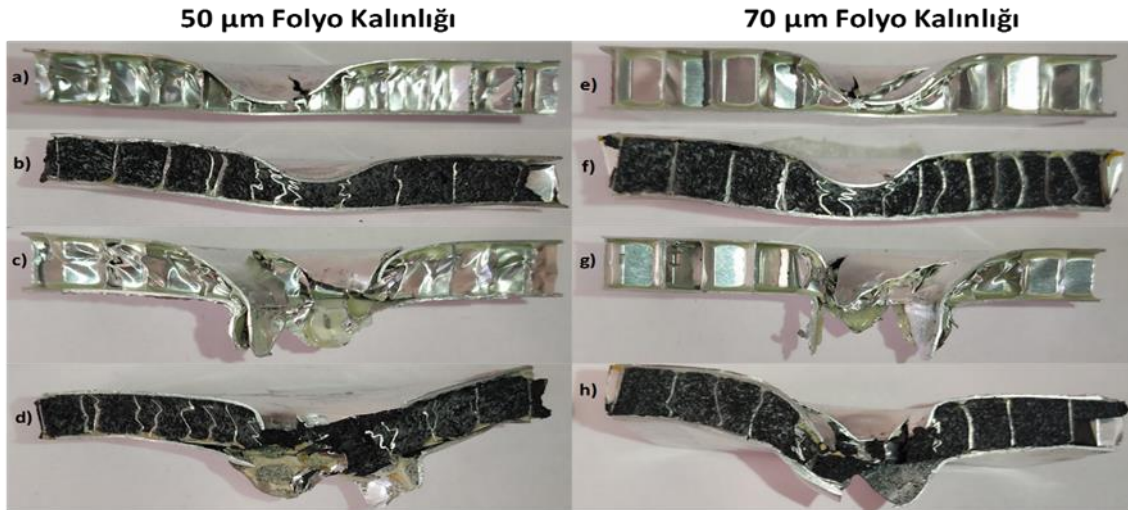


Şekil 4. 63. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 8 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 66.7 J ve (h) dolgulu 83.38 J

Şekil 4.64'de enerji-zaman grafiği verilen hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerde dolgu ile darbe yükleri altında penetrasyon için gereken enerji artırılmıştır. Şekil 4.65'de dolgunsuz paneller darbe esnasında delinirken dolgulu numunelerde penetrasyon bölgesinde geniş delaminasyonlar mevcuttur.

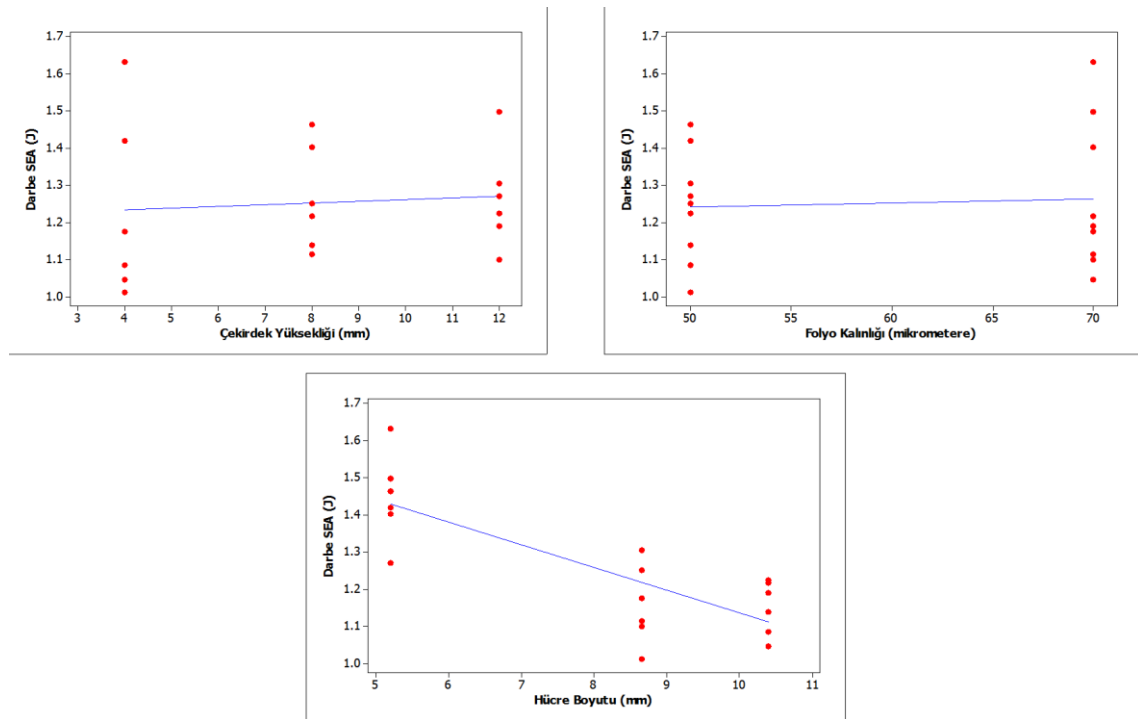


Şekil 4. 64. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin enerji zaman eğrileri a) 50 µm-dolgunsuz b) 50 µm-dolgulu c) 70 µm-dolgunsuz d) 70 µm-dolgulu

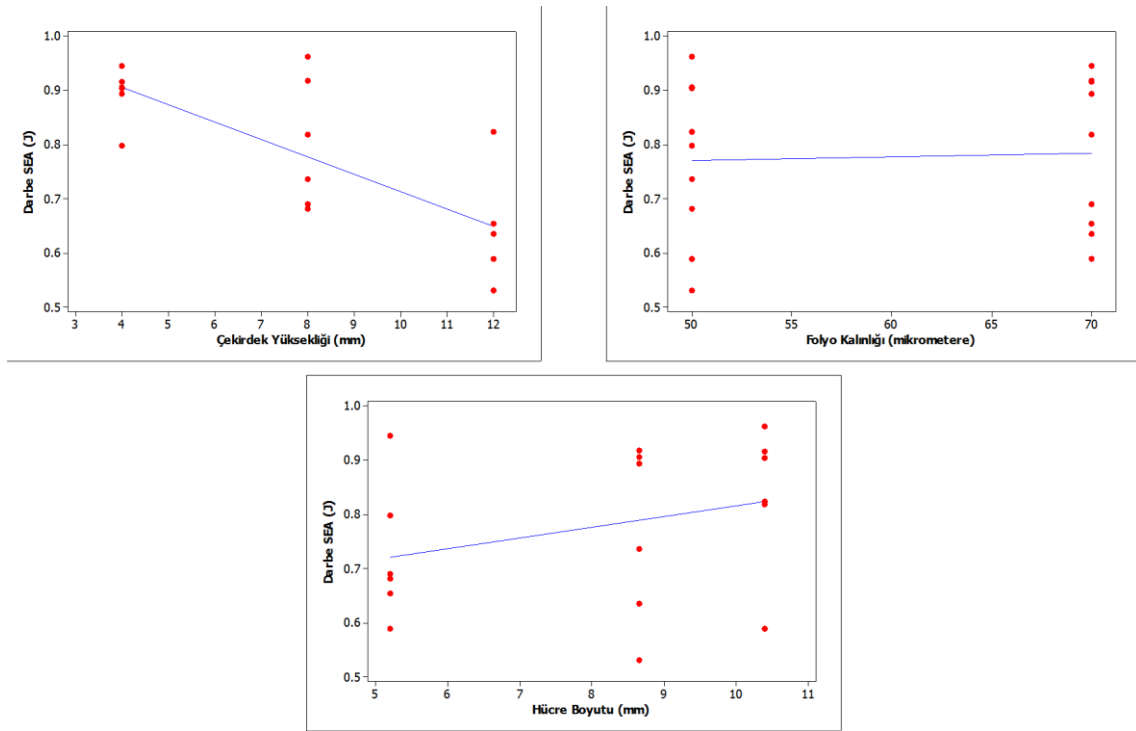


Şekil 4. 65. Hücre boyutu 10.39 mm ve çekirdek yüksekliği 12 mm olan alüminyum bal peteği sandviç panellerin darbe testi sonrası hasar bölgesi kesiti (a) ve (e) dolgunsuz 16.67 J, (b) ve (f) dolgulu 16.67 J, (c) ve (g) dolgunsuz 50.03 J, (d) dolgulu 100.06 J ve (h) dolgulu 66.7 J

Düşük hızlı darbe testinde numunelerin penetrasyonunda absobe edilen spesifik enerji miktarlarına (SEA) parametrelerin etkisi, Şekil 4.66 ve Şekil 4.67’de verilmiştir. Boş numunelerin düşük hızlı darbe ile penetrasyonunda, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliğinde asgari ölçülerdeki numuneler daha yüksek spesifik enerji absorpsiyonuna sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 66. Boş bal peteği sandviç panellerin düşük hızlı darbe penetrasyon spesifik enerji absorpsiyonu, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi



Şekil 4. 67. Dolgulu bal peteği sandviç panellerin düşük hızlı darbe penetrasyon spesifik enerji absorpsiyonu, hücre boyutu ve çekirdek yüksekliği ilişkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez kapsamında farklı hücre boyutları (5,20 mm, 8,66 mm, 10,39 mm), folyo kalınlıkları (50 μm , 70 μm) ve çekirdek yükseklikleri (4 mm, 8 mm, 12 mm) parametre olarak tespit edilen alüminyum bal peteği malzemeler kullanılarak; dolgunsuz ve polidimetilsiloksan (PDMS) köpük dolgulu çekirdek yapıların quasi-statik şartlarda düzlem dışı basma davranışları incelenmiştir. Üretilen tüm numuneler, makro indentasyon ve düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuş ve sonuçları incelenmiştir.

RTV-2 köpük üretimi 25 Shore A sertlik değerine sahip polimerden, ağırlıkça %0,3 azodikarbonamid (AZD), %2 kürleyici ajan (piperidin) ve %20 grafit (20-32 μm arası ve %80 saflıkta) terkinde 170 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 120 dakikada kütleme ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Bu köpük üretim sürecinde kullanılan RTV-2 yapısı, katkıları ile modifiye edilerek mekanik özellikleri geliştirilmiştir. Grafit katkısının 20-32 μm partikül boyutunun çalışma açısından uygun ve %20 katkının azami efektif katkı sağladığı yapılan DMA testleri ile ortaya konulmuştur. FTIR spektroskopisi ile katkının polimer matris molekülleri ile fiziksel olarak etkileştiği ve bunun partiküllerin yüzey alanı ile ilişkisi ortaya konulmuştur.

Düzlem dışı basma testlerinde RTV-2 polimer köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panellerin, kalıcı deformasyon göstermesi için daha az oranda şekil değiştirmesi gerektiği görülmüştür. Alüminyum bal peteği hücre duvarlarında meydana gelen hasar modlarının yükseklik ve kalınlıkla doğrudan ilişki içerisinde olduğu görülmüştür. RTV-2 polimer köpük dolgulu bal peteği hücre duvarlarında burkulma hasarı orta kısımda yoğunlaşmıştır.

Alüminyum bal peteği sandviç paneller darbe yükleri altında statik şartlardan daha farklı olarak deformasyona karşı daha fazla direnç göstermişlerdir. Penetrasyon bölgesinde meydana gelen hasar modlarında çekirdek yüksekliği, folyo kalınlığı, vurucu enerjisi, panelin dolgu durumu belirleyici olmuştur. RTV-2 polimer köpük dolgulu bal peteği sandviç paneller, darbe yükleri altında vurucuya tramplen etkisi göstermiştir. Polimer köpük dolgusu vurucunun panel ile temas süresini artırmıştır. Vurucu enerjisi arttıkça dolgulu sandviç paneller tarafından penetrasyon gerçekleşmesine rağmen absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. Dolgunsuz bal peteği sandviç panellere nazaran düşük hızlı darbe yükleri altında daha az enerji absorbe etmesine rağmen penetrasyon için verilmesi gereken enerji miktarı artmıştır. Dolgulu ve dolgunsuz yapıların test sonuçları karşılaştırıldığında,

dolgulu yapıların genellikle daha yüksek dayanıklılık ve penetrasyon direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Makro indentasyon testleri ve düşük hızlı darbe testleri karşılaştırıldığında, dolgusuz ve polimer dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panellerin spesifik enerji absorpsiyonunda artış meydana gelmiştir. Ağırlıkça %20 oranında 20-32 mikron arası partikül boyut dağılımına sahip “*döküm grafit tozu*” ile modifiye edilmiş RTV-2 polimer köpük dolgulu alüminyum bal peteği sandviç panel numunelerinde, dolgusuz numunelere göre ortalama %10 daha fazla spesifik enerji absorpsiyonunda artış meydana gelmiştir.

5.2 Öneriler

Tasarım ve kullanım amacına göre dolgulu veya dolgusuz yapıların hangisinin tercih edileceği, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Örneğin, yapıların yük taşımakta etkili olabilmesi için dolgulu yapı tercih edilebilirken, hafiflik ve esneklik gerekiyorsa dolgusuz yapıların kullanımı daha avantajlı olabilir.

RTV-2 (Room Temperature Vulcanized-2) polimerin “in-situ” şartlarda köpürtülmesi için belirlenen 120 dakikalık sürenin asgariye indirilmesi için uygun katalizör kullanımı araştırılmalıdır.

RTV-2 köpük dolgunun viskoelastik özelliğın daha net görülebilmesi için Hopkinson Bar cihazı ile orta hızlı darbe testleri yapılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Abrate, S. (1997). Localized impact on sandwich structures with laminated facings. *Applied Mechanics Reviews*, 50(2), 69–82. <https://doi.org/10.1115/1.3101689>
- Alexander Grolmuss. (2007). *Crosslinking and modification of silicones*. Wuppertal Bergische Üniversitesi. https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/disido/en/info/m_fact/crossmod.htm#1
- Antunes, M., & Velasco, J. I. (2014). Multifunctional polymer foams with carbon nanoparticles. *Progress in Polymer Science*, 39(3), 486–509. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.002>
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. In *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 364, Issue 1838). <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>
- Belingardi, G., Cavatorta, M. P., & Duella, R. (2003). Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train. *Composite Structures*, 61(1–2), 13–25. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00028-X)
- Bitzer, T. (1997). *Honeycomb Technology* (1st ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5856-5>
- Bokobza, L., Bruneel, J.-L., & Couzi, M. (2015). Raman Spectra of Carbon-Based Materials (from Graphite to Carbon Black) and of Some Silicone Composites. *C*, 1(1), 77–94. <https://doi.org/10.3390/c1010077>
- Brinson, H. F., & Brinson, L. C. (2015). Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction, Second edition. In *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7485-3>
- Burlayenko, V. N., & Sadowski, T. (2010). Effective elastic properties of foam-filled honeycomb cores of sandwich panels. *Composite Structures*, 92(12), 2890–2900. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.04.015>
- Campo, E. A. (2008). *Selection of polymeric materials: how to select design properties from different standards*. William Andrew.
- Chai, G. B., & Zhu, S. (2011). A review of low-velocity impact on sandwich structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 225(4), 207–230. <https://doi.org/10.1177/1464420711409985>
- Charoeythornkhajhornchai, P., Samthong, C., Boonkerd, K., & Somwangthanaroj, A. (2017). Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam. *Journal of Cellular Plastics*, 53(3), 287–303. <https://doi.org/10.1177/0021955X16652101>

- Chigwada, G., Kandare, E., Wang, D., Majoni, S., Mlambo, D., Wilkie, C. A., & Hossenlopp, J. M. (2008). Thermal stability and degradation kinetics of polystyrene/organically- modified montmorillonite nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8(4), 1927–1936. <https://doi.org/10.1166/jnn.2008.18258>
- Cimavilla-Román, P., Santiago-Calvo, M., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2021). Dynamic Mechanical Analysis during polyurethane foaming: Relationship between modulus build-up and reaction kinetics. *Polymer Testing*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107336>
- Couzi, M., Bruneel, J. L., Talaga, D., & Bokobza, L. (2016). A multi wavelength Raman scattering study of defective graphitic carbon materials: The first order Raman spectra revisited. *Carbon*, 107, 388–394. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.06.017>
- Crupi, V., Epasto, G., & Guglielmino, E. (2013). Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam. *Marine Structures*, 30, 74–96. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2012.11.002>
- Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Mozafari, H., & Najafian, S. (2014). Computed tomography-based reconstruction and finite element modelling of honeycomb sandwiches under low-velocity impacts. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 16(4), 377–397. <https://doi.org/10.1177/1099636214531515>
- Fincan, M. (2015). *Assessing Viscoelastic Properties of Polydimethylsiloxane (PDMS) Using Loading and Unloading of the Macroscopic Compression Test*.
- Foo, C. C., Seah, L. K., & Chai, G. B. (2008). *Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels*. 85, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.016>
- Gent, A. N. (2019). *Elastomer*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/elastomer>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular solids: Structure and properties. In *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Goldsmith, W., & Sackmant, J. L. (1992). *AN EXPERIMENTAL STUDY OF ENERGY ABSORPTION IN IMPACT ON SANDWICH PLATES*. 12(2), 241–262.
- Habib, F. N., Iovenitti, P., Masood, S. H., & Nikzad, M. (2017). In-plane energy absorption evaluation of 3D printed polymeric honeycombs. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(2), 117–131. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1291354>
- Hamouni, S., Arous, O., Abdessemed, D., Nezzal, G., & Van der Bruggen, B. (2019). Alcohol and Alkane Organic Extraction Using Pervaporation Process. *Macromolecular Symposia*, 386(1). <https://doi.org/10.1002/masy.201800247>

- Hassanpour Roubeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H., & Hadavinia, H. (2019). Experimental investigation of impact loading on honeycomb sandwich panels filled with foam. *International Journal of Crashworthiness*, 24(2), 199–210. <https://doi.org/10.1080/13588265.2018.1426233>
- Hazle, M. A., Mehicic, M., Gardiner, D. J., & Graves, P. R. (1990). Practical Raman Spectroscopy: Springer Verlag, Berlin, 1989 (ISBN 3-540-50254-8). viii+ 157 pp. Price DM 78.00. In *Vibrational Spectroscopy* (Vol. 1, Issue 1).
- Herup, E. J., & Palazotto, A. N. (1998). Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/Nomex honeycomb-sandwich plates. *Composites Science and Technology*, 57(12), 1581–1598. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00089-4)
- Hino, H., Takayama, Y., Kato, H., & Watanabe, H. (2010). Deformation Behavior in Three-point Bending of Aluminum Alloy Honeycomb Structures. *Proceedings of the 12th International Conference on Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, 625–630.
- Inam, A., Brydson, R., & Edmonds, D. V. (2020). Raman spectroscopy study of the crystallinity of graphite formed in an experimental free-machining steel. *Materials Characterization*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110264>
- Jaroslaw, B., Barbara, S., & Patryk, J. (2016). The comparison of low-velocity impact resistance of aluminum/carbon and glass fiber metal laminates. *Polymer Composites*, 37(4), 1056–1063.
- Jin, F.-L., Zhao, M., Park, M., & Park, S.-J. (2019). Recent trends of foaming in polymer processing: A review. *Polymers*, 11(6), 953.
- Jurásková, A., Dam-Johansen, K., Olsen, S. M., & Skov, A. L. (2020). Factors influencing mechanical long-term stability of condensation curing silicone elastomers. *Journal of Polymer Research*, 27(11), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02272-5>
- Kim, B. I., Noh, B. W., Choi, Y. W., Bae, S. I., & Song, J. I. (2006). *Dynamic Fracture Analysis of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel*. 308, 67–72. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.306-308.67>
- Kumar, A., & Virginia, W. (2003). Fundamentals of Polymer Engineering. In *Plastics Technology*.
- Kumar, V., Kumar, A., Song, M., Lee, D. J., Han, S. S., & Park, S. S. (2021). Properties of silicone rubber-based composites reinforced with few-layer graphene and iron oxide or titanium dioxide. *Polymers*, 13(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/polym13101550>
- Lakes, R. S. (2009). *Viscoelastic materials*. Cambridge university press.
- Lee, C. long, Niemi, R. G., & Kelly, K. M. (1977). *New Silicone Rtv Foam*. 14, 39–44.

- Liu, Y. R., Huang, Y. D., & Liu, L. (2007). Thermal stability of POSS/methylsilicone nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 67(13), 2864–2876.
- Lorna J. Gibson, M. F. A. (1999). [*Cellular Solid(BookSee.org).pdf*].
- 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>
- Michaeli, W., & Sitz, S. (2010). Analysis of the expansion behaviour of rubber compounds with chemical blowing agents. *Cellular Polymers*, 29(4), 227–236. <https://doi.org/10.1177/026248931002900402>
- Nour, M., Berean, K., Griffin, M. J., Matthews, G. I., Bhaskaran, M., Sriram, S., & Kalantar-Zadeh, K. (2012). Nanocomposite carbon-PDMS membranes for gas separation. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 161(1), 982–988. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.11.079>
- O’Connell, P. A., & McKenna, G. B. (2002). Yield and crazing in polymers. In *Encyclopedia of polymer science and technology*. Wiley Online Library.
- Pusztai, E. (2013). *Synthesis , characterization , and potential application of some organosilicon compounds*.
- Rahimidehghan, F., & Altenhof, W. (2023). Compressive behavior and deformation mechanisms of rigid polymeric foams: A review. *Composites Part B: Engineering*, 253(January), 110513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110513>
- Raju, K. S., Smith, B. L., Tomblin, J. S., Liew, K. H., & Guarddon, J. C. (2008). Impact damage resistance and tolerance of honeycomb core sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 42(4), 385–412. <https://doi.org/10.1177/0021998307088596>
- Ramírez-Hernández, A., Aguilar-Flores, C., & Aparicio-Saguilán, A. (2019). Fingerprint analysis of ftir spectra of polymers containing vinyl acetate. *DYNA (Colombia)*, 86(209), 198–205. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77513>
- Ramsteiner, F., Fell, N., & Forster, S. (2001). Testing the deformation behaviour of polymer foams. *Polymer Testing*, 20(6), 661–670. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00090-8)
- Rizov, V. I. (2007). Low velocity localized impact study of cellular foams. *Materials and Design*, 28(10), 2632–2640. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.09.023>
- Ruan, S., Chen, S., Liu, Y., Zhang, Y., Yan, D., & Zhang, M. (2023). Early-age deformation of hydrophobized metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 169(July). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107168>
- Saifullah, A., Thomas, B., Cripps, R., Tabeshfar, K., & Wang, L. (2020). An Investigation of Low Velocity Impact Properties of Rotationally Molded Skin–Foam–Skin

- Sandwich Structure. *Polymer Engineering and Science*, 60(2), 387–397. <https://doi.org/10.1002/pen.25294>
- Salih Hakan YETGİN. (2012). *Otomotiv Sektörü İçin Polimer Köpük Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu*. Sakarya Üniversitesi.
- Sayer, M. (2009). *Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi*.
- Shit, S. C., & Shah, P. (2013). A review on silicone rubber. *National Academy Science Letters*, 36(4), 355–365. <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0150-2>
- Solmaz, Murat Yavuz; Şanlıtürk, İ. H. Ö. T. (2010). Petek Yapılı Sandviç Yapılarda Köpük DolgunuKritik Burkulma YüğüEtkisinin Sayısal OlaraTespiti. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi.*, 523–530.
- Stronge, W. J. (2018). *Impact mechanics*. Cambridge university press.
- 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.
- Thomas, T., & Tiwari, G. (2019). Crushing behavior of honeycomb structure: a review. *International Journal of Crashworthiness*, 24(5), 555–579. <https://doi.org/10.1080/13588265.2018.1480471>
- Thurlow, P. E. R. (1976). *United States Patent (19)*.
- Uyaner, M. (2020). *Test to Graph*. Mendeley Data, V2. <https://doi.org/10.17632/gydhpktxjk.2>
- Verheyen, F., Giesen, R. U., & Heim, H. P. (2017). Einfluss verschiedener vernetzungssysteme und vernetzeranteile auf das vulkanisations-verhalten von silikonkautschuk. *Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology*, 2017(4), 233–253. <https://doi.org/10.3139/O999.02042017>
- Wadley, H. N. G. (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31–68. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1697>
- Yang, M., & Qiao, P. (2008). Quasi-Static Indentation Behavior of Honeycomb Sandwich Materials and Its Application in Impact Simulations. *Journal of Aerospace Engineering*, 21(4), 226–234. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(2008\)21:4\(226\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(2008)21:4(226))
- Yu, B., Aranguren van Egmond, D., Abu Samk, K., Erb, U., Wilkinson, D., Embury, D., & Zurob, H. (2023). The design of “Grain Boundary Engineered” architected

- cellular materials: The role of 5-7 defects in hexagonal honeycombs. *Acta Materialia*, 243(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118513>
- Zeigler, J. M., & Fearon, F. W. G. (1989). *Silicon-based polymer science: a comprehensive resource*. ACS Publications.
- Zhai, W., Jiang, J., & Park, C. B. (2022). A review on physical foaming of thermoplastic and vulcanized elastomers. *Polymer Reviews*, 62(1), 95–141. <https://doi.org/10.1080/15583724.2021.1897996>
- Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., & Fang, J. (2019a). Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam. *Composites Part B: Engineering*, 156(July 2018), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.043>
- Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., & Fang, J. (2019b). 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>
- Zhong, H. Z., Li, C. W., Das, R., Gu, J. F., & Qian, M. (2023). Post-yield softening of bending-dominated metal metamaterials. *PNAS Nexus*, 2(3), 1–7. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad075>
- Zhou, G., Hill, M., & Hookham, N. (2007). Investigation of parameters governing the damage and energy absorption characteristics of honeycomb Sandwich panels. In *Journal of Sandwich Structures and Materials* (Vol. 9, Issue 4). <https://doi.org/10.1177/1099636207067134>