

**T. C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**3B YAZICI İLE ÜRETİLEN BAL PETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Serdar KAVELOĞLU**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**

**AĞUSTOS 2023**

**T. C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**3B YAZICI İLE ÜRETİLEN BAL PETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Serdar KAVELOĞLU  
(36173618010)**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**

**AĞUSTOS 2023**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e,

Tez sürecinde her zaman tecrübe ve desteklerini esirgemeyen 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş merkezli depremde kaybettiğimiz KSÜ Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı rahmetli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet KAYA ve kıymetli eşi rahmetli öğretmen Elif KAYA'ya,

Tez sürecinde teknik bilgi ve manevi desteklerini unutamayacağım Öğr. Gör. Murat ÇATALKAYA'ya,

Tez sürecinde öneri, bilgi ve laboratuvar çalışmalarında destek olan Dr. Öğr. Gör. M. Safa KAMER, Doç. Dr. Çağrı UZAY ve Doç. Dr. Oğuz DOĞAN'a,

Erken yaşta kaybettiğim beni yetiştiren rahmetli annem öğretmen Nurhan KAVELOĞLU, rahmetli babam emekli tapu müdürü Kazım KAVELOĞLU ve ablam Nihal KAVELOĞLU'na,

Çalışmalarım süresince bana moral, motivasyon ve zaman desteği sağlayan değerli eşim Ayşe KAVELOĞLU ve birbirinden kıymetli evlatlarıma,

Tezin uygulama aşamasında FDK-2020-2349 nolu proje ile vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine,

*Şükranlarımı sunuyor, teşekkür ediyorum.*

## ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “3B Yazıcı İle Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Serdar KAVELOĞLU



# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....</b>	<b>i</b>
<b>ONUR SÖZÜ .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÖZET .....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>4</b>
2.1 Üç Boyutlu Yazıcılar .....	4
2.1.1 Üç boyutlu yazıcı teknolojileri.....	5
2.1.1.1 Stereolitografi (SLA).....	5
2.1.1.2 Dijital ışık işleme (DLP) .....	6
2.1.1.3 Tabaka yapıştırırmalı parça imalatı (LOM).....	7
2.1.1.4 Eriyik yığıma modeli (FDM).....	8
2.1.1.5 Elektron ışınli ergitme (EBM).....	9
2.1.1.6 Üç boyutlu yazıcıların tarihçesi.....	10
2.2 Kompozitler .....	11
2.3 Bal Peteği Sandviç Kompozitler.....	13
2.3.1 Bal peteği sandviç kompozit üretim yöntemleri .....	15
2.3.1.1 Uzatarak şekil verme yöntemi .....	15
2.3.1.2 Kıvrılarak şekil verme yöntemi .....	16
2.3.2 Sandviç kompozitlerin uygulamaları .....	18
<b>3. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>22</b>
3.1 Üç Nokta Eğme Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması .....	22
3.2 Düşük Hızda Darbe Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması .....	24
3.3 Basma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması .....	255
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>29</b>
4.1 Test Numunelerinin Tasarım ve Üretimi .....	29
4.1.1 Üç nokta eğme test numunelerinin tasarım ve üretimi.....	29
4.1.2 Düşük hızda darbe test numunelerinin tasarım ve üretimi.....	35

4.1.3 Basma test numunelerinin tasarım ve üretimi .....	40
4.2 Deneysel Çalışmalar .....	45
4.2.1 Üç nokta eğme deneyleri.....	45
4.2.2 Düşük hızda darbe deneyleri.....	47
4.2.3 Basma deneyleri .....	49
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI .....</b>	<b>52</b>
5.1 Üç Nokta Eğme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	52
5.2 Düşük Hızda Darbe Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	56
5.3 Basma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	73
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>822</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>88</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 4.1:</b> Eni ve boyu 200 mm - 50 mm ölçülerindeki eğme numunelerin yüzey alan değerleri.....	<b>31</b>
<b>Çizelge 4.2:</b> Ultimaker Cura 4.10.0 CAM yazılımında seçilen parametreler .....	<b>311</b>
<b>Çizelge 4.3:</b> PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri.....	<b>35</b>
<b>Çizelge 4.4:</b> Eni ve boyu 100 mm - 100 mm ölçülerindeki darbe numunelerinin yüzey alan değerleri.....	<b>36</b>
<b>Çizelge 4.5:</b> PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri.....	<b>40</b>
<b>Çizelge 4.6:</b> Basma numunelerin tasarımdan elde edilen hücre kesit alan değerleri .....	<b>41</b>
<b>Çizelge 4.7:</b> PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri.....	<b>45</b>
<b>Çizelge 4.8:</b> Enerji değerlerine göre darbe testi için seçilen parametreler.....	<b>48</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Bal peteğinin bal ile dolu görüntüsü .....	1
Şekil 1.2: Sandviç kompozit yapının kısımları .....	2
Şekil 1.3: Üç farklı ölçüdeki bir adet bal peteği geometrilerinin gösterimi a) Hücre genişliği 6 mm, duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9 mm, duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12 mm, duvar kalınlığı 1,6 mm.....	2
Şekil 2.1: 3D makinasının çalışma prensibi .....	4
Şekil 2.2: SLA teknolojisi kullanılarak üretilmiş 3D baskı objesi.....	5
Şekil 2.3: SLA makinesinin bileşenleri.....	6
Şekil 2.4: DLP makinesinin bileşenleri .....	7
Şekil 2.5: LOM makinesinin bileşenleri. ....	8
Şekil 2.6: FDM makinesinin bileşenleri . ....	9
Şekil 2.7: EBM teknolojisinin çalışma prensibi .....	10
Şekil 2.8: Kompozit malzemenin elde edilmesi.....	13
Şekil 2.9: Bal peteğinin gösterimi.....	13
Şekil 2.10: Altıgen hücrenin geometrik gösterimi .....	14
Şekil 2.11: a) Bal peteği sandviç yapısının boyutları b) Bal peteği sandviç yapısı .....	15
Şekil 2.12: Uzatarak şekil verme yöntemi .....	16
Şekil 2.13: Kıvrılarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi .....	16
Şekil 2.14: Petek sandviç yapısı 1. Dış Alüminyum kaplama, 2. Yapıştırıcı, 3. Alüminyum petek çekirdek, 4. Dahili Alüminyum kaplama .....	17
Şekil 2.15: Kare petek panelin temel boyutları.....	17
Şekil 2.16: Sandviç panellerin patlama testinin şeması. ....	18
Şekil 2.17: Yükleme ve kenetleme konfigürasyonu ile sandviç giriş geometrisinin taslağı.....	19
Şekil 2.18: Birleşik sıvı-yapı etkileşimi FE hesaplamaları .....	20
Şekil 2.19: Şok tüpü ile sandviç bileşenin montaj resmi. ....	21
Şekil 4.1: Üç farklı büyüklükteki bal peteği geometrilerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında üst görünüşlerine ait ekran görüntüleri a) Hücre genişliği 6 mm, hücre duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9 mm, hücre duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12 mm, hücre duvar kalınlığı 1,6 mm.....	30
Şekil 4.2: 200 mm – 50 mm ölçülerindeki eğme numunelerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında üst görünüşlerine ait ekran görüntüleri a) Hücre genişliği 6mm, hücre	



duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9mm, hücre duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12mm, hücre duvar kalınlığı 1,6 mm.....	31
<b>Şekil 4.3:</b> a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcıda eğme numunesinin görüntüsü b) Farklı hücre genişliği ve yüksekliğinde üretilmiş çekirdeklerin görüntüsü. ....	32
<b>Şekil 4.4:</b> Sandviç yapıların yapıştırma aşama görüntüleri.....	33
<b>Şekil 4.5:</b> Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı sandviç numune; b) İki katlı sandviç numune.....	33
<b>Şekil 4.6:</b> Eğme testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.....	34
<b>Şekil 4.7:</b> 100 mm – 100 mm ölçülerindeki darbe numunelerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında izometrik görünüşüne ait ekran görüntüsü .....	35
<b>Şekil 4.8:</b> Üç farklı hücre genişliğinde bal peteği darbe numunelerinin boyutlarının Solidworks® 2018 programındaki görüntüleri a. Hücre genişliği 6 mm b. Hücre genişliği 9 mm c. Hücre genişliği 12 mm. ....	36
<b>Şekil 4.9:</b> a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcının görüntüsü b) PLA darbe numunesinin yazdırma görüntüsü. ....	37
<b>Şekil 4.10:</b> CFRP plakaların görüntüleri.....	37
<b>Şekil 4.11:</b> Sandviç yapıların yapıştırma aşamalarının görüntüsü.....	38
<b>Şekil 4.12:</b> Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı sandviç numune b) İki katlı sandviç numune.....	38
<b>Şekil 4.13:</b> Darbe testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.....	39
<b>Şekil 4.14:</b> 75 mm - 75 mm eni ve boyunda sırasıyla 6-9-12 mm hücre genişliğinde, 10 mm yüksekliğindeki basma numunelerinin Solidworks 2018 CAD tasarım görüntüleri: a); b); c) üst görünüşleri.....	41
<b>Şekil 4.15:</b> Ultimaker Cura 4.7 Cam yazılım görüntüsü.....	41
<b>Şekil 4.16:</b> a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcının görüntüsü b) PLA numunenin bitmiş görüntüsü.....	42
<b>Şekil 4.17:</b> Sandviç yapıların yapıştırma aşama görüntüleri.....	43
<b>Şekil 4.18:</b> Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı; b) İki katlı.....	43

<b>Şekil 4.19:</b> Basma testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.....	<b>44</b>
<b>Şekil 4.20:</b> Hibrit sandviç kompozitin üç nokta eğme test düzeneğine ait Solidworks® 2018 programında şematik gösterimi .....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.21:</b> a) Zwick/Roell Z100 eğme test cihazı görüntüsü b) Alt destek mesafesinin ayar şablonu c) Numunelerin konum şablonu .....	<b>47</b>
<b>Şekil 4.22:</b> Düşük hızda darbe deneyinin şematik görüntüsü. ....	<b>47</b>
<b>Şekil 4.23:</b> a) Instron ceast 9350 darbe test cihazı görüntüsü b) Hibrit darbe numunesinin test sırasındaki görüntüsü .....	<b>48</b>
<b>Şekil 4.24:</b> a) Zwick/Roell Z100 basma test cihazı görüntüsü b) Numuneyi alt tablaya merkezini sağlayan şablonun görüntüsü.....	<b>49</b>
<b>Şekil 4.25:</b> a) Numuneyi alt tablaya merkezini sağlayan şablonun görüntüsü b) Numunenin basma testi esnasındaki görüntüsü.....	<b>50</b>
<b>Şekil 4.26:</b> Shimadzu AG-IC 250 kN kapasiteli universal çekme test cihazı görüntüsü. ...	<b>51</b>
<b>Şekil 5.1:</b> Tek katlı eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri .....	<b>52</b>
<b>Şekil 5.2:</b> İki katlı eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri .....	<b>52</b>
<b>Şekil 5.3:</b> Hibrit eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri .....	<b>53</b>
<b>Şekil 5.4:</b> Tek katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 5.5:</b> İki katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 5.6:</b> Hibrit eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 5.7:</b> Aynı hücre genişliğindeki tek katlı ve iki katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet- sehim grafikleri a) S_6 ile D_6/6 numuneleri b) S_9 ile S_9/9 numuneleri c) S_12 ile S_12/12 numuneleri.....	<b>56</b>
<b>Şekil 5.8:</b> Tek katlı hücre genişliği 6mm, 9mm, 12mm olan sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) S_6 darbe numunelerine ait görüntüler b) S_9 darbe numunelerine ait görüntüler c) S_12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	<b>57</b>
<b>Şekil 5.9:</b> Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/6	

darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	57
<b>Şekil 5.10:</b> Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit iki katlı sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	58
<b>Şekil 5.11:</b> Tek katlı hücre genişliği 6mm, 9mm, 12mm olan sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) S_6 darbe numunelerine ait görüntüler b) S_9 darbe numunelerine ait görüntüler c) S_12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	59
<b>Şekil 5.12:</b> Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/6 darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	59
<b>Şekil 5.13:</b> Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit iki katlı sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	60
<b>Şekil 5.14:</b> Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 140J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/6 darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	61
<b>Şekil 5.15:</b> Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit sandviç kompozit numunelerin 140J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.....	61
<b>Şekil 5.16:</b> Düşük hızda darbe testinden elde edilecek muhtemel grafikler a) Delinmemiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği b) Delinmiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği c) Tipik enerji-zaman grafiği .....	62
<b>Şekil 5. 17:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri .....	63
<b>Şekil 5.18:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.....	633

<b>Şekil 5.19:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri .....	<b>644</b>
<b>Şekil 5.20:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 5.21:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri.....	<b>66</b>
<b>Şekil 5.22:</b> Hibrit iki sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>666</b>
<b>Şekil 5.23:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri .....	<b>67</b>
<b>Şekil 5.24:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>677</b>
<b>Şekil 5.25:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri .....	<b>688</b>
<b>Şekil 5.26:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 5.27:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 5.28:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>700</b>
<b>Şekil 5.29:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri. ....	<b>711</b>
<b>Şekil 5.30:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>711</b>
<b>Şekil 5.31:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri.....	<b>722</b>
<b>Şekil 5.32:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği. ....	<b>733</b>
<b>Şekil 5.33:</b> Tek katlı S_6 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri. ....	<b>733</b>
<b>Şekil 5.34:</b> Tek katlı S_9 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri. ....	<b>733</b>
<b>Şekil 5.35:</b> Tek katlı S_12 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri. ....	<b>744</b>

<b>Şekil 5.36:</b> Hibrit iki katlı D_6/9 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri. ....	<b>744</b>
<b>Şekil 5.37:</b> Hibrit iki katlı D_9/12 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri. ....	<b>744</b>
<b>Şekil 5.38:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	<b>755</b>
<b>Şekil 5.39:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinde elde edilen maksimum basma kuvvet grafiği. ....	<b>755</b>
<b>Şekil 5.40:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri. ....	<b>766</b>
<b>Şekil 5.41:</b> Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen hücre genişliğine bağlı maksimum basma kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	<b>766</b>
<b>Şekil 5.42:</b> İki katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri. ....	<b>777</b>
<b>Şekil 5.43:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	<b>777</b>
<b>Şekil 5.44:</b> Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri. ....	<b>788</b>
<b>Şekil 5.45:</b> Hibrit ve iki katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen birleşik kuvvet-yer değiştirme grafiği. ....	<b>788</b>

# ÖZET

Doktora Tezi

## 3B YAZICI İLE ÜRETİLEN BAL PETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SERDAR KAVELOĞLU

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

89+XIII sayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bal peteği kompozit sandviç yapılar hafif olmaları, ağırlığına oranla darbe ve basma dayanımlarının yüksek olmasından dolayı tercih edilmektedirler. Ayrıca üretilen malzemeye bağlı olarak kimyasallara ve suya karşı dayanıklı olması, vidalama, delme, ekleme, tamirat gibi birçok kullanım özelliklerinden dolayı otomotiv, uçak, hafif ticari araç, yatçılık, hızlı tren, inşaat, ambalaj, rüzgâr enerjisi, güneş panelleri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Sandviç yapılar, alt ve üst örtü arasına çekirdek bir yapının yapıştırılmasından oluşan kompozit yapı elemanlarıdır. Örtüler ince, katı ve yoğunluğu fazladır. Çekirdek ise örtüye göre daha kalındır ve daha düşük yoğunluklu malzemelerden tercih edilir. Sandviç yapılarda basma, darbe, eğme dayanımı gibi amaçlanan mekanik özelliklere sahip olması için birçok çalışma mevcut olup araştırılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığındaki bal peteği geometrileri kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda polilaktik asit (PLA) filamentten çekirdekler üretilmiştir. Üretilen çekirdekler alt ve üst yüzeyleri karbon fiber takviyeli kompozit plakalarla (CFRP) yapıştırıcı ile birleştirilen tek katlı ve iki katlı sandviç kompozitlerin deneysel yöntemlerle mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı sırasıyla 6\_0,8 mm, 9\_1,2 mm ve 12\_1,6 mm ölçülerindeki bal peteği geometrileri kullanılmıştır. Eşit yüzey alanı elde etmek amacıyla hem hücre genişliği hem de hücre duvar kalınlıkları artırılarak bu ölçüler tercih edilmiştir. İki katlı numuneler her bir katı aynı ve farklı (hibrit) hücre genişliğine sahip çekirdeklerden üretilmiştir. Üç farklı hücre genişliğinde fakat birbirine yakın yüzey alanlarına sahip numunelere üç nokta eğme, düşük hızda darbe ve basma testleri uygulanmıştır. Testlerden elde edilen grafiklerle numunelerin testlere karşı gösterdikleri davranışlar incelenmiş ve yorumlar yapılmıştır. Basma testlerinde hücre genişliği 12 mm olan tek ve iki katlı numunelerin basma dayanımları yüksek çıkmıştır. Eğme testlerinde en yüksek eğilme rijitliği 6 mm hücre genişliğindeki tek katlı ve iki katlı numunelerde tespit edilmiştir. Üç farklı enerji seviyelerinde (80J, 100J ve 140J) uygulanan düşük hızda darbe testlerinde 6 mm hücre genişliğine sahip numunelerin daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bal peteği, Sandviç Kompozit, 3 Boyutlu Yazıcı, Mekanik Özellikler

## ABSTRACT

Phd. Thesis

### INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF HONEYCOMB SANDWICH COMPOSITES PRODUCED BY 3D PRINTER

Serdar Kaveloğlu

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

89+XIII page

2023

Supervisor: Prof. Dr. şemsettin TEMİZ

Honeycomb composite sandwich structures are preferred because they are light and have high impact and compression strength compared to their weight. In addition, it is used in many sectors such as automotive, aircraft, light commercial vehicle, yachting, high-speed train, construction, packaging, wind energy, solar panels due to its many usage features such as being resistant to chemicals and water, screwing, drilling, adding, and repairing depending on the material produced. Sandwich structures are composite building elements that consist of bonding a core structure between the bottom and top face sheet. Face sheets are thin, solid and dense. The core is thicker than the face sheet and lower density materials are preferred. There are many studies available for sandwich structures to have mechanical properties such as compression, impact and bending strength, and they continue to be researched and developed.

Within the scope of the thesis, cores from polylactic acid (PLA) filament were produced in a 3D printer using honeycomb geometries with three different cell widths and cell wall thicknesses. The mechanical properties of single-layer and two-layer sandwich composites, of which the produced cores are bonded with carbon fiber reinforced composite plates (CFRP) on the lower and upper face sheets, were investigated by experimental methods. Honeycomb geometries with three different cell widths and cell wall thicknesses of 6\_0.8 mm, 9\_1.2 mm and 12\_1.6 mm, respectively, were used in the study. In order to obtain equal surface area, these dimensions were preferred by increasing both cell width and cell wall thickness. Two-layer samples were produced from core with each solid having the same and different (hybrid) cell widths. Three-point bending, low speed impact and compression tests were applied to the samples with three different cell widths but close to each other surface areas. With the graphics obtained from the tests, the behaviors of the samples against the tests were examined and comments were made. In the compression tests, the compressive strength of the single-layer and double-layer samples with a cell width of 12 mm was found to be high. In the bending tests, the highest bending stiffness was determined in single-layer and double-layer specimens with a cell width of 6 mm. It was determined that samples with 6 mm cell width performed better in low-speed impact tests applied at three different energy levels (80J, 100J and 140J).

**Keywords:** Honeycomb, Sandwich Composite, 3D Printer, Mechanical Properties

## 1.GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji ile beraber geleneksel malzemelerin yerine daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip çok fonksiyonlu malzemelerin arayışına başlanmıştır. Bu arayışla birlikte farklı özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemler kullanılarak fiziksel olarak birleştirilmesi ile kompozit malzemeler elde edilmiştir [1], [2].

Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, darbe dayanımı, rijitlik, korozyon dayanımı ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı ilgi görmeye devam etmektedir. Bu yüzden kompozit malzemeler havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv, yapı malzemeleri, taşımacılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [1], [2].

İnsanoğlu doğada bulunan canlılardan ilham alarak kendisine kolaylık sağlayan birçok alet ya da araç üretmiştir. Birbirine karışmayan tendonlardan çelik halat, yunus balıklarından sonar cihazı, kuşların kanatlarından uçak kanatları, yarasalardan radar cihazının yapımı gibi birçok örnekler mevcuttur. Şekil 1.1'deki resimde görülen bal peteği geometrisinin kullanımı da insanların doğadan faydalandığı örneklerden biridir. Çünkü matematikçiler bir alanın maksimum kullanımı için en uygun geometrinin altıgen olduğunu tespit etmişlerdir. Arılar en çok balı altıgen hücrede depolarken, inşa etmek için en az miktarda balmumu gerektiren en verimli formu kullanırlar.

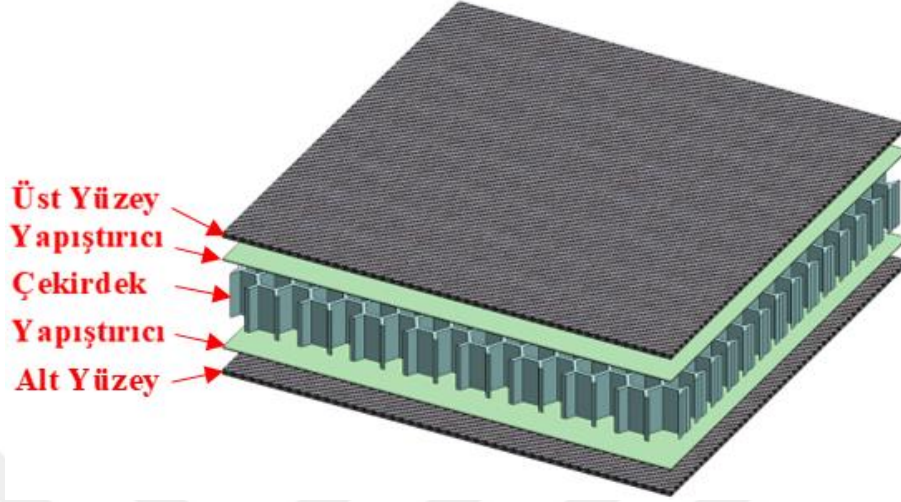


**Şekil 1.1:** Bal peteğinin bal ile dolu görüntüsü

Bal peteği sandviç yapılar kompozit malzemelerin uygulama örneklerinden birisi olup, kütesine oranla yüksek eğme ve basma dayanımı, darbe enerjisini emme yeteneği ve hafif olması gibi özelliklerinden dolayı birçok sektör tarafından tercih edilmektedir. Sandviç

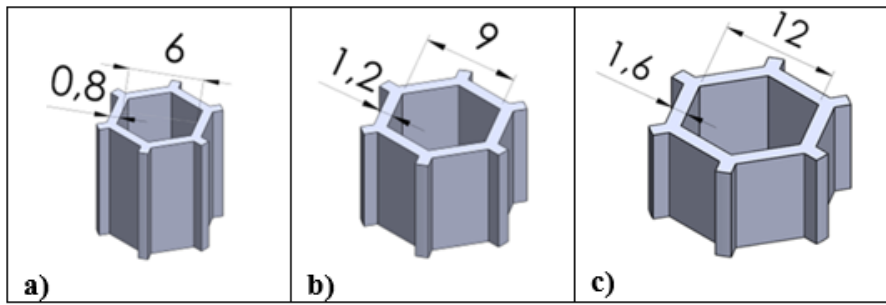


yapılar Şekil 1.2’de görüldüğü üzere kalınlığı ince, mukavemeti ve yoğunluğu fazla alt ve üst yüzey arasına kalınlığı yüksek, yoğunluğu ve mukavemeti yüzeye göre daha düşük çekirdek olarak adlandırılan kısmın yapıştırıcı ile birleştirilmesinden oluşur.



Şekil 1.2: Sandviç kompozit yapının kısımları

Bu çalışmada, alt ve üst yüzeylerde karbon fiber takviyeli kompozit plakalar (CFRP) ile 3 boyutlu yazıcıda polilaktik asit (PLA) filamentten bal peteği geometrisinde üretilen çekirdeklerin yapıştırılarak elde edilen tek ve iki katlı sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada Şekil 1.3’de gösterilen üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı sırasıyla 6\_0,8 mm, 9\_1,2 mm ve 12\_1,6 mm ölçülerine sahip bal peteği geometrilerinden faydalanılmıştır.



Şekil 1.3: Üç farklı ölçüdeki bir adet bal peteği geometrilerinin gösterimi a) Hücre genişliği 6 mm, duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9 mm, duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12 mm, duvar kalınlığı 1,6 mm

Yapılan mekanik test numunelerinde hücre genişliğini artırdıkça eşit yüzey alanı elde etmek için hücre duvar kalınlıkları da artırılmıştır. Böylelikle çalışmamızın literatürden farklı olarak birbirine yakın yüzey alanlarına sahip sandviç kompozitlerin hücre sayısı ve duvar

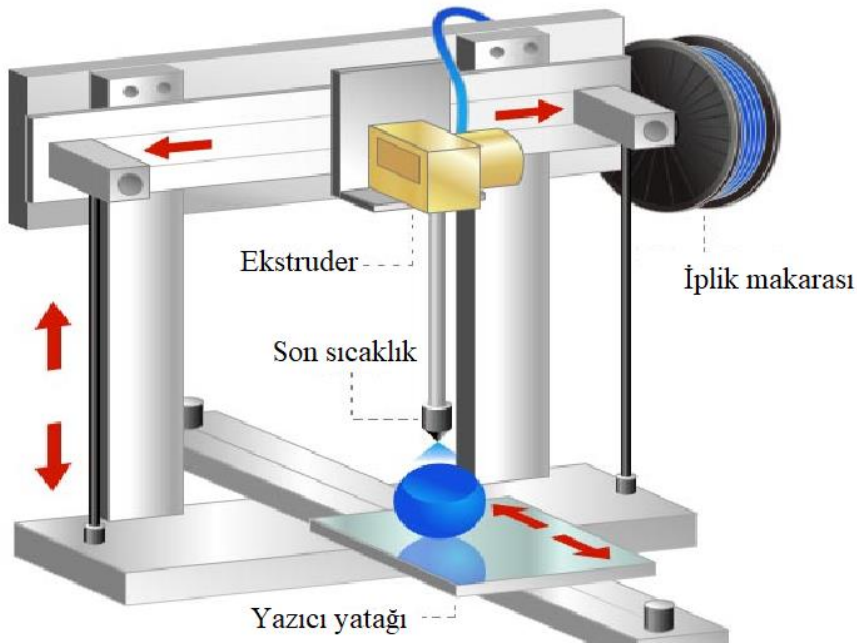
kalınlıklarının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Tek katlı, aynı hücre genişliğinde iki katlı ve farklı hücre genişliğinde (hibrit) iki katlı çekirdekler kullanılarak üretilen numunelere üç nokta eğme, düşük hızda darbe ve basma testleri gerçekleştirilmiştir.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Üç Boyutlu Yazıcılar

Üç boyutlu (3D) yazıcı soyut olarak düşünülen objelerin bilgisayar ortamında dijital verilerle dizayn edilen üç boyutlu nesnelerin katı formlarda elde edilerek üretimini sağlayan cihazdır. 3 boyutlu yazıcılar filament adı verilen hammaddeyi kullanarak katmanlı bir şekilde üretim yapar. Kullanılan uzun veya kısa filamentler elde edilen ürün kalitesinde önemli rol oynamaktadır. Aynı zamanda tasarlanan ürünün kalitesi kullanılan reçineye göre de değişmektedir. İhtiyaca uygun 3D yazıcı modeli seçilmeli ve bilgisayar ortamına aktarılmış 3 boyutlu tasarım modelleri AutoCAD, 3Ds Max, SolidWorks gibi programlarla yazıcıya aktarılır. Devam eden süreçte baskı işlemi yapılır. 3D yazıcılar geleneksel yöntemle göre daha hızlıdır ve çeşitli ürünlerin tasarlanmasında kolaylıklar sağlamaktadır. 3D tasarımların birçok uygulama alanı vardır. Tıp, otomotiv, inşaat sektörü, eczacılık, eğitim, sanayi ürünleri, havacılık ve uzay, tekstil, denizcilik ve eğlence ürünleri gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de 3D makinasının çalışma prensibi gösterilmiştir [3].



Şekil 2.1: 3D makinasının çalışma prensibi [4].

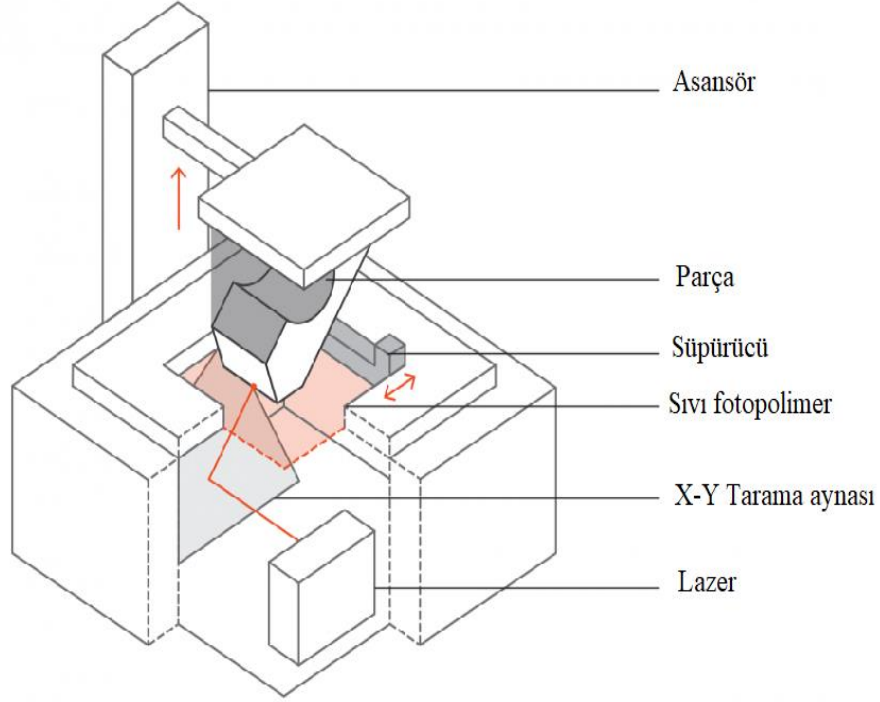
## 2.1.1 Üç boyutlu yazıcı teknolojileri

### 2.1.1.1 Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi (SLA) teknolojisi oda sıcaklığında sıvı halde bulunan reçineyi lazer (ultraviyole) veya projeksiyon ışığı ile belirli bölgelerin sertleştirilmesi prensibiyle çalışan 3 boyutlu yazıcı teknolojisidir. Reçine katmanı birinci katmanın üzerine yapışır ve sertleştirme işlemi sırasıyla devam eder, katmanlar bittikten sonra üretilen parça reçine havuzundan çıkarılır. Günümüzde Stereolitografi teknolojisinin iki tipi vardır: bunlardan birincisi; Lazer bazlı (tipik olarak SLA olarak kısaltılır) ikincisi; Projeksiyon temelli (dijital ışık projeksiyonu için kısaltılmış DLP). Bu yöntemde sıvı içerisinden çıkartılan objede çıkıntılı formlar, ters açılar gibi bir takım istenmeyen olumsuzluklar meydana gelebilir. Yüksek çözünürlüklü baskılar elde edilmesine rağmen stereolitografide baskının mukavemeti diğer yöntemlere göre daha düşük kalmaktadır. Şekil 2.2 SLA teknolojisi ile oluşturulmuş bir 3B yazdırılmış nesneyi, Şekil 2.3 SLA makinesinin bileşenlerini göstermektedir [5].



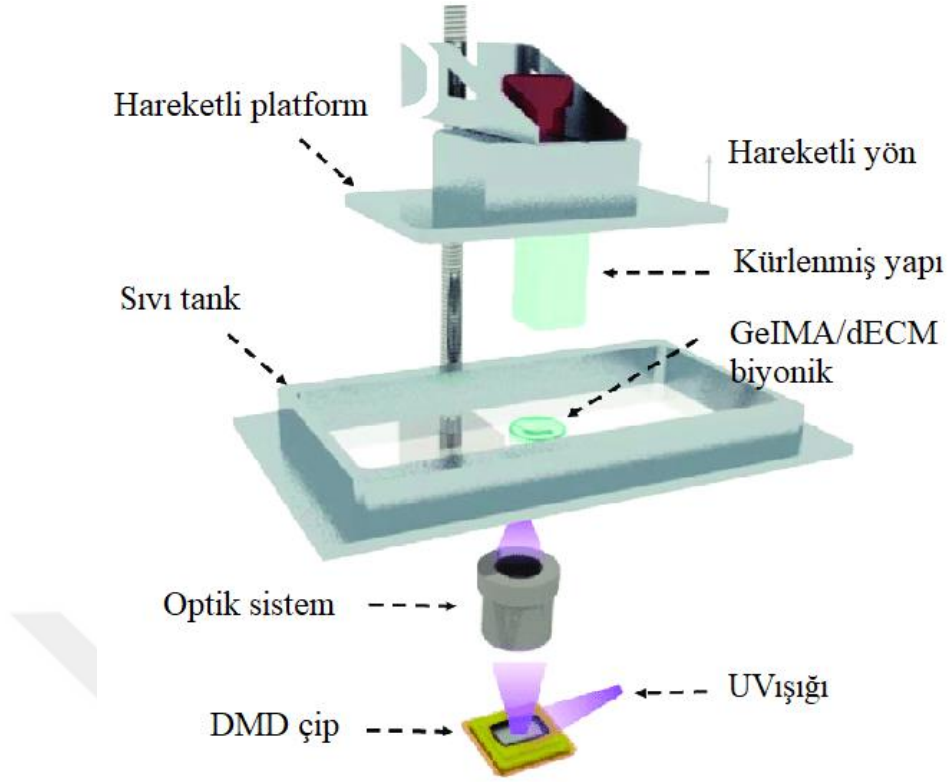
Şekil 2.2: SLA teknolojisi kullanılarak üretilmiş 3D baskı objesi [5].



Şekil 2.3: SLA makinesinin bileşenleri [6].

#### 2.1.1.2 Dijital ışık işleme (DLP)

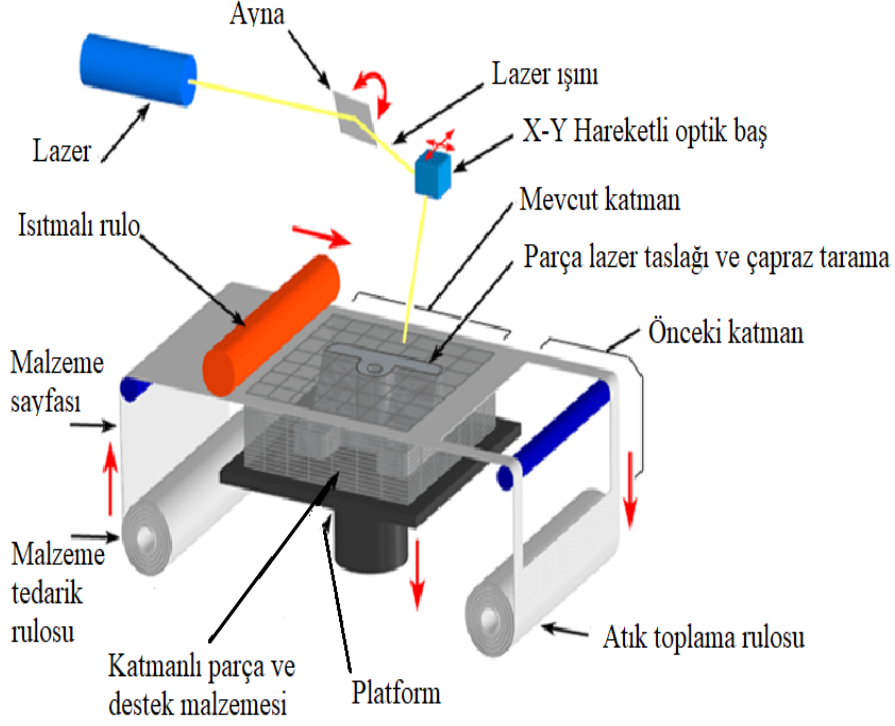
Dijital Işık İşleme (DLP, Digital Light Processing) makinelerinin teknolojisi, 3D baskı teknolojisi SLA teknolojisinin özellikleriyle birçok ortak noktası vardır. Fakat aralarındaki en önemli fark, reçine ve enerji kaynağıdır. DLP tekniği SLA'ya göre daha hızlıdır çünkü tek seferde her katmanı bir kerede flaş eder. Ayrıca DLP tekniğinde kullanılan dijital ışık reçinede anlık katılaşmaya neden olur. Şekil 2.4'de DLP makinesinin bileşenleri gösterilmiştir [7].



Şekil 2.4: DLP makinesinin bileşenleri [8].

### 2.1.1.3 Tabaka yapıştırırmalı parça imalatı (LOM)

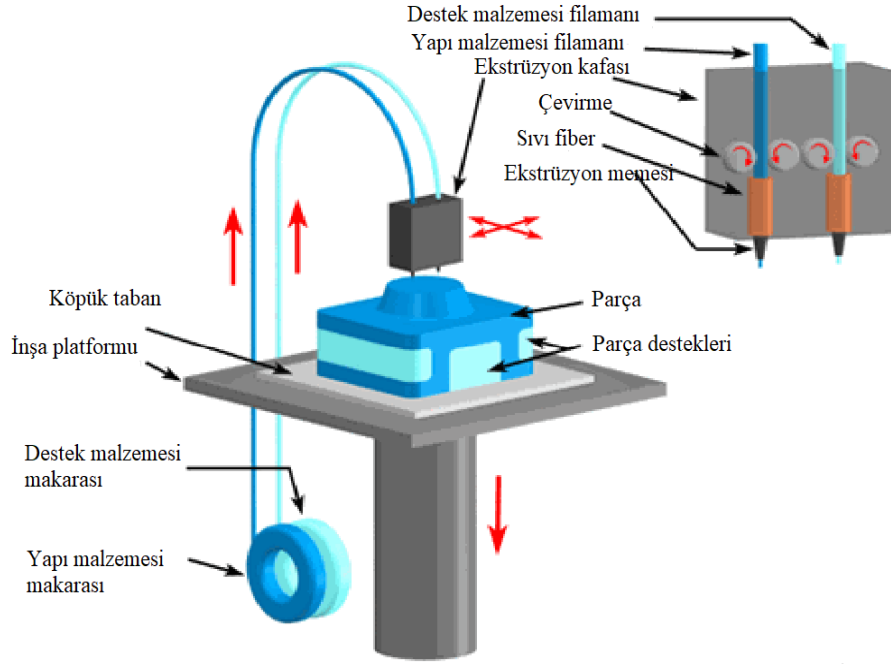
Tabaka Yapıştırırmalı Parça İmalatı (LOM, Laminated Object Manufacturing) çevre dostu teknolojidir ve hızlı üretim için olanak sağlamaktadır. Malzeme olarak kaplanmış kâğıt, plastik köpük veya seramik ve metal tozu emdirilmiş malzemeler de bu teknolojiye kullanılabilir. Geri dönüşüm malzemelerinin üretimine olanak sağlamaktadır ve kullanılan malzemelerin kolay temin edilmesi, ucuz olması yöntemin en büyük avantajıdır. Doğru tasarım ve parametrelerin uygun seçilmesiyle, hemen hemen her boyutta yapısal ve işlevsel modeller tasarlanarak elde edilebilir. Şekil 2.5’de LOM makinesinin bileşenleri gösterildi [9].



**Şekil 2.5:** LOM makinesinin bileşenleri [10].

#### **2.1.1.4 Eriyik yığıma modeli (FDM)**

İngilizce’de Fused Deposition Modeling (FDM) olarak, dilimizde ise Eriyik Yığıma Modelleme olarak adlandırılan model günümüzde 3D baskıda en yaygın kullanıma sahip teknolojidir. Üretim sürecinde, parçanın enine kesit geometrisini katman izleyen bir memeden ekstrüde edilir. Yapı malzemesi genellikle filament formunda sağlanır. Sıcak formdaki plastik kolayca akar ve kolayca sertleşerek tabakayı oluşturur. Şekil 2.6’da FDM makinesinin bileşenleri gösterilmiştir.

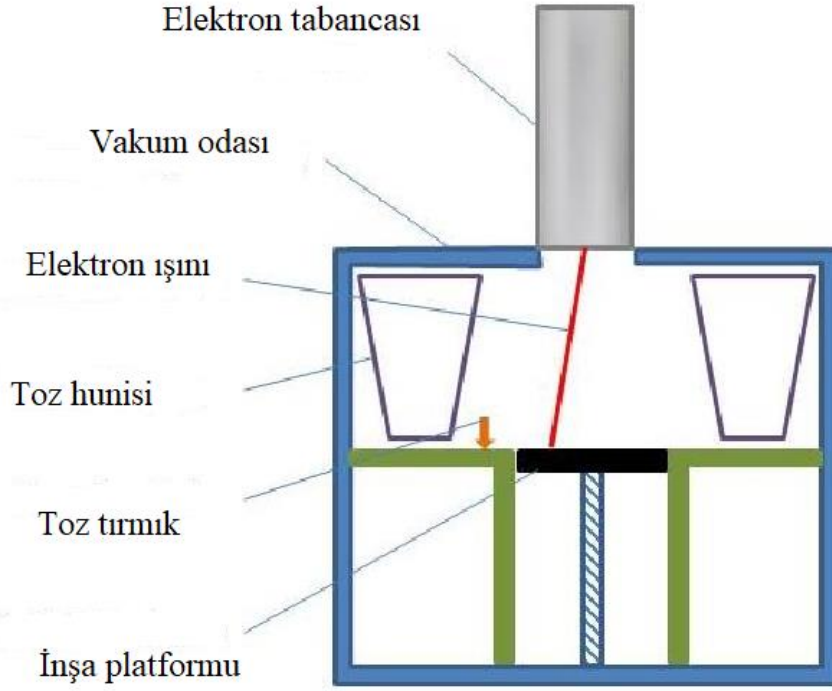


**Şekil 2.6:** FDM makinesinin bileşenleri [11].

#### **2.1.1.5 Elektron ışınli ergitme (EBM)**

Elektron Işınli Ergitme (EBM, Electron Beam Melting) teknolojisi, toz halindeki metalleri güçlü bir elektron ışını ile ısıtarak ergitme ve birleştirme prensibiyle çalışan prosese verilen addır. Hem güvenilir hem de çevre dostu teknoloji olması nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.7’de EBM teknolojisinin çalışma prensibi gösterilmiştir.





Şekil 2.7: EBM teknolojisinin çalışma prensibi [4].

#### 2.1.1.6 Üç boyutlu yazıcıların tarihçesi

3D yazıcılardaki gelişmeler son yıllarda hız kazanmasına rağmen aslında ilk çalışmalar uzun zaman önce başladığı bilinmektedir. Zaman içerisinde üç boyutlu yazıcı teknoloji üzerinde çok yönlü ilerlemeler kaydedilmiştir. 3 boyutlu yazıcılar olarak bilinen cihazlar sayesinde eklemeli imalat gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre 3 boyutlu yazıcılarla yapılan üretimlerde ekonomiklik, işçilik ve üretim hızı düşünüldüğünde 3 boyutlu yazıcılar daha avantajlıdır. 3 boyutlu yazıcılar günümüzde birçok sektörde yerini almıştır. Bunlardan bazıları tekstil, sağlık, gıda, eğitim, inşaat ve uzay teknolojisi gibi sektörler örnek verilebilir. 3 boyutlu yazıcıların tarihsel gelişimini kısaca özetlemek gerekirse:

- 1980: Japon Dr Kodama Hızlı prototipleme tarafından ilk patent
- 1984: Fransız mühendisler tarafından Stereolitografi daha sonra terk edildi
- 1986: Stereolitografi Charles Hull tarafından ele alındı
- 1988: İlk SLA-1 makinesi
- 1988: DTM Inc tarafından yapılan ilk SLS makinesi, ardından 3D sistemle satın alındı
- 1990: İlk EOS Stereolar sistemi
- 1992: Stratasys'e FDM patenti
- 1993: Solidscape kuruldu

- 1995: Z Corporation, MIT'den özel bir lisans aldı
- 1999: Tasarlanmış organlar tıbbi yeni gelişmeler getiriyor
- 2000: 3D baskılı çalışan bir böbrek oluşturuldu
- 2000: MCP Technologies (yerleşik bir vakumlu döküm OEM), SLM teknolojisini tanıttı
- 2005: Z Corp., Spectrum Z510'u piyasaya sürdü. Piyasadaki ilk yüksek çözünürlüklü renkli 3D Yazıcıydı
- 2006: Açık kaynaklı bir proje başlatıldı (Reprap)
- 2008: İlk 3D baskılı protez bacak
- 2009: Kamusal alanda FDM patentleri
- 2009: Sculpteo oluşturuldu
- 2010: Urbee, sunulan ilk 3D baskılı prototip otomobil
- 2011: Cornell Üniversitesi, 3D gıda yazıcısı üretmeye başladı.
- 2012: İlk protez çene basıldı ve implante edildi
- 2013: Obama'nın State of the Union konuşmasında "3D baskı"
- 2015: Carbon 3D, devrim niteliğindeki ultra hızlı CLIP 3D baskı makinesini yayınladı
- 2016: Daniel Kelly'nin laboratuvarı kemiği 3 boyutlu olarak yazdırabildiğini duyurdu
- 2018: İlk aile 3D baskılı bir eve taşındı

2020'lere gelindiğinde ise daha farklı imalat malzemelerinin gelişimiyle birlikte amacına uygun çok dayanıklı, sert veya esnek ürünler elde edilmesi hız kazandı [12], [13].

## 2.2 Kompozitler

Günümüzde sürekli artan ihtiyaçları karşılamak için gelişen teknolojiden faydalanmak suretiyle konvansiyonel malzemelerin yerini alabilecek, düşük maliyette ve üstün fiziksel, mekaniksel özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

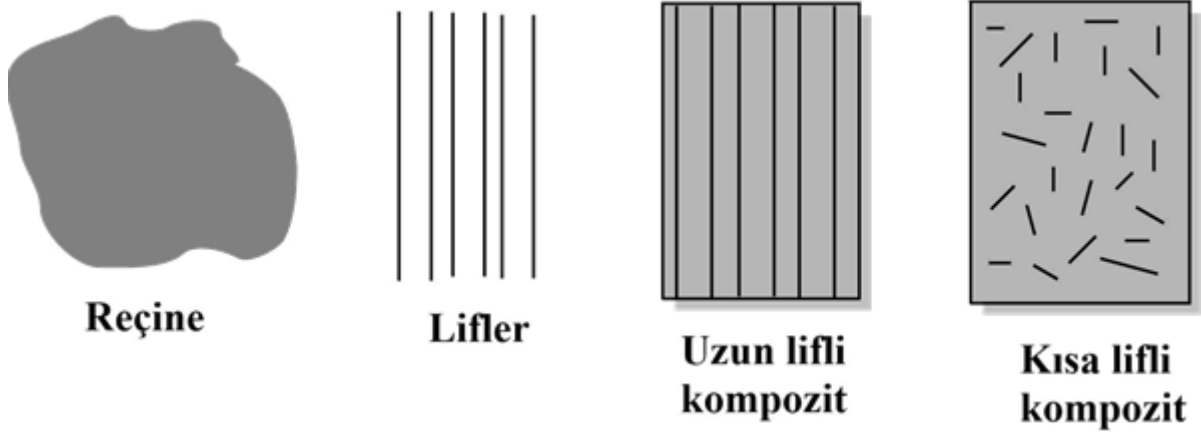
Kompozit malzemeler (heterojen) birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki veya ikiden daha fazla malzemenin bir araya gelerek makro düzeyde oluşturdukları yapı olarak bilinmektedir. Kompozit malzemelerin iyi korozyon direnci, düşük yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra yüksek mukavemet, uzun ömürlülük, rijitlik, darbe dayanımı ve yüksek sertliğe sahip olması gibi özelliklerinden dolayı çok tercih edilmektedir bu yüzden kullanım alanları genişlemektedir.

Kompozit malzemelerin birçok kullanım alanı vardır. Uzay endüstrisi, havacılık, zırh, otomotiv, altyapı, yalıtım, biyomedikal, denizcilik, spor malzemeleri (kayak, tenis raketleri gibi...), robot yapımı, müzik aletleri, sönümlenme kapasitesi, kimya sanayi ve savunma sanayii gibi birçok alanda geniş bir kullanım ihtiyacını karşılamaktadır.

Sandviç yapıların tasarımı, dış yüzey levhalarının aksel yükleri, eğilme momentlerini ve düzlem içi kesmeleri taşımasına izin verirken, çekirdek normal eğilme kesmelerini taşır. Sandviç yapılar, çekirdek/yüz levha düzeneğinin heterojen yapısından dolayı büyük normal yerel gerilim konsantrasyonları nedeniyle arızalara karşı hassastır [14].

Kompozit malzemeler farklı tabakaların yapıştırma yöntemi ile bir araya gelerek oluşturulan yapılardır. Tabakalı kompozit malzemelerin tabakalarında farklı uzunluklarda fiber takviyesi ile mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olmaktadır. Kompozit malzemelerin yüksek mukavemetlerinden dolayı özellikle havacılık ve savunma sanayilerinde uygulama alanları her geçen gün genişlemektedir. Hem hafif hem de yüksek dayanıklılığa sahip kompozit yapılar üretebilmek için, kompozit malzemelerin özelliklerinin tam olarak bilinmesi gereklidir. Çünkü kompozit malzemeler yüksek mukavemet direnci sergilerken homojen olmayan özelliklerinden dolayı gevrek yapıda olabilir.

Kompozit malzemelerde, liflerin dökünme şekli malzemenin farklı mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar. Kompozit malzemeler için mukavemetlerinin lif ekseni boyunca en yüksek olduğu önemli bir noktadır. Yükleme yönündeki uzun ve sürekli lifler matris reçinesinin istenilmeyen çok büyük gözenekli kompozitler ile noktalanır. Kısa uzunluklarda kesilen aynı malzeme, sürekli liflere göre daha düşük özellikler verir. Uygulama tipine (yapısal ve yapısal olmayan) ve üretim yöntemine bağlı olarak elyaf formu seçilir. Endüstriyel uygulamalar için sürekli elyaf veya uzun elyaf önerilir; yapısal olmayan uygulamalar için ise kısa elyaf önerilir. Entegrasyon ve kompresyon kalıplamada kısa lifler kullanılırken, filaman sarma, pultrüzyon ve rulo sarmada sürekli lifler kullanılır. Şekil 2.8' de kompozitlerin elde edilmesi gösterilmiştir [15], [16].



**Şekil 2.8:** Kompozit malzemenin elde edilmesi [15], [16].

### 2.3 Bal Peteği Sandviç Kompozitler

Kompozit malzemelerin alt sınıflarından birini temsil eden tabakalı kompozitlerden sandviç yapıları kompozitler geçmişten günümüze kadar bal peteklerinin geometrik şekilleri bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Bal Peteği sandviç kompozitlerin yapısındaki ana malzemeler ince ve yüksek mukavemetli alt, üst yüzey kaplamalarına ek olarak hafif ve düşük mukavemetli hücre çekirdek ile yapıştırıcı malzemelerinden meydana gelmektedir. Bal petekleri birçok alanda kullanılan sandviç kompozit malzemelerde iç dolgu malzeme işlevi görürler. Şekil 2.9’da bal peteğinin şekli verilmiştir.



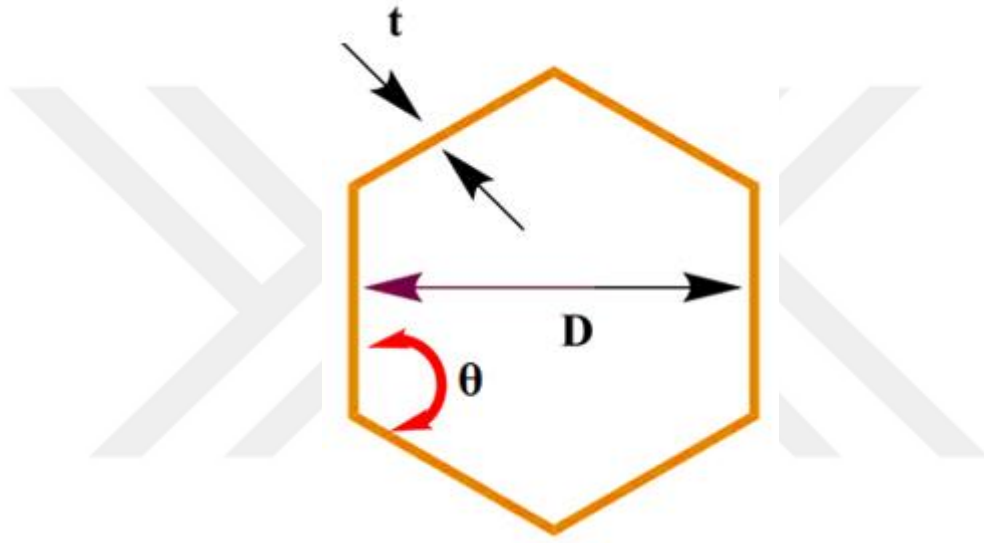
**Şekil 2.9:** Bal peteğinin gösterimi.

Alüminyum petek yapılar, yüksek mukavemetleri ve rijitlik/ağırlık oranlarından dolayı öncelikle havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere birçok endüstriyel alandaki

uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da altıgen hücrenin geometrik yapısı görülmektedir ve geometrik yapının birtakım özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

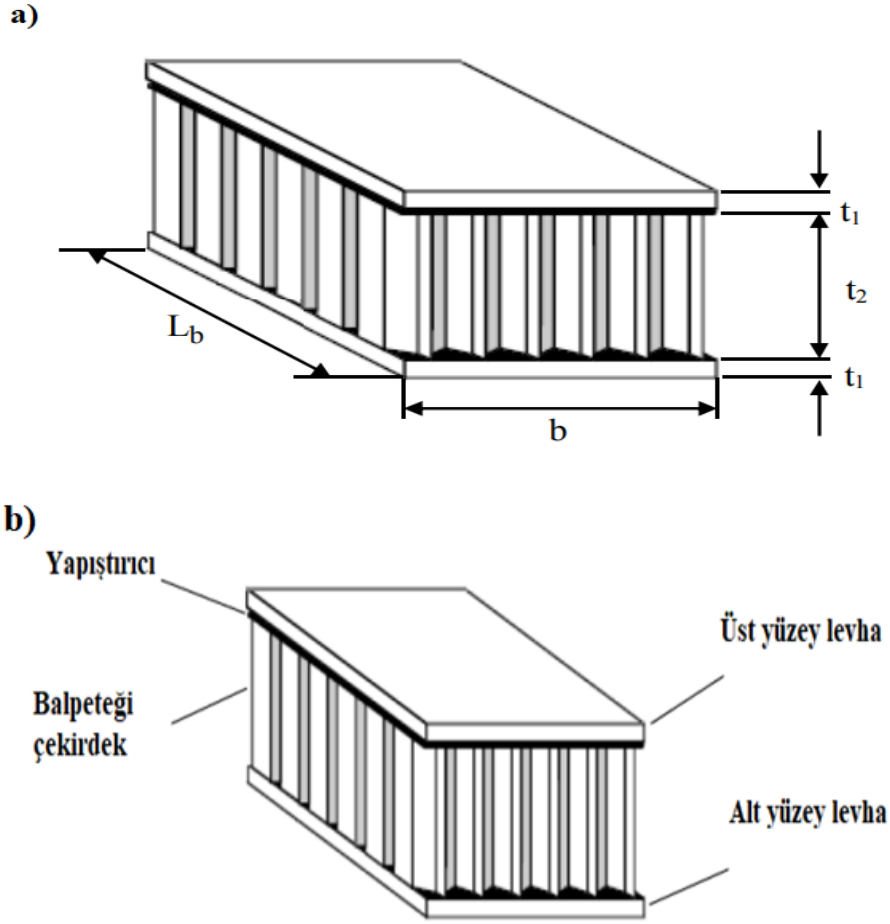
- Alüminyum petek yapının yoğunluğu;  $49 \text{ kg/m}^3$
- Hücre boyutu  $D=3,2 \text{ mm}$ 'dir
- Duvar boyutu  $t=0,254 \text{ mm}$ 'dir.
- Açı  $\theta=120^\circ$

Yapılan birçok araştırmalarda hücre duvarı kalınlığının işlem görmüş yüzeyin kalitesini önemli ölçüde etkilediği saptanmıştır [17].



**Şekil 2.10:** Altıgen hücrenin geometrik gösterimi [17].

Bal peteklerinin altıgen geometri yapısında olması, küçük alanlarda makro kapsama alanı sağlar. Bal peteklerinin altıgen geometrik yapısından dolayı kullanılacak malzeme miktarında verimlilik sağlanır. Sandviç kirişlerin görselleri ve şematik gösterimleri Şekil 2.11 a'da kirişin uzunluğu  $L_b$ , genişliği  $b$ , çekirdek kalınlığı  $t_2$ , alın sacı kalınlığı  $t_1$ 'dir. Şekil 2.11 b'de bal peteği sandviç yapısı görülmektedir.



Şekil 2.11: a) Bal peteği sandviç yapısının boyutları b) Bal peteği sandviç yapısı

Sandviç yapılar, alt ve üst yüzey iki tabaka arasında farklı kalınlıklara sahip çekirdek malzemelerin bir yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi sonucu oluşan kompozit malzemedir. Yapıştırıcı madde levhalar arasında düzgün şekilde uygulanabilmeli ve ince bir film oluşturabilecek şekilde bir yapıştırıcının seçilmesi gerekmektedir [18], [19].

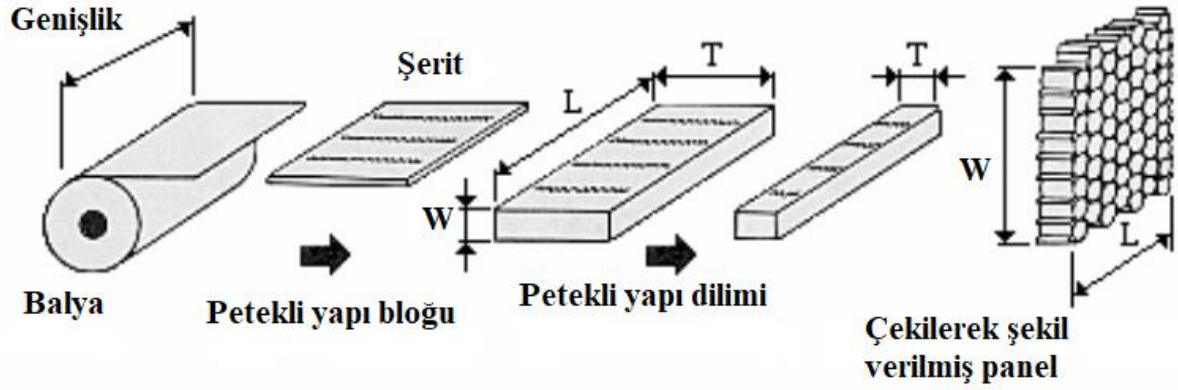
### 2.3.1 Bal peteği sandviç kompozit üretim yöntemleri

Bal peteği çekirdekli yapıların üretiminde genellikle yaygın olarak kıvrılarak veya uzatarak şekil verme teknikleri kullanılır.

#### 2.3.1.1 Uzatarak şekil verme yöntemi

Uzatarak şekil verme yöntemi metal veya metal olmayan malzemelerin üretiminde kullanılır. Bal petekli hücrelerin büyük kısmı genel olarak bu teknikle imal edilir. Şekil 2.12’de gösterilen bu yöntemde genellikle şerit şeklindeki panellerin kesilmesini ve yapıştırıcı kullanılarak panellerin bir arada istiflenmesi ile petekli malzemelerin seçilen sıcaklıkta pres

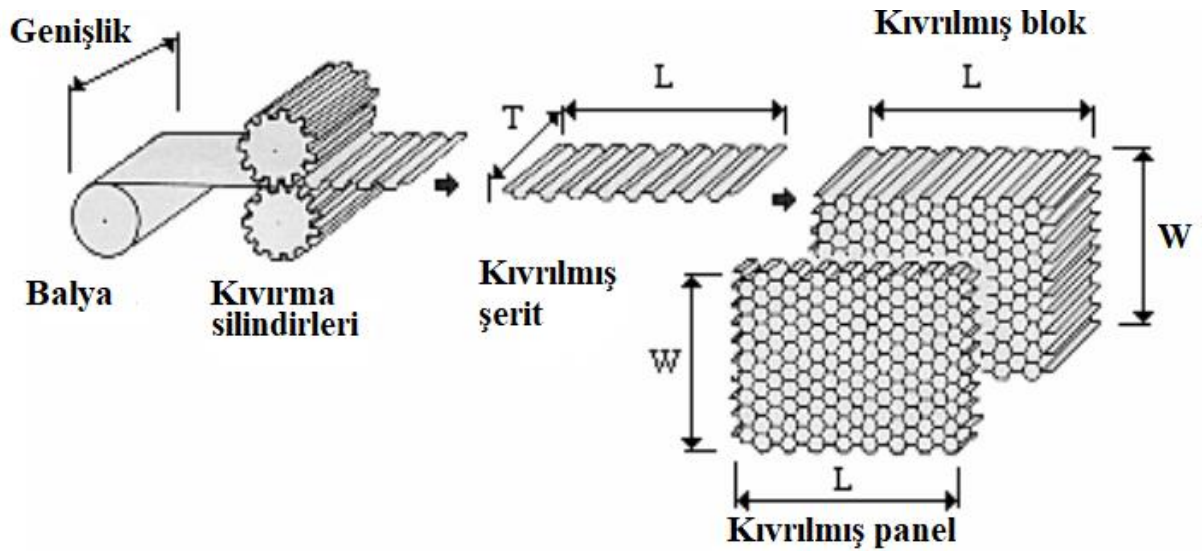
malzemesi içerisinde şekillendirilmesi aşamalarını kapsar. Rulo halindeki çekirdek malzeme istenilen boyutlarda kesilip çekilmesi ile şekil almaktadır.



Şekil 2.12: Uzatarak şekil verme yöntemi [20], [21].

### 2.3.1.2 Kıvrarak şekil verme yöntemi

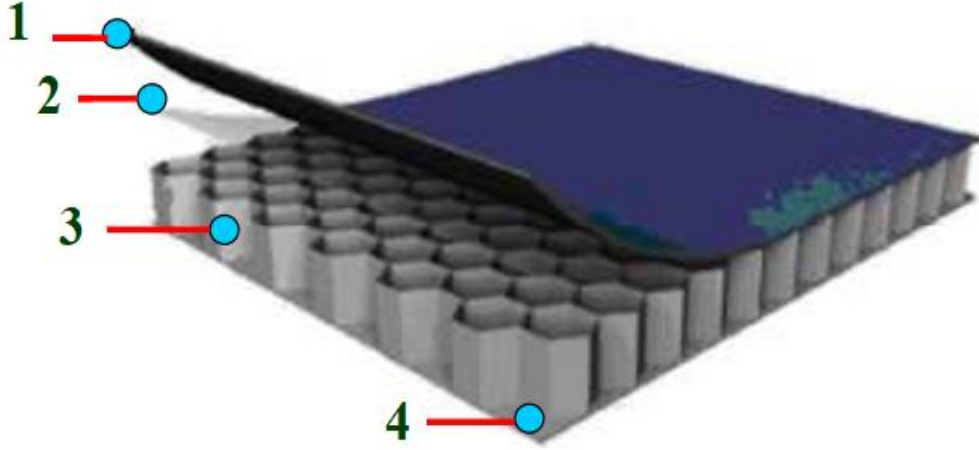
Kıvrma yöntemi metodunda yüksek sıcaklık etkisinde şerit levhalar tercih edilen uzunlukta kıvrılarak düğüm noktalarına uygun yapıştırıcının tatbik edilmesi ile üst üste yığılarak elde edilir. Metal veya metal olmayan malzemelerin üretiminde kullanılır. Şekil 2.13'te uzatarak şekil verme yöntemi gösterilmiştir [20], [21].



Şekil 2.13: Kıvrarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi [20], [21].

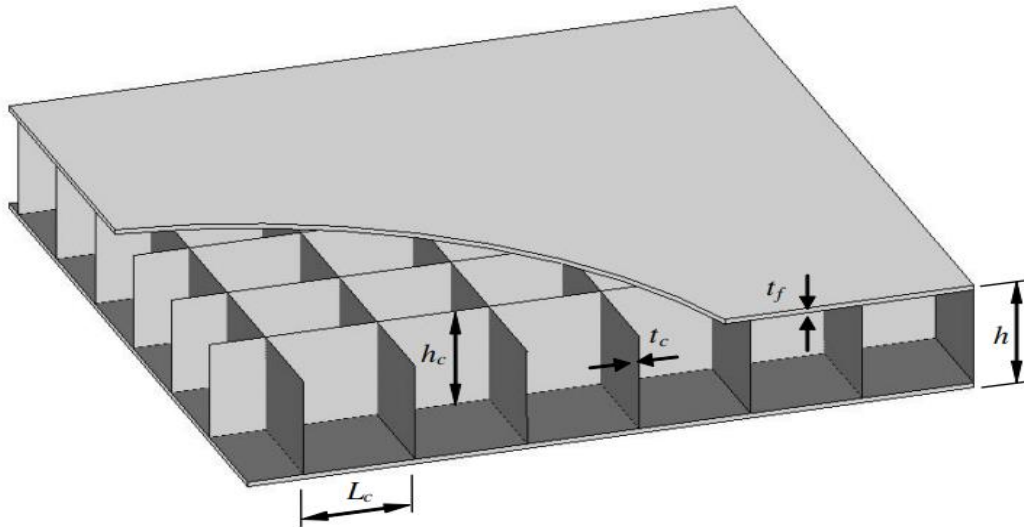
Metalik hücre elde etme malzemeleri arasında nikel, alüminyum, korozyona dayanıklı çelik ve titanyum esaslı alaşımları sayılabilir. Metal olmayan hücre malzemeleri ise termoplastik,

kraft kâğıdı, cam elyafıdır. Metal olmayan hücrelerde istenilen yoğunluğu elde edebilmek için poliamid, sıvı fenolik ya da polyester kullanılır. Petek sandviç yapının tasarımında çekirdek kalınlığının, hücre boyutunun, malzemenin yapısının, geometrik yapısının etkisi vardır. Şekil 2.14'te petek sandviç yapısı gösterilmiştir [14].



**Şekil 2.14:** Petek sandviç yapısı 1. Dış Alüminyum kaplama, 2. Yapıştırıcı, 3. Alüminyum petek çekirdek, 4. Dahili Alüminyum kaplama [14]

Kare petek çekirdeğin ayrık geometrik yapısı, çekirdek levhaları ince kirişler olarak ve sandviç paneli uygun yer değiştirme uyumluluğuna sahip plakalar ve kirişlerden oluşan kompozit yapıdır. Şekil 2.15'te temel boyutlara sahip tipik bir kare petek sandviç paneli gösterilmektedir, yani ön sac kalınlığı  $t_f$ , çekirdek sac kalınlığı  $t_c$ , çekirdek yüksekliği  $h_c$ , toplam panel yüksekliği  $h$  ( $h = h_c + 2t_f$ ), çekirdek sac aralığını  $L_c$  ile gösterilmektedir [22].



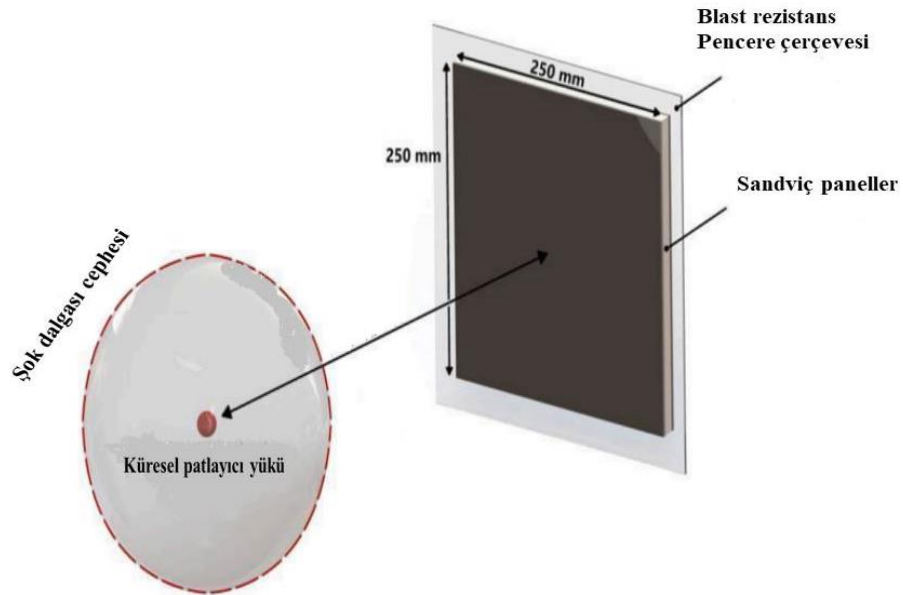
**Şekil 2.15:** Kare petek panelin temel boyutları.



### 2.3.2 Sandviç kompozitlerin uygulamaları

Çekirdek malzemeleri olarak bilinen petek yapılı polimerik sandviç kompozitler, geçmişte hafif olduğundan dolayı denizcilik, havacılık gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır. Fakat bu kompozitlerin en önemli dezavantajının örtü-çekirdek bağının çözülmesi olduğu bilinmektedir. Bu sorunun giderilmesi için epoksi matrisiyle, dış yüzey-çekirdek bağının iyileşmesini artıran sertleştirme yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Yüzeyleri farklı kalınlıklarda olan numunelerin darbelere karşı özellikleri incelendiğinde daha kalın yüzeylerin diğer numunelere göre daha dayanıklı özellik sergilediği tespit edildi [23].

Askeri gemiler, malzemesi polimer köpük (PVC) çekirdekli kompozit panellerden veya cam elyaf ya da karbon takviyeli polimer laminant yüzey tabakalı sandviç kompozit yapılar kullanılarak patlamalara, deformasyon ve hasara karşı dayanıklılığı artırmak için inşa edilebilir. Yapılan deneyde fiberglas laminantla kaplanmış ön yüz tabakaları, şok dalgasına ve patlamanın sebep olduğu hasara karşı karbon fiber ön yüz tabakalarına kıyasla daha dirençli olduğu analiz edildi. Şekil 2.16'da sandviç panellerin patlama testinin şeması gösterilmiştir [24].



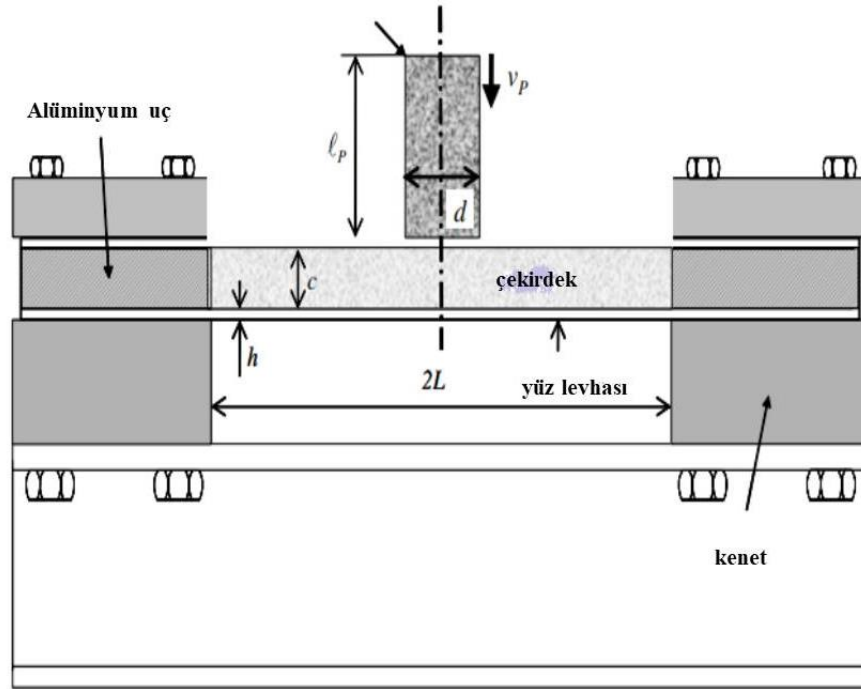
Şekil 2.16: Sandviç panellerin patlama testinin şeması [24].

PE4 diskleri çekirdeksiz laminantlara ve sandviç panellerdeki hasarı tespit etmek için (ayrılma, çatlama, delaminasyon, çekirdek sıkıştırma gibi) 200 mm mesafede patlatılarak laminantların ve sandviç panellerin geçici tepkisi arasındaki farklılıklar için birçok patlatma

testi gerçekleştirildi. Çekirdeksiz laminantlar ile sandviç panellerdeki salınımlar karşılaştırıldığında önemli ölçüde farklılıklar görüldü. Sandviç panelin asimetrik yapısı, simetrik sandviç panele kıyasla, patlamada oluşan hasara karşı sağlarken, ayrıca panelin bükülmesindeki gerilim dağılımını etkiler [25].

Cam elyafı-Vinil ester kompozit kirişler yüzey levhaları PVC köpükten ya da damarlı balsa ağacından çekirdek ile sandviç konfigürasyonuna sahiptir. Sandviç kirişler çekirdeğin çatlamasını ayrıca yüzey tabakasının delaminasyonunu gösterir. Sıkıştırma ve kesmede uç damarlı balsa ağacı, PVC köpüğünden çok daha önemli bir sertlik ve dayanıklılık sergiler. Ayrıca, düşük momentumlu mermiler balsa çekirdekli sandviç kirişler, PVC köpük çekirdekli kirişlere kıyasla daha iyi performans gösterir. Sandviç kirişlerin dinamik tepkisi, uç kenetlenmiş kirişlerin açıklık ortasında metal köpük mermilerin yerleştirilmesi ile ölçülmektedir.

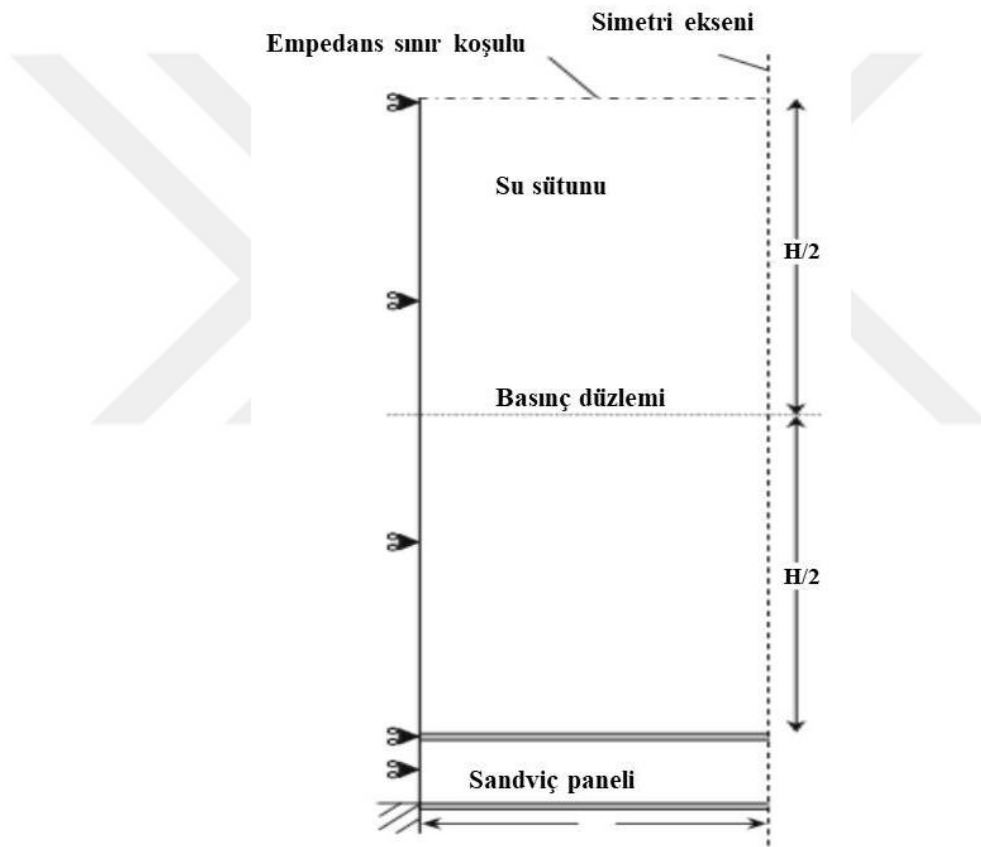
Metal köpük mermiler, uçtan kenetlenmiş yekpare ve sandviç kirişleri Şekil 2.17'de gösterildiği gibi dinamik olarak yüklemek için kullanılmaktadır [26].



**Şekil 2.17:** Yükleme ve kenetleme konfigürasyonu ile sandviç kiriş geometrisinin taslağı [26].

Sonlu elemanlar (FE) hesaplamaları, sıvı-yapı etkileşimini su altı patlamasına maruz kalan sandviç kirişlerin dinamik tepkisini geliştirmek için kullanılır. Sıvıdaki ilk kavite ile sıvı-yapı etkileşimine ilişkin zaman ölçeği, çekirdekte meydana gelen sıkışma, bükülme, gerilme tepkileri ile ilişkili olan zaman ölçeklerinden kayda değer bir şekilde küçüktür. Mevcut dört davranış rejimi vardır: sandviç çekirdek sıkıştırma periyodu, kiriş bükülme

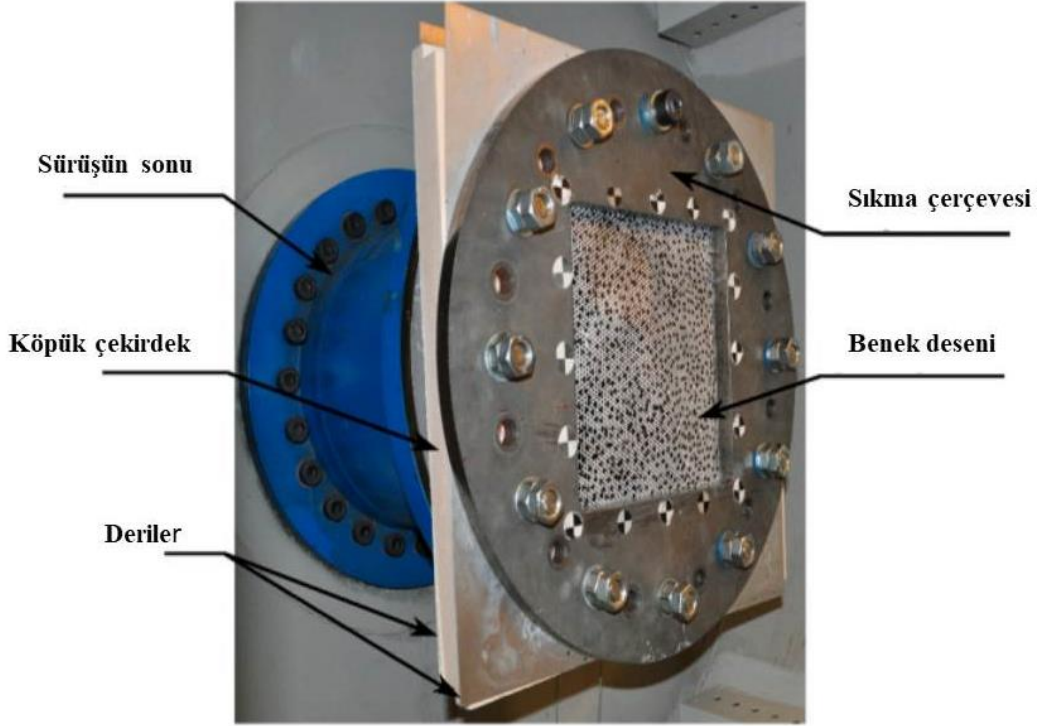
periyoduyla ya ayrışır ya da çiftleşir, çekirdek kısmen veya tamamen yoğunlaşır. Ayrıca davranış rejimleri, çekirdek gücü ve patlama etkisi eksenlerindeki veriler kullanılarak simülasyon haritaları çizilir ve olası ihtimaller değerlendirilir. Buradaki hesaplamalar sonucunda sandviç kirişlerin su patlama darbesi, kiriş geometrisi baz alınarak arka yüzeydeki sapmayı minimuma indirmek için gerekli olan değerlerin %40 üzerindedir. Çekirdek mukavemetinin en uygun değerleri, tekerrür eden patlatma darbesi ile artar, tek tip patlatma darbesi için tasarlanmış sandviç kiriş, farklı patlatma yükleri için yetersiz kalmaktadır. Kiriş Şekil 2.18'de gösterildiği gibi analiz edildi. Akışkan sütununun uçtan kenetli monolitik kirişleri üzerinde her iki tarafa simetri sınır koşulları uygulanarak yükleme, su püskürtme basıncı aracılığıyla belirlendi [27].



**Şekil 2.18:** Birleşik sıvı-yapı etkileşimi FE hesaplamaları [27].

Alüminyum kaplamalardan oluşan ve farklı yoğunluklara sahip ekstrüde polistiren (XPS) çekirdeğinden yapılmış sandviç paneller, patlama yüküne maruz kaldıklarındaki dinamik tepkisi, bir şok tüpü tesisi kullanılarak incelenmiştir. Sandviç paneller, patlamaya maruz kalan cephelerde mükemmel enerji emici oldukları için koruyucu yapı olarak kullanılabilir. Sandviç paneller köpük çekirdeği olmayan diğer kaplamalara kıyasla patlama yükünü hafifletmede önem arz etmektedir çünkü köpük yoğunluğu arka yüzey deformasyonu ve

çekirdek sıkıştırması açısından doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koydu. Ayrıca, sandviç panellerin kırılmasıyla birlikte bazı tutarsızlıklar gözlemlendi, daha az veya orta çekirdek yoğunluğuna sahip panel başarısız oldu. Bu sorunun giderilmesi için sandviç kaplamalar için daha güçlü ya da daha sünek alüminyum levhalar kullanılmalıdır. Deneysel çalışmalar bir şok tüpü tesisi kullanılarak incelenmiştir ve Şekil 2.19’da şok tüpü gösterilmiştir [28].



**Şekil 2.19:** Şok tüpü ile sandviç bileşenin montaj resmi.

### 3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

#### 3.1 Üç Nokta Eğme Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması

Subaşı ve diğ., yapmış oldukları çalışmalarında CTP (cam takviyeli polyester) örtü kalınlığı ile bal peteği yüksekliği değişimlerinin eğme dayanımına etkisini incelemişler. CTP levha kalınlığındaki artışın dayanımı artırdığı ancak bal peteği kalınlık etkisinin daha fazla oranda artırdığı tespit edilmiştir [29].

Lu ve diğ., çalışmalarında 3D yazıcıda üretilen çekirdek geometrisi Bi-Grid, Tri-Grid, Quadri-Grid ve Kagome-Grid olan sandviç yapıların eğme dayanım performanslarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler. Quadri-Grid sandviç yapı en yüksek, Tri-Grid sandviç yapı en düşük eğme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir [30].

Brischetto ve diğ., 3D yazıcıda ABS ve PLA filament kullanarak tek veya çift ekstrüderle üretilen sandviç numunelerin eğme dayanımlarını araştırmışlar. Çift ekstrüderle üretilen numunelerde birinci ve ikinci ekstrüderler arasında yazdırma geçişi sırasında birincinin soğumasıyla birlikte çekirdek ve örtü arasında arzu edilen birleşme sağlanamamıştır. Tek ekstrüderle üretilen PLA çekirdek ve PLA örtü arasında daha iyi bir birleşme gerçekleştiğinden diğerlerinden yüksek performans elde edilmiştir [31].

Jiga ve diğ., 3D yazıcıda balpeteği, inversed balpeteği ve kagome geometrilerinde üretilen çekirdekler alüminyum örtü ile yapıştırılarak eğme dayanımları deneysel ve nümerik olarak araştırmışlar. En fazla dayanım inversed balpeteğinde en düşük dayanım Kagome geometrili yapıda olduğu tespit edilmiştir [32].

Li ve Wang, 3D yazıcıda truss, conventional honeycomb ve re-entrant honeycomb geometrilerinde üretilen çekirdekler ile karbon fiber destekli polimer (CFRP) kompozitten üretilen yüzeyleri yapıştırmışlar. Üç nokta eğme testleri uygulanan bu sandviç kompozitler arasında en yüksek dayanım truss geometrili kompozit yapılarda elde edildiği tespit edilmiştir [33].

Sugiyama ve diğ., 3D yazıcıda sürekli karbon fiber kullanarak honeycomb, rhombus, rectangle ve circle geometrilerindeki çekirdek ile örtüyü yapıştırıcı kullanmadan birlikte üretmişler. Eğme testlerinde tüm geometrilerde numunelerin yoğunluğu arttıkça maksimum yük ve elastikiyet modülünün arttığını, en iyi sonuçların rhombus geometride elde edildiği tespit edilmiştir [34].

Arbaoui ve diğ., polipropilen çekirdek ile cam fiber takviyeli kompozit plakadan bir, iki, üç ve dört katlı sandviç yapılar üretmişler. Eğme testleri sonucunda çekirdek yüksekliği ile ara katman sayısı arttıkça yapının rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir [35].

Naresh ve diğ., nomex çekirdek ile prepreg karbon fiber takviyeli plakalar kullanarak bir, dört ve beş katlı kompozit sandviç yapılar üretmişler. Çalışılan tüm varyasyonlarda toplam hücre yüksekliği ile prepreg plakaların sayısı eşitlenmiştir. Sandviç yapılar farklı spam aralığında eğme yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Her iki spam aralığında en iyi performansı tek katlı sandviç yapı göstermiştir. Spam aralığı daraltılınca dört katlı ve beş katlı sandviç yapıların eğme dayanımlarında önemli artış olmamıştır. Alt ve üst örtü kalınlığı en yüksek olan tek katlı sandviç yapının eğme dayanımında %36'lık artış meydana geldiği tespit edilmiştir [36].

Paik ve diğ., alüminyum çekirdek ve örtü kullanılarak üretilen sandviç yapılara üç nokta eğme deneyi uygulamışlar. Çekirdek yüksekliğinin, sandviç yapıların eğme dayanımları ile plastik deformasyon başlangıçlarını etkilediği tespit edilmiştir [37].

Ali ve Batai, 3D yazıcıda üretilen bal peteği PLA filamentten çekirdek, ABS filamentten ürettiği örtüyü yapıştırarak sandviç yapılar üretmişler. Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarında eğilme yükü altında bal peteği çekirdekli yapı, aynı PLA filament ve ağırlıktaki düz bir levhadan üç kat daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir [38].

Lascano ve diğ., levha halindeki PLA'ya bir kalıpta iz vererek yarı altıgen formu kazandırılmış parçaları karşılıklı olarak yapıştırdılar. Daha sonra %40 PLA/Flax oranındaki kumaş ile bal peteği çekirdekleri sıcak preste yapıştırarak kompozit sandviç yapılar üretmişler. Yapılan eğme deneylerinden numunelerin çekirdek yüksekliği arttıkça, taşıyabileceği eğme yük kapasitesinde önemli ölçüde artış görüldüğü tespit edilmiştir [39].

Zaharia ve diğ., nomex balpeteği çekirdek ile karbon fiber plakalardan üretilen kompozit sandviç yapıların üç nokta eğme, basma ve charpy darbe testleri ile mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir [40].

Yaman, aramid çekirdek ile %0, %1, %2 karbon nanotüp (CNT) katkılı karbon fiber kompozit plakalar kullanarak ürettiği sandviç yapıların eğme yükü altında en yüksek eğme kuvvetinin %2 CNT katkılı sandviç yapılarda elde edildiğini tespit etmiştir [41].

Arputhabalan ve diğ., matris olarak epoksi LY556 ve epoksi GY250 polimer reçineleri kullanılarak beş doğal lif (aloe vera, kenaf, sisal, jüt ve keten) ile elde edilen sandviç

kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Epoksi reçinenin doğal liflere çok iyi yapıştığı birlikte çekme, darbe ve eğilme özelliklerinde artış sağladığı tespit edilmiştir [42].

Lombardi ve Liu, köprü uygulamalarında cam elyaf takviyeli polimer/çelik hibrit bal peteği sandviç yapıları incelemişler. Bal peteği yapıya çeliğin dahil edilmesinin L ve W yönlerinde çekirdeğin eğme ve kesme rijitliğini artırdığını tespit etmişlerdir [43].

### **3.2 Düşük Hızda Darbe Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması**

Vasanthanathan ve Kumar, vakum destekli reçine infüzyon işlemi (VARIP) ile kompozit petek sandviç yapılarının üretimini ayrıntılı olarak incelemişler. Karbon fiber takviyeli polimer yüzeyler, plastik pelet dolgulu veya dolgusuz alüminyum petek yapıştirarak iki farklı tipte sandviç panel ürettirler. Çarpışma testlerinden daha az hasar alabilen dolgulu kompozit sandviç panellerin otomotiv, hava ve tren taşımacılığında kullanılabileceği tespit edilmiştir [44].

Kaya ve Selver, Z-pin ile güçlendirilmiş köpük sandviç kompozitlerin darbe dayanımlarını incelemişler. Z-pin sayısı arttıkça sandviç kompozitin darbeye karşı davranışını olumlu etkilediğini fakat esneklik ve sünekliklerinin azaldığı tespit edilmiştir [45].

Topkaya ve Solmaz, 3003 alüminyum alaşımındaki bal peteği çekirdek ile alüminyum, cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozit plakaları yüzey olarak ürettiği sandviç yapıları 5J ve 10J enerji seviyelerinde düşük hızda darbe testleri uygulayarak darbe davranışlarını incelemişler. Sandviç kompozitlerin yüzey kalınlığı arttıkça darbe dayanımının arttığı ve yüzde olarak en fazla artışın karbon takviyeli kompozit plakalarda olduğu tespit edilmiştir [46].

Akkuş ve diğ., bal peteği sandviç kompozitleri saf epoksi reçine ve %1 çok duvarlı karbon nanotüp (mwnt) ilave edilmiş epoksi yapıştırıcı kullanarak üretmişler. Yapılan darbe testlerinde karbon nanotüp katkısının darbe temas kuvvetini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca hücre genişliğini sabit tutarak hücre yüksekliğini artırmanın darbe temas kuvvetini arttırdığını, hücre yüksekliğini sabit tutarak hücre genişliğini artırmanın ise darbe temas kuvvetini azalttığı bulunmuştur [47].

Cormos ve diğ., kâğıt ve polyester reçine emdirilmiş kâğıt kullanarak dört farklı geometriye sahip iki katlı kompozit sandviç yapılar üretmişler. Yapılan üç farklı darbe enerjisi testlerinde numunelerin ivme ölçer (accelerometer) aygıtıyla ivmeleri tespit edilmiştir [48].

Usta ve diğ., sandviç kompozitlerin çekirdeklerini 3 boyutlu yazıcıda auxetic (negatif poisson oranına sahip) ve auxetic olmayan prizmatik yapılarda üreterek 10J darbe enerjisindeki dayanımlarını araştırmışlar. Auxetic olmayan çekirdeklerin daha geniş temas yüzeyi ve yüksek kalınlığı sayesinde darbe direnci ile enerji emme kapasitesinin diğerinden üstün olduğu tespit edilmiştir [49].

Özen ve diğ., 3 boyutlu yazıcıda akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemenen bal peteği ve girintili (reentrant) geometrili çekirdekler ile karbon fiber destekli polimer (CFRP) kompozit plakalar yapıştırılarak kompozit sandviç yapılar üretmişlerdir. Sandviç yapılara 20J, 40J ve 70J darbe enerjilerinde x-y eksenini (in-plane) ve z ekseninde (out-of-plane) testler uygulanmıştır. En iyi darbe dayanımı x-y doğrultusunda girintili çekirdekli numunelerde tespit edilmiştir [50].

Gülçimen ve diğ., ekstrüzyon yöntemi kullanarak ABS malzemenen auxetic bal peteği geometrisindeki numunelerin deneysel ve nümerik darbe dayanımlarını araştırmışlardır. Numunelerin Z eksenini doğrultusunda darbeye karşı daha iyi performans gösterdiği, deneysel ve nümerik değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir [51].

Cao ve diğ., üç boyutlu cam elyaf kumaş destekli kompozit sandviç yapıların darbe direncini araştırdı. Darbe deneyleri sonucunda sandviçlerin alüminyum ile kaplanması sandviçlerin darbe mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı ve çekirdek yüksekliği arttıkça darbe etkisinin sandviç yapıya verilen zararı azalttığı tespit edilmiştir [52].

Kavianiboroujeni ve diğ., köpük çekirdekli ve çekirdeksiz yüksek yoğunluklu polietilen ve kenevirden yapılmış üç katmanlı sandviç yapıların darbe davranışını araştırdı. Charpy darbe sonuçlarına göre, köpük çekirdekli yapıların köpük çekirdeksiz muadillerine göre daha yüksek enerji emme kabiliyetine sahip olduğu ve düşük hızlı darbe testlerine göre köpük çekirdeksiz sandviç yapıların enerji yayma özelliklerinin daha üstün olduğu tespit edilmiştir [53].

### **3.3 Basma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması**

Zaini ve diğ., doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlar. Yüzde 15, 30 ve 51 pirinç kabuğu katkılı termoplastik kompozitler bal peteği formunda kalıplarda preslenerek üretilmiştir. Mekanik testlerden sonra %15 pirinç kabuğu içeren kompozitler, diğer oranlara göre daha iyi mekanik ve fiziksel özelliklerde olduğu tespit edilmiştir [54].



Xiong ve diğ., karbon fiber takviyeli üç boyutlu yumurta ve piramidal petek ızgara çekirdekler birbirine geçmeli olarak sandviç kompozitler üretmişler. Basma testleri sonucunda, piramidal geometrili sandviç panellerin aynı yoğunluktaki kare peteklere kıyasla daha yüksek basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir [55].

La Saponara ve Kamaya, statik basma yükü altında kevlar dikişlerle güçlendirilmiş delikli kompozit sandviç yapının davranışını deneysel olarak araştırdılar. Daha yoğun dikiş aralığının, sandviç yapının taşıyabileceği maksimum yükü önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir [56].

Akkuş ve diğ., alüminyum bal peteği kompozit yapının basma dayanımını deneysel ve sayısal yöntemle incelemişler. Farklı hücre genişlik ve yüksekliklerindeki bal peteği çekirdeği alüminyum panel ile yapıştırarak sandviç yapılar üretmişler. Yapıştırıcının basma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre hücre genişliği ve yüksekliğinin basma reaksiyon kuvveti ile ters orantılı olduğu ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) eklenmiş epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen numunelerin, saf epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen numunelere kıyasla daha yüksek bir basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir [2].

Aslan ve diğ., otomotiv sektöründe kullanılan motor gövdesini hafifletmek ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla sandviç panel teknolojilerinden yararlanmıştır. Sandviç panellerin yüzeylerini karbon elyaf, cam elyaf takviyeli kompozit ve alüminyum panellerden çekirdek kısmını alüminyum, polipropilen (PP) ve polipropilen tereftalat (PET) sert köpük kullanmışlar. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen numunelere aksenal, kenar basma ve eğme testleri uygulanmıştır. Yapılan deneylerde sandviç yapıların çekirdekleri yüzeylere göre daha fazla mekanik değişiklik göstermiştir. Ayrıca en yüksek kenar basma ve eğme mukavemeti PET malzeme, en yüksek aksenal basma mukavemeti ve eğme elastikiyeti alüminyum çekirdekli sandviç yapılarda tespit edilmiştir [57].

Zaharia ve diğ., hücre genişliği 5 mm Nomex® bal peteği ile karbon fiber takviyeli kompozit plakanın yapıştırılmasıyla elde edilen sandviç yapının üç nokta eğme, basma, darbe ve yorulma mukavemetini incelemişler. Hücre yüksekliği 8 mm toplam yüksekliği 9 mm olan sandviç plakanın ortalama basma dayanımının 2,5 MPa tespit edilmiştir [58].

Kıyak ve Kaman, poliüretan köpük ile doldurulmuş kare şeklindeki karbon fiber kompozit hücrelere sahip sandviç panellerin eğme ve basma dayanımlarını incelemişler. Poliüretan

köpüğün kompozit sandviç panellerin basma ve eğme mukavemetini artırmadığı hatta bu değerleri kısmen azalttığı tespit edilmiştir [59].

Arslan ve Kaman, bal peteği sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişler. Basma testlerinde aynı hücre genişliğinde hücre duvar kalınlığı artırıldığında basma dayanımını arttırdığı, sadece hücre genişliği veya hücre yüksekliği artırıldığında ise basma dayanımının azaldığı tespit edilmiştir [60].

Gohar ve diğ., 3 boyutlu yazıcıda farklı malzemelerden üretilmiş dört tipte bal peteği sandviç kompozitin (ABS çekirdek & %15 karbon fiber katkılı PLA yüzey, ABS çekirdek & PLA yüzey, termoplastik poliüretan (TPU) çekirdek & %15 karbon elyaf katkılı PLA yüzey ve TPU çekirdek & PLA yüzey) mekanik özelliklerini incelemişler. Mekanik testlerde (yanal basma, üç nokta eğme ve yapıştırma dayanım) ABS çekirdek %15 karbon fiber katkılı PLA yüzeye sahip sandviç kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin diğerlerinden üstün olduğu tespit edilmiştir [61].

Solmaz ve Çelik, 3 boyutlu yazıcıda PLA ve ABS filamentlerden üretilmiş bal peteği sandviç kompozit yapıların hücre genişliği, yüksekliği ve hücre duvar kalınlığının basma dayanımı üzerine etkisini deneysel olarak incelemişler. Aynı duvar kalınlığındaki numunelerin hücre genişliği ve hücre yüksekliği arttıkça basma dayanımının azaldığını diğer parametreler sabit iken hücre duvar kalınlığı arttıkça basma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir [62].

Colmenero ve diğ., endüstriyel bir elemanın basma dayanımını deneysel ve nümerik olarak incelemişler. 3 boyutlu yazıcıda PLA filamentten ürettiği altı adet numuneye ISO 604 standardında tek eksenli basma testiyle malzemenin elastik ve izotropik Young basma modül sabitini tespit ettiler. Endüstriyel elemanın tek eksenli basma deney sonuçları simülasyon sonuçları Z ekseninde %0,91 X ekseninde %0,56 farkla uyumlu olduğu tespit edilmiştir [63].

Beniak ve diğ., aseton buharının yüzey pürüzlülüğüne ve basma dayanımına etkisini incelemişler. 3 boyutlu yazıcıda ABS filamentten üretilen numuneler ASTM D695 standartlarında 5 - 7,5 - 10 dakika aseton buharına maruz bırakılarak yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve basma testleri uygulanmıştır. En yüksek Ra (aritmetik ortalama pürüzlülük) değerinin aseton buharına maruz bırakılmayan numunelerde, en düşük Ra değerinin ise aseton buharına 10 dakika maruz kalan numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca en düşük basma dayanımı aseton buharına maruz kalmayan numunelerde, en yüksek basma dayanımı ise 5 dakika aseton buharına maruz kalan numunelerde elde edilmiştir. 5 dakikadan

daha uzun süre aseton buharına maruz kalan numunelerde basma dayanımının düştüğü tespit edilmiştir [64].

Duan ve diğ., bal peteği ve kelvin köpüğü geometrilerine sahip sandviç kompozitlerin  $0^0$  ile  $50^0$  arasında beş farklı açıda basma dayanımlarını incelemişler. Her iki geometride basma yük açısı arttıkça normal gerilim azalırken kayma gerilimi artmıştır. Fakat basma yük açısı arttıkça bal peteği sandviçlerin kelvin köpüğü sandviçlere göre normal gerilimlerinde daha keskin bir düşüş olduğu tespit edilmiştir [65].

Pollard ve diğ., 3 boyutlu yazıcıda ABS ve PLA filamentlerden üretilen bal peteği sandviç yapının hücre duvar kalınlığının basma dayanımına etkisini incelemişler. Hücre duvarı kalın numunelerin ince duvarlı numunelere göre daha sünek davrandığı, ABS ve PLA numunelerin Nomex® numunelere göre basma dayanımlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [66].

Mamatha ve diğ., 3 boyutlu yazıcıda seramik malzemeden altıgen, kare ve üçgen petek geometrilerinde ürettiği yapıların sinterlenmiş halde aksel ve yanal basma dayanımlarını incelemişler. Hem aksel hem de yanal basma testleri sonucunda altıgen petek numunelerin basma dayanımlarının kare ve üçgen peteklere göre önemli ölçüde üstün olduğu tespit edilmiştir [67].

Ayrılmış ve diğ., 3 boyutlu yazıcıda ahşap/PLA karışımı filamentten farklı dolgu oranlarında kare, altıgen ve sekizgen geometrilerde üretilen sandviç yapıların üç nokta eğme, çekme ve basma dayanımlarını incelemişler. Çekirdeklerin dolgu oranı arttıkça mekanik dayanımların arttığı, en çok artışın altıgen numunelerde olduğu tespit edilmiştir [68].

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

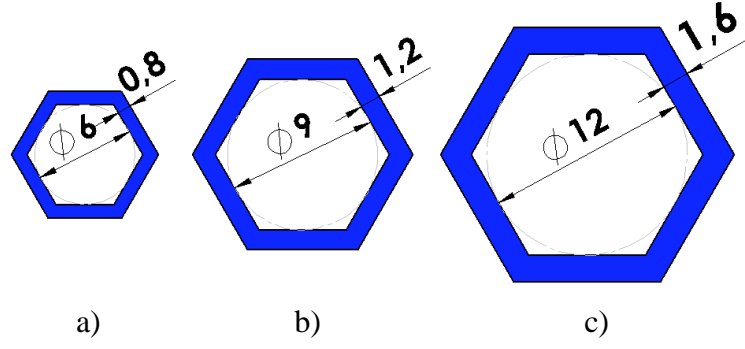
Bu çalışmada tek katlı ve iki katlı (her katında aynı ve farklı (hibrit) hücre genişliklerinde) sandviç kompozit yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sandviç yapıda yüzey alanları birbirine yakın bal peteği geometrili çekirdeğin hücre genişliği ile beraber hücre duvar kalınlık değişiminin mekanik özellikler üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sandviç yapıların bal peteği geometrili çekirdekleri polylactic acid (PLA) filament kullanılarak tabla ısıtmalı 3 boyutlu Ultimaker marka yazıcıda üretilmiştir. Kompozit sandviç yapıların alt, ara ve üst yüzeylerinde 1 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polimer kompozit plakalar (CFRP) kullanılmıştır. Çekirdekler üç farklı 6, 9, 12 mm hücre genişliğinde sırasıyla 0,8-1,2-1,6 mm hücre duvar kalınlığında birbirine yakın yüzey alanlarında üretilmiştir. Çekirdek ve yüzeyler yapıştırıcı ile basınç altında birleştirilerek sandviç kompozit yapılar üretilmiştir. Üretilen numunelere üç nokta eğme, düşük hızda darbe ve basma testleri uygulanarak mekanik özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışması üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda Solidworks® 2018 bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak numunelerin hücre genişliği ve hücre duvar kalınlıklarına göre tasarımları yapılarak 3 boyutlu yazıcıda üretimlerini yapabilmek için Ultimaker Cura 4.10.0 [69] bilgisayar destekli üretim (CAM) yazılımı ile G-kodları oluşturulmuştur. İkinci kısımda Ultimaker 2+ [70] 3 boyutlu yazıcıda üretilen çekirdekler ile CFRP plakalar yapıştırılarak üretimleri gerçekleştirilmiştir. Son aşamada sandviç kompozitlere üç nokta eğme, düşük hızda darbe ve basma testleri uygulanmıştır.

### 4.1 Test Numunelerinin Tasarım ve Üretimi

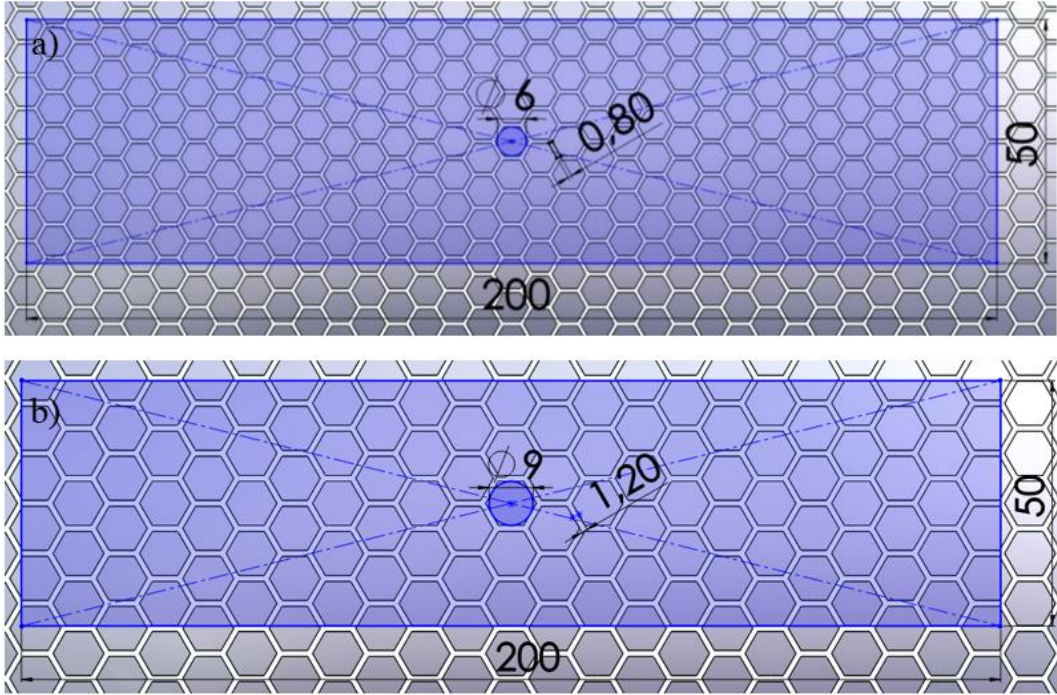
#### 4.1.1 Üç nokta eğme test numunelerinin tasarım ve üretimi

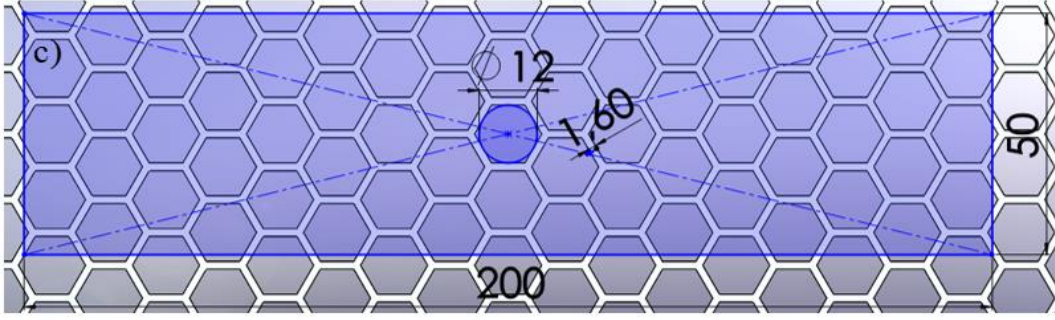
Hücre genişliği ve hücre duvar kalınlıkları  $\text{Ø}6 \times 0,8$  mm,  $\text{Ø}9 \times 1,2$  mm ve  $\text{Ø}12 \times 1,6$  mm olan üç farklı bal peteği geometrisinin tasarımı Solidworks® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1:** Üç farklı büyüklükteki bal peteği geometrilerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında üst görünüşlerine ait ekran görüntüleri a) Hücre genişliği 6 mm, hücre duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9 mm, hücre duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12 mm, hücre duvar kalınlığı 1,6 mm.

Eğme numunelerinin boyutları ASTM C393-16 [71] standardına göre boyu 200 mm, genişliği 50 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de görülen levha halinde bal peteği 3 boyutlu modelleme yapıldıktan sonra 200 mm – 50 mm’lik bir dikdörtgenin köşegenlerinin kesişim noktası, bir peteğin iç teğet daire merkezi kabul edilerek dikdörtgenin kesimi yapılmıştır.





**Şekil 4.2:** 200 mm – 50 mm ölçülerindeki eğme numunelerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında üst görünüşlerine ait ekran görüntüleri a) Hücre genişliği 6mm, hücre duvar kalınlığı 0,8 mm b) Hücre genişliği 9mm, hücre duvar kalınlığı 1,2 mm c) Hücre genişliği 12mm, hücre duvar kalınlığı 1,6 mm.

Hücre genişlikleri büyütüldüğünde, eşit yüzey alanları elde edebilmek için hücre duvar kalınlıklarının ölçüsü de büyütülmüştür. Yazıcıda 0,4 mm nozul çapı kullanıldığından dolayı hücre duvar kalınlıkları 0,4 mm artırılarak büyütülmüştür. Elde edilen geometrilerin yüzey alanları Solidworks® 2018 programından alınmıştır. Üç farklı genişlikteki hücreye sahip eğme numunelerinin yüzey alanlarının birbirine yakın olduğu Çizelge 4.1’de görülmektedir.

**Çizelge 4.1:** Eni ve boyu 200 mm - 50 mm ölçülerindeki eğme numunelerin yüzey alan değerleri

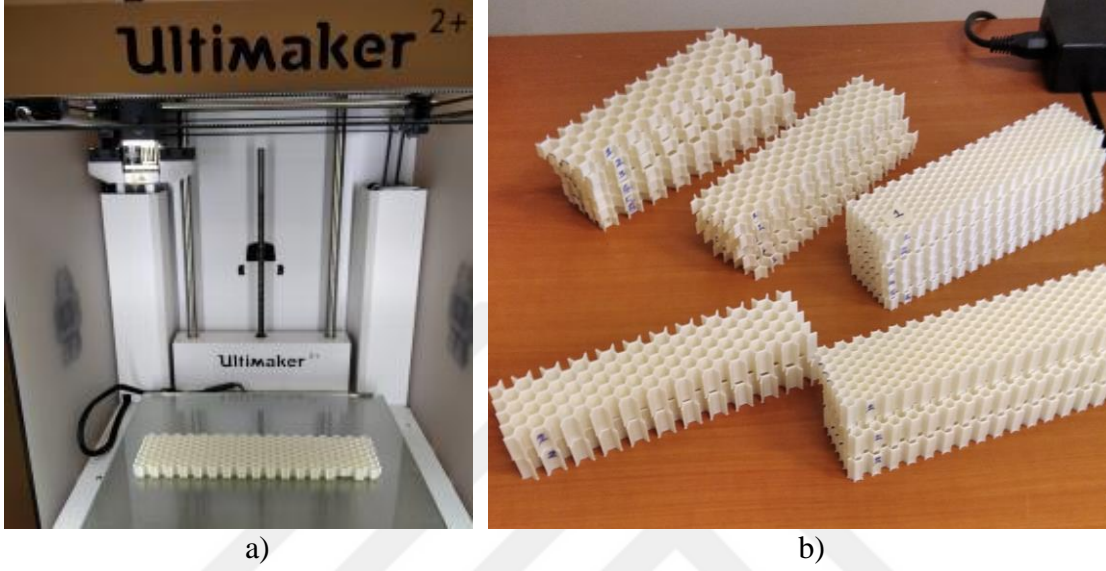
Hücre genişliği (mm)	Hücre duvar kalınlığı (mm)	Hücre yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
6	0,8	2228,70
9	1,2	2146,59
12	1,6	2193,48

Numuneleri Şekil 4.3 a)’da görülen Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcıda üretebilmek için Ultimaker Cura 4.10.0 CAM yazılımı kullanılmıştır. Yazılıma Çizelge 4.2’de belirtilen parametre değerleri seçilerek tasarımın G-kodları elde edilmiştir.

**Çizelge 4.2:** Ultimaker Cura 4.10.0 CAM yazılımında seçilen parametreler

Yazıcı	Ultimaker 2+
Malzeme	PLA
Filament çapı	2,85 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0,8 / 1,2 / 1,6 mm
Üst/Alt kalınlığı	0
Dolgu yoğunluğu	%100
Dolgu deseni	Lines
Yazdırma hızı	60 mm/s
Boşta gezme hızı	150 mm/s
Nozul sıcaklığı	240°C
Tabla sıcaklığı	60°C

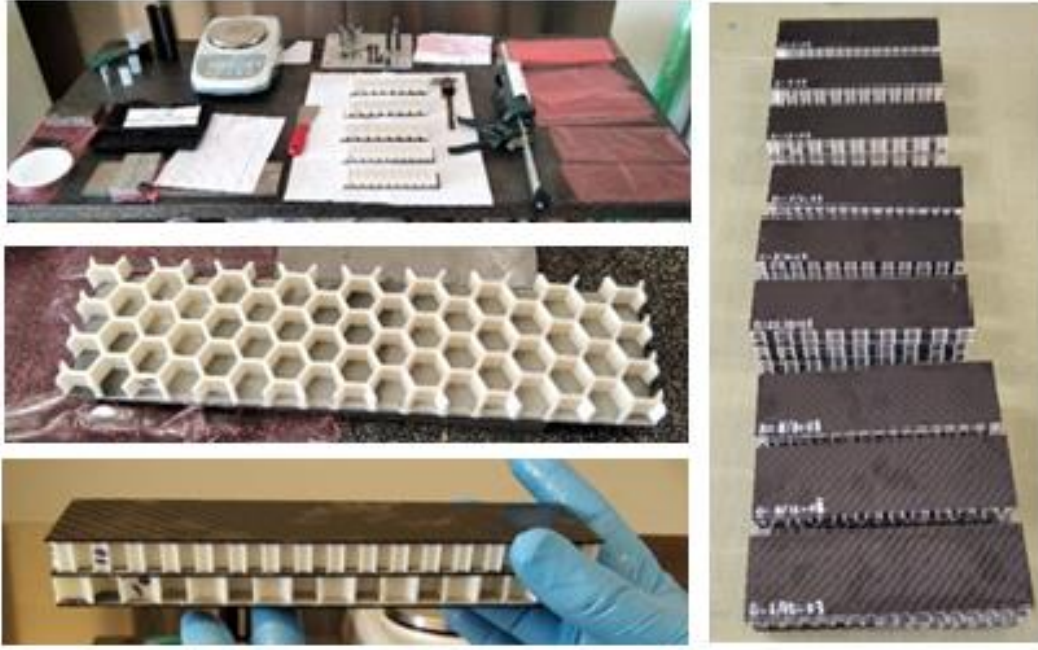
Yazıcının yükseklik kalibrasyonu çekirdeklerin üretimine başlamadan önce manuel olarak ayarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcıya beyaz renkli PLA filament takılmıştır. Şekil 4.3 b)'de görülen tek kat çekirdek için 20 mm, iki kat çekirdek için 10 mm hücre yüksekliğinde numuneler üretilmiştir. Ultimaker firmasının PLA filamenti için belirlediği baskı tablası ve nozul sıcaklık değerleri 3 boyutlu yazıcıda uygulanmıştır.



**Şekil 4.3:** a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcıda eğme numunesinin görüntüsü b) Farklı hücre genişliği ve yüksekliğinde üretilmiş çekirdeklerin görüntüsü.

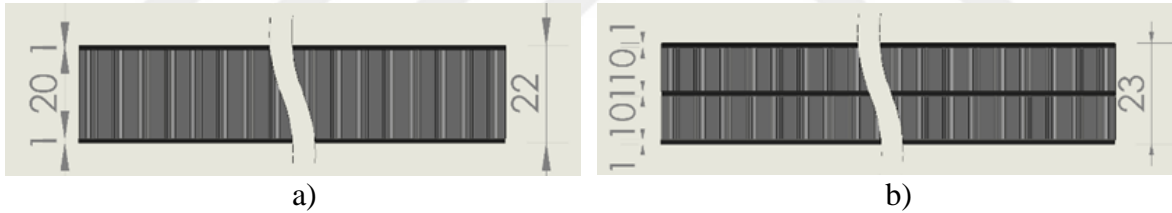
İki bileşenli epoksi esaslı Araldite® 2015 yapıştırıcı [72] kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda üretilen çekirdekler ile CFRP plakalar yapıştırılmıştır. Yapıştırma prosesleri Şekil 4.4'de görülmektedir. Yapıştırıcıyı CFRP plakaya uygulamak için bir spatula kullanıldı ve malzemeler üst üste getirilerek birbirine yapıştırıldı. Yapıştırıcının kurlaşması için birleştirilmiş sandviç yapıya 24 saat boyunca 0,5 MPa'lık bir basınç uygulanmıştır.





**Şekil 4.4:** Sandviç yapıların yapıştırma aşama görüntüleri.

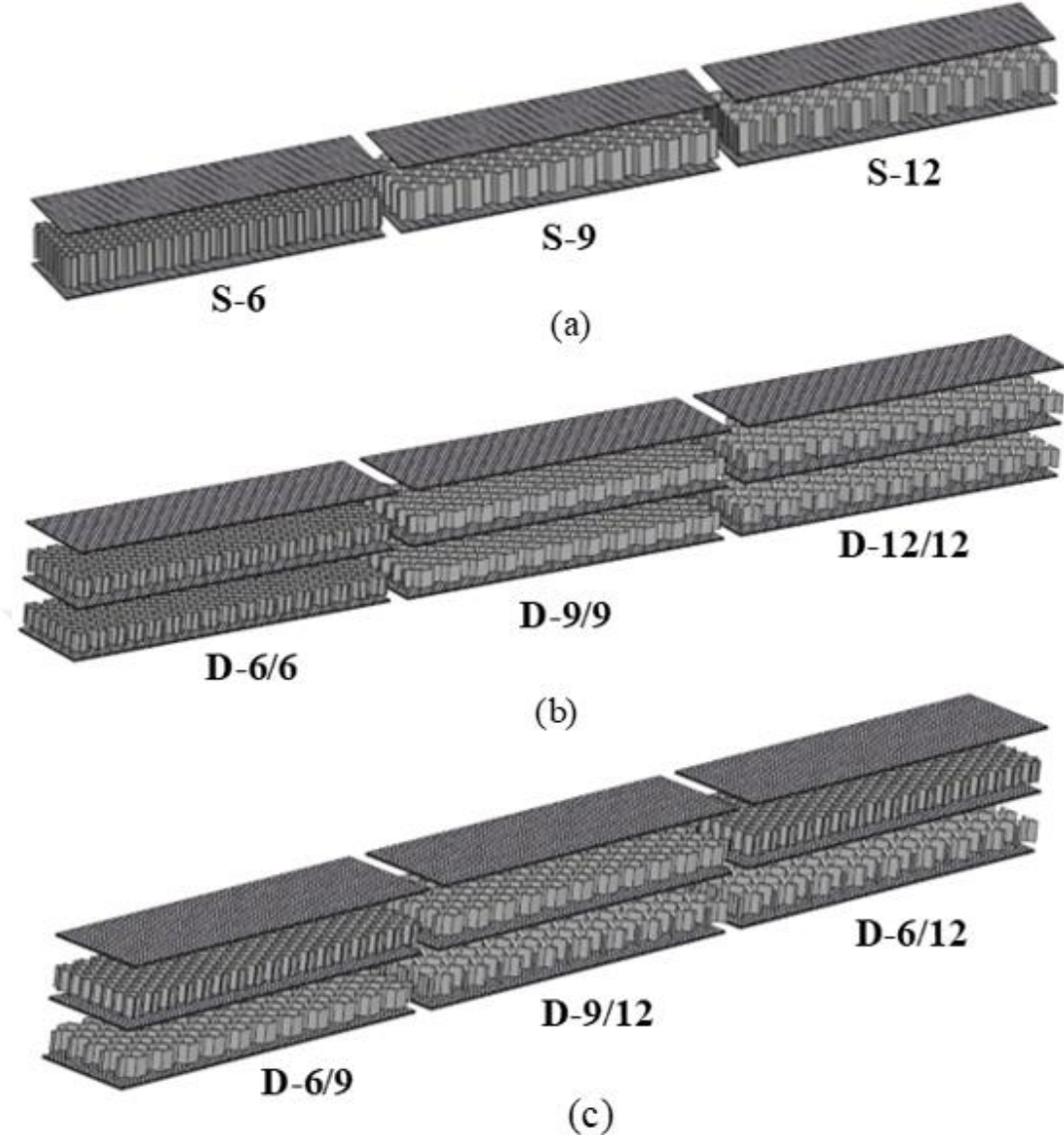
Şekil 4.5’de görülen tek katlı numuneler 20 mm çekirdek ve 1’er mm alt ve üst yüzey toplam 22 mm yüksekliğindedir. İki katlı numuneler ise 10’ar mm alt ve üst çekirdek 1’er mm alt, üst ve ara yüzeylerle birlikte toplam 23 mm yüksekliğindedir.



**Şekil 4.5:** Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı sandviç numune; b) İki katlı sandviç numune.

Şekil 4.6’da araştırma için ürettiğimiz dokuz farklı numune tipi görülmektedir. Bunlardan üç tanesi 6 mm, 9 mm, 12 mm hücre genişliğinde tek katlı, üç tanesi her katında aynı hücre genişliğinde iki katlı ve üç tanesi de hibrit iki katlı numunelerden oluşmaktadır. Tek katlı numunelere single kelimesinin ilk harfi (s), iki katlı numunelere ise double kelimesinin ilk harfi (d), verilerek adlandırılmıştır. Üretilen numunelere sırasıyla sandviç yapının kat tipi, hücre genişliği, numune sırası kodlaması yapılarak adlandırılmıştır. Örneğin, D-9/12 adlı numunede sandviç yapının iki katlı, üst katta çekirdeğin hücre genişliğinin 9 mm, alt katta çekirdeğin hücre genişliğinin 12 mm numune olduğunu ifade etmektedir.





**Şekil 4.6:** Eğme testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.

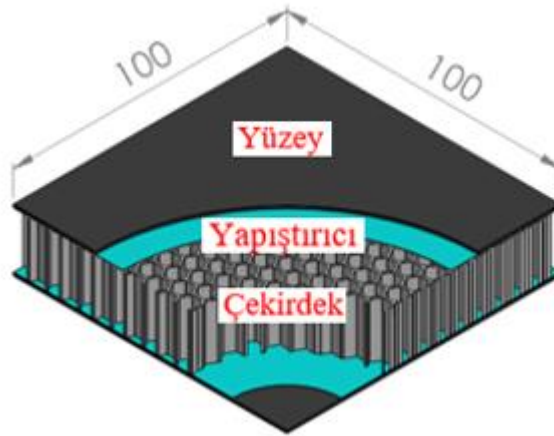
Yapıştırma öncesi çekirdeklerin ve CFRP plakaların KERN PLS 6200-2A marka (kapasite: 6,200 g, hassasiyet: 0,01 g) hassas teraziyle kütle ölçümleri yapılmıştır. Yapıştırma sonrası sandviç kompozit numunelerin toplam kütlesi ölçülerek numunelerde kullanılan yapıştırıcı miktarı bulunmuştur. Çekirdeklerin hacim ölçüleri Solidworks® 2018 programından faydalanılarak sandviç yapıların yoğunlukları hesap edilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda üretilen üç farklı hücre genişliğindeki çekirdeklerin kütlelerinin birbirine yakın olduğu, iki katlı numunelerinde tek katlı numunelere göre yaklaşık yüzde otuz altı daha fazla kütleyle sahip olduğu Çizelge 4.3’de görülmektedir.

**Çizelge 4.3:** PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri

Numune adı	Çekirdeklerin kütlesi (g)	Yüzeylerin kütlesi (g)	Yapıştırıcı kütlesi (g)	Sandviç yapının kütlesi (g)	Sandviç yapının yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
S_6	51,13	32,18	10,09	93,40	1,45
S_9	51,69	31,85	12,92	96,46	1,53
S_12	52,83	31,32	13,78	97,93	1,53
D_6/6	51,38	47,96	21,66	121,00	1,62
D_9/9	50,34	47,57	31,93	129,84	1,78
D_12/12	51,95	48,52	29,23	129,70	1,76
D_6/9	50,80	48,04	36,76	135,60	1,84
D_9/12	51,45	47,40	31,47	130,32	1,78
D_6/12	51,14	47,65	38,66	137,45	1,85

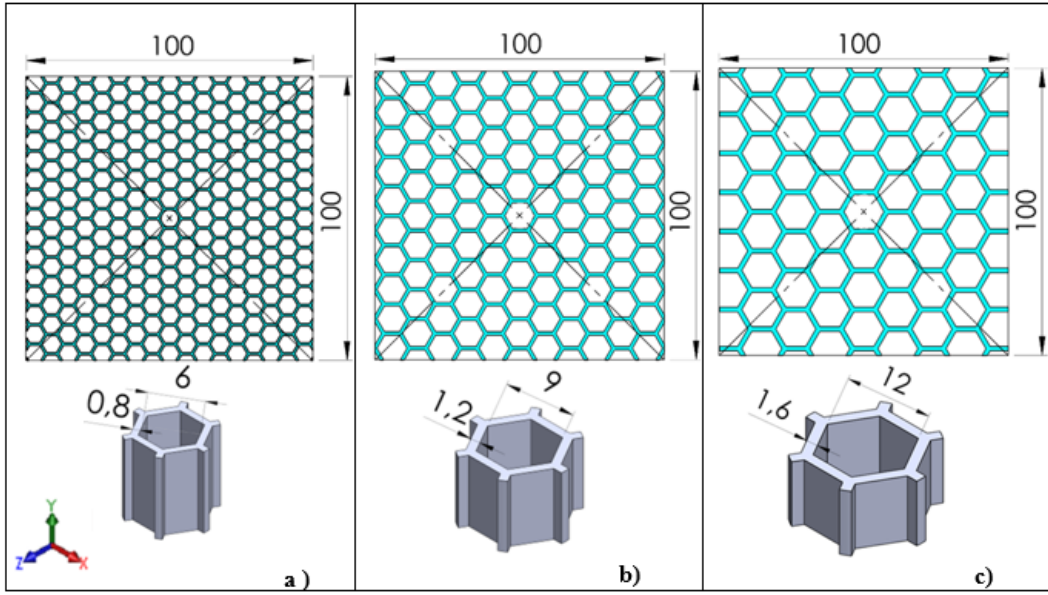
#### 4.1.2 Düşük hızda darbe test numunelerinin tasarım ve üretimi

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemiyle üretilen üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığına sahip darbe test numunelerinin darbeye karşı davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 4.7’de bileşenleri ile birlikte görüntüsü verilen numunelerin ölçüleri ASTM D7766 [73] standardına göre eni ve boyu 100 mm - 100 mm olarak kararlaştırılmıştır.



**Şekil 4.7:** 100 mm – 100 mm ölçülerindeki darbe numunelerinin Solidworks® 2018 CAD tasarım programında izometrik görünüşüne ait ekran görüntüsü

Şekil 4.8’de bir bal peteği levhasından 100 mm - 100 mm’lik karenin köşegenlerinin kesişim noktası, bir peteğin iç teğet daire merkezi kabul edilerek numunelerin tasarımı yapılmıştır. Hücre genişliği 6 mm’den 12 mm’ye genişletildiğinde hücre sayısının azaldığı Şekil 4.8’de görülmektedir. Hücre genişliği 6 mm, 9 mm ve 12 mm hücre duvar kalınlıkları sırasıyla 0,8 mm, 1,2 mm ve 1,6 mm olan 3 farklı geometrideki darbe numuneleri Solidworks® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımında tasarlanmıştır.



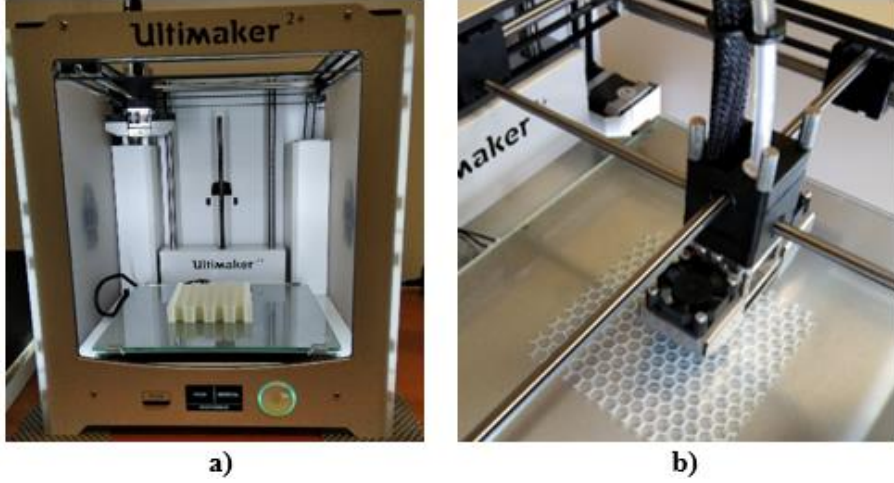
**Şekil 4.8:** Üç farklı hücre genişliğinde bal peteği darbe numunelerinin boyutlarının Solidworks® 2018 programındaki görüntüleri a. Hücre genişliği 6 mm b. Hücre genişliği 9 mm c. Hücre genişliği 12 mm.

Hücre genişlik ölçüsü büyütüldüğünde, eşit yüzey alanı elde edebilmek için hücre duvar kalınlıkları da büyütülmüştür. Yazıcıda nozul çapı 0,4 mm olduğu için hücre duvar kalınlıkları 0,4 mm ve katları şeklinde eklenmiştir. Tasarlanan geometrilerin yüzey alan ölçüleri Solidworks® 2018 yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Üç farklı genişlikteki hücreye sahip darbe numunelerinin yüzey alanlarının birbirine yakın olduğu Çizelge 4.4’de görülmektedir.

**Çizelge 4.4:** Eni ve boyu 100 mm - 100 mm ölçülerindeki darbe numunelerinin yüzey alan değerleri

Hücre genişliği (mm)	Hücre duvar kalınlığı (mm)	Hücre yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
6	0,8	2197,2
9	1,2	2248,6
12	1,6	2172,7

Numuneler Şekil 4.9 a) ve b)’de görülen Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcıda üretmek için G-kodlarının çıkartılmasında Ultimaker Cura 4.10.0 CAM yazılımından faydalanılmıştır. Yazıcının yükseklik kalibrasyonu çekirdeklerin üretimine başlamadan önce manuel olarak ayarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcıya beyaz renkli PLA filament takılmış ve iki katlı numuneler için 10 mm ve tek katlı numuneler için 20 mm yüksekliğinde çekirdek kısımlar üretilmiştir. Ultimaker firmasının PLA filamentini için belirlediği baskı tablası ve nozul sıcaklık değerleri 3 boyutlu yazıcıda uygulanmıştır.



**Şekil 4.9:** a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcının görüntüsü b) PLA darbe numunesinin yazdırma görüntüsü.

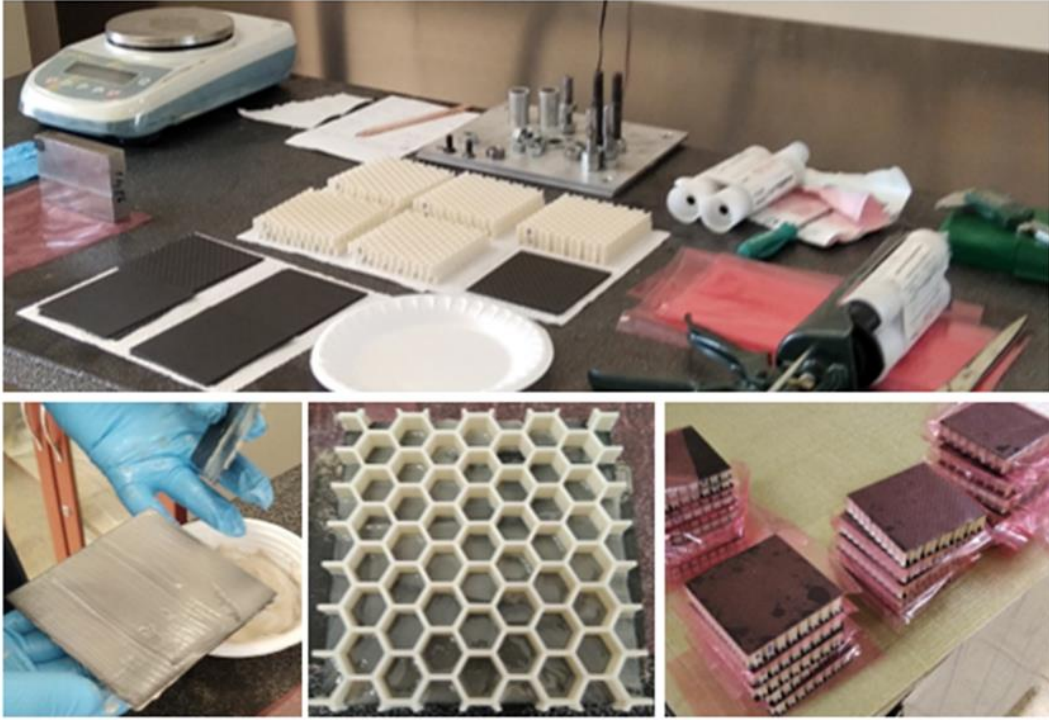
Sandviç kompozit numunelerde yüzey olarak 1 mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. Şekil 4.10’da görülen Kompozitnet firmasından tedarik edilen pro tipi CFRP plakalar karbon fiber epoksi prepregden imal edilmiştir [74]. CFRP plakalar yapıştırılmaya geçmeden önce 100x100 mm kare ölçüsünde CNC tezgâhta kesimleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.10:** CFRP plakaların görüntüleri.

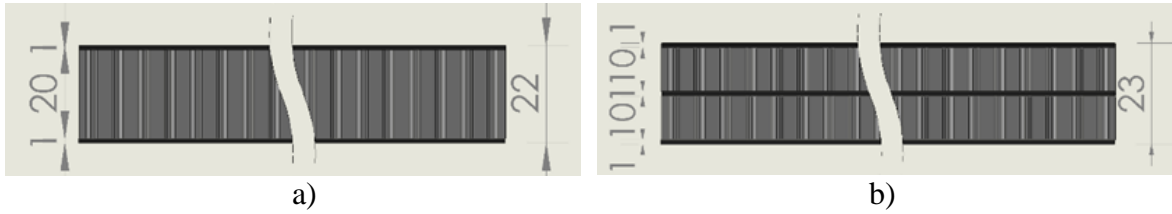
İki bileşenli epoksi esaslı Araldite® 2015 yapıştırıcı kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda üretilen çekirdekler ile CFRP plakalar yapıştırılmıştır. Yapıştırma prosesleri Şekil 4.11’de görülmektedir. Yapıştırıcıyı CFRP plakaya uygulamak için bir spatula kullanıldı ve malzemeler üst üste getirilerek birbirine yapıştırıldı. Yapıştırıcının kurlaşması için birleştirilmiş sandviç yapıya 24 saat boyunca 0,5 MPa’lık bir basınç uygulanmıştır.





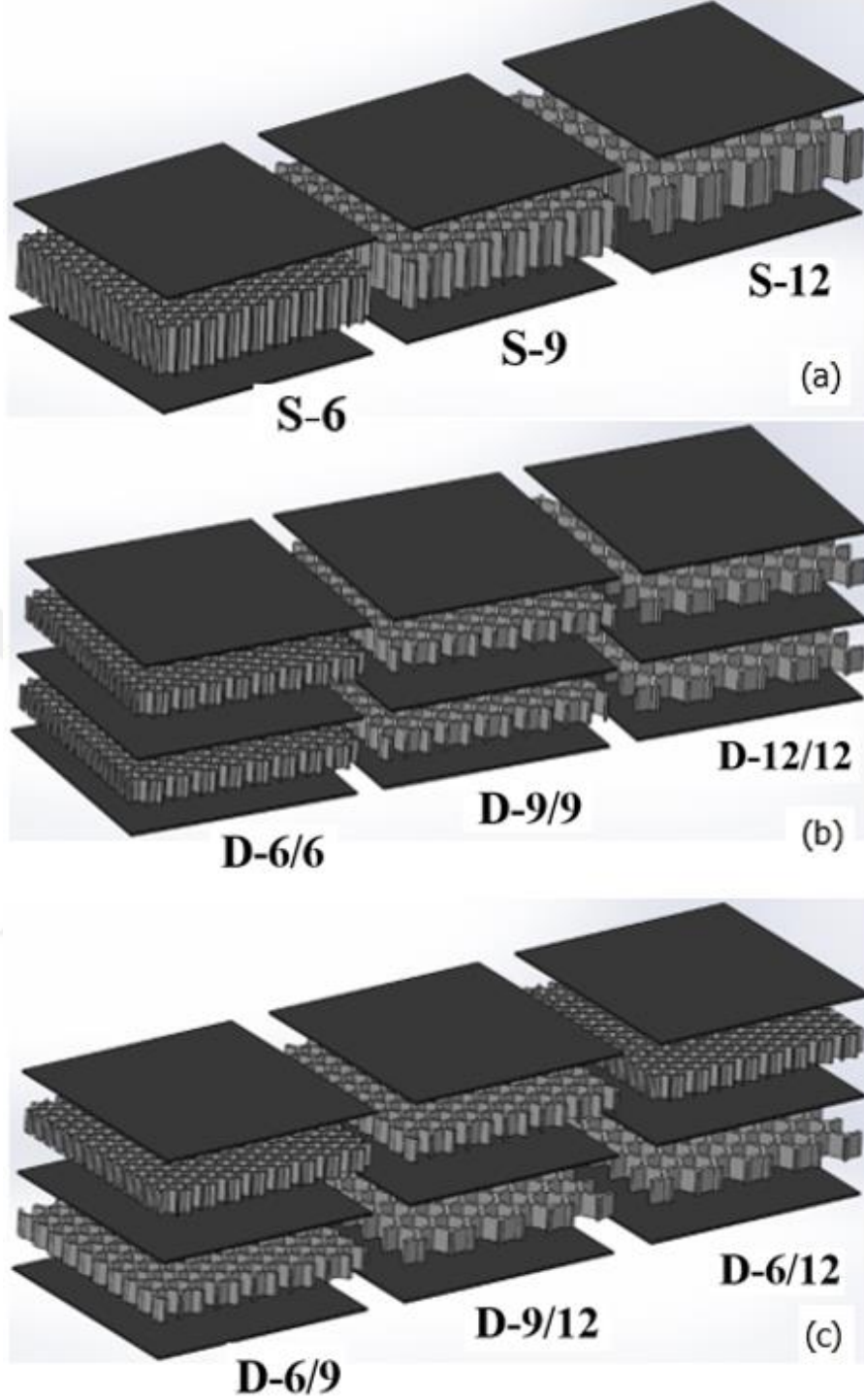
**Şekil 4.11:** Sandviç yapıların yapıştırma aşamalarının görüntüsü

Şekil 4.12’de görülen tek katlı numuneler 20 mm çekirdek ve 1’er mm alt ve üst yüzey toplam 22 mm yüksekliğindedir. İki katlı numuneler ise 10’ar mm alt ve üst çekirdek 1’er mm alt, üst ve ara yüzeylerle birlikte toplam 23 mm yüksekliğindedir.



**Şekil 4.12:** Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı sandviç numune b) İki katlı sandviç numune.

Şekil 4.13’de araştırma için ürettiğimiz dokuz farklı numune tipi görülmektedir. Bunlardan üç tanesi 6 mm, 9 mm, 12 mm hücre genişliğinde tek katlı, üç tanesi her katında aynı hücre genişliğinde iki katlı ve üç tanesi de hibrit iki katlı numunelerden oluşmaktadır. Tek katlı numunelere single kelimesinin ilk harfi (S), iki katlı numunelere ise double kelimesinin ilk harfi (D), verilerek adlandırılmıştır. Üretilen numunelere sırasıyla sandviç yapının kat tipi, hücre genişliği, numune sırası kodlaması yapılarak adlandırılmıştır. Örneğin, D-6/12 adlı numunede sandviç yapının iki katlı, üst katta çekirdeğin hücre genişliğinin 6 mm, alt katta çekirdeğin hücre genişliğinin 12 mm numune olduğunu ifade etmektedir.



**Şekil 4.13:** Darbe testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.

Yapıştırma öncesi çekirdeklerin ve CFRP plakaların KERN PLS 6200-2A marka (kapasite: 6,200 g, hassasiyet: 0,01 g) hassas teraziyle kütle ölçümleri yapılmıştır. Yapıştırma sonrası sandviç kompozit numunelerin toplam kütlesi ölçülerek numunelerde kullanılan yapıştırıcı miktarı bulunmuştur. Çekirdeklerin hacim ölçümleri Solidworks® 2018 programından

faýdalanılarak sandviç yapıların yoğunlukları hesap edilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda üretilen üç farklı hücre genişliğindeki çekirdeklerin kütlelerinin birbirine yakın olduğu Çizelge 4.5’de görülmektedir.

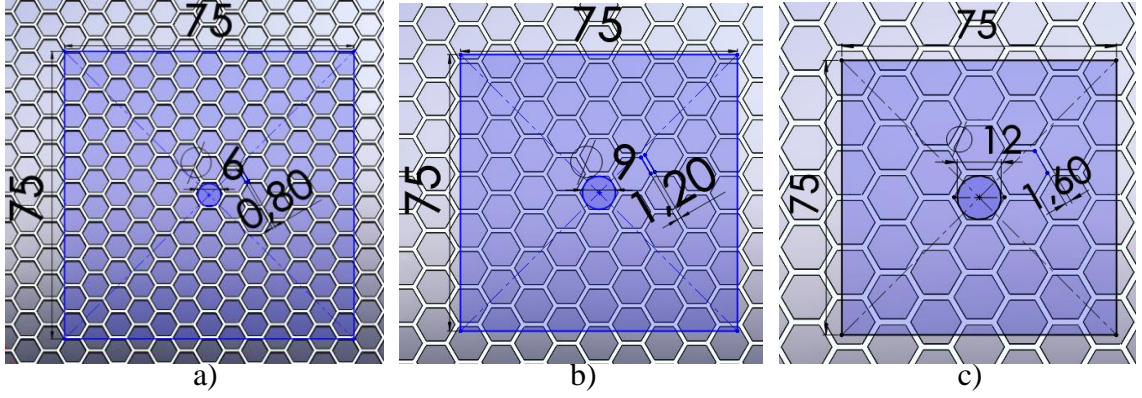
**Çizelge 4.5:** PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri

Numune adı	Çekirdeklerin kütlesi (g)	Yüzeylerin kütlesi (g)	Yapıştırıcı kütlesi (g)	Sandviç yapının kütlesi (g)	Sandviç yapının yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
S_6	48,84	31,63	11,21	91,67	1,43
S_9	53,12	31,72	13,95	98,79	1,52
S_12	50,85	31,80	14,76	97,41	1,54
D_6/6	48,96	46,61	21,60	117,17	1,58
D_9/9	51,68	47,53	23,79	122,99	1,64
D_12/12	49,98	47,32	21,51	118,79	1,62
D_6/9	51,02	46,92	19,71	117,65	1,58
D_9/12	50,70	46,99	20,99	118,68	1,60
D_6/12	50,20	47,53	23,60	121,33	1,65

#### 4.1.3 Basma test numunelerinin tasarım ve üretimi

Basma numunelerinin tasarımı ASTM C365-16 [75] standardında, hücre genişliğine göre minimum basma yüzey alanı 5625 mm<sup>2</sup> (75 mm x 75 mm) olarak belirlenmiştir. Standart da belirtilen ölçülerde 3 boyutlu basma numuneleri Solidworks 2018 CAD programında tasarımları yapılmıştır. Bir peteğin iç teğet daire merkezi, 75 mm - 75 mm’lik bir karenin köşegenlerinin kesişim noktası olarak belirlenmiş ve kare elde edilmiştir. Hücre genişliği 6 mm, 9 mm ve 12 mm hücre duvar kalınlıkları sırasıyla 0,8 mm, 1,2 mm ve 1,6 mm olan bal peteği levhasından 75 mm - 75 mm kare şeklinde kesilerek numunelerin basma yüzeyleri elde edilmiştir (Şekil 4.14).

Hücre genişlikleri büyütüldüğünde, eşit yüzey alanları elde edebilmek için hücre duvar kalınlıklarının ölçüsü de büyütülmüştür. Yazıcıda 0,4 mm nozul çapı kullanıldığından dolayı hücre duvar kalınlıkları 0,4 mm artırılarak büyütülmüştür. Elde edilen geometrilerin yüzey alanları Solidworks® 2018 programından alınmıştır. Bu alanların birbirine yakın değerlerde olduğu Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

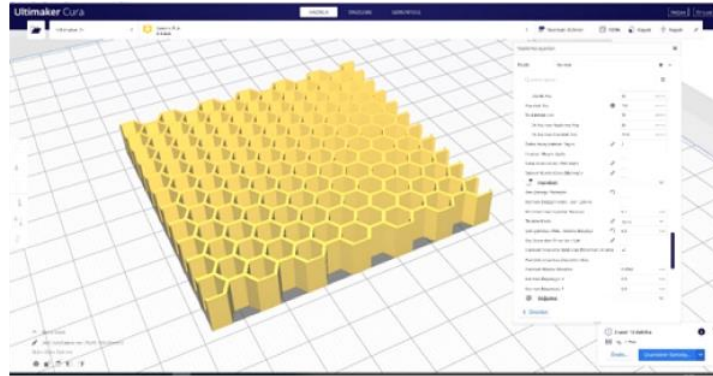


**Şekil 4.14:** 75 mm - 75 mm eni ve boyunda sırasıyla 6-9-12 mm hücre genişliğinde, 10 mm yüksekliğindeki basma numunelerinin Solidworks 2018 CAD tasarım görüntüleri: a); b); c) üst görünüşleri.

**Çizelge 4.6:** Basma numunelerin tasarımdan elde edilen hücre kesit alan değerleri

Hücre çapı (mm)	Hücre duvar kalınlığı (mm)	Hücre yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
6	0,8	1222,65
9	1,2	1222,16
12	1,6	1207,46

Numunelerin Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcıda üretebilmek için G-kodlarının çıkartılmasında Şekil 4.15’de gösterilen Ultimaker Cura 4.7 CAM yazılımından faydalanılmıştır. Ultimaker Cura 4.7 yazılımında 3 boyutlu yazıcı seçimi yapılarak, Solidworks 2018 CAD yazılımında “.stl” uzantılı basma numunesi tasarımı açılmıştır.

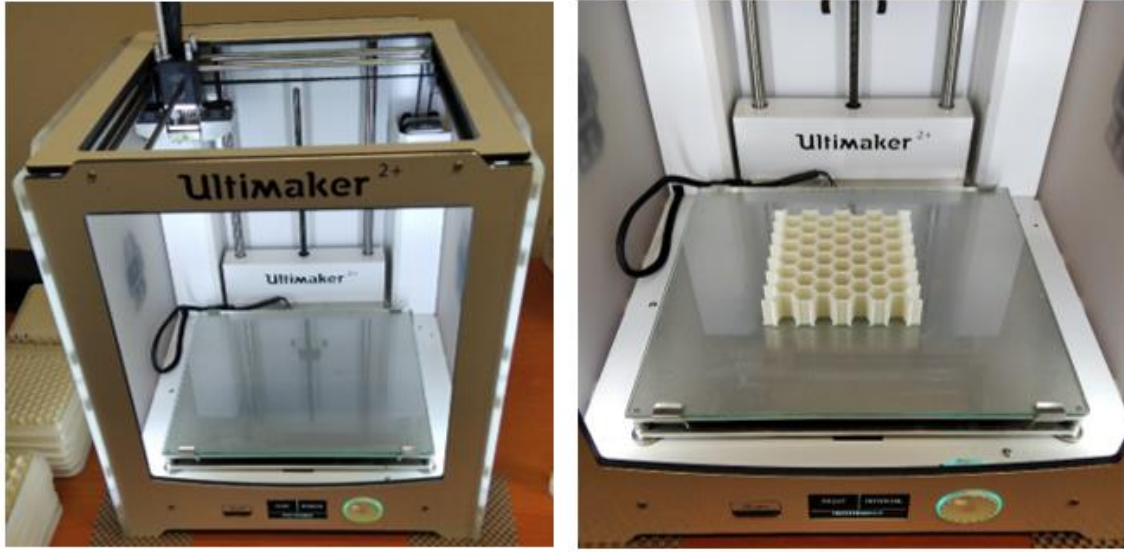


**Şekil 4.15:** Ultimaker Cura 4.7 Cam yazılım görüntüsü

Çekirdeklerin üretimine başlamadan önce Şekil 4.16 a)’da görülen Ultimaker 2+ marka yazıcı tablasının yükseklik kalibrasyonu manuel yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya beyaz renkli PLA filament takılmıştır. Şekil 4.16 b)’de görülen tek katlı numuneler için 20 mm yüksekliğinde, iki katlı numuneler için 10 mm yüksekliğinde çekirdeklerin üretimi



yapılmıştır. Ultimaker firmasının PLA filamenti için belirlediği baskı tablası ve nozul sıcaklık değerleri 3 boyutlu yazıcıda uygulanmıştır.



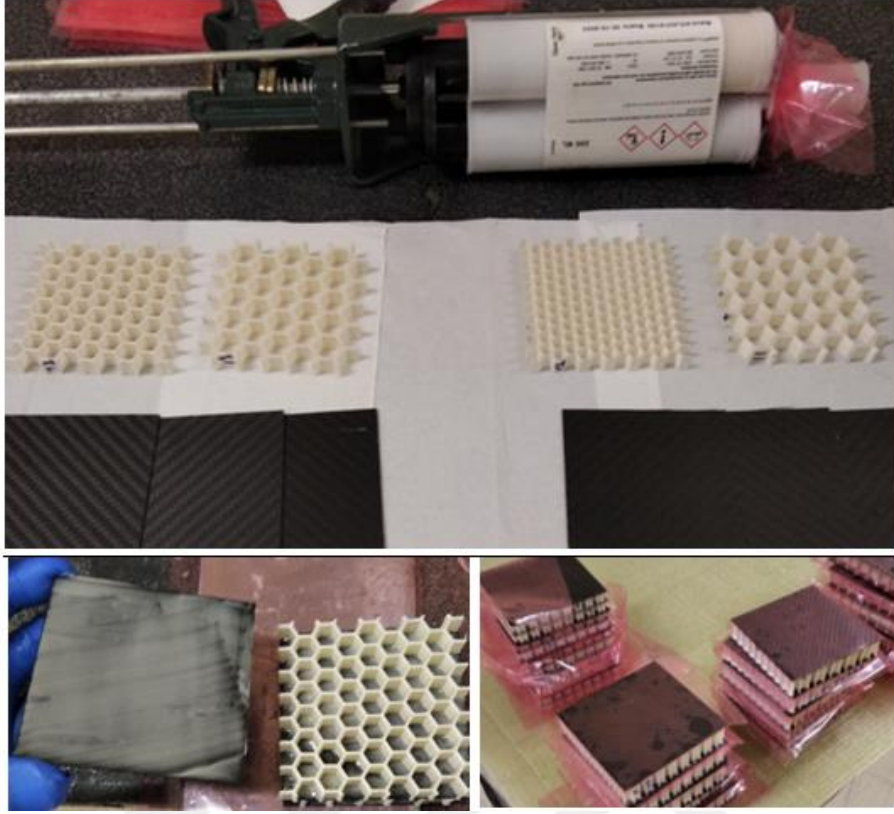
(a)

(b)

**Şekil 4.16:** a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcının görüntüsü b) PLA numunenin bitmiş görüntüsü.

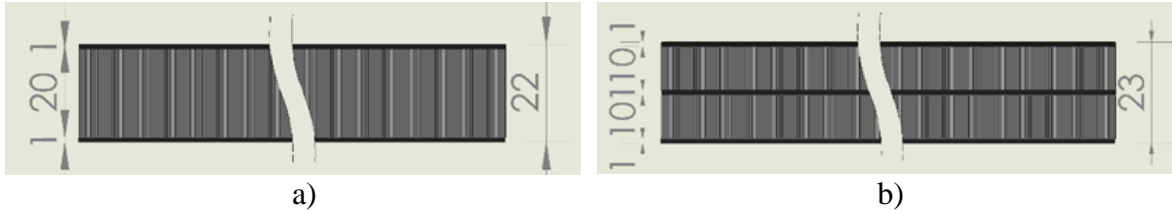
Sandviç yapılarda yüzey olarak 1 mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. Kompozitnet firmasından sağlanan pro tipi CFRP plakalar karbon fiber epoksi prepregden sıcak preslerde yüzeyleri düzgün, her yeri eşit kalınlıkta imal edilmiştir. Plakalar yapıştırma öncesi 75 mm - 75 mm ölçülerinde CNC tezgahda kesimleri yapılmıştır.

İki bileşenli epoksi esaslı Araldite® 2015 yapıştırıcı kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda üretilen çekirdekler ile CFRP plakalar yapıştırılmıştır. Yapıştırma prosesleri Şekil 4.17'de görülmektedir. Yapıştırıcıyı CFRP plakaya uygulamak için bir spatula kullanıldı ve malzemeler üst üste getirilerek birbirine yapıştırıldı. Yapıştırıcının kürleşmesi için birleştirilmiş sandviç yapıya 24 saat boyunca 0,5 MPa'lık bir basınç uygulanmıştır.



**Şekil 4.17:** Sandviç yapıların yapıştırma aşama görüntüleri.

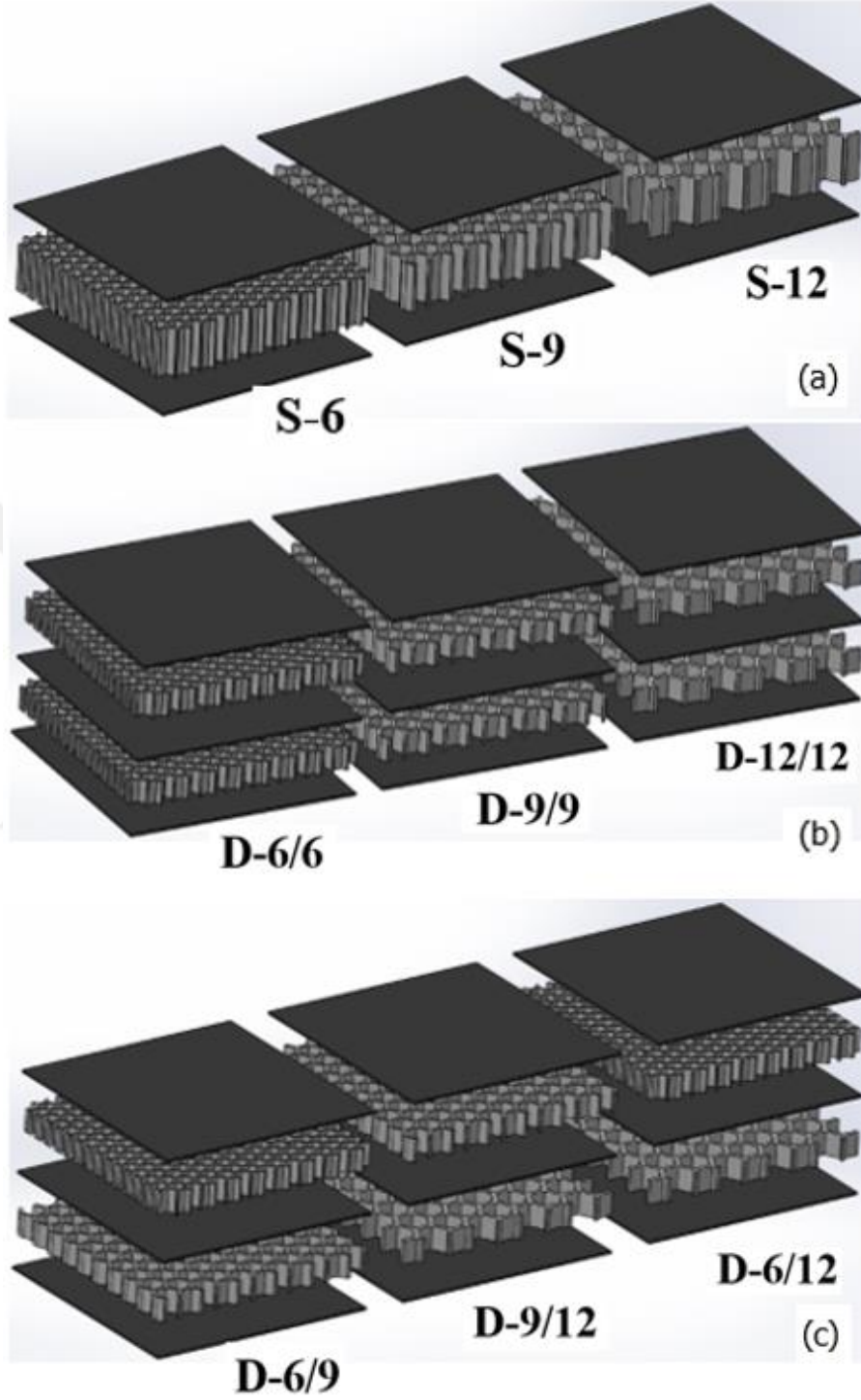
Şekil 4.18’de görülen tek katlı numuneler 20 mm çekirdek ve 1’er mm alt ve üst yüzey toplam 22 mm yüksekliğindedir. İki katlı numuneler ise 10’ar mm alt ve üst çekirdek 1’er mm alt, üst ve ara yüzeylerle birlikte toplam 23 mm yüksekliğindedir.



**Şekil 4.18:** Kompozit sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey yükseklik ölçüleri a) Tek katlı; b) İki katlı.

Şekil 4.19’da araştırma için ürettiğimiz dokuz farklı numune tipi görülmektedir. Bunlardan üç tanesi 6, 9, 12 mm hücre genişliğinde tek katlı, üç tanesi her katında aynı hücre genişliğinde iki katlı ve üç tanesi de hibrit iki katlı numunelerden oluşmaktadır. Tek katlı numunelere single kelimesinin ilk harfi (S), iki katlı numunelere ise double kelimesinin ilk harfi (D) verilerek adlandırılmıştır. Üretilen numunelere sırasıyla sandviç yapının kat tipi, hücre genişliği, numune sırası kodlaması yapılarak adlandırılmıştır. Örneğin, D-9/12 adlı

numunede sandviç yapının iki katlı, üst katta çekirdeğin hücre genişliğinin 9 mm, alt katta çekirdeğin hücre genişliğinin 12 mm numune olduğunu ifade etmektedir.



**Şekil 4.19:** Basma testinde kullanılan sandviç yapı tiplerinin görüntüleri a) 3 farklı hücre genişliğinde tek katlı sandviç yapılar; b) Aynı hücre genişliğinde iki katlı sandviç yapılar; c) Hibrit iki katlı sandviç yapılar.

Yapıştırma öncesi çekirdeklerin ve CFRP plakaların KERN PLS 6200-2A marka (kapasite: 6,200 g, hassasiyet: 0,01 g) hassas teraziyle kütle ölçümleri yapılmıştır. Yapıştırma sonrası sandviç kompozit numunelerin toplam kütlesi ölçülerek numunelerde kullanılan yapıştırıcı miktarı bulunmuştur. Çekirdeklerin hacim ölçüleri Solidworks® 2018 programından faydalanılarak sandviç yapıların yoğunlukları hesap edilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda üretilen üç farklı hücre genişliğindeki çekirdeklerin kütlelerinin birbirine yakın olduğu Çizelge 4.7’de görülmektedir.

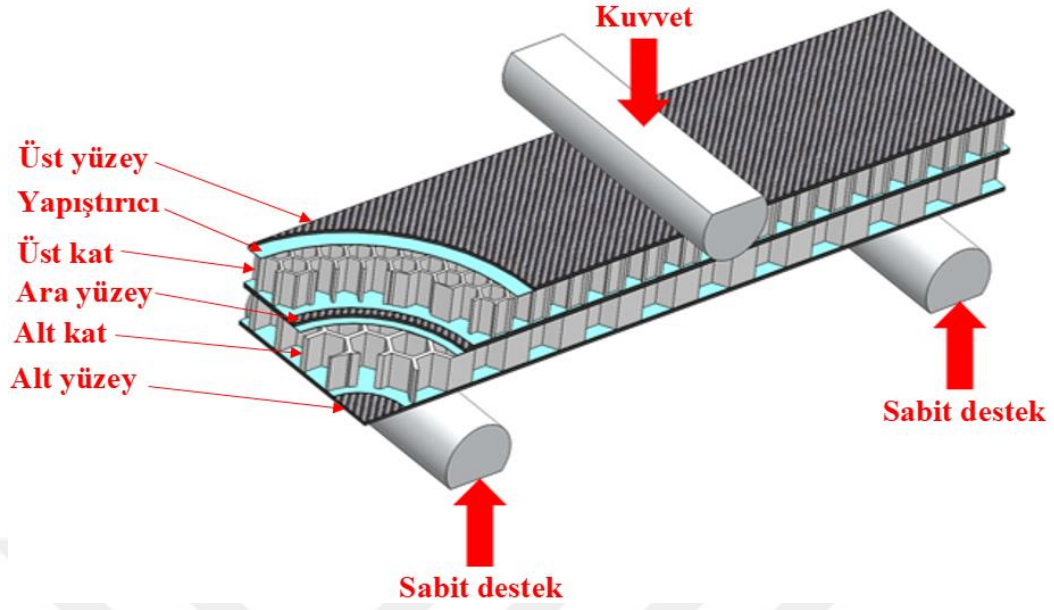
**Çizelge 4.7:** PLA bal peteği çekirdekli sandviç yapıların tiplerine göre ortalama değerleri

Numune adı	Çekirdeklerin kütlesi (g)	Yüzeylerin kütlesi (g)	Yapıştırıcı kütlesi (g)	Sandviç yapının kütlesi (g)	Sandviç yapının yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
S_6	26,48	16,73	6,87	50,08	1,40
S_9	28,33	17,05	5,56	50,94	1,43
S_12	28,16	17,03	6,56	51,75	1,46
D_6/6	27,81	26,08	12,26	66,15	1,60
D_9/9	29,10	25,34	14,12	68,56	1,66
D_12/12	28,44	25,68	11,15	65,27	1,59
D_6/9	27,80	25,97	12,18	65,95	1,60
D_9/12	27,70	26,00	11,98	65,68	1,60
D_6/12	27,11	25,87	10,04	63,02	1,53

## 4.2 Deneysel Çalışmalar

### 4.2.1 Üç nokta eğme deneyleri

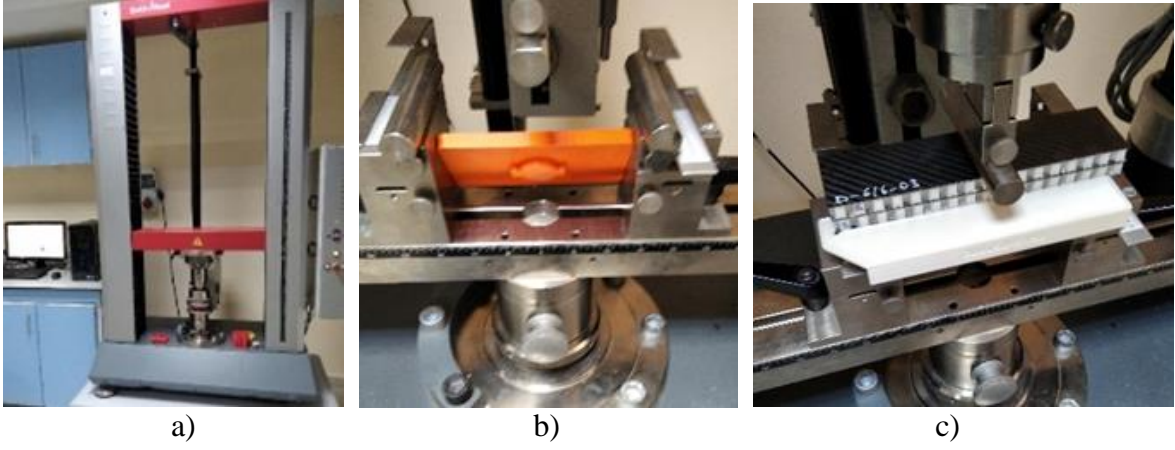
Şekil 4.20’de yüzey, çekirdek ve yapıştırıcı kısımlardan oluşan iki katlı hibrit kompozit sandviç yapı görülmektedir. Burada üç nokta eğme testi sırasında sabit alt iki pin ile kuvvet uygulayan hareketli pin görüntüsü örnek olarak gösterilmiştir. Sandviç yapılarda yüzey olarak 1 mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. Kompozitnet firmasından sağlanan pro tipi CFRP plakalar karbon fiber epoksi prepregden sıcak preslerde her iki yüzeyi düzgün, her yeri eşit kalınlıkta imal edilmiştir. Plakalar yapıştırma öncesi 200 mm - 50 mm ölçülerinde CNC tezgahta hassas olarak kesimleri yapılmıştır.



**Şekil 4.20:** Hibrit sandviç kompozitin üç nokta eğme test düzeneğine ait Solidworks® 2018 programında şematik gösterimi

Eğme testleri Şekil 4.21 a)'da gösterilen Zwick/Roell Z100 kapasitesi 100 kN'luk test cihazında uygulanmıştır. Testler 6 mm/dk hızda ve ASTM C393-16 [76] standardı seçilerek uygulanmıştır. Numunelerin alt destek mesafe aralığının 150 mm olması için Şekil 4.21 b)'de gösterilen turuncu renkli master kullanılmıştır. 3 nokta eğme testlerinde, numunelerin her birinin aynı konumda yapılamaması önemli bir sorundur. Yapılan testlerde hatasız birbiriyle uyumlu sonuçların elde edilmesi için numunelerin eğme cihazı üzerinde her defasında aynı yerde konumlandırılması gerekmektedir. Bu problemin ortadan kaldırılabilmesi için Şekil 4.21 c)'de gösterilen beyaz renkli master ekipmanı tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcıda üretilerek testlerde kullanılmıştır. Üretilen bu konum sabitleyici ekipmanla birlikte, üretilen tüm eğme numunelerine aynı nokta üzerinden kuvvet tatbiki suretiyle oluşabilecek konumlandırma problemi giderilmiştir.

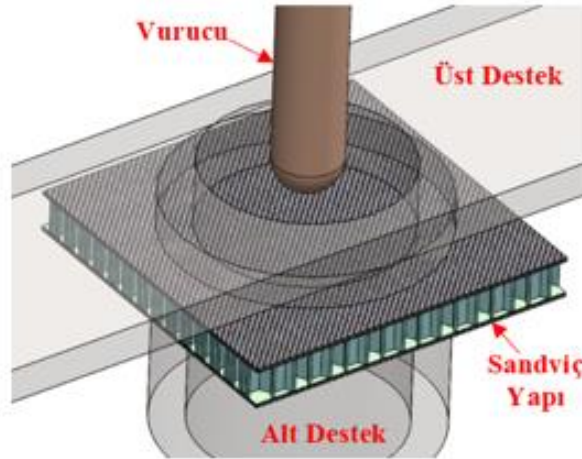




**Şekil 4.21:** a) Zwick/Roell Z100 eğme test cihazı görüntüsü b) Alt destek mesafesinin ayar şablonu c) Numunelerin konum şablonu

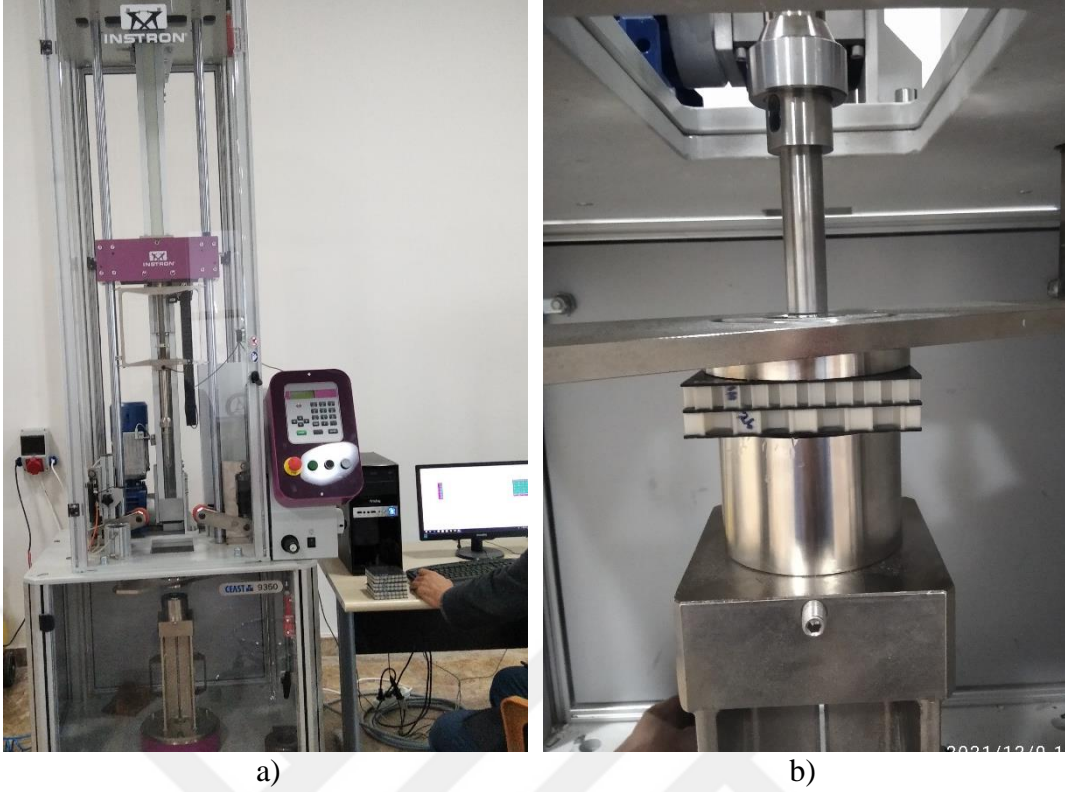
#### 4.2.2 Düşük hızda darbe deneyleri

Şekil 4.22’de düşük hızda darbe testi şematik olarak görülmektedir. Darbe testi sırasında numune sabit alt destek ve hareketli üst destek arasında sıkıştırılmaktadır. Kütlesi ve yüksekliği istenilen enerji düzeyine göre değiştirilen bir vurucu belli bir yükseklikten bırakılarak yerçekimi kuvvetiyle numuneye vurmaktadır. Vurucunun numuneye çarpma esnasındaki temas kuvveti, numune içerisindeki hareketi, geçen süre, hızı ve enerji gibi datalar bilgisayar programı aracılığıyla alınmaktadır.



**Şekil 4.22:** Düşük hızda darbe deneyinin şematik görüntüsü.

Şekil 4.23 a’da gösterilen Instron Ceast 9350 [76] test cihazıyla düşük hız darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri ASTM D7766 standardında Adıyaman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 4.23 b’de hibrit iki katlı bir numunenin cihazdaki duruşu gösterilmektedir.



**Şekil 4.23:** a) Instron ceast 9350 darbe test cihazı görüntüsü b) Hibrit darbe numunesinin test sırasındaki görüntüsü

Darbe testlerinde gerçekleştirilen parametreler Çizelge 4.8’de görülmektedir. Testlerde 20 mm çapa sahip küresel uçlu vurucu ile gerçekleştirilmiştir. İstenilen enerji seviyesinde darbe testi gerçekleştirmek için (1) numaralı denklemden faydalanılır. Yani vurucunun potansiyel enerjisi arzu edilen darbe enerjisidir. Vurucunun yüksekliği veya kütlesi değiştirilerek istenilen enerji düzeyinde testler gerçekleştirilir.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Burada,  $E$  darbe enerjisi (J);  $m$  vurucunun kütlesi (kg);  $g$  yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ); ve  $h$  vurucunun düşme yüksekliği (m)’dir.

**Çizelge 4.8:** Enerji değerlerine göre darbe testi için seçilen parametreler

Özellik	Test 1	Test 2	Test 3
Darbe enerjisi (J)	80	100	140
Vurucunun düşme yüksekliği (m)	0,526	0,658	0,560
Vurucunun kütlesi (kg)	15,5	15,5	25,5
Numune ölçüleri (mm)	100x100		
Vurucunun tipi ve çapı (mm)	Küresel, 20		

### 4.2.3 Basma deneyleri

Basma testlerinin bir kısmı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi (KSÜ) Üniversite Sanayi Kamu İş birliği Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezindeki (ÜSKİM) Şekil 4.24 a) ve b)'de gösterilen 100 kN kapasiteli Zwick/Roell Z100 [77] basma test cihazıyla yapılmıştır. Testler 0,5 mm/dk hızda ve ASTM C365-16 standardı seçilerek yapılmıştır. Numunelerin köşegen merkezinin alt basma tablasının daire merkeziyle aynı olması için Şekil 4.25 a)'da gösterilen sarı renkli şablon kullanılmıştır. 3 boyutlu yazıcıda PLA filament kullanılarak farklı hücre boyutlarında üretilen numunelerin basma dayanımları araştırılmıştır.

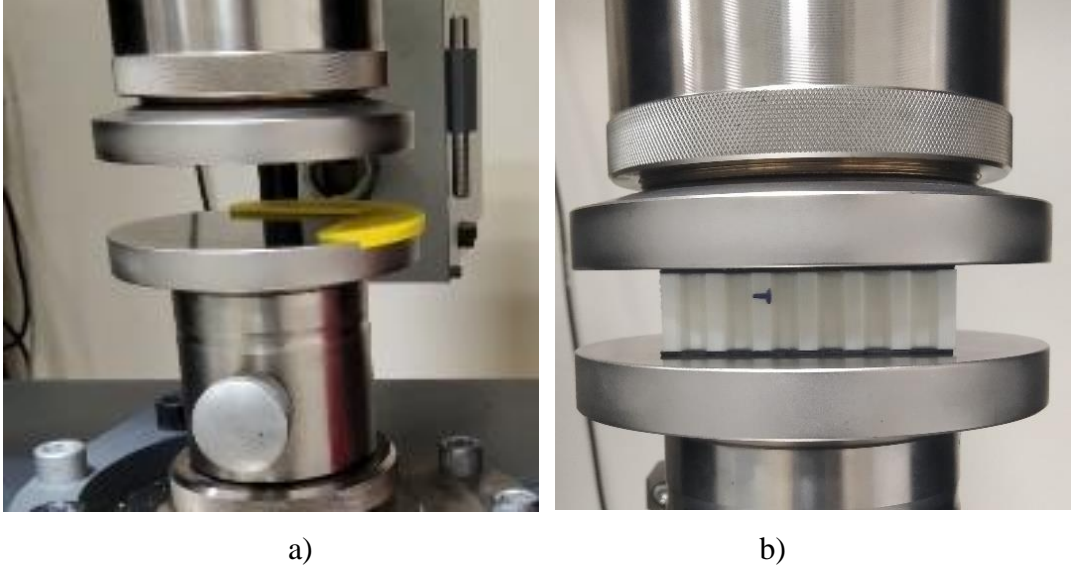


a)

b)

**Şekil 4.24:** a) Zwick/Roell Z100 basma test cihazı görüntüsü b) Numuneyi alt tablaya merkezini sağlayan şablonun görüntüsü.





**Şekil 4.25:** a) Numuneyi alt tablaya merkezini sağlayan şablonun görüntüsü b) Numunenin basma testi esnasındaki görüntüsü.

Yapılan basma testlerinde iki katlı sandviç kompozit sandviçlerinin basma dayanımlarının 100kN'u geçtiği görülmüştür. Bu yüzden iki katlı sandviç panellerin basma testleri Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarındaki Şekil 4.26'da görülen Shimadzu AG-IC model 250kN [78] kapasiteli universal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Testlere başlamadan önce KSÜ ÜSKİM'de yapılan aynı tipteki numunelerin Batman Üniversitesi Makine Mühendisliğindeki cihazda basma testleri yapılmış, elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin ÜSKİM'de elde edilen grafiklere benzer olduğu görülmüştür.

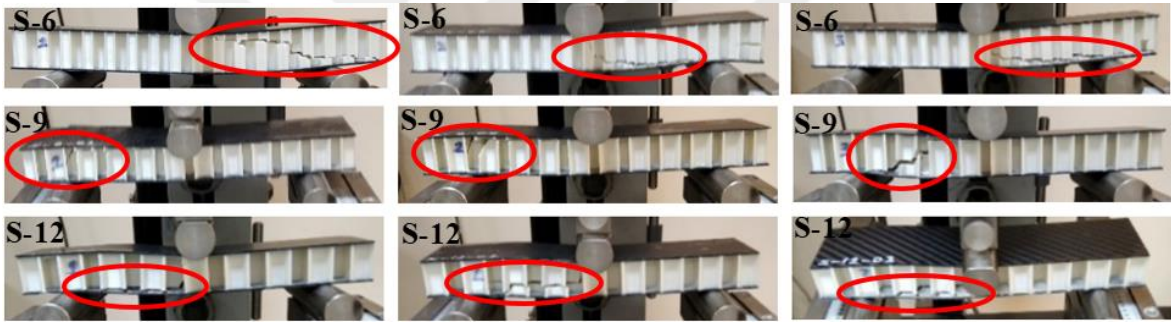


**Şekil 4.26:** Shimadzu AG-IC 250 kN kapasiteli üniversal çekme test cihazı görüntüsü.

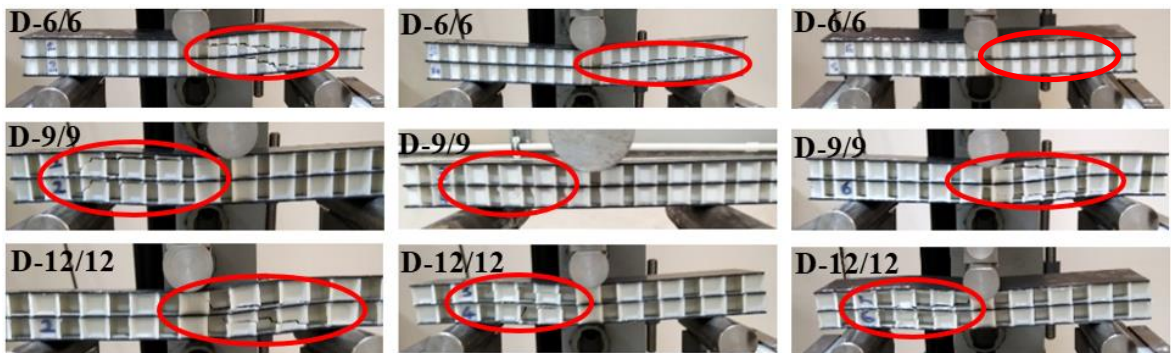
## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

### 5.1 Üç Nokta Eğme Denejlerinden Elde Edilen Sonuçlar

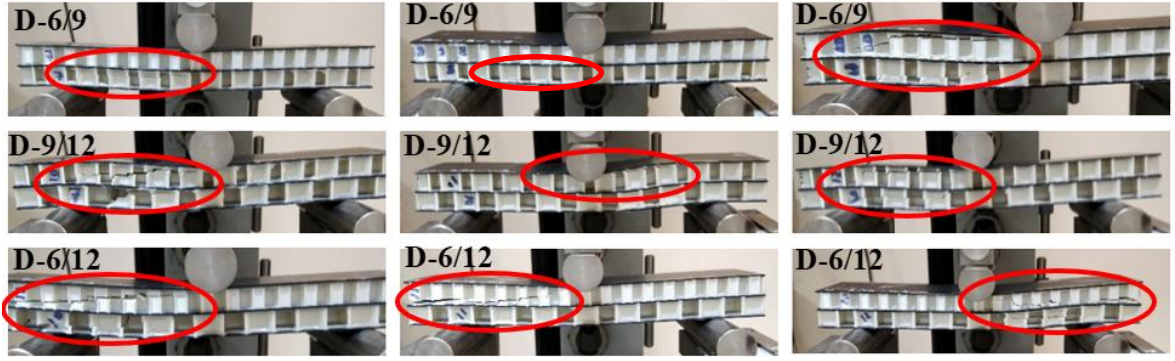
Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de üç nokta eğme testinde cihazın testi sonlandırdığı andaki numunelerin görüntüleri görölmektedir. Kırmızı renkli elips içerisinde alınan kısımlar sandviç yapıların uğradığı hasar tipleri hakkında bilgi vermektedir. Numunelerin yüzeylerinde kırılma, delaminasyon ve yapıştırma kaynaklı problem gerçekleşmemiştir. Yapıştırıcı ve yapıştırma yönteminin PLA çekirdek ile CFRP yüzey için uygun olduğu tespit edilmiştir. Hasarlar genellikle CFRP yüzeye göre daha gevrek olan PLA çekirdekte kırılma olarak gerçekleşmiştir. Bazı numunelerin çekirdek kısmında delaminasyon hataları da görölmüştür. Hücre genişliği 6 mm olan numunelerde kırılma yatay devam ederek diğerlerinden daha uzun kırılma tespit edilmiştir. Bunun sebebi yüke bağlı olarak kayma gerilmeleri küçük hücre genişliğinde daha iyi aktarılmasıdır.



Şekil 5.1: Tek katlı eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri

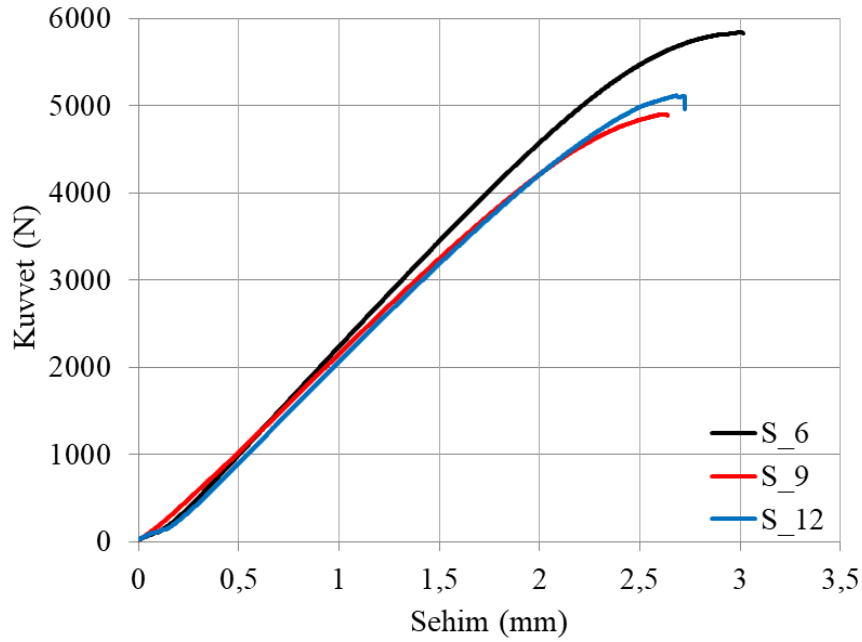


Şekil 5.2: İki katlı eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri



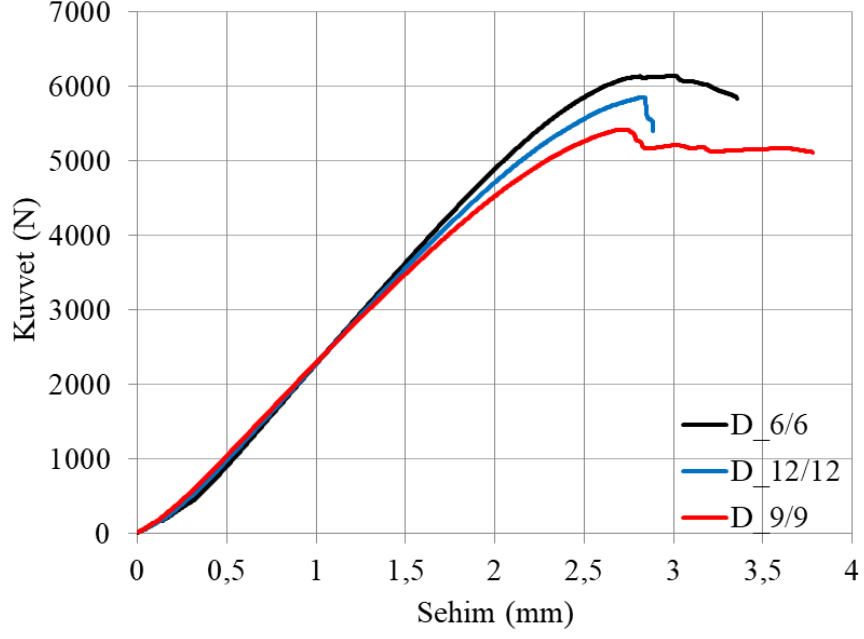
**Şekil 5.3:** Hibrit eğme numunelerinin test sonrası görüntüleri

Şekil 5.4’de tek katlı, aynı hücre genişliğinde iki katlı ve hibrit iki katlı kompozit sandviç yapıların hücre genişliklerine göre üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafikleri gösterilmektedir. Tek katlı sandviç yapılarda en yüksek eğme kuvveti 6 mm hücre genişliğine sahip yapılarda elde edilmiştir.



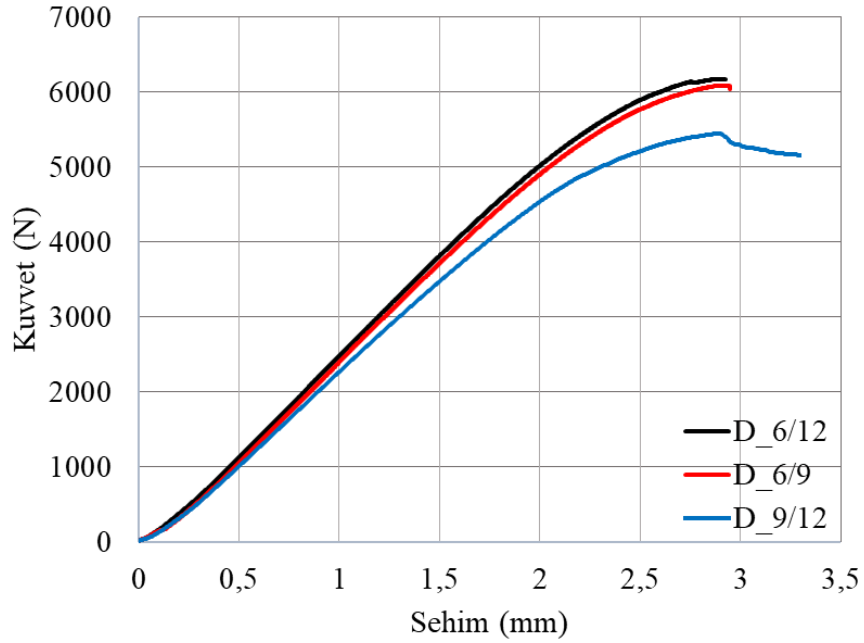
**Şekil 5.4:** Tek katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği.

Şekil 5.5’de iki katlı sandviç yapıların hücre genişliklerine göre üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafikleri gösterilmektedir. 6 mm hücre genişliğine sahip iki katlı D\_6/6 adlı sandviç numunelerde daha yüksek eğme kuvveti görülmektedir. Bunun sebebi uygulanan yükü yüzey tabakalar arasında daha iyi ilettiğinden kaynaklanmaktadır.



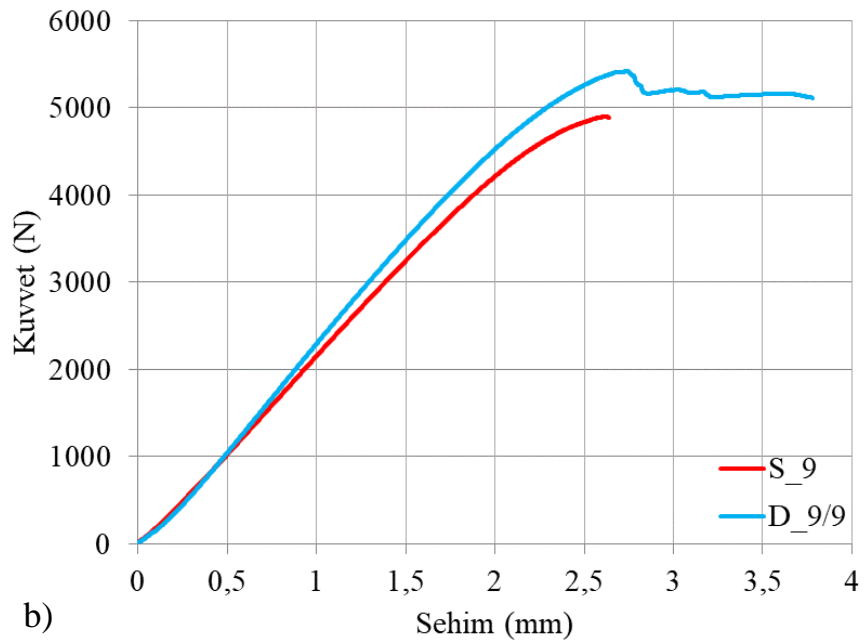
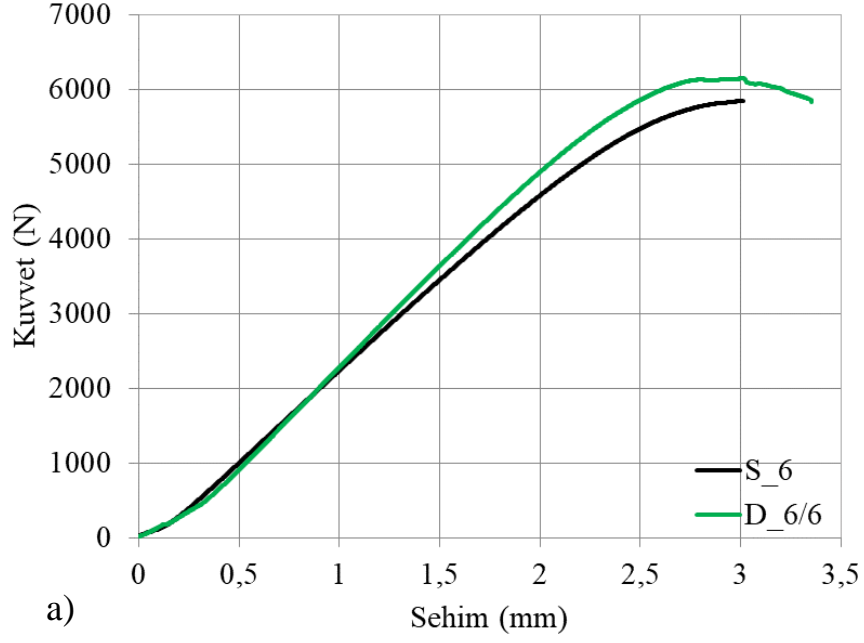
Şekil 5.5: İki katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği.

Hibrit iki katlı sandviç yapılarda, üst katta 6 mm hücre genişliğine sahip olan numunelerde daha yüksek eğme kuvveti görülmektedir (Şekil 5.6).

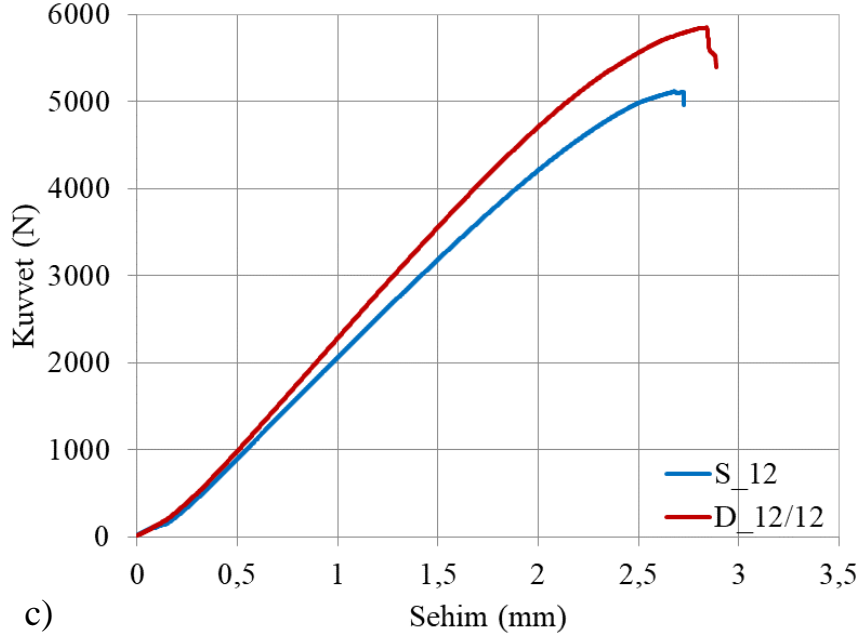


Şekil 5.6: Hibrit eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet-sehim grafiği.

Şekil 5.7 a), b) ve c)'de görüldüğü üzere iki katlı yapılarda maksimum eğme kuvveti ile sehim yüksekliği beklenildiği gibi [79] aynı hücre genişliğine sahip tek katlı yapılara göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi tek katlı ve iki katlı yapılarda toplam 20 mm yüksekliğinde PLA çekirdek kullanılmasına rağmen iki katlı yapılarda CFRP ara katman olmasından kaynaklanmaktadır.



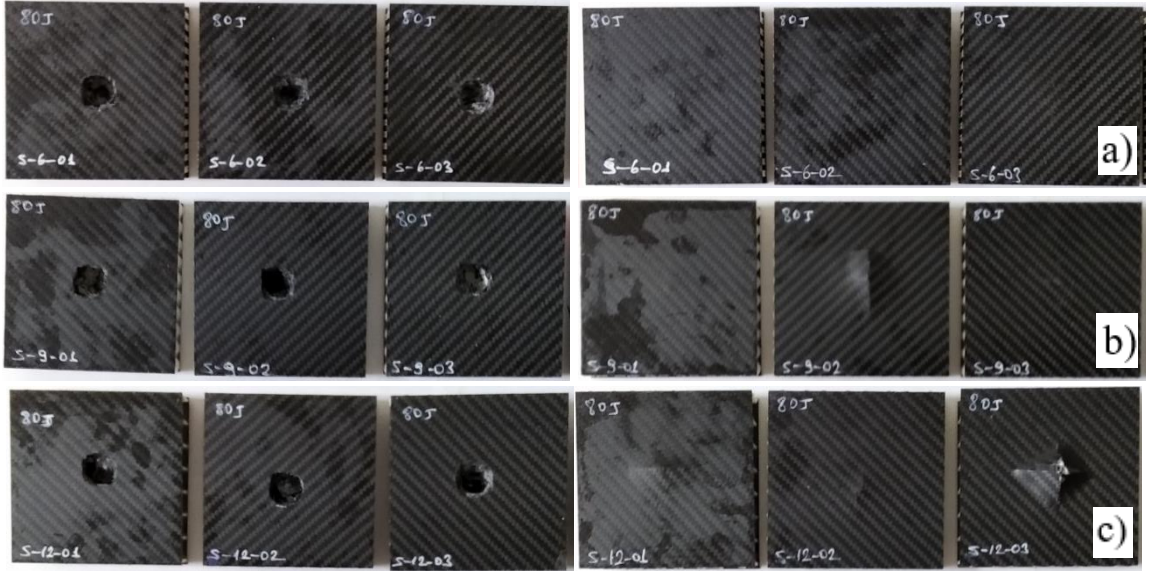




**Şekil 5.7:** Aynı hücre genişliğindeki tek katlı ve iki katlı eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet- sehim grafikleri a) S\_6 ile D\_6/6 numuneleri b) S\_9 ile S\_9/9 numuneleri c) S\_12 ile S\_12/12 numuneleri.

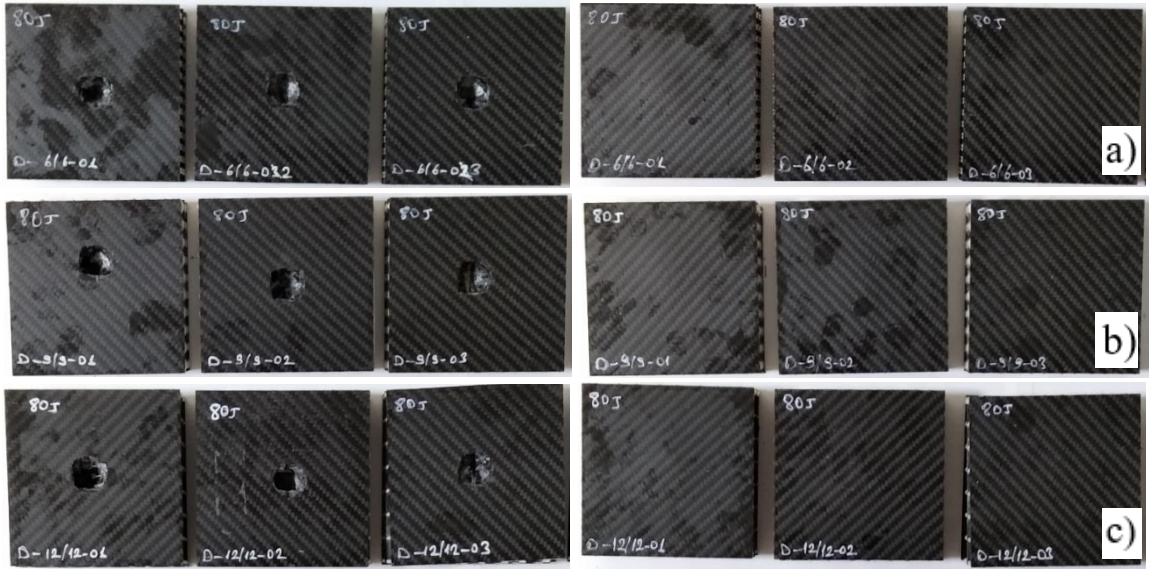
## 5.2 Düşük Hızda Darbe Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Tez çalışmasında darbe testlerine başlamadan önce numunelerin darbe dayanımlarını ölçmek için 10J'den 80J'e kadar 10'ar Joule enerji artırılarak ön çalışma yapılmıştır. Ön çalışmadan sonra testlere 80J'de başlanmaya karar verilmiştir. Şekil 5.8-15 arası şekillerde hücre genişliklerine göre sıralanan numunelerin 80J, 100J ve 140J darbe enerjilerinde yapılan darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. Şekillerde solda darbe test cihazındaki vurucunun ilk temas ettiği numunelerin üst kısmı, sağda ise numunelerin arka kısımları gösterilmiştir. Şekil 5.8'de tek katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 80J darbe enerji seviyesinde test sonrası görüntüleri görülmektedir. 80J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde üst yüzeylerin tamamının delindiği, S\_6 numunelerin alt yüzeylerinde hasar görülmemiş fakat S\_9 ve S\_12 numunelerin alt yüzeylerinde belirgin hasar oluştuğu görülmektedir.



**Şekil 5.8:** Tek katlı hücre genişliği 6mm, 9mm, 12mm olan sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) S\_6 darbe numunelerine ait görüntüler b) S\_9 darbe numunelerine ait görüntüler c) S\_12 darbe numunelerine ait görüntüler.

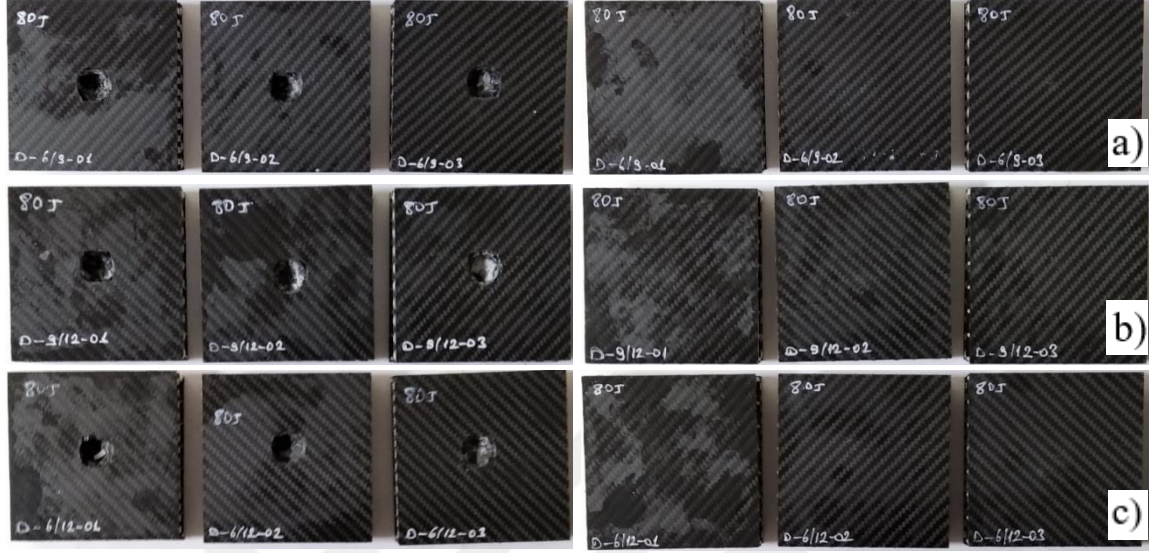
Şekil 5.9’da iki katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 80J enerji seviyesinde darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. 80J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde üst yüzeylerin tamamının delindiği alt yüzeylerinde hasar oluşmadığı görülmektedir.



**Şekil 5.9:** Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/6 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

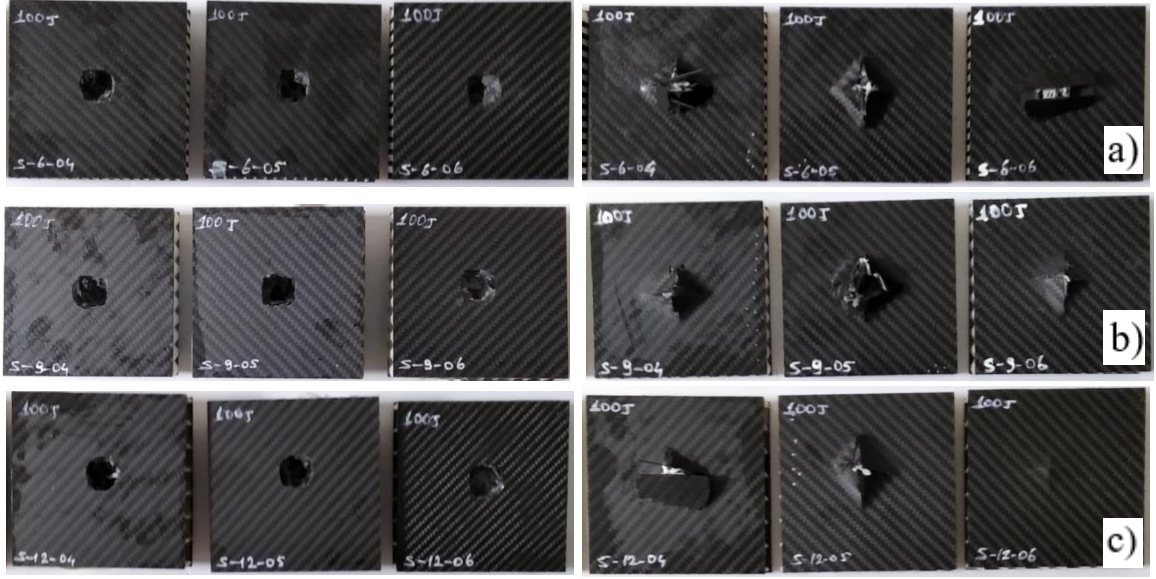


Şekil 5.10'da hibrit iki katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 80J enerji seviyesinde darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. 80J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde üst yüzeylerin tamamının delindiği alt yüzeylerinde hasar oluşmadığı görülmektedir.



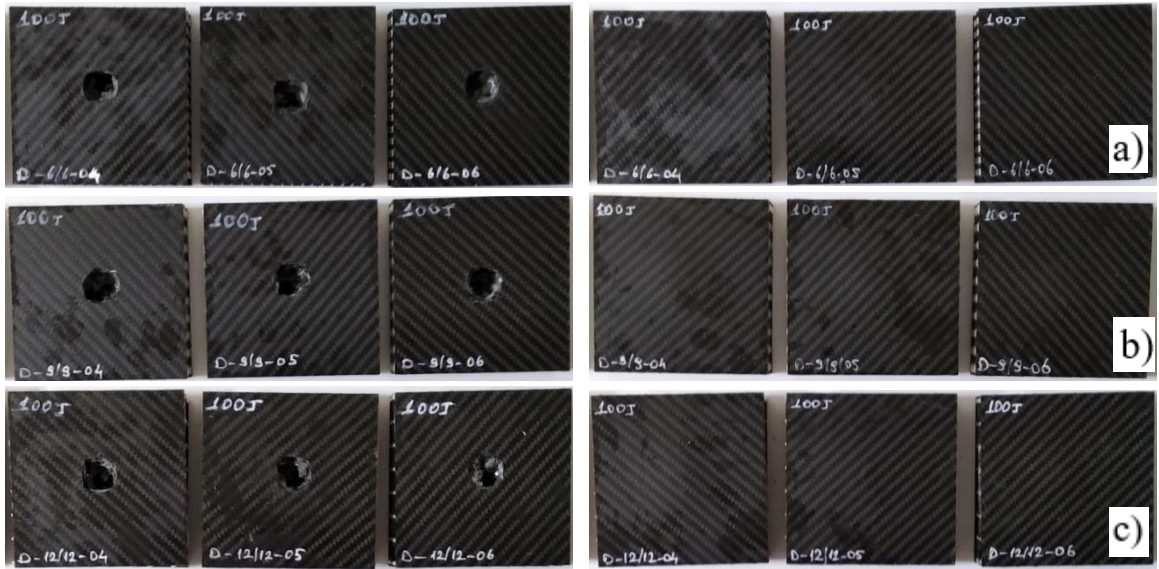
**Şekil 5.10:** Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit iki katlı sandviç kompozit numunelerin 80J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

Şekil 5.11'de tek katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 100J darbe enerji seviyesinde test sonrası görüntüleri görülmektedir. 100J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde vurucu üst yüzeyden geçip alt yüzeyi kırdığı vurucunun numune içerisinde saplandığı görülmektedir.



**Şekil 5.11:** Tek katlı hücre genişliği 6mm, 9mm, 12mm olan sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) S\_6 darbe numunelerine ait görüntüler b) S\_9 darbe numunelerine ait görüntüler c) S\_12 darbe numunelerine ait görüntüler.

Şekil 5.12’de iki katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 100J enerji seviyesinde darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. 100J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde üst yüzeylerin tamamının delindiği alt yüzeylerinde hasar oluşmadığı görülmektedir.

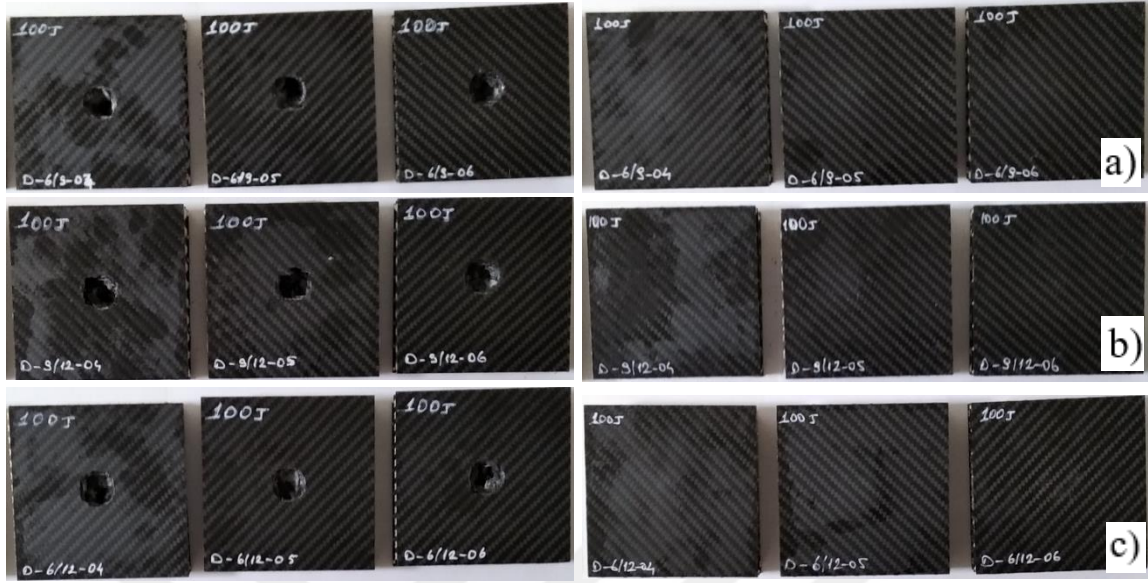


**Şekil 5.12:** Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/6 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

Şekil 5.13’de hibrit iki katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 100J enerji seviyesinde darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. 100J darbe enerjisinde yapılan

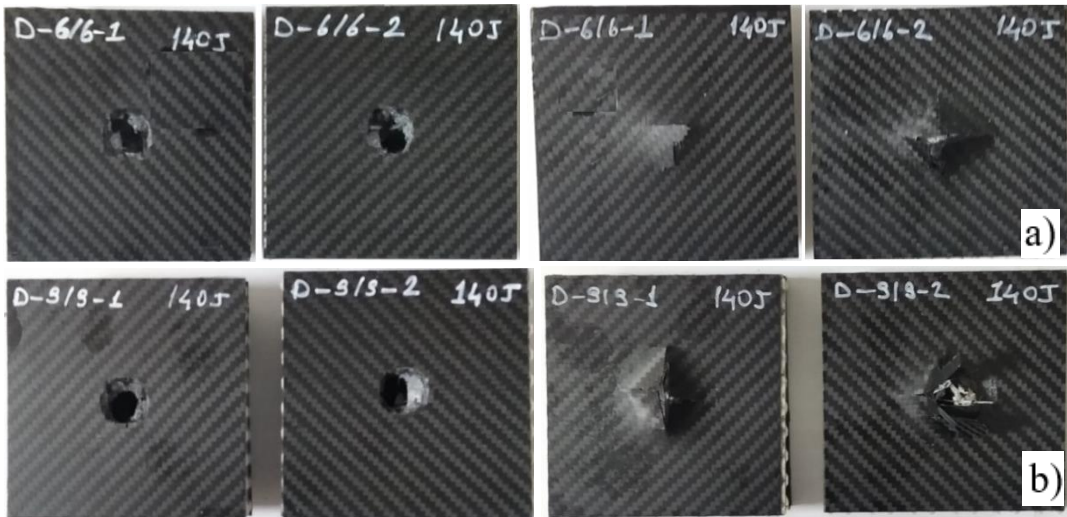


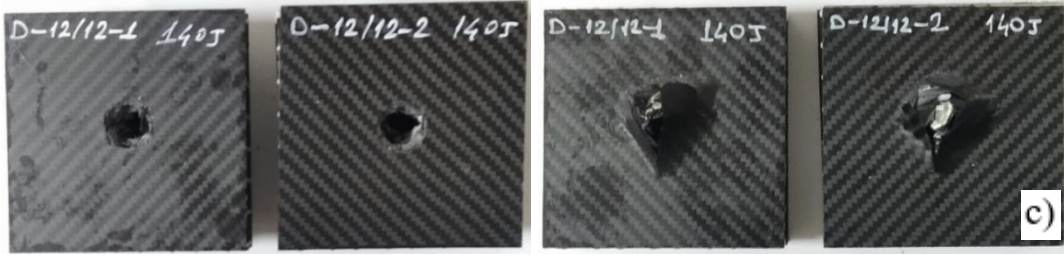
testlerde her üç hücre genişliğinde üst yüzeylerin tamamının delindiği alt yüzeylerinde hasar oluşmadığı görülmektedir.



**Şekil 5.13:** Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit iki katlı sandviç kompozit numunelerin 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

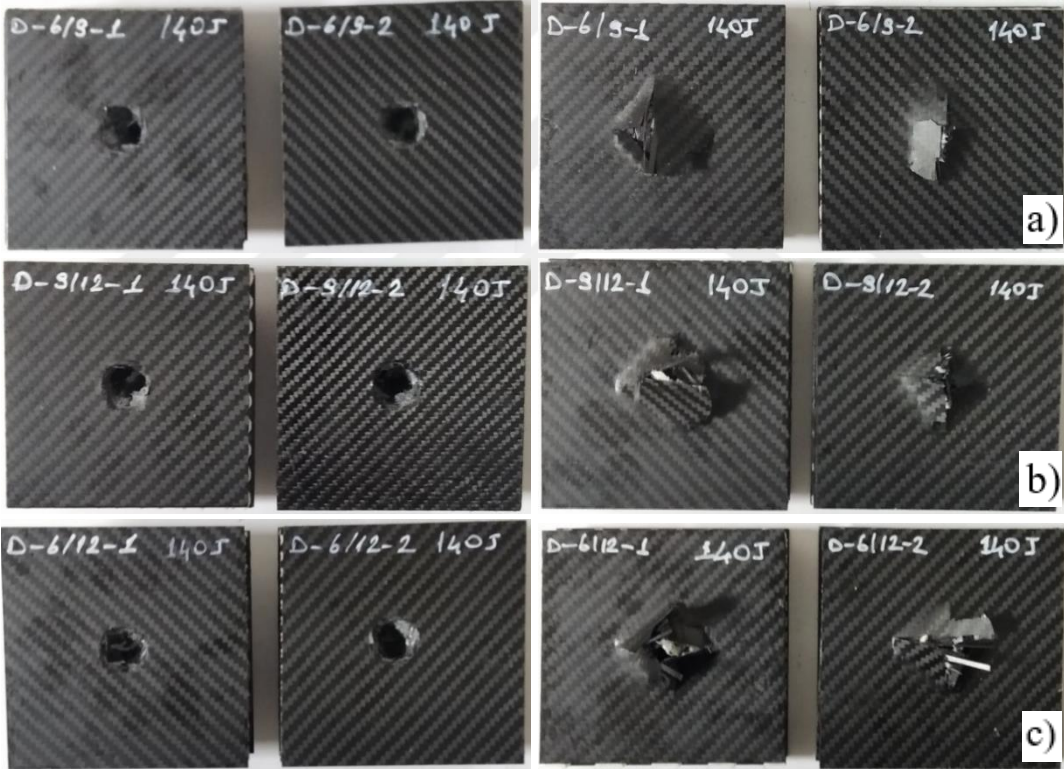
İki katlı numunelerde 80J ve 100J enerji seviyelerindeki darbe testlerinden sonra iki katlı numunelerin darbe dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla 140J enerji seviyesinde testler uygulanmıştır (Şekil 5.14). 140J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde vurucu üst ve orta yüzeyden geçip alt yüzeyi kırdığı vurucunun numune içerisinde saplandığı görülmektedir.





**Şekil 5.14:** Her katında aynı hücre genişliğine sahip iki katlı sandviç kompozit numunelerin 140J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/6 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/9 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_12/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

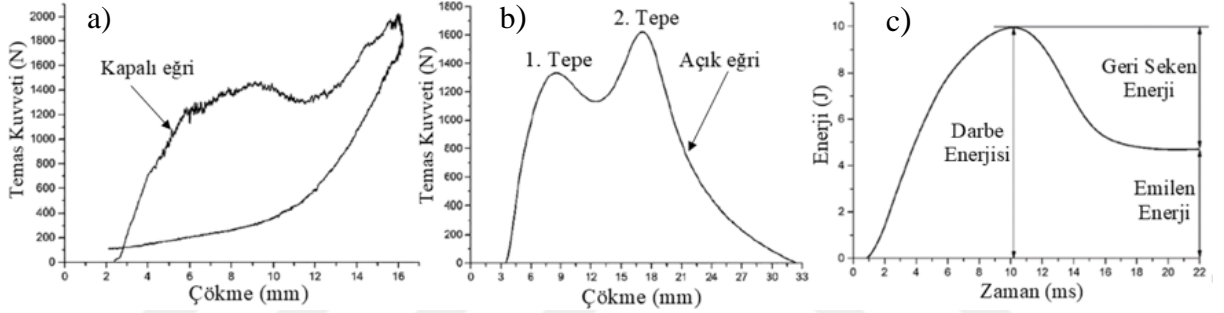
Şekil 5.15’de hibrit iki katlı üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin 140J enerji seviyesinde darbe test sonrası görüntüleri görülmektedir. 140J darbe enerjisinde yapılan testlerde her üç hücre genişliğinde vurucu üst ve orta yüzeyden geçip alt yüzeyi kırdığı vurucunun numune içerisinde saplandığı görülmektedir.



**Şekil 5.15:** Her katında farklı hücre genişliğine sahip hibrit sandviç kompozit numunelerin 140J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası üst ve alt yüzey görüntüleri a) D\_6/9 darbe numunelerine ait görüntüler b) D\_9/12 darbe numunelerine ait görüntüler c) D\_6/12 darbe numunelerine ait görüntüler.

Darbe testleri neticesinde elde edilecek olası eğriler [80] Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Temas kuvveti-çökme eğrilerinin şekli numunenin darbe enerjisine karşı tepkisi hakkında bilgi vermektedir. Şayet çökmeye bağlı temas kuvveti en yüksek noktadan sonra başlangıç noktasına doğru ani bir düşüş meydana gelirse Şekil 5.16 a)’da görülen kapalı bir şekil olur.

Bu eğri vurucunun numune içerisinde hareket ettiğini fakat delmediğini gösterir. Eğer darbe enerjisine karşı en yüksek temas kuvveti 1. tepeye ulaştıktan sonra değeri azalarak düşer, tekrar ikinci en yüksek temas kuvveti 2. tepeye ulaştıktan sonra çökme değeri artarak temas kuvveti azalır Şekil 5.16 b)'de görülen açık görülür. Burada, vurucu 1. Tepede numuneyi deldiği, numunenin içerisinde ilerlediği ve 2. tepede tekrar rijit bir bölgeden geçerek deldiğini ifade etmektedir. Şekil 5.16 c)'de ise düşük hızda darbe testlerinden elde edilebilecek tipik bir enerji-zaman eğrisi gösterilmiştir. Bu egride belli bir yükseklikten bırakılan bir vurucunun yer çekimi ivmesiyle numuneye uyguladığı darbe enerjisi ile temas süresi görülmektedir. Vurucu numuneye çarptığında hasara neden olur ve enerjinin bir kısmı numune tarafından emilir. Bu enerjiye emilen enerji denir. Numunenin rijitliği darbe enerjisinden şayet büyükse vurucu geri sekme yapar. Bu enerjiye geri sekme enerjisi denilir.

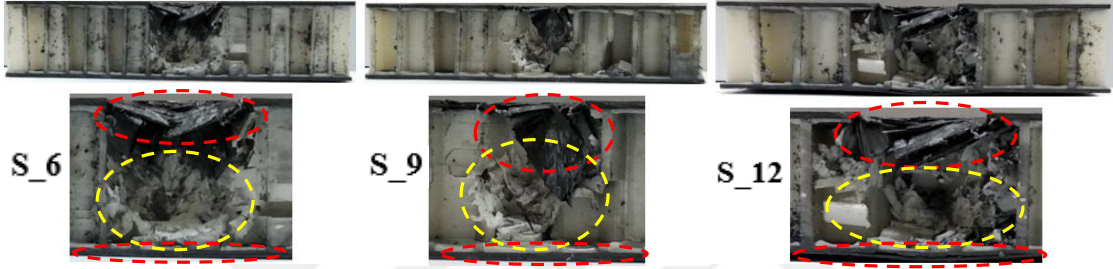
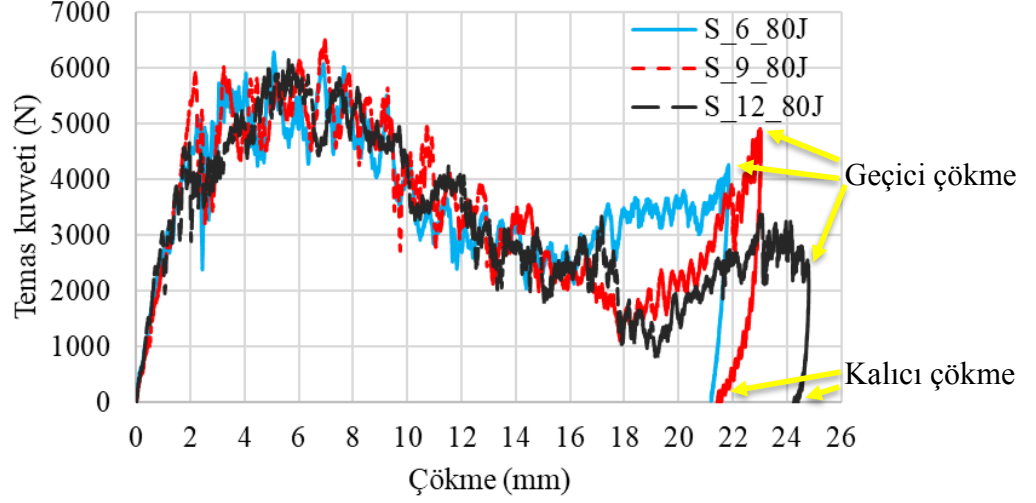


**Şekil 5.16:** Düşük hızda darbe testinden elde edilecek muhtemel grafikler a) Delinmemiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği b) Delinmiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği c) Tipik enerji-zaman grafiği

Şekil 5.17-32 arasında 80J, 100J ve 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme ve enerji-zaman grafikleri gösterilmektedir. Ayrıca bu şekillerde grafiklerin altında test sonrası numunelerin kesilmiş görüntüleri ile vurucunun hasar verdiği kısımların büyütüldüğü resimlerde eklenmiştir. Bu görüntülerde kırmızı renkli elips içerisine alınan kısımlar yüzeylerin, sarı renkli elips içerisine alınan kısımlar ise çekirdeklerin uğradığı hasarlar gösterilmektedir.

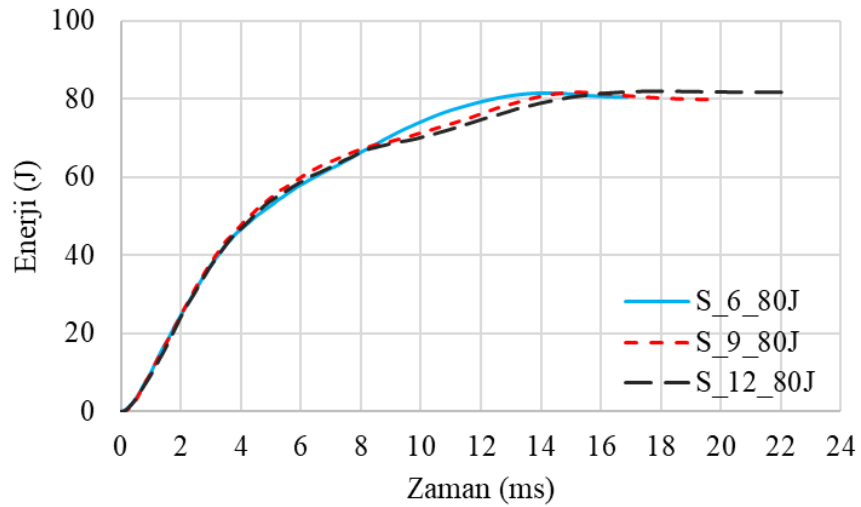
Şekil 5.17'deki tek katlı numunelerde temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucunun üst yüzeye darbesinin etkisiyle 1. tepe noktasında temas kuvveti 6000N'nun üzerine çıkmış, yüzeyi deldikten sonra çekirdekte daha düşük temas kuvvetiyle hareket ettiği görülmektedir. Vurucunun alt yüzeye temas ettiği fakat delmediği numunelerin kesilmiş görüntülerinde görülmektedir. Numunelerde önce geçici çökme sonra kalıcı çökme meydana geldiği temas kuvveti-çökme grafiğinde görülmektedir. 80J darbe enerjisiyle numunelerin üst yüzeyinde ve çekirdekte kırılma, alt yüzeyinde ise delaminasyon hasarı meydana gelmiştir.





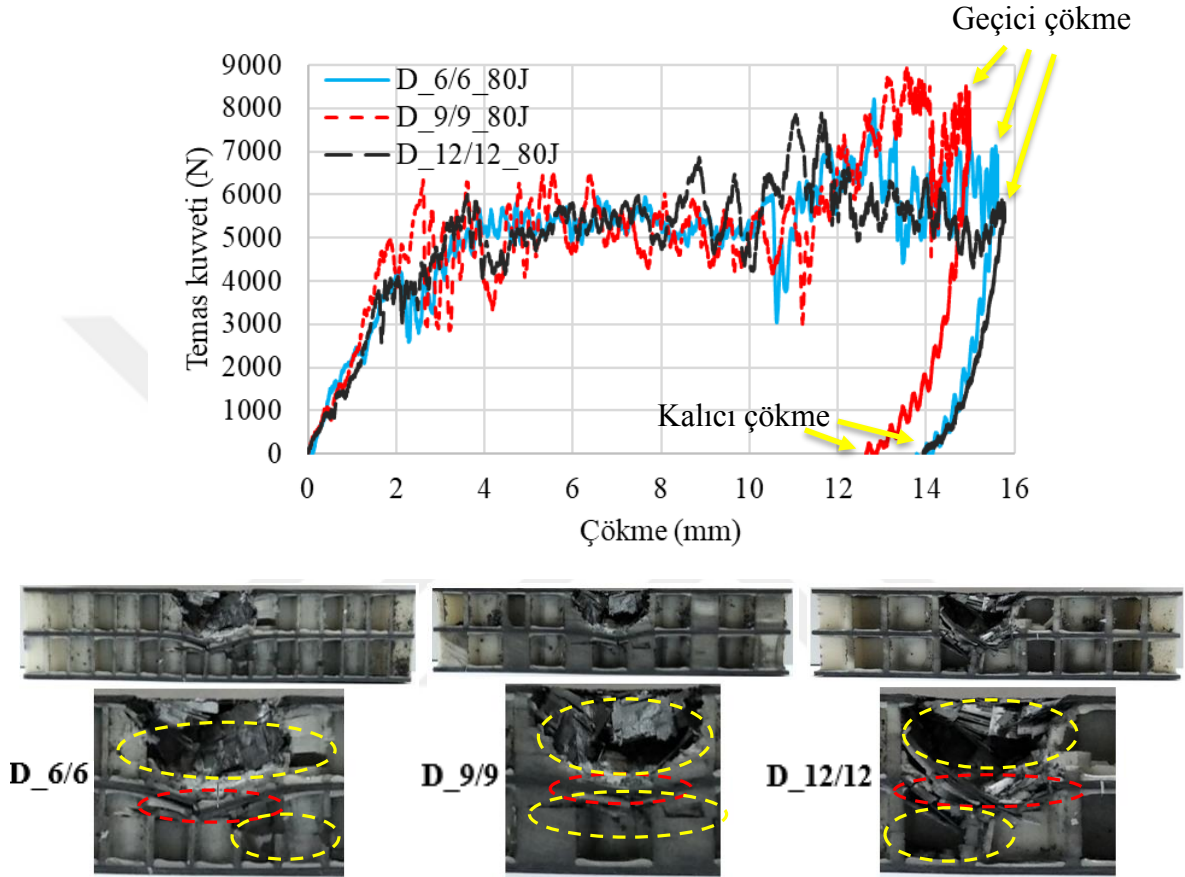
**Şekil 5. 17:** Tek katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.18'deki enerji-zaman grafiğinde üç farklı hücre genişliğindeki numunelerde 80J darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmektedir. Grafikte vurucunun numuneyle temas süresinin küçükten büyüğe doğru sırasıyla S\_6 / S\_9 / S\_12 adlı numunelerde olduğu görülmektedir.



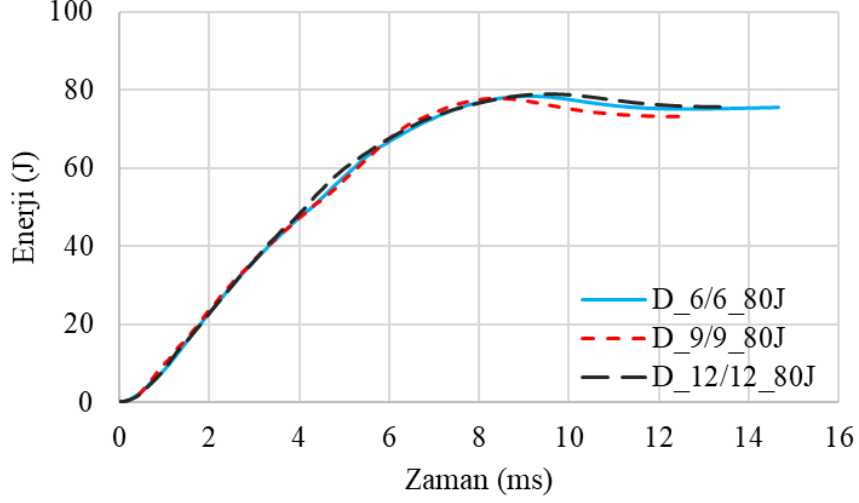
**Şekil 5.18:** Tek katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.19'daki iki katlı numunelerde temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucunun üst yüzey ve çekirdeği geçerek orta yüzeye 8000N'u geçen temas kuvvetiyle hareket ettiği görülmektedir. Grafikte önce geçici çökme sonra kalıcı çökme meydana geldiği görülmektedir. 80J darbe enerjisiyle numunelerin üst, orta yüzey ile üst, alt çekirdeğinde hasar meydana gelmiştir. Vurucu alt yüzeye temas etmemiştir.



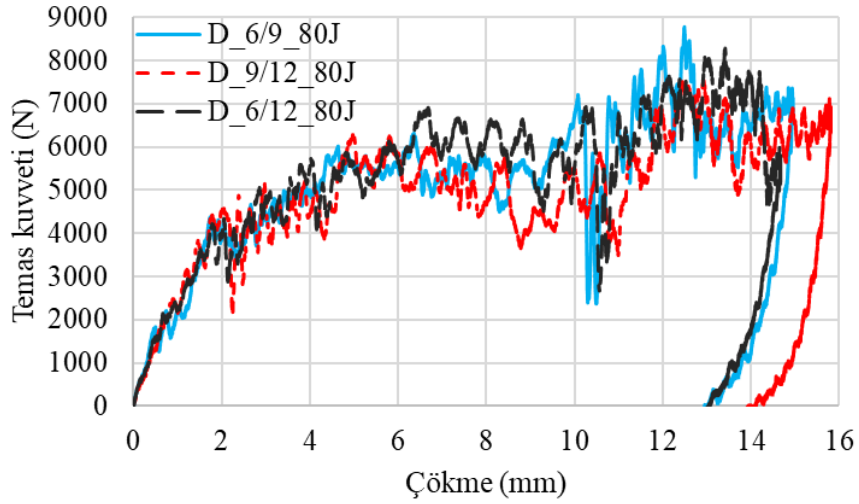
**Şekil 5.19:** İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.20'deki enerji-zaman grafiğinde 80J darbe enerjisinin büyük kısmının numunede emildiği kalan kısmının geri sekme enerjisi olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

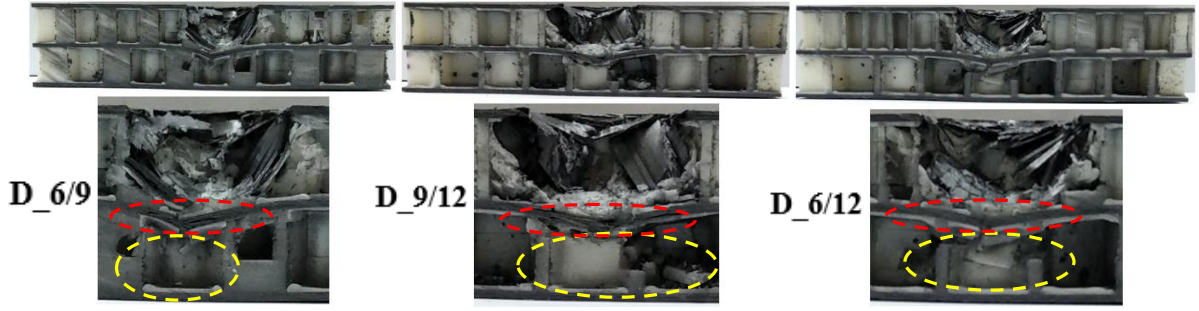


**Şekil 5.20:** İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.21'deki grafikte hibrit iki katlı numunelerde temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucunun üst yüzey ve çekirdeği geçerek orta yüzeye temas ettiğinde 8000N'ü aşan temas kuvvetiyle hareket ettiği görülmektedir. Grafikte önce geçici çökme sonra kalıcı çökme meydana geldiği temas kuvveti-çökme grafiğinde görülmektedir. 80J darbe enerjisiyle numunelerin üst ve orta yüzeyleri ile üst ve alt çekirdeğinde hasar meydana gelmiştir. Vurucu alt yüzeye temas etmemiştir.

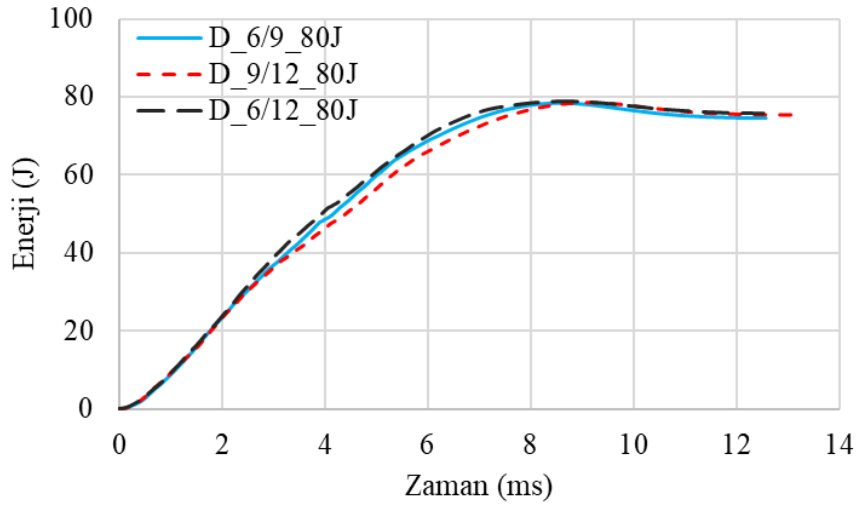






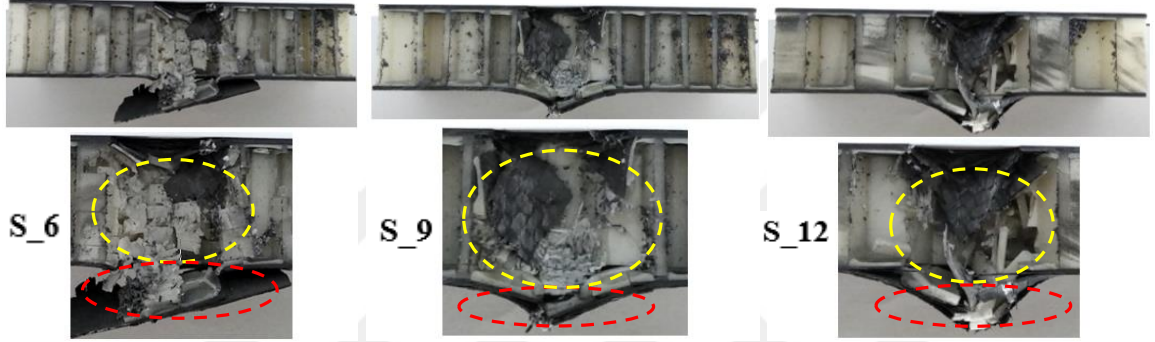
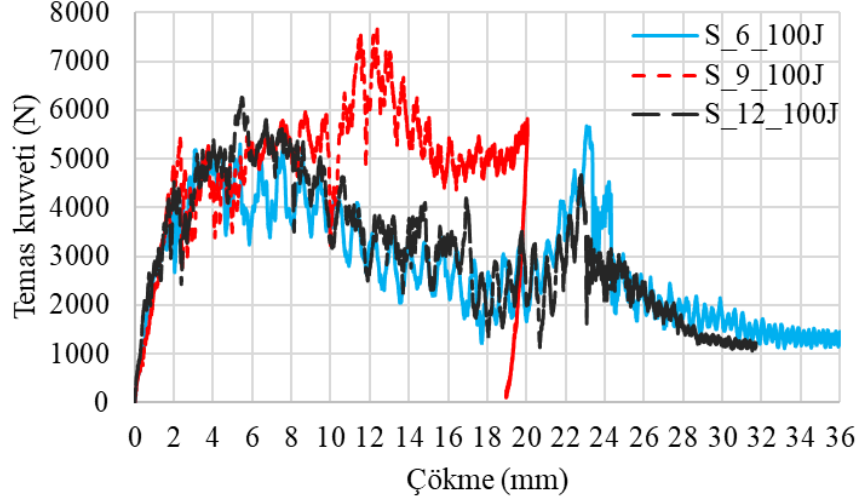
**Şekil 5.21:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.22'deki enerji-zaman grafiğinde üç hücre genişliğinde de benzer davranış gösterdiği ve 80J darbe enerjisinin büyük kısmının numunede emildiği kalan kısmının geri sekme enerjisi olarak ortaya çıktığı görülmektedir.



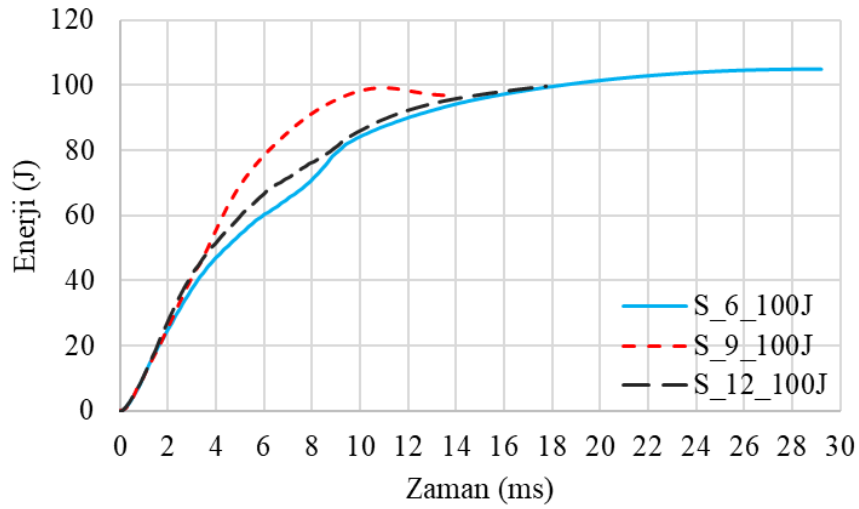
**Şekil 5.22:** Hibrit iki sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.23'deki temas kuvveti-çökme grafiğinde üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin alt yüzeylerinin tamamen delindiği görülmektedir. Vurucu en yüksek S\_9 adlı numunelerde temas kuvvetiyle karşılaşmıştır.



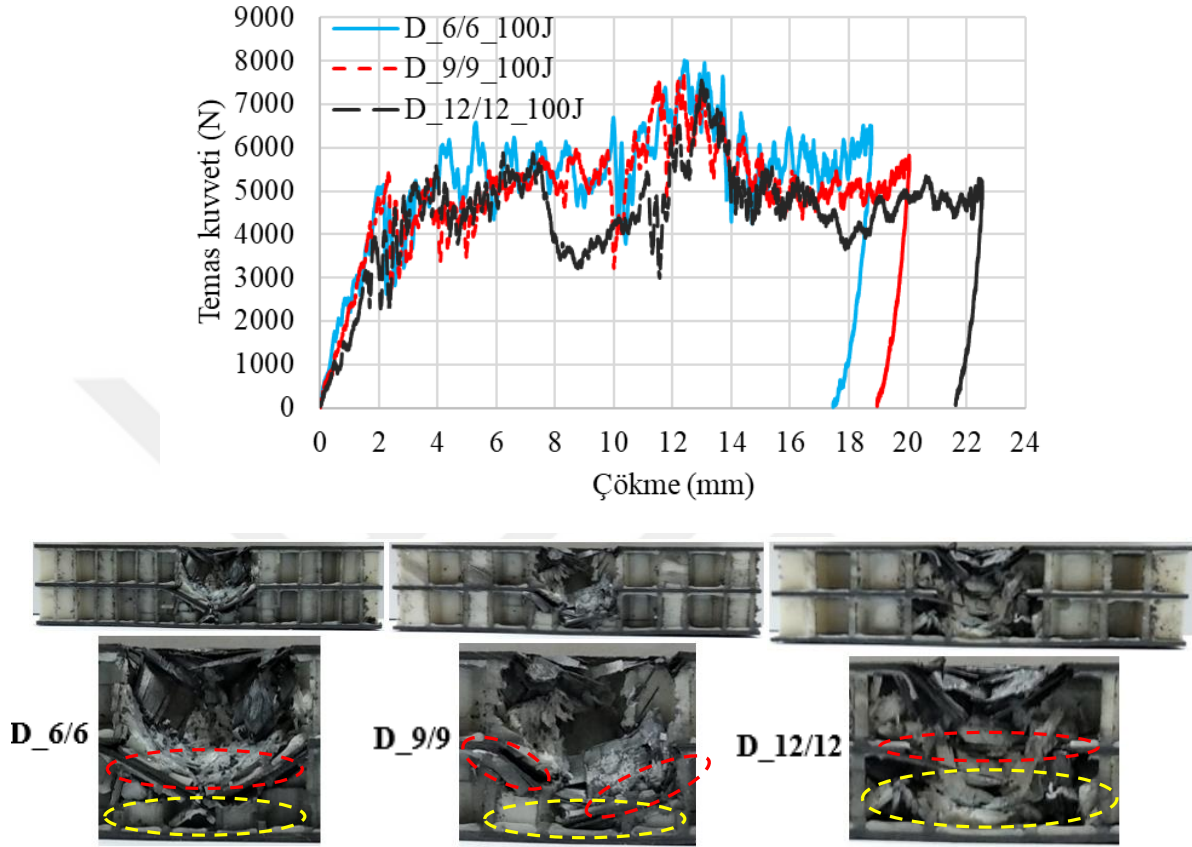
**Şekil 5.23:** Tek katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.24'deki enerji-zaman grafiğinde üç farklı hücre genişliğindeki numunelerde 100J darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmektedir. Grafikte vurucunun en kısa temas süresinin S\_9 adlı numunelerinde olduğu görülmektedir.



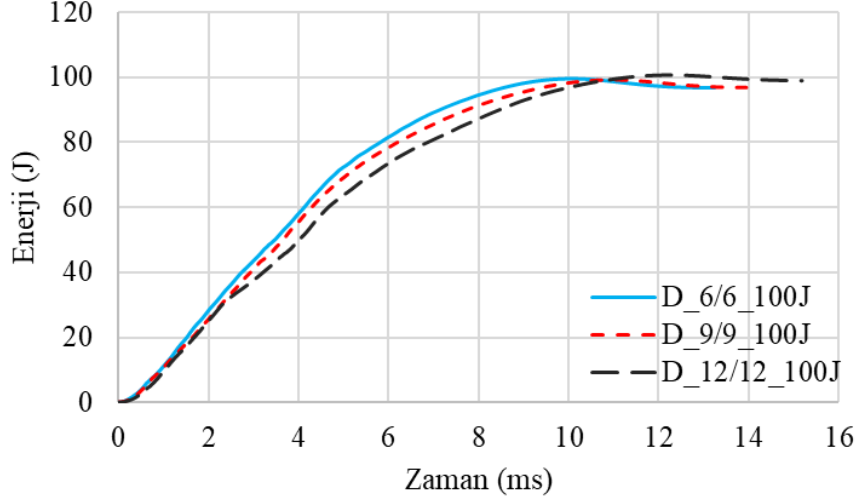
**Şekil 5.24:** Tek katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.25'deki temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucu iki katlı numunelerin üst ve orta yüzey ile üst ve alt çekirdeğe hasar verdiği görülmektedir. 100J darbe enerjisiyle vurucu alt yüzeye temas etmemiştir. En iyi performans D\_6/6 adlı numunelerde görülmüştür.



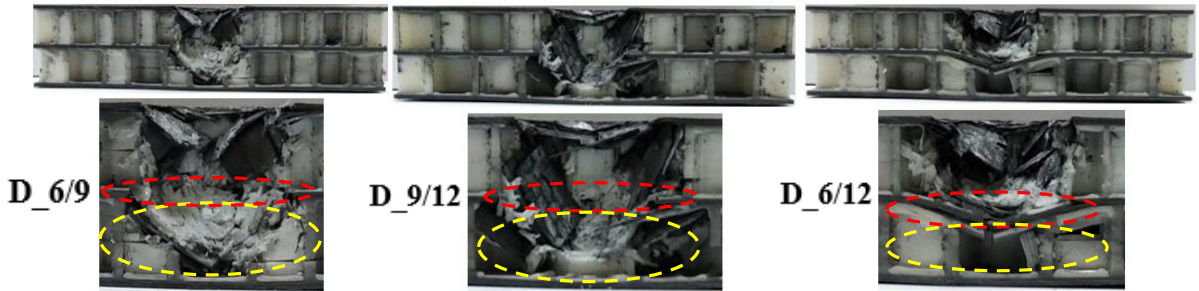
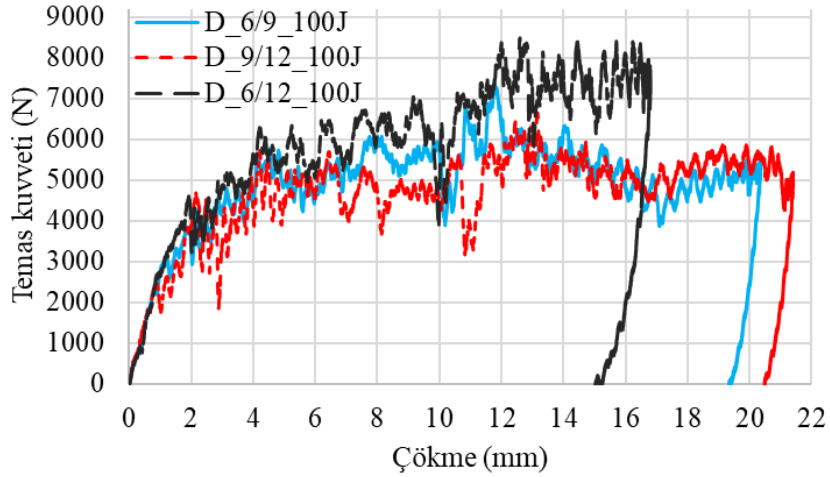
**Şekil 5.25:** İki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.26'daki enerji-zaman grafiğinde 100J darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmektedir. Grafikte vurucunun numuneyle temas süresinin küçükten büyüğe doğru sırasıyla D\_6/6 - D\_9/9 - D\_12/12 numunelerinde olduğu görülmektedir.



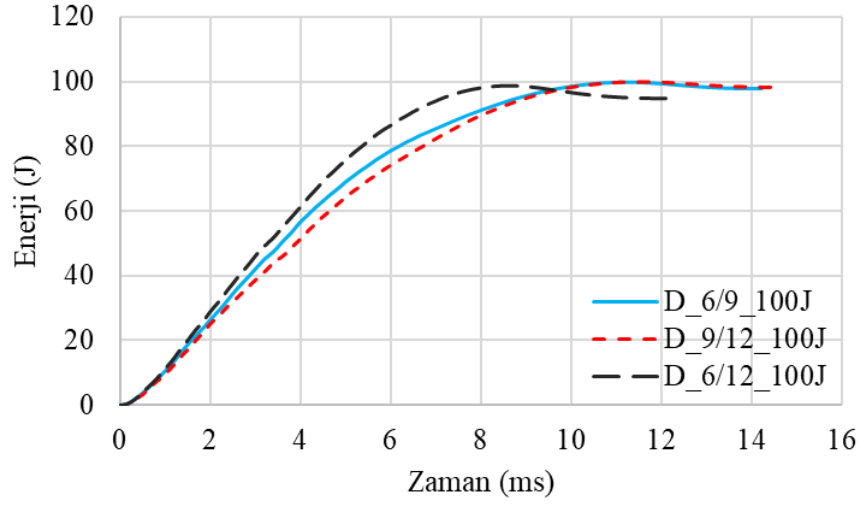
**Şekil 5.26:** İki katlı sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.27'deki temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucu, hibrit iki katlı numunelerin üst ve orta yüzey ile üst ve alt çekirdeğe hasar verdiği görülmektedir. Numunelerin toplam yüksekliği 23mm olduğu göz önünde bulundurulursa grafikteki çökme değerleri ve numunelerin kesit görünüşlerinden 100J darbe enerjisiyle vurucu alt yüzeye temas etmediği görülmektedir. En iyi performans D\_6/12 adlı numunelerde görülmüştür.



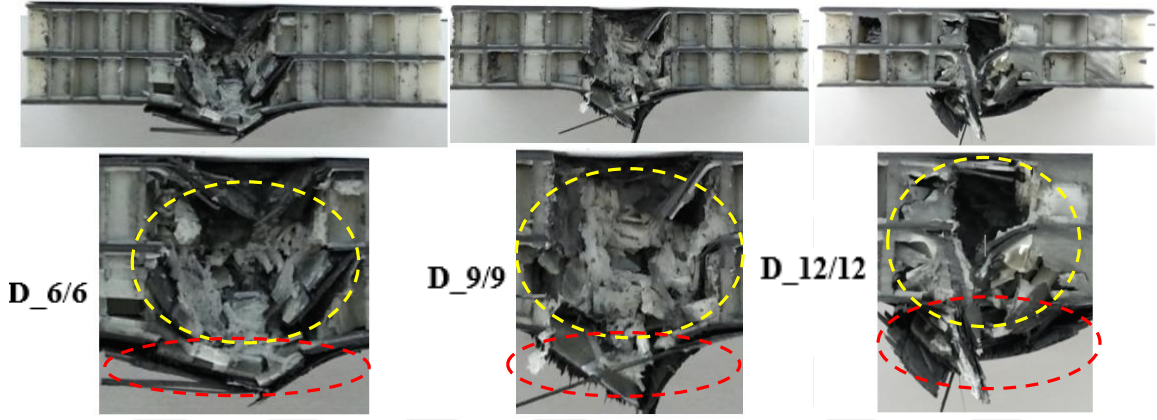
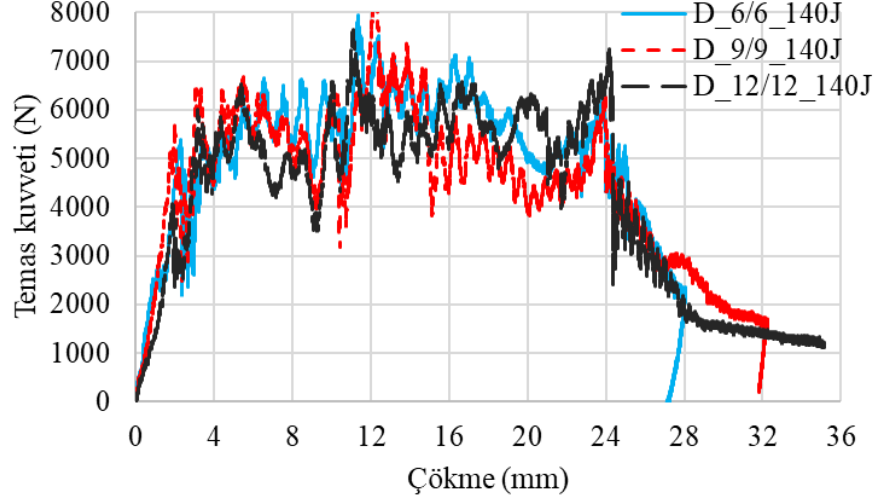
**Şekil 5.27:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Şekil 5.28'deki enerji-zaman grafiğinde D\_6/12 adlı numunelerde bir miktar geri tepme enerjisi meydana gelmiş fakat diğer numunelerde enerjinin tamamı emilmiştir.



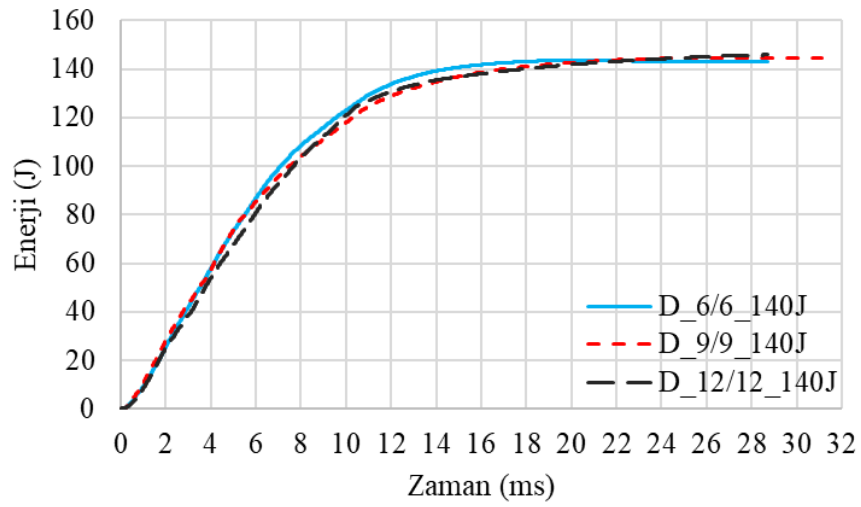
**Şekil 5.28:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

Çalışmada iki katlı numunelerin darbe dayanımlarını tespit etmek için 100J enerji seviyesinden daha büyük 120J darbe seviyesinde test yapılmıştır. 120J darbe seviyesinde alt yüzeye hasar vermiş fakat tamamen delmemiştir. Bu yüzden 140J darbe enerji testlerine geçilmiştir. Şekil 5.29'daki temas kuvveti-çökme grafiğinde 140J darbe enerji seviyesinde vurucunun iki katlı numunelerin içinden geçerek tamamen deldiği görülmektedir. En iyi performans D\_6/6 adlı numunelerde görülmüştür.



**Şekil 5.29:** İki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri.

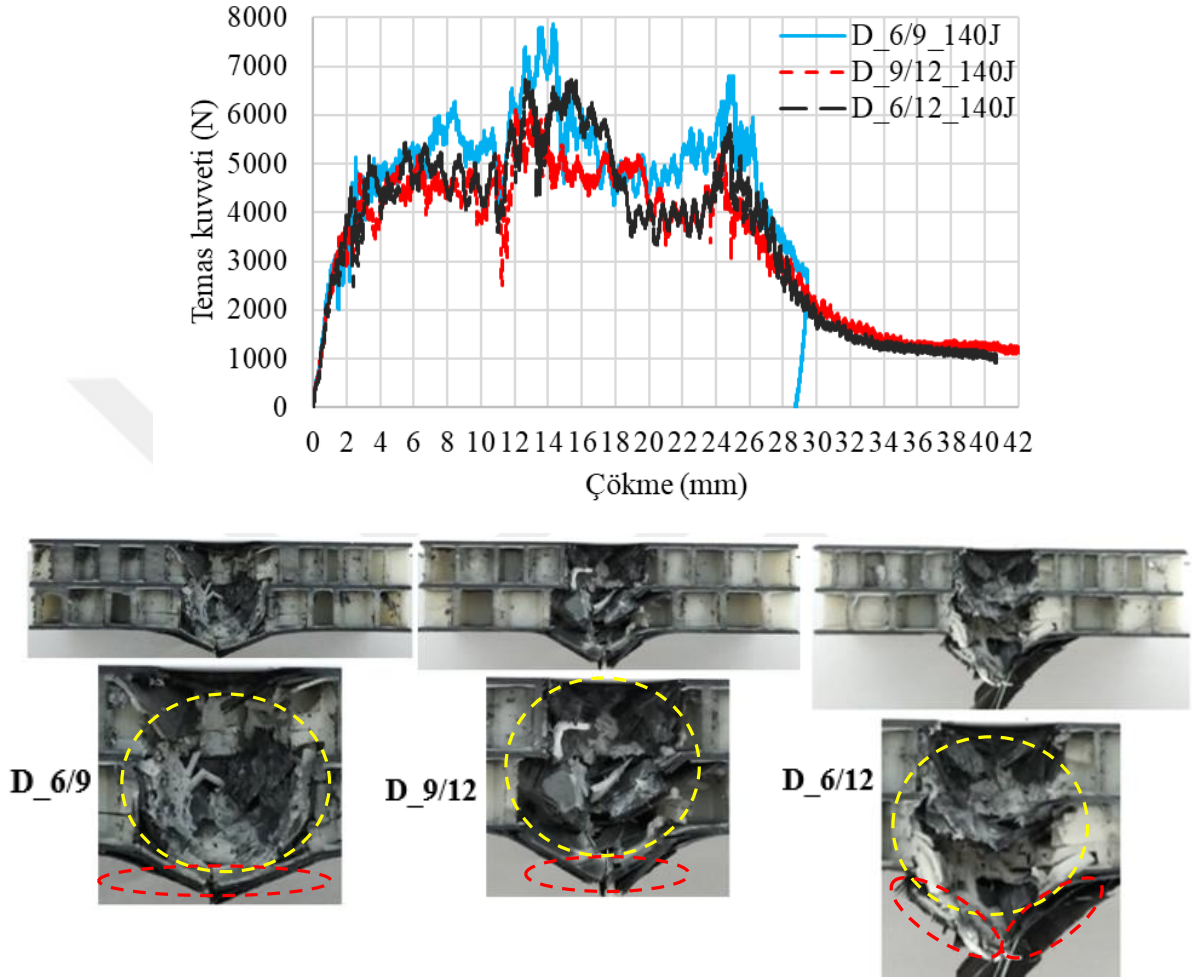
Şekil 5.30'daki enerji-zaman grafiğinde üç hücre genişliğinde de benzer davranış gösterdiği 140J darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmektedir.



**Şekil 5.30:** İki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.



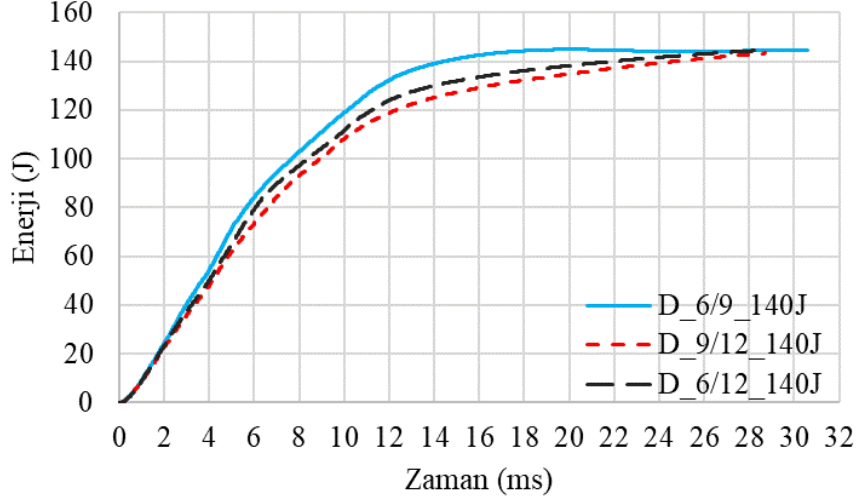
Şekil 5.31'deki temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucunun hibrit iki katlı numuneleri deldiği görülmektedir. En yüksek temas kuvveti D\_6/9 adlı numunelerde görülmüştür. D\_6/9 adlı numunede vurucu numune içerisinde sıkışmış iken diğer D\_9/12 ve D\_6/12 adlı numunelerde vurucunun tamamen dışarı çıktığı kesit görünüşlerde görülmektedir.



**Şekil 5.31:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme grafiği ile test sonrası hasar görüntüleri.

Şekil 5.32'deki enerji-zaman grafiğinde D\_6/9 adlı numunenin en uzun temas süresine sahip olduğu, tüm numunelerde 140J darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmektedir.





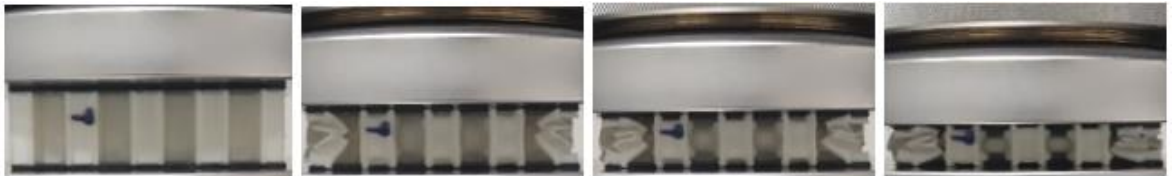
**Şekil 5.32:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin 140J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği.

### 5.3 Basma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada, tabla ısıtmalı 3 boyutlu Ultimaker 2+ yazıcı ile PLA filament kullanılarak, 6 mm, 9 mm, 12 mm hücre genişliğinde tek katlı, iki katlı ve hibrit iki katlı basma numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere basma testi yapılmış, kuvvet-yer değiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Elde edilen grafiklerden maksimum basma kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5. 33, 34 ve 35’te görülen şekillerde tek katlı numunelerin basma testindeki farklı çökme mesafelerindeki deformasyon görüntüleri görülmektedir.



**Şekil 5.33:** Tek katlı S\_6 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri.

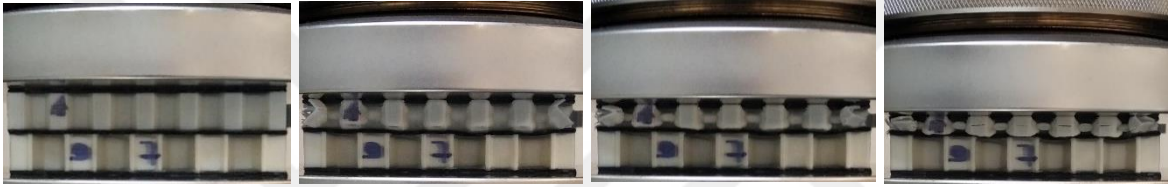


**Şekil 5.34:** Tek katlı S\_9 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri.

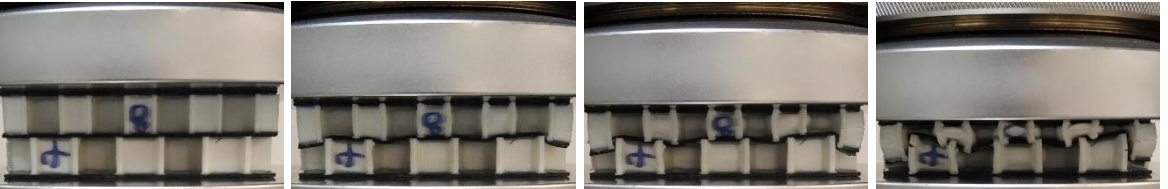


**Şekil 5.35:** Tek katlı S\_12 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri.

Şekil 5. 36'daki basma testinde basma kuvvetinin etkisiyle önce 6 mm hücre genişliğindeki üst katta çökme meydana gelmiştir. Üst katın sıkışmasından sonra 9 mm hücre genişliğindeki alt kat deforme olmuştur. Şekil 5.37'de ise yine aynı şekilde basma dayanımı daha zayıf olan 9 mm hücre genişliğindeki üst kat, sonra 12 mm hücre genişliğindeki alt kat deforme olmuştur.

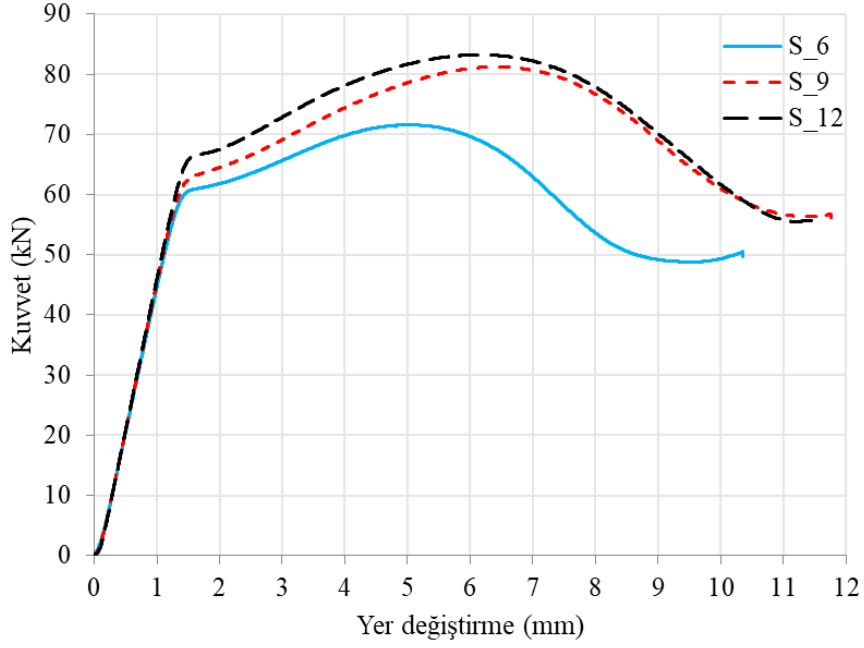


**Şekil 5.36:** Hibrit iki katlı D\_6/9 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri.



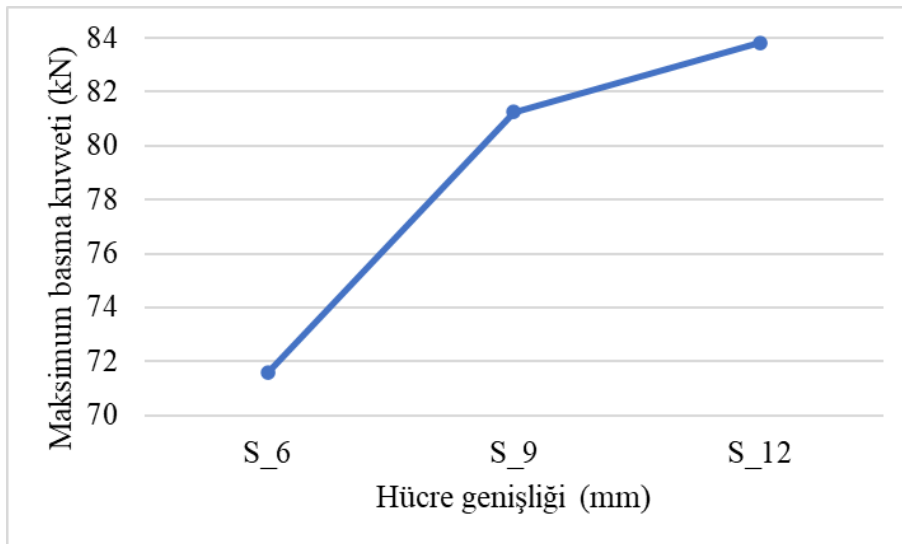
**Şekil 5.37:** Hibrit iki katlı D\_9/12 sandviç kompozit numunelerin basma testi deformasyon görüntüleri.

Şekil 5.38'de tek katlı numunelerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinde basma dayanımının küçükten büyüğe doğru sırasıyla S\_6 / S\_9 / S\_12 numunelerinde olduğu görülmektedir. Şekil 5. 36 ve 37'deki test görüntüleri şekil 5.38'deki grafiği doğrular şekilde ortaya çıkmıştır.



**Şekil 5.38:** Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği.

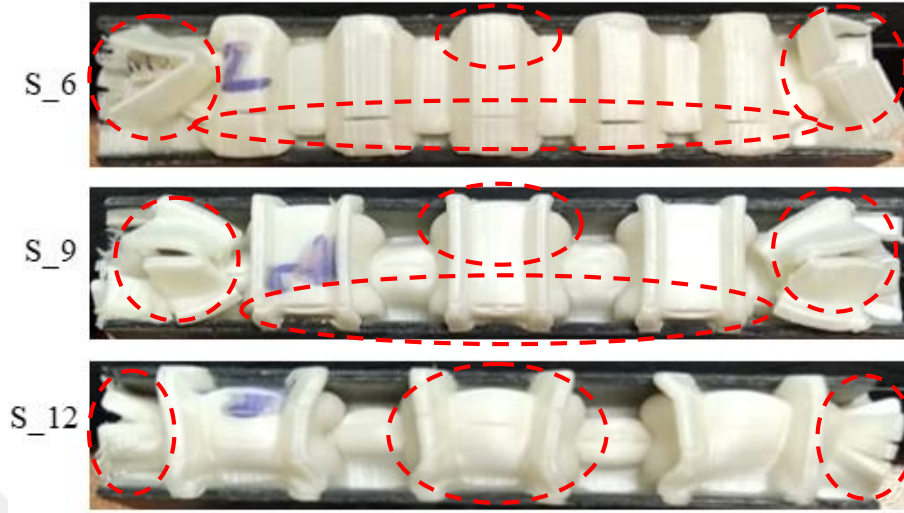
Şekil 5.39'daki grafikte tek katlı sandviç yapıların basma testlerinde hücre genişliği artmasına karşın hücre duvar kalınlığının artmasından dolayı maksimum basma kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. S\_6 ile S\_12 arasında maksimum basma kuvvetinde %17'lik bir artış meydana gelmiştir.



**Şekil 5.39:** Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinde elde edilen maksimum basma kuvvet grafiği.

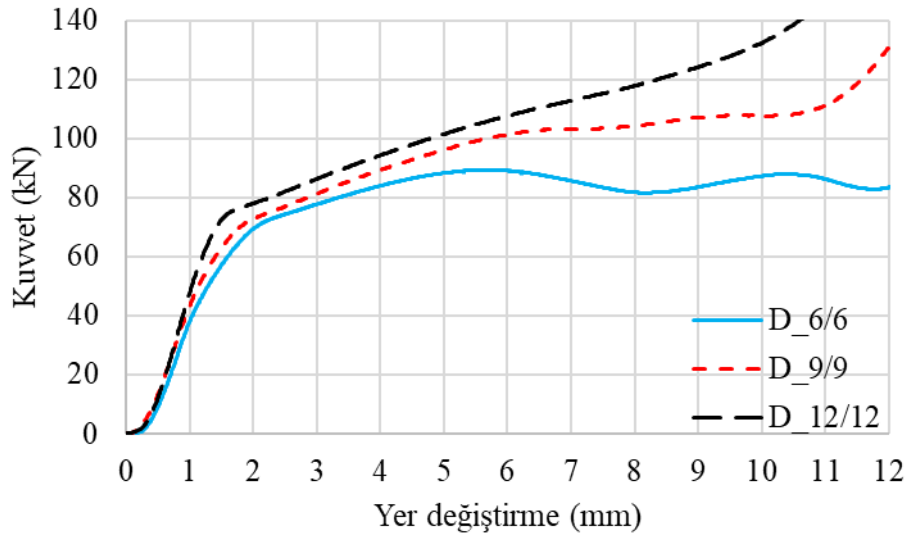
Şekil 5.40'daki görüntüde kesikli kırmızı çizgiler içerisine alınan bölgelerde hasar durumları gösterilmektedir. Numunelerin kapalı bal peteği hücrelerinde plastik burkulma, açık

hücrelerde ise boyuna kırılmalar, S\_6 ve S\_9 numunelerin hücre duvarlarında çatlamlar daha belirgin görülmektedir.



**Şekil 5.40:** Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri.

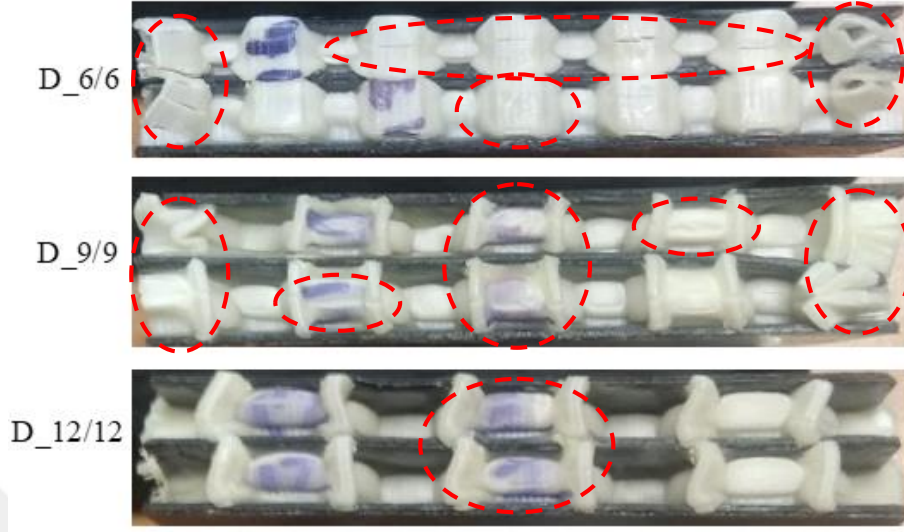
Şekil 5.41'deki iki katlı numunelerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinde basma dayanımının küçükten büyüğe doğru sırasıyla D\_6/6 - D\_9/9 - D\_12/12 numunelerinde olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.41:** Tek katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen hücre genişliğine bağlı maksimum basma kuvvet-yer değiştirme grafiği.

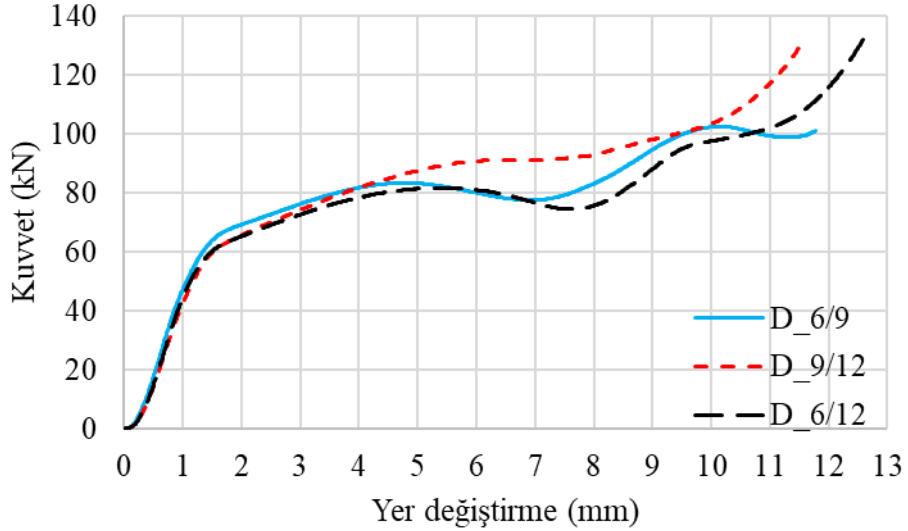
Şekil 5.42'deki görüntüde kesikli kırmızı çizgiler içerisine alınan bölgelerde hasar durumları gösterilmektedir. Numunelerin kapalı hücrelerinde plastik burkulma, açık hücrelerde ise boyuna kırılmalar, D\_6/6 ve D\_9/9 numunelerde hücre duvarlarında çatlamlar

görülmektedir. İki katlı numunelerde üst ve alt kat aynı hücre genişliğine sahip olduğundan dolayı hücre duvarları birbirine destek olmuştur.



**Şekil 5.42:** İki katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri.

Şekil 5.43'deki hibrit iki katlı numunelerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinde önce üst kattaki çökme sırasında birinci tepe noktası, sonra alt katın çökme sırasında kuvvet değeri yükselerek ikinci bir tepe noktası görülmektedir. Basma dayanımının küçükten büyüğe doğru sırasıyla D\_6/12 - D\_6/9 - D\_9/12 numunelerinde olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.43:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 5.44'deki görüntüde kesikli kırmızı çizgiler içerisine alınan bölgelerde hasar durumları gösterilmektedir. Numunelerin kapalı hücrelerinde plastik burkulma, özellikle 6 mm hücre

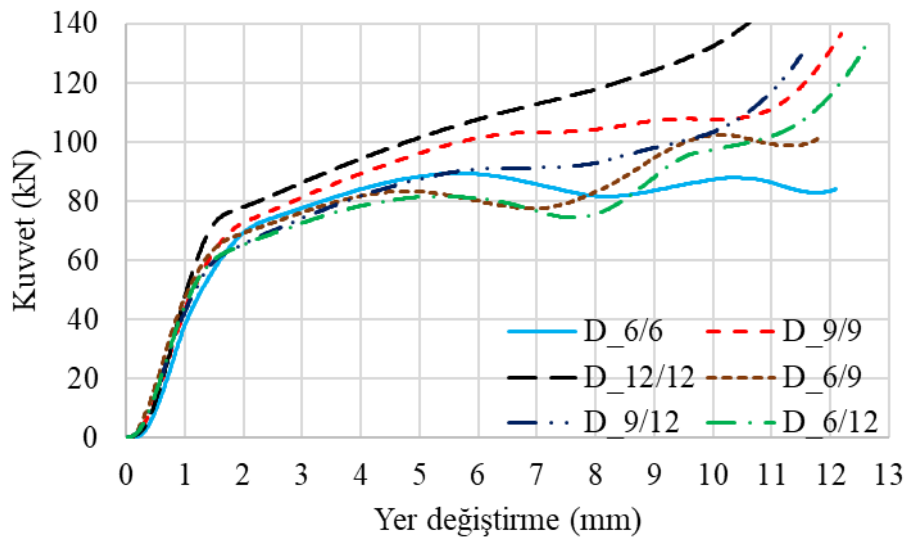


genişliğindeki katlarda boyuna kırılmalar görülmektedir. Hibrit iki katlı numunelerde üst ve alt kat hücre genişlikleri farklı olduğundan üst kattaki hücre duvarı tabanda destek bulamadığından aşağıya doğru boşta hareket ettiği görülmektedir.



**Şekil 5.44:** Hibrit iki katlı sandviç kompozitlerin basma testi sonrası deformasyon görüntüleri.

Şekil 5.45’de iki katlı ve hibrit iki katlı numunelerin basma testlerinden elde edilen toplu olarak kuvvet-yer değiştirme grafiği görülmektedir. En büyük basma dayanımının D\_12/12 olarak adlandırılan numunede olduğu tespit edilmiştir. Aynı hücre genişliğine sahip iki katlı numunelerin hibrit iki katlı numunelerin basma dayanımından daha iyi olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.45:** Hibrit ve iki katlı sandviç kompozitlerin basma testlerinden elde edilen birleşik kuvvet-yer değiştirme grafiği.

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığındaki bal peteği geometrileri kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda polilaktik asit (PLA) filamentten çekirdekler üretilmiştir. Alt ve üst yüzeylerde karbon fiber takviyeli kompozit plakalar (CFRP) kullanılmıştır. Çekirdeğin alt ve üst yüzey arasına yapıştırıcı ile 0,5 MPa basınçta birleştirilerek üretilen tek katlı ve iki katlı sandviç kompozitlerin deneysel yöntemlerle mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı sırasıyla 6\_0,8 mm, 9\_1,2 mm ve 12\_1,6 mm ölçülerindeki bal peteği geometrileri kullanılmıştır. Eşit yüzey alanı elde etmek amacıyla hem hücre genişliği hem de hücre duvar kalınlıkları artırılarak bu ölçüler tercih edilmiştir. İki katlı numuneler her bir katı aynı ve farklı (hibrit) hücre genişliğine sahip çekirdeklerden üretilmiştir. Üç farklı hücre genişliğinde fakat birbirine yakın yüzey alanlarına sahip numunelere üç nokta eğme, düşük hızda darbe ve basma testleri uygulanmıştır.

Üç nokta eğme testleri sonucunda, 3 boyutlu yazıcıda PLA filament kullanılarak üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığında birbirine yakın yüzey alanındaki bal peteği geometri yapıların eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiş, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek katlı sandviç kompozit yapılar arasında S\_6 adlı numunelerde en yüksek eğme kuvveti elde edilmiştir. Hücre genişliği 6 mm'lik hücrelerin eğme rijitliğinin diğerlerinden yüksek çıkmasının nedeni duvar kalınlığının diğerlerine göre daha ince olmasına rağmen birim yüzeydeki fazla hücre sayısından dolayıdır. Buda yüzey tabakalar arasındaki kayma gerilmelerini etkileyen kuvvetlerin S\_6 adlı numunelerde daha iyi iletildiğini göstermektedir.
- İki katlı sandviç kompozit yapılar arasında D\_6/6 adlı numunelerde en yüksek eğme kuvveti elde edilmiştir. İki katlı sandviç yapılarda tek katlı sandviç yapılardan daha büyük eğme kuvveti ve sehim elde edilmiştir. Bunun sebebi iki katlı yapılarda tek katlı yapıda olduğu gibi toplam 20 mm çekirdek kullanılmasına rağmen iki katlı yapılarda orta yüzey ile birlikte iki kat fazla yapıştırıcı olmasıdır. Bu yüzden iki katlı yapılar tek katlı yapılardan eğmeye karşı daha rijit hale gelmiştir.
- Hibrit iki katlı sandviç kompozit yapılar arasında D\_6/12 ve D\_6/9 adlı numunelerde en yüksek eğme kuvveti elde edilmiştir. Bunun sebebi sandviç kompozit yapının üst katta 6 mm hücre genişliğindeki çekirdeğin tek katlı numunelerde olduğu gibi kayma gerilmelerini etkileyen kuvvetleri daha iyi iletildiğini göstermektedir. Hibrit iki katlı



sandviç yapılarda tek katlı sandviç yapılardan daha büyük eğme kuvveti ve sehim elde edilmiştir.

- Eğmeye maruz kalacak bir sandviç kompozit yapı kullanılacağı zaman hesap edilen kütle ile gerekli olan yüzey alanında mümkün olduğu kadar bal peteği çekirdeğin hücre sayısını artırmak ve mümkünse iki katlı sandviç yapı kullanmak avantajlı olacaktır.

Düşük hızda darbe testleri sonucunda, üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığında birbirine yakın yüzey alanındaki bal peteği geometrili yapıların darbe dayanımları deneysel olarak incelenmiş, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek katlı numunelerde 80J darbe enerji seviyesinde vurucu üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin üst yüzeylerini ve çekirdeklerini geçip alt yüzeylerine hasar verdiği, 100J darbe enerji seviyesinde numuneleri tamamen deldiği tespit edilmiştir. Tek katlı numunelerde 80J darbe enerji seviyesinde S\_6 olarak adlandırılan numuneler, 100J darbe enerji seviyesinde S\_9 olarak adlandırılan numuneler diğer hücre genişliğine sahip numunelere göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Tek katlı sandviç yapıların darbe dayanımlarının 80J ila 100J arasında olduğu tespit edilmiştir.
- İki katlı ve hibrit iki katlı numunelerde 80J ve 100J darbe enerji seviyesinde vurucu numunelerin üst ve orta yüzeyleri ile üst ve alt çekirdeklere hasar vermiş alt yüzeye temas etmemiştir. Üretilen iki katlı numuneler 100J darbe enerjisini absorbe edebilme kabiliyetine sahip olduğu tespit edilmiştir. İki katlı ve hibrit iki katlı numunelerin darbe dayanımlarının 120J ila 140J arasında olduğu tespit edilmiştir.
- Darbeye karşı birbirine yakın yüzey alanına sahip farklı hücre genişliğindeki bal peteği çekirdekleri arasında en çok hücre sayısına sahip yapılar tercih edilmelidir. Çünkü bu yapılar belli bir darbe enerji seviyesine kadar üstünlük göstermektedir. Ayrıca pratikte farklı çaptaki darbeler, büyük hücre genişliğindeki yapılara göre küçük hücre genişliğindeki yapılara daha az hasar verecektir.

Basma testleri sonucunda, üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığında birbirine yakın yüzey alanındaki bal peteği geometrili yapıların eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiş, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek katlı numunelerde en yüksek maksimum basma kuvvetinin S\_12 adlı numunelerde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi hücre genişliğinin 6 mm ve 9 mm'den daha büyük olmasına rağmen hücre duvar kalınlığının sırasıyla 0,8 mm ve

- 1,2 mm'den büyük 1,6 mm olması daha anlamlı olmuştur. S\_12 adlı numuneler basma yükü altında hücre duvarları burulmaya karşı daha dirençli davranmıştır.
- İki katlı numunelerde en yüksek maksimum basma kuvvetinin D\_12/12 adlı numunelerde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi tek katlı yapılarda görüldüğü üzere 12 mm hücre genişliğindeki çekirdeklerin hücre duvar kalınlıklarının diğerlerinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır.
  - İki katlı sandviç yapıların tek katlı sandviç yapıların basma dayanımlarından yüksek olduğu görülmüştür. Beklenildiği üzere sandviç yapılarda çekirdek yüksekliği arttıkça basma kuvveti azalmaktadır [81]. Çalışmamızda tek katlı sandviç kompozitlerde çekirdek yüksekliği 20 mm olup iki katlı sandviç kompozitlerde 10'ar mm yüksekliğinde iki adet çekirdek olduğundan dolayı iki katlı sandviç yapıların basma kuvveti yüksek çıkmıştır.
  - Hibrit iki katlı numunelerde en yüksek maksimum basma kuvvetinin D\_9/12 adlı numunelerde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi hibrit iki katlı numuneler içerisinde her iki katında da en büyük hücre duvar kalınlığına sahip olmasındandır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Önal, T.** (2020). Kompozit balsa yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [2] **Akkus, H., Duzcukoglu, H., & Sahin, O. S.** (2017). Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, 165-170.
- [3] **3D Yazıcı Nedir.** (2021). Erişim: 07 Nisan 2023, <https://www.3ksen.com/blog/icerik/3d-yazici-nedir>
- [4] **Etiket Arşivi 3 Boyutlu Yazıcılar.** (2019). Erişim: 06 Nisan 2023, <https://nanoteknoloji.org/tag/3-boyutlu-yazicilar/>
- [5] **Size Özel 3D Çözümler – Reçine Kürleme Teknolojisi.** (2013). Erişim: 05 Nisan 2023, <https://fibilo.com/3d-baski-stereolitografi-recine-kurleme-sla/>
- [6] **Size Özel 3D Çözümler.** (2013). Erişim: 05 Nisan 2023, <https://fibilo.com/sla-3d-baski-teknolojisi/>
- [7] **Dijital Işık İşleme. (DLP).** (2021). Erişim: 05 Nisan 2023, <https://www.forcyst.com/digital-light-processing?lang=tr>
- [8] **Arduino Tabanlı DLP Yazıcı.** (t.y.). Erişim: 05 Nisan 2023, <https://akademi.robotlinkmarket.com/arduino-tabanlı-dlp-yazici/>
- [9] **Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri.** (2018). Erişim: 06 Nisan 2023, <https://www.kotaman.com/uc-boyutlu-yazdirma-teknolojileri/>
- [10] **3D Yazıcı (3D Printer) Nasıl Çalışır? – Katmanlı üretim Yöntemleri.** (t.y.). Erişim: 06 Nisan 2023, <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/63-3d-yazici-nasil-calisir-katmanli-uretim-yontemleri>
- [11] **Injection Molding.** (t.y.). Erişim: 06 Nisan 2023, <https://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>
- [12] **3D Yazdırma Teknolojilerinin Tarihi Üzerine.** (t.y.). Erişim: 03 Nisan 2023, <https://3dbaskial.com/3d-yazdirma-teknolojilerinin-tarihi-uzerine/>
- [13] **Akbaba, A. İ., & Akbulut, E.** (2021). 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları. *ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, (3), 19-46.
- [14] **Boudjemai, A. Bouanane, A. M. H., Amri, R., Salem, H., & Chouchaoui, B.** (2012). MDA of hexagonal honeycomb plates used for space applications. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 6(6), 1061-1069.
- [15] **Dursun, T., & Ozbay, M.,** (2008). Progressive damage modeling for laminated composite plates. *Journal of the faculty of engineering and architecture of gazi university*, 23(1), 65-68.
- [16] **Balpeteği (Honeycomb) Kompozitler.** (2015). Erişim: 05 Nisan 2023, <https://www.slideshare.net/DuranTuncel1/balpetei-kompozitler-56210673>

- [17] **Zarrouk, T., Salhi, J. E., Nouari, M., Salhi, M., Chaabelasri, E., Makich, H., & Salhi, N.** (2022). Modeling machining of aluminum honeycomb structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7-8), 2481-2500.
- [18] **Sakar, G., & Bolat, F. Ç.** (2015). The free vibration analysis of honeycomb sandwich beam using 3D and continuum model. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 9(6), 1077-1081.
- [19] **Bolat, F. Ç.** (2011). Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi. Y. Lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [20] **Arslan, N., & Kaman, M. O.** (2002). Alüminyum, Kağıt Ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 113-123.
- [21] **Taşkesen, İ. H.** (2020). Bal peteği sandviç kompozitlerde darbe testi sonrası basma davranışlarının incelenmesi (Master's thesis, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [22] **Liu, J., Cheng, Y. S., Li, R. F., & Au, F. T. K.** (2010). A semi-analytical method for bending, buckling, and free vibration analyses of sandwich panels with square-honeycomb cores. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 10(01), 127-151.
- [23] **Paul, D., & Gupta, N. K.** (2022). Experimental and analytical studies of syntactic foam core composites for impact loading. *International Journal of Crashworthiness*, 27(1), 299-316.
- [24] **Gargano, A., Das, R., & Mouritz, A. P.** (2022). Comparative experimental study into the explosive blast response of sandwich structures used in naval ships. *Composites Communications*, 30, 101072.
- [25] **Gabriel, S., von Klemperer, C. J., Chung Kim Yuen, S., & Langdon, G. S.** (2021). Towards an understanding of the effect of adding a foam core on the blast performance of glass fibre reinforced epoxy laminate panels. *Materials*, 14(23), 7118.
- [26] **Tagarielli, V. L., Deshpande, V. S., & Fleck, N. A.** (2007). The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact. *International Journal of Solids and Structures*, 44(7-8), 2442-2457.
- [27] **Tilbrook, M. T., Deshpande, V. S., & Fleck, N. A.** (2009). Underwater blast loading of sandwich beams: regimes of behaviour. *International Journal of Solids and Structures*, 46(17), 3209-3221.
- [28] **Brekken, K. A., Reyes, A., Berstad, T., Langseth, M., & Børvik, T.** (2020). Sandwich panels with polymeric foam cores exposed to blast loading: An experimental and numerical investigation. *Applied Sciences*, 10(24), 9061.
- [29] **Subaşı, S., Çetin, V., & Şamandar, A.** (2017). Kompozit Panellerde CTP Levha Ve Çekirdek Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi. *El-Cezeri*, 4(2), 135-145.
- [30] **Lu, C., Qi, M., Islam, S., Chen, P., Gao, S., Xu, Y., & Yang, X.** (2018). Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 47-54.

- [31] **Brischetto, S., Ferro, C. G., Torre, R., & Maggiore, P.** (2018). 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 5(1), 80-94.
- [32] **Jiga, G. G., Burtoiu, M. G., Pascu, N. E., & Dobrescu, T. G.** (2021). Behavior of Different PLA Sandwich Structures Loaded in Three Points Bending. In *Macromolecular Symposia*, 396(1), 2000306.
- [33] **Li, T., & Wang, L.** (2017). Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, 175, 46-57.
- [34] **Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., & Hirano, Y.** (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114-121.
- [35] **Arbaoui, J., Schmitt, Y., Pierrot, J. L., & 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(1), 11-16.
- [36] **Naresh, K., Cantwell, W. J., Khan, K. A., & Umer, R.** (2021). Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 256, 113059.
- [37] **Paik, J. K., Thayamballi, A. K., & Kim, G. S.** (1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-walled structures*, 35(3), 205-231.
- [38] **Ali, M. H., & Batai, S.** (2020). Bending behavior of sandwich composite structures of 3D-printed materials. In *Advances in Materials and Manufacturing Engineering: Proceedings of ICAMME 2019* (pp. 281-287). Springer Singapore.
- [39] **Lascano, D., Guillen-Pineda, R., Quiles-Carrillo, L., Ivorra-Martínez, J., Balart, R., Montanes, N., & Boronat, T.** (2021). Manufacturing and characterization of highly environmentally friendly sandwich composites from polylactide cores and flax-polylactide faces. *Polymers*, 13(3), 342.
- [40] **Zaharia, S. M., Pop, M. A., Semenescu, A., Florea, B., & Chivu, O. R.** (2017). Mechanical properties and fatigue performances on sandwich structures with CFRP skin and nomex honeycomb core. *Mat. Plast*, 54, 67.
- [41] **Yaman, O. F.** (2017). *Cnt Takviyeli Karbon/Epoksi Yüzeye Sahip Nomex Çekirdekli Sandviç Yapının Eğilme Özelliklerinin İncelenmesi* (Master's thesis)
- [42] **Arputhabalan, J., Karunamoorthy, L., & Palanikumar, K.** (2021). Experimental investigation on the mechanical properties of aluminium sandwiched sisal/kenaf/aloevera/jute/flax natural fibre-reinforced epoxy LY556/GY250 composites. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), 1495-1504.
- [43] **Lombardi, N. J., & Liu, J.** (2011). Glass fiber-reinforced polymer/steel hybrid honeycomb sandwich concept for bridge deck applications. *Composite structures*, 93(4), 1275-1283.
- [44] **Vasanthanathan, A., & Navin Kumar, C.** (2022). Fabrication of aluminum honeycomb cored carbon fabric/epoxy composite sandwich structures via

vacuum assisted resin infusion technique. *Polymer Composites*, 43(3), 1407-1420.

- [45] **Kaya, G., & Selver, E.** (2019). Impact resistance of Z-pin-reinforced sandwich composites. *Journal of Composite Materials*, 53(26-27), 3681-3699.
- [46] **Topkaya, T., & Solmaz, M. Y.** (2018). Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32, 3161-3167.
- [47] **Akkuş, H., Düzcükoğlu, H., & Şahin, Ö. S.** (2016). Alüminyum bal peteği yapılarında darbe mukavemeti tahmini için regresyon modeli oluşturulması. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 9(3), 102-111.
- [48] **Cormos, R., Petrescu, H., Hadar, A., ADIR13, G. M., & Gheorghiu, H.** (2017). Finite Element Analysis of the Multilayered Honeycomb. *Materiale Plastice*, 54(1), 180.
- [49] **Usta, F., Türkmen, H. S., & Scarpa, F.** (2021). Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 163, 107738.
- [50] **Özen, İ., Çava, K., Gedikli, H., Alver, Ü., & Aslan, M.** (2020). Low-energy impact response of composite sandwich panels with thermoplastic honeycomb and reentrant cores. *Thin-Walled Structures*, 156, 106989.
- [51] **Gülçimen, Çakan, B., Ensarioğlu, C., Kucukakarsu, V., Tekin, I., & Cakir, M.** (2021). Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3).
- [52] **Cao, H., Qian, K., Wei, Q., & Li, H.** (2010). Low-velocity impact behaviour of 3-D glass fibre hollow integrated core sandwich composites. *Polymers and Polymer Composites*, 18(4), 175-180.
- [53] **Kavianiboroujeni, A., Cloutier, A., & Rodrigue, D.** (2017). Low velocity impact behaviour of asymmetric three-layer sandwich composite structures with and without foam core. *Polymers and Polymer Composites*, 25(5), 381-394.
- [54] **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. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 22(3), 525-550.
- [55] **Xiong, J., Vaziri, A., Ghosh, R., Hu, H., Ma, L., & Wu, L.** (2016). Compression behavior and energy absorption of carbon fiber reinforced composite sandwich panels made of three-dimensional honeycomb grid cores. *Extreme Mechanics Letters*, 7, 114-120.
- [56] **La Saponara, V., & Kamaya, S.** (2004). Evaluation of static compression properties of notched stitched sandwich structures. In *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference* (p. 1704).

- [57] **Aslan, M., Güler, O., & Alver, Ü.** (2018). Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1062-1068.
- [58] **Zaharia, S. M., Pop, M. A., Semenescu, A., Florea, B., & Chivu, O. R.** (2017). Mechanical properties and fatigue performances on sandwich structures with CFRP skin and nomex honeycomb core. *Mat. Plast*, 54, 67.
- [59] **Kıyak, B., & Kaman, M. O.** (2019). Hücre Boşlukları Köpük ile Doldurulmuş Kompozit Sandviç Levhaların Basma ve Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 47-52.
- [60] **Arslan, N., & Kaman, M. O.** (2002). Alüminyum, Kağıt Ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 113-123.
- [61] **Gohar, S., Hussain, G., Ali, A., & Ahmad, H.** (2023). Mechanical performance of honeycomb sandwich structures built by FDM printing technique. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(1), 182-200.
- [62] **Solmaz, M. Y., & Çelik, E.** (2018). 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 277-286.
- [63] **Mercado-Colmenero, J. M., Martín-Doñate, C., Moramarco, V., Attolico, M. A., Renna, G., Rodriguez-Santiago, M., & Casavola, C.** (2020). Mechanical characterization of the plastic material GF-PA6 manufactured using FDM technology for a compression uniaxial stress field via an experimental and numerical analysis. *Polymers*, 12(1), 246.
- [64] **Beniak, J., Križan, P., Šooš, L., & Matuš, M.** (2018). Roughness and compressive strength of FDM 3D printed specimens affected by acetone vapour treatment. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 297, p. 012018). IOP Publishing.
- [65] **Duan, Y., Liu, Z., Zhao, X., Hou, N., Du, B., Liu, H., ... & Rabinskiy, L. N.** (2020). Crushing behavior of honeycomb vs. foam under combined shear-compression loading. *International Journal of Impact Engineering*, 146, 103696.
- [66] **Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G., & Etches, J.** (2017). The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 3(1), 21-31.
- [67] **Mamatha, S., Biswas, P., Das, D., & Johnson, R.** (2020). 3D printing of cordierite honeycomb structures and evaluation of compressive strength under quasi-static condition. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(1), 211-216.
- [68] **Ayrilmis, N., Kariz, M., Šernek, M., & Kuzman, M. K.** (2021). Effects of sandwich core structure and infill rate on mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 3233-3242.



- [69] **An improved engineering workflow with Ultimaker Cura 4.10.** (2011). Erişim: 06 Mart 2023, <https://ultimaker.com/learn/an-improved-engineering-workflow-with-ultimaker-cura-4-10/>
- [70] **The Ultimaker 2+ Specifications.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://support.makerbot.com/s/article/1667337915868>
- [71] **ASTM C393/C393M-16.** (2016). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. ASTM International, 1-8.
- [72] **Araldite 2015-1.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://www.huntsman.com/products/araldite2000/araldite-2015-1>
- [73] **ASTM D7766/D7766M-16.** (2016). Standard Practice for Damage Resistance Testing of Sandwich Constructions. ASTM International, 1-9.
- [74] **Karbon Fiber Plaka Pro T:1mm 50cmX50cm.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://www.kompozit.net/karbon-fiber-plaka-pro-t-1mm-50cmx50cm>
- [75] **ASTM C365/C365M-16.** (2016). Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. ASTM International, 1-8.
- [76] **Instron Ceast 9350 Drop Tower Impact System.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://www.plantautomation-technology.com/products/instron/ceast-9350-drop-tower-impact-system>
- [77] **Advantages of the Zwick Z100/Z250 materials testing machine with central ball-lead screw.** (t.y.). Erişim: 10 Nisan 2023, [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user\\_upload/PI\\_EN/08\\_437\\_Single\\_screw\\_testing\\_machine\\_PI\\_EN.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/08_437_Single_screw_testing_machine_PI_EN.pdf)
- [78] **Shimadzu Autograph Universal Testing Machines.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://www.shimadzu.com/an/products/material-non-destructive/test/retrofits/retrofits2.html>
- [79] **Naresh, K., Cantwell, W. J., Khan, K. A., & Umer, R.** (2021). Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 256, 113059.
- [80] **Geren, N., Acer, D. C., Uzay, C., & Bayramoglu, M.** (2021). The effect of boron carbide additive on the low- velocity impact properties of low- density foam core composite sandwich structures. *Polymer Composites*, 42(4), 2037-2049.
- [81] **Kaveloglu, S., & Temiz, S.** (2022). An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221122333.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Serdar KAVELOĞLU

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1999, Niğde Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2010, Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı
- **Doktora** : 2023, İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM:

- 1999-2000 OYSA Çimento Arçım Makine Bakım Onarım İmalat Sanayi Ltd. Şti, Niğde, Makine Bakım ve Montaj Mühendisi
- 2002-2003 Çift Kartal Değirmen Makineleri ve Taşları Sanayi ve Ticaret A. Ş., Aksaray, İmalat ve Proje Mühendisi
- 2003-2013 Birko Koyunlu Yün İplik İşletmesi A. Ş., Niğde, İşletme ve Makine Bakım Şefi
- 2013- devam ediyor Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Öğretim Görevlisi

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR:

#### Uluslararası SCI dergilerde Yayımlanan Makaleler

- **Kaveloğlu, S. & Temiz, Ş. (2024)**. 3 Boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe performanslarının araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39 (1), 139-150. DOI: 10.17341/gazimmfd.1172545
- **Kaveloğlu, S., & Temiz, S. (2022)**. An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. Polymers and Polymer Composites, 30, 09673911221122333.

### **Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler**

- **Kaveloğlu, S., Temiz, Ő., Doğan, O., & Kamer, M. S., (2022).** 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(2), 459-470.

### **Uluslararası Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler**

- Kaveloğlu S., Kamer M. S., Temiz Ő., Kaya A., (29.11.2019- 01.12.2019). 3 Boyutlu Yazıcı İle Abs Filament Kullanılarak Üretilen Sandviç Kompozit Yapıların Basma Yüğü Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. 3. Uluslararası Gap Matematik-Mühendislik- Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi (667-675).
- Kaveloğlu S., Kamer M. S., Temiz Ő., Kaya A., (29.11.2019- 01.12.2019). 3 Boyutlu Yazıcı İle Pla Filament Kullanılarak Üretilen Sandviç Kompozit Yapıların Basma Yüğü Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. 3. Uluslararası Gap Matematik-Mühendislik- Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi (1173-1180).