



**T.C.**

**HİTİT ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAL PETEĞİ  
YAPILARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Doktora Tezi**

**Levent PEHLİVAN**

**Çorum - 2024**

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAL PETEĞİ YAPILARIN  
TASARIMI, ÜRETİMİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Levent PEHLİVAN**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Doktora Tezi**

**TEZ DANIŞMANI**

**Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

**Çorum 2024**

Levent PEHLİVAN tarafından hazırlanan “Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Bal peteği Yapıların Tasarımı, Üretimi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi.” adlı tez çalışması 25/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kürşat GÜLTEKİN .....  
Başkan

Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU .....  
Danışman

Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ .....  
Üye

Dr. Öğr. Üyesi. Muhammed Emin ERDİN .....  
Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK .....  
Üye

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun ... /... / 202.... tarih ve ..... sayılı kararı ile Levent PEHLİVAN'ın Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Levent PEHLİVAN



# KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAL PETEĞİ YAPILARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Levent PEHLİVAN

ORCID: 0000-0001-7468-3789

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Aralık 2024

## ÖZET

Sandviç yapılar havacılık, uzay, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde üstün mekanik özellikleri, yüksek enerji sönümlenme kabiliyetleri ve yüksek özgül dayanımlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılar farklı yüzey malzemeleri ile köpük, kafes ve bal peteği gibi çekirdek yapıların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bunlar arasında bal peteği çekirdek yapıları üstün mekanik özellikleri ve üretim kolaylığı gibi avantajlarından dolayı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Diğer taraftan, bal peteği çekirdek yapıların tasarım ve malzeme özelliklerinin mekanik davranış ve enerji sönümlenme kabiliyetleri üzerinde oldukça önemli etkileri bulunmaktadır. Bu bağlamda, Nomex ve alüminyum gibi malzemelerden çeşitli geometrilerde üretilen bal peteği çekirdek yapıları uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak, ince cidarlı metalik bal peteklerinin burkulmaya yatkınlıkları bu yapıların en önemli zayıflığı olup, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda bu geleneksel yapılar genellikle arzu edilen performans isterlerini sağlayamamaktadırlar. Bu noktada, fiber takviyeli kompozit malzemeler yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı bal peteği yapıların geliştirilmesi açısından paha biçilmez bir fırsat sunmaktadır. Bu motivasyonla hazırlanan bu tez çalışması kapsamında, karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozit malzemeden yüksek özgül dayanıma ve enerji sönümlenme performansına sahip bal peteği yapıların tasarım, üretim ve testlerine odaklanılmış olup, bu yapıların çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak mekanik ve enerji sönümlenme davranışları deneysel olarak detaylı bir biçimde incelenmiştir. KFTP bal peteklerinin üretim sürecinde oluklu fiber kompozit levhaların düşük maliyetli ve seri bir şekilde üretime olanak veren kalıplama ve yapıştırma tekniği uygulanmıştır. KFTP kompozit bal peteklerinin üretimi 3K Twill [0/90] fiber

yönelimli kumaş ve epoksi reçine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hücre topolojisinin bal peteği yapıların mekanik davranışlarına etkilerinin incelenmesi bağlamında tasarımlarda kare, daire ve altıgen olmak üzere üç farklı çekirdek topolojisi dikkate alınmış olup, bu yapılar alüminyum kalıplardan faydalanılarak üretilen oluklu levhaların epoksi reçine kullanılarak birleştirilmesiyle üretilmiştir. Ayrıca, duvar kalınlığı ve yükseklik parametrelerinin yapıların mekanik davranışlarına etkileri her bir parametrenin üç farklı değeri için incelenmiştir. Üretim sürecinin ardından, tasarlanan bal peteği yapıların mekanik davranışları ve enerji sönümleme özellikleri hem düzlem içi hem de düzlem dışı sanki-statik yüklemeler altında incelenmiştir. Bu bağlamda, dikkate alınan tasarım parametreleri özelinde 81 adet senaryo için testler gerçekleştirilmiştir. Her bir senaryo için en az üç tekrar yapılarak testler gerçekleştirilmiş ve tasarım parametrelerinin bal peteği yapıların mekanik davranışlarına ve enerji sönümleme performanslarına etkileri ortaya konmuştur. Bu bağlamda, dayanım, toplam sönümlenen enerji, özgül sönümlenen enerji, ortalama ezilme kuvveti, maksimum ezilme kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliği gibi kriterler yapıların performansının incelenmesinde dikkate alınmıştır. KFTP bal peteği yapıların hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükleme koşulları altındaki mekanik performansları ayrıca literatürdeki çeşitli gözenekli yapıların performanslarıyla kıyaslanmış ve üstün yönleri ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar KFTP bal peteği yapıların hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükleme koşulları altında yüksek mekanik dayanım ve enerji sönümleme performansına sahip olduklarını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca uygun tasarım parametrelerinin seçimi ile kompozit bal peteği yapıların ezilme performanslarının dikkate değer ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Elde edilen deneysel bulgular 155-283  $kg/m^3$  yoğunluğa sahip KFTP bal peteği yapıların yaklaşık 61  $MPa$  kadar dayanıma ve 192  $J/gr$  kadar özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu göstermiştir. Bu bulgular yüksek özgül dayanım ve enerji sönümü gerektiren uygulamalar bağlamında bu yapıların kullanılabilme potansiyelini ortaya koymuştur.

**Anahtar Kavramlar:** Karbon Fiber Takviyeli Polimer, Bal Peteği Tasarımı, Kalıplama ve Yapıştırma Tekniği, Mekanik Testler, Mekanik Dayanım, Enerji Sönümleme Performansı.

**Bilim Kodu:** 91417

# **DESIGN, FABRICATION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE HONEYCOMB STRUCTURES**

Levent PEHLİVAN

ORCID: 0000-0001-7468-3789

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

December 2024

## **ABSTRACT**

Sandwich structures are widely used in sectors such as aviation, aerospace, automotive and defense industries due to their superior mechanical properties, high energy absorption capability and high specific strength. These structures are formed by combining different surface materials and core structures such as foam, lattice and honeycomb. Among these, honeycomb core structures are frequently preferred due to their advantages such as superior mechanical behavior and ease of fabrication. On the other hand, the design and material properties of honeycomb core structures have a significant effect on their mechanical behavior and energy absorption capabilities. In this context, honeycomb core structures produced from materials such as Nomex and aluminum in various geometries are widely used in applications. However, the tendency of thin-walled metallic honeycombs to buckling is the most important weakness of these structures, and these traditional configurations often fail to meet the desired performance requirements in applications requiring high strength. At this point, fibre reinforced composite materials offer an invaluable opportunity for the development of high strength and low weight honeycomb structures. Motivated by these facts, this thesis focuses on the design, fabrication and testing of honeycomb structures made of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite material, aiming for high specific strength and energy absorption performance. The mechanical and energy absorption behaviors of these structures have been examined experimentally in detail, considering various design parameters. In the fabrication process of CFRP honeycombs, a molding and bonding technique was applied, which allows low-cost and mass production of corrugated fiber composite sheets. CFRP composite honeycombs

were produced using 3K Twill [0/90] fibre-oriented fabric and epoxy resin. In the context of examining the effects of cell topology on the mechanical behavior of honeycomb structures, three different core topologies namely square, circle and hexagon were taken into consideration in the designs and these structures were fabricated by combining corrugated sheets produced in aluminum moulds using epoxy resin. In addition, the effects of wall thickness and height on the mechanical behavior of the structures were investigated for three different values of each parameter. Following the fabrication process, the mechanical behavior and energy absorption properties of the designed honeycomb structures were examined under both in-plane and out-of-plane quasi-static loading conditions. In this context, experimental tests were performed for 81 scenarios for the design parameters considered. For each scenario, at least three repetitions of the tests were performed and the results were analyzed to reveal the effects of the design parameters on the mechanical behavior and energy absorption performance of the honeycomb structures. In this context, criteria such as strength, total absorbed energy, specific energy absorption, mean crushing force, peak crushing force and crush force efficiency were considered to evaluate the structures' performance. The performances of CFRP honeycomb structures under both in-plane and out-of-plane loading conditions were also compared with the performances of various porous structures in the literature and their superior aspects were revealed. The results showed that CFRP honeycomb structures have high mechanical strength and energy absorption performance under both in-plane and out-of-plane loading conditions, and the crushing performance of these structures can be significantly improved by selecting appropriate design parameters. The experimental results show that CFRP honeycomb structures with a density range of 155-283  $kg/m^3$  have a strength of up to approximately 61  $MPa$  and a specific energy absorption capacity of up to 192  $J/gr$ . These findings reveal the potential of these structures to be used in applications requiring high specific strength and energy absorption.

**Key Terms:** Carbon Fiber Reinforced Polymer, Honeycomb Design, Moulding and Bonding Technique, Mechanical Tests, Mechanical Strength, Energy Absorption Performance.

**Science Code:** 91417

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince bilgi, beceri ve tecrübeleriyle beni her zaman yönlendiren, teşvik ve destekleriyle karşılaştığım tüm sorunların üstesinden gelmemi sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde bulunan Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ ve Dr. Öğr. Üyesi. Muhammed Emin ERDİN'e ve tez savunma jürimde bulunan Doç. Dr. Kürşat GÜLTEKİN ve Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK'e katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca tezimin düzenlenmesinde destek sağlayan Öğr. Gör. Dr. Mustafa Çağrı ÖZKADER'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora eğitimime 2013 yılında başlamama rağmen tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 pandemisi nedeniyle çalışmalarına bir süre ara vermek zorunda kaldım. Ayrıca, doktora ders ve tez dönemlerimde ortaya çıkan önemli sağlık problemleri nedeniyle de çeşitli dönemlerde eğitimime ara vermek zorunda kaldım. Ortaya çıkan bu durumlar doktora tezimi tamamlamamı geciktirse de tezimi bitirme arzumdan hiç vazgeçmedim. Tüm bu süreçler boyunca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Fatma Betül'e çok teşekkür ederim. Ayrıca, bu tez çalışmasında motivasyonumu her kaybettiğimde varlıklarıyla en büyük motivasyon kaynağı olan oğlum İbrahim Ethem ve kızım Emine Ceyda'ya sonsuz teşekkür ederim.

Levent PEHLİVAN

Bu tez çalışmasına, FBE19004.19.001 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	x
TABLolar DİZİNİ .....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiv
RESİMLER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xviii
GİRİŞ .....	1

### 1. BÖLÜM

#### BAL PETEĞİ ÇEKİRDEK YAPILAR ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ

1.1. Bal Peteği Çekirdek Yapıların Sınıflandırılması .....	6
1.1.1. Alüminyum bal peteği çekirdek.....	8
1.1.2. Sürekli köpük çekirdek.....	10
1.1.3. Polipropilen bal peteği çekirdek.....	11
1.1.4. Kâğıt bal peteği çekirdek.....	11
1.1.5. Nomex (Aramid) bal peteği çekirdek.....	12
1.1.6. Balsa bal peteği çekirdek .....	13
1.2. Bal Peteği Üretiminde Kullanılan Fiber Kumaşlar .....	14
1.2.1. Seramik fiberler.....	14
1.2.2. Boron fiberler .....	14
1.2.3. Cam fiberler.....	14
1.2.4. Kevlar fiberler .....	15
1.2.5. Karbon fiberler .....	16
1.3. Fiber Malzemelerin Oryantasyonu.....	17

1.4. Matris Malzemeler.....	18
1.5. Bal Peteği Çekirdeklerinin Üretilmesi.....	20
1.5.1. Ondüle-genişletme yöntemi ile üretim .....	20
1.5.2. Oluk oluşturma yöntemi ile üretim.....	21
1.5.3. Fiber malzemelerden oluklama yöntemi ile üretim .....	22

## **2. BÖLÜM**

### **MATERYAL VE METOT**

2.1. Deney Numunelerinin Üretimi İçin Ön Çalışmalar .....	31
2.2. Deney Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi .....	32
2.3. Deney Standartları, Testler ve Yapıların Ezilme Performans Kriterleri.....	49
2.4. Deneysel Çalışmalar.....	50

## **3. BÖLÜM**

### **DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA**

3.1. KFTP Kompozitin Mekanik Özellikleri.....	53
3.2. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem Dışı Ezilme Davranışlarının İncelenmesi.....	55
3.2.1. Deformasyon modlarının incelenmesi .....	55
3.2.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi .....	61
3.2.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücreli yapıların performansı ile karşılaştırılması.....	64
3.3. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem İç Genişleme Yönünde Ezilme Davranışlarının İncelenmesi.....	67
3.3.1. Deformasyon modlarının incelenmesi .....	67
3.3.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi .....	72
3.3.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücreli yapıların performansı ile karşılaştırılması.....	75
3.4. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem İç Boylamsal Yönde Ezilme Davranışlarının İncelenmesi.....	77
3.4.1. Deformasyon modlarının incelenmesi .....	77

3.4.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi .....	81
3.4.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücreli yapıların performansı ile karşılaştırılması .....	83
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>85</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>88</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>100</b>
EK-1: Düzlem Dışı Eksenel Yöne Ait Veriler .....	101
EK-2: Düzlem İçi Genişleme Yönüne Ait Veriler .....	106
EK-3: Düzlem İçi Boylamsal Yöne Ait Veriler .....	111



## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> 5083 serisi alüminyumun kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri. ....	<b>35</b>
<b>Tablo 2.2.</b> Karbon fiber kumaşın (200 gr/m <sup>2</sup> 3K Twill) teknik ve mekanik özellikleri (Kompozitsan, 2018). ....	<b>38</b>
<b>Tablo 2.3.</b> F-1564 reçine ve F-3487 sertleştirici teknik özellikleri (Kompozitsan, 2018). ....	<b>39</b>
<b>Tablo 2.4.</b> Vakum infüzyon ünitesinin teknik özellikleri (Kompozitsan, 2018). ....	<b>41</b>
<b>Tablo 2.5.</b> Türlerine ve şekillerine göre üretilen deney numuneleri. ....	<b>48</b>
<b>Tablo 3. 1.</b> Düzlem dışı mekanik davranışların verileri. ....	<b>60</b>
<b>Tablo 3.2.</b> Düzlem dışı eksenel yönde performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları. ....	<b>66</b>
<b>Tablo 3.3.</b> Düzlem içi genişleme yönüne ait mekanik davranış verileri. ....	<b>72</b>
<b>Tablo 3.4.</b> Düzlem içi genişleme yönünde performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları. ....	<b>75</b>
<b>Tablo 3.5.</b> Düzlem içi boylamsal yöne ait mekanik davranış verileri. ....	<b>79</b>
<b>Tablo 3.6.</b> Düzlem içi boylamsal yöndeki performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları. ....	<b>83</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Bal peteği çekirdek yapıların sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.2. Havalandırmalı bal peteği çekirdek yapısı (Bitzer 1997).....	9
Şekil 1.3. Fiber örgü tipleri örnekleri (a) Plain, (b) Basket, (c) Twill, (d) Örgülü, (e) Ortogonal ve (f) 3 Eksenli (Hexcel Corporation, 2005). ....	17
Şekil 1.4. Sekiz tabakalı fiberlerin yarı-izotropik ve tek yönlü yönlendirme şematiği (Hexcel Corporation, 2005).....	18
Şekil 1.5. Genişletme işlemi üretim süreci (Bitzer 1997).....	21
Şekil 1.6. Oluklu levha üretim süreci (Bitzer, 1997).....	22
Şekil 1.7. Elle yatırma yöntemi (Sumithra vd., 2023). ....	23
Şekil 1.8. Vakum torbalama yöntemi (Jiudingmaterial, 2024). ....	24
Şekil 1.9. Sprey ile üretim yöntemi (Sumithra vd., 2023).....	25
Şekil 1.10. Profil çekme yöntemi (Jiuding New Material,2020).....	27
Şekil 1.11. Kalıba reçine enjeksiyonu (KRE) yöntemi (Tekstilbilgi, 2022). ....	28
Şekil 2.1. Oluklu üretim sürecinin bileşenleri ve önerilen KFTP petek yapılarının kare, daire ve altıgen şekillerine ait geometrik konfigürasyonlar. ....	34
Şekil 3.1. (a) KFTP kompozitin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, (b) Kürlenmiş epoksi reçinenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	54
Şekil 3.2. Düzlem dışı yükleme durumunda farklı hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerin tipik deformasyon modları ve örnek kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	56
Şekil 3.3. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin düzlem dışı basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	58
Şekil 3.4. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin temas noktalarının detaylı gösterimi.....	59
Şekil 3.5. KFTP bal peteği numunelerinin düzlem dışı basma yüklemesi altında enerji sönümlenme performanslarının karşılaştırılması. ....	63
Şekil 3.6. Bu çalışmada önerilen KFTP bal petek yapıların özelliklerinin dahil edildiği mühendislik malzemeleri için dayanım-yoğunluk haritası.....	64

<b>Şekil 3.7.</b> Farklı hücresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin düzlem dışı enerji sönümlenme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri.....	<b>65</b>
<b>Şekil 3.8.</b> Düzlem içi genişleme yönünde basma yüklemesi altında kare, dairesel ve altıgen hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerin tipik deformasyon modları ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri. ....	<b>68</b>
<b>Şekil 3.9.</b> Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin genişleme yönünde düzlem içi basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	<b>70</b>
<b>Şekil 3.10.</b> KFTP bal peteği numunelerinin genişleme yönünde düzlem içi basma yüklemesi altında enerji sönümlenme performanslarının karşılaştırılması.....	<b>74</b>
<b>Şekil 3.11.</b> Farklı hücresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin genişleme yönündeki enerji sönümlenme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri.....	<b>76</b>
<b>Şekil 3.12.</b> Düzlem içi boylamsal yönde basma yüklemesi altında kare, dairesel ve altıgen hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerin tipik deformasyon modları ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri. ....	<b>77</b>
<b>Şekil 3.13.</b> Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin boylamsal yönde düzlem içi basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	<b>80</b>
<b>Şekil 3.14.</b> KFTP bal peteği numunelerinin boylamsal yönde düzlem içi basma yüklemesi altında enerji sönümlenme performanslarının karşılaştırılması.....	<b>82</b>
<b>Şekil 3.15.</b> Farklı hücresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin boylamsal yöndeki enerji sönümlenme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri.....	<b>84</b>

## RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
<b>Resim 1.1.</b> Alüminyum bal petekleri altıgen ve dalgalı çekirdek yapı görseli (Haxcore, 2024)-.....	8
<b>Resim 1.2.</b> Delikli ve havalandırma kanallı alüminyum bal peteği çekirdek yapısı görseli- (Bitzer 1997). .....	10
<b>Resim 1.3.</b> PVC köpük ve alüminyum köpük görselleri (Beihaicomposite 2024, Jloncomposite 2024). .....	10
<b>Resim 1.4.</b> Polipropilen bal peteği çekirdeği.....	11
<b>Resim 1.5.</b> Kâğıt bal peteği çekirdeği.....	12
<b>Resim 1.6.</b> Aramid (Nomex) bal peteği çekirdek yapısı.....	13
<b>Resim 1.7.</b> Balsa çekirdekli sörf tahtası içi.....	13
<b>Resim 1.8.</b> Seramik elyaf kumaş ve seramik fiber battaniye (Kompozitsan, 2018). .....	14
<b>Resim 1.9.</b> Cam fiber kumaş 300 <i>gr/m<sup>2</sup></i> Plain ve Twill dokuma örnekleri (Kompozitsan, 2018). .....	15
<b>Resim 1.10.</b> Kevlar fiber kumaş 200 <i>gr/m<sup>2</sup></i> Plain ve Twill dokuma örnekleri- (Kompozitsan, 2018)-.....	16
<b>Resim 1.11.</b> Karbon fiber kumaş 200 <i>gr/m<sup>2</sup></i> UD, Plain ve Twill dokuma örnekleri (Kompozitsan, 2018). .....	17
<b>Resim 1.12.</b> F-1564 Epoksi Reçine ve F-3487 Epoksi Sertleştirici (Kompozitsan, 2018).....	19
<b>Resim 1.13.</b> Vakum infüzyon makinesi 1500X2000 <i>mm</i> ve örnek numune .....	26
<b>Resim 1.14.</b> Otoklav kalıplama tüpü (Medico Teknik, 2024). .....	30
<b>Resim 2.1.</b> Çubuk kullanımı ile kalıplama yöntemiyle üretilen altıgen örnek. ....	31
<b>Resim 2.2.</b> Mum çubuk kullanımı ile üretilen dairesel örnek .....	32
<b>Resim 2.3.</b> Çentik açma yöntemiyle üretilen kare topoloji örneği.....	32
<b>Resim 2.4.</b> PROBOTSAN marka CNC dikişleme merkezi .....	36
<b>Resim 2.5.</b> Kare, daire ve altıgen kalıpların görselleri.....	37
<b>Resim 2.6.</b> Kare kalıba krem vaks uygulanması. ....	40

<b>Resim 2.7.</b> Kare kalıp içerisine alüminyum çubuk yerleştirme işlemi.....	<b>40</b>
<b>Resim 2.8.</b> Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesi.....	<b>41</b>
<b>Resim 2.9.</b> 100 kg yük altında kalıp içerisine kurlenme sürecinin gösterimi. ....	<b>42</b>
<b>Resim 2.10.</b> Kare model oluklu levha. ....	<b>43</b>
<b>Resim 2.11.</b> Daire model oluklu levha.....	<b>43</b>
<b>Resim 2.12.</b> Altıgen model oluklu levha. ....	<b>44</b>
<b>Resim 2.13.</b> Oluklu levhalardan oluklu blok yapımının gösterimi. ....	<b>44</b>
<b>Resim 2.14.</b> 0,25 mm kalınlıkta kare, daire ve altıgenden oluşan 54 adet test numunesi .....	<b>45</b>
<b>Resim 2.15.</b> 0,25 mm kalınlıkta 80x80 mm ölçüsünde 40, 60 ve 80 mm yükseklikte kare numune.....	<b>46</b>
<b>Resim 2.16.</b> 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde kare deney numunesi. ....	<b>47</b>
<b>Resim 2.17.</b> 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde daire deney numunesi.....	<b>47</b>
<b>Resim 2.18.</b> 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde altıgen deney numunesi. ....	<b>47</b>
<b>Resim 2.19.</b> Besmak marka BMT-E serisi 100 kN test cihazı. ....	<b>51</b>
<b>Resim 2.20.</b> BTM-S Serisi 600 kN test cihazı.....	<b>51</b>
<b>Resim 2.21.</b> Ürünlerin aksenal, boylamsal ve genişleme basma yönleri.....	<b>52</b>
<b>Resim 3.1.</b> KFTP kompozit çekme numunelerinin hazırlanması ve örnek çekme deneyinden görüntüler:.....	<b>53</b>
<b>Resim 3.2.</b> Epoksi reçine çekme numunelerinin hazırlanması ve örnek çekme deneyinden görüntüler:.....	<b>54</b>
<b>Resim 3.3.</b> Deney esnasında meydana gelen hasarların üstten görüntüleri kare (a), daire (b) ve altıgen (c) numuneler:.....	<b>57</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma$	Çekirdek Basma Mukavemeti
$\theta$	Genişleme Açısı
$\rho$	Yoğunluk
a	Serbest Duvar Uzunluğu
b	Düğüm Genişliği
u	Yükleme Bloğunun (Çenenin) uzaması
A	Kesit Alanı
E	Çekirdek Basma Elastite Modülü
P	En Yüksek Yük
S	Uzama Eğrisinin Eğimi
T	Çekirdek Duvar Kalınlığı

### Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CFTP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
CNC	Computer Numeric Control
EKV	Ezilme Kuvveti Verimliliği
FSY	Filament Sarım Yöntemi
FTP	Fiber Takviyeli Polimer
HKT	Hamur Kalıplama Tekniği
ISO	International Organization for Standardization
KFTP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
KRE	Kalıba Reçine Enjeksiyonu

LKT	Levha Kalıplama Tekniği
LS	Loom-State
MEK	Maksimum Ezilme Kuvveti
OBS	Otomatik Bant Sarımı
OEK	Ortalama Ezilme Kuvveti
OFS	Otomatik Fiber Serimi
ÖSE	Özgöl Sönümlenen Enerji
PET	Polietilen Tereftalat
PET-G	Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	Polilaktid Asit
PVC	Polivinil Klorür
SC	Scoured
SMK	Seramik Matris Kompozitler
TSE	Toplam Sönümlenen Enerji

## GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda sandviç malzemelerin havacılık, uzay teknolojileri, savunma sanayi, otomotiv, gemi yapımı, inşaat sektörü, sportif ekipmanlar ve küçük ev aletleri gibi birçok alanda kullanımı özellikle son yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu bağlamda, özellikle yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda gereksinimlere cevap verebilecek sandviç yapıların hızlı ve ekonomik bir şekilde tasarlanıp üretilmesi giderek önem kazanmaktadır (Yin vd., 2023; Miao vd., 2024; Birman vd., 2018; Guo vd., 2024; Castanie vd., 2020; Al-Khazraji vd., 2024; Ramnath vd., 2019). Bu noktada, özgül mukavemet, özgül enerji sönümü ve çarpışma dayanıklılığı açısından üstün nitelikler sergileyen bal peteği yapıları, yük taşıyıcı ve koruyucu elemanlar olarak son yıllarda büyük ilgi görmektedir (Mohammadi vd., 2023; Qi vd., 2021; Thomas vd., 2019). Bu bağlamda, bal peteği yapılar özellikle sandviç panellerin çekirdek malzemesi ve ince duvarlı enerji sönümleyici sistemlerde dolgu malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır (Yang vd., 2022; Zhao vd., 2022; Sun vd., 2021; Chandrasekaran vd., 2021; Wang vd., 2018; Meran vd., 2016). Sandviç yapılar üzerine gerçekleştirilen çok sayıda çalışmada, numunelerin alt ve üst plakalarında malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, çekirdek malzemenin özelliklerinin geliştirilmesinin de sandviç yapının mekanik performansını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir (Ge vd., 2024; Liu vd., 2024).

Bal peteği yapıların mekanik özellikleri, farklı yükler altında deformasyon davranışları ve enerji sönümleme performansları bal peteği yapıların yapısal topolojileri ve malzeme özelliklerine doğrudan bağlıdır (Sun vd., 2017; Wang vd., 2019). Bu nedenle, bu yapıların mekanik davranış ve özelliklerinin iyileştirilmesi için yeni bal peteği malzemelerinin ve geometrik konfigürasyonların geliştirilmesi oldukça önemli bir konudur. Bu bağlamda, çeşitli petek yapı türlerinin mekanik performansını belirlemek ve iyileştirmek amacıyla birçok sayısal ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında üçgen (Han vd., 2023; Zhang vd., 2022), kare (Cheng vd., 2023; Wang vd., 2022), daire (Hosen vd., 2023, San vd., 2022), altıgen (Moghaddam vd., 2022, Moghaddam vd., 2021), sekizgen (Hedayati vd., 2016) kagome (Wang vd., 2021; Zhang vd., 2013) yumurta ve piramidal (Xiong vd., 2014) gibi birçok farklı petek hücre geometrisi literatürde önerilmiştir. Hücre topolojisinin bal peteği yapıların mekanik davranışı üzerindeki etkilerine ilişkin daha fazla bilgiye araştırma ve inceleme makalelerinden ulaşılabilir (Ge vd., 2024; Ghate ve Goel, 2023; Habib vd. 2018; Chandrasekaran ve Arunachalam, 2021; Miao vd., 2024; Thomas ve Tiwari, 2019; Yin vd., 2023).

Üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde metaller, polimerler ve kompozitler gibi farklı malzemelerden çeşitli formlarda bal peteği yapılar seri ve ekonomik şekilde üretilebilmektedir (Tripathi vd., 2021; Wei vd., 2020). Bununla birlikte, araştırmalar çoğunlukla alüminyum ve Nomex petekler üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle, hafiflikleri ve yüksek mekanik performansları nedeniyle demiryolu, havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde

alüminyum petekler yaygın olarak kullanılmaktadır (Birman vd., 2018; Ivanez vd., 2017; Han vd., 2017; Meran vd., 2014). Benzer şekilde, Nomex petekleri de yüksek özgül dayanımları ile öne çıkmaktadır (Ahmad vd., 2020; Foo vd., 2007). Öte yandan, ultra hafif ince duvarlı metalik bal peteklerinin burkulma hasarına yatkınlıkları, uzay araçları, demiryolu araçları ve denizaltılar gibi yüksek basma dayanımı gerektiren uygulamalarda bu malzemelerin kullanımında sınırlayıcı bir etkidir. Bu noktada, geleneksel metal çekirdek yapıların yerine fenolik reçineye batırılmış aramid kâğıt, karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) ve cam fiber takviyeli polimer (CFTP) gibi fiber takviyeli polimer (FTP) kompozit malzemeler üstün mekanik özelliklere sahip düşük ağırlıklı bal peteklerinin geliştirilmesi için eşsiz bir fırsat sunmaktadır (Vitale vd., 2018; Zhang vd., 2018; Liu ve Turner, 2017; Yu vd., 2016; Prakash vd., 2015; Lu vd., 2015; Dong ve Wadley, 2015). Bu bağlamda, son yıllarda yapılan çok sayıda çalışmada özellikle KFTP petek yapıların birçok hücresele veya gözenekli malzemedan (örneğin, alüminyum örgülerle üretilen yapılar, polimer ve metal köpükler) daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine ve basma mukavemetine sahip olduğu gösterilmiştir (George vd., 2013; Xiong vd., 2010; Finnegan vd., 2007; Dou vd., 2022). Ayrıca, KFTP kompozitler diğer malzemeler ile kıyaslandığında yüksek sıcaklık direnci ve iyi korozyon özellikleri sergilemektedir (Wei vd., 2022; Dou vd., 2021). Bu nedenlerle, KFTP kompozit bal petekleri özellikle son yıllarda hafif sandviç ve çok işlevli yapıların inşası gibi mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır (Zaini vd., 2020; Russell vd., 2008).

Çekirdek topolojisinin veya hücre geometrisinin kompozit bal peteklerinin mekanik davranışlarında önemli etkileri vardır. Öte yandan, bal peteği tasarımlarında umut vadeci mekanik özellikleri, optimum malzeme kullanımına olanak sağlamaları ve kalıplama ve oluklama gibi yöntemlerle görece kolay şekilde üretilebilirlik açısından kare, daire ve altıgen hücre topolojileri literatürde en yaygın şekilde dikkate alınan hücre geometrileridir (Qi vd., 2021; Wei vd., 2020; Habib vd., 2018; Ghate vd., 2023). Bunlar arasından, dairesel hücreli bal petekleri yüksek özgül mukavemete ve darbe dayanıma sahip olmasına rağmen geleneksel dairesel petek tasarımları hücreler arasında boşluklar içerir (San vd., 2022; Wang vd., 2020). Kare hücreli bal petekleri ise kompakt bir yapıya ve düzlem içi ve düzlem dışı yüklemeler altında yüksek mukavemete sahiptir (Wang vd., 2022; Russel vd., 2008). Kare hücreli peteklerin kayma mukavemet değerlerinin piramidal ve oluklu gibi çekirdek modellerle karşılaştırıldığında sandviç yapımında uygulama için çok daha büyük potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir (Cote vd., 2006, 2009). Benzer şekilde, altıgen bal petekleri hem üstün mekanik özelliklere ve hem de kompakt yapıya sahip olup, bu yapılar mühendislik alanlarında en sık kullanılan hücresele yapılardan biridir (Moghaddam vd., 2022; Li vd., 2018).

KFTP bal peteği yapıların düzlem içi ve düzlem dışı basma dayanımları ve enerji sönümlenme özelliklerinin incelenmesi üzerine özellikle son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. KFTP peteklerin düzlem dışı yöndeki dayanım özellikleri düzlem içi yönlerle kıyaslandığında tipik olarak daha yüksektir. Ayrıca, bal peteği hücre çekirdekleri basma yüküne karşı mukavemetli olmalarına rağmen kesme ve eğilme yüklerine karşı dayanımları genellikle görece daha

düşüktür (Solmaz vd., 2018; Zhonggang vd., 2017; Qiang vd., 2016; Lu vd., 2015; Zhou vd., 2009). Bu nedenle, sandviç panel uygulamaları için bu yapıların çoğunlukla düzlem dışı ezilme performansına odaklanılmıştır. Ancak, çeşitli uygulamalarda KFTP peteklerin düzlem içi mekanik özelliklerinin optimum petek tasarımlarının ortaya konmasında kritik önemi vardır (Shi vd., 2023; Dou vd., 2022; Moghaddam vd., 2021). Bu bağlamda, KFTP bal peteklerinin düzlem içi ve dışı ezilme davranışları ile enerji sönümlenme kabiliyetleri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar takip eden satırlarda özetlenmiştir. Russell vd. (2008), FTP kompozit levhaların kanal açma yöntemiyle üretilmesi, birleştirilmesi ve yapıştırılmasıyla oluşturulan KFTP kare peteklerin sanki-statik düzlem dışı yükleme durumunda basma ve kayma deformasyonunu incelemiştir. Bu çalışmada, KFTP kare peteklerin düzlem dışı basma dayanımının aynı yoğunluğa sahip çelikten yapılmış piramitsel yapılar ve kare petek dahil üzere birçok malzemedan daha üstün olduğu bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, KFTP bal peteği yapıların yüksek dayanıklılık ve düşük ağırlık kombinasyonunun istendiği uygulamalarda özellikle avantajlı olabileceğini göstermiştir (Saito vd., 2014). Ayrıca, Park vd. (2012), kanal açma, birleştirme ve yapıştırma tekniği ile üretilen kare KFTP peteklerin dinamik ezilme davranışını incelemiştir. Yu vd. (2016), kanal açma ve birleştirme yöntemi ile üretilen çoklu fonksiyonlu kare KFTP peteklerin düzlem dışı termal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Lu vd. (2015), kalıplama tekniği kullanarak KFTP bal petekleri üretmiş ve mekanik performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, alüminyum ve Nomex® bal petekli sandviçlerle karşılaştırıldığında, KFTP bal petekli sandviçin daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğunu gösterilmiştir. Ayrıca, Vitale vd. (2018), düz lamine levhaların birleştirme yöntemini kullanarak çekirdek yoğunluğu  $48 \text{ kg/m}^3$ 'ten az olan ultra hafif KFTP çekirdekler üretmiş ve sandviç panellerin basma özelliklerini incelemişlerdir. Alia vd. (2018) vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilen KFTP bal peteği yapıların basma dayanımları ve enerji sönümlenme performanslarını incelemişlerdir. Alia vd. (2020) ayrıca yükleme hızının KFTP peteklerinin basma performansı üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Feng vd., (2018) optimize edilmiş yüksek modüllü hiyerarşik fazlara sahip kare KFTP peteklerinin ezilme ve kayma özelliklerini araştırmışlardır. Chen vd., (2021) kalıplama ve birleştirme işlemiyle üretilen KFTP kavisli duvarlı peteklerin düzlem dışı basma performansını incelemişlerdir. Başka bir çalışmada, Chen vd., (2023) 2.5D KFTP petek yapısının sanki-statik düzlem dışı basma yükü altında mekanik performansını incelemişlerdir. Rao vd., (2019), vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi üretilen KFTP peteklerinin düzlem dışı basma performansını araştırmışlardır. Kondratiev vd., (2023) katman yöneliminin karbon fiber peteklerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Zhao vd., (2021) çoklu fonksiyonlu KFTP petek sandviç yapıları için bir üretim stratejisi sunmuş ve bu yapıların düzlem dışı ezilme ve termal davranışını araştırmışlardır.

Son yıllarda KFTP petek yapıların üretiminde 3D baskı teknolojileri yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda, Dou vd., (2022) 3D yazdırılmış sürekli KFTP petek yapıların düzlem içi basma özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, Zeng vd., (2021) şekil hafızası

etkilerine sahip 3D baskılı KFTP peteklerin hem düzlem dışı hem de düzlem içi ezilme özelliklerini ve çarpışma dayanıklılık performansını incelemişlerdir. Quan vd. (2020) 3D baskı teknolojisi kullanılarak üretilen KFTP ökzetik petek yapıların düzlem içi basma özelliklerini incelemişlerdir. Lin vd., (2022) KFTP peteklerinin düzlem dışı ezilme ve kayma davranışını incelemişlerdir. Başka bir çalışmada, Khan vd., (2022) sıvı termoplastik reçine kullanılarak üretilen KFTP petek yapıların enerji sönümleme özelliklerini incelemişlerdir.

Yukarıda bahsi geçen tüm sayısal ve deneysel araştırmalar, KFTP bal peteği yapıların üstün mekanik performanslarını ortaya koymuş ve farklı uygulamalar için taşıdığı potansiyeli gözler önüne sermiştir. Bu bağlamda, KFTP kompozit bal peteği yapılar için hızlı ve ekonomik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ile bu yapıların düzlem içi ve düzlem dışı mekanik davranışlarının incelenmesi ve optimize edilmesi bu yapılardan arzu edilen performansın elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Öte yandan, yukarıda sunulan literatür özetinden görülebileceği üzere kalıplama ve birleştirme gibi hızlı ve ekonomik üretim yöntemleri ile üretilen farklı topolojilere sahip KFTP petek yapıların, düzlem içi ve düzlem dışı ezilme ve enerji sönümleme davranışlarının incelenmesi ve karşılaştırılması üzerine kapsamlı bir çalışmanın literatürde olmadığı görülmektedir. Bu eksikliğin giderilmesi motivasyonu ile gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında, yüksek dayanım ve enerji sönümleme performansına sahip KFTP bal peteği yapıların tasarım, üretim ve mekanik davranışlarına odaklanılmış olup, bu yapıların çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak ezilme ve enerji sönümleme performansları deneysel olarak kapsamlı bir biçimde incelenmiş ve performansları farklı hücreli ve gözenekli yapılar ile karşılaştırılmıştır. KFTP kompozit bal peteklerinin düşük maliyetli ve seri bir şekilde üretimleri kalıplama ve yapıştırma tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Hücre şeklinin bal peteği yapıların mekanik davranışlarına etkilerinin incelenmesi bağlamında tasarımlarda kare, daire ve altıgen olmak üzere üç farklı çekirdek geometrisi dikkate alınmıştır. Ayrıca, hücre duvar kalınlığı ve yükseklik parametrelerinin yapıların mekanik davranışlarına etkileri tez kapsamında incelenmiştir. Farklı hücre topoloji ve parametrelerine sahip bal peteği yapıların mekanik davranışları ve enerji sönümleme özellikleri hem düzlem içi hem düzlem dışı statik yüklemeler altında incelenmiş; basma dayanımı, toplam sönümlenen enerji, özgül sönümlenen enerji, ortalama ezilme kuvveti, maksimum ezilme kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliği gibi kriterler dikkate alınarak tasarım parametrelerinin bal peteği yapıların mekanik davranışlarına ve enerji sönümleme performanslarına etkileri ortaya konulmuştur. Tez kapsamında elde edilen bulgular dikkate alınan KFTP bal peteği yapıların hem düzlem içi hem düzlem dışı yükleme koşulları altında yüksek özgül dayanım ve enerji sönümleme performansına sahip olduklarını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca uygun tasarım parametrelerinin seçimi ile KFTP bal peteği yapıların mekanik performanslarının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. KFTP kompozit bal peteği yapıların hem düzlem içi hem düzlem dışı yükleme koşulları altındaki mekanik ve enerji sönümleme performansları ayrıca literatürdeki çeşitli gözenekli ve hücreli yapıların mekanik ve enerji sönümleme performanslarıyla kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonuçları KFTP kompozit bal peteklerinin hem

düzlem içi hem düzlem dışı yönlerdeki mekanik ve enerji sönümlenme performanslarının literatürdeki birçok alternatif hücresel konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Tez kapsamında elde edilen tüm bulgular yüksek özgül dayanım ve enerji sönümü gerektiren uygulamalar bağlamında KFTP kompozit bal peteklerinin yüksek potansiyelini ortaya koymuştur.



## 1. BÖLÜM

### BAL PETEĞİ ÇEKİRDEK YAPILAR ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ

#### 1.1. Bal Peteği Çekirdek Yapıların Sınıflandırılması

Bal peteği çekirdekler arıların doğal olarak ürettikleri bal peteklerine benzer özellikler gösteren yapılardır. Bal peteği yapıları, en az malzeme kullanarak maksimum yüzey alanı sağlama amacına uygun olarak tasarlanmaktadır. Bu tasarımlar örneğin altıgen formun yapısal verimliliğini kullanarak minimum malzeme ile yüksek dayanım sağlamaktadır. Günümüzde, çeşitli form ve yapıdaki çekirdek malzemeler kullanılmakta olup, bu çekirdekler basma kuvvetine karşı yüksek dayanım sergilemektedir. Bu bağlamda, kare, dikdörtgen, üçgen, dairesel, zikzak, piramit, kagome ve chiral gibi çok farklı kafes yapı formları kullanılmakta ve her bir formun üretiminde yapıştırma, kalıplama gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

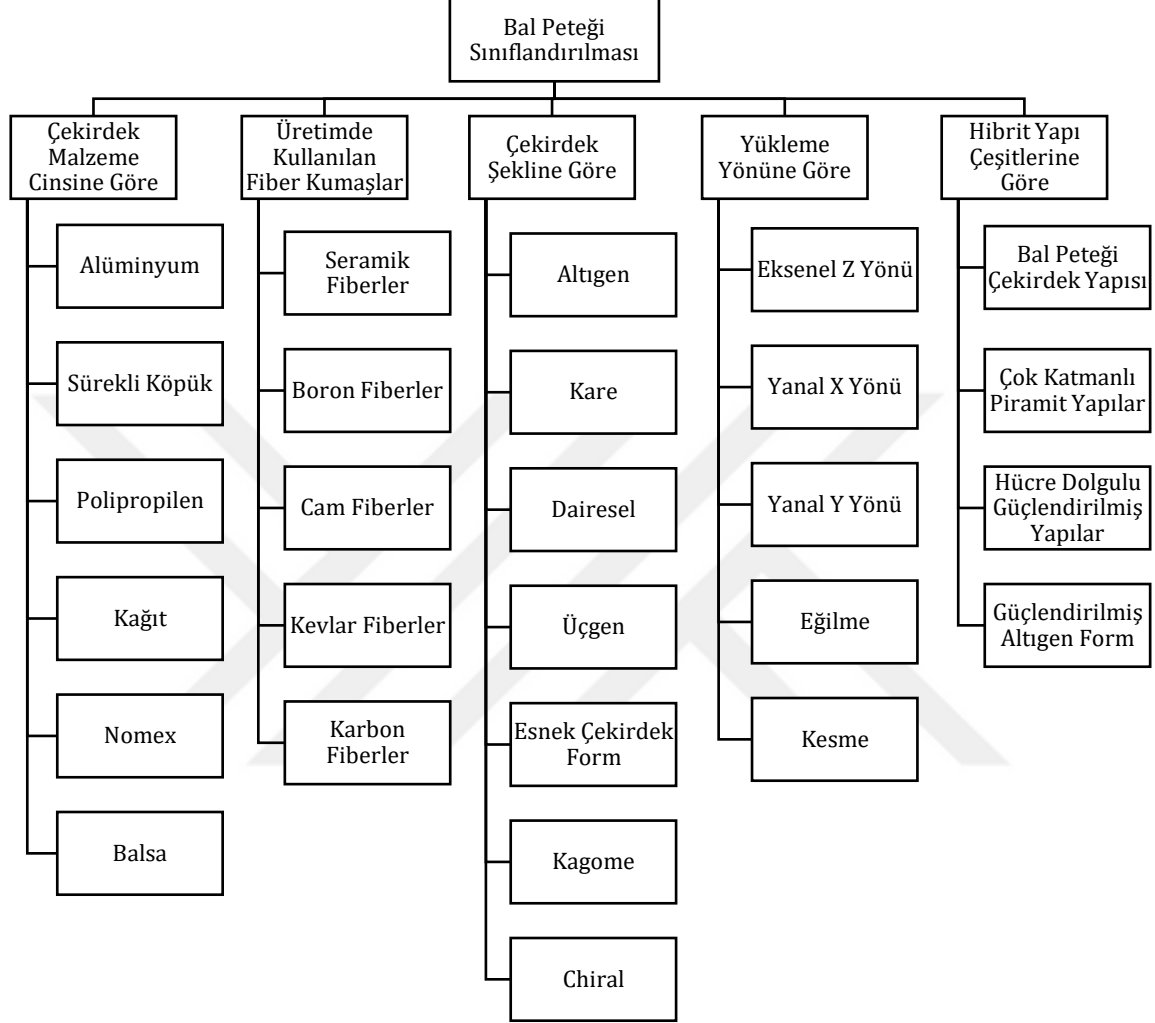
Bal peteği çekirdekleri, farklı malzemeler kullanılarak üretilmekte olup, temelde metalik, kompozit ve plastik esaslı olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Metalik bal peteği çekirdekleri, genellikle alüminyum folyo kullanılarak üretilirken; kompozit bal peteği çekirdeklerinde epoksi reçine emdirilmiş fenolik aramid kâğıtlar, plastik bal peteği çekirdeklerinde ise poliüretan malzemeler tercih edilmektedir. Bal peteği sistemlerinde ısıya dayanıklı ve yüksek dayanım-ağırlık oranı sağlayan çekirdek yapılar öncelikli olarak tercih edilmektedir.

Metalik bal peteği çekirdekleri genellikle kıvrma veya genişletme işlemleri ile üretilir. Metalik şerit levhalar, istenilen ölçüde kesildikten sonra katlanır veya şekillendirilir. Üst üste gelen kısımlarına yapıştırıcı uygulanarak birleştirilen levhalar, blok halinde çekirdek hücreleri oluşturur. Genişletme işlemi sırasında rulo halindeki çekirdek malzemeye yapıştırıcı sürülüp, levhalar üst üste dizildikten sonra ürün istenen kalınlıkta kesilir ve genişletilerek bal peteği yapısı elde edilir. Üretim sonrasında, bal peteği kullanılmadan önce fazla atık malzemeler temizlenir. Bu çekirdek yapıların kompozit malzemedeki üretiminde vakumlama, kalıplama ve sıcak presleme gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Bal peteği çekirdeklerin dayanımı, hücre sayısına ve temas yüzeyine doğrudan bağlıdır. Hücre sayısı arttıkça ve temas yüzeyi genişledikçe, çekirdek bloklar basma ve darbe kuvvetlerine karşı daha yüksek mukavemet sağlar. Ancak, kesme gerilmelerine karşı aynı oranda direnç göstermezler. Bu nedenle, çekirdekler sandviç yapılar haline getirilerek mekanik dayanımları artırılır.

Bal peteği çekirdek yapıları, kara, deniz, hava ve uzay araçlarının yanı sıra silah sanayi ve diğer endüstriyel alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bal peteği çekirdeklerin bu alanlarda tercih edilmesinin temel nedeni, hafif olmalarına rağmen yüksek mukavemet sunmalarıdır. Bu çekirdekler, sandviç panel yapıları haline getirilerek pek çok ürünün tasarımında yer almakta ve çeşitli formlar oluşturularak farklı yapısal çözümler sunmaktadır. Bal peteği çekirdek

yapıları, çeşitli özelliklerine ve taşıyacağı yüklere göre Şekil 1.1'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilirler.



**Şekil 1.1.** Bal peteği çekirdek yapıların sınıflandırılması

Çekirdek malzemelerin hangi alanda kullanılacağı, o ortamın fiziksel ve kimyasal koşullarına uygun olarak belirlenmelidir. Özellikle sıcaklık, korozyon ve diğer çevresel etkiler karşısında malzemenin rijitliğini ve mukavemetini koruyup koruyamayacağı titizlikle araştırılmalıdır. Ayrıca, üretim maliyetlerinin hesaplanması ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin göz önünde bulundurulması da son derece önemlidir.

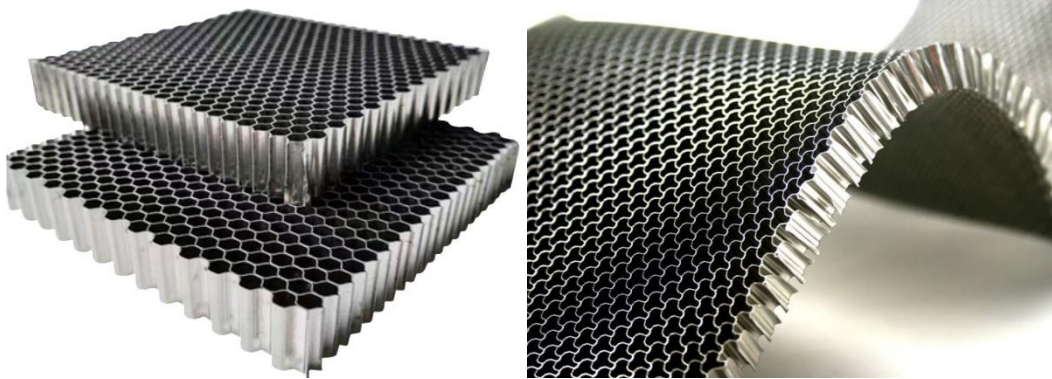
Bal peteği çekirdekleri ve kompozit paneller, özellikle hafiflik ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda büyük avantajlar sunar. Ağırlığın kritik bir problem olduğu durumlarda bal peteği yapılar, yüksek mukavemet ve rijitlik sağlayarak otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi alanlarda tercih edilmektedir. Örneğin, otomobil şaselerinin üretiminde, hızlı trenlerin burun

kısımlarında ve uçakların gövde panellerinde bal peteği çekirdek yapıların kullanımı, bu sistemlerin performansını artırmaktadır. Ayrıca bu yapılar kaza anlarında darbelerden kaynaklanan kuvvetleri sönmüleyerek, yolcu güvenliğine önemli katkı sağlamaktadır.

### 1.1.1. Alüminyum bal peteği çekirdek

Alüminyum bal peteği çekirdekleri, kara, deniz, hava ve uzay araçları, silah sanayi gibi çeşitli endüstrilerde kullanılan yüksek mukavemetli ve hafif yapıların temel bileşenlerinden biridir. Alüminyum bal peteği yapılar, mukavemet-ağırlık oranı açısından diğer birçok malzemeye kıyasla daha avantajlıdır ve ekonomik ve hafif olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Alüminyum bal peteği çekirdek hücreleri, 25, 40, 50, 60 veya 75 mikron kalınlığındaki 3000, 5000 ve 7000 serisi alaşımlı alüminyum folyolardan üretilmektedir. Hücreler oluşturulurken, mukavemetin yanında korozyon direncini artırmak için folyolar üzerine özel kaplamalar uygulanmaktadır (Resim 1.1). Bu özellikleri sayesinde alüminyum bal peteği çekirdekleri, hafif olmalarının yanı sıra yüksek dayanıklılığa sahip ürünler olarak dikkat çekmektedir (Haxcore, 2024).

Alüminyum bal peteği çekirdeklerinin kullanım alanları, yalnızca yukarıda bahsedilen endüstrilerle sınırlı kalmaz; aynı zamanda inşaat, taşımacılık ve yenilenebilir enerji sektörlerinde de bu çekirdek yapılar, ağırlığın azaltılması ve mukavemetin artırılması gereken durumlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.



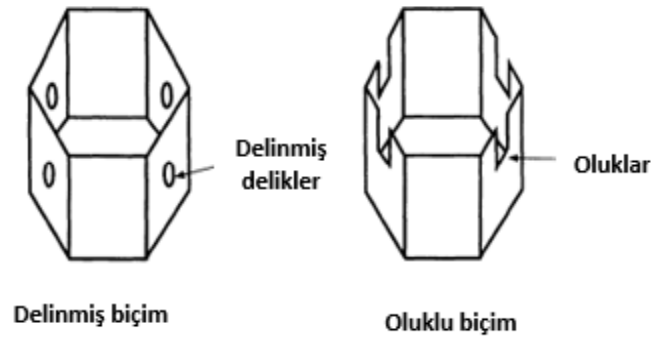
**Resim 1.1.** Alüminyum bal petekleri altıgen ve dalgalı çekirdek yapı görseli (Haxcore, 2024)

Alüminyumdan üretilen ince cidarlı çekirdekli paneller, hafif olmalarının yanı sıra kolay işlenebilirlik, kesme ve basma dayanımı, alev ve aşınma direnci ile korozyona dayanıklılık gibi özellikleriyle kara, hava, deniz ve uzay araçları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek başına kullanıldığında alüminyum bal peteği yapılar, şok emme, hava akışı kontrolü, su ve lazer jetlerinde destek masası gibi işlevlerde de yer alır. Blok haldeki

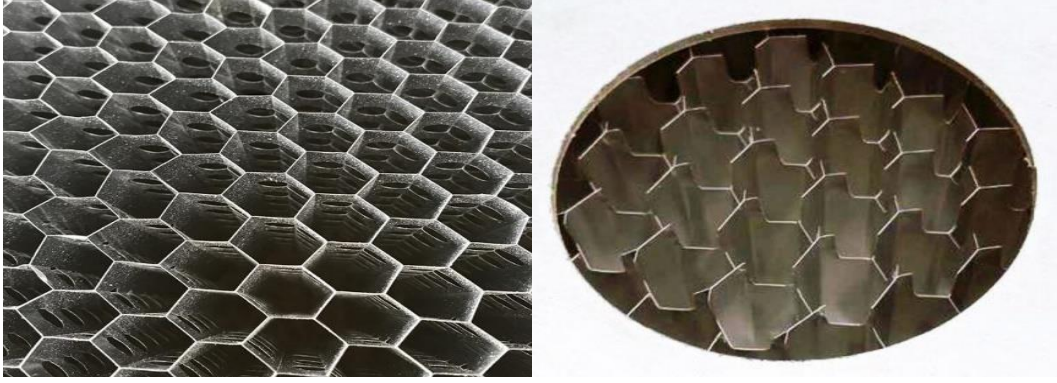
alüminyum bal peteği çekirdekler, hücre yapılarının ısı difüzyonunu ve ses dalgasının yayılmasını büyük ölçüde engelleyerek mükemmel ısı ve ses yalıtımı sağlar. Alüminyum çekirdek hücrelerin yüzeyinde uygulanan film kaplaması, bu malzemeleri nemli ortamlarda daha dayanıklı hale getirir. Diğer çekirdek malzemelere kıyasla, alüminyum bal peteği çekirdekler, mekanik performans-ağırlık oranı açısından oldukça avantajlıdır. Hücre duvarlarının kalınlıkları sabit olduğu için basma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek direnç gösterirler. Bu yapılar, çeşitli hücre boyutlarında üretilebilir ve hem fiyat hem kalite açısından üstün performans sunarlar.

Uzay araçlarının fırlatılması sırasında çevre koşulları nedeniyle ortamda yüksek sıcaklıklar meydana gelir. Bu sıcaklıklar, bal peteği yapısındaki hücrelerde hapsedilmiş havanın genişlemesine ve basınç oluşturmaya yol açar. Eğer bu basınç kontrol edilmez ve havalandırma yapılmazsa, alüminyum bal peteği çekirdeklerinde bulunan ince kaplama zarar görür ve kaplamanın çekirdekten soyulmasına neden olur, bu da sandviç panelin işlevini yitirmesine yol açabilir. Ayrıca, vakum ortamında sandviç paneller, içerisindeki havayı emebilir, bu da bal peteği hücrelerinde istenmeyen hava birikimlerine sebep olur. Uzay aracı uygulamalarında, bal peteği hücrelerindeki sıkışan havanın kaçmasını sağlamak için hücrelerde havalandırma delikleri ve kanalların açılması zorunlu hale gelir.

Havalandırılmalı bal peteği çekirdek yapısının şematik çizimi Şekil 1.2'de, görseli ise Resim 1.2'de gösterilmiştir. Uzay araçları tasarımlarında, delikli ve havalandırma kanallı alüminyum bal peteği çekirdekleri hem oluklu hem de genişletilmiş çekirdeklerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yapıda, maksimum derinlik yuva genişliğinin iki katından fazla olmamalıdır. Bu sayede, bal peteği çekirdek duvarlarındaki yapı ile güçlü, kararlı, hafif ve etkili hava sirkülasyonu sağlayan alüminyum bal peteği çekirdekleri geliştirilmiş olmaktadır (Bitzer 1997).



**Şekil 1.2.** Havalandırılmalı bal peteği çekirdek yapısı (Bitzer 1997)



**Resim 1.2.** Delikli ve havalandırma kanallı alüminyum bal peteği çekirdek yapısı görseli (Bitzer 1997)

### 1.1.2. Sürekli köpük çekirdek

Sürekli köpük çekirdek malzemeler, çeşitli kimyasal maddeler kullanılarak farklı üretim teknikleri ile elde edilmektedir. Bu malzemelerin tasarlanmasındaki ana amaç, minimum yoğunluğa sahip olup dayanım gücünü maksimum düzeye çıkarmaktır. Sürekli köpük çekirdekler, yumuşak, yarı sert veya sert olacak şekilde üretilebilirler. Üretim yöntemine göre gözenekli yapıları değişiklik gösterir. Kapalı gözenekli köpükler yüksek basınç altında üretilirken, düşük basınç sistemlerinde karışık gözenekli yapılar oluşur. Kapalı gözenekli köpükler sıvı girişine dirençlidir ve korozyona karşı yüksek dayanım gösterir; ancak belirli kimyasallara karşı hassastır (Resim 1.3), (Beihaicomposite 2024).

Bu malzemeler havacılık sektörü başta olmak üzere birçok endüstride kullanılmakta olup, yüksek basınca karşı dayanıklılık sağlarlar. Ayrıca, yoğunluk arttıkça mekanik dayanım da artmaktadır. Hafif olmaları, kalınlıklarını korumaları, kolay taşınmaları ve uygulanmaları, sürekli köpük çekirdekleri cazip kılmaktadır. Ayrıca büyük oranda geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilirler (Resim 1.3), (Jloncomposite 2024).

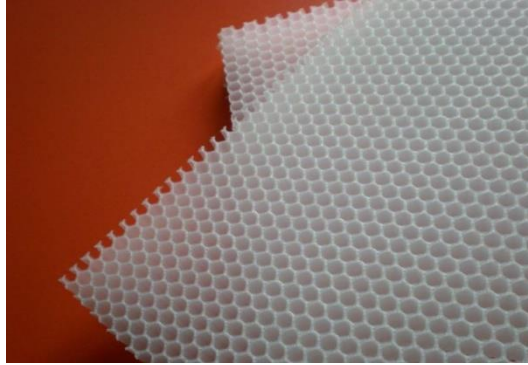


**Resim 1.3.** PVC köpük ve alüminyum köpük görselleri (Beihaicomposite 2024, Jloncomposite 2024)

### 1.1.3. Polipropilen bal peteği çekirdek

Polipropilen bal peteği çekirdekleri, genellikle kompozit panellerin hafifletilmesi amacıyla tercih edilen bir çekirdek yapısıdır. Bu çekirdekler, bal peteği formunda olup, alt ve üst yüzeylerine mekanik özellikleri yüksek termoplastik plakalar yerleştirilerek sandviç paneller oluşturulmaktadır (Resim 1.4). Plakalar ile çekirdeği birbirine yapıştırmak için "yüzey tülü" adı verilen bir bağlayıcı kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı, üretim sürecinde epoksi reçinelerin gözeneklere dolmasını önleyerek, imalatın daha kolay ve verimli bir şekilde tamamlanmasını sağlamaktadır.

Polipropilen bal peteği çekirdekleri, iki yönlü destek sağladığı ve hücre yapıları dikey olarak yerleştirildiği için özellikle düzlem dışı uygulanan kuvvetlere karşı yüksek dayanım göstermektedir. Polipropilenin geri dönüştürülebilir bir malzeme olması ve düşük üretim maliyeti, bu çekirdeklerin ekonomik avantajlarını artırmaktadır. Üretimin ileri aşamalarında, alt ve üst yüzeylere karbon fiber, cam fiber gibi yüksek dayanımlı plakaların yapıştırılması ile hafif ancak güçlü sandviç paneller üretilmektedir. Polipropilen bal peteği çekirdekleri, havacılık, otomotiv, denizcilik ve yat yapımı gibi ileri kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif yapıları sayesinde, hücre duvar kalınlığı ve yüksekliği isteğe göre ayarlanabilir. Ayrıca, suya ve neme karşı dayanıklıdır, kolayca kesilip işlenebilirler ve yüksek basınç altında dahi mukavemetlerini korurlar. Polipropilen bal peteği çekirdekleri elastik bir yapıya sahip oldukları için gürültüyü büyük ölçüde engelleyebilmekte, ayrıca tasarımları sayesinde sesi ve titreşimi etkili bir şekilde azaltmaktadır.



**Resim 1.4.** Polipropilen bal peteği çekirdeği

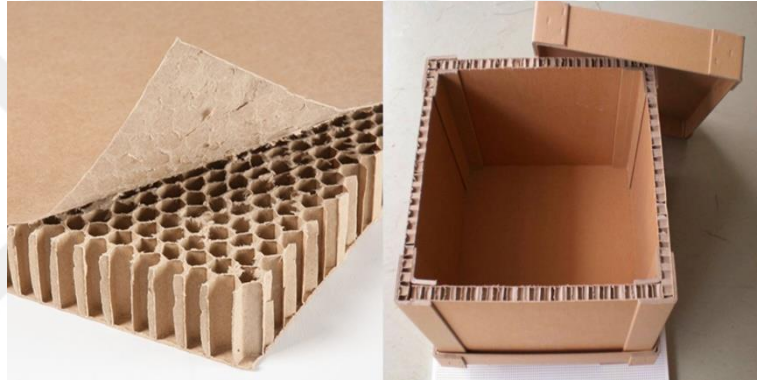
### 1.1.4. Kâğıt bal peteği çekirdek

Kâğıt bal peteği çekirdekler, kâğıtların belirli formlarda üst üste yapıştırılması ve preslenmesi sonucunda katlanmış bir yapı elde edilmesiyle üretilmektedir (Resim 1.5). Bu ürünler, alt ve üst kısımlarından genişletilerek, altıgen formlar şeklinde yüksek mukavemetli kâğıt bal peteği çekirdeklerine dönüştürülmektedir. Benzer şekilde, oluklu kâğıtlar üretilerek, temas

noktalarından yapıştırılmak suretiyle çekirdek yapılar oluşturulmaktadır. Geri dönüşüm imkânları nedeniyle bu tip yapılar ekonomik açıdan da tasarruf sağlamaktadır.

Üretim sürecinde, 70-150  $gr/m^2$  arasında değişen birim ağırlıkta kâğıtlar ikiz tamburlara yerleştirildikten sonra, melamin-üre formaldehit gibi kimyasallarla emdirilerek kurutma fırınında kurutulmakta ve ölçülendirme istasyonunda istenilen ebatlarda şekillendirilmektedir. Genellikle ahşap işlerinde ve mobilya sektöründe tercih edilmektedir.

Kâğıt bal peteği çekirdekleri, çekirdek ağırlığının ve yüksek dayanımın çok önemli olmadığı alanlarda kullanılmaktadır. Nomex ve PVC köpüğüne alternatif olarak düz kâğıt petekler bu tip uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. Ekstra güç ve nem direnci sağlamak amacıyla genişletilebilen bu yapılar, epoksi reçine ile emdirilerek daha da dayanıklı hale getirilebilmektedir.

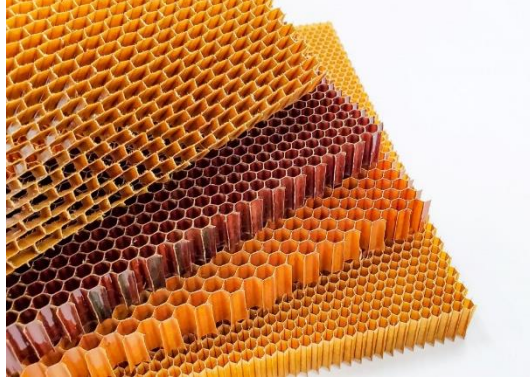


**Resim 1.5.** Kâğıt bal peteği çekirdeği

#### **1.1.5. Nomex (Aramid) bal peteği çekirdek**

Aramid elyaf bal peteği çekirdekleri, genellikle "Nomex bal peteği" olarak adlandırılır. Nomex bal peteği çekirdekleri, aramid elyaf kâğıtlarının fenolik reçine ile emdirilmesi yoluyla üretilir ve çeşitli yoğunluklarda bal peteği formunda şekillendirilir (Resim 1.6). Aramid bal peteği çekirdekleri, yüksek özgül mukavemet, ısıl direnç ve ses yalıtımı gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, kolayca işlenebilir, şekillendirilebilir ve yapıştırıcılar kullanılarak diğer malzemelere bağlanabilirler.

Aramid bal peteği çekirdekleri altıgen, dikdörtgen ve beşgen gibi farklı geometrik şekillere sahiptir. Bu çekirdekler, kompozit panel üretiminde temel malzeme olarak kullanılmaktadır ve özellikle havacılık, askeri uygulamalar, radar antenleri, ulaşım, inşaat, tekne gövdeleri, yarış araçları gövdeleri, tren ve gemi panelleri gibi çeşitli sektörlerde tercih edilmektedir (Dupont, 2024).

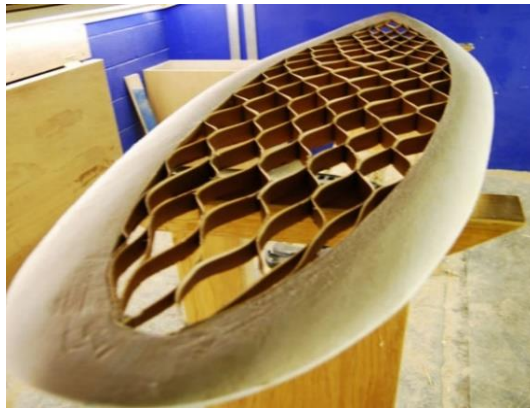


**Resim 1.6.** Aramid (Nomex) bal peteği çekirdek yapısı

#### **1.1.6. Balsa bal peteği çekirdek**

Balsa çekirdek malzemesi, tropikal bölgelerde doğal olarak yetişen balsa ağacından elde edilmektedir. Anavatanı Güney Amerika olan bu ağaç, özellikle Ekvator bölgesindeki rutubetli ve ılıman iklim koşullarında yetişir. Balsa ağaçları, hızlı büyüme kapasiteleri sayesinde bir yıl içinde 12 metre yüksekliğe ulaşabilmekte, 6 ila 10 yıl içinde hasat edilmektedir. Hasat edildiğinde bu ağaçların çapı 60-65 cm'ye, boyları ise yaklaşık 25-30 metreye ulaşır.

Balsa çekirdek malzemesi, 60 ila 380  $kg/m^3$  arasında değişen yoğunluklara sahiptir. Sert tahtalar kategorisinde yer alan balsa ağacı, ince fiçı şeklindeki hücrelere sahiptir ve bu hücreler hava ile doludur. Bu hücrelerden suyun çıkarılması, yapının sağlamlaşmasını sağlar; ancak saf selüloz yapısına sahip olduğundan imalatı zor olabilir. Liflerin yönünde kesilerek işlenen balsa ağacı, rüzgâr türbinleri, gemiler, uçaklar ve uzay araçları gibi çeşitli uygulamalarda yapısal çekirdek malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca, hobi ve film endüstrisi gibi farklı sektörlerde de kullanılmaktadır. Balsa çekirdekli sörf tahtası örneği Resim 1.7'de gösterilmiştir.

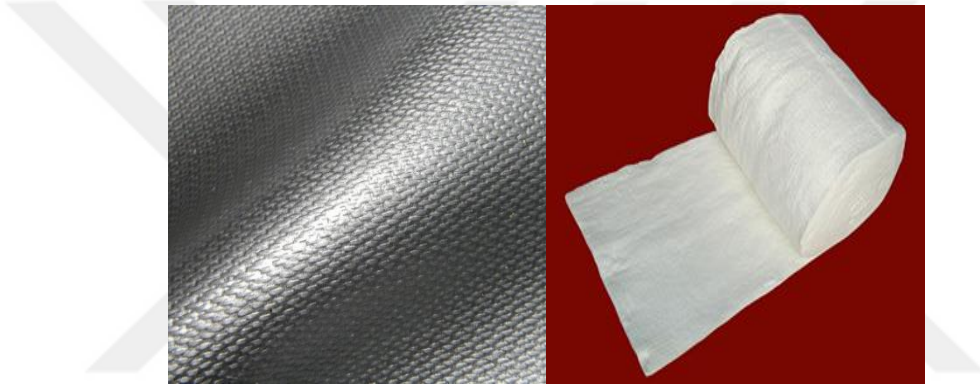


**Resim 1.7.** Balsa çekirdekli sörf tahtası içi

## 1.2. Bal Peteği Üretiminde Kullanılan Fiber Kumaşlar

### 1.2.1. Seramik fiberler

Seramik Matris Kompozitler (SMK), yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özellikleri (800 °C ve üzeri) ve yüksek mukavemetleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu fiberler, aynı zamanda ısı ve ses yalıtımı için de sıklıkla tercih edilmektedir. Camsı seramik fiberler 1250 °C'yi aşan sıcaklıklarda kullanıldığında daralma ve hasar sorunları oluşsa da yüksek sıcaklıklarda daha az genleşme gösterdiği için kristal seramik fiberlerde bu problemler daha az yaşanmaktadır. Seramik fiberler, özellikle çelik endüstrisinde yaygın olarak kullanılırken (%65 oranında), uzay ve savunma sanayii gibi yüksek aşınma ve korozyon dayanımı gerektiren alanlarda da kullanımı yaygınlaşmaktadır (Resim 1.8).



**Resim 1.8.** Seramik elyaf kumaş ve seramik fiber battaniye (Kompozitsan, 2018)

### 1.2.2. Boron fiberler

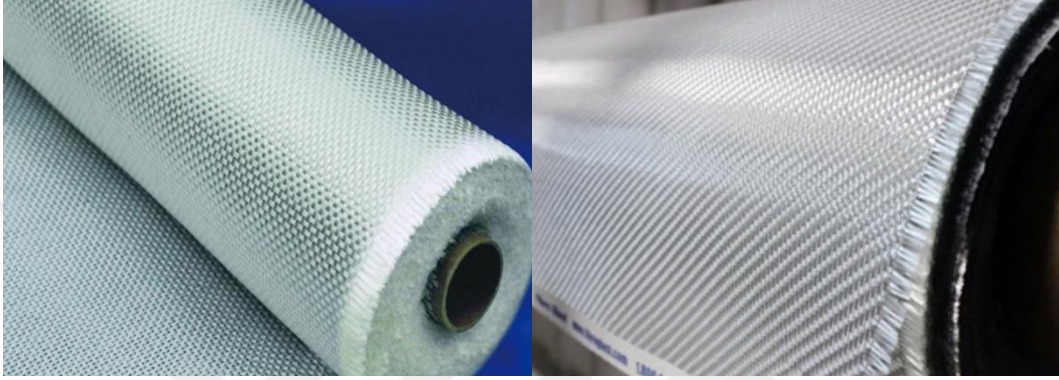
Boron fiberler, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile ince bir tel üzerine üretilir ve yaklaşık 1.000 °C sıcaklıkta üretim gerçekleştirilir. Yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk gibi özellikler sunan boron fiberler, maliyetleri yüksek olduğundan uygulama alanları sınırlıdır. Alüminyum matrislerle takviye edilen boron fiberler, uydu sistemleri, uzay mekikleri ve havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmaktadır

### 1.2.3. Cam fiberler

Cam fiberler, farklı malzemelerin bir araya getirilmesi ile üretilir ve kompozit malzemeler arasında en çok tercih edilen elyaf takviyelerinden biridir. Cam fiber üretiminde alüminyum oksit, kolemanit ve silika gibi maddeler kullanılır. Cam fiberler kimyasal eklemelerle modifiye edilerek farklı özelliklerde ürünler elde edilmektedir. Cam fiberler; A-Cam, C-Cam, E-Cam ve S+R-Cam gibi türlere ayrılır ve bu türler belirli özelliklerine göre farklı sanayi kollarında

kullanılır. Örneğin, E-Cam en yaygın kullanılan elyaf türlerinden biri olup, düşük maliyetli olması ve su emme oranının düşük olması nedeniyle tercih edilir.

Cam fiberlerin düşük maliyetli olması, çeşitli dokuma desenlerine sahip olması ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı gibi avantajları vardır. Ancak, uzun süreli yüklemelere karşı duyarlıdırlar ve belirli bir süre sonra yük altında deformasyona uğrayabilirler. Cam fiber takviyeli plastikler veya polimerler (CFTP) genellikle kompozit panel imalatı gibi alanlarda kullanılır (Resim 1.9).



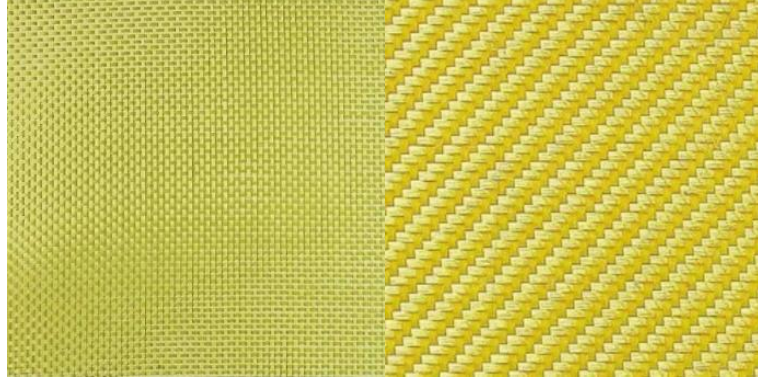
**Resim 1.9.** Cam fiber kumaş 300  $gr/m^2$  Plain ve Twill dokuma örnekleri (Kompozitsan, 2018)

#### 1.2.4. Kevlar fiberler

Kevlar fiberler yüksek sertlik ve mukavemete sahiptirler. En çok bilinen aramid türleri keklar29, keklar49, keklar119, keklar129 ve keklar149'dur. Loom-State (LS, kaplamasız) 61  $gr/m^2$  ve Scoured (SC, temizlenmiş) 41  $gr/m^2$  olmak üzere iki farklı yoğunluğa sahip keklar fiber kumaş uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek performanslı kompozit parça imalatında kullanılan bu keklarlar hafifliği ön plana çıkarmaktadır.

Loom-State türü fiberler, ince ve sık yapısı sayesinde çeşitli şekilleri alabilmekte ve hafifliğin çok kritik olduğu parça imalatlarında kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara, darbeye ve aşınmaya dayanıklı olup, yoğunluğu düşüktür. Epoksi reçine ile beraber, yalnız başına ya da cam fiber, karbon fiber gibi takviye malzemeleriyle birlikte hibrit biçimde kullanılabilir. Özellikle ağırlığın çok kritik olduğu, İHA, havacılık, modelcilik ve otomotiv sektörüne dönük parça imalatları için tercih edilmektedir.

Scoured türü fiberler, epoksi reçinelerle birlikte kurşun geçirmez yelek ve başlık gibi ürünlerin imalatlarında kullanılmaktadır. Hafif yapısı nedeniyle askeri malzeme kullanımında üst düzey performans ortaya koymakta ve bu alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kevlar kumaşların kesilmesi zor olup bundan dolayı imalatlarında özel olarak tasarlanmış mekanik ve elektrikli makaslar kullanılmaktadır (Resim 1.10).



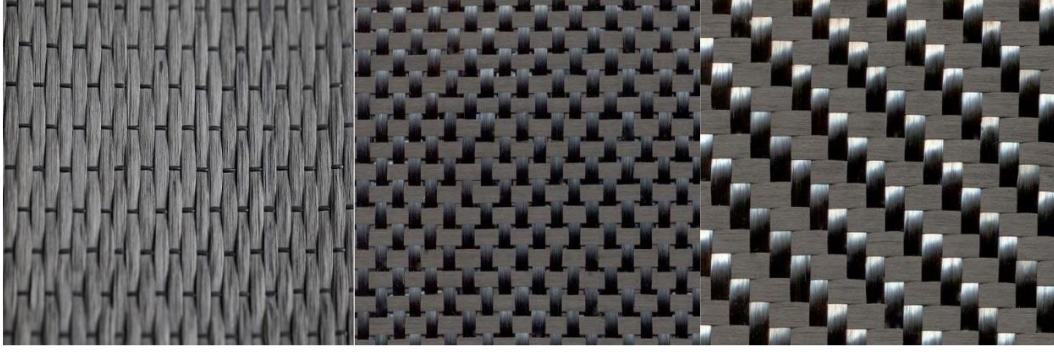
**Resim 1.10.** Kevlar fiber kumaş 200  $gr/m^2$  Plain ve Twill dokuma örnekleri. (Kompozitsan, 2018)

### 1.2.5. Karbon fiberler

Karbon Fiber Takviyeli Polimer veya Karbon Fiber Takviyeli Plastik (KFTP) olarak adlandırılan güçlü ve hafif kompozit malzemenin üretiminde kullanılan takviyeli malzemeleridir. Bu yapılarda, polimer bağlayıcı olarak en çok epoksi reçine kullanılmakta olup, vinil ester, polyester ya da başka bağlayıcılar da tercih edilmektedir. Karbon fiberler farklı kristal yapılardan meydana gelmektedir. Karbon fiber malzemeler kevlar, alüminyum ve cam fiber gibi diğer takviyelerle birlikte hibrit olarak da kullanılmaktadır. Karbon fiberlerin yoğunluğu düşük olup, yüksek sıcaklık dayanımına, yorulma mukavemetine ve korozyon direncine sahiptirler. Dezavantajı ise yüksek maliyetli olması ve geri dönüşümünün olmamasıdır.

Eşit mukavemete sahip karbon fiber, çeliğin yaklaşık beşte biri ağırlığındadır. Bundan dolayı otomotiv şirketleri çeşitli uygulamalarda çelik yerine karbon fiberi tercih edebilmektedir. Hafif metallerden biri olan alüminyum ile karşılaştırıldığında ise, eşit mukavemete sahip bir alüminyum yapıdan karbon fiber yaklaşık 1,5 kata kadar az ağırlığa sahiptir. Havacılık, uzay araçları ve otomotiv sektörü gibi birçok uygulama alanında karbon fiber destekli polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Gelişen üretim teknikleriyle beraber maliyetlerinin azaltılma çalışmaları da yapılmaktadır. Dayanım-ağırlık oranının kritik olduğu birçok spor dalında da karbon fiberler sıklıkla kullanılmakta olup; bisiklet, motosiklet, okçuluk, balık oltaları, raketler, golf ekipmanları, yelkenliler gibi çok çeşitli alanlarda bu malzemenin uygulamaları her geçen gün artmaktadır.

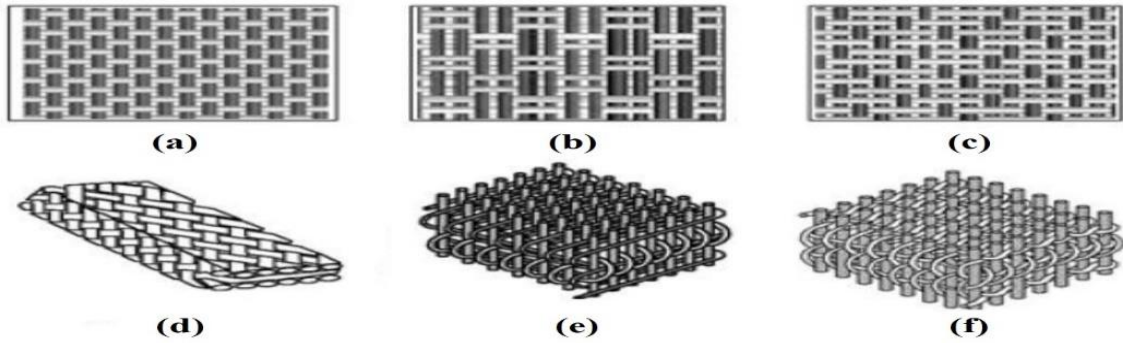
Karbon fiberlerde, dokuma şekline göre UD, Plain ve Twill olmak üzere üç farklı ana yapı bulunmaktadır (Resim 1.11). Karbon fiber iplerin kalınlıkları 1K, 3K, 6K, 12K ve 24K olarak nitelenmektedir. Bu bağlamda, karbon fiber kumaşlar iplerin kalınlıklarına, yoğunluklarına ve dokuma çeşitlerine göre tanımlanmaktadır.



**Resim 1.11.** Karbon fiber kumaş 200  $gr/m^2$  UD, Plain ve Twill dokuma örnekleri (Kompozitsan, 2018)

### 1.3. Fiber Malzemelerin Oryantasyonu

Fiber malzemelerde mekanik özellikler, kullanılan fiberlerin oryantasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fiberlerin temelini oluşturan lifler, mekanik yükleri taşıyan ve yapısal dayanımı belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Genellikle 1K'lık bir fiber demeti yaklaşık 1.000 lif içerir ve bu lifler bir araya getirilerek farklı dokuma tiplerinde kumaş formunda kullanılabilir. Kompozit üretim süreçlerinde, fiber iplerin farklı dokuma desenlerinde kullanılması, yapıların mukavemetini ve dayanımını artırırken, üretim hızını ve verimliliğini de olumlu yönde etkileyebilir. Dokuma kumaş kullanımı, daha hızlı ve seri üretim yapılmasına olanak sağlar ve aynı zamanda farklı geometrilere çok çeşitli tasarımlar ortaya çıkarır. Sanayide en çok kullanılan fiber oryantasyon tipleri ve dokuma çeşitleri Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



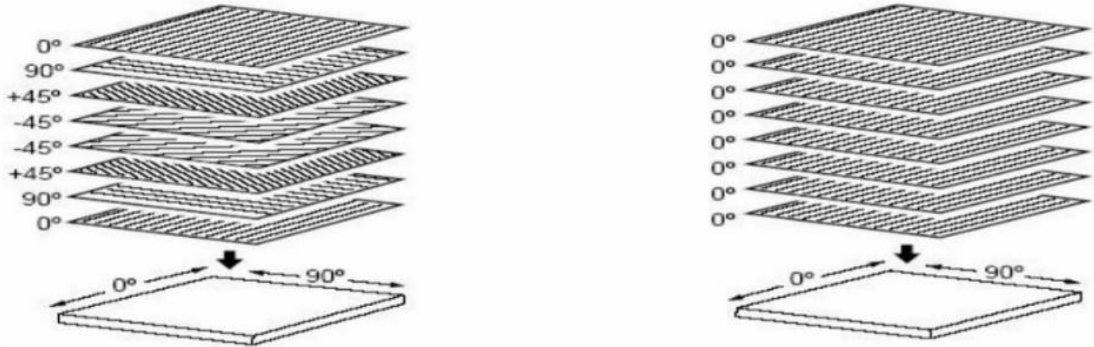
**Şekil 1.3.** Fiber örgü tipleri örnekleri (a) Plain, (b) Basket, (c) Twill, (d) Örgülü, (e) Ortogonal ve (f) 3 Eksenli (Hexcel Corporation, 2005)

Fiberlerin farklı açılarda yönlendirilmesi, kompozit malzemenin çeşitli dış kuvvetlere karşı mukavemetini artırır. Yük taşıma kapasitesini maksimize etmek ve delaminasyon gibi yapısal

zayıflıkları önlemek için fiber oryantasyonu stratejik olarak belirlenmeli ve optimize edilmelidir. Bu sayede, kompozit malzemenin kesme dayanımı, esneklik ve rijitlik gibi mekanik özellikleri, tasarlanan yapıya en uygun şekilde kazandırılır.

Fiber oryantasyonu, lamine levhaların mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Liflerin yönelimi, kompozitin rijitlik, mukavemet ve deformasyon özelliklerini doğrudan etkiler. Aynı lif yönünde üst üste dizilen fiber tabakaları, yapının mukavemetini azaltabilir. Bu nedenle, fiberlerin farklı açılarla yerleştirilmesi, dış yükler altında daha dengeli bir dayanım ve rijitlik sağlar. Liflerin yöneliminin doğru bir şekilde belirlenmemesi, tabakalar arasında delaminasyon olarak adlandırılan tabaka ayrılmalarına yol açabilir. Delaminasyon, kompozit malzemelerde ciddi yapısal hasarların başlangıcı olup, bu durum genellikle liflerin yerleştirilme açısına bağlı olarak meydana gelir. Liflerin düzgün yerleştirilmemesi, kompozitin yük taşıma kapasitesini düşürerek mukavemet kaybına neden olur.

Bu sorunları önlemek amacıyla, fiber tabakalar genellikle  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  gibi farklı açılarla üst üste dizilerek katmanlı yapılar oluşturulur (Şekil 1.4). Bu yapı, liflerin her yönde homojen bir dayanım göstermesini sağlayarak, dış yükler altında daha iyi performans sergilemesini mümkün kılar. Liflerin en düşük kesme dayanımına sahip olduğu açının  $15^\circ$  olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, farklı ihtiyaçlara ve uygulamalara göre fiber oryantasyonu değiştirilmeli ve buna uygun olarak lamine levhaların mekanik dayanım testleri gerçekleştirilmelidir.



**Şekil 1.4.** Sekiz tabakalı fiberlerin yarı-izotropik ve tek yönlü yönlendirme şematifi (Hexcel Corporation, 2005)

#### 1.4. Matris Malzemeler

Kompozit malzemelerde matris, fiberlerin bir arada tutulmasını sağlarken aynı zamanda malzemeye gelen yükleri fiberlere veya parçacıklara aktaran kritik bir bileşen olarak görev yapar. Bununla birlikte, dışarıdan gelen darbe, basınç ve gerilmelere karşı ilk tepkiyi de matris malzeme verir. Bu nedenle kompozit yapıların performansı, kullanılan matris malzemesinin

özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Matris malzemeleri, yüksek elastik modüllü fiberlerin düşük elastik modüllü matris içerisinde bir araya gelmesi prensibine dayanan kompozitlerin temel yapısını oluşturur. Bu nedenle, matris malzemelerinin seçimi, kompozit yapıların dayanıklılığını ve genel performansını etkileyen kritik bir unsurdur.

Matris malzemelerinden beklenen özellikler arasında yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal stabilite, mekanik mukavemet ve işlenebilirlik yer alır. Aynı zamanda, matris malzemelerinin elastikiyeti, fiberlerin mekanik özelliklerini daha iyi kullanabilmek için genellikle daha fazla olmalıdır. Kompozit yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılan reçineler, bağlayıcı işlevi görerek, termoset ve termoplastik sınıflara ayrılır. Termoset polimerler kürlenme sırasında sertleşirken, termoplastik polimerler yüksek sıcaklıklarda eritilerek tekrar şekillendirilebilir.

Termoset polimerler arasında en yaygın kullanılan reçineler polyesterlerdir. Bununla birlikte, epoksi reçineler, fenolik reçineler, vinilester ve bismaleimid gibi farklı termoset türleri de yaygın olarak tercih edilir. Termoplastik polimerler arasında ise polipropilen, poliamid ve polietereketon gibi malzemeler sıklıkla kullanılır.

Matris malzemelerinin akrilikler, aneroikler, bismaleimid, siyanat ester, fenolikler, poliüretan, silikon, siyano akrilikler, vinilester reçineler, polyester reçineler, epoksi reçineler olmak üzere farklı sınıflandırmaları yapılabilir.



**Resim 1.12.** F-1564 Epoksi Reçine ve F-3487 Epoksi Sertleştirici (Kompozitsan, 2018)

Epoksi reçineler, kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemelerden biridir. Yüksek mukavemete sahip olması ve geniş kullanım alanı sayesinde pek çok sektörde tercih edilir. Epoksi reçineler, termoset grubundandır ve polimerizasyon işlemi sonucunda sertleşerek yüksek mukavemetli bir yapı oluşturur. Epoksi ve sertleştirici bileşenleri belli oranlarda karıştırılarak kullanılır ve karışım oranlarına bağlı olarak kürlenme süresi birkaç saatten birkaç güne kadar değişebilir (Resim 1.12). Kürlenme süresi ve sıcaklığı da epoksinin nihai mekanik özelliklerini doğrudan etkiler; yüksek sıcaklıkta kürlenmiş epoksiler, genellikle daha yüksek mukavemet sunar. Bu reçineler, termoset polimerlerin sunduğu mekanik

özelliklerin yanı sıra, çevresel etkilere karşı da dayanıklıdır. Bununla birlikte, epoksi reçinelerin viskozitesi yüksek olup, işlenmesi sırasında dikkat edilmesi gereken zararlı etkileri vardır. Ayrıca, epoksi reçinelerin metal veya plastik yüzeylere bağlanma kabiliyeti sınırlıdır. Bağlanma sırasında oluşan hasar genellikle malzeme ile matris arasında meydana gelir. Ancak, ağaç gibi malzemelerde ise epoksi bağlayıcılar oldukça güçlüdür ve hasarlar genellikle malzemenin kendi yapısında oluşur. Epoksi reçineler, karbon fiber, cam fiber ve diğer takviye malzemeleri ile birlikte geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ulaşım, denizcilik, havacılık, savunma ve spor ekipmanları gibi pek çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Artan maliyetine rağmen, sunduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle kompozit malzemeler arasında F-1564 Epoksi Reçine ve F-3487 Epoksi Sertleştirici en çok tercih edilen bağlayıcı olarak ön plana çıkmaktadır.

### **1.5. Bal Peteği Çekirdeklerinin Üretilmesi**

Bal peteği yapıların üretiminde, beş temel yöntem kullanılmaktadır: yapışkanla birleştirme, direnç kaynağı kullanma, lehimleme, difüzyonla birleştirme ve termal füzyon. Bu yöntemlerin farkı, bal peteği hücrelerinin düğüm noktalarının birbirine nasıl eklendiğine dayanır.

En yaygın kullanılan yöntem yapışkanla birleştirme olup, bal peteği çekirdeklerinin yaklaşık %95'i bu teknikle üretilmektedir. Bu yöntemde, genellikle epoksi reçine ve nitril fenolik yapıştırıcılar kullanılır ve bu malzemeler 400 °F (204 °C) sıcaklıklara kadar dayanıklılık sağlar. Yüksek sıcaklıkların veya aşırı çevresel koşulların mevcut olduğu uygulamalarda ise daha dayanıklı üretim tekniklerine ihtiyaç duyulur. Bu durumlarda, direnç kaynağı, lehimleme veya difüzyonla birleştirme gibi yöntemler tercih edilir.

Termoplastik malzemelerle üretilen bal peteği çekirdeklerinde ise, temas noktaları kısmen eritilir ve iki şerit levha bu noktalarda birleştirilir. Bu teknik, yapıştırıcı kullanımına gerek kalmadan yapısal bütünlük sağlar.

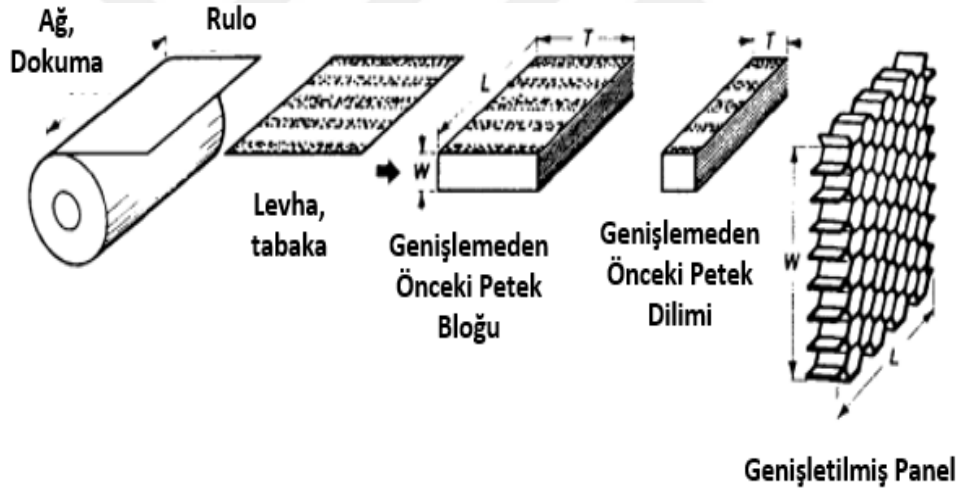
Bal peteği çekirdeklerinde altıgen, daire ve kare topolojilerini oluşturmak için ondüle-genişletme yöntemi ve oluk oluşturma yöntemi olmak üzere iki ana yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler, levha halinde plakaları istenilen bal peteği formuna dönüştürmek için kullanılır ve üretim sürecinin verimliliğini artırır.

#### **1.5.1. Ondüle-genişletme yöntemi ile üretim**

Ondüle-genişletme yöntemi, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bal peteği çekirdeklerinin üretiminde en çok tercih edilen ve en verimli yöntemdir. Bu yöntemde, metalik folyo levhaların yüzeylerine aşındırmaya karşı dirençli bir kaplama uygulanır. Kaplanan yüzeylere yapışkan çizgiler basılır ve bu levhalar kesildikten sonra üst üste istiflenir. İstiflenen levhalar, yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlenerek birleştirilir.

Kürleme işleminin ardından levhalar, istenilen ölçülerde bal peteği dilimlerine dönüştürülmek üzere genişletilir. Genişletme işlemi, metalik çekirdeklerin geometrik formlarını, düğüm noktalarından esneterek oluşturmasını sağlar. Bu esneme, çekirdeklerin plastik gibi şekil almasına olanak tanır ve böylece bal peteği yapıları istenilen geometrik formu almış olur (Şekil 1.5).

Metalik olmayan bal peteği çekirdeklerinin imalat süreci, metalik ürünlerden farklılık göstermektedir. Genişletme işleminden sonra bu çekirdekler, petek şeklini koruyarak raflarda bekletilir. Bal peteği bloğu, genellikle az miktarda reçine içerir ve bu reçine, fırında ısıyla sabitlenir. Örneğin, Nomex gibi kâğıt esaslı çekirdekler genişletildikten sonra şeklini koruyabilir. İmalat sürecinde bal peteği bloğu, sıvı reçine dolu bir havuza daldırılır ve blok bu şekilde ıslatılır. Ardından fırında kürlenir. Daldırma ve kürlleme döngüsü, bloğun istenen yoğunluğa ulaşması için genellikle iki ya da üç kez tekrarlanır. Bu işlemler sırasında, bal peteği blokları raflarda bekletilir ve süreç tamamlanana kadar sabit bir yapıda kalmaları sağlanır (Bitzer, 1997).



Şekil 1.5. Genişletme işlemi üretim süreci (Bitzer 1997)

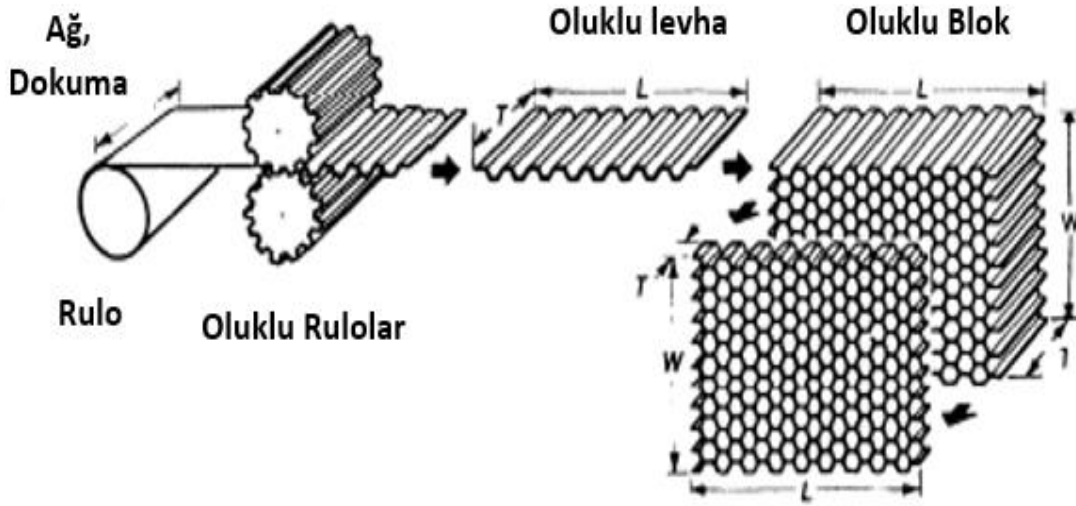
### 1.5.2. Oluk oluşturma yöntemi ile üretim

Oluk oluşturma yöntemi, özellikle yüksek yoğunluklu metal ve metal olmayan çekirdeklerin üretiminde kullanılan önemli bir tekniktir. Bu yöntem, çekirdeklerin üretim sürecini verimli bir şekilde yönlendirmek amacıyla tercih edilmektedir ve Şekil 1.6'da gösterilen işlem adımlarına dayanmaktadır.

Bu yöntemde, ilk adım olarak düz alüminyum levha, oluklu ruloların arasından geçirilerek oluklu levha haline getirilir. Ardından, levhaların temas noktalarına yapıştırıcı sürülür ve bu levhalar istiflendikten sonra fırında kürlenir. Oluklu blokların yalnızca temas noktalarına

basınç uygulandığından, temas bölgeleri genişletilmiş çekirdeklere kıyasla daha kalın olur. Bu farklılık, yapışkanın kullanım oranında da kendini gösterir: oluklu levhalardaki yapıştırıcı, bal peteği ağırlığının yaklaşık %10'u kadarını oluştururken, genişletilmiş çekirdeklere bu oran sadece %1 veya daha azdır.

Bazı metalik olmayan oluklu bloklar, optimum reçine takviye oranlarına ulaşabilmek amacıyla reçine içerisine daldırılarak istenen yoğunluk elde edilir.



Şekil 1.6. Oluklu levha üretim süreci (Bitzer, 1997)

Temas noktalarından birleştirmek için yapıştırıcı yerine farklı birleştirme yöntemleri de tercih edilmektedir. Bu yöntemler arasında, bazı metalik oluklu çekirdeklerin temas noktalarını lehimlemek, difüzyonla birleştirmek veya nokta kaynağı uygulamak yer alır. Bu yöntemler, özellikle daha sağlam ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bağlantılar gerektiren uygulamalar için kullanılır.

Oluklu alüminyum bal peteği çekirdeklerinin üretim süresi, genişletme yöntemine göre daha uzun sürmektedir. Bu nedenle, oluklu bal peteği üretimi daha maliyetli bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Üretimde kullanılan alüminyum oluklu çekirdek tiplerinde 0,076-0,152 mm arasında değişen folyo kalınlıkları tercih edilmekte ve 192-880 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen yoğunluklara sahip ürünler elde edilmektedir.

### 1.5.3. Fiber malzemelerden oluklama yöntemi ile üretim

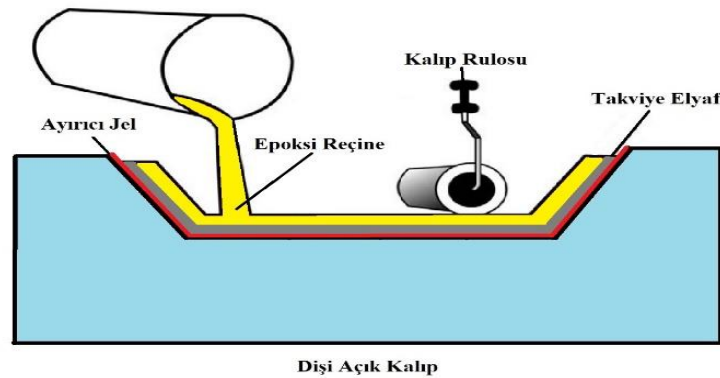
Kompozit fiber malzemelerin üretiminde çeşitli teknolojik uygulamalar kullanılarak fiziksel ve kimyasal yapıları birbirinden farklı tasarımlar elde edilmektedir. Hammadde maliyetlerinin düşmesi, imalat yöntemlerinin çeşitlenmesine ters orantılı olarak yansımaktadır. Günümüz

teknolojisiyle kompozit malzeme üretiminde istenen değişiklikler yapılabilmekte olup, bu üretim yöntemlerinin gelecekte daha da gelişmesi beklenmektedir. Genel olarak dokuz farklı üretim tekniği kullanılmaktadır.

#### 1.5.3.1. Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yöntemi, kompozit malzeme üretiminde en basit ve ekipman ihtiyacının en az olduğu yöntemlerden biridir. Bu yöntem, dört temel adımda gerçekleştirilmektedir: kalıpların hazırlanması, kalıpların jelkot ile kaplanması, elyafların serilerek düzenlenmesi ve epoksi reçine kullanılarak malzemenin sertleştirilmesi. Elle yatırma yöntemi, düşük maliyetli olmasının yanı sıra çeşitli yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İyi bir yüzey kalitesi elde etmek için kullanılan kalıbın sert, pürüzsüz ve parlak olması gereklidir. Kalıp yüzeyine, polimerin kalıba yapışmasını önlemek amacıyla kalıp ayırıcı jel sürülür. Daha sonra bu jel üzerine, kalıp ölçüsüne uygun olarak kesilen kırılmış elyaf lifleri veya elyaf kumaşları yerleştirilir. Elyafın üzerine hazırlanan epoksi reçine karışımı dökülür ve rulo veya fırça ile elyafa iyice yedirilerek kalıbın formu alınır (Şekil 1.7). Bu işlem, istenilen katman sayısına bağlı olarak birkaç kez tekrarlanabilir. Fazla polimerin ve sıkışan havanın giderilmesi için rulolar kullanılır ve her katmanda bu işlem yenilenir. Kurlenme süresi, kullanılan epoksi ve reçine türlerine bağlı olarak değişiklik gösterir ve genellikle oda sıcaklığında 24-48 saat aralığında tamamlanır. Elle yatırma yöntemi, özellikle uçak, tekne ve yapısal destek ürünleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



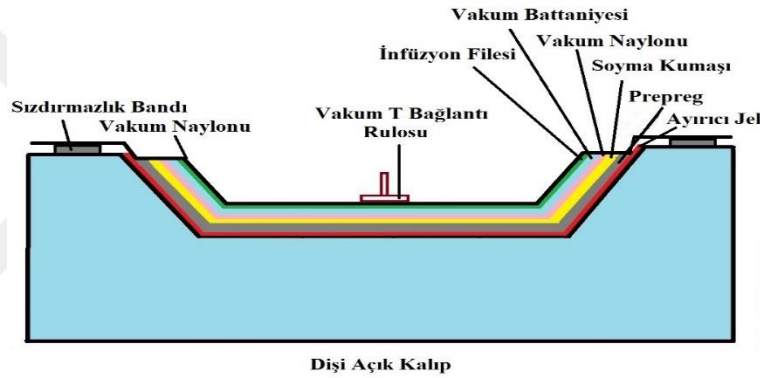
Şekil 1.7. Elle yatırma yöntemi (Sumithra vd., 2023)

#### 1.5.3.2. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, elle yatırma yönteminin bir devamı olarak kabul edilebilir. Düz plaka imalatı için zemin üzerinde vakum naylonu serilerek kalıp ayırıcı olarak işlev görürken, karmaşık formlara sahip parçalar için kalıp üzerine vaks sürülmektedir. Üretim sürecinde,

kırpılmış elyaf veya elyaf kumaşlar elle yatırma yöntemiyle epoksi reçine emdirilerek kalıp üzerine serilir ya da prepreg kumaş kullanılarak kalıp formu oluşturulur. Soyma kumaşı üzerine delikli vakum naylonu, vakum battaniyesi ve infüzyon filesi eklenir. Son aşamada ise vakum naylonu hava sızdırmayacak şekilde yerleştirilir ve vakum makinesi ile torbanın içindeki hava tamamen emilerek dışarı atılır.

Bu yöntemin temel amacı, epoksi reçinenin her yere eşit şekilde nüfuz etmesini sağlamak, fiber malzemelerin içindeki hava boşluklarını gidermek ve fazla epoksi reçinenin dışarı atılmasını sağlamaktır. Vakum işlemi sonucunda fiber malzemelerin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulanarak malzeme sıkıştırılır (Şekil 1.8). Bu yöntem, özellikle karmaşık ve zor yapıların üretiminde tercih edilmekte olup, malzemenin maksimum mukavemete ulaşmasını sağlar. En çok kullanıldığı alanlar olarak denizcilik sektöründe tekne ve yat imalatı ile otomotiv sektöründe yarış arabalarının üretimi öne çıkmaktadır.



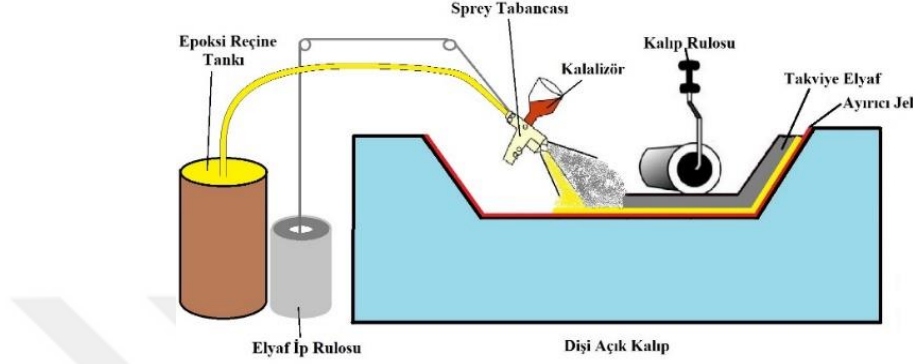
**Şekil 1.8.** Vakum torbalama yöntemi (Jiudingmaterial, 2024)

#### 1.5.3.3. Sprey ile üretim yöntemi

Sprey ile üretim, bir diğer adıyla püskürtme yöntemi, genellikle oda sıcaklığında ve büyük ölçekli ürünlerin imalatında kullanılan bir tekniktir. İlk adım olarak, kalıp yüzeyine ayırıcı jel sürülerek parçanın kalıptan kolayca ayrılması sağlanır. Ardından, sprej tabancası yardımıyla fiber takviye malzemesi kalıp içerisine püskürtülür. Makara halindeki fiber ip takviyeleri, püskürtme tabancasından geçirilerek kırılır ve basınçlı reçine ile birlikte yüzeye püskürtülür. Ayrıca epoksi reçineye takviye malzemeleri de eklenebilir.

Bu yöntemde de elyafın içine hava kabarcıklarının sıkışmasını önlemek ve kalıbın formunu almasını sağlamak için rulo ve fırça kullanılır (Şekil 1.9). Püskürtme işlemi hem kolay uygulanabilirliği hem de maliyet avantajı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Bu üretim yöntemi, özellikle büyük boyutlu parçaların imalatında daha yaygın kullanılmaktadır.

Uygulama alanları arasında gemiler, yatlar, küçük botlar gibi denizcilik ürünleri ön plandadır. Bunun yanı sıra, küvetler, su depoları ve kaporta kaplamaları gibi yük taşıyan yapısal destek elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır. Ancak havacılık sektöründe, bu yöntem diğer yöntemlere kıyasla daha az tercih edilmektedir.

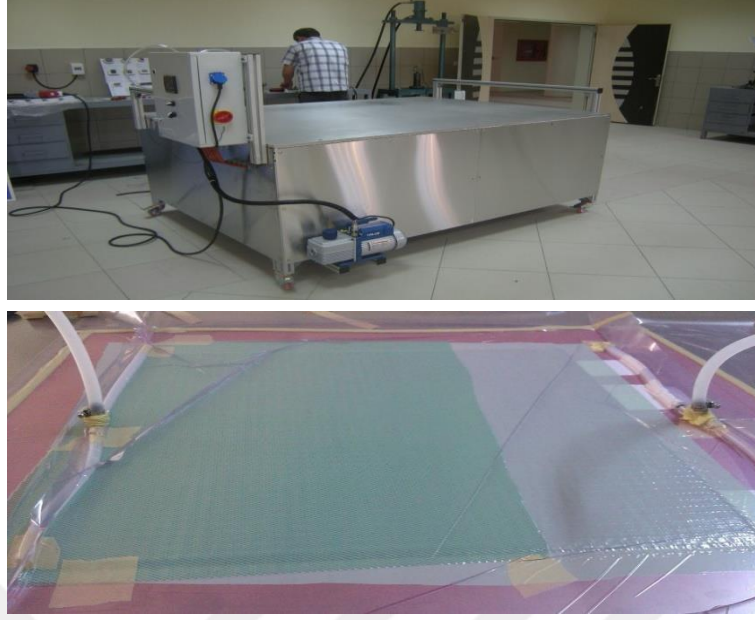


Şekil 1.9. Sprey ile üretim yöntemi (Sumithra vd., 2023)

#### 1.5.3.4. İnfüzyon yöntemi

İnfüzyon yöntemi, vakum torbalama yönteminin daha gelişmiş bir versiyonudur. Üretim aşamaları ve kalıplama teknolojisi benzerdir, ancak en önemli fark, elyafların kalıba kuru olarak yerleştirilmesi ve ardından epoksi reçinenin vakum yardımıyla enjekte edilmesidir. Bu yöntemde, genellikle kalıbın iki uzak noktasına epoksi reçinenin giriş ve çıkışı için vakum bağlantıları yerleştirilir. Vakum bağlantılarından bir tanesi epoksi reçine tankına, diğeri ise vakum pompasına bağlanır.

Vakum pompası çalıştırıldığında, öncelikle kalıbın içindeki hava emilir ve bu süreçte epoksi reçine, elyaf tabakalarına nüfuz eder. Elyaf tamamen reçine ile ıslatıldıktan sonra emme hattı kapatılır. Fazla epoksi reçine, vakumlanarak kalıptan uzaklaştırılır ve sistemde kalan hava ile birlikte atık kabına yönlendirilir. Bu işlem sırasında, elyafların emdiği epoksi reçinenin de bir miktarı vakumlanabilir, bu nedenle bu aşamada dikkatli olunmalıdır. Yöntemin son adımında, kalıplar veya zemin ısıtılarak kürleme işlemi gerçekleştirilir (Resim 1.13). Bu yöntem, büyük ölçekli ve hassas üretimler için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.



**Resim 1.13.** Vakum infüzyon makinesi 1500X2000 mm ve örnek numune

#### 1.5.3.5. Profil çekme yöntemi

Profil çekme (Pultrüzyon) yöntemi, sürekli beslenen fiber liflerin epoksi reçineye emdirilerek sabit kesitli kompozit profillerin üretilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle sabit kesitli ve yüksek mukavemet gerektiren kompozit profillerin üretiminde kullanılır ve yapı, inşaat, altyapı gibi pek çok sektörde tercih edilmektedir (Jiuding New Material,2020). Yöntem beş temel adımdan oluşur:

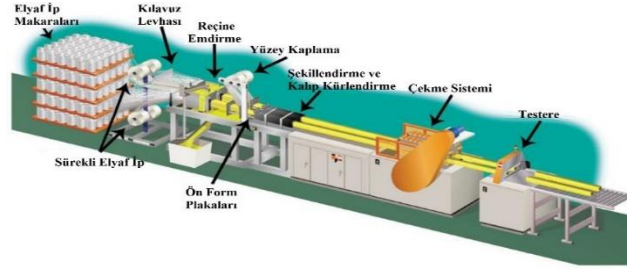
**Elyaf Liflerinin Reçineye Emdirilmesi:** İlk adımda, sürekli elyaf lifleri, epoksi reçine içeren havuzlardan geçirilerek reçineye emdirilir.

**Geometri Verme:** İkinci adımda, lifler, istenilen geometriyi elde etmek amacıyla ön form kılavuz plakalarından geçirilir ve fazla reçine bu aşamada sıyrılır.

**Kürleme Aşaması:** Üçüncü adımda, kompozit malzeme kürlenme işlemi için ısıtma bölgesine girer. Bu aşama iki farklı sıcaklık bölgesinden oluşur: İlk olarak düşük sıcaklıkta reçinenin jelleşmesi sağlanır, ardından daha yüksek sıcaklıkta tam kürlenme gerçekleşir.

**Sıkıştırma ve Çekme:** Dördüncü adımda, kürlenmiş kompozit malzeme döner kauçuk bantlarla sıkıştırılarak sürekli bir şekilde çekilir.

**Kesme:** Beşinci ve son adımda ise, üretilen profil istenilen uzunlukta kesilerek işlem tamamlanır (Şekil 1.10).



**Şekil 1.10.** Profil çekme yöntemi (Jiuding New Material,2020)

#### 1.5.3.6. Filament sargı yöntemi

Filament sargı yöntemleri, genellikle büyük hacimli ve hassas parçaların üretiminde kullanılan ve prepreg olarak adlandırılan reçine emdirilmiş sürekli liflerin malzeme üretiminde kullanıldığı bir tekniktir. Üç temel filament sargı yöntemi bulunmaktadır: Otomatik Bant Sarımı (OBS), Otomatik Fiber Serimi (OFS), ve Filament Sarım Yöntemi (FSY). Bu yöntemlerin tümünde kullanılan mantık aynıdır, ancak her birinin kendine has özellikleri ve uygulama alanları mevcuttur.

Otomatik Bant Sarımı (OBS) yöntemi, yaklaşık 25 yıl önce geliştirilen OBS sistemi, farklı genişliklerde prepreg bantları sabit bir kalıba yerleştiren robotik bir makinedir. OBS makinelerinde kullanılan bant genişlikleri genellikle 50 mm ile 250 mm arasında değişmektedir. OBS sistemi, yüksek teknolojiye sahip bir sarım kafasına sahiptir. Bu kafa, konum sensörlerinden sarıcı kılavuzlarına, sıkıştırma pabuçlarına, baskı silindirlerine ve şerit kesiciye kadar çeşitli elemanlardan oluşur. Bu yöntem, sabit yüzeylerde etkin olup geniş ölçekte kompozit parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

Otomatik Fiber Serim (OFS) yöntemi, OBS'ye göre daha karmaşık yüzeylerin işlenmesine imkân tanıyan bir yöntemdir. Bu sistem, robot kolları tarafından yönetilen iki farklı makinenin aynı kontrol sistemi ile çalıştırılmasını sağlar. Özellikle keskin kavisli yüzeyler ve dar alanlarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. OFS, fiber bazlı lifleri belirli bir yön ve pozisyonda kırmadan yerleştirebilir ve lamine levhaların mukavemetini artırmak için basınç ve gerilimlerle birlikte çalışır. OFS makinasının kafası, dönen bir mandrel etrafında hareket edebilir ya da düzlem tarafından taşınabilir. Yüksek maliyetine rağmen, malzeme israfını azaltması ve hata oranını düşürmesi nedeniyle avantajlıdır. OFS sistemi, uçak ve otomotiv endüstrisi gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda tercih edilmektedir.

Filament Sarım Yöntemi (FSY), spesifik parçaların seri biçimde üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde makaraya sarılı elyaf lifler reçine havuzunda ıslatıldıktan sonra dönen bir kalıp üzerine sarılır. Elyafın kalıba sarılmasıyla ürünün yoğunluğu fiberlerin gerginliğine bağlı olarak belirlenir. Gerginlik, elyafın düzgün bir şekilde sarılmasını ve yüksek mukavemetli bir yapı oluşturulmasını sağlar. Sarım tamamlandıktan sonra ürün fırında kürlenir ve sertleşir. FSY ile kimyasal depo tankları, silindirik borular, roket

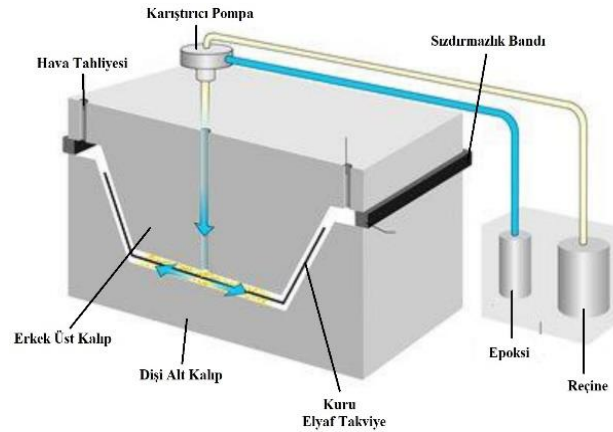
kasaları, tekne direkleri, uçak gövdeleri gibi parçalar üretilmektedir. Bu yöntem, mukavemetin önemli olduğu silindirik ve dairesel yapılar için idealdir.

#### 1.5.3.7. Kalıba reçine enjeksiyonu yöntemi

Kalıba Reçine Enjeksiyonu (KRE) yöntemi, elle yatırma sistemine kıyasla daha verimli ve kolay bir üretim süreci sunmaktadır. Bu yöntemde, ürünlerin imalatı için dişi ve erkek kalıplar kullanılmaktadır. Kalıpların kompozit malzemeden yapılması, çelik kalıplara göre daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır. KRE yönteminde, genellikle jelkot kullanılarak her iki yüzeyin de pürüzsüz olması sağlanmaktadır.

Takviye malzemesi olarak kuru keçe, kırılmış fiber ip veya bunların kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu malzemeler önceden dişi kalıbın içine yerleştirilir ve ardından erkek kalıp üzerine kapatılır. Epoksi reçine, kalıbın içerisine pompalanarak kalıplama süreci başlatılır, bu süreç genellikle daha uzun sürmektedir. Reçinenin kalıba düzgün bir şekilde dağılması ve elyaflara iyi nüfuz etmesi için vakumlama işlemi uygulanabilir. Bu enjeksiyon işlemi, 80 °C'ye kadar ısıtılmış kalıplarda gerçekleştirilir (Şekil 1.11).

Kalıba reçine enjeksiyonu yöntemi, karmaşık şekillere sahip parçaların gözeneksiz bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Üretilen ürünler genellikle araç gövde parçaları ve endüstriyel konteynerler gibi alanlarda kullanılmaktadır.



**Şekil 1.11.** Kalıba reçine enjeksiyonu (KRE) yöntemi (Tekstilbilgi, 2022)

#### 1.5.3.8. Basınçla kalıplama yöntemi

Basınçla kalıplama yöntemi, termoset ve termoplastik polimerlerin kullanıldığı bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, dişi ve erkek olmak üzere metal kalıplar kullanılır. Kalıbın içerisine uygun miktarda kırılmış fiber takviyesi ve epoksi reçine yerleştirildikten sonra, kalıp kapatılır. Kalıp kapatıldıktan sonra basınç ve sıcaklık uygulanarak kürleşme işlemi başlatılır. Belirli bir süre sonra kalıp soğutulur ve açılarak nihai ürün elde edilir.

Basınçla kalıplama yöntemi, uygulama açısından kolay olup geniş bir malzeme yelpazesi ile çalışılabilir. Bu yöntem, fazla efor gerektirmeden kaliteli parça üretimi yapılabilmesini sağlar ve çalışma süreci de oldukça verimlidir. Genellikle Levha Kalıplama Tekniği (LKT) ve Hamur Kalıplama Tekniği (KHT) olmak üzere iki temel kalıplama tekniği kullanılmaktadır. LKT, bu teknikte, önceden hazırlanan ve genellikle termoset malzemelerden oluşan levhalar kalıp içerisine yerleştirilir. Basınç ve sıcaklık altında şekillendirilip, kürleştirilir. HKT'de ise, malzemeler hamur kıvamında hazırlanır ve kalıp içerisine doldurularak aynı şekilde basınç ve sıcaklık uygulanarak şekillendirilir ve kürleşme sağlanır. Her iki teknik de çeşitli endüstriyel uygulamalarda, yüksek dayanımlı ve kaliteli kompozit ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir.

#### 1.5.3.9. Otoklav kalıplama yöntemi

Otoklav kalıplama yöntemi, yüksek sıcaklık ve buhar basıncı altında yapılan bir işlemdir. Bu yöntemin işleyişi, vakum torbalama yöntemi ile büyük oranda benzerlik gösterse de bazı önemli farklar bulunmaktadır. Otoklav kalıplamada fiber elyaf takviyesinde prepreg (reçine emdirilmiş elyaf) kullanılmakta ve bu takviye katmanlar halinde belirli bir sırayla kalıp içerisine yerleştirilmektedir. Bu işlemin ardından, sistem içerisindeki sıkışan havayı çıkarmak amacıyla vakum torbalama işlemi yapılır ve sistem 1 atm basınca ulaştığında kalıp yüksek basınçlı bir otoklav tüpüne yerleştirilir.

Otoklav tüpü, altında su bulunduran bir ızgara sistemine sahiptir. İşlenecek malzemeler bu ızgaranın üzerine yerleştirilir ve tüp kapatılır. Tüpün içerisindeki su ısıtılarak buharlaşmaya başlar, bu sırada içerideki hava tahliye vanalarından dışarı atılarak tüp içinde tamamen buharla doymuş bir ortam oluşturulur. Havanın tahliye edilmesi, ısının her yere eşit dağılmasını sağlamak için gereklidir. Otoklav içerisindeki basınç ve sıcaklık, bir manometre ve termometre yardımıyla kontrol altında tutulur.

Buhar basıncı ve sıcaklık 100 °C'nin üzerine çıkartılarak, epoksi reçinenin kürlenmesi sağlanır. Kürleme işlemi sırasında ısı ve basınç belirli bir süre boyunca sabit tutulur, bu da epoksi reçinenin elyaf yapıyla güçlü bir şekilde bağlanmasını ve reçinenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. İşlem tamamlandığında, tüp yavaşça soğutulur ve nihai ürün vakum torbasından çıkarılır (Resim 1.14).

Otoklav kalıplama yöntemi, genellikle askeri araçlar, uçak parçaları, denizcilik, uzay ve savunma sanayisi gibi ileri teknoloji gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Füze, roket ve benzeri yüksek performanslı ürünlerin imalatında yaygın olarak tercih edilmektedir.



**Resim 1.14.** Otoklav kalıplama tüpü (Medico Teknik, 2024)

Bal peteği hücre üretimi için belirtilen yöntemler ile uygun şartlar sağlandığında ikincil işlemlerde uygulanarak ürünler ortaya konabilmektedir. Ürün büyüklüğü ve kullanım alan tercihine göre üretim yöntemi en uygun olacak biçimde seçilmektedir.

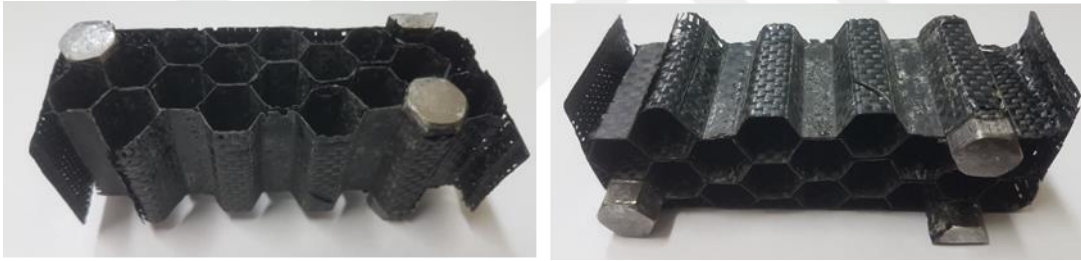
## 2. BÖLÜM

### MATERYAL VE METOT

#### 2.1. Deney Numunelerinin Üretimi İçin Ön Çalışmalar

Bir önceki bölümde tartışıldığı üzere, kompozit bal peteği yapılar çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında, karbon fiber takviyeli yapıların laboratuvar ölçeğinde etkin şekilde üretilmesi amacıyla farklı yöntemler dikkate alınmış ve bu bağlamda çeşitli ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların temel hatları ve bulguları takip eden satırlarda tartışılmıştır.

İlk olarak altıgen bir balpeteği yapısı oluşturmak için 1 cm çapında çelik, alüminyum ve plastik çubuklar kullanılarak bir kalıp hazırlanmıştır. Hazırlanan bu altıgen yapı, karbon fiber takviyeli polimer kumaşlarla sarılmış ve bir araya getirilerek blok bir yapı oluşturulmuştur. Ancak, bu yapının üretim sürecinde önemli zorluklarla karşılaşmıştır. Blok yapının içerisindeki çubukların çıkarılması sırasında kırılmalar ya da çatlaklar meydana gelmiş, ayrıca blokta deformasyonlar oluşmuştur. Ayrıca bazı durumlarda çubukların çıkarılması mümkün olmamıştır (Resim 2.1).



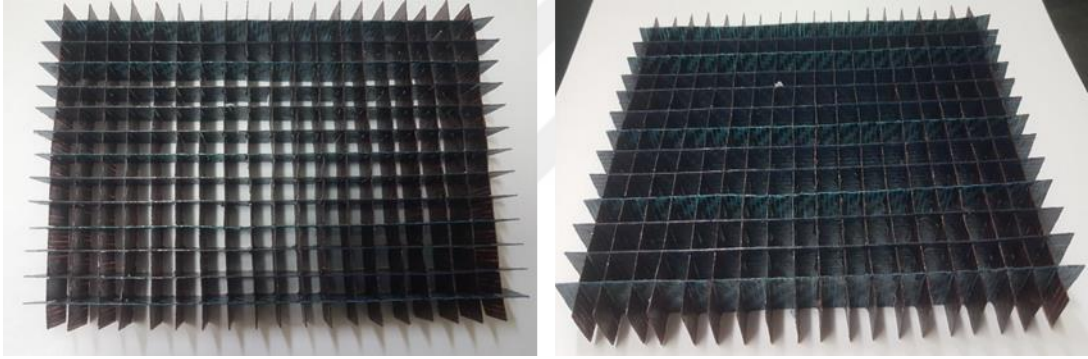
**Resim 2.1.** Çubuk kullanımı ile kalıplama yöntemiyle üretilen altıgen örnek

Bu sorunların ardından alternatif bir yöntem geliştirilmiş ve kalıp yapımında mum kullanılması tercih edilmiştir. Benzer şekilde, mum çubuklar karbon fiber kumaşlarla sarılmış ve kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, kürleme sırasında meydana gelen sıcaklık artışı, mumun erimesine ve dolayısıyla kalıbın şeklinin bozulmasına neden olmuştur. Bu durum sonucunda, Resim 2.2'de görüldüğü üzere istenilen dairesel topoloji elde edilememiştir.



**Resim 2.2.** Mum çubuk kullanımı ile üretilen dairesel örnek

Diğer alternatif yöntem olarak düz plakalar üretilmiş ve bu plakalar belirli ölçülerde kesilmiştir. Çentik açma işlemi ile plakalar istenilen noktalardan birleştirilerek kare topolojisine sahip bir yapı oluşturulmuştur (Resim 2.3). Ancak bu yöntemin hassas şekilde uygulanması oldukça zor ve zaman alıcı olup numunelerde istenmeyen kusurlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tutarlı karşılaştırmalı analizlerinin yapılması açısından diğer hücre topolojilerine uygulanması mümkün olmadığından bu teknikten vazgeçilmiştir.



**Resim 2.3.** Çentik açma yöntemiyle üretilen kare topoloji örneği

Yukarıda bahsedilen yöntemler ile istenen üretim başarısı sağlanamadığı için, bir sonraki bölümde ayrıntılı şekilde ele alınacak olan kalıplama ve yapıştırma yöntemi uygulanarak numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

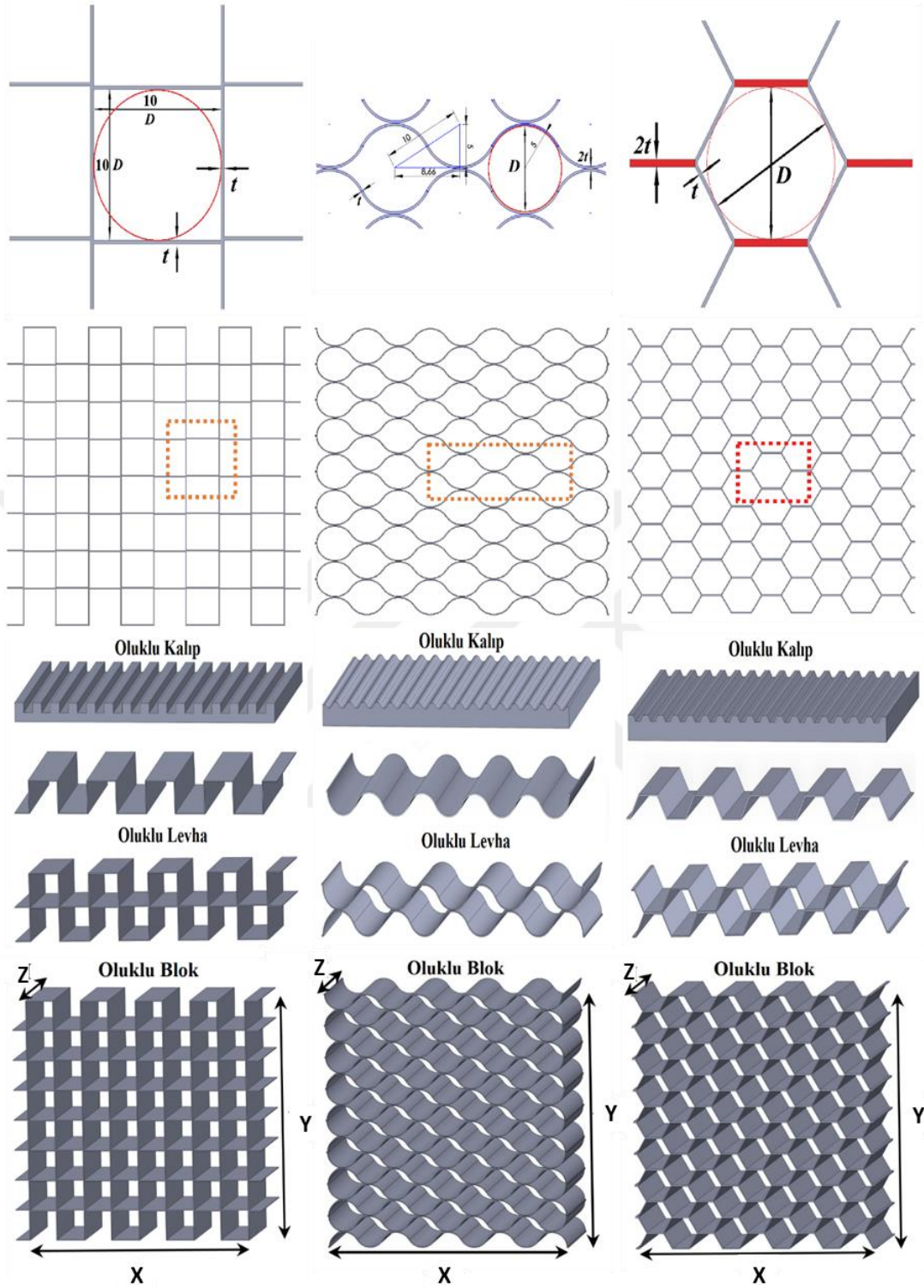
## 2.2. Deney Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi

Bu tez kapsamında kompozit malzemedan üretilen bal peteği numuneler ASTM C365-03 standartına uygun olarak hazırlanmıştır. Kompozit levhaların üretiminde karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmış olup, oluklu levhalar elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Oluklu levha formlarının oluşturulması süreçlerinde basınçla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Bal peteği hücre topolojisinin bal peteği yapıların mekanik

davranışlarına etkilerinin incelenmesi bağlamında tasarımlarda üç farklı çekirdek topolojisi dikkate alınarak her bir tolopoji için üç farklı duvar kalınlığına ve yüksekliğe sahip bal peteği numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel test çalışmalarıyla numunelerin mekanik özellikleri ile enerji sönümlenme performans değerleri elde edilip, bu değerler hem kendi içinde hem literatürdeki benzer yapılarla kıyaslanmıştır.

Bal peteği yapılar, her hücrenin aynı boyutta olduğu periyodik hücreli yapılar olup genellikle oluklu levhaların düzlem içi enine yönde birbirine yapıştırılmasıyla elde edilir. Bal peteği yapıların mekanik özellikleri ve davranışları, çekirdek topolojisine ve parametrelerine (örneğin, hücre şekli, hücre duvarı kalınlığı, hücre duvarlarının tek ve çift bağ kısımları) bağlı olarak düzlem içi ve düzlem dışı yönlerde önemli ölçüde farklılık gösterebilir (Thomas vd., 2019; Qi vd., 2021; Mohammadi vd., 2023). Mevcut üretim yöntemiyle efektif şekilde üretilebilip, metal ve kompozit bal peteği tasarımlarında hem umut vadeci mekanik özellikleri hem kolay ve hızlı üretilebilirlik açısından literatürde yaygın şekilde dikkate alınan kare, daire ve altıgen hücre topolojileri bu çalışmada referans geometriler olarak seçilmiştir (Habib vd., 2018; Ghate vd., 2023). Bunlar arasından, dairesel hücreli bal petekleri olağanüstü özgül mukavemete ve darbe dayanıma sahip olmasına rağmen geleneksel dairesel petek tasarımları hücreler arasında boşluklar içerir (San vd., 2022; Wang vd., 2020). Öte yandan, kare hücreli bal petekleri kompakt bir yapıya sahiptir ve düzlem içi ve düzlem dışı yüklemeler altında yüksek mukavemete sahiptir (Wang vd., 2022; Russel vd., 2008). Altıgen bal petekleri ise hem üstün mekanik özelliklere hem kompakt yapılara sahiptir ve bu yapılar mühendislik alanlarında en sık kullanılan hücreli malzemelerden biridir (Moghaddam vd., 2022; Li vd., 2018). Hücre topolojisinin metal ve kompozit peteklerin mekanik davranışı üzerindeki etkilerine ilişkin daha fazla bilgiye referans verilen araştırma ve inceleme makalelerinden ulaşılabilir (Ghate ve Goel, 2023; Habib vd., 2018; Chandrasekaran ve Arunachalam, 2021; Miao vd., 2024; Thomas ve Tiwari, 2019; Yin vd., 2023).

Bal peteği tasarımları "SolidWorks" Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) programı kullanılarak oluşturulmuştur. İlk olarak, kare, daire ve altıgen şeklinde 2 boyutlu kalıp tasarımları yapılmış, ardından bu tasarımlar 3 boyutlu olarak oluklu yapıda modellenmiştir. Bal peteği hücre çekirdeğinin tasarımında yükseklik "Z", boylamsal yönde uzunluk "X", genişleme yönünde uzunluk "Y" ve duvar kalınlığı "t" olarak tanımlanmıştır. Kare, daire ve altıgen modellere ait tasarım bileşenleri, KFTP petek yapılarının farklı geometrik konfigürasyonları ve oluşturulma sistematiği Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu noktada, birim hücre genişliği (iç çember çapı)  $D=10$  mm olacak şekilde her hücre topolojisi için aynı seçilmiş, duvar kalınlıkları ise  $t=0,25-0,50-0,75$  mm olacak şekilde belirlenerek üç farklı bal peteği modeli oluşturulmuştur. Bal peteği bloklarının tasarımlarında ise kesit  $80$  mm x  $80$  mm (XxY), yükseklikler ise  $Z=40-60-80$  mm olacak şekilde üç farklı tasarım ortaya konmuştur. Kalıplar ise  $300$  mm x  $210$  mm x  $20$  mm ölçülerinde tasarlanarak imal edilmiştir.



**Şekil 2.1.** Oluklu üretim sürecinin bileşenleri ve önerilen KFTP petek yapılarının kare, daire ve altıgen şekillerine ait geometrik konfigürasyonlar

Kare, daire ve altıgen hücre geometrilerinin gruplandırılmasında hücre geometrilerinin baş harfleri “K”, “D” ve “A” kullanılmıştır. Ayrıca, duvar kalınlığı ve numune yüksekliği sırasıyla “K<sub>i</sub>”

ve "Yi" olarak belirtilmiştir. Burada, üç farklı kalınlık ve yükseklik değerinin tanımlandığı i tam sayı değeri  $1 \leq i \leq 3$  aralığındadır. Hücre duvar kalınlıkları 0,25 mm için K1, 0,50 mm için K2, 0,75 mm için K3 olarak, yükseklikler ise 40 mm için Y1, 60 mm için Y2 ve 80 mm için Y3 olarak tanımlanmıştır. Örneğin, kare hücreli bir KFTP bal peteğinin 0,25 mm duvar kalınlıklı ve 80 mm yükseklikli numunesi için tanımlama K-K1-Y3 şeklindedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında toplam 27 bal peteği tasarımı dikkate alınmıştır.

Kompozit bal peteği birim hücrelerinin oluşturacağı oluklu levhaların elle yatırma yöntemiyle üretilmesi için kalıplara ihtiyaç vardır. Bu amaç doğrultusunda, 5083 serisi alüminyum malzeme kullanılarak oluklu kalıplar üretilmiştir. Söz konusu alüminyumun kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 2.1'de sunulmaktadır.

**Tablo 2.1.** 5083 serisi alüminyumun kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşimi								
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer
0,40	0,40	0,10	0,40-1,00	4,00-4,90	0,25	0,05-0,25	0,15	0,15
Mekanik Özellikleri								
Sıcaklık	Akma Mukavemeti (MPa)		Çekme Mukavemeti (MPa)		Uzama (%50)	Sertlik (Brinel)		
HX9	370		420		0-5	115		

Tasarlanan kalıpların üretimi, Gümüşhane Üniversitesi Enerji Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ve 0,01 mm hassasiyetle işleme kabiliyetine sahip CNC dik işleme makinesinde gerçekleştirilmiştir (Resim 2.4). Bu süreçte, "PowerMill" Bilgisayar Destekli Üretim programı kullanılarak CNC'yi kontrol eden bilgisayar kodları üretilmiştir. Kalıpların tasarım aşamasında belirlenen ölçü, ilerleme hızı ve devir kontrolüne göre hazırlanan üretim kodları sayesinde, istenilen ölçülerde kalıplar hassas bir şekilde üretilmiştir. Kompozit oluklu levhaların üretimde kullanılmak üzere hazırlanan kare, daire ve altıgen kalıplar Resim 2.5'te gösterilmiştir.



**Resim 2.4.** PROBOTSAN marka CNC dikifleme merkezi



**Resim 2.5.** Kare, daire ve altıgen kalıpların görselleri

Karbon fiberden oluklu levhaların üretiminde naylon film ve 3K Twill dokuma yapısına sahip  $200 \text{ gr/m}^2$  ağırlığında  $[0^\circ, 90^\circ]$  yönelimli karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Kullanılan karbon fiber kumaşın ( $200 \text{ gr/m}^2$  3K Twill) teknik ve mekanik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

**Tablo 2.2.** Karbon fiber kumaşın (200 gr/m<sup>2</sup> 3K Twill) teknik ve mekanik özellikleri (Kompozitsan, 2018)

Özellikler	Açıklamalar	Özellikler	Açıklamalar
Atkı Elyaf	Tenax-E HTA 40 3K	Çekme Dayanımı (MPa)	3.950
Çözgü Elyaf	Tenax-E HTA 40 3K	Elastite Modülü (GPa)	240
Dokuma Tipi	Twill	Elektriksel Özdirenç ( $\mu\Omega$ )	1.650
Düşük Lif Çapı ( $\mu m$ )	5-8	Termal İletkenlik (W/M*K)	20
Kumaş Kalınlığı (mm)	0,215	Termal Genleşme Katsayısı	-0,10
Alansal Ağırlık (gr/m <sup>2</sup> )	200	Kopmadaki Birim Boy Değişim (%)	1,80
Epoksi Reçine Emme Tüketimi (gr/m <sup>2</sup> )	230	Kumaş Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	0,93
Laminat Ağırlığı (gr/m <sup>2</sup> )	430	Laminant Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	1,68
Laminat Kalınlığı (mm)	0,255		

Çalışmada kullanılan epoksi reçine miktarı, karbon fiber kumaşın ağırlığına göre hesaplanmıştır. Kalıbın boyutları 300x210 mm olarak belirlenmiş ancak oluklu yapıdan kaynaklanan dalgalanma nedeniyle karbon fiber kumaş ölçüleri 500x250 mm olacak şekilde kesilmiştir. Aşağıda, tek kat karbon fiber kumaş için ölçü ve reçine gereksinimleri detaylandırılmıştır:

- Karbon fiber kumaşın ağırlık ve reçine emme gereksinimi:  
Alansal ağırlık, 200 gr/m<sup>2</sup>  
Epoksi reçine emme tüketimi, 230 gr/m<sup>2</sup>
- 1 kat karbon fiber kumaş için hesaplamalar:  
Alan: 0,5 m x 0,25 m = 0,125 m<sup>2</sup>  
Reçine emme: 0,125 m<sup>2</sup> x 0,230 gr/m<sup>2</sup> = 28,75 gr
- Epoksi reçine karışım oranı:  
Epoksi miktarı (%25): 28,75 gr x 0,25 = 7,1875 gr  
Reçine miktarı (%75): 28,75 gr x 0,75 = 21,5625 gr

Çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştiriciye ait teknik özellikler ise Tablo 2.3'de verilmiştir.

**Tablo 2.3.** F-1564 reçine ve F-3487 sertleştirici teknik özellikleri (Kompozitsan, 2018)

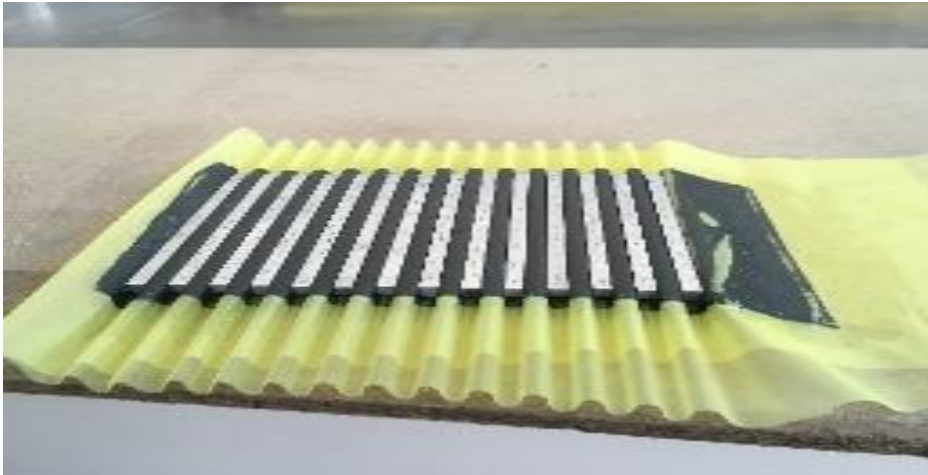
<b>Reçine 1564</b>		<b>Sertleştirici 3487</b>	
Renksiz Sıvı		Renksiz Hafif Sarı Sıvı	
Viskozite 25 °C	1.250- 1.450 [mPa.s]	Viskozite 25 °C	30 - 70 [mPa.s]
Yoğunluk 25 °C	1,1 - 1,2 [g/cm <sup>3</sup> ]	Yoğunluk 25 °C	0,98 - 1,0 [g/cm <sup>3</sup> ]
Epoksi Endeksi	5,8 - 6.05 [Eq/kg]	Epoksi Endeksi	9,30 - 10,20 [t]
<b>Karışım Oranları</b>			
		<b>Ağırlıkça</b>	<b>Hacimce</b>
Reçine 1564		100	100
Sertleştirici 3487		34	41
<b>Kürlenme Sıcaklıkları</b>			
25-40 °C			2 Gün
50-65 °C			8 Saat
75-90 °C			4 Saat
100-115 °C			2 Saat
<b>Kürlenmeden Sonra Mekanik Özellikleri</b>			
Çekme Gerilmesi	(80 °C 8 saat)		70-75 MPa
Çekme Kompleks Modülü	(80 °C 8 saat)		2.850-3.000 MPa
Bükme Gerilmesi	(80 °C 8 saat)		110-125 MPa
Bükme Modülü	(80 °C 8 saat)		2.800-3.000 MPa

İki kat karbon fiber kumaş 57,5 gr, üç kat karbon fiber kumaşa ise 86,25 gr epoksi reçine kullanılarak emdirilmiştir. Üretim süreci, 0,25 mm kalınlıkta tek katmanlı model tasarımı ile başlatılmıştır. Kalıpların yüzeyine krem vaks uygulanarak tüm yüzeylerde ince bir film tabakası oluşturulmuş, böylece oluklu levhaların kalıptan deformasyona uğramadan ayrılması sağlanmıştır (Resim 2.6).



**Resim 2.6.** Kare kalıba krem vaks uygulanması

Deliksiz naylon arasında yer alan karbon fiber kumaşa, prepreg yöntemindeki gibi her bir katmana emdirme işlemi uygulanmıştır. Deliksiz naylon arasındaki karbon fiber kumaş, üretilen dişi kalıpların üzerine serilmiş; kare ve daire formundaki uygulamalar için alüminyum çubuklar, altıgen form için ise pirinç çubuklar kullanılmıştır. Kullanılan çubuklar, 10 mm çapında olup dişi kalıptaki boşluklara yerleştirilerek naylon içerisindeki kumaşın sıkıca sıkıştırılması sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda istenilen yapı oluşturulmuş ve kalıplar içerisinde bütünlük sağlanmıştır (Resim 2.7).



**Resim 2.7.** Kare kalıp içerisine alüminyum çubuk yerleştirme işlemi

Numunelerin üretimi Gümüşhane Üniversitesi Enerji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda yer alan sıcaklık kontrollü vakum infüzyon ünitesi yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Resim 2.8). Kullanılan vakum infüzyon tezgahının teknik özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

**Tablo 2.4.** Vakum infüzyon ünitesinin teknik özellikleri (Kompozitsan, 2018)

<b>Sıcaklık Kontrollü Vakum İnfüzyon Ünitesinin Teknik Özellikleri</b>	
Cihaz çalışma boyutları(m)	1,5 X 2 X 0,9
Ağırlık (kg)	350
Çalışma sıcaklığı: (°C)	90-150
Rezistans (Watt)	12.000
Isıtmalı tabla malzemesi	5083 serisi alüminyum
Vakum pompasının özellikleri	8 CFM 0,2 Pa 1 HP 220 V 50 Hz

1 Litre kapasiteli manometreli vakum taşma tankı  
Cihazın çalışması için gerekli olan tüm bağlantı elemanları kablolar ve aksesuarlar  
Dijital ve sıcaklık ayarlı termokupl  
Masa gövdesi alüminyum profil  
Sıcaklık kontrol ve programlama kontrol panosu



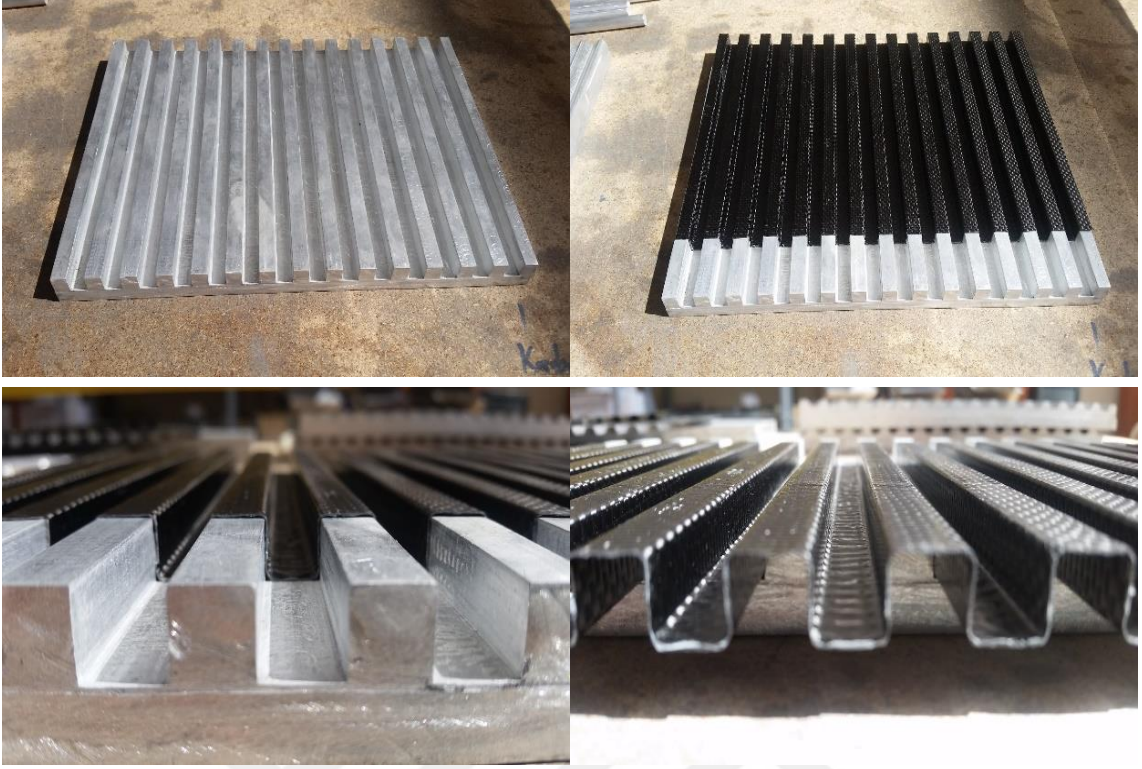
**Resim 2.8.** Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesi

Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon makinası üzerinde kalıplanan ürün, 100 *kg*'lık yük altında preslenerek imal edilmiştir (Resim 2.9). Kürlenme işlemi sürecinde, ilk 15 dakikada makinenin zemin sıcaklığı 100 °C'ye yükseltilmiş ve bu sıcaklık 1 saat boyunca korunmuştur. Ardından kademeli olarak her 1,5 saatte makinenin zemin sıcaklığı 25 °C düşürülerek sırasıyla 75 °C ve 50 °C'ye indirilmiş; son olarak oda sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Kürlenme işlemi ortalama 6 saat sürmüştür ve oluklu levha formunda ürün üretilmiştir.



**Resim 2.9.** 100 *kg* yük altında kalıp içerisinde kürlenme sürecinin gösterimi

Kalıplarda elle yatırma yöntemiyle üretilen kare, daire ve altıgen formlarında karbon fiber oluklu levhaların görselleri sırasıyla Resim 2.10, Resim 2.11 ve Resim 2.12'da sunulmuştur. İlk aşamada, çekirdek malzeme tabakaları tek kat halinde 0,25 *mm* kalınlığında üretilmiştir. Daha sonra ise, 0,50 *mm* ve 0,75 *mm* kalınlıklarındaki oluklu levhaların üretimi tamamlanmıştır.



**Resim 2.10.** Kare model oluklu levha

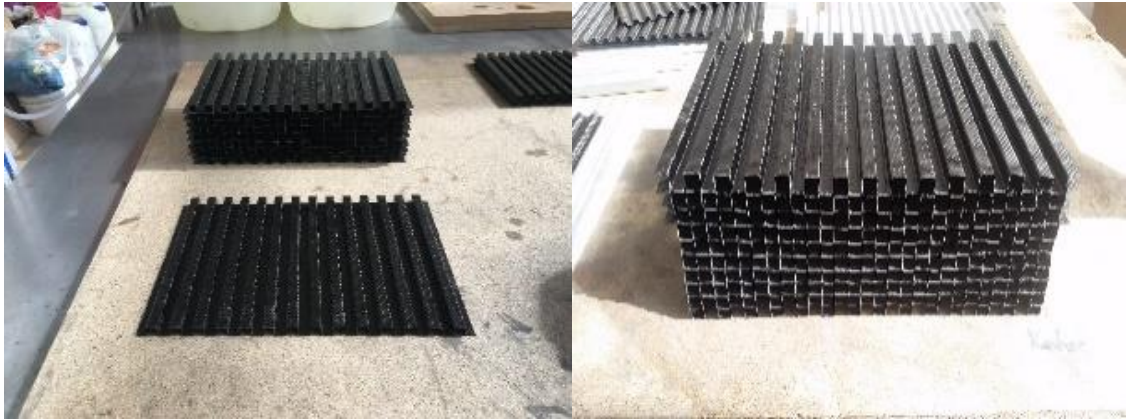


**Resim 2.11.** Daire model oluklu levha



**Resim 2.12.** Altıgen model oluklu levha

Üretilen oluklu levhalar, epoksi reçine kullanılarak üst üste dizilip birleştirilmiş ve böylece oluklu blok haline getirilmiştir (Resim 2.13). Aynı işlem, diğer iki geometri için de uygulanmıştır. KFTP bal peteklerinin üretim sürecinde uygulanan bu kalıplama ve yapıştırma tekniği ince duvarlı kompozit petek yapıların kolay, hızlı ve ekonomik üretimini sağlama açısından yaygın olarak tercih edilmektedir (Wei vd., 2020; Chen vd., 2018; Zeng vd., 2022).



**Resim 2.13.** Oluklu levhalardan oluklu blok yapımının gösterimi

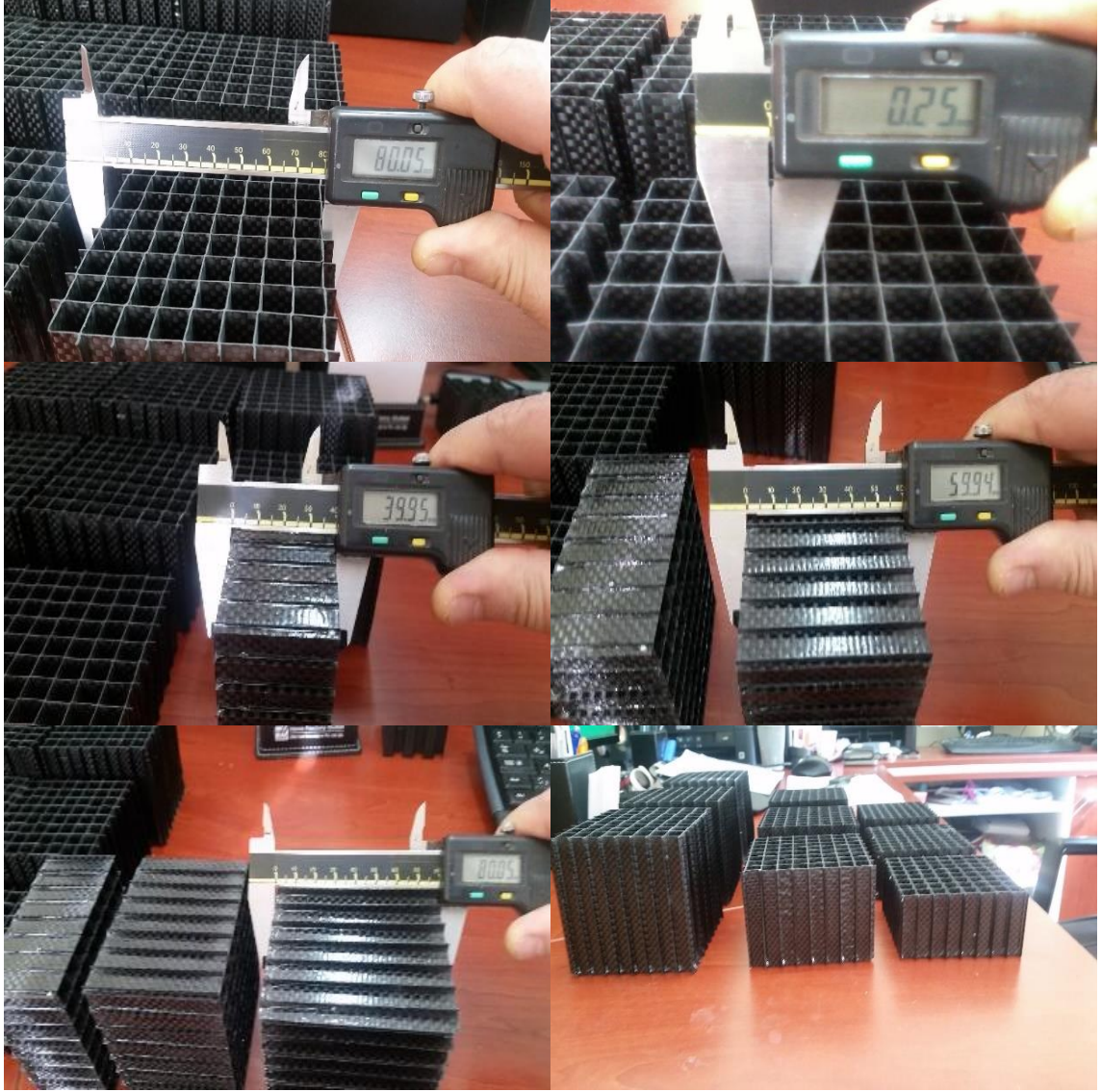
Üretilen bloklar sulu kesim elmas daire testere kullanılarak  $80 \times 80 \text{ mm}$  (XxY) boyutlarında, yükseklikleri sırasıyla (Y1)  $40 \text{ mm}$ , (Y2)  $60 \text{ mm}$  ve (Y3)  $80 \text{ mm}$  olacak şekilde kesilmiş ve deney numuneleri oluşturulmuştur. Her bir geometri (kare, daire ve altıgen) için  $0,25 \text{ mm}$  kalınlığında ve belirtilen üç farklı yükseklikte ( $40\text{-}60\text{-}80 \text{ mm}$ ) altışar adet numune hazırlanmış, toplamda 54 deney numunesi üretilmiştir. Aynı işlemler,  $0,50 \text{ mm}$  ve  $0,75 \text{ mm}$  kalınlıklarda da uygulanarak her kalınlık için yine 54 deney numunesi üretilmiştir. Bu bağlamda, düzlem dışı eksenel yönde yapılan basma deneyleri için toplamda 162 adet numunenin üretimi tamamlanmıştır.

Üretilen numuneler düzlem dışı eksenel yönde basma deneylerine tabi tutulmuş ve deneyler sonucunda tutarlı veriler elde edilmiştir. Eksenel yöndeki basma deneylerinde, 6 örnekten oluşan her deney grubunda oldukça tutarlı sonuçlar elde edilmesi nedeniyle, boylamsal ve genişleme yönlerinde yapılacak deneylerde her bir yön için üçer numune üretilmiştir. Bu doğrultuda, düzlem içi mekanik davranışın incelenmesi bağlamında boylamsal yönde 81 adet ve genişleme yönünde 81 adet olmak üzere toplamda 162 deney numunesi daha hazırlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, farklı yönlerde yapılacak deneyler için toplamda 324 adet karbon fiber çekirdek numunesi üretilmiştir. Eksenel yönde yapılan deneylerde kullanılan,  $0,25 \text{ mm}$  kalınlığında ve kare, daire ve altıgen formdaki 54 adet numunenin görünümü Resim 2.14'te verilmiştir. Ayrıca,  $0,25 \text{ mm}$  kalınlığında üretilen kare numunenin ölçüleri Resim 2.15'te gösterilmiştir. Ayrıca,  $80 \times 80 \times 40 \text{ mm}$  boyutlarında,  $0,25 \text{ mm}$  kalınlıkta üretilen kare, daire ve altıgen modellere ait görünümler sırasıyla Resim 2.16, Resim 2.17 ve Resim 2.18'de sunulmuştur.



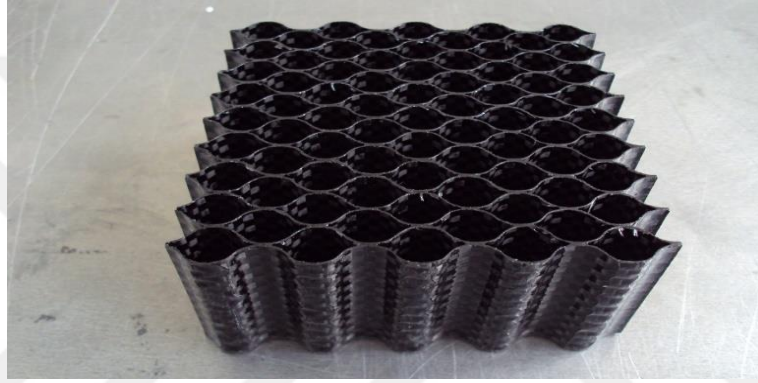
**Resim 2.14.**  $0,25 \text{ mm}$  kalınlıkta kare, daire ve altıgenden oluşan 54 adet test numunesi



**Resim 2.15.** 0,25 mm kalınlıkta 80x80 mm ölçüsünde 40, 60 ve 80 mm yükseklikte kare numune



**Resim 2.16.** 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde kare deney numunesi



**Resim 2.17.** 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde daire deney numunesi



**Resim 2.18.** 0,25 mm kalınlıkta 80x80x40 mm ölçülerinde altıgen deney numunesi

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan deney numunelerine ait teknik özellikler Tablo 2.5'te sunulmuştur.

**Tablo 2.5.** Türlerine ve şekillerine göre üretilen deney numuneleri

Şekil	Hücre Çapı (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)	Yükseklik (mm)	Üretilen Adet
Kare	10	80	80	0,25	40	12
					60	12
					80	12
				0,50	40	12
					60	12
					80	12
				0,75	40	12
					60	12
					80	12
Daire	10	80	80	0,25	40	12
					60	12
					80	12
				0,50	40	12
					60	12
					80	12
				0,75	40	12
					60	12
					80	12
Altıgen	10	80	80	0,25	40	12
					60	12
					80	12
				0,50	40	12
					60	12
					80	12
				0,75	40	12
					60	12
					80	12
<b>TOPLAM</b>						<b>324</b>

### 2.3. Deney Standartları, Testler ve Yapıların Ezilme Performans Kriterleri

KFTP bal peteği numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi sürecinde standartlara ve literatüre uyum, deney sonuçlarının güvenilirliği ve karşılaştırılabilirliği açısından kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, KFTP bal peteği numunelerinin basma deneyleri ASTM C365-03 “Standart Test Method for Flatwise Compressive of Sandwich Cores” standardı ile ilgili literatür dikkate alınarak yürütülmüştür. KFTP levhalarının çekme ve eğme testleri ise ISO 178 ve ISO 527 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (ISO-527-2; ISO 527-4; ISO 178).

ASTM C365-03 deney standartlarında deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında test makinesinin çenesinin sabit hızla ilerlemesi sağlanıp, sanki-statik yükleme altında KFTP bal petekleri önce bir ön yüklemeye ve ardından sabit bir hızda yüklemeye maruz bırakılmıştır.

KFTP bal peteği örneklerinin ezilme performans parametreleri deneysel olarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme verilerinden türetilmiştir. Deney standartları kapsamında kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Kesit alanı Denklem 2.1’deki eşitliği ile hesaplanmıştır:

$$A = X \cdot Y \quad (2.1)$$

Burada:

X= Numunenin eni (*mm*)

Y = Numune boyu (*mm*)

Bal peteği hacmi kesit alanı ile yüksekliğin çarpılmasıyla elde edilip Denklem 2.2 ile hesaplanmıştır:

$$V = A \cdot Z \quad (2.2)$$

Burada:

V= Hacim (*m<sup>3</sup>*)

Z= Numunenin yüksekliği (*mm*)

Bal peteği yoğunluğu ( $\rho$ )(*kg/m<sup>3</sup>*) Denklem 2.3 ile hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Basma mukavemeti veya dayanımı Denklem 2.4’teki eşitliğin kullanımı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = MEK/A \quad (2.4)$$

Burada:

$\sigma$  = Çekirdek basma mukavemeti (*MPa*)

MEK = Maksimum ezilme kuvveti ( $N$ )

A = Kesit alanı ( $mm^2$ )

Toplam sönümlenen enerji (TSE), kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altındaki alandan aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$TSE = \int_a^b F(\delta) d\delta \quad (2.5)$$

Burada  $a$  ve  $b$  sınır şartlarıdır. Hesaplamalarda  $a=0$  ve  $b$  ise toplam deformasyon miktarı olarak alınmıştır.  $F(\delta)$  deformasyon sürecinde oluşan kuvveti ifade etmektedir.

Özgöl sönümlenen enerji (ÖSE) toplam enerji sönümünün numune kütlesine ( $m$ )( $gr$ ) oranı olup, Denklem 2.6 ile hesaplanmıştır.

$$\text{ÖSE} = \frac{TSE}{m} \quad (2.6)$$

Ortalama ezilme kuvveti (OEK), Denklem 2.7 ile hesaplanmıştır:

$$OEK = \frac{1}{b-a} \int_a^b F d\delta \quad (2.7)$$

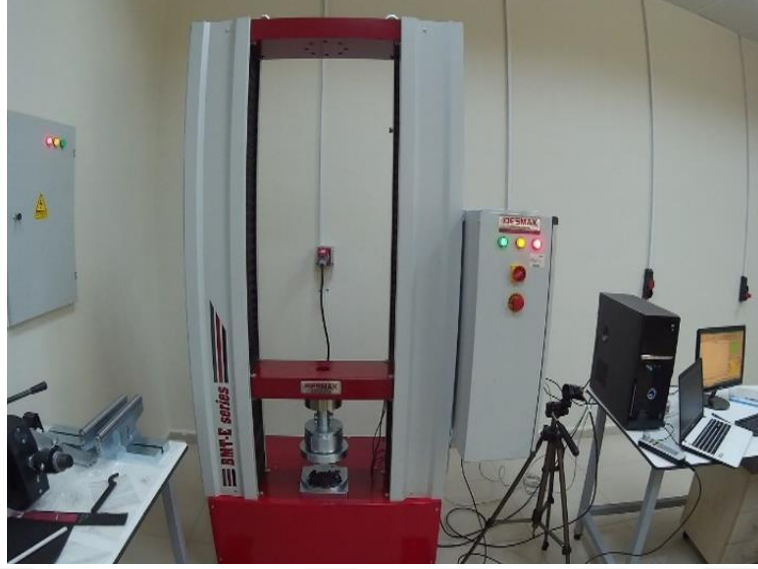
Ezilme kuvveti verimi (EKV), Denklem 2.8'de gösterildiği gibi ortalama ezilme kuvvetinin (OEK) maksimum ezilme kuvvetine (MEK) oranıdır.

$$EKV = \frac{OEK}{MEK} \quad (2.8)$$

TSE ve ÖSE'nin yüksek olup, EKV'nin 1'e yakın olması üstün enerji sönümlenme performansı için arzu edilir.

#### 2.4. Deneysel Çalışmalar

ASTM C365-03 standartlarına uygun olarak üretilen çekirdek numuneler, Besmak BMT-E Serisi 100  $kN$  kapasiteli üniversal test cihazı ve 600  $kN$ 'luk yükleme kapasitesine sahip Besmak BTM-600S makinesinde basma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında numuneler sabit bir plaka ile hareketli plakaların arasına yerleştirilerek, BESMAK test cihazları ile tek ekseninde yukarıdan aşağıya doğru basma yüküne tabi tutulmuştur. Deney prosedüründe, ön yükleme sırasında 0,5  $mm/dak$ , normal yükleme esnasında ise 5  $mm/dak$ 'lık bir hızla kuvvet uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan cihazlar Resim 2.19 ve 2.20'de gösterilmiştir. Ezilme süreci, numunelerin davranışını gözlemlenmek amacıyla kamera ile kaydedilmiştir. Deneyler numunelerin orijinal yükseklik değerlerinin en az %80'ine kadar ezilerek gerçekleştirilmiştir.

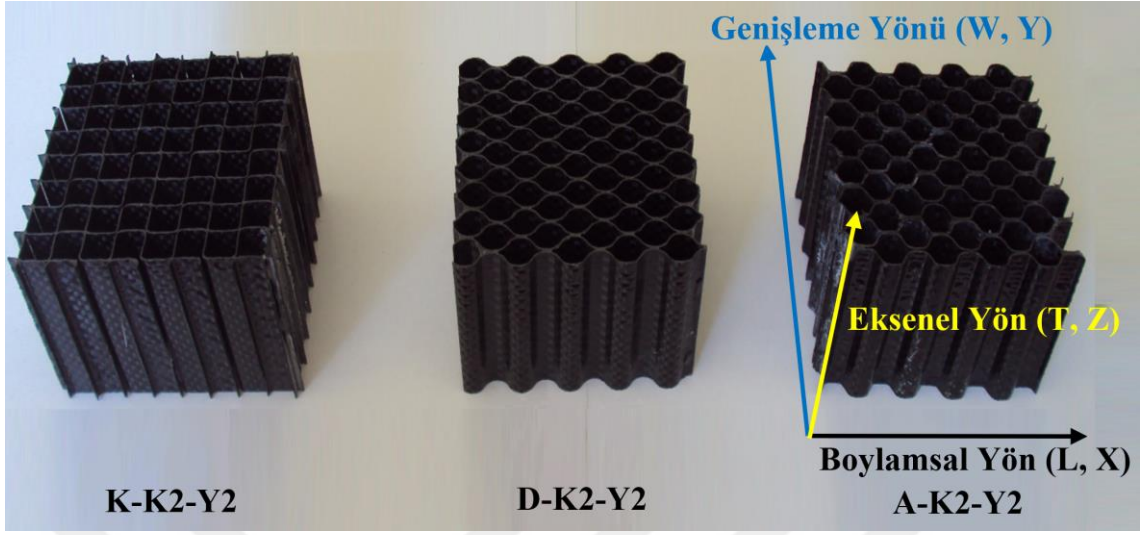


**Resim 2.19.** Besmak marka BMT-E serisi 100 kN test cihazı



**Resim 2.20.** BTM-S Serisi 600 kN test cihazı

Deney numuneleri düzlem dışı eksenel yönde ve düzlem içi boylamsal ile genişleme yönlerinde basma durumlarına göre incelenmiştir. Basma testleri sürecinde uygulanan yüklerin yönleri numuneler üzerinde Resim 2.21’de gösterilmiştir.



**Resim 2.21.** Ürünlerin aksenal, boylamsal ve genişleme basma yönleri

## 3. BÖLÜM

### DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. KFTP Kompozitin Mekanik Özellikleri

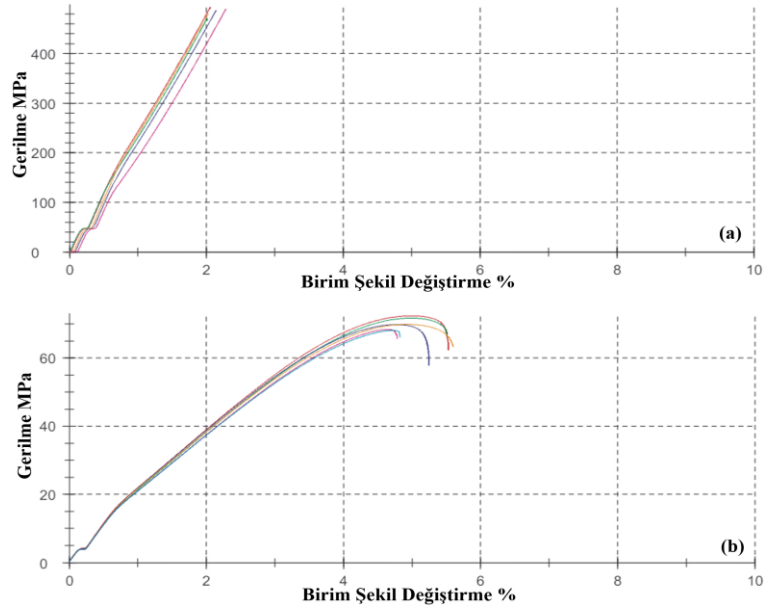
Bu tez kapsamında dikkate alınan tüm bal petek numuneleri karbon fiber takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit malzemeden üretilmiştir. Kompozit levhalar  $200 \text{ gr/m}^2$  3K düz dokuma kumaştan her kat  $[0^\circ, 90^\circ]$  fiber yönelimli olacak şekilde 1-3 kat olarak üretilmiştir. Karbon fiber filamentin yoğunluğu yaklaşık  $1,7 \text{ gr/cm}^3$  olup,  $5-8 \mu\text{m}$  çapa,  $3.450-4.850 \text{ MPa}$  çekme mukavemetine ve  $220-240 \text{ GPa}$  çekme modülüne sahiptir. Polimer matris malzemesi olarak detaylı özellikleri önceki bölümde verilen F1564 epoksi reçine (Fibermak Composites) ve F13487 (Fibermak Composites) sertleştirici kullanılmıştır. Ayrıca, oluklu levhaların yapıştırılması için iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Kürlenmiş epoksi reçine ve KFTP levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çekme ve eğilme testleri ISO 527 ve ISO 178 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Epoksi reçine ve KFTP kompozit malzemeden çekme deney numunelerinin elde edilmesi ve örnek çekme testlerinden fotoğraf kareleri Resim 3.1 ve Resim 3.2’de gösterilmiştir. KFTP levhaların çekme mukavemeti ve gerinim değerleri sırasıyla  $470-494 \text{ MPa}$  ve  $\%2,0-2,3$  olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Kürlenmiş epoksi reçinenin çekme mukavemeti, gerinimi ve çekme modülü sırasıyla  $68-72 \text{ MPa}$ ,  $\%4,7-5,0$  ve  $2.900-3.080 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir (Şekil 3.1). Ayrıca, kürlenmiş epoksi reçinenin eğilme mukavemeti, gerinim ve eğilme modülü sırasıyla  $115-125 \text{ MPa}$ ,  $\%5,6-6,5$  ve  $2.900-3.080 \text{ MPa}$  olarak bulunmuştur.



**Resim 3.1.** KFTP kompozit çekme numunelerinin hazırlanması ve örnek çekme deneyinden görüntüler



**Resim 3.2.** Epoksi reçine çekme numunelerinin hazırlanması ve örnek çekme deneyinden görüntüler



**Şekil 3.1.** (a) KFTP kompozitinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, (b) Kurlenmiş epoksi reçinenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

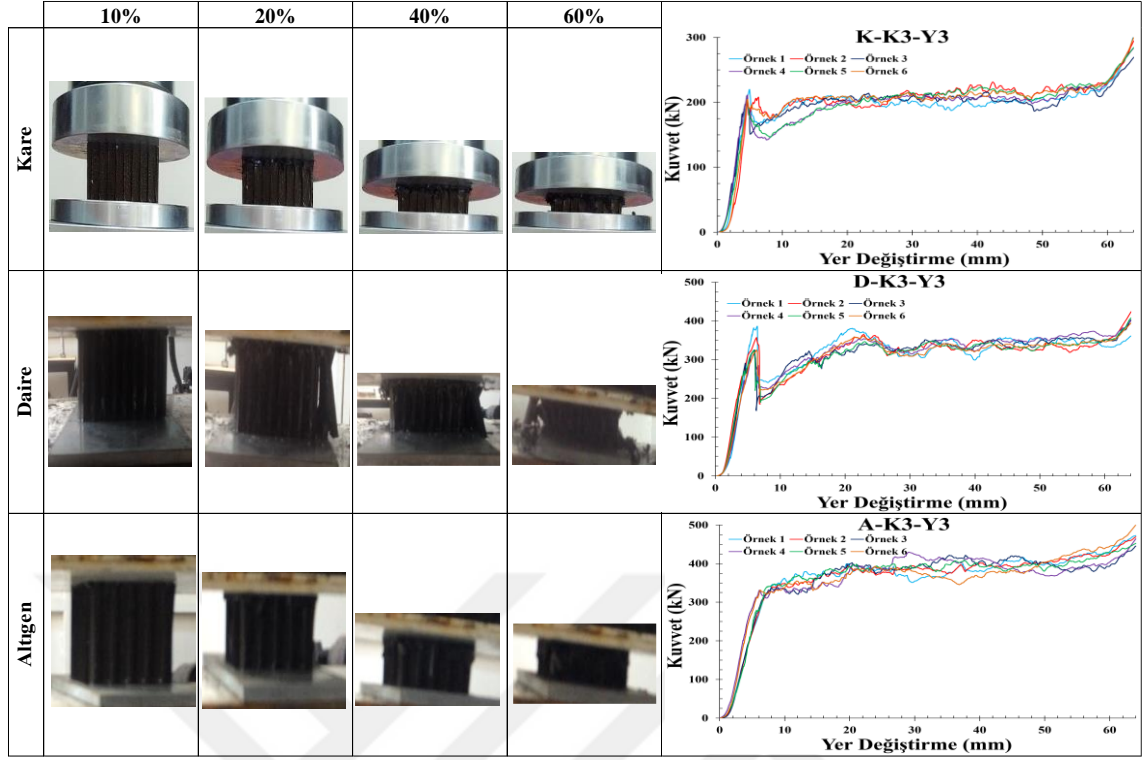
Elde edilen bu veriler, kompozit levha ve epoksi reçinenin çekme ve eğilme mukavemeti açısından tatmin edici sonuçlar sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyum göstermekte olup, çekme ve eğilme mukavemeti açısından hem KFTP hem de epoksi reçine için optimal performans değerlerini büyük oranda sağlamaktadır.

## **3.2. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem Dışı Ezilme Davranışlarının İncelenmesi**

### **3.2.1. Deformasyon modlarının incelenmesi**

Kare, daire ve altıgen hücre geometrilerine sahip KFTP numuneler üzerinde yapılan basma deneyleri sürecinde numunelerin düzlem dışı deformasyon modları kamera yardımıyla kaydedilmiştir. Deneyler süresince farklı deformasyon oranlarında meydana gelen deformasyon modları ile tipik kuvvet-yer değiştirme eğrileri farklı numuneler için (0,75 mm duvar kalınlığı ve 80 mm yüksekliğe sahip kare, daire ve altıgen hücreli numuneler) Şekil 3.2 ve Resim 3.3'de gösterilmiştir. Ayrıca, kare, daire ve altıgen hücre geometrileri ile farklı kalınlara ve yüksekliklere sahip KFTP petek numunelerin düzlem dışı basma deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.3'te sunulmuştur. Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Resim 3.3 düzlem dışı basma yükü altında KFTP bal peteği yapıların deformasyon mekanizmalarını ve yük taşıma kapasitelerindeki değişimi görsel olarak ortaya koyup, deformasyonun ilerleyişi sürecinde her bir geometri için özgün hasar ve burkulma modlarını yansıtarak, yapıların dayanım ve stabilite davranışlarına dair önemli bilgiler sunmaktadır.

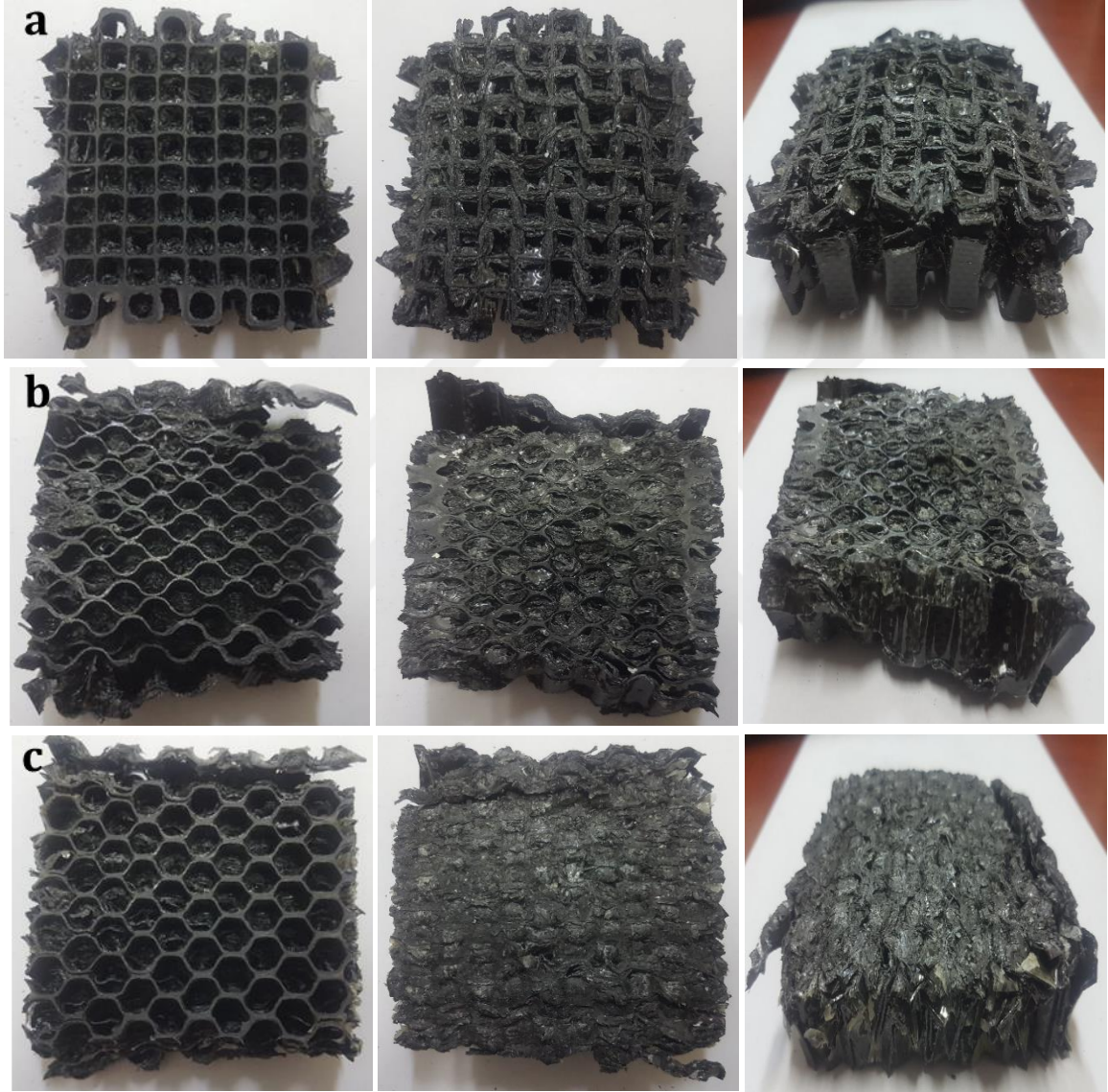
Düzlem dışı basma deneylerinde, deneylerin tekrarlanabilirliğinin ve tutarlı sonuçlar üretilebilirliğinin gösterilmesi amacıyla her bir bal peteği grubundan 6 adet numune aynı yükleme koşullarında test edilmiştir. Bu nedenle düzlem dışı yönde gerçekleştirilen bu deneylerde toplam 162 petek numunesinin ezilme performansı analiz edilmiştir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, aynı tip deney numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri oldukça benzer karakteristiktir. Burada, kuvvet-yer değiştirme eğrileri arasındaki farklılıklara temelde KFTP bal peteği üretim süreçlerinden kaynaklı geometrik ve malzeme kusurları neden olmaktadır. Sonuç olarak, bu bulgular düzlem dışı yükleme ezilme deney sonuçlarının güvenilirliğini ve standart sapmaların birçok parametre için tatmin edici düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu noktada, KFTP bal peteği numunelerinin mekanik performanslarını karşılaştırmak için 6 testin ortalama değerleri dikkate alınmıştır.



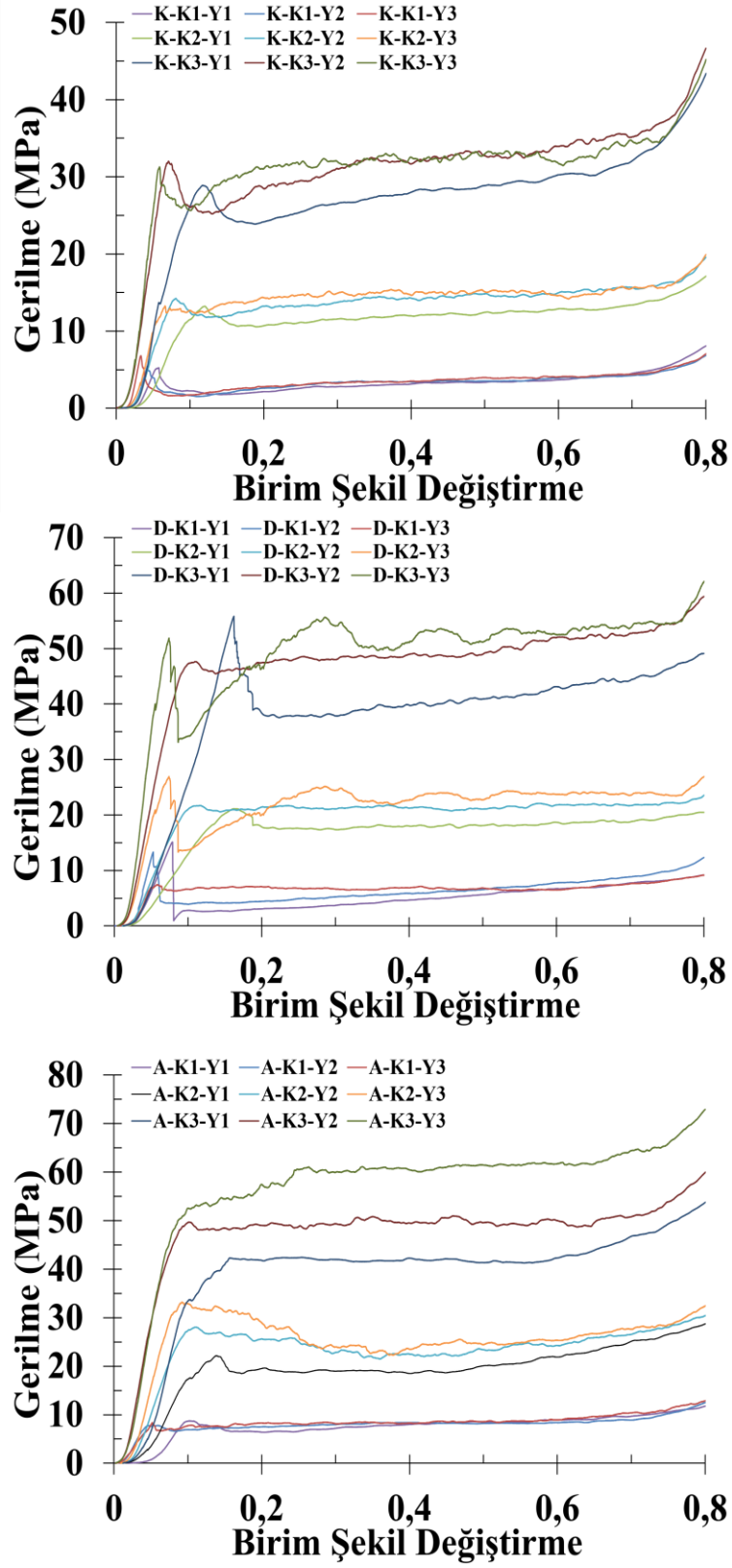
**Şekil 3.2.** Düzlem dışı yükleme durumunda farklı hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerin tipik deformasyon modları ve örnek kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Bal peteği yapıların düzlem dışı yüklemeye maruz kaldıklarında, uygulanan kuvvetin hücre duvarlarına genel olarak uniform olarak dağıldığı Şekil 3.2'den görülmektedir. Düzlem dışı yükleme durumunda hasarların genellikle kompozit levhaların yerel burkulmaları ve çatlakların oluşmasıyla başladığı ve gevrek bir tarzda olduğu görülmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'ten kuvvet ve gerilme değerleri ilk tepe noktasına ulaşana kadar numunelerin büyük oranda elastik deformasyona maruz kalarak bütünlüklerini korudukları ve ilk hasarın bu değere ulaşıldıktan sonra meydana geldiği görülmektedir. Şekil 3.3'ten görüldüğü gibi kare bal peteği numunelerinin elastik deformasyon bölgeleri daire ve altıgen numunelere kıyasla daha dardır. Bunun temel nedeni kare hücre topolojisine sahip bal peteği numunelerin üretiminde kullanılan kompozit oluklu levhaları birbirine bağlayan noktasal temaslı bağların daire ve altıgen numunelere kıyasla deformasyonun daha erken aşamalarında hasara uğrayamaya başlamasıdır. Kuvvet ve gerilme değerleri elastik deformasyon bölgesinin sonunda maksimum seviyelerine ulaştıktan sonra, kare, daire ve altıgen bal peteği numunelerinde farklı deformasyon modlarının olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, hücre tasarımının kompozit bal peteği yapıların ezilme davranışı üzerindeki etkisini açık şekilde ortaya koymaktadır. Kare ve dairesel hücre geometrisine sahip numunelerin oluklu levhalar arasında sınırlı bağlanma yüzeylerine sahip olmaları nedeniyle şekillerde görüldüğü gibi elastik deformasyon aşamasında sonra ezilme kuvvetleri hızla düşmektedir (Şekil 3.4). Buna karşılık, altıgen numunelerdeki kuvvet ve gerilme değerlerindeki düşüş bu numunelerin daha fazla çift kat

güçlü bağlanma yüzeyine sahip olmalarından dolayı çok daha azdır. Sonraki aşamada kuvvet ve gerilme değerlerinin bir platoya ulaştığı ve bal peteği yapıların kademeli deformasyonu nedeniyle geometrik konfigürasyona bağlı olarak daha fazla deformasyonla neredeyse sabit kaldığı veya düşük miktarda kademeli olarak arttığı görülmektedir.

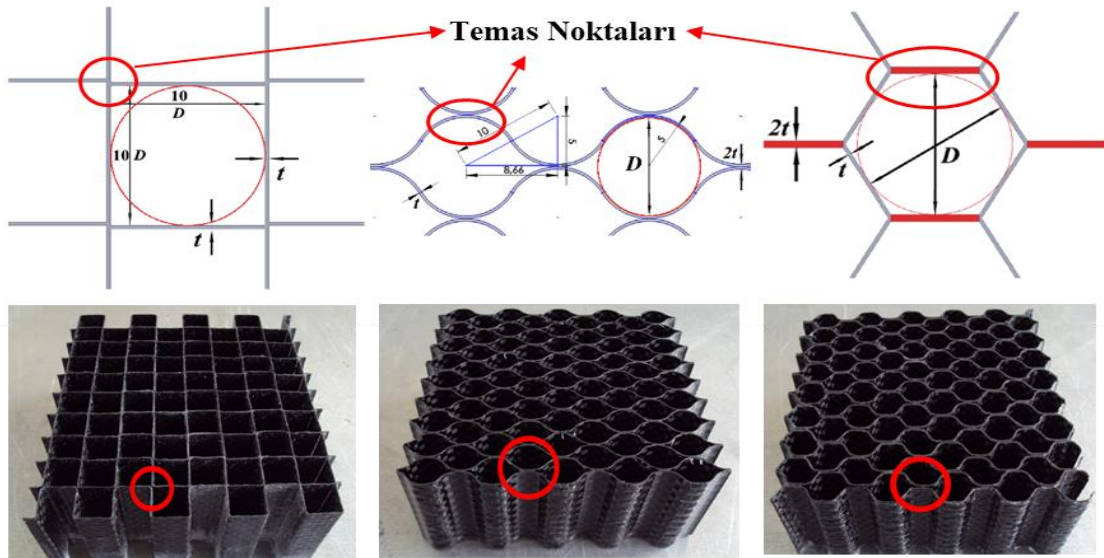


**Resim 3.3.** Deney esnasında meydana gelen hasarların üstten görüntüleri kare (a), daire (b) ve altıgen (c) numuneler



Şekil 3.3. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin düzlem dışı basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 3.3'de sunulan sonuçlar hücre geometrisi, duvar kalınlığı ve yüksekliğinin basma yüklemesi sırasında bal peteği yapıların mekanik davranışlarını ve dolayısıyla enerji sönümleme performanslarını ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, kare, dairesel ve altıgen bal peteği numune gruplarının ilk ve plato bölgesi kuvvet ve gerilmeleri, hücre duvarı kalınlığındaki artışla önemli ölçüde artmaktadır. Bunun nedeni hücre duvarı kalınlığının artmasının burkulma dayanımı ve eğilme rijitliğini artırarak yapıların plastik deformasyonu geciktirmesi ve yapının stabilitesini iyileştirmesidir. Bundan dolayı şekilde görüldüğü gibi hücre kalınlığındaki artışla yapıların yük taşıma kapasiteleri ve ezilme dayanımları doğrusal olmayan bir tarzda dikkate değer mertebede iyileşmektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi altıgen numune gruplarının kuvvet ve gerilme değerleri genellikle kare ve dairesel numunelerden çok daha yüksektir. Bunun nedeni altıgen numunelerin kare ve dairesel numunelerden farklı olarak çok sayıda çift kat bağlanma yüzeyi içermeleri ve bu sayede stabiliteyi tüm deformasyon sürecinde koruyabilmeleridir. Buna karşılık kare ve daire numuneler büyük oranda noktasal tip veya kısıtlı çift kat bağlanma yüzeylerine sahip olup, bu numuneleri meydana getiren bileşenler aralarındaki bağlar görece düşük basma yükleri altında hasara uğrayabilmektedir (Şekil 3.4). Ayrıca, Resim 3.3'ten görülebileceği üzere deformasyon sürecinde hasara uğrayan karbon fiber parçaları dışarıya savrulmakta veya bal peteği hücrelerinde birikmektedir. Bu noktada, kare ve daire hücre geometrili numunelerde hücrelerin deformasyonu sürecinde gevrek şekilde kırılan parçaların hem içe hem dışa doğru hareket ettiği; altıgen hücreli numunelerde ise yüzey temas noktalarının fazla olması nedeniyle numunelerin bütünlüğünü koruduğu ve kırılan parçaların büyük oranda hücre içlerine yöneldiği görülmektedir. Bundan dolayı altıgen numuneler yoğunlaşma bölgesine kare ve daire hücre geometrili numunelerle kıyaslandığında görece olarak deformasyonun daha erken aşamalarında girmektedir.



**Şekil 3.4.** Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin temas noktalarının detaylı gösterimi

Şekil 3.3'den görüldüğü gibi, çekirdek yüksekliğinin bal peteği yapıların ezilme davranışına etkisi kalınlık ile kıyaslandığında petek numune tiplerinin çoğu için genel olarak düşük mertebededir. Özellikle, hücre yüksekliğinin oluklu levhalar arasında zayıf kenar tipi bağları olan kare numunelerin deformasyon davranışı üzerinde etkileri ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Ancak, altıgen petek numunelerin deformasyon davranışı üzerinde hücre yüksekliğinin kare ve dairesel numunelere kıyasla önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada, hücre yüksekliğindeki artış oluklu levhalar arasındaki toplam bağlanma yüzey alanlarını artırarak, yüksek bağlanma yüzey alanına sahip altıgen hücre geometrili bal peteği yapıların kayma dayanımı ile burkulma ve eğilme dayanımını önemli oranda iyileştirmektedir. Ayrıca, hücre yüksekliğinin artırılması yoğunlaşma aşamasında önce uzun bir plato bölgesi sağlayıp ve tüm numune gruplarının yük taşıma performansını iyileştirmektedir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında, 0,75 mm kalınlık ve 80 mm yükseklik ölçülerine sahip altıgen geometrili bal peteği çekirdek, diğer deney gruplarıyla karşılaştırıldığında en iyi basma dayanım performansı sergilemiştir. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin düzlem dışı mekanik davranışlarının incelenmesi sürecinde elde edilen tüm veriler ayrıca Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3. 1.** Düzlem dışı mekanik davranışların verileri

Eksenel Yön	Ağırlık Ort. <i>m(gr)</i>	TSE Ort. <i>(J)</i>	ÖSE Ort. <i>(J/gr)</i>	OEK Ort. <i>(kN)</i>	MEK Ort. <i>(kN)</i>	EKV <i>(%)</i>	Dayanım $\sigma$ <i>(MPa)</i>	Yoğunluk <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>
K-K1-Y1	40.44	670.76	16.59	20.94	33.58	62.35	5.25	157.98
K-K1-Y2	60.29	1025.35	17.01	21.36	35.30	60.49	5.52	157.01
K-K1-Y3	80.02	1437.55	17.97	22.46	43.58	51.53	6.81	156.28
K-K2-Y1	55.31	2326.94	42.07	72.66	84.58	85.90	13.22	216.04
K-K2-Y2	82.54	4142.40	50.19	86.25	91.09	94.69	14.23	214.95
K-K2-Y3	110.55	5739.34	51.92	89.67	90.35	99.24	14.12	215.91
K-K3-Y1	70.30	5475.61	77.89	171.00	184.88	92.50	28.89	274.61
K-K3-Y2	104.81	9417.41	89.85	196.16	204.87	95.75	32.01	272.94
K-K3-Y3	139.64	12633.27	90.47	197.35	200.30	98.53	31.30	272.73
D-K1-Y1	41.51	1059.44	25.52	33.11	96.75	34.22	15.12	162.16
D-K1-Y2	61.43	1933.69	31.48	40.28	85.21	47.27	13.31	159.97
D-K1-Y3	82.35	2730.98	33.16	42.62	47.61	89.52	7.44	160.84
D-K2-Y1	56.02	3404.63	60.78	106.33	135.24	78.63	21.13	218.82
D-K2-Y2	83.84	6118.92	72.98	127.44	138.84	91.79	21.69	218.33
D-K2-Y3	112.22	8827.18	78.66	137.90	172.34	80.02	26.93	219.19
D-K3-Y1	70.53	7680.03	108.89	239.82	357.29	67.12	55.83	275.52
D-K3-Y2	106.24	14276.04	134.37	297.27	304.96	97.48	47.65	276.68
D-K3-Y3	142.27	19793.36	139.12	309.22	332.18	93.09	51.90	277.88
A-K1-Y1	42.11	1554.13	36.91	48.54	55.85	86.91	8.73	164.50
A-K1-Y2	62.99	2457.46	39.01	51.19	53.11	96.38	8.30	164.03
A-K1-Y3	84.39	3463.96	41.05	54.12	54.70	98.93	8.55	164.81
A-K2-Y1	56.41	3924.14	69.56	122.58	141.84	86.42	22.16	220.36
A-K2-Y2	85.14	7130.52	83.75	148.49	179.39	82.77	28.03	221.71
A-K2-Y3	113.24	10347.50	91.38	161.53	212.52	76.01	33.21	221.17
A-K3-Y1	72.15	7982.57	110.64	249.36	270.63	92.14	42.29	281.82
A-K3-Y2	108.31	14497.17	133.85	301.86	318.05	94.91	49.70	282.05
A-K3-Y3	143.35	23184.00	161.73	362.14	390.93	92.63	61.08	279.99

### 3.2.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi

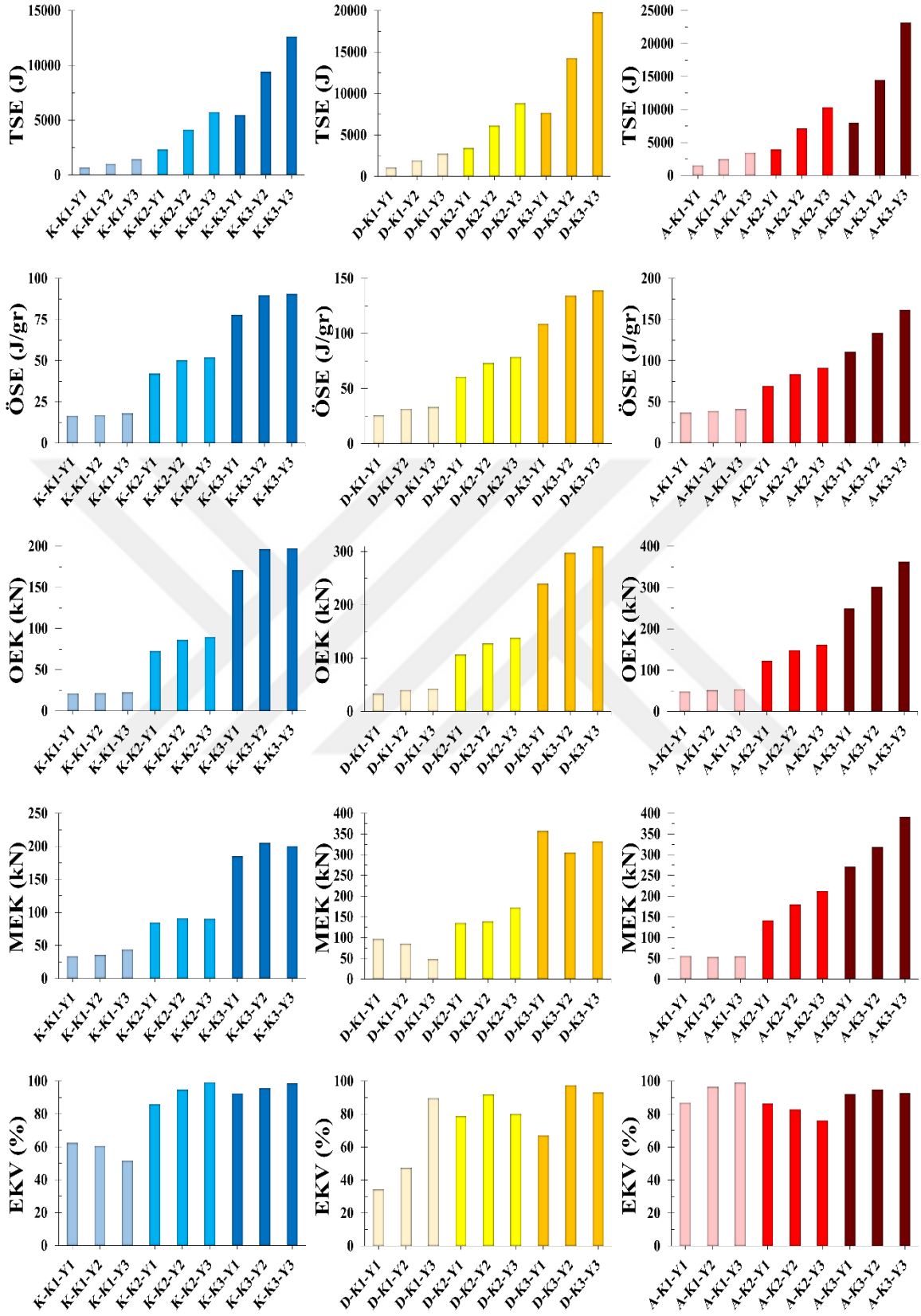
Uygulamalarda kompozit bal peteği yapıları, yüksek enerji sönümlenme potansiyeline sahip olmaları nedeniyle ayrıca tercih edilmektedir (Wang ve Liu, 2018; Paz vd., 2014; Zuhri vd., 2014). Yüksek yoğunluklu KFTP bal peteği yapıların kullanımı, yüksek yapısal dayanım sağlamakla birlikte, yüksek ağırlık özgül enerji sönümünü olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, kompozit yapı tasarımlarından yüksek özgül enerji sönümlenme performansı elde etmek için bal peteği parametrelerinin uygun şekilde seçilmesi kritik öneme sahiptir. Bu bölümde önerilen yapıların ezilme performans parametreleri (TSE, ÖSE, OEK, MEK, ÇEV ve dayanım) 27 farklı örnek grubu için hesaplanarak karşılaştırılmıştır. KFTP numunelerinin düzlem dışı enerji sönümlenme performans parametrelerinin tasarım değişkenlerine bağlı değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Performans parametrelerine ait standart sapma değerleri ayrıca Tablo Ek-1'de sunulmuştur.

KFTP bal peteği numunelerinin yoğunlukları ve ağırlıkları sırasıyla  $156,28-282,05 \text{ kg/m}^3$  ve  $40,44-143,35 \text{ gr}$  arasında değişmektedir. Aynı hücre yüksekliği ve duvar kalınlığına sahip kare, daire ve altıgen bal peteği numuneleri arasındaki ağırlık farkı maksimum %5'in altında olup, kare petekler nispeten daha hafifken, hücre yapısı ve bağ bölgelerinin etkisiyle altıgen petekler daha ağırdır. Dolayısıyla, farklı çekirdek topolojilerine sahip bal peteği numunelerinin bağlı yoğunlukları (yani petek yoğunluğunun KFTP kompozit malzemenin yoğunluğuna oranı) aynı duvar kalınlığı değeri için birbirine yakın olup, bal peteği ve bağlı yoğunluk değerleri kalınlık arttıkça benzer şekilde artmaktadır. Ayrıca, deney verilerinin standart sapma değerleri küçük olduğundan Şekil 3.5'te sadece enerji sönümlenme performans parametrelerinin ortalama değerleri sunulmuştur.

Şekil 3.5'ten açıkça görüldüğü gibi, tüm numunelerin TSE ve ÖSE değerleri, hücre duvarı kalınlığında ki artışla birlikte beklenildiği gibi artmaktadır. Ancak, hücre duvar kalınlığının artışı ile ÖSE değerlerindeki artış arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Örneğin, duvar kalınlığının  $0,25 \text{ mm}$ 'den  $0,75 \text{ mm}$ 'ye yükselmesiyle KFTP bal peteği yapıların ÖSE değerlerinde 5 kattan fazla bir artış gerçekleşmiştir. Öte yandan, kare geometrili numunelerde, daire ve altıgen numunelere kıyasla yüksek ÖSE değerlerine ulaşmak için hücre duvar kalınlığını artırmak çok daha etkili bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.5 incelendiğinde, altıgen numunelerin en yüksek, kare numunelerin ise en düşük ÖSE değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Örneğin, altıgen numunelerin ÖSE değeri, aynı ağırlıktaki dairesel numunelerden %45 ve kare numunelerden %130 daha yüksektir. Sonuçlar, kare ve dairesel numunelerin enerji sönümlenme kabiliyetlerinin altıgen numunelere kıyasla hücre yüksekliğine nispeten daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, duvar kalınlığının artması ile hücre yüksekliğinin enerji sönümlenme performansına olan etkisi de artmıştır. Hücre yüksekliğindeki artış yoğunlaşma fazından önce daha uzun bir plato bölgesi deformasyonuna izin vermekte ve bu durum numunelerin TSE ve ÖSE'nin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, altıgen numunelerin ÖSE değerinin yükseklik artışıyla

%46'ya varan oranda arttığı görülmektedir. OEK parametresinin toplam enerji sönümüne doğrudan bağlı olduğu dikkate alındığında, hücre geometrisi, duvar kalınlığı ve yükseklik gibi faktörlerin OEK parametresine etkisi bu parametrelerin TSE ve ÖSE üzerindeki etkilerine benzerdir.

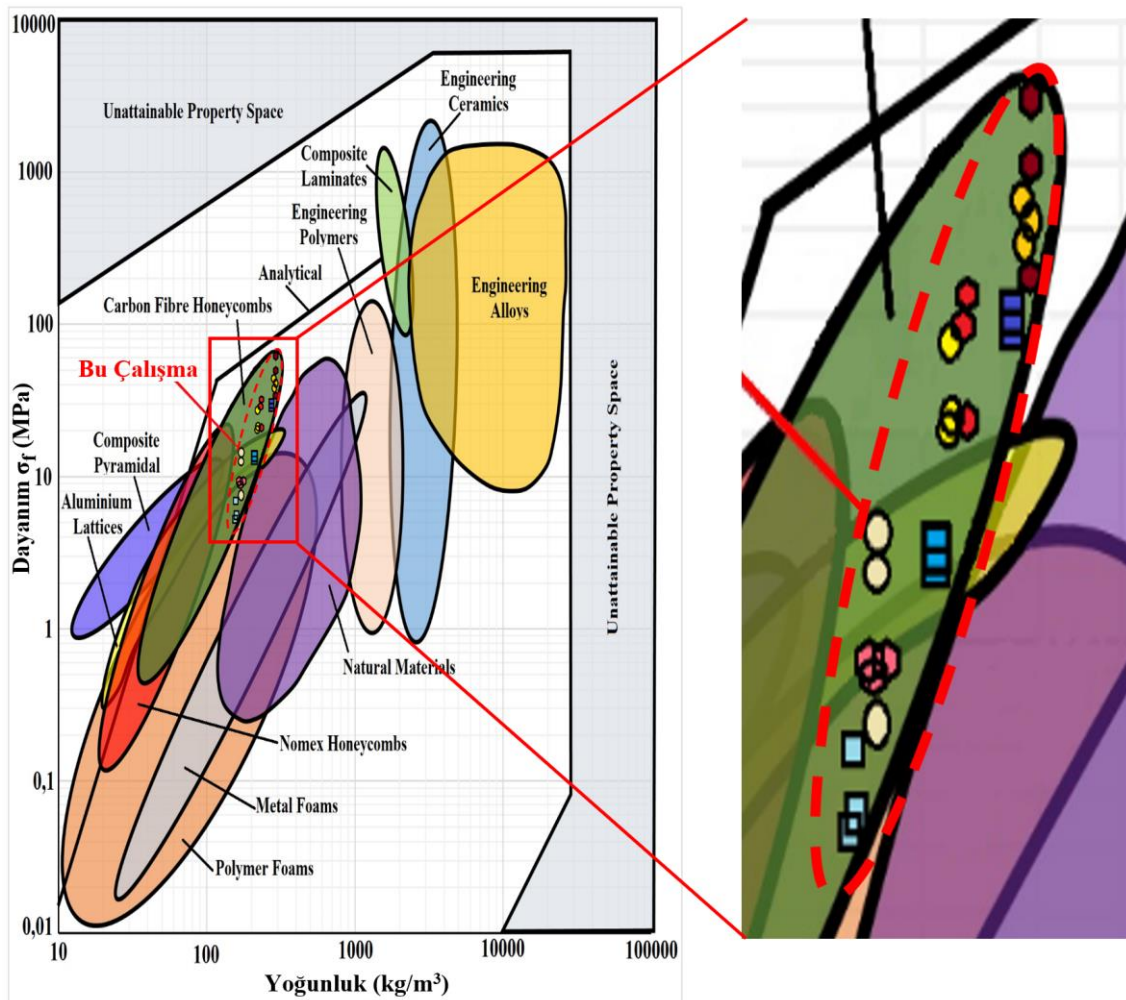
KFTP bal peteği yapıların ezilme performanslarının değerlendirilmesinde MEK ve EKV parametreleri önemli göstergeler arasındadır. EKV kuvvet-yer değiştirme eğrisinin stabilitesinin bir göstergesi olup, yüksek EKV, yüksek OEK ve düşük MEK nedeniyle enerjinin daha verimli bir şekilde sönümlendiği anlamına gelir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, tüm numunelerin MEK değerleri hücre duvarı kalınlığı arttıkça önemli ölçüde artmaktadır. Öte yandan, altıgen ve daire kesitli numunelerin MEK değerleri kare kesitli numunelere göre daha yüksektir. Bu durum altıgen ve dairesel KFTP numunelerin basma yüklemesi altında daha yüksek bir burkulma dayanımı sergilediklerini göstermektedir. Ayrıca Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, daha kalın hücre duvarlarına sahip numunelerin genellikle daha yüksek EKV değerlerine sahiptir. Öte yandan, altıgen numuneler tüm kalınlık aralığı için daha yüksek EKV değerlerine sahiptir. Örneğin, aynı ağırlığa sahip 0,25 mm duvar kalınlığındaki altıgen numunelerin EKV değerleri, daire ve kare kesitli numunelerle karşılaştırıldığında sırasıyla %154 ve %91 oranında daha yüksektir.



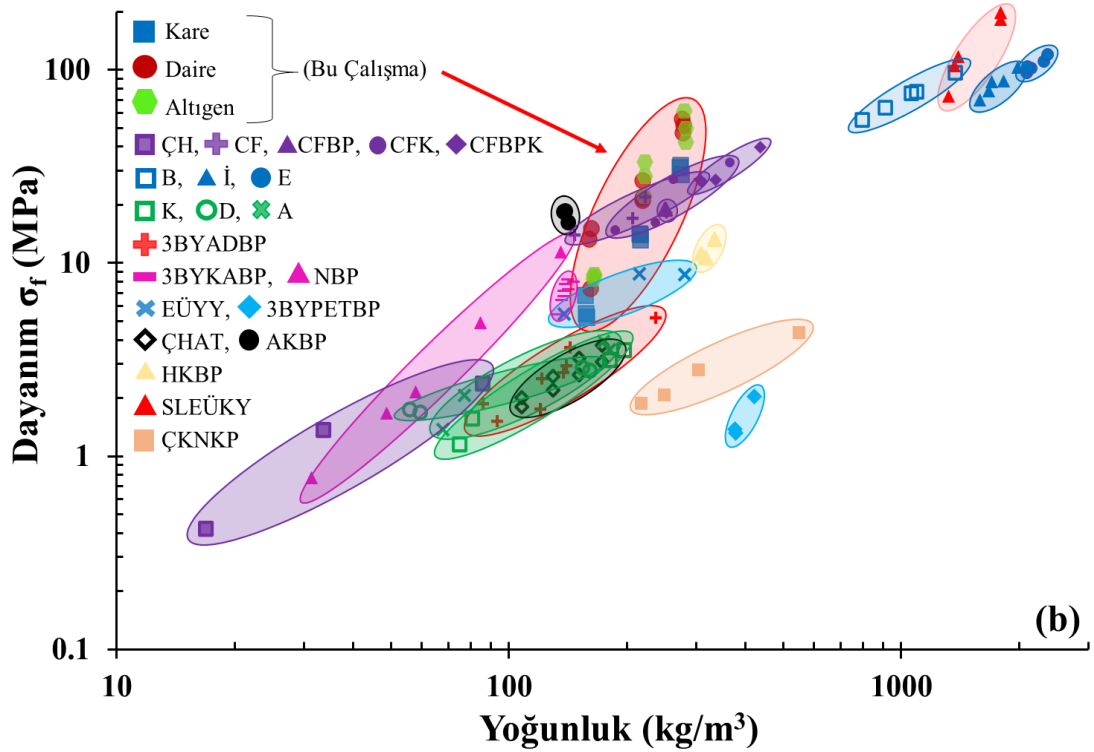
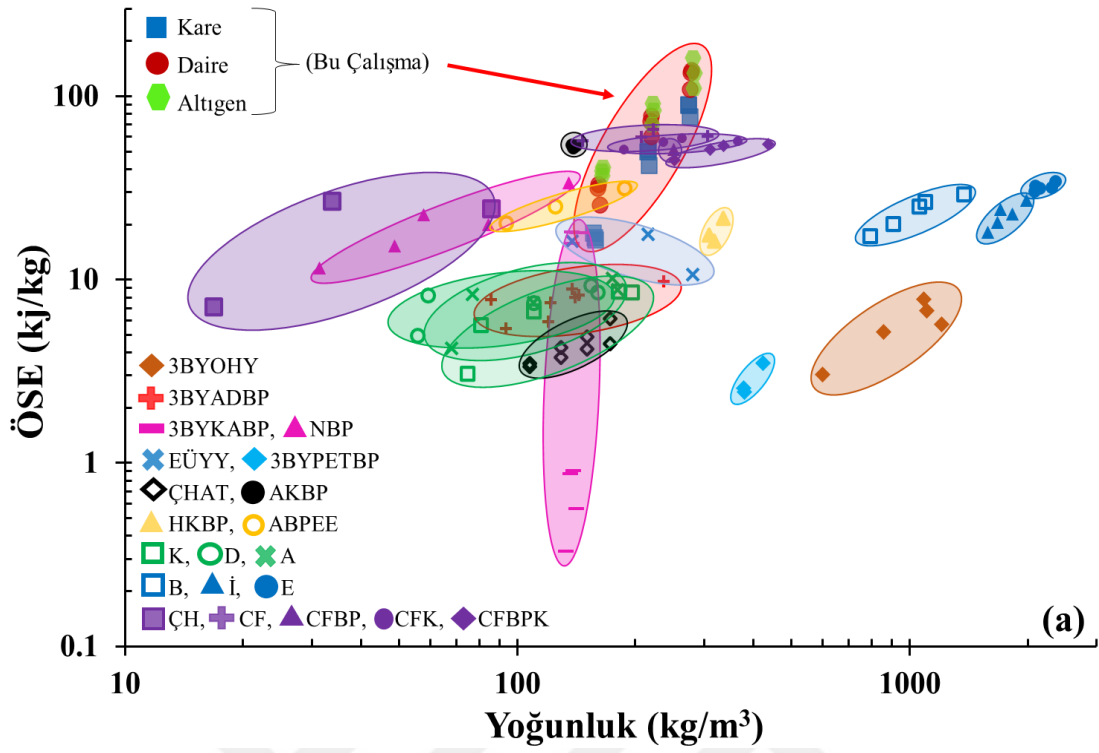
Şekil 3.5. KFTP bal peteği numunelerinin düzlem dışı basma yüklemesi altında enerji sönümleme performanslarının karşılaştırılması

### 3.2.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücresel yapıların performansı ile karşılaştırılması

Altıgen, daire ve kare KFTP bal peteği numunelerin performanslarını literatürdeki diğer gözenekli yapılarla kıyaslayarak değerlendirmek amacıyla elde edilen değerler Ashby diyagramında dayanım-yoğunluk çizelgesinde gösterilmiştir (Şekil 3.6). Ashby diyagramında, KFTP bal peteği numunelerinin düzlem dışı dayanımları kompozit piramidal kafesler, alüminyum kafesler, nomex bal petekleri, metal köpükler, polimer köpükler ve karbon fiber bal petekleri gibi çeşitli hücresel malzemeler ile karşılaştırılmıştır (George, 2013; Zhang vd., 2018; Russell vd., 2008; Yu vd., 2016; Vitale vd., 2018). Şekil 3.6’da, altıgen, daire ve kare KFTP bal peteği numuneler sırasıyla kırmızı, sarı ve mavi tonlarında 9 farklı renk ile temsil edilmiştir.



Şekil 3.6. Bu çalışmada önerilen KFTP bal petek yapıların özelliklerinin dahil edildiği mühendislik malzemeleri için dayanım-yoğunluk haritası



Şekil 3.7. Farklı hüresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin düzlem dışı enerji sönümlenme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması  
a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri

Şekil 3.6 incelendiğinde, KFTP numunelere ait verilerinin dayanım-yoğunluk grafiğinde karbon fiber bal peteği eliptik bölgesinin üst sağ kısmında konumlandığı ve özgün dayanım değerlerinin birçok alternatif malzemeden daha iyi veya rekabet edebilir seviyede olduğunu görülmektedir. Ayrıca, altıgen ve dairesel numunelerin düzlem dışı özgün dayanımının kare numunelerden belirgin şekilde yüksek olduğu görülmektedir. Burada, düşük yoğunluklarda, dairesel numuneler yüksek burkulma dayanımları sayesinde altıgen numunelere kıyasla daha yüksek basma dayanımı sergilemişlerdir. Buna karşın, yüksek yoğunluk değerlerinde altıgen numunelerin diğer geometrik formlara kıyasla çok daha yüksek basma dayanımı sunduğu Şekil 3.6'dan görülmektedir.

**Tablo 3.2.** Düzlem dışı eksenel yönde performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları

Sembol	Kısaltmalar	Kısaltmaların Açıklaması	Referans
●	AKBP	Altıgen CFRP Kompozit Bal Petekler	Deng vd. 2024
▲	NBP	Nomex Bal Petekler	Xie vd. 2020
■	3BYOHY	3B Yazıcıda Origami'den Esinlenen Hücresel Yapılar	Li vd. 2021
◆	3BYPETBP	3B Yazıcıda PET-G Bal Petekler	Vazquez vd. 2021
+	3BYADBP	3B Yazıcıda Atnalı Desenli Bal Petekler	Yang vd. 2018
—	3BYKABP	3B Yazıcıda Kare ve Altıgen Bal Petekler	Duan vd. 2018
×	EÜYY	Ekleme Üretilen Yardımcı Yapılar	Alomarah vd. 2020
○	ABPEE	Alüminyum Balpeteklerinin Enerji Emilimi	Xie vd. 2015
◊	ÇHAT	Çok Hücreli Altıgen Tüpler	Gao vd. 2023
▲	HKBP	Hiyerarşik Kare Bal Petekler	Zhou vd. 2023
□ ○ ×	K, D, A	Kare, Daire ve Altıgen Modüler Karbon Fiber Hücreler	Wang vd. 2023
□ ▲ ●	B, İ, E	Boş, İlkel ve Elmas Üçlü Periyodik Kare Yüzey Kafesleri	Xie vd. 2024
■ + ▲ ● ◆	ÇH, CF, CFBP, CFK, CFBPK	(Çekirdek Hücre), (Cam Fiber), (Cam Fiber-Bal Peteği), (Cam Fiber-Köptük), (Cam Fiber-Bal Peteği-Köptük) Cam Fiber Boruya Köptük Dolgulu Bal Petekleri	Sarkhosh vd. 2022
▲	SLEÜKY	Seçici Lazer Eritme ile Üretilen Kafes Yapıları	Yan vd. 2019
■	ÇKNKP	Çok Katmanlı Metal Kafes Paneller	Li vd. 2018

KFTP bal peteklerinin düzlem dışı basma yüklemesi altındaki performansları ayrıca literatürdeki farklı hücresel yapıların performansı ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.7'de, KFTP peteklerin ÖSE ve dayanım değerleri literatürdeki farklı hücresel yapıların değerleri ile birlikte sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen deney sonuçları grafikte kırmızı bölgeyle işaret

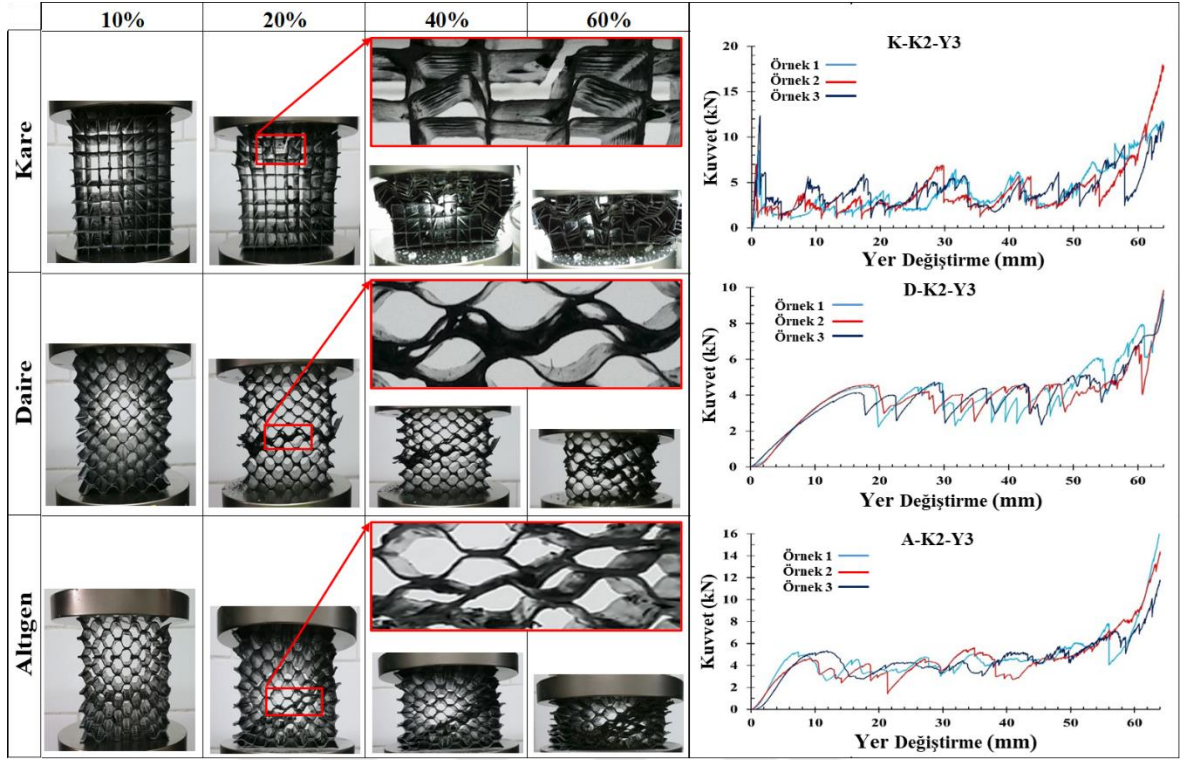
edilmiştir. Tablo 3.2'de ise Şekil 3.7'de kıyaslanan çalışmalara ait ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Şekil 3.7'den görülebileceği gibi yoğunlukları  $156,28-282,05 \text{ kg/m}^3$  arasında değişen KFTP bal peteklerinin düzlem dışı ezilme performansı ÖSE ve dayanım değerleri ( $16,59-161,73 \text{ J/gr}$  ve  $5,25-61,08 \text{ MPa}$ ) açısından literatürdeki birçok alternatif hücresel konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyededir. Bu sonuç, KFTP bal peteklerinin düzlem dışı enerji sönmüleme ve dayanıklılık açısından pratik uygulamalarda üstün bir seçenek olabileceğini kanıtlamaktadır.

### **3.3. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem İçi Genişleme Yönünde Ezilme Davranışlarının İncelenmesi**

#### **3.3.1. Deformasyon modlarının incelenmesi**

Kare, daire ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerin genişleme yönünde yapılan basma deneylerinde gözlemlenen tipik deformasyon modları ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.8'de, gerilme-şekil değiştirme eğrileri ise Şekil 3.9'da sunulmuştur. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere, aynı tip deney numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri benzer trende sahip olup, numunelerin kuvvet değerleri arasında farklar oldukça düşüktür. KFTP bal peteği üretim süreçlerinde meydana gelen geometrik bozukluklar ve diğer kusurlar yapılarındaki hasar mekanizmalarını etkilediğinden, bu durum bal peteği numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde bu tarz düşük seviyede farklılıkların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu bulgular deney sonuçlarının güvenilirliğini ve standart sapmaların birçok parametre için tatmin edici düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görüldüğü gibi bal peteği numuneler başlangıçtan belirli deformasyon seviyelerine kadar elastik olarak deforme olurken, numuneler boyunca genel olarak uniform bir deformasyon meydana gelmektedir. Bu fazda, deformasyonla birlikte ezilme kuvvetleri ve gerilmeler neredeyse doğrusal olarak artarken, hücre duvarları düşük miktarda deformasyona uğrayıp esasen elastik eğilmeye maruz kalmaktadır. Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi kare bal peteği numunelerinin doğrusal elastik deformasyon bölgeleri diğer numuneler ile kıyaslandığında oldukça dardır. Bunun temel nedeni kare hücre geometrisine sahip numunelerin üretiminde kullanılan oluklu levhaları birbirine bağlayan büyük oranda noktasal temasla oluşturulan bağların diğer numunelere kıyasla çok daha erken bir deformasyon aşamasında hasar görmeye başlamasıdır. Ezilme kuvvetleri ve gerilme değerleri elastik deformasyon bölgesinin sonunda maksimum seviyelerine ulaştığında, farklı çekirdek geometrilerine sahip bal peteklerinde farklı deformasyon modlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, hücre geometrisinin bal peteği yapıların mekanik davranış üzerindeki etkisini belirgin şekilde ortaya koymaktadır.



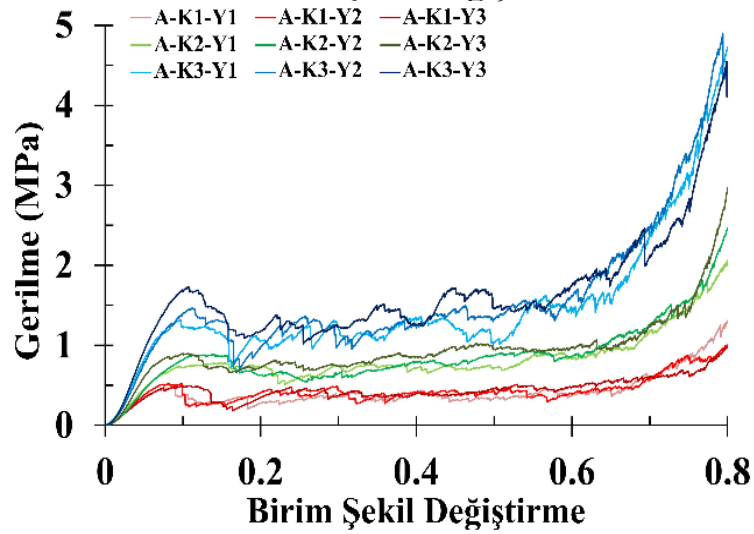
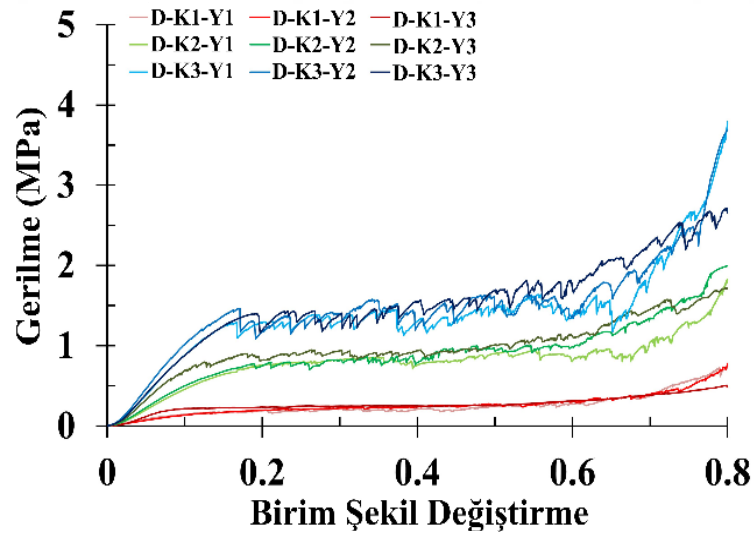
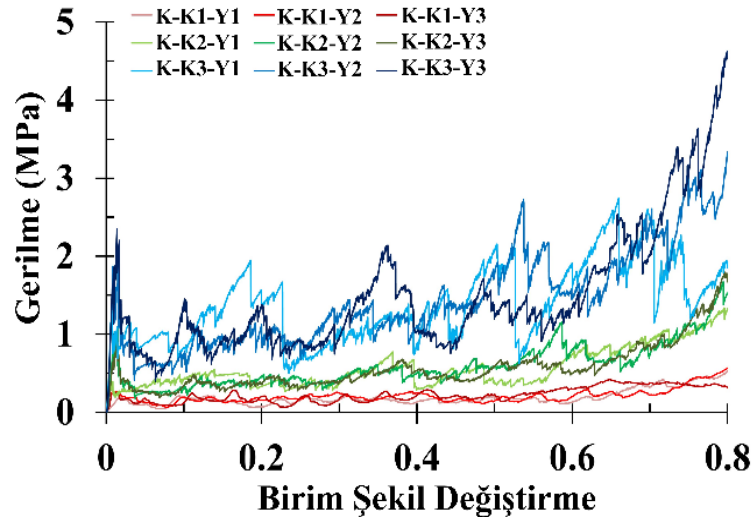
**Şekil 3.8.** Düzlem içi genişleme yönünde basma yüklemesi altında kare, dairesel ve altgen hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerin tipik deformasyon modları ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 3.8'de bir örneği görüldüğü üzere, altgen hücreli bal peteklerinde, hücre duvarlarının genişleme yönünde katman katman hasara uğradığı ve eğik yönde yerel bant oluşumlarının olduğu kademeli tarzda katlanma desenleri gözlenmiştir. Bu deformasyon modu, kayma bandı benzeri bir özellik göstermektedir. Altgen bal peteklerinde kare ve daire bal peteklerinin aksine geniş çift duvarlı bağlanma yüzeyleri bulunmakta olup, bu güçlü bağ yapısı bu yapıların kayma mukavemetini artırır ve deformasyon süreci boyunca stabilitelerini korumalarına yardımcı olur. Şekil 8'de görüldüğü gibi, altgen hücrelerin tek ve çift duvarlarının kesişim noktalarında plastik mafsallar gelişmekte ve hücre duvarları eğilme momentini elemanlar arasında yeniden dağıtmak için plastik mafsallar etrafında dönmektedir. Belirli bir deformasyon seviyesinden sonra hasara uğrayan hücre duvarları birbirleriyle temas ederek gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin hafifçe yükselmesine neden olmaktadır. Sonraki süreçlerde, deformasyon arttıkça eğik yöndeki yerel bantlarının sayısı artmakta ve bu süreç gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde küçük dalgalanmalara neden olmaktadır. Son aşamada, altgen bal peteklerin tüm duvarlarının hasara uğramasından sonra yoğunlaşma bölgesine ulaşılmakta ve bu durum deformasyonun son aşamalarında kuvvet ve gerilme değerlerinin keskin şekilde yükselmesine neden olmaktadır. Altgen bal peteklerinin bu deformasyon modları, literatürdeki metal ve kompozit altgen petek yapıların deformasyon davranışları ile benzerlik göstermektedir (Zeng vd., 2021; Habib vd., 2018; Li vd., 2020; Khan vd., 2012). Şekil

3.8 ve Şekil 3.9'da görüldüğü gibi altıgen bal petekleri oldukça yüksek bir ezilme kuvveti verimliliğine sahiptirler (%80-97). Bu nedenle, bu bal peteği yapıları, kararlı yük taşıma kapasiteleri nedeniyle genişleme yönünde oldukça etkili bir enerji sönümleme performansı sergilerler.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görüldüğü gibi dairesel hücre yapılı bal peteklerinde de kademeli tarzda katlanma desenleri gözlenmiş olup, dairesel bal peteklerinin kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri altıgen bal peteklerinkine benzemektedir. Yani dairesel bal peteklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri başlangıçta doğrusal elastik bölge sergilemiş, ardından bir dizi küçük dalgalanmanın olduğu uzun bir plato bölgesi göstermiş ve en sonunda yoğunlaşma bölgesine girmiştir. Dairesel bal peteklerinde KFTP oluklu levhalar arasında sınırlı çift kat bağ yüzeyleri bulunmakta olup, bu bağlar hücre duvarlarının eğilmesi veya deformasyona uğraması sırasında bağ yapısına bağlı olarak düşük yükler altında deformasyonun erken safhalarında hasara uğrayabilmektedir. Bu nedenle dairesel bal peteği hücreleri, öncelikle yatay yönde (yükleme yönüne dik) olmak üzere yerel bant oluşumlarıyla katman katman deformasyona uğrama eğilimindedir.

Kare bal peteği numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal elastik bölgeleri, deformasyon sürecinin erken aşamalarında noktasal tip bağların kırılması ve daha sonra oluklu levhaların nispeten daha düşük yükler altında genişleme yönünde hareket etmesi nedeniyle diğer petek numunelere kıyasla oldukça dardır. Ayrıca, kare bal peteği yapıların kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde büyük salınımlar olması nedeniyle, bu yapıların en yüksek kalınlık değerlerinde ezilme ve enerji sönümleme süreçleri oldukça kararsızdır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, deformasyona uğrayan kare numune oluklu levha duvarları birbiri ile temas edene kadar deformasyon sürecinde kuvvet ve gerilme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Belirli bir deformasyondan sonra hücre duvarları yapı boyunca önemli ölçüde temas edip, plastik eğilme baskın hale gelmektedir. Bu süreçte düşey yönde hasara uğramış hücre duvarları yanlara doğru kayma deformasyonuna uğrayarak, genişleme yönündeki kare peteklerin yük taşıma kapasitesi ve enerji sönümleme kabiliyetini sınırlamaktadır. Ayrıca, KFTP oluklu levhaların istiflenme tarzı deformasyonu sürecinde eğilmenin baskın olması nedeniyle, hücre duvarı kalınlığı arttıkça kare bal peteği yapısının dayanımının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Burada hücre duvarı kalınlığının artırılması, oluklu kare levhalar arasında daha geniş bir temas yüzeyi oluşmasına neden olur ve bu nedenle yüklemeye yönüne paralel çok sayıda hücre duvarı bulunan kare bal peteği numuneler başlangıçta diğer numunelere göre daha fazla basma yükü taşıyabilmektedir. Örnek verilecek olursa, 0,75 mm duvar kalınlığına ve 80 mm yüksekliğe sahip kare, dairesel ve altıgen bal petekleri için başlangıç tepe gerilmeleri sırasıyla yaklaşık 2.4, 1.4 ve 1.7 MPa'dır. Oluklu kare levhaların istiflenmesi sırasında oluşan kademeli deformasyon benzer bir mekanizma ile gerçekleştiğinden, yüksek kalınlıktaki kare numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri büyük dalgalanmalar içermektedir.



**Şekil 3.9.** Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin genişleme yönünde düzlem içi basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 3.9'da sunulan test sonuçları, hücre şeklinin, duvar kalınlığının ve yüksekliğinin bal peteği yapıların düzlem içi basma yüklemesi altında genişleme yönündeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri üzerinde kayda değer etkilerinin olduğu göstermektedir. Bu bağlamda, altıgen ve dairesel bal peteklerinin tüm tasarım parametreleri için tüm deformasyon süreci boyunca kararlılıklarını neredeyse korudukları, kare bal peteklerinin ise özellikle yüksek kalınlık değerlerinde kararsız bir hasar modu sergilediği görülmektedir. Öte yandan, farklı topolojilerin ezilme performansları karşılaştırıldığında, yukarıda belirtilen etkili deformasyon mekanizmalarından dolayı, özellikle düşük kalınlık değerlerinde altıgen numuneler en yüksek dayanıma ve plato gerilmesine sahiptir. Örnek verilecek olursa, 0,25 mm duvar kalınlığına ve 80 mm yüksekliğe sahip kare, dairesel ve altıgen bal peteklerinin dayanım değerleri sırasıyla yaklaşık 0,29, 0,30 ve 0,50 MPa'dır. Diğer yandan, hücre duvar kalınlığının veya yapıların yoğunluğunun artmasıyla elastik eğrinin başlangıç eğiminin, ilk tepe ezilme kuvvetinin, plato gerilmesinin ve peteklerin dayanımının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu noktada, yapıların yoğunluğunun yaklaşık 1,75 kat artması dayanımı 6,1 kata kadar artırabilmektedir.

Kompozit bal peteklerinin mekanik davranışları numune büyüklüğünden de etkilenebilmektedir. Bu noktada, bal peteği duvar yüksekliği yapının en-boy oranını ve oluklu levhalar arasındaki toplam bağlanma yüzey alanlarını değiştirir ve bu durumun ezilme süresince kompozit petek yapıların mekanik davranışı üzerinde belirli oranlarda etkileri olabilir. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere hücre yüksekliğinin yapının genişleme yönünde düzlem içi basma davranışı üzerinde belirli oranda etkisi bulunmaktadır; ancak, bu etki duvar kalınlığına kadar yüksek oranda değildir. Bu noktada, en yüksek dayanım değerleri ve nispeten daha uniform ve kararlı deformasyon davranışı tipik olarak en boy oranı 1 olduğunda (yani 80 mm yükseklik için) elde edilmiştir. En iyi iyileşmeye örnek verilecek olursa, 0,5 mm duvar kalınlığına sahip altıgen bal peteklerinin dayanımı, yükseklik 40 mm'den 80 mm'ye (örneğin 0,73'ten 0,87 MPa'ya) çıkarıldığında yaklaşık %20 oranında artmıştır. Öte yandan, yüksek hücre kalınlığına sahip kare ve dairesel bal peteği numunelerinde yüksekliğin ezilme davranışına olan etkisi, güçlü çift duvarlı bağlama yüzeyleri içeren altıgen bal peteği numunelerine göre daha belirgindir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi yükseklik arttıkça, kayma dayanımının artması ve kenar etkilerinin en aza indirilmesi nedeniyle kare ve dairesel petek numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri yoğunlaştırma bölgesine kadar daha kararlı bir davranış göstermektedir. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin genişleme yönünde davranışlarının incelenmesi sürecinde elde edilen tüm veriler ayrıca Tablo 3.3'te verilmiştir.

**Tablo 3.3.** Düzlem içi genişleme yönüne ait mekanik davranış verileri

Genişleme Yönü	Ağırlık Ort. $m(gr)$	TSE Ort. (J)	ÖSE Ort. (J/gr)	OEK Ort. (kN)	MEK Ort. (kN)	EKV (%)	Dayanım $\sigma$ (MPa)	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
K-K1-Y1	40.43	38.86	0.96	0.61	0.94	64.37	0.15	157.93
K-K1-Y2	60.26	63.95	1.06	1.00	1.58	63.27	0.25	156.93
K-K1-Y3	79.59	92.30	1.16	1.44	2.45	58.76	0.38	155.44
K-K2-Y1	55.59	110.43	1.99	1.73	3.12	55.32	0.49	217.16
K-K2-Y2	82.44	181.46	2.20	2.84	4.19	67.68	0.65	214.68
K-K2-Y3	111.53	259.04	2.32	4.05	7.22	56.05	1.13	217.83
K-K3-Y1	69.92	282.84	4.05	4.42	7.25	60.97	1.13	273.13
K-K3-Y2	104.71	441.95	4.22	6.91	10.04	68.78	1.57	272.69
K-K3-Y3	139.61	609.20	4.36	9.52	12.49	76.18	1.95	272.68
D-K1-Y1	41.93	50.56	1.21	0.79	1.06	74.32	0.17	163.79
D-K1-Y2	60.69	79.03	1.30	1.23	1.44	85.74	0.23	158.05
D-K1-Y3	82.23	109.21	1.33	1.71	1.91	89.36	0.30	160.61
D-K2-Y1	56.10	139.33	2.48	2.18	2.26	96.49	0.35	219.14
D-K2-Y2	83.81	221.91	2.65	3.47	3.76	92.21	0.59	218.26
D-K2-Y3	112.63	309.69	2.75	4.84	5.45	88.74	0.85	219.98
D-K3-Y1	70.35	284.69	4.05	4.45	5.29	84.15	0.83	274.79
D-K3-Y2	106.33	452.29	4.25	7.07	7.29	96.91	1.14	276.91
D-K3-Y3	142.62	616.69	4.32	9.64	10.70	90.07	1.67	278.55
A-K1-Y1	42.46	85.34	2.01	1.33	1.59	84.07	0.25	165.87
A-K1-Y2	62.89	132.37	2.10	2.07	2.59	79.73	0.41	163.78
A-K1-Y3	83.01	181.17	2.18	2.84	3.35	84.81	0.52	162.14
A-K2-Y1	56.52	144.17	2.55	2.25	2.33	96.52	0.36	220.77
A-K2-Y2	85.25	235.92	2.77	3.69	3.88	95.01	0.61	222.01
A-K2-Y3	112.91	326.43	2.89	5.10	5.60	91.11	0.87	220.52
A-K3-Y1	71.62	301.18	4.21	4.71	4.88	96.34	0.76	279.75
A-K3-Y2	108.40	482.51	4.45	7.54	7.99	94.39	1.25	282.30
A-K3-Y3	142.80	660.96	4.63	10.32	11.07	93.21	1.73	278.91

### 3.3.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi

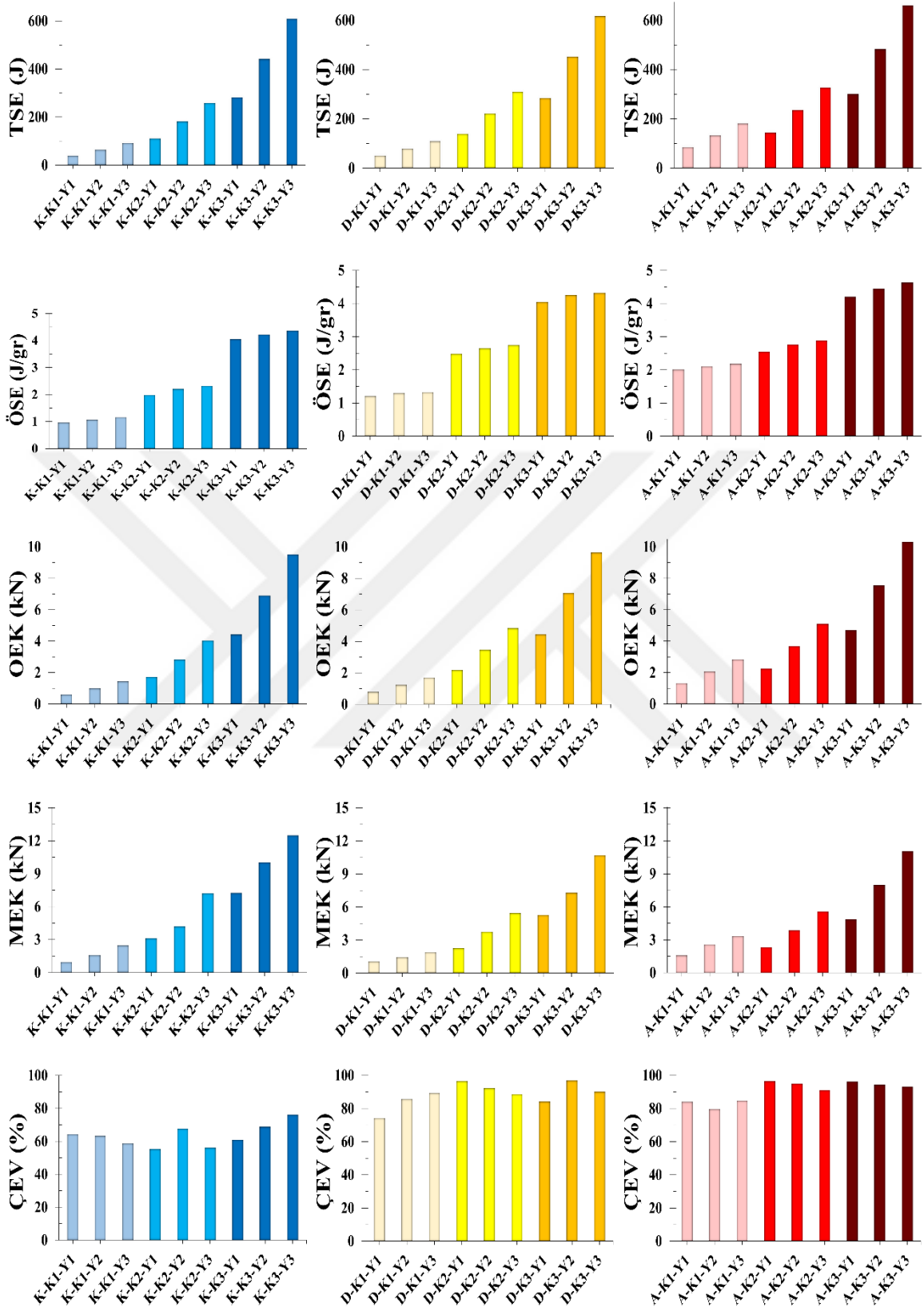
Yukarıdaki gözlemler, uygun tasarım parametreleri dikkate alındığında KFTP bal peteği yapıların genişleme yönünde düzlem içi yükleme koşulları altında kararlı bir kademeli deformasyon davranışı gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle dikkate alınan kompozit bal peteği yapıların enerji sönümlenme uygulamalarında kullanılabilme potansiyelleri yüksektir. Öte yandan, bal peteği yapıların enerji sönümlenme performansının optimize edilmesinde, düşük ağırlıklarda kararlı bir deformasyon süreciyle yüksek enerji sönümlenme kapasitelerine ulaşılması istenmektedir. Dolayısıyla, hasar bazlı ve enerji bazlı performans kriterlerini aynı anda optimize eden bal peteği tasarımlarının pratik uygulamalarda yer bulma potansiyeli daha yüksektir. Bu bağlamda, KFTP bal peteği yapıların enerji sönümlenme karakteristikleri, önceki bölümde tartışılan farklı hasar bazlı ve enerji bazlı performans endeksleri kullanılarak bu bölümde ayrıca değerlendirilmiştir.

Düzlem içi genişleme yönünde kompozit bal peteği numunelerinin enerji sönümlenme performans parametrelerinin tasarım değişkenlerine bağlı değişimi Şekil 3.10'da

gösterilmiştir. Performans parametrelerine ait standart sapma değerleri ayrıca Tablo Ek-2'de sunulmuştur. KFTP bal peteği numunelerinin yoğunlukları ve ağırlıkları sırasıyla 155,44-282,84  $kg/m^3$  ve 40,43-143,07  $gr$  arasında değişmektedir. Aynı hücre yüksekliği ve duvar kalınlığına sahip kare, daire ve altıgen bal peteği numuneleri arasındaki ağırlık farkları oldukça düşük mertebede olup, farklı çekirdek topolojilerine sahip bal peteği numunelerinin bağıl yoğunlukları aynı duvar kalınlığı değeri için birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, deney verilerinin standart sapma değerleri oldukça küçük olduğundan Şekil 3.10'da sadece enerji sönümleme performans parametrelerinin ortalama değerleri sunulmuştur.

Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere duvar kalınlığının artmasıyla tüm numunelerde TSE, ÖSE ve OEK değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Burada, duvar kalınlığı iki katına çıkarıldığında kare, daire ve altıgen bal peteklerinin TSE ve OEK değerleri sırasıyla 2,8, 2,8 ve 1,8 kata kadar artarken; duvar kalınlığı üç katına çıkarıldığında bu değerlerin sırasıyla 7,3, 5,7 ve 3,6 kata kadar artmaktadır. Enerji sönümleme kapasitesindeki bu artışla birlikte ÖSE değerlerinin de kalınlık 0,25  $mm$ 'den 0,75  $mm$ 'ye çıktığında kare, daire ve altıgen bal peteklerinde sırasıyla 4,2, 3,4 ve 2,1 kata kadar arttığı görülmektedir. Sonuçlar ayrıca özellikle düşük kalınlık değerlerinde altıgen petek numunelerin kare ve daire petek numunelere kıyasla daha yüksek enerji sönümleme performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu noktada, altıgen bal peteklerinin ÖSE değerlerinin, 0,25  $mm$  duvar kalınlığına sahip numunelerde, yaklaşık olarak aynı ağırlıktaki daire ve kare numunelere kıyasla sırasıyla %67 ve %110 daha yüksektir. Burada, 0,75  $mm$  kalınlık değeri için bu fark %7'den azdır. Bu sonuçlar tüm bal peteği yapılarında hücre duvar kalınlıklarının artmasının enerji sönümleme kapasitesini dikkate değer miktarda arttırdığını ortaya koymaktadır. Şekil 3.10'dan görülebileceği gibi hücre yüksekliği arttıkça petek numunelerin enerji sönümleme performansı iyileşmektedir. Bu noktada, aynı yoğunluğa sahip bal peteği numunelerin ÖSE değerleri hücre yüksekliğinin artmasıyla %20 oranına varan artış göstermektedir.

Numunelerin tamamında kalınlık ve yüksekliğin artışıyla beklenildiği gibi MEK değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, özellikle altıgen numunelerin dayanım ve MEK değerleri, düşük kalınlık değerlerinde dahi diğer numunelere göre daha yüksek seviyelerde olup, bu durum da altıgen numunelerin üstün enerji sönümleme kapasitesinin bir göstergesidir. Ayrıca, daire ve altıgen bal peteklerinin kararlı yük taşıma kapasiteleri ve yüksek plato kuvveti verimlilikleri sayesinde EKV değerleri %97 oranına ulaşmaktadır. Ancak, kare bal peteği numunelerinin EKV değerleri, kararsız deformasyon davranışları nedeniyle yüksek kalınlık ve yükseklik değerlerinde maksimum %77'ye ulaşabilmiştir.



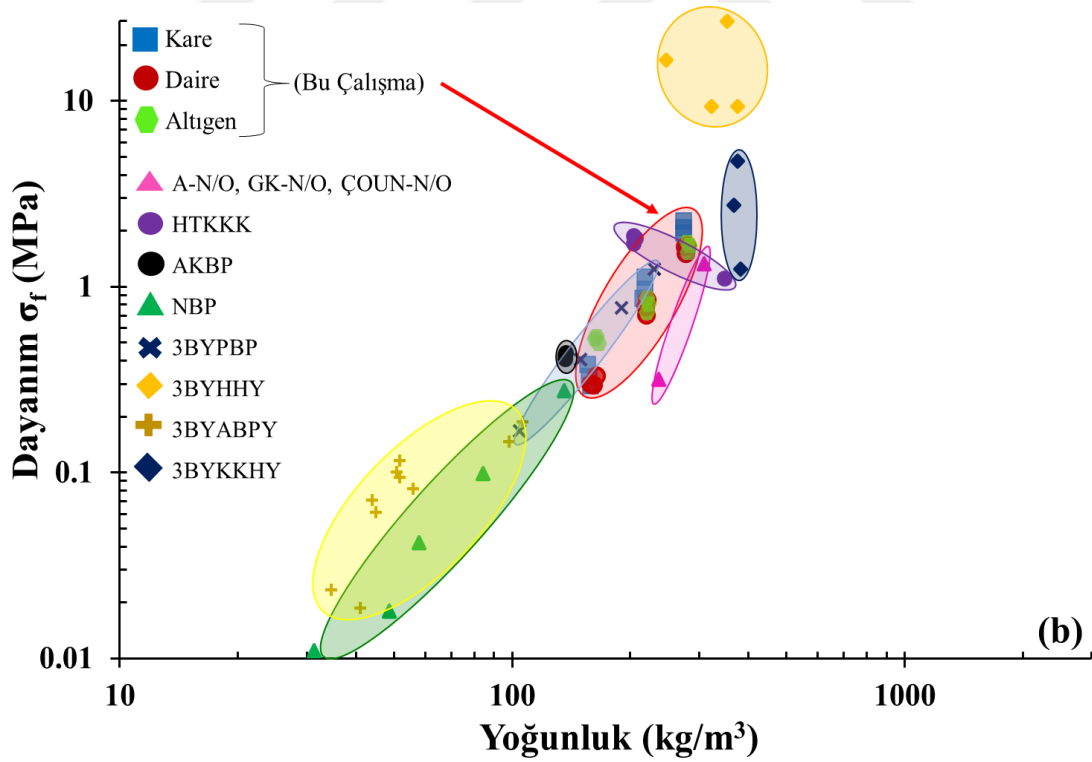
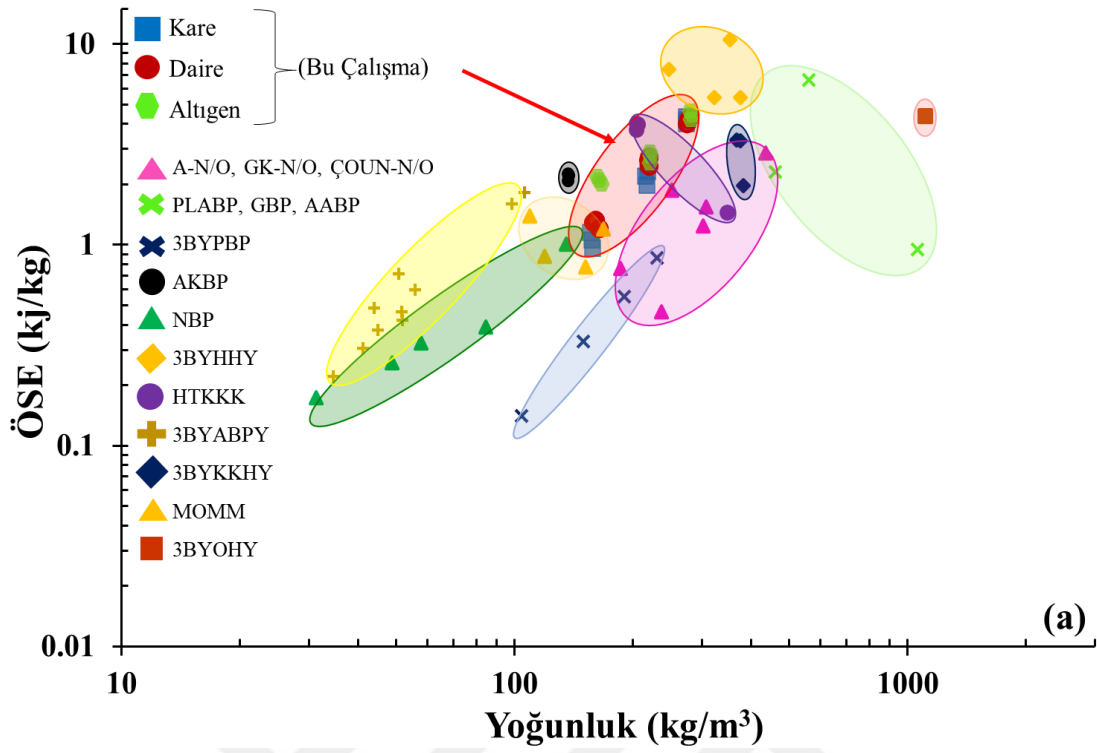
Şekil 3.10. KFTP bal peteği numunelerinin genişleme yönünde düzlem içi basma yüklemesi altında enerji sönümleme performanslarının karşılaştırılması

### 3.3.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücrese yapıların performansı ile karşılaştırılması

KFTP bal peteklerinin genişleme yönünde düzlem içi basma yüklemesi altındaki performansı bu bölümde literatürdeki farklı hücrese yapıların performansı ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11'de, KFTP peteklerin ÖSE ve dayanım değerleri literatürdeki farklı hücrese yapıların değerleri ile birlikte sunulmuştur. Tablo 3.4'te ise Şekil 3.11'de kıyaslanan çalışmalara ait ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Şekil 3.11'den görülebileceği gibi yoğunlukları 155,44–282,84  $kg/m^3$  arasında değişen KFTP bal peteklerinin genişleme yönündeki ezilme performansı ÖSE ve dayanım değerleri açısından literatürdeki birçok alternatif hücrese konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyededir. Bu sonuç, KFTP bal peteklerinin düzlem içi enerji sönümlenme ve dayanıklılık açısından pratik uygulamalarda üstün bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

**Tablo 3.4.** Düzlem içi genişleme yönünde performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları

Sembol	Kısaltmalar	Kısaltmaların Açıklaması	Referans
✕	PLABP GBP AABP	Polilaktik Asit Bal Petekler Güçlendirilmiş Bal Petekler Alüminyum Alaşımılı Bal Petekler	Dou vd. 2022
✕	3BYBPB	3B Yazıcıda Polimerik Bal Petekler	Habib vd. 2017
●	AKBP	Altıgen CFRP Kompozit Bal Petekler	Deng vd. 2024
▲	NBP	Nomex Bal Petekler	Xie vd. 2020
▲	A-N/O GK-N/O ÇOUN-N/O	Altıgen Naylon/Oniks Girintili Köşeli Naylon/Oniks Çift Ok Uçlu Naylon/Oniks	Zhou vd. 2023
◆	3BYHHY	3B Yazıcıda Hibrit Hücrese Yapılar	Ebrahimi vd. 2022
●	HTKKK	Hiyerarşik Termoplastik Kompozit Kare Kafesler	Liua vd. 2019
+	3BYABPY	3B Yazıcıda Altıgen Bal Petek Yapılar	Ragab vd. 2023
◆	3BYKKHY	3B Yazıcıda Kompozit Kemikten Esinlenen Hücrese Yapılar	Ghorbani vd. 2023
▲	MOMM	Miura-ori Origami Tabanlı Meta Malzemeler	Zhang vd. 2019
■	3BYOHY	3B Yazıcıda Origami'den Esinlenen Hücrese Yapılar	Li vd. 2021

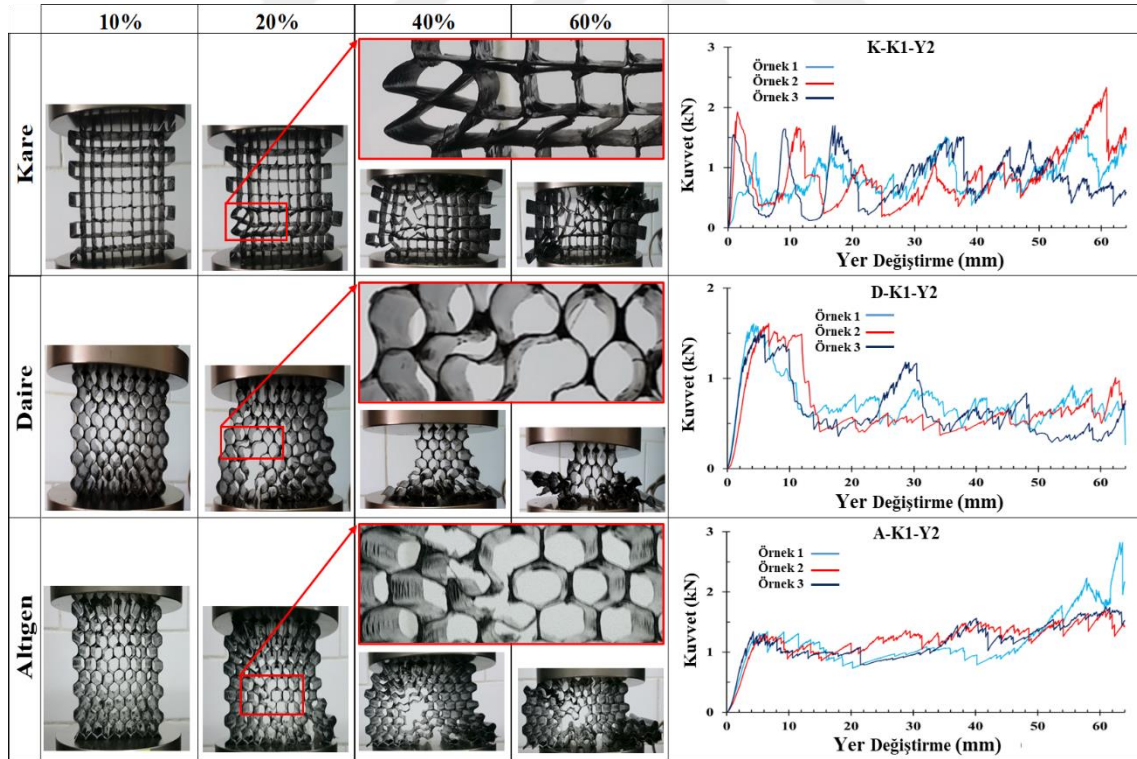


**Şekil 3.11.** Farklı hüresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin genişleme yönündeki enerji sönümleme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri

### 3.4. KFTP Bal Peteği Yapıların Düzlem İçi Boylamsal Yönde Ezilme Davranışlarının İncelenmesi

#### 3.4.1. Deformasyon modlarının incelenmesi

Şekil 3.12 düzlem içi boylamsal yönde düzlem içi basma yüklemesi altında düşük hücre duvarı kalınlığına sahip KFTP bal peteği numunelerinin tipik deformasyon modlarını ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Ayrıca, tüm numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Genişleme yönündeki deney sonuçlarına benzer şekilde, aynı konfigürasyondaki petek numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri benzer trendlere sahip olup, bu durum düzlem içi boylamsal yöndeki deney sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Boylamsal yönde uygulanan basma kuvveti, bal peteklerinin genişleme yönüne dik olduğundan, oluklu levhalar arasındaki bağların kopması, yapıların stabilitesini ve enerji sönmüleme performansını genişleme yönüne kıyasla daha olumsuz yönde etkilemiştir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 incelendiğinde, boylamsal yönde lokalize bant oluşumlarının tipik olarak gözlenmediği ve kuvvet ile gerilme değerlerinin genişleme yönündekilere göre daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. Düzlem içi boylamsal yönde basma yüklemesi altında kare, dairesel ve altıgen hücre geometrilerine sahip KFTP petek numunelerinin tipik deformasyon modları ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Kare, daire ve altıgen bal peteği numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, üç temel aşamanın (doğrusal elastik, plato deformasyonu ve yoğunlaşma) tüm numunelerde gözlemlendiği, ancak bu aşamaların her bir yapının deformasyon modlarına bağlı olarak farklı özellikler sergilediği görülmektedir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, kısa bir doğrusal elastik deformasyon periyodundan sonra kare bal peteklerinin ezilme kuvvetleri ve gerilmeleri, esas olarak hücre duvarlarının yatay yönde burkulması nedeniyle, keskin bir şekilde azalır. Belirli bir deformasyon seviyesinden sonra, çöken hücre duvarlarının birbiri ile temas etmesi kuvvet ve gerilme değerlerinin yeniden artmasına yol açmaktadır. Sonrasında hücre duvarı açılarının değişmesi ve yapının simetrisinin bozulması sonucu petek yapısında uniform olmayan bir ezilme meydana gelmiş ve uniform olmayan yükleme koşulları nedeniyle oluklu levhalar arasındaki bağlarda lokal kopmalar oluşmuştur. Bu aşamada elastik burkulma, plastik eğilme ve hücre duvarlarının gevrek kırılması gibi farklı hasar mekanizmaları baskındır. Bu noktada, kare bal peteklerinin deformasyonu sırasında oluşan bu kararsız kompleks deformasyon modları nedeniyle plato gerilmelerinde büyük dalgalanmalar meydana gelmektedir.

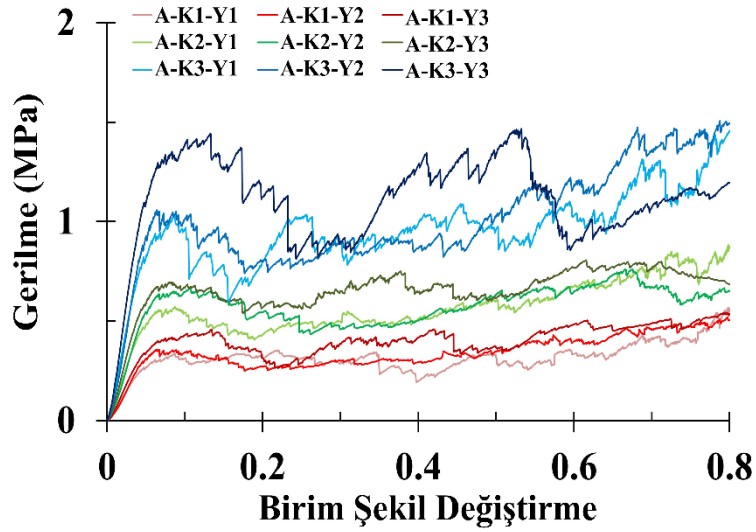
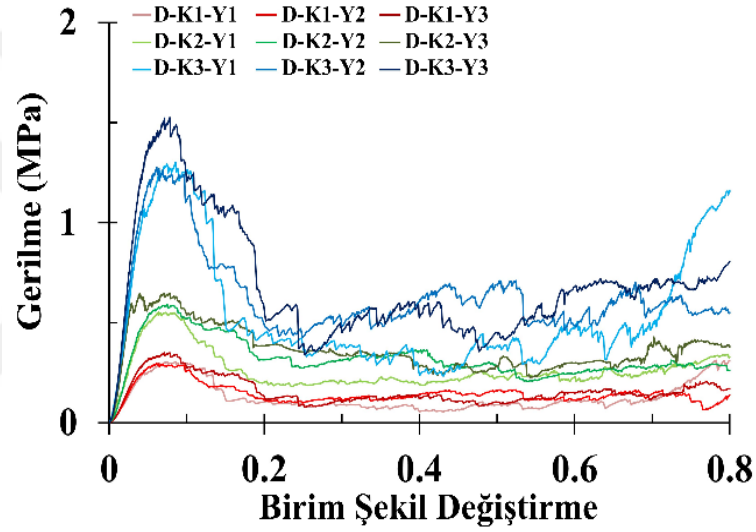
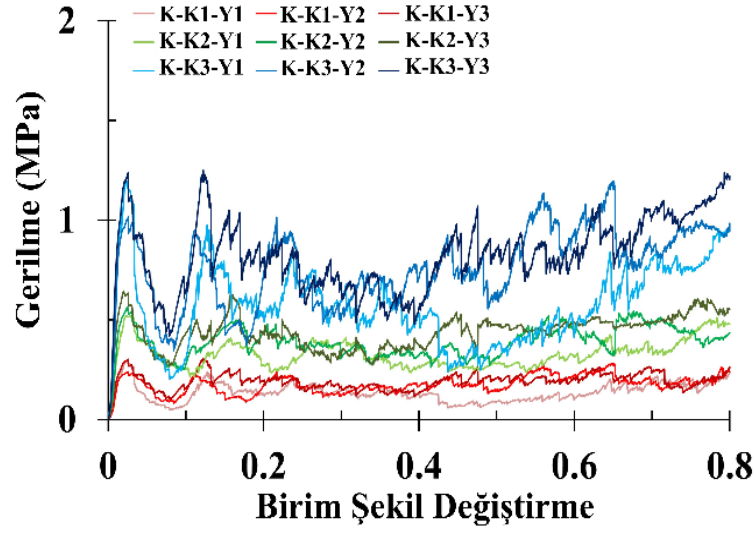
Dairesel bal peteklerinde sınırlı çift kat bağlanma alanları bulunduğundan, kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri kararsız bir ezilme tepkisi göstermiştir. Şöyle ki, belirli bir elastik deformasyondan sonra oluklu levhalar arasındaki bağlar genellikle yükleme yönünde kırılmaya başlamakta ve daha sonraki deformasyon sürecinde oluklu levhaların ayrılması nedeniyle dairesel peteklerin kuvvet ve gerilme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu deformasyon modu dairesel bal peteklerinin boylamsal yöndeki yük taşıma ve enerji sönümlenme kapasitesi dikkate değer oranda sınırlamaktadır.

Geniş çift kat bağ yüzeyleri içeren altıgen peteklerin, yapılarında bazı lokal hasarlar oluşsa bile, güçlü bağ yapıları nedeniyle deformasyon süreci boyunca genel olarak kararlılıklarını korudukları görülmektedir. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi altıgen bal peteklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri başlangıçta hücre duvarlarının elastik eğilmesinden dolayı doğrusal elastik bir bölge göstermektedir. Daha sonra eğik yöndeki lokal hasar nedeniyle gerilme değerleri hafifçe azalır, ardından gerilmenin çoğu konfigürasyonda neredeyse sabit kaldığı bir plato bölgesine ulaşılır. Bu nedenle, altıgen numunelerin boylamsal ve genişleme yönlerindeki ezilme dayanımları diğer topolojilere kıyasla çok daha yakındır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde hücre geometrisi, duvar kalınlığı ve yüksekliğin düzlem içi boylamsal yönde de KFTP peteklerin mekanik davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. Altıgen bal peteği numuneleri, deformasyon sürecinde yapı bütünlüğünü koruyarak boylamsal yönde diğer geometrilere kıyasla daha yüksek plato gerilmesi ve enerji sönümlenme kapasitesi göstermiştir. Bu nedenle, altıgen bal petekleri, benzer ağırlıktaki kare (örn. %47-75 ve 0,69-2,43 J/g) ve dairesel (örn. %42-49 ve 0,63-1,98 J/g) peteklere kıyasla boylamsal yönde önemli ölçüde daha yüksek ezilme kuvveti verimliliğine (örn. %77-95) ve özgül enerji sönümüne (örn. 1,48-3,17 J/g) sahiptir. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, boylamsal yönde tüm peteklerin mukavemeti, hücre duvarı kalınlığı ve yüksekliği arttıkça önemli ölçüde

artmaktadır. Şöyle ki, hücre duvar kalınlığı 0,25 mm'den 0,75 mm'ye çıktığında kare, daire ve altıgen bal peteklerinin dayanım değerlerinde sırasıyla 4,1, 4,3 ve 3,2 kat artış gözlemlenmiştir. Duvar kalınlığı 0,75 mm ve yüksekliği 80 mm olan kare, dairesel ve altıgen petek numunelerin dayanımları sırasıyla 1,24, 1,52 ve 1,44 MPa olarak hesaplanmıştır. Boylamsal yönde hücre yüksekliğindeki değişimin altıgen peteklerin mekanik performansına etkisinin, kare ve daire peteklere göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Boylamsal yönde, genişleme yönüne benzer şekilde en iyi dayanım değerleri hücre yüksekliğinin en-boy oranı 1 olacak şekilde 80 mm'ye çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Burada, altıgen bal peteği numuneler, oluklu levhalar arasında güçlü çift kat bağlama yüzeyleri içerdiğinden, yükseklik arttıkça boylamsal yöndeki kayma dayanımları diğer numunelere göre daha fazla artmaktadır. Örneğin, 0,75 mm duvar kalınlığına sahip altıgen petek yapısının dayanımı, yükseklik 40 mm'den 80 mm'ye (örneğin 1,04'ten 1,44 MPa'la) çıkarıldığında yaklaşık %39 oranında artmaktadır. Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin boylamsal yönde davranışlarının incelenmesi sürecinde elde edilen tüm veriler ayrıca Tablo 3.5'te verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Düzlem içi boylamsal yöne ait mekanik davranış verileri

Boylamsal Yön	Ağırlık Ort. $m(gr)$	TSE Ort. (J)	ÖSE Ort. (J/gr)	OEK Ort. (kN)	MEK Ort. (kN)	EKV (%)	Dayanım $\sigma$ (MPa)	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
K-K1-Y1	40.44	28.07	0.69	0.44	0.93	47.18	0.15	157.97
K-K1-Y2	60.49	54.30	0.90	0.85	1.15	73.59	0.18	157.53
K-K1-Y3	79.77	79.09	0.99	1.24	1.93	63.88	0.30	155.80
K-K2-Y1	55.12	58.43	1.06	0.91	1.91	47.69	0.30	215.31
K-K2-Y2	82.10	115.72	1.41	1.81	2.40	75.33	0.38	213.80
K-K2-Y3	110.89	170.44	1.54	2.66	3.97	67.14	0.62	216.58
K-K3-Y1	68.90	116.91	1.70	1.83	3.83	47.68	0.60	269.14
K-K3-Y2	104.72	234.50	2.24	3.66	4.89	74.93	0.76	272.71
K-K3-Y3	139.31	337.92	2.43	5.28	7.93	66.57	1.24	272.09
D-K1-Y1	41.80	26.46	0.63	0.41	0.98	42.39	0.15	163.28
D-K1-Y2	61.16	44.40	0.73	0.69	1.42	48.83	0.22	159.27
D-K1-Y3	81.75	64.27	0.79	1.00	2.24	44.87	0.35	159.67
D-K2-Y1	55.80	55.17	0.99	0.88	2.05	42.99	0.32	217.97
D-K2-Y2	83.70	94.31	1.13	1.47	3.00	49.08	0.47	217.97
D-K2-Y3	112.54	137.50	1.22	2.15	4.70	45.73	0.73	219.80
D-K3-Y1	70.38	111.56	1.59	1.74	4.16	41.75	0.65	274.93
D-K3-Y2	106.50	193.75	1.82	3.03	6.13	49.43	0.96	277.34
D-K3-Y3	142.38	281.37	1.98	4.40	9.76	45.05	1.52	278.09
A-K1-Y1	42.91	63.72	1.48	0.99	1.08	92.17	0.17	167.63
A-K1-Y2	63.30	104.15	1.65	1.63	1.72	94.83	0.27	164.84
A-K1-Y3	83.78	143.93	1.72	2.25	2.86	78.55	0.45	163.63
A-K2-Y1	56.39	126.73	2.25	1.98	2.17	91.36	0.34	220.29
A-K2-Y2	84.93	206.06	2.43	3.22	3.40	94.76	0.53	221.18
A-K2-Y3	113.26	283.48	2.50	4.43	5.78	76.69	0.90	221.20
A-K3-Y1	72.41	194.40	2.68	3.04	3.32	91.36	0.52	282.84
A-K3-Y2	108.52	308.28	2.84	4.81	5.05	95.32	0.79	282.60
A-K3-Y3	143.07	453.48	3.17	7.09	9.24	76.71	1.44	279.43

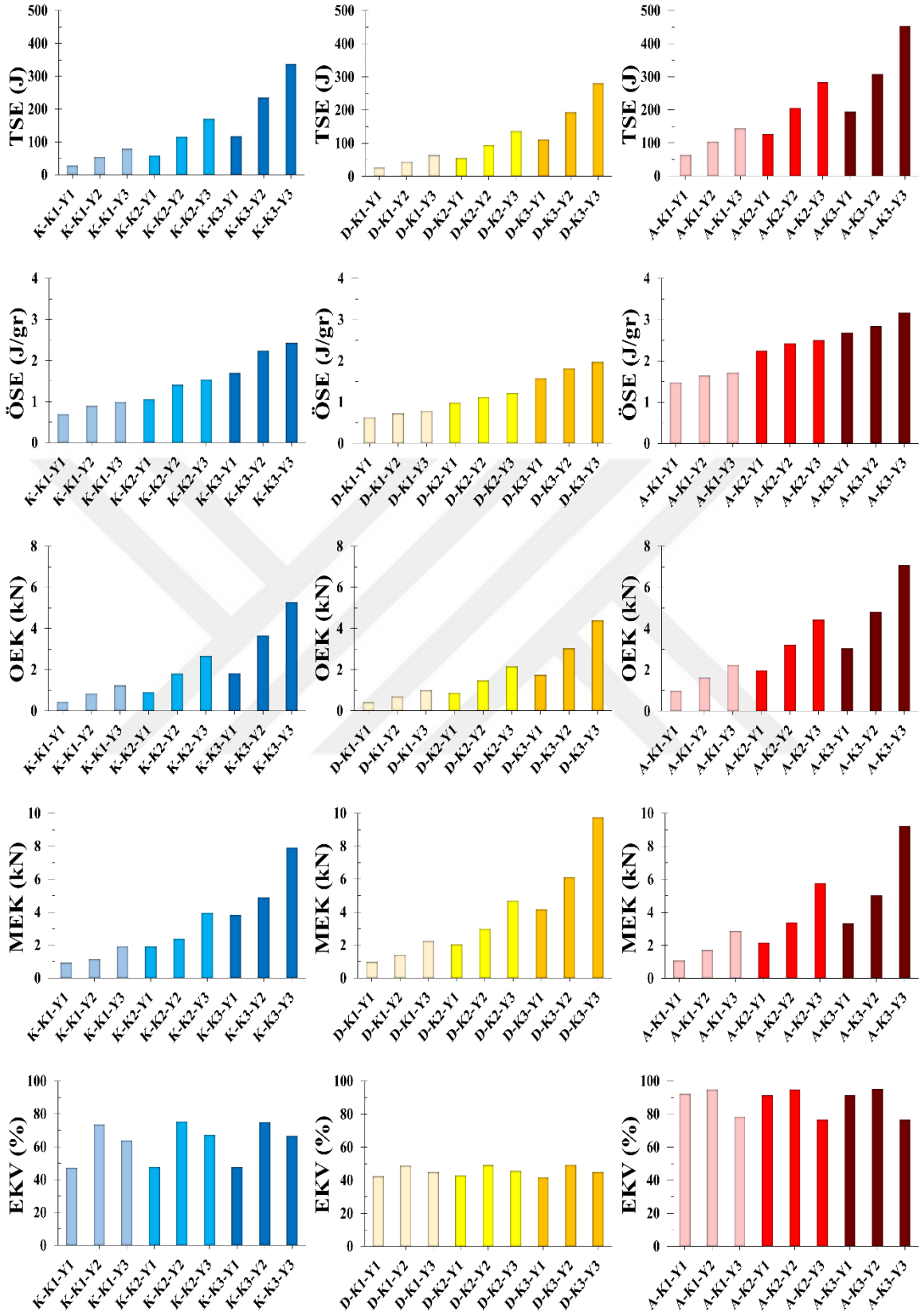


**Şekil 3.13.** Kare, dairesel ve altıgen hücre geometrisine sahip KFTP petek numunelerinin boylamsal yönde düzlem içi basma yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri

### 3.4.2. Enerji sönümlenme parametrelerinin incelenmesi

Düzlem içi boylamsal yönde kompozit bal peteği numunelerinin enerji sönümlenme performans parametrelerinin tasarım değişkenlerine bağlı değişimi Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Performans parametrelerine ait standart sapma değerleri ayrıca Tablo Ek-3'de sunulmuştur. Deney verilerinin standart sapma değerleri küçük olduğundan Şekil 3.14'te sadece enerji sönümlenme performans parametrelerinin ortalama değerleri sunulmuştur.

Şekil 3.14 incelendiğinde, hücre duvar kalınlığı ve yüksekliklerdeki artışların numunelerin dayanımını arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda tüm numunelerin TSE, OEK ve ÖSE değerleri anlamlı düzeyde iyileştirdiği görülmüştür. Bu noktada, duvar kalınlığı üç katına çıkarıldığında, kare, daire ve altıgen peteklerin TSE ve OEK değerlerinin sırasıyla 4,3, 4,4 ve 3,2 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, duvar kalınlığı 0,25 mm'den 0,75 mm'ye yükseldiğinde kare, daire ve altıgen bal peteklerinin ÖSE değerlerinde sırasıyla 2,5, 2,5 ve 1,8 kata kadar artış gözlenmiştir. Öte yandan, aynı et kalınlığına sahip numunelerin ÖSE değerleri, hücre yüksekliğinin artmasıyla %45'e kadar yükselmektedir. Altıgen petekler, tüm kalınlık ve yükseklik değerleri için boylamsal yönde kare ve daire numunelere kıyasla önemli ölçüde yüksek enerji sönümlenme performansı sergilemiştir. Şöyle ki, altıgen numunelerin ÖSE değerlerinin yaklaşık aynı ağırlığa sahip daire ve kare numunelere kıyasla sırasıyla %134 ve %113 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak ÖSE verileri incelendiğinde, daire numunelerin en düşük, altıgen numunelerin ise en yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. MEK değerleri incelendiğinde, hücre duvar kalınlığı ve yüksekliğinin artmasıyla MEK değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere kare numunelerin MEK değerleri, altıgen ve daire numunelere kıyasla daha düşük seviyededir. Bu nedenle, altıgen ve daire KFTP numuneler, basma deneyi sırasında daha yüksek burkulma dayanımı sergileyerek yapısal bütünlüklerini daha iyi korumuşlardır. EKV değerlerinin yüksekliği, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin stabil davranış gösterdiğini, dolayısıyla yapının iyi bir yük taşıma performansı gösterdiğini ifade etmektedir. Bu bağlamda, altıgen numunelerin EKV değerleri, stabil yük taşıma kapasiteleri nedeniyle tüm kalınlık ve yükseklik değerlerinde boylamsal yönde kare ve daire numunelerden anlamlı derecede daha yüksektir. Bu noktada, altıgen numunelerin EKV değerlerinin yaklaşık aynı ağırlığa sahip daire ve kare numunelere kıyasla sırasıyla %117 ve %95'e varan oranlarda daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



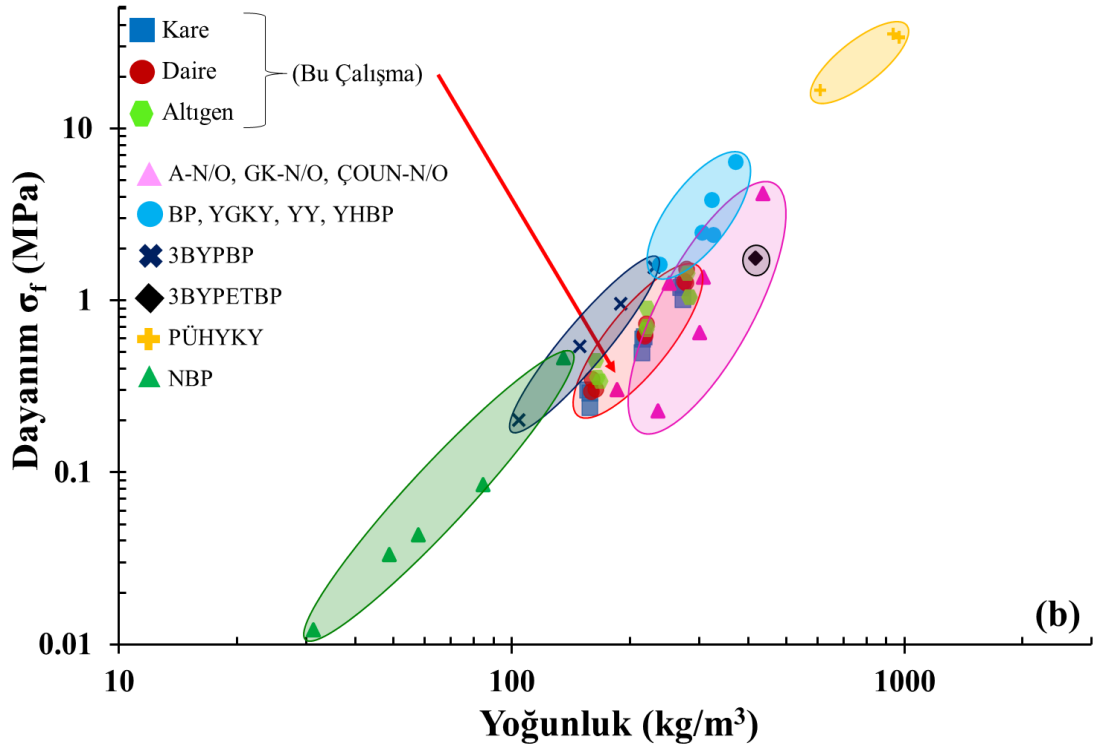
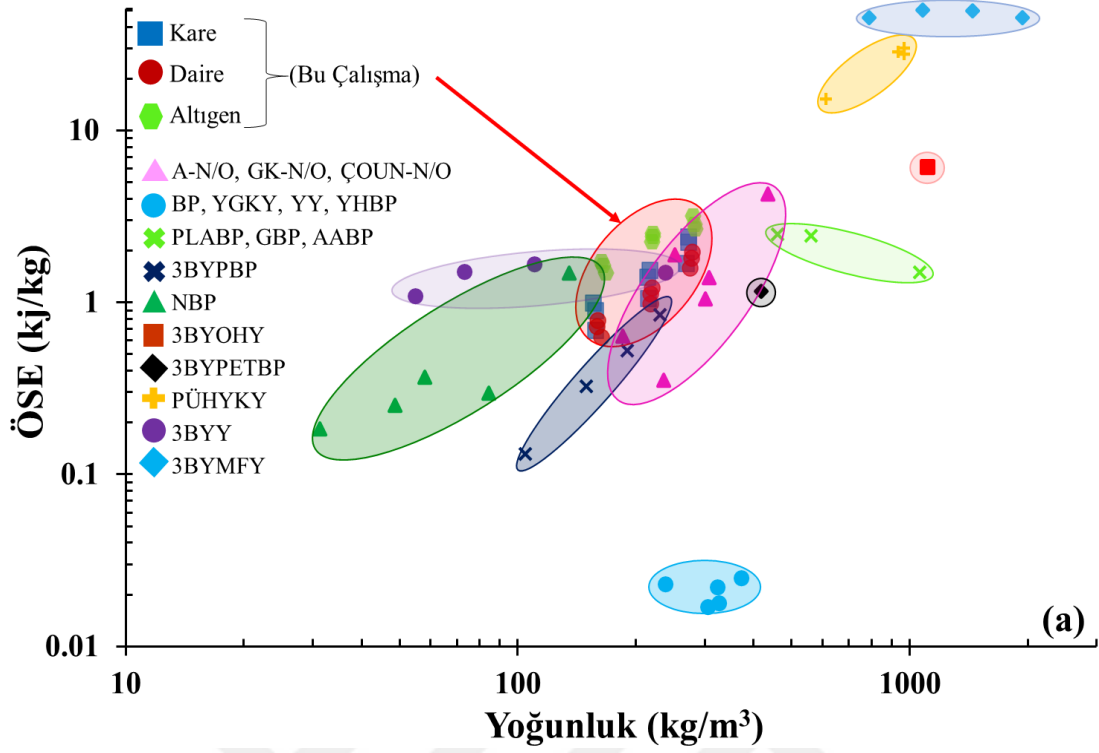
**Şekil 3.14.** KFTP bal peteği numunelerinin boylamsal yönde düzlem içi basma yüklemesi altında enerji sönümleme performanslarının karşılaştırılması

### 3.4.3. KFTP bal peteği yapıların performansının literatürdeki çeşitli hücresele yapıların performansı ile karşılaştırılması

Bu bölümde altıgen, daire ve kare KFTP bal peteği numuneler için boylamsal yöndeki basma deneylerinden elde edilen sonuçlar, özgül enerji sönümleme-yoğunluk ve dayanım-yoğunluk grafiklerinde literatürdeki diğer çalışmalardaki verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 3.15'te, KFTP bal peteklerinin ÖSE ve dayanım değerleri literatürdeki farklı hücresele yapıların değerleri ile birlikte sunulmuştur. Tablo 3.6'da ise Şekil 3.15'te kıyaslanan çalışmalara ait ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Şekil 3.15'ten görülebileceği gibi KFTP bal peteklerinin boylamsal yöndeki ezilme performansı ÖSE ve dayanım değerleri açısından literatürdeki birçok alternatif hücresele konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyededir. Boylamsal doğrultuda elde edilen bu sonuçlar, KFTP bal peteklerinin düzlem içi enerji sönümleme ve dayanıklılık açısından pratik uygulamalarda iyi bir alternatif seçenekele olabileceğini göstermektedir.

**Tablo 3.6.** Düzlem içi boylamsal yöndeki performans karşılaştırması amacıyla dikkate alınan literatür çalışmaları

Sembol	Kısaltmalar	Kısaltmaların Açıklaması	Referans
✘	PLABP GBP AABP	Polilaktik Asit Bal Petekler Güçlendirilmiş Bal Petekler Alüminyum Alaşımılı Bal Petekler	Dou vd. 2022
✘	3BYBPB	3B Yazıcıda Polimerik Bal Petekler	Habib vd. 2017
▲	NBP	Nomex Bal Petekler	Xie vd. 2020
▲	A-N/O GK-N/O ÇOUN-N/O	Altıgen Naylon/Oniks Girintili Köşeli Naylon/Oniks Çift Ok Uçlu Naylon/Oniks	Zhou vd. 2023
■	3BYOHY	3B Yazıcıda Origami'den Esinlenilen Hücresele Yapılar	Li vd. 2021
●	BP YGKY YY YHBP	Bal Peteği Yardımcı Girintili Köşeli Yapılar Yardımcı Yapılar Yardımcı Hibrit Bal Petekleri	Ingrole vd. 2017
◆	3BYPETBP	3B Yazıcıda PET-G Bal Petekleri	Vazquez vd. 2021
+	PÜHYKY	Periyodik Üçlü Hibrit Yüzey Kafes Yapıları	Zhang vd. 2024
●	3BYYY	3B Yazıcıda Yardımcı Yapılar	Bohara vd. 2023
◆	3BYMFY	3B Yazıcıda Menger Fraktal Yapılar	Bogahawaththa vd. 2024



Şekil 3.15. Farklı hüresel konfigürasyonlara sahip KFTP bal peteklerinin boylamsal yöndeki enerji sönümlenme ve dayanım performanslarının farklı yapılarla karşılaştırılması  
a) ÖSE-yoğunluk ve b) dayanım-yoğunluk grafikleri

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozit malzemeden yüksek özgül dayanıma ve enerji sönümlenme performansına sahip bal peteği yapıların tasarım, üretim ve testlerine odaklanılmış olup, bu yapıların çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak mekanik ve enerji sönümlenme davranışları deneysel olarak detaylı bir biçimde incelenmiş ve potansiyelleri literatürde ki farklı yapılar ile karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Hücre topolojisinin bal peteği yapıların mekanik davranışlarına etkilerinin incelenmesi bağlamında tasarımlarda kare, daire ve altıgen olmak üzere üç farklı çekirdek topolojisi dikkate alınmış olup, duvar kalınlığı ve yükseklik parametrelerinin yapıların mekanik davranışlarına etkileri her bir parametrenin üç farklı değeri için incelenmiştir. Tasarlanan bal peteği yapıların mekanik davranışları ve enerji sönümlenme özellikleri hem düzlem içi hem de düzlem dışı sanki-statik yüklemeler altında incelenmiştir. Bu bağlamda, dayanım, toplam sönümlenen enerji, özgül sönümlenen enerji, ortalama ezilme kuvveti, maksimum ezilme kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliği gibi kriterler yapıların performansının incelenmesinde dikkate alınmıştır. KFTP kompozit bal peteği yapıların düzlem içi ve düzlem dışı mekanik davranışları ile enerji sönümlenme özellikleri ile ilgili elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükleme durumunda elde edilen sonuçlar hücre geometrisi, duvar kalınlığı ve yüksekliğinin basma yüklemesi sırasında bal peteği yapıların mekanik davranışlarını ve dolayısıyla enerji sönümlenme performanslarını ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Düzlem dışı yükleme durumunda hasarların genellikle kompozit levhaların yerel burkulmaları ve çatlakların oluşmasıyla başladığı ve gevrek bir tarzda olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu yükleme durumunda KFTP kompozit bal peteği yapıların kademeli şekilde deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Düzlem dışı yükleme durumunda altıgen numune gruplarının kuvvet ve gerilme değerlerinin genellikle kare ve dairesel numunelerden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu noktada, altıgen numuneler kare ve dairesel numunelerden farklı olarak çok sayıda çift kat bağlanma yüzeyi içerdiklerinden dolayı stabiliteyi tüm deformasyon sürecinde koruyabildikleri gözlemlenmiştir. Düzlem dışı yükleme durumunda elde edilen sonuçlar hücre kalınlığındaki artışın yapıların burkulma dayanımı ve eğilme rijitliğini artırarak yük taşıma kapasitelerini dikkate değer mertebede iyileştirdiğini göstermiştir. Öte yandan, çekirdek yüksekliğinin bal peteği yapıların ezilme davranışına etkisinin kalınlık ile kıyaslandığında daha düşük mertebede olduğu görülmüştür. Ancak, sonuçlar hücre yüksekliğindeki artışın oluklu levhalar arasındaki toplam bağlanma yüzey alanlarını artırarak, yüksek bağlanma yüzey alanına sahip altıgen hücre geometrilili bal peteği yapıların kayma dayanımı ile burkulma ve eğilme dayanımını önemli oranda iyileştirdiği göstermiştir. Bu bağlamda, 0,75 mm kalınlık ve 80 mm yükseklik ölçülerine sahip altıgen geometrilili bal peteği çekirdek, diğer deney gruplarıyla karşılaştırıldığında en iyi basma dayanım performansını sergilemiştir. Diğer taraftan, düzlem

dışı yükleme durumunda tüm numunelerin TSE ve ÖSE değerleri, hücre duvarı kalınlığında ki artışla birlikte dikkate değer mertebede artmıştır. Bu noktada sonuçlar duvar kalınlığının 3 kat arttırılmasıyla KFTP bal peteği yapıların ÖSE değerlerinin 5 kattan fazla arttırılabileceğini göstermiştir. Düzlem dışı yükleme durumunda altıgen numuneler en yüksek, kare numunelerin ise en düşük ÖSE performansı sergilemişlerdir. Bu noktada, altıgen numunelerin ÖSE değerinin, aynı ağırlıktaki dairesel numunelerden %45 ve kare numunelerden %130'a kadar yüksek olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, düzlem dışı yükleme durumunda altıgen numunelerin tüm kalınlık aralığı için en yüksek EKV değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlar, yoğunlukları  $156,28-282,05 \text{ kg/m}^3$  arasında değişen KFTP bal peteklerinin düzlem dışı ezilme performansının ÖSE ve dayanım değerleri ( $16,59-161,73 \text{ J/gr}$  ve  $5,25-61,08 \text{ MPa}$ ) açısından literatürdeki birçok alternatif hücresel konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyede olduğunu ortaya koymuştur.

Düzlem içi genişleme yönünde yükleme durumunda elde edilen sonuçlar, düzlem dışı yükleme durumuna benzer şekilde altıgen bal peteklerinin oldukça yüksek bir ezilme kuvveti verimliliğine sahip olduklarını ve dolayısıyla kararlı yük taşıma kapasiteleri nedeniyle genişleme yönünde oldukça etkili bir enerji sönümlenme performansı sergileyebildiklerini göstermiştir. Düzlem içi genişleme yönünde altıgen ve dairesel bal peteklerinin tüm tasarım parametreleri için tüm deformasyon süreci boyunca kararlılıklarını neredeyse korudukları, kare bal peteklerinin ise özellikle yüksek kalınlık değerlerinde kararsız bir hasar modu sergilediği görülmüştür. Hücre duvar kalınlığının veya yapıların yoğunluğunun artmasının bu yönde yapıların dayanımını dikkate değer seviyede iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu noktada, sonuçlar yapıların yoğunluğunun yaklaşık 1,75 kat artmasının dayanımı 6,1 kata kadar artırabileceğini göstermiştir. Düzlem içi genişleme yönünde en yüksek dayanım değerleri ve daha uniform ve kararlı deformasyon davranışı tipik olarak en boy oranı 1 olan numunelerde elde edilmiştir. Bu noktada, numune yüksekliğin 2 katına çıkarılmasının dayanımı yaklaşık %20 oranında artırabileceği görülmüştür. Düzlem içi genişleme yönünde duvar kalınlığının artmasıyla tüm numunelerde TSE, ÖSE ve OEK değerleri önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu noktada, duvar kalınlığı 3 katına çıkarılmasıyla kare, daire ve altıgen bal peteklerinin bu değerlerinin sırasıyla 7,3, 5,7 ve 3,6 kata kadar arttırılabileceği gözlemlenmiştir. Sonuçlar ayrıca özellikle düşük kalınlık değerlerinde altıgen petek numunelerin kare ve daire petek numunelere kıyasla daha yüksek enerji sönümlenme performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Diğer taraftan, daire ve altıgen bal peteklerinin kararlı yük taşıma kapasiteleri ve yüksek plato kuvveti verimlilikleri sayesinde EKV değerleri %97 oranına ulaştığı, kare numunelerde ise bu değer kararsız deformasyon davranışları nedeniyle maksimum %77'ye ulaşabildiği görülmüştür. Düzlem dışı yükleme performansına benzer şekilde, elde edilen sonuçlar KFTP bal peteklerinin genişleme yönündeki ezilme performansının ÖSE ve dayanım değerleri açısından literatürdeki birçok alternatif hücresel konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyede olduğunu göstermiştir.

Düzlem içi boylamsal yönde yükleme durumunda elde edilen sonuçlar, altıgen bal peteği numunelerin deformasyon sürecinde yapı bütünlüklerini koruduklarını ve bu yönde diğer geometrilere kıyasla daha yüksek plato gerilmesi ve enerji sönümlene kapasitesine sahip olduklarını göstermiştir. Düzlem içi boylamsal yönde de tüm peteklerin mukavemetinin, hücre duvarı kalınlığı ve yüksekliği arttıkça önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu noktada, hücre duvar kalınlığı 3 kat artmasının kare, daire ve altıgen bal peteklerinin dayanım değerlerini sırasıyla 4,1, 4,3 ve 3,2 kat arttırdığı görülmüştür. Boylamsal yönde, genişleme yönüne benzer şekilde en iyi dayanım değerleri hücre yüksekliğinin en-boy oranı 1 olacak şekilde 80 mm'ye çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Boylamsal yönde de hücre duvar kalınlığındaki artışın numunelerin dayanımını arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda tüm numunelerin TSE, OEK ve ÖSE değerleri anlamlı düzeyde iyileştirdiği görülmüştür. Bu noktada, duvar kalınlığı 3 katına çıkarıldığında, kare, daire ve altıgen peteklerin TSE ve OEK değerlerinin sırasıyla 4,3, 4,4 ve 3,2 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Genel olarak ÖSE verileri incelendiğinde, boylamsal yönde yüklemede daire numunelerin en düşük, altıgen numunelerin ise en yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Öte yandan, altıgen numunelerin EKV değerlerinin, stabil yük taşıma kapasiteleri nedeniyle tüm kalınlık ve yükseklik değerlerinde boylamsal yönde kare ve daire numunelerden oldukça yüksek olduğu (%117 varan oranda) tespit edilmiştir. Diğer yükleme yönlerindeki performanslara benzer şekilde, elde edilen sonuçlar KFTP bal peteklerinin boylamsal yöndeki ezilme performansının ÖSE ve dayanım değerleri açısından literatürdeki birçok alternatif hücresel konfigürasyondan daha iyi veya rekabet edebilir seviyede olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışması kapsamında her ne kadar çok sayıda tasarım parametresi dikkate alınarak kapsamlı deneysel çalışmalar yürütülsede, gelecekte farklı başlıklarda çalışmalar gerçekleştirilerek önerilen kompozit bal peteği yapıların mekanik performansları daha ileri seviyelerde iyileştirilebilir. Bu bağlamda,

- Bu çalışmadan elde edilen veriler temel alınarak sonlu elemanlar modelleri geliştirilip, daha fazla tasarım parametresinin göz önüne alınarak kapsamlı optimizasyon çalışmaları yapılabilir.
- Bu çalışmada yalnızca  $[0/90]_n$  istifleme düzeni dikkate alınmış olup, farklı istifleme düzenleri ve elyaf yönelimlerinin kullanılmasıyla KFTP peteklerin ezilme performansları iyileştirilebilir.
- Oluklu levhaların birleştirilmesinde farklı birleştirme stratejileri dikkate alınarak petek yapısının mekanik performansı iyileştirilebilir.
- Çok daha fazla tasarım parametresi dikkate alınarak yapıların performansına etkileri incelenebilir. Bu noktada, örneğin kare bal peteği tasarımlarında, altıgen peteklere benzer yarım kare oluklu levha tasarımı kullanılıp bu yapının performansı iyileştirilebilir.

## KAYNAKÇA

- Ahmad, S., Zhang, J., Feng, P., Yu, D., Wu, Z. ve Ke, M. (2020). Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review. *Composite Structures*, 250, 112545.
- Al-Khazraji, M. S., Bakhy, S. H., & Jweeg, M. J. (2024). Composite sandwich structures: review of manufacturing techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 22(5), 1616-1636.
- Alia, R. A., Al-Ali, O., Kumar, S. ve Cantwell, W. J. (2018). The energy-absorbing characteristics of carbon fiber-reinforced epoxy honeycomb structures. *Journal of Composite Materials*, 53(9), 1145-1157.
- Alia, R. A., Zhou, J., Guan, Z. W., Qin, Q., Duan, Y. ve Cantwell, W. J. (2020). The effect of loading rate on the compression properties of carbon fibre-reinforced epoxy honeycomb structures. *Journal of Composite Materials*, 54(19), 2565-2576.
- Alomarah, A., Masood, S.H. ve Ruan, D. (2020). Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures. *Aerospace Science and Technology Volume 106*, 106-107.
- Arbaoui, J., Schmitt, Y., Pierrot, J.L. ve Royer, F.X. (2014). Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures. *Archives of Metallurgy and Materials*, (59):11-16
- Arbaoui, J., Moustabchir, H., Pruncu, C.I. ve Schmitt, Y., (2016). Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. (00): 1–19
- Arslan, N. ve Kaman, M.O., (2000). Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması DEÜ mühendislik fakültesi fen ve Mühendislik dergisi Cilt:4, Sayı:3, Sh.113-123 Ekim
- Asadi, M., Shirvani, H., Sanaei, E. ve Ashmead, M., (2006). A simplified model to simulate crash behavior of honeycomb, proceedings of the international conference on advanced Design and manufacture, 8th-10th January Harbin, China, p.119- 123
- Ashby, M.F. ve Brechet, Y.J.M., (2003). Designing hybrid materials, *Acta Materialia* 51 5801–5821
- Balaji. G ve Annamalaj, K. (2018). Crushing response of square aluminium column filled with carbon fibre tubes and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Structures* 132 667–681.
- Basurto-Vázquez, O., Sánchez-Rodríguez, E.P., McShane, G.J., Medina, D.I. (2021). Load Distribution on PET-G 3D Prints of Honeycomb Cellular Structures under Compression Load. *Polymers* 2021, 13 (12),1983.
- Beihaicomposite 2024. Alüminyum Köpük. Erişim tarihi: 15.12.2024  
<https://www.beihaicomposite.com/tr/spherical-aluminum-foam-electromagnetic-shielding-filter-material-product/>
- Birman, V., Kardomatea, G.A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Compos B Eng* 142:221–40.

- Bogahawaththa, M., Mohotti, D., Hazell, P. J. ve Lee C. K. (2024). Energy absorption and mechanical performance of 3D printed Menger fractal structures. *Engineering Structures*, 305,117774.
- Bohara, R.P., Linforth, S., Thai, H.T. ve Ngo, T. (2023). Experimental, numerical, and theoretical crushing behaviour of an innovative auxetic structure fabricated through 3D printing. *Thin-Walled Structures*, 182, 110209.
- Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004.
- Chandrasekaran, N. K., ve Arunachalam, V. (2021). State-of-the-art review on honeycomb sandwich composite structures with an emphasis on filler materials. *Polymer Composites*, 42(10), 5011-5020.
- Chen, H., Liu, X., Zhang, Y., Xiao, C., Zhang T. ve Zhang Y. (2023). Numerical investigation of the compressive behavior of 2.5D woven carbon-fiber (2.5D-KFTP) honeycomb and experimental validation. *Composite Structures* 312 116858.
- Chen Y, Li T, Jia Z ve Wang, L. (2018). 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Mater Des*; 137:226–34.
- Chen, X., Yu, G. Wang, Z., Feng, L. ve Wu, L. (2021). Enhancing out-of-plane compressive performance of carbon fiber composite honeycombs. *Composite Structures* 255 112984.
- Cheng, L., Si, Y., Ji, Z., Xu, J., Dong, J., He, Z. ve Zheng, X. (2023). A novel linear gradient carbon fiber array integrated square honeycomb structure with electromagnetic wave absorption and enhanced mechanical performances. *Composite Structures*, 305, 116510.
- Cote, F., Deshpande, V.S. ve Fleck, N.A., (2006). The shear response of metallic square honeycombs, *Journal Of Mechanics Of Materials And Structures* Vol. 1, No. 7.
- Cote, F., Russell, B.P., Deshpande, V.S. ve Fleck, N.A., (2009). The through-thickness compressive strength of a composite sandwich panel with a hierarchical square honeycomb sandwich core, *Journal of Applied Mechanics* November Vol. 76 / 061004-1
- Davalos, J. F., Qiao, P., Ramayanam, V., Shan, L. ve Robinson, J., (2009). Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration, *Composite Structures*, 88, 97–111,
- Deng, Y., Hu, X., Yang, X., Yu, H. ve Zheng, Y. (2024). Quasi-static compressive response and energy absorption mechanism of all-KFTP honeycomb core using digital image correlation (DIC). *Thin-Walled Structures*, 198.
- Dong, L., Wadley, H. (2015). Mechanical properties of carbon fiber composite octet-truss lattice structures. *Compos Sci Technol* 119:26–33.
- Dou, H., Ye, W., Zhang, D., Cheng, Y., Huang, K., Yang, F. ve Rudykh, S. (2021). Research on drop-weight impact of continuous carbon fiber reinforced 3D printed honeycomb structure. *Materials Today Communications*, 29, 102869.

- Dou, H., Ye, W., Zhang, D., Cheng, Y., Wu, C. (2022). Comparative study on in-plane compression properties of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composite honeycomb and aluminum alloy honeycomb, *Thin-Walled Struct.* 176, 109335.
- Duan S, Tao Y, Lei H, Wen, W., Liang, J. ve Fang, D. (2018). Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges. *Extreme Mech Lett*; 18:9–18.
- Dupont, 2024. Nomex. Erişim tarihi: 15.12.2024. <https://www.dupont.com.tr/brands/nomex.html>.
- Ebrahimi, M.S., Hashemi, R. ve Etemadi, E. (2022). In-plane energy absorption characteristics and mechanical properties of 3D printed novel hybrid cellular structures. *journal of materials research and technology*, 20, 3616-3632.
- Fan H, Luo Y, Yang F ve Li, W. (2018). Approaching perfect energy absorption through structural hierarchy. *Int J Eng Sci*; 130:12–32.
- Feng L. J, Yang ZT, Yu GC, Chen, X.J. ve Wu. L.Z. (2018). Compressive and shear properties of carbon fiber composite square honeycombs with optimized high-modulus hierarchical phases. *Compos Struct*; 201:845–56.
- Fiedler, T. ve Ochsner, A. (2008). Experimental analysis of the flexural properties of sandwich panels with cellular core materials. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39(2), 121,124.
- Finnegan, K., Kooistra, G., Wadley, H.N., Deshpande V.S. (2007). The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores. *Int J Mater Res* 98(12):1264–72.
- Flora, F., Pinto, F. ve Meo, M. (2022). Manufacturing and characterisation of a new thermal pre-stressed carbon fibre-reinforced lattice core for sandwich panels. *Journal of Composite Materials Vol.* 56(8) 1233–1254.
- Foo, C. C., Chai, G. B. ve Seah, L. K. (2007). Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure. *Composite structures*, 80(4), 588-594.
- Gao, Z., Xia, F., Li, J. ve Ruan, L. (2023). Axial compression of multi-cell hexagonal tubes with novel hierarchical architectures: Numerical and theoretical analyses. *Composite Structures* 318, 117079
- Ge, Y., Xue, J., Liu, L., Wan, H. ve Yang, Y. (2024). Advances in multiple assembly acoustic structural design strategies for honeycomb composites: A review. *Materials Today Communications* 38, 108013.
- George, T., Deshpande, V.S., Wadley, H.N. (2013). Mechanical response of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores. *Compos Appl Sci Manuf* 47:31–40.
- Ghaedizadeh A, Shen J, Ren X ve Xie, Y.M. (2016). Tuning the performance of metallic auxetic metamaterials by using buckling and plasticity. *Materials*; 9(1):54.
- Ghate, N. ve Goel, M. D. (2023). Influence of core topology on blast mitigation application of multi-layered honeycomb core sandwich panel. *Materials Today Communications*, 106531.

- Ghorbani, F., Gharehbaghi, H., Farrokhhabadi, A. ve Hedayati, S.K. (2023). Investigation of energy absorption performances of a 3D printed fiber-reinforced bio-inspired cellular structure under in-plane compression loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- Gpoichand, A., Mohanrao, R., Sankar, N. V. S., Balaji, G.R. ve Kumar, P.S. (2013). Design and analysis of copper honeycomb sandwich structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(4):635-638
- Guo, H., Yuan, H., Zhang, J., & Ruan, D. (2024). Review of sandwich structures under impact loadings: experimental, numerical and theoretical analysis. *Thin-Walled Structures*, 196, 111541.
- Habib, F. N., Iovenitti, P., Masood, S. H. ve Nikzad, M. (2018). Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 2369-2380.
- Han, B., Zhang, Z.J., Zhang, Q.C., Zhang, Q, Lu, T.J., Lu, B.H. (2017). Recent advances in hybrid lattice-cored sandwiches for enhanced multifunctional performance. *Extr Mech Lett* 10:58–69.
- Han, J., Chen, H., Xu, X., Li, Z., Chen, Q., Gu, H. ve Gu, Z. (2023). Mechanical characterization of a novel gradient thinning triangular honeycomb. *Thin-Walled Structures*, 188, 110862.
- Haxcore, 2024. 3003 Alüminyum petek çekirdek. Erişim tarihi: 15.12.2024. <http://tr.haxhoneycombcore.com/honeycomb-core/aluminum-honeycomb/3003-aluminum-honeycomb-core.html>.
- Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam M. ve Zadpoor AA. (2016). Mechanical properties of additively manufactured octagonal honeycombs. *Mater Sci Eng, C*; 69:1307–17.
- Hosen, A., Hossain, M. F., Rana, M. S. ve Ferdous, M.S. (2023). Investigation of flexural strength of jute fiber based circular type honeycomb sandwich panel: An experimental and numerical approach. *Results in Materials* 19 100423.
- Huang, H., Zhang Y., Li, K., Tan, Y. ve Kong, H. (2023), Crushing resistance tailoring of honeycomb material via vertex-derivative strategy. *Thin-Walled Structures*, 182 110145.
- Huang, W., Zhang, Y., Zhou, J., Jiang, F. ve Liu, R. (2023). Long-lasting, stabilized, high-efficient multi-crushing properties of honeycomb strengthened by face-centered hierarchical strategy. *College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, China*.
- Ingrole, A., Hao, A. ve Liang, R. (2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Materials & Design* Volume 117, 72-83.
- Isaac, C.W., Sokolowski, A., Duddeck, F. ve Aremu, A. (2023). Mechanical characterisation and crashworthiness performance of additively manufactured polymerbased honeycomb structures under in-plane quasi-static loading. *Virtual and Physical Prototyping*, vol.18, no.1.
- ISO-527-2. *Plastics: Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*, 1996.

ISO 527-4, Plastics: Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre reinforced plastic composites –1997c

ISO 178, Plastics: Determination of flexural properties, 2010

Ivanez, I., Fernandez-Cañadas, L. M. ve Sanchez-Saez, S. (2017). Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core. *Composite Structures*, 174, 123-133.

Jiuding New Material,2020. Pultrusion teknolojisi nedir? Erişim tarihi: 15.12.2024. <https://tr.jiudingfrp.com/news/what-is-pultrusion-technology-39115214.html>.

Jiuding material,2024. Hafif reçine transfer kalıplama (LRTM). Erişim tarihi: 15.12.2024. <http://tr.jiudingmaterial.com/light-resin-transfer-molding-lrtm-product/>.

Jloncomposite 2024. PVC köpük. Erişim tarihi: 15.12.2024. <https://www.jloncomposite.com/tr/what-is-pvc-foam-core.html>

Joseh, A., Mahesh, V. ve Mahesh V. (2021). Effect of loading rates on the in-plane compressive properties of additively manufactured ABS and PLA-based hexagonal honeycomb structures. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 1–22.

Khan, M. K., Baig, T. ve Mirza, S. (2012). Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Materials Science and Engineering: A*, 539, 135-142.

Khan, T., Aziz, A.R., Irfan, M.S., Cantwell, W.J. ve Umer, R. (2022). Energy absorption in carbon fiber honeycomb structures manufactured using a liquid thermoplastic resin. *Journal of Composite Materials* Vol. 56(9) 1335–1348.

Kondratiev, A., Piştek, V., Gajdachuk, V., Kharchenko, M., Nabokina, T., Kuçera, P., Kuçera, O. (2023). Effect of ply orientation on the mechanical performance of carbon fibre honeycomb cores, *Polymers (Basel)* 15 (11), 2503.

Khoshravan, M. R. ve Pour, M. N., (2014). Numerical and experimental analyses of the effect of different geometrical modelings on predicting compressive strength of honeycomb core, *Thin-Walled Structures*, 84, 423-431

Kompozitsan 2018. Epoksi Reçineler ve Sertleştiriciler. Erişim tarihi 04.07.2018. <https://kompozitsan.com/tr/48-epoksi-re%C3%A7ineler>.

Li, C., Lei, H., Liu, Y., Zhang, X., Xiong, J. ve Zhou, H. (2018). Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 145 389-399

Li, S., Liu, Z., Shim, V. P. W., Guo, Y., Sun, Z., Li, X. ve Wang, Z. (2020). In-plane compression of 3D-printed self-similar hierarchical honeycombs–Static and dynamic analysis. *Thin-walled structures*, 157, 106990.

Li X, Lu Z, Yang Z, Yang, Z. ve Yang, C. (2018). Anisotropic in-plane mechanical behavior of square honeycombs under off-axis loading. *Mater Des* 158:88–97.

Li, Q., Zhi X. ve Fan, F. (2021). Quasi-static compressive behaviour of 3D-printed origami-inspired cellular structure: experimental, numerical and theoretical studies. *Virtual and Physical Prototyping*, vol 17, no 1, 69-91.

- Li, Z., Wang, T., Jiang, Y., Wang, L., Liu, D. (2018). Design-oriented crushing analysis of hexagonal honeycomb core under in-plane compression, *Compos. Struct.* 187, 429–438.
- Lin, Y., Yang, Z., Wang, X., Zuo, X., Li, Z., Guan, Z. ve Jiang, Y. (2022). The design of continuous carbon fiber composite honeycombs and study on its properties. *Journal of Composite Materials*, 56(24), 3729-3747.
- Liu, Ao, Wang, A., Jiang, Q., Jiao, Y., Wu, L., ve Tang, Y. (2024). Structure Design and Performance Evaluation of Fibre Reinforced Composite Honeycombs: A Review. *Applied Composite Materials*, 31, 2019–2045.
- Liu, T., Chen, C ve Cheng, Y. (2023). Mechanical characteristics and foam filling enhancement mechanism of polymeric periodic hybrid structures under uniaxial compression. *Materials & Design*, 227, 111762.
- Liu, T., Turner, P. (2017). Dynamic compressive response of wrapped carbon fibre composite corrugated cores. *Compos Struct* 165:266–72.
- Liu, Z., Zhao, W., Yu, G. ve Wu, L. (2021). Fabrication and mechanical behaviors of quartz fiber composite honeycomb with extremely low permittivity. *Composite Structures* 271 114129.
- Liu, Q., Mo., Mo, Z., Wu, Z., Ma, J. ve Tsui, G., C., P., (2016), Crush response of KFTP square tube filled with aluminum honeycomb, *Composites Part B* 98 406e414.
- Liu, H., Chen, L ve Liue, P. (2019). Flatwise compression property of hierarchical thermoplastic composite square lattice. *Composite Structures* 210 118–133.
- Lu, C., Zhao, M., Jie, L., Wang, J., Gao, Y., Cui, X. ve Chen, P. (2015); Stress Distribution on Composite Honeycomb Sandwich Structure Suffered from Bending Load. *Procedia Engineering*, (99):405-412.
- Medico Teknik, 2024. Otoklav Nedir Ne İçin Kullanılır. Erişim tarihi: 15.12.2024 <https://medicoteknik.com/otoklav-nedir-ne-icin-kullanilir>.
- Meran, A. P., Baykasoğlu, C., Mugan, A. ve Toprak, T. (2016). Development of a design for a crash energy management system for use in a railway passenger car. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(1), 206-219.
- Meran, A. P., Toprak, T. ve Muğan, A. (2014). Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Structures*, 78, 87-94.
- Miao, X., Hu, J., Xu, Y., Su, J. ve Jing, Y. (2024). Review on mechanical properties of metal lattice structures. *Composite Structures*, 342, 118267.
- Moghaddam, H.S., Keshavanarayana, S.R., Ivanov, D., Yang, C., Horner, A.L. (2021). In-plane shear response of a composite hexagonal honeycomb core under large deformation—a numerical and experimental study, *Compos. Struct.* 268, 113984.
- Moghaddam, H.S., Keshavanarayana, S.R., Yang, C., Horner, A.L. (2022). Anisotropic hyperelastic constitutive modeling of in-plane finite deformation responses of commercial composite hexagonal honeycombs, *J. Sandw. Struct. Mater.* 24 (1), 5–34.

- Mohammadi, H., Ahmad, Z., Petru, M., Mazlan, S. A., Johari, M. A. F., Hatami, H. ve Kolor, S. S. R. (2023). An insight from nature: honeycomb pattern in advanced structural design for impact energy absorption. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 2862-2887.
- Mousanezhad D, Ebrahimi H, Haghpanah B, Ghosh R, Ajdari A, Hamouda AMS, ve Vaziri, A. (2015). Spiderweb honeycombs. *Int J Solids Struct*; 66:218–27.
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K. ve Kim, G.S. (1999); The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 35(3):205-231
- Pan, J., Li, M. ve Cai, J. (2023). Experimental and numerical analysis of a bolted reinforced honeycomb with tunable Poisson's ratio. *Thin-Walled Structures* 192 11151.
- Papka S.D. ve Kyriakides S. (1999). Biaxial crushing of honeycombs-Part I: Experiments. *Int J Solids Struct*; 36:4367–4396.
- Papka S.D. ve Kyriakides S. (1999). In-plane biaxial crushing of honeycombs-Part 2: Analysis. *Int J Solids Struct*; 36:4397–4423.
- Park, S., Russell, B.P., Deshpande, V.S. ve Fleck, N.A., (2012), Dynamic compressive response of composite square honeycombs, *Composites: Part A* 43 527–536
- Paz, J., Diaz, J., Romera, L. ve Costas, M., (2014), Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of CFTP honeycomb-filled energy absorption devices, *Finite Elements in Analysis and Design* 91 30–39
- Prakash, A.A., Mohan, B., Rajadurai, A. ve Jaswin, A., (2015), Low velocity impact behaviour of glass fabric epoxy honeycomb core sandwich composites, *Sci Eng Compos Mater* 22(5): 525–538.
- Qi, C., Jiang, F. ve Yang, S. (2021). Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review. *Composites Part B: Engineering*, 227, 109393.
- Qiang L., Zhengwei M., Yinghan W., Jingbo M., Gary Chi Pong T. ve David H., (2016). Crush response of KFTP square tube filled with aluminum honeycomb. *Composites Part B* 98 406e414
- Qiao, P., Fan, W., Davalos, J.F. ve Zou, G., (2008). Optimization of transverse shear moduli for composite honeycomb cores. *Composite Structures* 85 265–274
- Quan, C., Han, B., Hou, Z., Zhang, Q., Tian, X., ve Lu, T. J. (2020). 3D printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures. *Composites Part B: Engineering*, 187, 107858.
- Qu, Y., Chen, J., Jiao, L., Ye, T. ve Hu, X. (2024). Experiment and finite element analysis of protective honeycombs based on equivalent method for ocean engineering under impact loading. *Composite Structures*, 331,117858.
- Ragab, A.M., Mahdi, E., Oosterhuis, K., Dean, A. ve Cabibihan, J.J. (2023). Mechanical and energy absorption properties of 3D-printed honeycomb structures with Voronoi tessellations. *Frontiers in Mechanical Engineering*.
- Ramnath, B. V., Alagarraja, K., & Elanchezhian, C. (2019). Review on sandwich composite and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 16, 859-864.

- Rao, S., Thomas, J., Aziz, A. ve Cantwell, W. (2019). Manufacturing and performance evaluation of carbon fiber-reinforced honeycombs. *Journal of Composites Science*, 3(1), 13.
- Russell, B.P., Deshpande, V.S. ve Wadley, H.N.G., (2008). Quasistatic Deformation And Failure Modes Of Composite Square Honeycombs. *Journal Of Mechanics Of Materials And Structures* Vol. 3, No. 7., 1315-1340.
- Saito, K., Pellegrino, S., Nojima, T. (2014). Manufacture of arbitrary cross-section composite honeycomb cores based on origami techniques. *J Mech Des* 136(5). 051011.
- San, H. N., Pham, T.M., Tran, T.T., Hao, H., Lu, G. (2022). Mechanical properties and energy absorption of bio-inspired hierarchical circular honeycomb, *Compos. B Eng.* 236,109818.
- Sarkhosh, R., Farrokhhabadi, A. ve Zarei, A. (2022), Crashworthiness characteristics of composite cylindrical energy absorbers filled with honeycomb and foam under quasi-static load: experimental and analytical study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 44:346
- Shahverdi Moghaddam, H., Keshavanarayana, S. R., Ivanov, D., Yang, C. ve Horner, A. L. (2021). In-plane shear response of a composite hexagonal honeycomb core under large deformation—a numerical and experimental study. *Composite Structures*, 268, 113984.
- Shahverdi Moghaddam, H., Keshavanarayana, S. R., Yang, C. ve Horner, A. L. (2022). Anisotropic hyperelastic constitutive modeling of in-plane finite deformation responses of commercial composite hexagonal honeycombs. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(1), 5-34.
- Shi, S., Zhou, X., Zhang, J., Chen, B. ve Sun, Z. (2023). In-plane compressive response of composite sandwich panels with local-tight honeycomb cores. *Composite Structures*, 314, 116970.
- Silva, R.C., Castro, M. G., Oliveira, A.B.S, Brasil, A.C.M. ve Luz, S.M. (2022). Crashworthiness performance of hybrid energy absorbers using PET-G honeycomb structure. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*.
- Solmaz, M.Y. ve Çelik, E. (2018); 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ.* 30(1), 277-286, 2018 30(1), 277-286,
- Solmaz, M.Y. ve Topkaya, T. (2020). The Flexural Fatigue Behavior of Honeycomb Sandwich Composites Following Low Velocity Impacts. *Applied Sciences* 10, 7262.
- Sumithra, G., Reddy, R.N., Kumar, G.D., Ojha, S., Jayachandra, G., Raghavendra, G. (2023). Review on composite classification, manufacturing, and applications. *Materialtoday: Proceedings*.
- Sun, G., Li, S., Liu, Q., Li, G. ve Li, Q., (2016); Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum foam/honeycomb-filled KFTP tubes, *Composite Structures*, 152, 969-993
- Sun, F., Lai, C. ve Fan, H. (2016). In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures. *Mater Des*; 100:280–90.
- Sun, G., Chen, D., Zhu, G. ve Li, Q. (2022). Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: A state-of-the-art review and outlook. *Thin-Walled Structures*, 172, 108760.
- Sun, G., Huo, X., Wang, H., Hazell, P. J. ve Li, Q. (2021). On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108881.

- Sun, Y., Li, Q.M. (2017). Dynamic compressive behaviour of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int J Impact Eng* 112:74–115.
- Tao Y, Li W, Wei K. ve Fang, D. (2019). Mechanical properties and energy absorption of 3D printed square hierarchical honeycombs under in-plane axial compression. *Compos B*; 176:107219.
- Tekstilbilgi, 2022. Kompozitlerin üretim yöntemleri. Erişim Tarihi: 31.01.2022 <https://tekstilbilgi.net/kompozitlerin-uretim-yontemleri.html>.
- Thomas, T. ve Tiwari, G. (2019). Crushing behavior of honeycomb structure: a review. *International Journal of Crashworthiness*, 24(5), 555-579.
- Tripathi, L., Behera, B.K. (2021). 3D woven honeycomb composites, *J. Mater. Sci.* 56, 15609–15652.
- Vázquez, O. B., Sánchez-Rodríguez, E.P., McShane, G.J. ve Medina, D.I. (2021). Load Distribution on PET-G 3D Prints of Honeycomb Cellular Structures under Compression Load. *Polymers*, 13,1983.
- Vitale, P., Francucci, G., Rapp, H. ve Stocchi, A. (2018). Manufacturing and compressive response of ultra-lightweight KFTP cores. *Composite Structures*, 194, 188-198.
- Wang, J., Shi, C., Yang, N., Sun, H., Liu, Y. ve Song, B., (2018), Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle bod, *Composite Structures* 184 1189–1196
- Wang, Y., Yu, Y., Wang, C., Zhou, G., Karamoozian, A., Zhao, W. (2020). On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square, triangular and circular honeycomb panels, *Int. J. Mech. Sci.* 173, 105402.
- Wang, Z. (2019). Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 166, 731-741.
- Wang, Z., Deng, J., Liu, K., Tao, Y. (2022). Hybrid hierarchical square honeycomb with widely tailorable effective in-plane elastic modulus. *Thin-Walled Structures*, 171, 108816.
- Wang Z, Lei Z, Li Z, Yuan, K. ve Wang, X. (2021). Mechanical reinforcement mechanism of a hierarchical Kagome honeycomb. *Thin-Walled Struct*; 167:108235.
- Wang, Z., Liu, J., (2018), Mechanical performance of honeycomb filled with circular KFTP tubes, *Composites Part B* 135, 232-241
- Wang, W., Chen, X. ve Fan, H. (2023) Modular technique to construct lightweight KFTP lattice structures. *Thin-Walled Structures*. 182 110259
- Wei, S., Guo, Z., Shi, H., Chai, B.G., Li, Y. ve Luan, Y. (2022). Compression properties of carbon fiber reinforced polymer grid sandwich structure. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 0(0) 1–14.
- Wei X, Li D ve Xiong J. (2019). Fabrication and mechanical behaviors of an all-composite sandwich structure with a hexagon honeycomb core based on the tailor-folding approach. *Compos Sci Technolgy*; 184:107878.

- Wei, X., Wang, Y., Xue, P., Zhang, T., Rouis, A., Xiao, W., ve Xiong, J. (2022). Carbon Fiber Composite Honeycomb Structures and the Application for Satellite Antenna Reflector with High Precision. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 5(4), 423-441.
- Wei, X., Xiong, J., Wang, J., ve Xu, W. (2020). New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials. *Science China Technological Sciences*, 63(8), 1348-1370.
- Wei, Y., Zhang, Y., Song, Q., Zhou, Y. ve Shen, Y. (2022). Effects of different configurations and gradients on compression responses of gradient honeycombs via selective laser melting. *Thin-Walled Structures* 170 108462.
- Wiranto, I.B., Saraswati, S.O., Prabowo, A.R., Al Fikri I. R., Muttaqied. T., ve Nurrohmade, A., (2023). Experimental studies on crashworthiness analysis of a sandwich composite panel under axial impact: A comprehensive review. *Procedia Structural Integrity* 48 65–72.
- Wu, H.X., Liu, Y., Zhang, X.C. (2018). In-plane crushing behavior and energy absorption design of composite honeycombs, *Acta Mech. Sin.* 34, 1108–1123.
- Wu, Y., Liu, Q., Fu, J., Li, Q. ve Hui, D., 2017; Dynamic crash responses of bio-inspired aluminum honeycomb sandwich structures with KFTP panels. *Composites Part B: Engineering*, 121, 122-133 .
- Xie, S., Feng, Z., Zhou, H., Wang, D. ve Ma, W. (2020). In-plane and out-of-plane compressive mechanical properties of Nomex honeycombs and their prediction. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42:460.
- Xie, S. ve Zheng, S., Zhang, J., Liu, Z., Wang, H. ve Zhou H. (2024) Study on the crashworthiness of multi-cell thinwalled tubes filled with triply periodic minimal surface lattices. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2345206>
- Xie, S. ve Zhou, H., (2015). Analysis and optimisation of parameters influencing the outof-plane energy absorption of an aluminium honeycomb. *Thin-Walled Structures*, 89, 169-177.
- Xiong, J., Ma, L., Wu, L., Wang, B., Vazir, A. (2010). Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures. *Compos Struct* 92(11):2695–702.
- Xiong J, Vaziri A, Ghosh R, ve Wu, L. (2016). Compression behavior and energy absorption of carbon fiber reinforced composite sandwich panels made of three-dimensional honeycomb grid cores. *Extreme Mech Lett*; 7:114–20.
- Xiong, J., Zhang, M., Stocchi, A., Hu, H., Ma, L., Wu, L., ve Zhang, Z. (2014). Mechanical behaviors of carbon fiber composite sandwich columns with three-dimensional honeycomb cores under in-plane compression. *Composites Part B: Engineering*, 60, 350-358.
- Yan X, Li Q, Yin S, ve Liu, M. (2019). Mechanical and in vitro study of an isotropic Ti6Al4V lattice structure fabricated using selective laser melting. *J Alloy Compd*; 782: 209–23.
- Yang, X., Sun, Y., Yang, J. ve Pan, J., (2018). Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructured. *Thin-Walled Structures* 125 1–11

- Yang, W., Dong, S., Zhu, X., Ren, S. ve Li, L. (2022). Superior energy absorption performance of layered aux-hex honeycomb filled tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 234, 107702.
- Yao S, Xiao X, Xu P, Qu Q, Che Q. (2018). The impact performance of honeycomb-filled structures under eccentric loading for subway vehicles. *Thin-Walled Struct* 123:360–70.
- Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., ve Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304, 116397.
- Yina H, Huang X, Scarpa F. ve Chen, Y. (2018). In-plane crashworthiness of bio-inspired hierarchical honeycombs. *Compos Struct*; 192:516–27.
- Yu, G.C., Feng, L.J. ve Wu, L.Z. (2016). Thermal and mechanical properties of a multifunctional composite square honeycomb sandwich structure. *Mater Des* 102:238–46.
- Zaini, E.S., Azaman, M.D., Jamali, M.S., Ismail, K.A. (2020). Synthesis and characterization of natural fiber reinforced polymer composites as core for honeycomb core structure: a review, *J. Sandw. Struct. Mater.* 22 (3), 525–550.
- Zeng, C., Liu, L., Bian, W., Leng, J. ve Liu, Y. (2021). Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects. *Additive Manufacturing*, 38, 101842.
- Zeng, C, Liu, L., Bian, W., Leng, J. ve Liu, Y. (2022). Temperature-dependent mechanical response of 4D printed composite lattice structures reinforced by continuous fiber. *Composite Structures* 280, 114952.
- Zeng, W., Jiang, W., Liu, J. ve Huang, W. (2022). Fabrication method and dynamic responses of composite sandwich structure with reentrant honeycomb cores. *Composite Structures*, 299, 116084.
- Zhang, D., Lu, G., Ruan, D., Fei, Q. ve Duan, W., (2019) Quasi-static combined compression-shear crushing of honeycombs: An experimental study, *Materials & Design* Volume 167, 5 April 2019, 107632
- Zhang, J. ve Ashby, M.F., (1992). The out-of-plane properties of honeycombs, *International Journal of Mechanical Sciences* Volume 34, Issue 6, June 1992, Pages 475-489
- Zhang, J. ve Ashby, M.F., (1992) Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses, *International Journal of Mechanical Sciences* Volume 34, Issue 6, June 1992, Pages 491-509
- Zhang, J., Karagiozova, D. You, Z., Chen, Y. ve Lu, G. (2019). Quasi-static large deformation compressive behaviour of origami-based metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 194–207.
- Zhang, X. ve Zhang, H. (2013). Theoretical and numerical investigation on the crush resistance of rhombic and kagome honeycombs. *Composite Structures*, 96, 143-152.
- Zhang, Y., Chen, Y., Li, J. ve Zeng, G. (2024). Protective performance of hybrid triply periodic minimal surface lattice structure. *Thin-Walled Structures*, 194, 111288.
- Zhang, Y., Liu, T., Tizani, W. (2018). Experimental and numerical analysis of dynamic compressive response of Nomex honeycombs, *Composites Part B* 148 27–39

- Zhang, Y., Xu, X., Fang, J., Huang, W. ve Wang, J. (2022). Load characteristics of triangular honeycomb structures with self-similar hierarchical features. *Engineering Structures*, 257, 114114.
- Zhang, Y., Zong, Z., Liu, Q., Ma, J., Wu, Y. ve Li, Q., (2017); Static and dynamic crushing responses of KFTP sandwich panels filled with different reinforced materials, *Materials & Design*, 117, 396-408
- Zhang W, Yin S, Yu TX ve Xu, J. (2019). Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *Int J Impact Eng*; 125: 163–72.
- Zhao, T., Yang, J., Chen, J. ve Guan, S. (2022). Review of carbon fiber-reinforced sandwich structures. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221098729.
- Zhao, W., Liu, Z., Yu, G. ve Wu, L. (2021). A new multifunctional carbon fiber honeycomb sandwich structure with excellent mechanical and thermal performances. *Composite Structures*, 274, 114306.
- Zheng J, Zhao L ve Fan H. (2012). Energy absorption mechanisms of hierarchical woven lattice composites. *Compos B Eng*; 43(3):1516–22.
- Zhonggang W., Jiefu L. ve David H., (2017). Mechanical behaviors of inclined cell honeycomb structure subjected to compression; *Composites Part B* 110 307e314
- Zhou, G. ve Hill, M.D. (2009); Impact damage and energy absorbing characteristics and residual in-plane compressive strength of honeycomb sandwich panels, *Journal of sandwich structures and materials*. VOI11, p.329-356
- Zhou, H., Xu, P., Xie, S., Feng, Z. ve Wang, D., (2018), Mechanical performance and energy absorption properties of structures combining two Nomex honeycombs, *Composite Structures* 185 524–536
- Zhou, J., Dong, C., Chen, B., Qin, R. ve Li, D. (2023). Out-of-plane crushing performances of cell-based hierarchical honeycombs based on the evaluation criteria for ideal energy absorption. *Thin-Walled Structures* 182 110246.
- Zhou, J., Liu, H., Dear, J.P., Falzon, B.G. ve Kazancı, Z. (2023). Comparison of different quasi-static loading conditions of additively manufactured composite hexagonal and auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 244,108054.
- Zhu, X., Xiong, C., Yin, J., Zhou, H., Zou, Y., Fan, Z. ve Deng, H. (2023). Experimental study and modeling analysis of planar compression of composite corrugated, lattice and honeycomb sandwich plates. *Composite Structures* 308 116690.
- Zuhri, M.Y.H., Guan, Z.W. ve Cantwell, W.J., (2014). The mechanical properties of natural fibre based honeycomb core materials, *Composites: Part B* 58 1–9

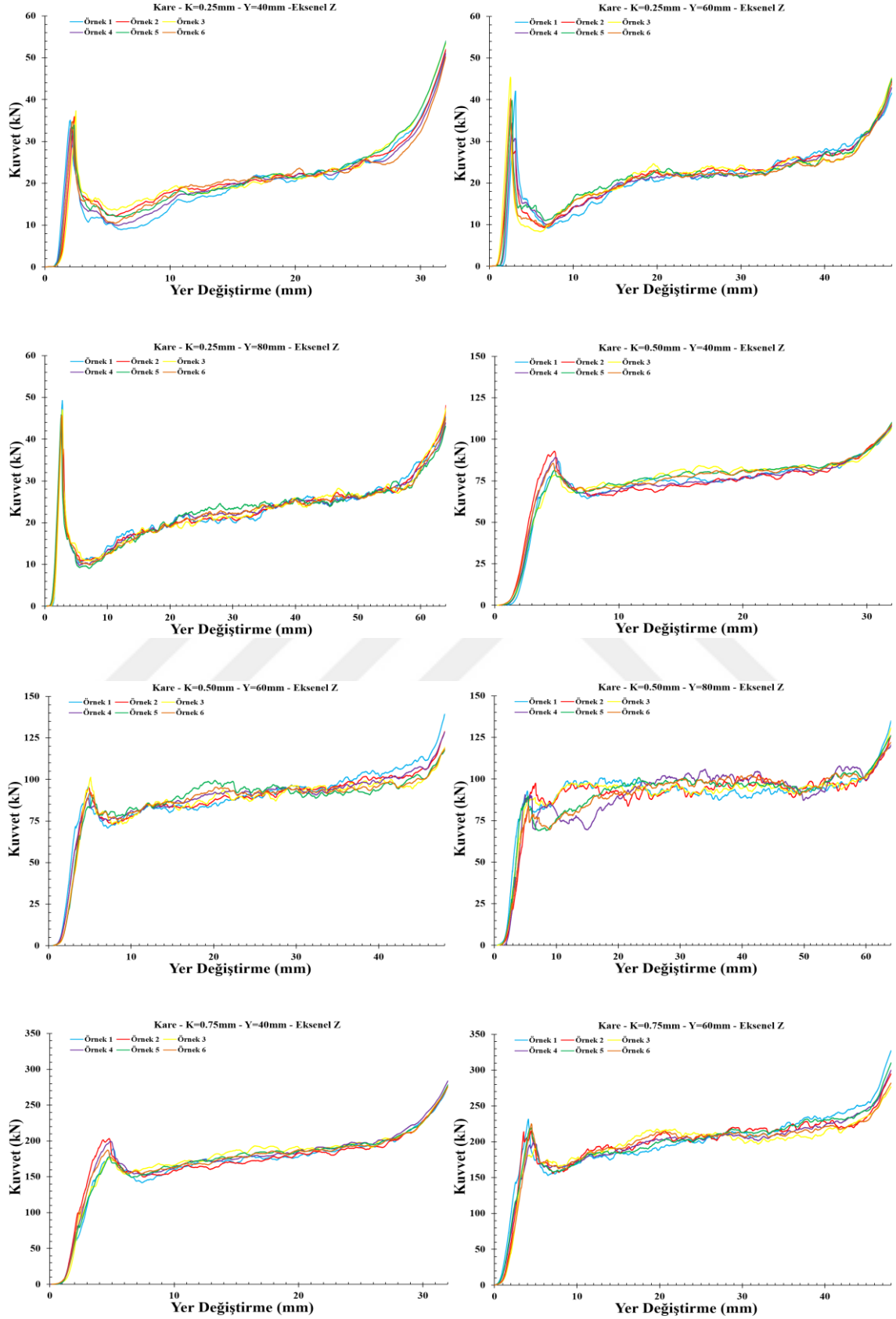
## EKLER



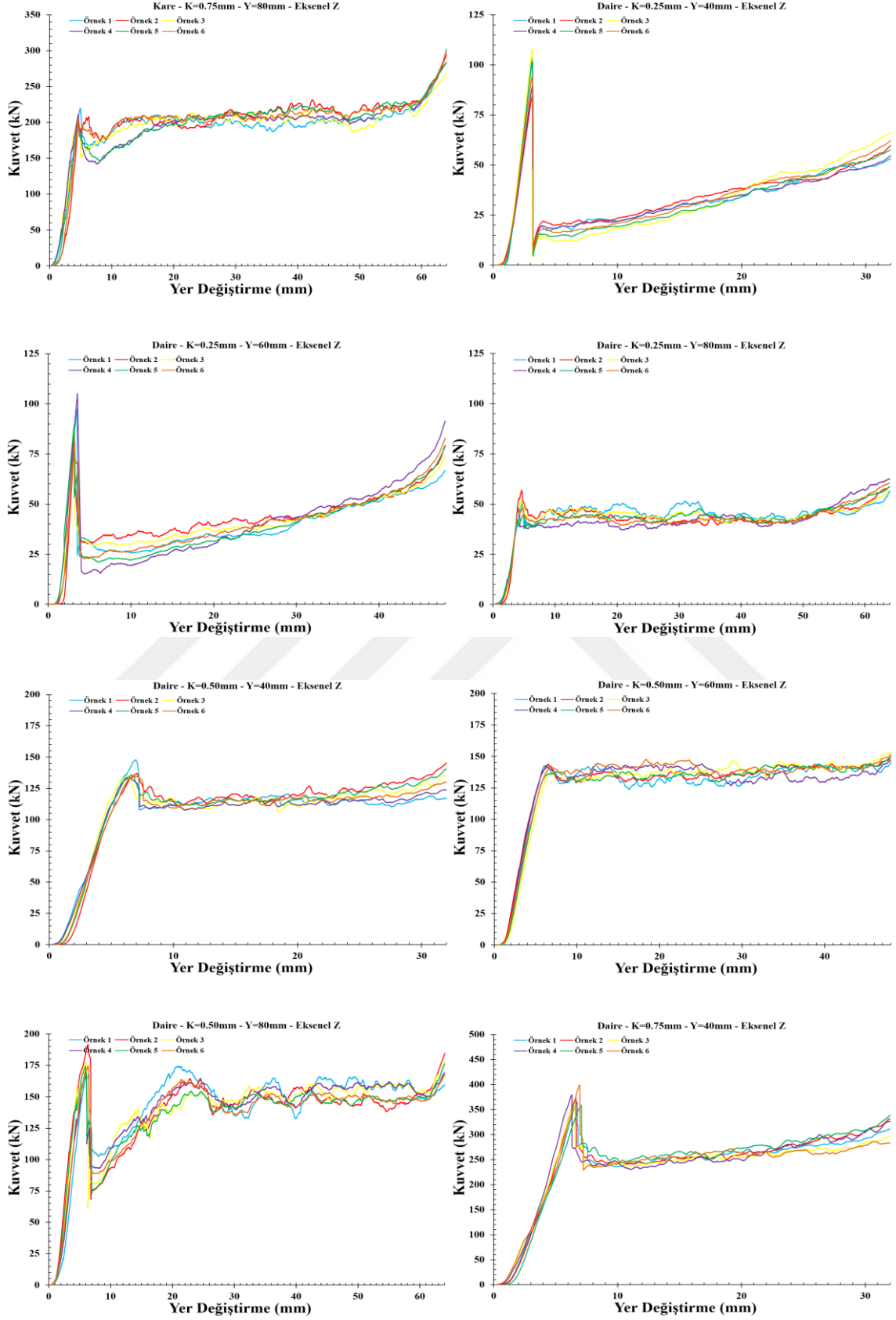
**EK-1: Düzlem Dışı Eksenel Yöne Ait Veriler****Tablo Ek- 1.** Deney verilerinin kullanımı ile hesaplanan performans parametrelerinin standart sapma değerleri

Eksenel Yön	Standart Sapma Ağırlık	Standart Sapma TSE	Standart Sapma ÖSE	Standart Sapma OÇK	Standart Sapma MÇK	Standart Sapma ÇKV
K-K1-Y1	0.99	19.75	0.10	1.46	0.60	2.23
K-K1-Y2	0.69	13.24	0.04	5.50	0.28	7.52
K-K1-Y3	0.41	4.51	0.14	2.42	0.07	2.56
K-K2-Y1	0.65	32.76	0.17	5.22	1.02	6.19
K-K2-Y2	0.71	42.24	0.15	4.82	0.90	5.05
K-K2-Y3	0.60	32.94	0.15	4.04	0.52	4.29
K-K3-Y1	1.01	70.01	0.22	11.28	2.13	5.82
K-K3-Y2	0.63	84.30	0.30	15.76	1.75	6.43
K-K3-Y3	1.34	191.78	0.66	5.96	3.00	3.68
D-K1-Y1	0.60	26.80	0.30	8.77	0.84	3.69
D-K1-Y2	0.81	66.08	0.70	9.42	1.37	5.51
D-K1-Y3	0.84	54.04	0.34	4.36	0.87	7.04
D-K2-Y1	0.99	60.80	0.58	5.07	1.87	3.15
D-K2-Y2	0.48	71.13	0.56	2.50	1.48	1.79
D-K2-Y3	0.99	160.00	0.76	8.42	2.50	4.39
D-K3-Y1	0.64	121.99	1.01	42.09	3.75	9.88
D-K3-Y2	0.42	59.15	0.30	8.32	1.20	2.22
D-K3-Y3	1.06	228.31	0.67	26.97	3.56	6.70
A-K1-Y1	0.45	8.84	0.24	9.31	0.30	14.09
A-K1-Y2	0.59	22.37	0.27	5.11	0.46	9.24
A-K1-Y3	0.94	69.07	0.44	3.81	1.09	7.34
A-K2-Y1	0.90	68.13	0.19	10.23	2.12	7.07
A-K2-Y2	0.58	43.09	0.15	1.25	0.91	0.85
A-K2-Y3	0.91	73.36	0.18	12.40	1.15	4.11
A-K3-Y1	0.75	96.90	0.70	25.72	3.02	8.94
A-K3-Y2	0.74	124.48	0.45	10.57	2.56	3.29
A-K3-Y3	0.79	69.62	0.53	12.37	1.08	3.61

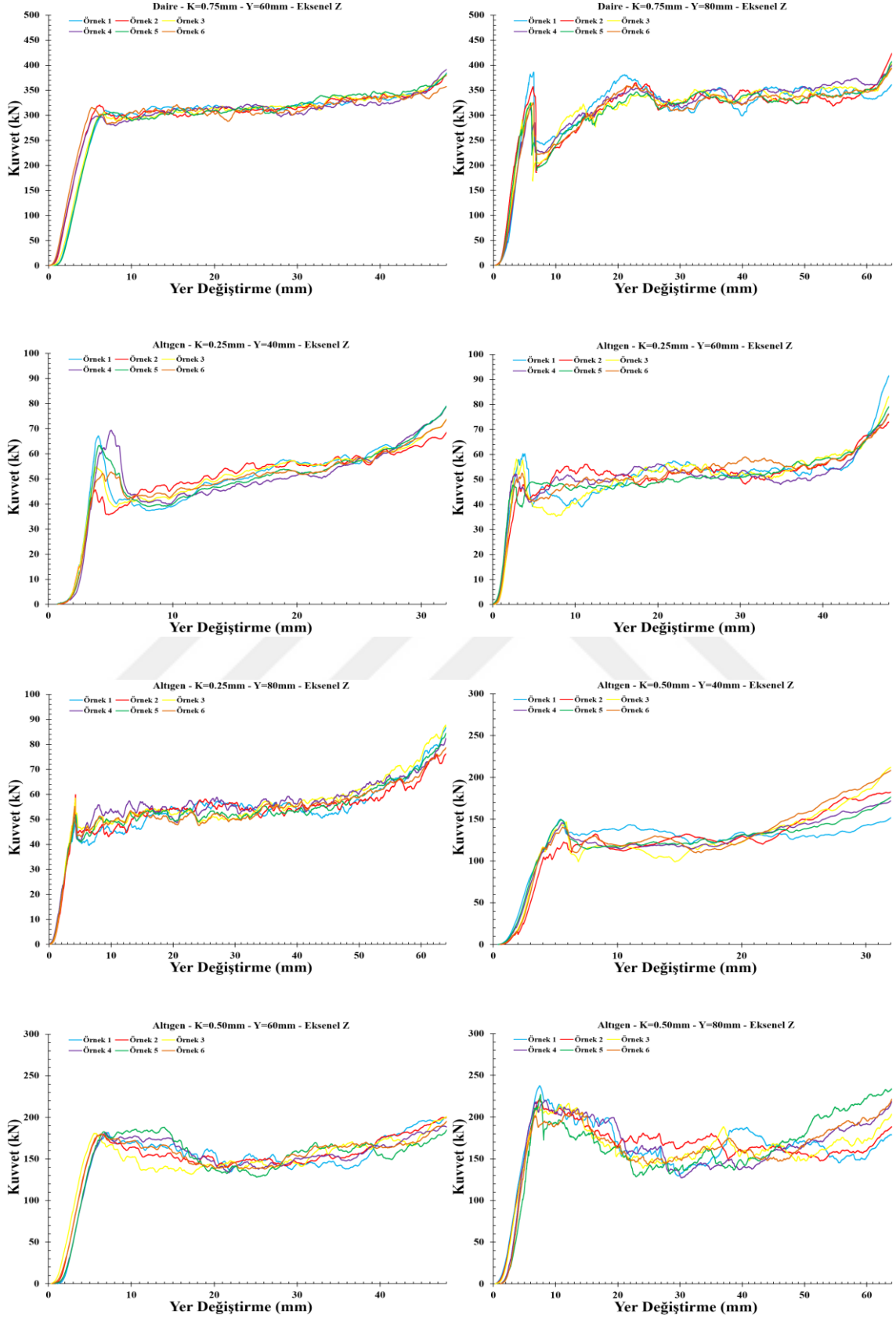
Şekil Ek- 1. Düzlem Dışı Eksenel yöndeki Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri



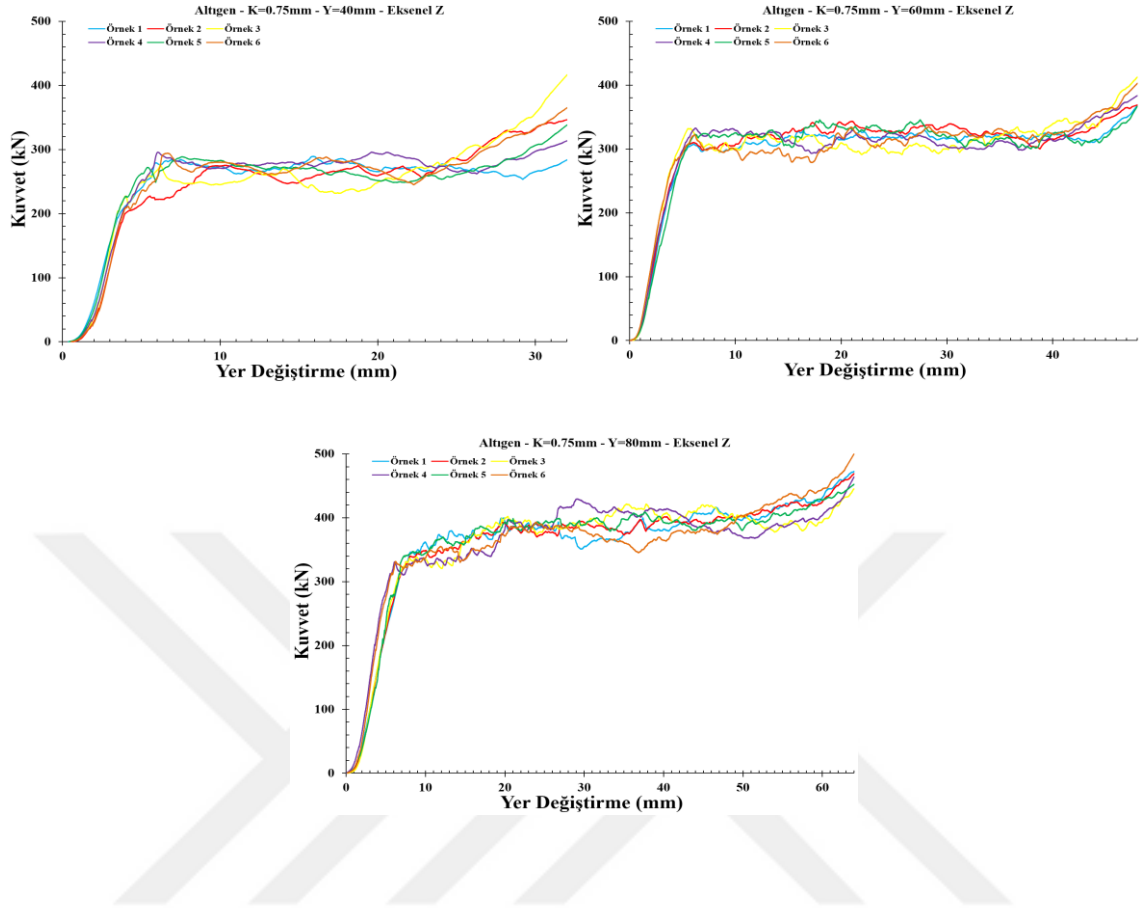
Şekil Ek-1. (Devamı)



Şekil Ek-1. (Devamı)



Şekil Ek-1. (Devamı)



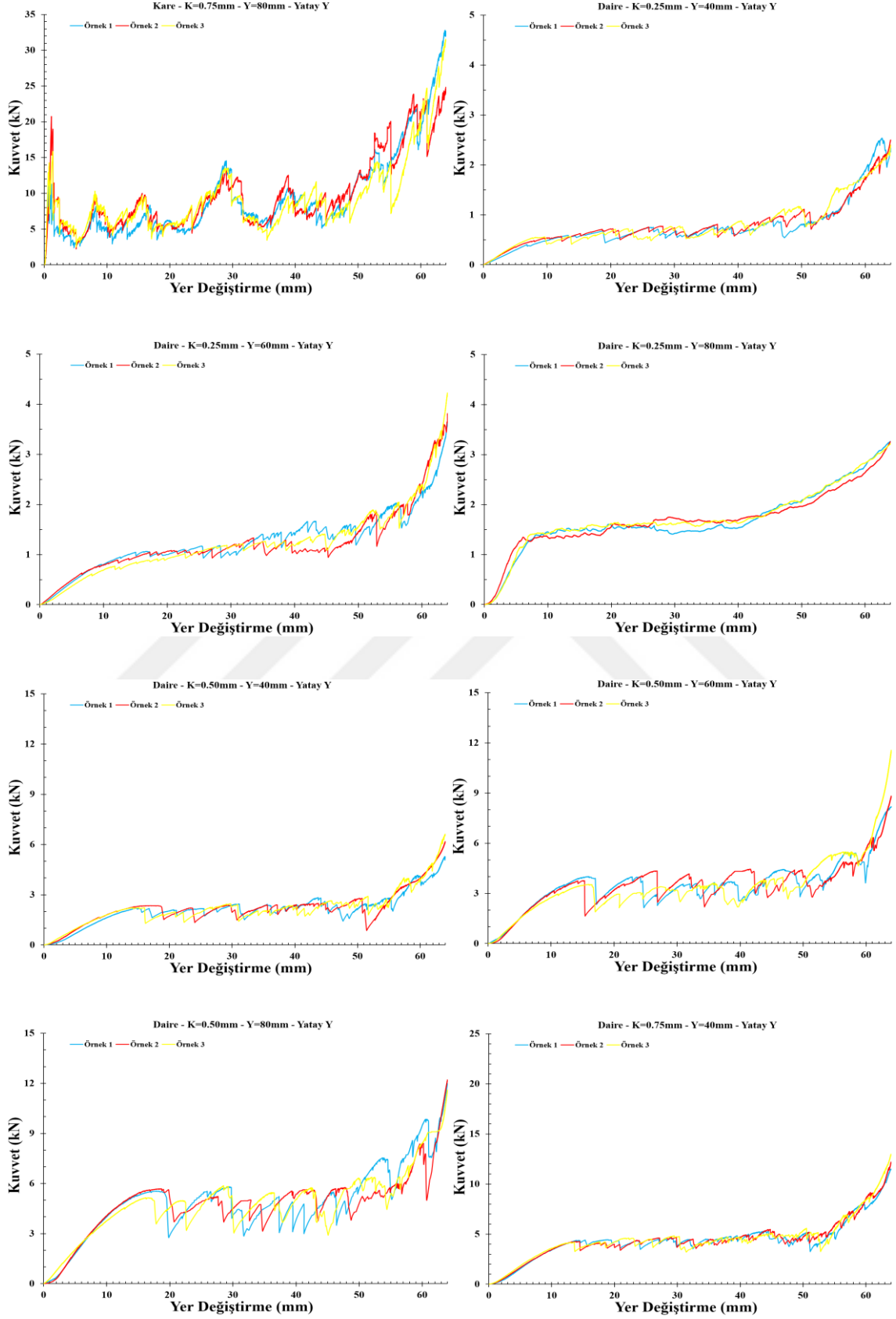
**EK-2: Düzlem İçi Genişleme Yönüne Ait Veriler****Tablo Ek- 2.** Deney verilerinin kullanımı ile hesaplanan performans parametrelerinin standart sapma değerleri

Genişleme Yönü	Standart Sapma Ağırlık	Standart Sapma TSE	Standart Sapma ÖSE	Standart Sapma OÇK	Standart Sapma MÇK	Standart Sapma ÇKV
K-K1-Y1	1.18	0.44	0.02	0.13	0.01	10.52
K-K1-Y2	0.99	1.60	0.01	0.10	0.03	3.70
K-K1-Y3	2.41	6.55	0.05	0.27	0.10	13.35
K-K2-Y1	1.23	2.89	0.01	1.48	0.05	13.90
K-K2-Y2	1.83	3.38	0.01	2.96	0.05	24.90
K-K2-Y3	1.43	6.13	0.03	2.75	0.10	11.50
K-K3-Y1	1.97	7.77	0.04	1.88	0.12	37.91
K-K3-Y2	1.29	5.81	0.01	1.75	0.09	11.99
K-K3-Y3	1.69	19.74	0.09	4.73	0.31	18.10
D-K1-Y1	0.73	1.40	0.01	0.09	0.02	27.16
D-K1-Y2	1.04	1.46	0.00	0.14	0.02	19.67
D-K1-Y3	1.45	1.58	0.00	0.03	0.02	2.43
D-K2-Y1	1.43	2.49	0.02	0.08	0.04	2.65
D-K2-Y2	0.54	1.66	0.01	0.24	0.03	5.28
D-K2-Y3	0.93	3.36	0.02	0.28	0.05	4.59
D-K3-Y1	0.85	3.51	0.02	0.11	0.05	3.96
D-K3-Y2	0.47	2.89	0.01	0.14	0.05	1.63
D-K3-Y3	0.54	3.08	0.01	0.24	0.05	3.12
A-K1-Y1	0.36	1.17	0.01	0.24	0.02	14.05
A-K1-Y2	0.64	2.33	0.02	0.10	0.04	2.17
A-K1-Y3	0.32	1.91	0.02	0.29	0.03	6.18
A-K2-Y1	0.41	3.47	0.05	0.14	0.05	4.35
A-K2-Y2	0.65	2.89	0.02	0.37	0.05	11.43
A-K2-Y3	1.71	6.62	0.01	0.41	0.10	6.86
A-K3-Y1	0.46	3.63	0.03	0.27	0.06	7.94
A-K3-Y2	1.08	1.94	0.03	0.55	0.03	7.62
A-K3-Y3	0.44	2.95	0.01	0.33	0.05	2.36

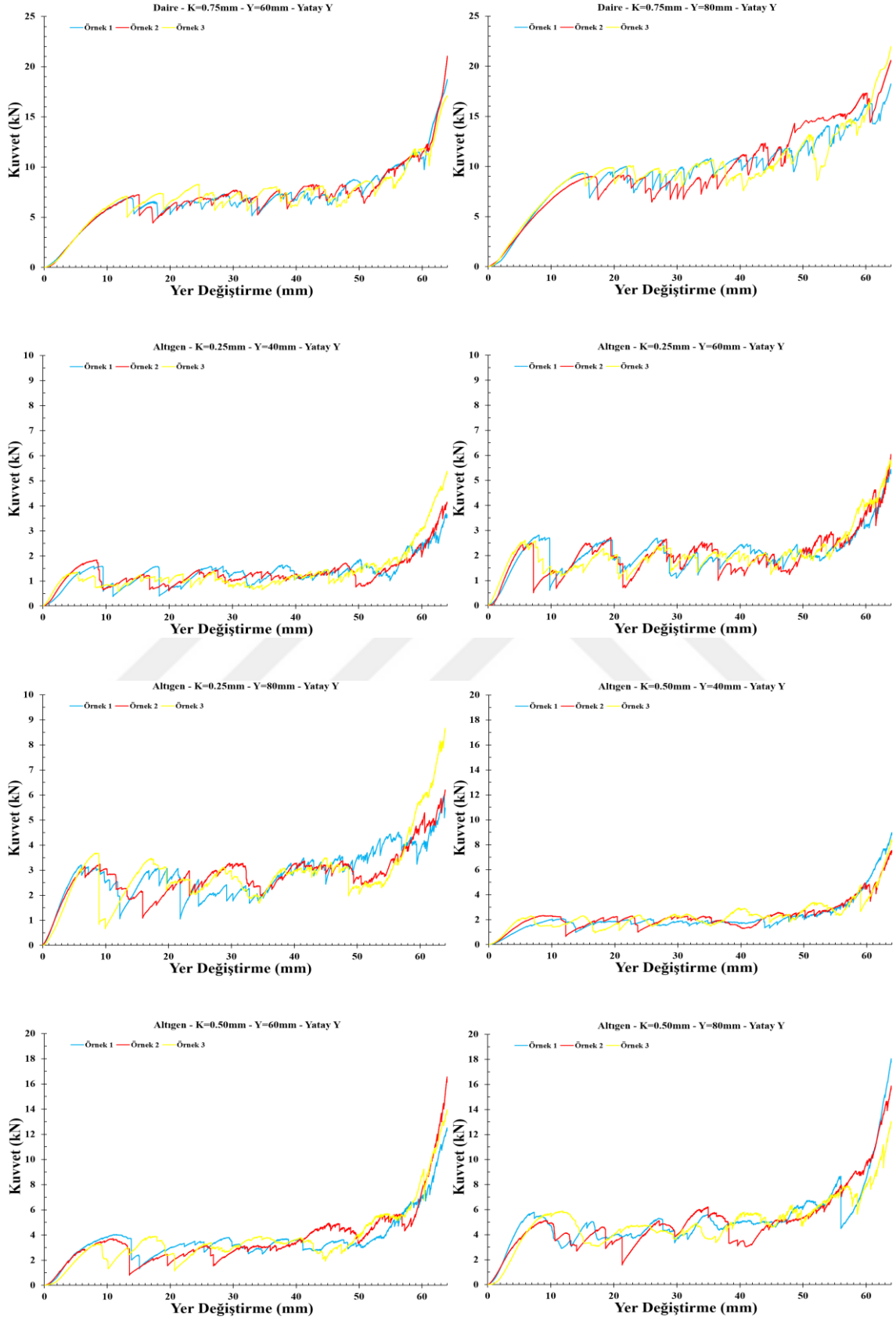
**Şekil Ek- 2.** Düzlem İçi Genişleme yönündeki Kuvvet-Yer Değişirme Grafikleri



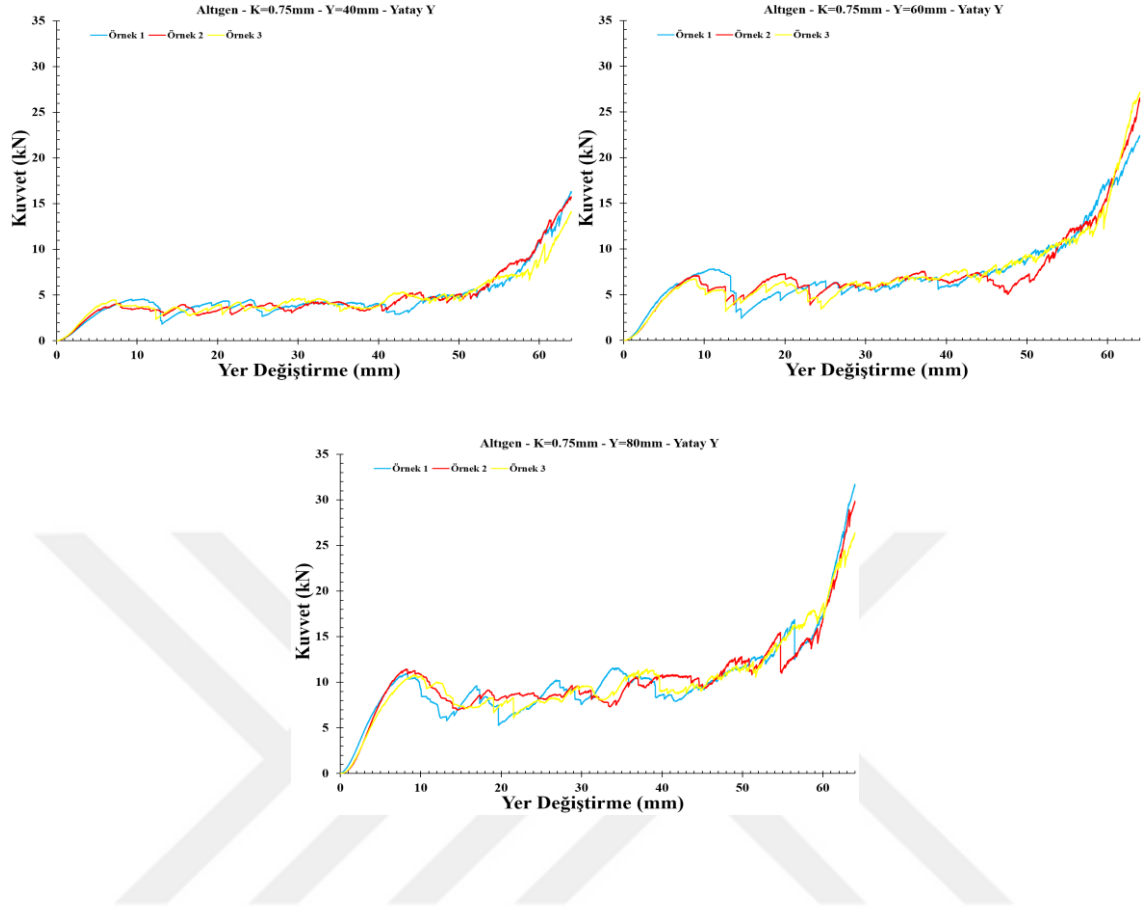
Şekil Ek-2. (Devamı)



Şekil Ek-2. (Devamı)



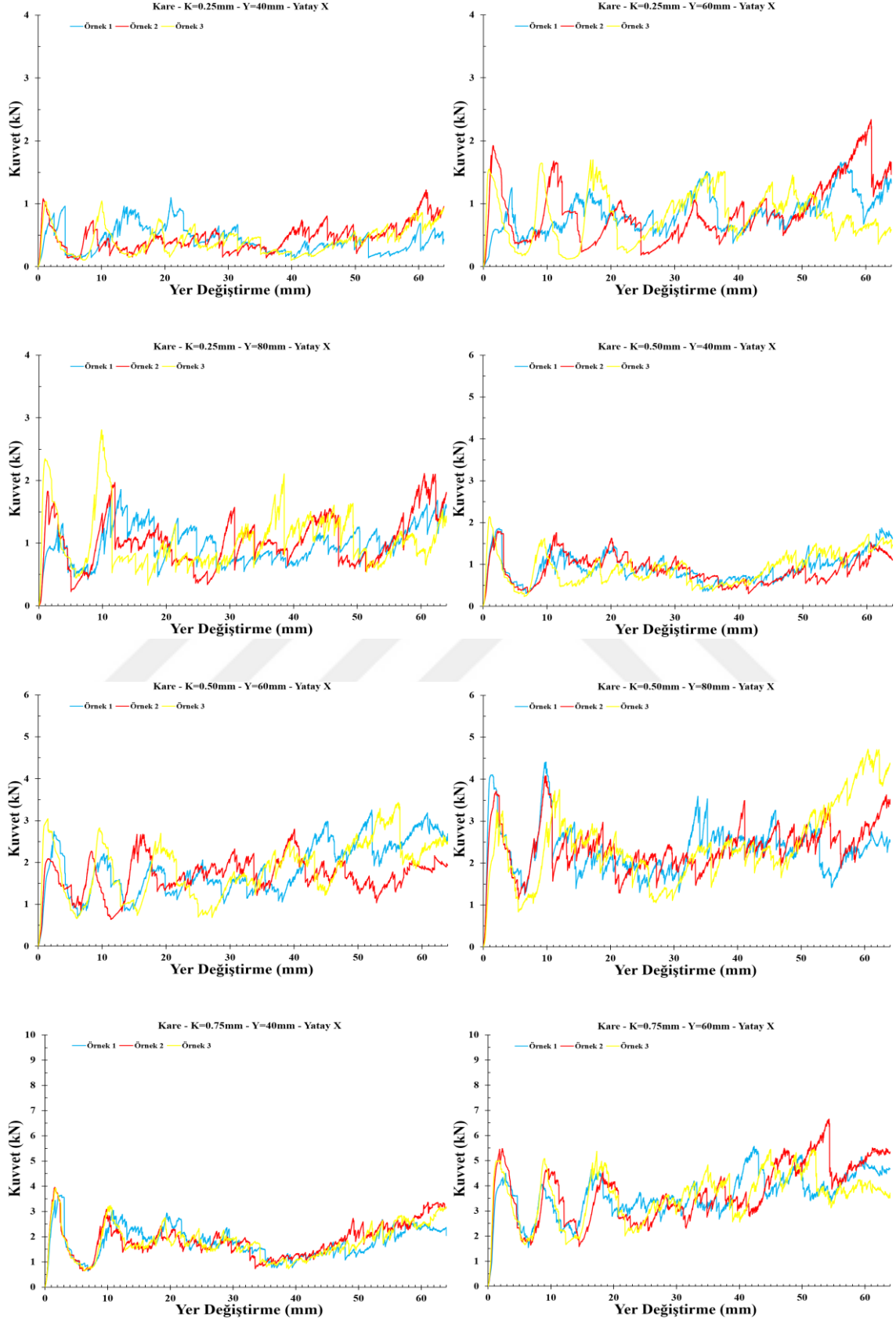
## Şekil Ek-2. (Devamı)



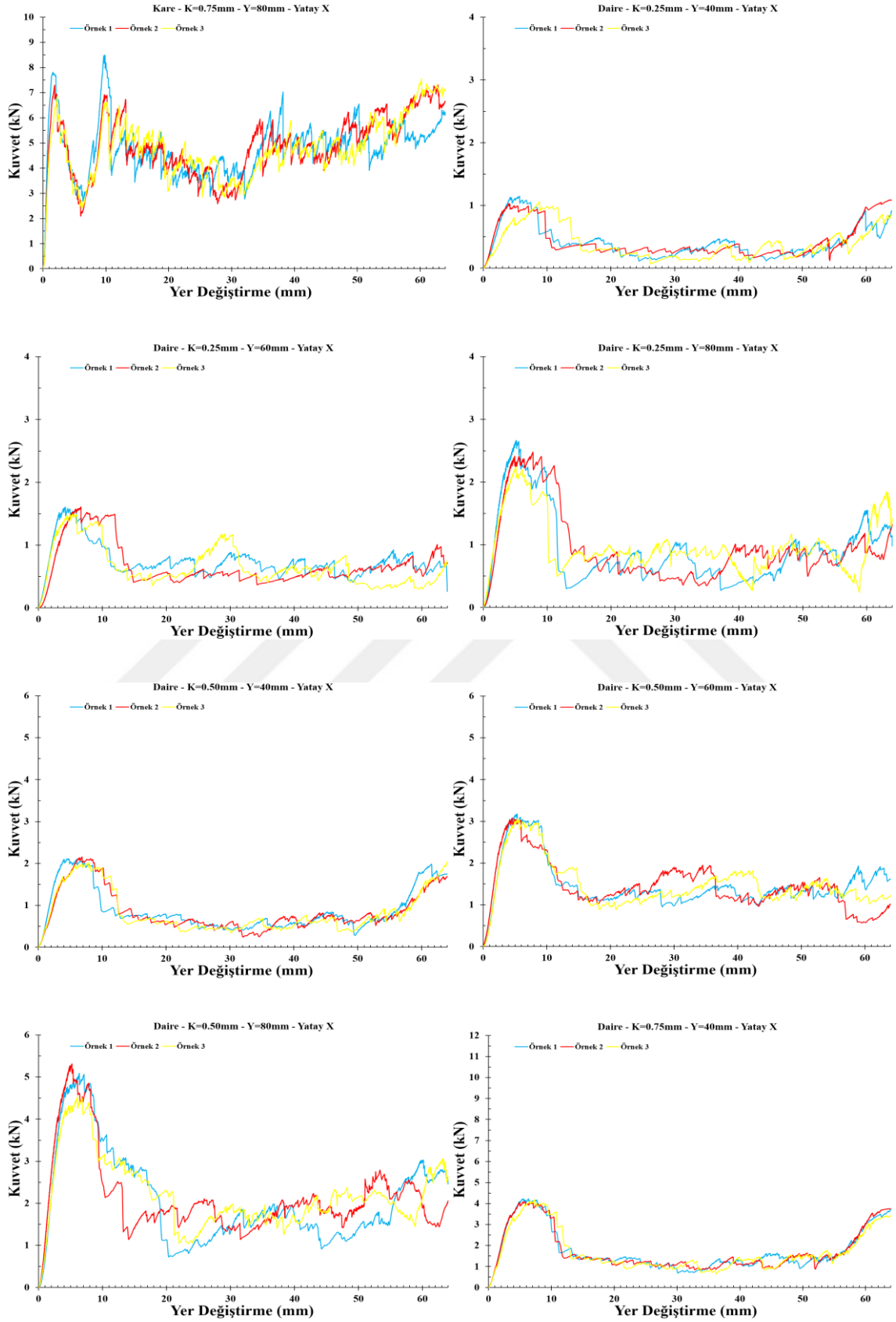
**EK-3: Düzlem İçi Boylamsal Yöne Ait Veriler****Tablo Ek- 3.** Deney verilerinin kullanımı ile hesaplanan performans parametrelerinin standart sapma değerleri

Boylamsal Yön	Standart Sapma Ağırlık	Standart Sapma TSE	Standart Sapma ÖSE	Standart Sapma OÇK	Standart Sapma MÇK	Standart Sapma ÇKV
K-K1-Y1	0.94	1.69	0.03	0.06	0.03	2.18
K-K1-Y2	0.35	2.68	0.04	0.34	0.04	11.22
K-K1-Y3	0.53	2.54	0.03	0.64	0.04	16.15
K-K2-Y1	0.53	1.58	0.02	0.18	0.02	4.05
K-K2-Y2	1.39	6.50	0.06	0.49	0.10	9.99
K-K2-Y3	0.85	3.99	0.02	0.47	0.06	9.03
K-K3-Y1	0.08	2.53	0.04	0.17	0.04	1.61
K-K3-Y2	1.07	5.35	0.03	0.49	0.08	6.38
K-K3-Y3	1.25	3.44	0.00	0.52	0.05	4.43
D-K1-Y1	0.68	1.35	0.02	0.06	0.02	3.28
D-K1-Y2	0.75	2.81	0.05	0.06	0.04	2.05
D-K1-Y3	0.50	1.65	0.02	0.25	0.03	4.85
D-K2-Y1	1.40	1.67	0.01	0.07	0.02	2.01
D-K2-Y2	0.56	0.94	0.01	0.06	0.01	1.02
D-K2-Y3	0.82	3.49	0.02	0.40	0.05	4.51
D-K3-Y1	0.83	1.47	0.01	0.07	0.02	0.90
D-K3-Y2	0.36	1.73	0.01	0.06	0.03	0.39
D-K3-Y3	0.51	6.12	0.04	0.36	0.10	2.07
A-K1-Y1	1.02	1.55	0.01	0.03	0.02	4.62
A-K1-Y2	1.34	2.39	0.00	0.03	0.04	3.59
A-K1-Y3	1.81	3.90	0.01	0.58	0.06	13.44
A-K2-Y1	0.39	2.32	0.03	0.10	0.04	4.35
A-K2-Y2	1.09	2.60	0.01	0.05	0.04	2.15
A-K2-Y3	1.08	3.27	0.01	0.29	0.05	3.74
A-K3-Y1	1.51	5.04	0.02	0.07	0.08	1.02
A-K3-Y2	1.34	9.94	0.06	0.18	0.16	1.34
A-K3-Y3	0.97	9.05	0.04	0.35	0.14	3.60

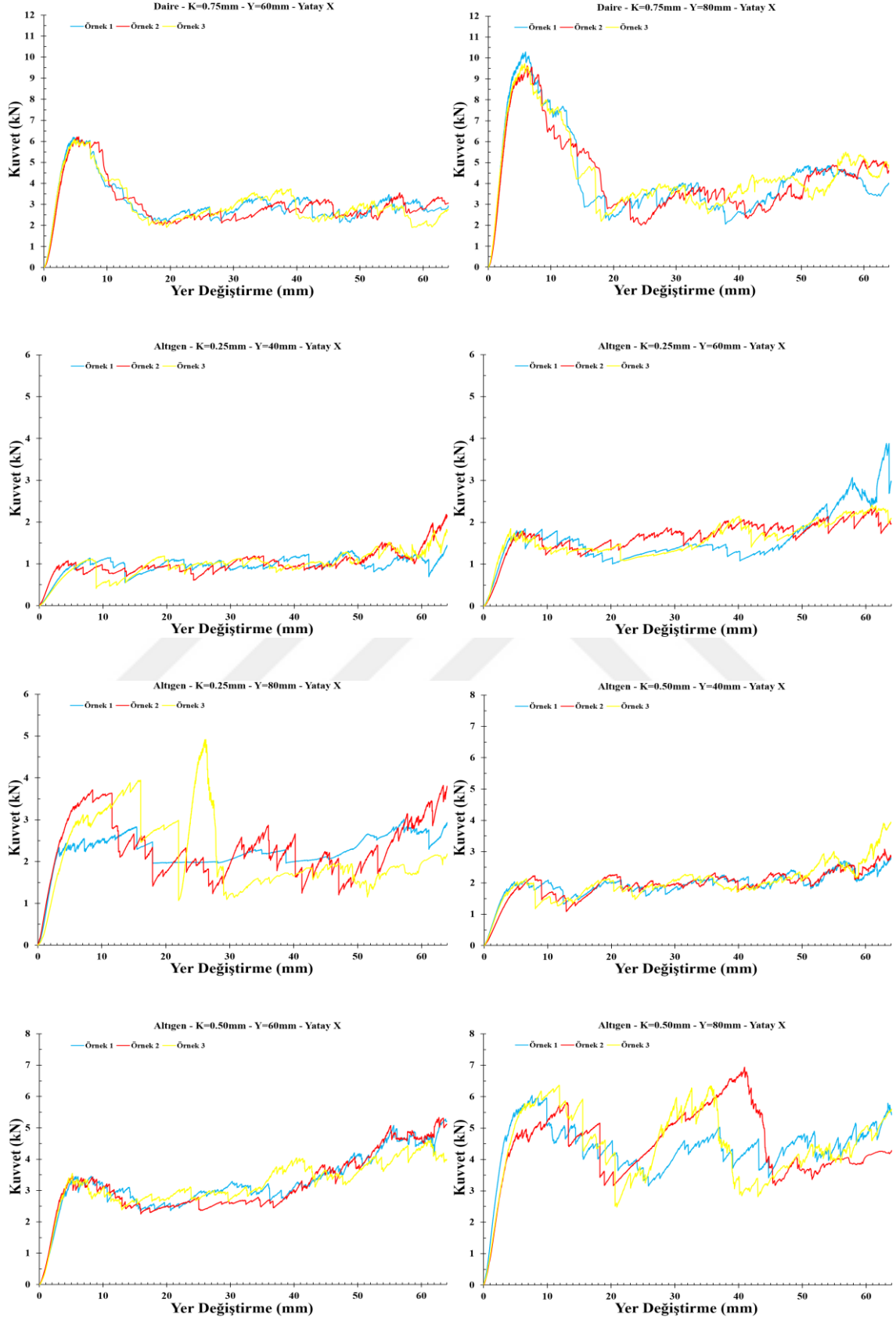
Şekil Ek- 3. Düzlem İçi Boylamsal yöndeki Kuvvet-Yer Değişirme Grafikleri



Şekil Ek-3. (Devamı)



Şekil Ek-3. (Devamı)



Şekil Ek-3. (Devamı)

