



**KARBON FİBER KOMPOZİT ÇEKİRDEKLİ
SANDVIÇ LEVHALARIN İMALATI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KIYAK

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

AĞUSTOS-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON FİBER KOMPOZİT ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ LEVHALARIN İMALATI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KIYAK
(142120103)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

AĞUSTOS-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON FİBER KOMPOZİT ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ LEVHALARIN İMALATI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KIYAK

(142120103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24.07.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 10.08.2017

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (Fırat Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ (İnönü Ü.)

Doç. Dr. M. Yavuz SOLMAZ (Fırat Ü.)

AĞUSTOS-2017

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, bilgi ve deneyimleriyle beni aydınlatan kıymetli danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Mete Onur KAMAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, bilgi ve deneyimlerinden faydalanarak fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR ve Sayın Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ'a teşekkür ederim. Bu çalışmayı MF 16.57 kodlu FÜBAB projesi kapsamında destekleyen Fırat Üniversitesi' ne teşekkür ederim.

Ayrıca bütün hayatım boyunca bana maddi ve manevi yönden destek olan sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Burak KIYAK
Elazığ-2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	15
3.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	16
3.1.1. Uzay ve Havacılık Sanayi	16
3.1.2. Denizcilik Sanayi.....	17
3.1.3. Otomotiv Sanayi	17
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	18
3.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	20
4. SANDVIÇ KOMPOZİTLER.....	21
4.1. Sandviç Kompozitlerin Tarihi	22
4.2. Sandviç Kompozitlerin Özellikleri	23
4.3. Sandviç Yapılar Neden Tercih Edilir?	24
4.3.1. Hafiflik	25
4.3.2. Çevresel Faydalar	27
4.3.3. Tasarım Faydaları	27
4.3.4. Diğer Faydalar	27
4.4. Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması	28
4.4.1. Yüzey Malzemeleri.....	28
4.4.2. Yapıştırıcı Malzemeler (Reçineler)	30
4.4.3. Çekirdek Malzemeleri	31
5. PETEKLİ ÇEKİRDEK YAPIYA SAHİP SANDVIÇ KOMPOZİTLER.....	33
5.1. Petekli Yapı Çekirdek Üretim Yöntemleri	34

5.2.	Petekli Sandviç Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	35
5.2.1.	Sıcak Pres Yöntemi	36
5.2.2.	Vakum Yöntemi	37
5.2.3.	Kalıplama Yöntemi	38
5.3.	Petekli Sandviç Yapılarda Oluşabilecek Hasar Modları.....	39
5.3.1.	Mukavemet	39
5.3.2.	Rijitlik.....	40
5.3.3.	Panel Burkulması.....	40
5.3.4.	Kesme Kıvrımı	41
5.3.5.	Yüzey Tabakada Çökme.....	41
5.3.6.	Hücreler Arası Kıvrılma	42
5.3.7.	Bölgesel Basınç	42
6.	MATERYAL VE METOT.....	43
6.1.	Sandviç Levha Üretim Uygulaması	45
6.2.	Üretimi Yapılan Sandviç Levha Çeşitleri	49
6.2.1.	Basma Deneyi İçin Üretilen Numuneler	50
1)	B1, B2 ve B3 numuneleri (kare hücre)	50
2)	B4, B5 ve B6 numuneleri (dikdörtgen hücre).....	51
3)	B7, B8 ve B9 numuneleri (üçgen hücre)	53
4)	B10, B11 ve B12 numuneleri (kare + köpüklü hücre).....	54
5)	B13, B14 ve B15 numuneleri (kare + delikli hücre).....	55
6)	B16, B17 ve B18 numuneleri (kare + delikli + köpüklü hücre)	56
7)	B19, B20 ve B21 numuneleri (10 mm yüksekliğinde kare hücre)	56
8)	B22, B23 ve B24 numuneleri (40 mm yüksekliğinde kare hücre)	57
9)	B25, B26 ve B27 numuneleri (4 hücreli kare çekirdek yapı)	58
10)	B28, B29 ve B30 numuneleri (64 hücreli kare çekirdek yapı).....	59
6.2.2.	Üç Nokta Eğme Deneyi İçin Üretilen Numuneler.....	59
1)	E1, E2 ve E3 numuneleri (kare hücre).....	59
2)	E4, E5 ve E6 numuneleri (dikdörtgen hücre)	61
3)	E7, E8 ve E9 numuneleri (üçgen hücre)	62
4)	E10, E11 ve E12 numuneleri (kare + köpüklü hücre)	63
5)	E13, E14 ve E15 numuneleri (kare + delikli hücre)	63
6)	E16, E17 ve E18 numuneleri (kare + delikli + köpüklü hücre).....	65

7) E19, E20 ve E21 numuneleri (10 mm yüksekliğinde kare hücre)	65
8) E22, E23 ve E24 numuneleri (40 mm yüksekliğinde kare hücre)	66
9) E25, E26 ve E27 numuneleri (4 hücreli kare çekirdek yapı)	67
10) E28 , E29 ve E30 numuneleri (128 hücreli kare çekirdek yapı)	68
7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR	70
7.1. Basma Deney Sonuçları	70
7.2. Yanal Basma (Edgewise) Deney Sonuçları	83
7.3. Üç Nokta Eğme Deney Sonuçları	86
7.4. Farklı Tip Çekirdek Yapısına Sahip Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması	105
7.4.1. Hücre Yapısına Göre Karşılaştırma	106
7.4.2. Hücrelerin Köpüklü-Köpüksüz ve Çekirdek Yapının Delikli-Deliksiz Oluşuna Göre Karşılaştırma	108
7.4.3. Çekirdek Yüksekliğine Göre Karşılaştırma	111
7.4.4. Hücre Alanına Göre Karşılaştırma (Hücre Sayısı)	113
8. SAYISAL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR	116
8.1. Burkulma Analizi Sonuçları	116
8.2. Üç Nokta Eğme Analizi Sonuçları	119
9. DEĞERLENDİRME	123
KAYNAKLAR	128
ÖZGEÇMİŞ	133

ÖZET

Bu tez çalışmasında, çeşitli hücre yapılarına sahip karbon fiber çekirdekli sandviç kompozitlerin imalatı yapılarak mekanik özellikleri, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda imalatı yapılan numunelere basma ve üç nokta eğme uygulanmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 10 farklı çekirdek yapısına sahip 60 adet sandviç kompozit numunenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri çizilerek, maksimum dayanım yükleri belirlenmiştir. Karbon fiber/epoksi çekirdekli kompozit sandviç levhaların basma ve eğme dayanımı üzerinde hücre şekli, çekirdek yüksekliği/yoğunluğu, köpük dolgusu gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışmada sonlu elemanlar metodunu esas alan ANSYS paket programı kullanılmıştır. Lineer elastik malzeme davranışına sahip kompozit levhaların sayısal kritik burkulma yükleri, basma test sonuçları ile kuvvet-deplasman davranışları ve eğme dayanımları ise *Tsai-Wu* hasar kriterine göre eğme test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen uyumlu sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sandviç levha, karbon fiber kompozit, çekirdek, sonlu elemanlar metodu, basma, eğme

SUMMARY

MANUFACTURING AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE HAVING CARBON FIBER CORE

In this study, manufacturing and mechanical properties of sandwich composites with various cell structure having carbon fiber core have been investigated numerically and experimentally. Compression and three-point bending tests have been applied to manufactured specimens in experiments. For this purpose, 60 sandwich composite specimens with 10 different core structures were produced for use in experimental studies. In the performed experiments, the force-displacement graphs of the specimens were drawn and the maximum strength loads were determined. The effect of parameters such as cell shape, core height/density, and foam filling on the compression and bending strength of carbon fiber/epoxy core composite sandwich plates were investigated. ANSYS package program based on finite element method was used in numerical study. Numerical critical buckling loads of composite plates having linear elastic behavior with results of compression test, force-displacement behaviors and bending strengths with the results of bending test were compared according to the *Tsai-Wu* failure criterion. Compatible results obtained from experiments and numerical analysis have been presented in tables and graphics.

Keywords: Sandwich plate, carbon fiber composite, core, finite element method, compression, bending.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Sandviç bir yapıyı oluşturan bileşenler.	1
Şekil 3.1 Kompozit malzeme [42].	15
Şekil 3.2 Üretim aşamasındaki kompozit bir tekne [46].	17
Şekil 3.3 Takviye elemanının şekline göre kompozit tipleri [1].	19
Şekil 4.1 Sandviç yapıyı oluşturan elemanlar.	21
Şekil 4.2 Eğme durumundaki sandviç yapıda meydana gelen gerilmeler.	23
Şekil 4.3 Koordinat sistemindeki sandviç levha.	24
Şekil 4.4 Sandviç kompozit bir kiriş ve çelikten yapılmış bir I kirişi arasındaki benzerlik [48].	25
Şekil 4.5 Çekirdek kalınlığındaki artışın rijitlik ve ağırlık üzerine etkisi [48].	26
Şekil 5.1 Farklı hücre şekilleri [51].	33
Şekil 5.2 Uzatarak şekil verme yöntemi ile petekli yapı çekirdek üretimi [56].	34
Şekil 5.3 Kıvrırma yöntemi ile petekli yapı çekirdek üretimi [56].	35
Şekil 5.4 Sıcak pres yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].	36
Şekil 5.5 Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].	36
Şekil 5.6 Vakum yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].	37
Şekil 5.7 Vakum yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].	37
Şekil 5.8 Kalıplama yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].	38
Şekil 5.9 Kalıplama yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].	38
Şekil 5.10 Tasarım yükünü karşılayamayan düşük mukavemetli sandviç yapı [57].	39
Şekil 5.11 Yetersiz rijitliğe sahip sandviç yapı [57].	40
Şekil 5.12 Panel burkulma hatası [57].	40
Şekil 5.13 Kesme gerilmesine maruz kalmış bir sandviç yapı [57].	41
Şekil 5.14 Sandviç panel yüzeyinde çökme hatası [57].	41
Şekil 5.15 Hücreler arası kıvrılma hatası [57].	42
Şekil 5.16 Bölgesel basınca maruz kalmış sandviç yapıda çökme hatası [57].	42
Şekil 6.1 Karbon fiber/epoksi kompozit malzeme.	43
Şekil 6.2 İç içe sıkı geçme tekniği uygulaması.	44
Şekil 6.3 Çekirdek yapı hücre şekilleri.	44
Şekil 6.4 Üretimde kullanılan karbon fiber kompozitler.	45
Şekil 6.5 a) Elektrikli şerit testere b) kanal açma işlemi.	46
Şekil 6.6 Kanal açılmış karbon fiber kompozit.	46
Şekil 6.7 Karbon fiber kompozit çekirdek yapı üretimi a) karbon fiber şeritlerin iç içe geçirilmesi b) üretimi tamamlanmış çekirdek yapı.	47
Şekil 6.8 Yapıştırıcı malzemenin hazırlanması a) reçine ve sertleştirici b) karışıma reçinenin eklenmesi c) karışıma sertleştiricinin eklenmesi.	48
Şekil 6.9 a) Yapıştırıcı malzemenin yüzey kapaklarına uygulanması b) çekirdek yapı ve yüzey kapağının yapıştırılması.	48
Şekil 6.10 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.	51

Şekil 6.11 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	51
Şekil 6.12 10 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.	52
Şekil 6.13 40 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.	52
Şekil 6.14 16 hücreli dikdörtgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	52
Şekil 6.15 a) Orta noktasına kanal açılmış karbon fiber kompozit b) X parçası.	53
Şekil 6.16 16 hücreli üçgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	53
Şekil 6.17 a) Poliüretan köpük b) hücelere köpük doldurulması c) kurumuş haldeki köpük.	54
Şekil 6.18 16 hücreli kare + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	54
Şekil 6.19 20 mm aralıklarla kanal açılmış delikli yapıdaki karbon fiber kompozit.	55
Şekil 6.20 16 hücreli kare + delikli formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	55
Şekil 6.21 16 hücreli kare + delikli + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	56
Şekil 6.22 10 mm yüksekliğinde 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.	57
Şekil 6.23 10 mm yüksekliğe sahip 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	57
Şekil 6.24 40 mm yüksekliğinde 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.	57
Şekil 6.25 40 mm yüksekliğe sahip 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	58
Şekil 6.26 4 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	58
Şekil 6.27 64 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	59
Şekil 6.28 20 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	60
Şekil 6.29 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	60
Şekil 6.30 40 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	61
Şekil 6.31 32 hücreli dikdörtgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	61
Şekil 6.32 32 hücreli üçgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	62
Şekil 6.33 32 hücreli kare + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	63
Şekil 6.34 20 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki delikli karbon fiber kompozit.	64
Şekil 6.35 32 hücreli kare + delikli formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	64

Şekil 6.36 32 hücreli kare + delikli + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	65
Şekil 6.37 20 mm aralıklarla kanal açılmış 10 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	66
Şekil 6.38 10 mm yüksekliğe sahip 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	66
Şekil 6.39 20 mm aralıklarla kanal açılmış 40 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	67
Şekil 6.40 40 mm yüksekliğe sahip 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	67
Şekil 6.41 40 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	68
Şekil 6.42 8 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	68
Şekil 6.43 10 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.	69
Şekil 6.44 128 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.	69
Şekil 7.1 Basma-çekme test cihazı.	70
Şekil 7.2 B1, B2 ve B3 numunelerine ait kuvvet - deplasman grafiği.	71
Şekil 7.3 B4, B5 ve B6 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	72
Şekil 7.4 B7, B8 ve B9 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	74
Şekil 7.5 B10, B11 ve B12 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	75
Şekil 7.6 B13, B14 ve B15 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	77
Şekil 7.7 B16, B17 ve B18 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	78
Şekil 7.8 B19 numunesine ait kuvvet – deplasman grafiği.	79
Şekil 7.9 Basma yükü altındaki 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip numune.	80
Şekil 7.10 B22, B23 ve B24 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	80
Şekil 7.11 B25, B26 ve B27 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.	82
Şekil 7.12 B20 ve B21 numunelerine ait yanal basma testinden elde edilen kuvvet - deplasman grafiği.	83
Şekil 7.13 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunenin yanal basma test yöntemi ile basma deneyi	84
Şekil 7.14 B28, B29 ve B30 numunelerine ait yanal basma testinden elde edilen kuvvet - deplasman grafiği.	85
Şekil 7.15 64 hücreli çekirdek yapıya sahip numunenin yanal basma test yöntemi ile basma deneyi	85
Şekil 7.16 E1, E2 ve E3 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	86
Şekil 7.17 E4, E5 ve E6 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	88
Şekil 7.18 E7, E8 ve E9 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	90
Şekil 7.19 E10, E11 ve E12 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	92
Şekil 7.20 E13, E14 ve E15 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	94
Şekil 7.21 E16, E17 ve E18 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	96
Şekil 7.22 E19, E20 ve E21 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	98

Şekil 7.23 E22, E23 ve E24 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	100
Şekil 7.24 E25, E26 ve E27 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	102
Şekil 7.25 E28, E29 ve E30 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.	104
Şekil 7.26 Hücre yapısına göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.	107
Şekil 7.27 Hücre yapısına göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.	108
Şekil 7.28 Numunelerin köpüklü-köpüksüz ve delikli-deliksiz oluşuna göre ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.	109
Şekil 7.29 Numunelerin köpüklü-köpüksüz ve delikli-deliksiz oluşuna göre ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.	110
Şekil 7.30 Çekirdek yüksekliğine göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.	112
Şekil 7.31 Çekirdek yüksekliğine göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.	113
Şekil 7.32 Hücre sayısına göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.	114
Şekil 7.33 Hücre sayısına göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.	115

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1 Sandviç yapılarda çekirdek malzemenin kalınlığına göre rijitlik, mukavemet ve ağırlıktaki değişim [51].	26
Tablo 4.2 Bazı cam fiberlerin yaklaşık olarak kimyasal bileşeni [53].	28
Tablo 6.1 Üretimde kullanılan karbon fiber kompozitlerin ölçüleri ve adetleri.	45
Tablo 6.2 Basma deneyi için üretilen numune isimleri ve özellikleri.	49
Tablo 6.3 Üç nokta eğme deneyi için üretilen numune isimleri ve özellikleri.	50
Tablo 7.1 Basma yükü altındaki kare hücre yapısına sahip numuneler.	72
Tablo 7.2 Basma yükü altındaki dikdörtgen hücre yapısına sahip numuneler.	73
Tablo 7.3 Basma yükü altındaki üçgen hücre yapısına sahip numuneler.	74
Tablo 7.4 Basma yükü altındaki kare ve köpüklü hücre yapısına sahip numuneler.	76
Tablo 7.5 Basma yükü altındaki kare ve delikli hücre yapısına sahip numuneler.	77
Tablo 7.6 Basma yükü altındaki poliüretan köpük dolgulu kare ve delikli hücre yapısına sahip numuneler.	79
Tablo 7.7 Basma yükü altındaki kare hücre yapısına ve 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip numuneler.	81
Tablo 7.8 Basma yükü altındaki 4 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numuneler.	82
Tablo 7.9 Kare hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	87
Tablo 7.10 Dikdörtgen hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	89
Tablo 7.11 Üçgen hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	91
Tablo 7.12 Poliüretan köpük dolgulu kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	93
Tablo 7.13 Kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	95
Tablo 7.14 Poliüretan köpük dolgulu kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numunelerinin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	97
Tablo 7.15 10 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	99
Tablo 7.16 40 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numunenin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	101
Tablo 7.17 8 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	103
Tablo 7.18 128 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.	105
Tablo 8.1 Çapraz fiber takviyeli / epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri.	116
Tablo 8.2 Farklı çekirdek yapıya sahip numunelerin burkulma analizi için sonlu eleman modelleri.	117
Tablo 8.3 Burkulma analizi modelleri için eleman ve düğüm sayıları.	118

Tablo 8.4 Numunelere ait basma deneyi ve burkulma analizi sonuçları.	118
Tablo 8.5 Farklı çekirdek yapıya sahip numunelerin eğme analizi için sonlu eleman modelleri.	119
Tablo 8.6 Eğme analizi modelleri için eleman ve düğüm sayıları.	120
Tablo 8.7 <i>Tsai-Wu</i> hasar kriterine göre eğme analizinde çekirdek yapıda meydana gelen hasar bölgeleri.....	120



KISALTMALAR LİSTESİ

MWCNT	: Multi Walled Carbon Nano Tube
PET	: Polietilen Tereftalat
PVC	: Polivinil Klorür
PES	: Polietersülfon
B1, B2, B3	: Kare hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B4, B5, B6	: Dikdörtgen hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip numuneleri
B7, B8, B9	: Üçgen hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B10, B11, B12	: Kare + köpüklü hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B13, B14, B15	: Kare + delikli hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B16, B17, B18	: Kare + delikli + köpüklü hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B19, B20, B21	: Kare hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 10mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B22, B23, B24	: Kare hücre yapısına sahip 16 hücreli ve 40mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B25, B26, B27	: Kare hücre yapısına sahip 4 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
B28, B29, B30	: Kare hücre yapısına sahip 64 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip basma numuneleri
E1, E2, E3	: Kare hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E4, E5, E6	: Dikdörtgen hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E7, E8, E9	: Üçgen hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E10, E11, E12	: Kare + köpüklü hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E13, E14, E15	: Kare + delikli hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E16, E17, E18	: Kare + delikli + köpüklü hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E19, E20, E21	: Kare hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 10mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E22, E23, E24	: Kare hücre yapısına sahip 32 hücreli ve 40mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E25, E26, E27	: Kare hücre yapısına sahip 8 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri
E28, E29, E30	: Kare hücre yapısına sahip 128 hücreli ve 20mm çekirdek yüksekliğine sahip eğme numuneleri

SEMBOLLER LİSTESİ

$F_{\max}$: Deneysel maksimum basma ve eğme dayanımı (kN)
 F_{kritik} : Sayısal kritik burkulma yükü (kN)

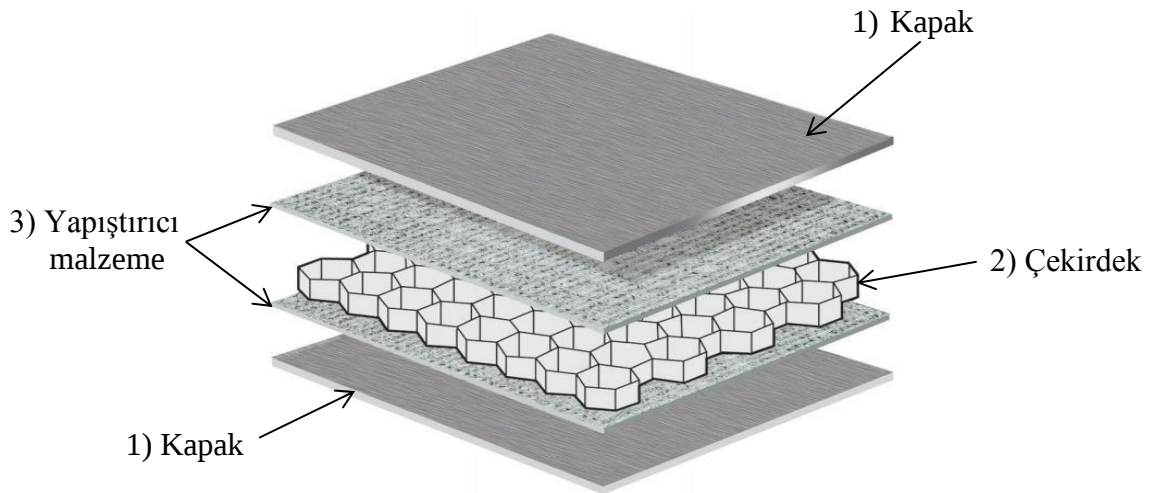


1. GİRİŞ

Sürekli olarak gelişmekte olan teknoloji ile birlikte mühendislik uygulamalarında kullanılan metal gibi klasik malzemelere alternatif olarak daha ekonomik ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olan kompozit malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. İlk olarak 1930’larda cam fiber takviyeli modern kompozitler üretilmiş ve fiberglas olarak adlandırılan bu kompozitler bot ve uçak yapımında kullanılmıştır. 1970’lerden itibaren ise çeşitli fiber ve matris elemanları kullanılarak yeni kompozitler geliştirilmiş ve buna bağlı olarak kompozit malzeme uygulamaları artmıştır [1].

Kompozit malzemeler, tabakalı kompozit şeklinde üretilbildikleri gibi ağırlığı azaltmak amacıyla sandviç kompozit şeklinde de üretilbilirler. Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerinin makro düzeyde ve fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemedir. Sandviç kompozit levhalar ise temelde üç yapı elemanından oluşmaktadır (Şekil 1.1). Bu yapı elemanları;

- 1) Alt ve üst yüzeyde bulunan ince ve mukavemetli kapaklar,
 - 2) İki kapak arasındaki mesafeyi koruyan ve sandviç levha üzerine gelen kuvvetleri bir kapaktan diğerine aktaran çekirdek yapı,
 - 3) Kapak malzemelerini ve çekirdek yapı ara yüzey bağlantısını sağlayan ve bu iki yapı elemanı arasında kayma gerilmelerini ileten yapıştırıcı malzeme,
- şeklinde tanımlanabilir.



Şekil 1.1 Sandviç bir yapıyı oluşturan bileşenler.

Bu şekilde elde edilen sandviç kompozitler hafif, mukavemetli ve yüksek enerji absorbe etme özelliğine sahip yapıların elde edilmesine imkân tanır. Bu tez çalışmasında, günümüzde mevcut olan sandviç kompozitlerden daha üstün mekanik özelliklere sahip sandviç yapıların üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmalar, sandviç kompozitin üç temel elemanından biri olan çekirdek yapı üzerine yoğunlaştırılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak alüminyum, aramid ve kâğıt (*Nomex*) gibi geleneksel malzemelerin yerine karbon fiber kompozit malzeme kullanılmıştır. Aynı şekilde çekirdek üretimlerinde geleneksel olarak kullanılan yapıştırıcı bağlantılar yerine iç içe sıkı geçme tekniği kullanılmıştır. Böylece 10 farklı tipte çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit geliştirilmiş ve deneysel ve sayısal analizler sonucunda bunlar arasında en iyi mekanik özelliklere sahip sandviç kompozit tespit edilmiştir. Elde edilen bu sandviç kompozitler ile yüksek dayanım gerektiren kontrüksiyonlar için alternatif bir malzeme olarak kullanılma fikrinin oluşmasının sağlanması amaçlanmaktadır.

Tez çalışması özetle aşağıdaki sekiz bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; sandviç kompozitler hakkında genel bir bilgi verilerek tez çalışmasının içeriğinden kısaca bahsedilmiştir.

İkinci bölümde; literatürde sandviç kompozitler ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde; sandviç levhalarda temel yapı elemanı olarak kullanılan kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde; sandviç kompozitlerin tarihi gelişimi, genel özellikleri, sınıflandırılmaları ve yaygın olarak tercih edilme sebepleri açıklanmıştır.

Beşinci bölümde; sandviç kompozitler arasında en yaygın kullanıma sahip olan petekli çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlerin çekirdek üretim yöntemleri, ve bu tip çekirdek yapıya sahip kompozitlerde meydana gelebilecek hasar türleri konularına değinilmiştir.

Altıncı bölümde; deneylerde kullanılmak üzere imalatı yapılan numunelerin üretim yönteminden bahsedilerek her bir çekirdek yapısına ait numunenin üretim aşamaları ayrı ayrı anlatılmıştır.

Yedinci bölümde; basma ve üç nokta eğme deneylerinden elde edilen sonuçlar paylaşılarak farklı tip çekirdek yapısına sahip olan numunelerin mekanik özellikleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Sekizinci bölümde; deneysel çalışmaları yapılan numunelerin modelleri, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla oluşturularak burkulma ve eğme analizleri yapılmıştır. Böylece deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak sonuçların tutarlılığı değerlendirilmiştir.

Dokuzuncu bölümde; kompozit sandviç levhalar için elde edilen sonuçlarına göre genel bir değerlendirme yapılarak daha iyi mekanik özelliklere sahip numune üretimi için tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hafifliği, yüksek mukavemeti ve enerji absorbe etme yeteneği gibi birçok üstün özelliği bir arada barındıran sandviç kompozit levhaların bu özelliklerini en üst seviyelere çıkarmak ve yeni mekanik özellikler eklemek amacıyla günümüze kadar birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır.

Paik ve diğ. [2], çalışmalarında alüminyum balpeteği hücreli kompozit levhaların dayanımlarını teorik ve deneysel olarak tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla ürettikleri balpeteği sandviç numuneleri üç nokta eğme, eksenel basma ve yanal ezme gibi bir dizi teste tabi tutmuşlar ve alüminyum sandviç panelde meydana gelen yapısal bozuklukları incelemişlerdir.

Daniel ve Abot [3], tek yönlü karbon-epoksi kompozit kapak ve hücre boşlukları PVC ile doldurulmuş alüminyum balpeteği çekirdekten oluşan sandviç levha üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri eğme, kayma ve eksenel yüklere maruz bırakmış ve meydana gelen hataları inceleyerek elde ettikleri değerleri analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Arslan ve Kaman [4], alüminyum, polyester reçine emdirilmiş cam elyaf ve kâğıt çekirdek malzemesine sahip balpeteği sandviç kompozit levhalar üretmişlerdir. Basma ve çarpma yükleri altında bu levhaların, maksimum dayanım, kırılma, deformasyon ve enerji sönümleme özelliklerini araştırmışlardır.

Pan ve diğ. [5], tarafından alüminyum petek hücreli kompozit levhaların eksenel kayma deformasyon davranışı incelenmiştir. Kayma testi sonucunda yük-yer değiştirme grafiğinden; kayma yükünün maksimum bir değere ulaştığını bu değerden sonra ani bir düşüş gösterdiğini ve daha sonra yükün sabit kaldığını gözlemlemişlerdir. Kayma deformasyon sürecini; hücre duvarı kırılması ve petek hücreleri ile yüzey örtüsünün ayrılması şeklinde tanımlamışlardır.

Bunyawanicakul ve diğ. [6], karbon fiber/epoksi kapak ve nomex çekirdekten oluşan ve orta noktasında pim bulunan petekli yapıdaki sandviç levhaya pull-out testi

uygulamışlardır. Sonuç olarak hücre kayması ve burkulması, yüzey örtüsü hasarı ve pimin sandviç levhada oluşturduğu ezilme hasarlarını lineer olmayan sonlu elemanlar metoduyla modelleyerek sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Aktay ve diğ. [7], sonlu elemanlarda katı modellemeye uygun homojenleştirilmiş malzeme modeli ve yarı uyarlamalı sayısal eşleşme (SAC) tekniği kullanarak petek yapılı kompozit levhaların ezilme davranışlarını modellemişler ve SAC modelinin ezilme davranışı ve hasar oluşumunu modellemeye daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Galletti ve diğ. [8], tarafından, eğilmeye maruz petek yapılı kompozit levhaların hasar tipleri ve dayanımları araştırılmıştır. Çalışmada hasar oluşumunun yüzey örtüsünün mekanik dayanımının aşıldığı durumda meydana geldiği belirlenmiştir.

Fiedler ve Öchsner [9], farklı hücre tipindeki sandviç yapıların eğilme davranışlarını inceleyerek bu yapıların eğilme dayanımlarını ve hasar tiplerini belirlemişlerdir. Hücre malzemesi olarak; alüminyum, köpük ve küre şeklinde boşluklu metal yapılar kullanmışlardır.

He ve Hu [10], çalışmalarında balpeteği sandviç panellerin yapısal ve mekanik özelliklerini tanıtmış ve bu panellerin kapak ile hücre ağırlık oranlarının %50 – 66.7 arasında olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu varsayıma dayanarak ürettikleri numuneleri deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca sayısal olarak buldukları sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırarak her iki sonucun uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Othman ve Barton [11], statik ve dinamik çarpma yükü etkisindeki petek yapılı kompozit levhalarda hasar başlangıcı ve ilerlemesini araştırmışlardır. Üç nokta eğme deneyi yaparak sandviç levhaların yük taşıma, enerji sönümleme karakteristikleri ve hasar mekanizmalarını tespit etmişlerdir. Etkili hasar mekanizmalarını; yük temas yüzeyi etrafında basınç hasarı, hücre ezilmesi ve yüzey örtüsü çekme hasarı olarak belirlemişlerdir.

Russell ve diğ. [12], karbon fiber/epoksi kompozit çekirdekli sandviç levhalar üretmişlerdir. Çekirdek üretimi için öncelikle çeşitli fiber yapısına sahip karbon fiber kompozitlere kanallar açmışlar ve daha sonra bu kanallar vasıtasıyla montajını yaptıkları karbon fiber kompozitleri bir yapıştırıcı ile bağlayarak çekirdek üretimini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numunelerin basma ve kayma özelliklerini; yoğunluk, hücre yüksekliğinin genişliğine oranı ve hücre yoğunluğunun etkilerine bağlı olarak belirlemişlerdir.

Belouettar ve diğ. [13], dört nokta eğme testi uygulayarak petek yapılı kompozit levhaların yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında petek hücre yoğunluğu ve boyutunun maksimum yük, hasar başlangıcı ve ilerlemesi üzerine etkisini araştırmışlardır.

Jen ve diğ. [14], petek yapılı kompozit levhalarda yüzey örtüsü ile petek hücrenin yapıştırıcı ile birleştirilmesi durumunda kullanılan yapıştırıcı miktarının eğilme yorulması üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonlu elemanlar metodunu kullanılarak ara yüzey gerilmelerini elde etmiş ve bu gerilmeleri yorulma ömrünün tahmini için kullanmışlardır.

Solmaz ve Kaman [15], bal peteği sandviç yapılarda petek hücre boşluklarına köpük ilavesinin kritik burkulma yüküne etkisini tespit etmek için bir araştırma yapmışlardır. Bu amaçla 4 farklı hücre boyutunda ürettikleri bal peteği sandviç numunelerin petek hücre boşluklarını köpük ile doldurmuşlardır. Petek yapılı kompozit levhaların yüzey plakalarını, polyester/cam fiber kompozitinden üretmiş petek hücre malzemesi olarak ise 4 farklı kalınlığa sahip alüminyum kullanmışlardır. Sonuçta en ince hücre duvarına sahip olan (0.05 mm) köpüklü levhaların ağırlığındaki ortalama %95 artış oranına karşılık, kritik burkulma yüklerinde ortalama %160 artış elde ederken, en kalın hücre duvarı kalınlığına sahip olan numunelerde (0.15 mm) ortalama %45 ağırlık oranı artışına karşılık kritik burkulma yükü artışını ortalama %32 olarak elde etmişlerdir.

Şakar ve diğ. [16], çalışmalarında petek yapılı sandviç kompozit yapıların serbest titreşim analizini yapmışlardır. Sandviç kompozit yapıların serbest-serbest sınır

şartlarındaki doğal frekansları deneysel ve sayısal olarak belirlemiş ayrıca bu frekanslara karşılık gelen titreşim biçimlerini elde etmişlerdir. Sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey kompozit tabaka özelliklerinin (tabaka sayısı, yönlenme açısı gibi), ayrıca çekirdek malzemesinin yüksekliğinin titreşim karakteristiklerine olan etkileri incelemişlerdir. Sayısal analizler ANSYS paket programı ile yapmışlardır. Sonuçta sandviç yapının titreşim karakteristiğinde etkili olan en önemli parametreleri belirlemişlerdir.

Feli ve Pour [17], yüksek hızdaki bir darbeye maruz kalan alüminyum petek yapıli kompozit sandviç panellerin delinme direncini araştırmak için analitik bir model geliştirmişlerdir. Sandviç paneli iki ince kompozit yüzey arasına alüminyum petek yapı yerleştirerek oluşturmuşlardır. Çözüm sürecini ön yüzeyin, çekirdeğin ve arka yüzeyin delinmesi dâhil üç aşamalı delinme süreci şeklinde incelemişlerdir. Buna ek olarak, hareket enerji dengesi ve denklemine bağıli olarak sandviç panel tarafından absorbe edilen enerjiyi, mermi hızını, merminin sandviç paneli delme süresini ve deldikten sonraki hızını elde etmişlerdir. Ayrıca, delinme direnci ve sandviç panellerin balistik performansı üzerinde, sandviç paneli oluşturmak için kullanılan kompozit yüzeylerin ve alüminyum petek yapıli çekirdeğin etkisini araştırmışlardır.

Tan ve Akil [18], metal kapaklı ve polipropilen petek hücre yapıli çekirdek ile ürettikleri sandviç yapının darbe dayanımını, bir dizi iletken yardımıyla ölçmüşlerdir.

Du ve diğ. [19], kapak malzemesi olarak biyo-elyaf esaslı, kâğıt takviyeli termoset polimer kompozit malzeme ve reçine emdirilmiş aramid kâğıt petek yapıli çekirdekten oluşan hafif sandviç paneller üretmişlerdir. Farklı hücre boyutu ve yüksekliklerine sahip sandviç panellerdeki bu parametrelerin eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Yang ve diğ. [20], çalışmalarında hibrit karbon fiber kompozit malzemedan üretilmiş piramit kafes çekirdekli sandviç panellerin titreşim sönümleme özelliklerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca sıcak kalıp presleme yöntemi ile ürettikleri viskoelastik katmana sahip olan ve olamayan sandviç panellerin titreşim sönümleme özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında hem deneysel hem de sayısal

sonuç olarak viskoelastik katmana sahip olan sandviç panellerin titreşim sönümleme özelliğinde bir artış gözlemlenmiştir.

Jen ve diğ. [21], yapışkanla bağlı alüminyum petek sandviç levhaların iki aşamalı kümülatif eğilme yorulma davranışlarını incelemiştir.

Du ve diğ. [22], kapak ve petek çekirdek malzemesi olarak doğal elyaf takviyeli termoset polimer kompozitten üretilen sandviç yapıların sürünme davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmayı ortam koşullarında %65 bağıl nem ve 30 günlük süre içinde yaparak, sonuçları literatürde bu konu hakkında yapılan çalışmalarla karşılaştırmıştır.

Xiong ve diğ. [23], karbon fiber kompozit çekirdekli, yumurta kolisine ve piramit şekline benzer iki farklı çekirdek yapısına sahip sandviç yapı üretmiştir. Daha sonra iki farklı çekirdek yapısına sahip bu numunelere, yüzey levhalarındaki büzülme ve kırılma, çekirdek kısmındaki kırılma ve bağlar arası kopma dikkate alınarak üç nokta eğme deneyini uygulamıştır ve maksimum yer değiştirmeyi deneysel ve analitik olarak bulmuştur.

Stocchi ve diğ. [24], sıkıştırma-kalıplama tekniği kullanarak jüt kumaş ile takviyeli bir vinil ester matriksten oluşan petek yapılı çekirdek üretmiştir. En iyi sonuçları yanal sıkıştırma ile kalıplama tekniğinde elde etmiştir. Deneysel testler ile basınç altındaki çekirdeğin tepkisini, homojenizasyon analizi ve sonlu elemanlar modelleme ile ise çekirdeğin etkin elastik özelliklerini tespit etmiştir. Basınç altındaki çekirdekte lif çekme ve kopma hataları oluştuğunu gözlemiştir. Statik yük altındaki standart çekirdeklere bir alternatif olarak jüt kumaş ile takviyeli çekirdeklerin kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Shi ve diğ. [25], petek rijitliğini artırmak ve ara yüzey uyumsuzluğunu azaltmak için çekirdek yapı içerisine alüminyum ızgaralar yerleştirmiştir. Sadece alüminyum petek yapıdan oluşan, sadece alüminyum ızgaradan oluşan ve boşlukları alüminyum peteklerle doldurulmuş alüminyum ızgaradan oluşan çekirdek tiplerine sahip üç farklı sandviç levha üretmiştir. Daha sonra bu üç farklı çekirdek tipine sahip sandviç

levhalara üç nokta eğilme deneyi uygulayarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları karşılaştırmada alüminyum petek yapıyla doldurulmuş ızgaralı çekirdeğe sahip levhanın diğer iki levhaya göre biraz daha ağır olduğunu fakat özel dayanımının ve enerji absorbe etme yeteneğinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Abbadi ve diğ. [26], yapay kusurlu petek yapılı sandviçler ile kusursuz petek yapılı sandviçlerin yorulma davranışlarını inceleyerek bir karşılaştırma yapmışlardır. Kusurun varlığının, malzemenin statik davranışı üzerinde bir etkisi olmadığı ancak delik tipi arızaya karşı sandviç panel ömrünün çok hassas olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Gilioli ve diğ. [27], darbe testinden hasar görmüş ve hasarsız petek yapılı *Nomex* çekirdek ve alüminyum yüzeylerden oluşan sandviç panellere, tek eksenli sıkıştırma testleri uygulamışlar ve sonuçları karşılaştırarak nicel bir etki sonrasında sandviç panellerin mekanik performansının azaldığını göstermişlerdir.

Lu ve diğ. [28], sıkıştırma-kalıplama tekniği ile karbon elyaf ve epoksi reçine kullanarak hazırladıkları petek sandviç yapısına üç nokta eğme deneyi uygulayarak gerilme dağılımını incelemişlerdir. Eğilme yükü 7200 N' a kadar arttığında kapaklar ve çekirdek arasındaki ara yüzeyde çatlaklar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sandviç yapının mekanik ve üç nokta eğme performansını sonlu elemanlar metodu ile inceleyerek sonuçların deneysel sonuçlarla tutarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri karbon fiber petek sandviç yapıyı geleneksel alüminyum ve *Nomex* petek sandviç yapılarla karşılaştırmışlardır. Karbon fiber petek sandviç yapının daha yüksek eğme dayanımının olduğunu ve böylece uzay ve havacılık sanayisinde kullanılabilir bir yapı olabileceği sonucuna varmışlardır.

Shi ve diğ. [29], karbon fiber yüzey ve alüminyum petek yapıdan oluşan sandviç levhaların yapısal performansı için gerekli olan ara yüzey bağı, eğme ve tek eksenli sıkıştırma deneyleri ile incelemişlerdir. Karbon fiber kapak levhaları ve alüminyum petek yapılı çekirdek arasındaki ara yüzeyde kısa kevlar fiber ile ara yüzey sertleştirmesinin uygulanabilirliği ve etkinliğini incelemişlerdir. Bu ara yüzeyde reçine ve kısa kevlar elyaftan oluşan bir yapışkan bağı etkili bir bileşik haline geldiği

gözlemlemişlerdir. Ayrıca sandviç kompozitlerin maksimum yük ve enerji absorpsiyonunu, kısa kevlar fiber ara yüzey sertleştirilmesi yapılan ve yapılmayan sandviç levhalar için sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır.

Nagasankar ve diğ. [30], sandviç bir yapıda alt ve üst tabakaların farklı elyaf dizilimlerinin, yapının enine kesme sönümlemesini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Yapının doğal frekansını ve bir çekiç darbesine karşı tabakalardaki elyaf diziliminin etkisini araştırmak için beş farklı dizilimde (tümü 0° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve tümü 90°) tabaka üretmişlerdir. Ayrıca doğal frekans ve darbe etkisini teorik olarak hesaplayıp deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Bunun yanı sıra polipropilen petekli sandviç yapılarda çekirdek ve alt-üst tabaka kalınlıklarının yanal ezilme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Boorle ve Mallick [31], yapı malzemesi olarak karbon fiber takviyeli epoksi laminatla ürettiği kıvrımlı çekirdek yapısına sahip sandviç yapının eğmeye karşı geometrik parametrelerin (tabaka kalınlığı, çekirdek kalınlığı, kıvrımlı yapıda olan çekirdeğin eğim açısı ve alt-üst tabakalar arası mesafe) etkisini araştırmışlardır.

Li ve diğ. [32], hafif ahşap esaslı yapısal panellere, dört nokta eğme testi uygulayarak panellerin eğilme, normal ve kayma gerilme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmalarını deneysel ve sayısal olarak yaparak tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Ndiaye ve diğ. [33], petek yapılı sandviç kompozit panellerin kusur boyutlandırması ve yapışma karakterizasyonu hakkında bir çalışma yapmışlardır.

Akkuş ve diğ. [34], altıgen yapılı bal peteği kompozit yapıların çoklu regresyon tahmin modelini oluşturmuşlardır. Bu amaçla saf epoksi ve %1 çok duvarlı karbon nano tüp (MWCNT) takviyeli yapıştırıcı ile farklı hücre genişliği ve farklı yükseklikteki numuneleri yapıştırarak ürettikleri alüminyum bal peteklerinin üç nokta eğme deneylerini *ASTM E1556-08* standardına göre gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda eğilmeye sebep olan maksimum kuvvet değerlerini ölçmüşlerdir ve hücre genişliğini sabit tutup hücre yüksekliğini arttırdıklarında eğilme kuvvetinde artma

olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı hücre yüksekliği için ise hücre genişliği arttırdıkça eğilme kuvvetinde azalma olduğunu belirlemişlerdir. %1 MWCNT ile takviye edilen yapıştırıcının eğilme kuvvetlerinde azalmaya sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Xu ve diğ. [35], çalışmalarında otomatik kesme ve kalıp pres işlemlerine dayalı olarak ürettikleri kademeli kıvrımlı kafes çekirdek yapısına sahip sandviç kirişlerin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca geometrik parametrelerin kafes çekirdekli sandviç kirişlerin eğilme davranışları üzerine etkisini araştırmak için üniform ve kademeli, kıvrımlı kafes çekirdekli sandviç panelleri üreterek test etmişlerdir.

Ivanez ve diğ. [36], kompozit sandviç plakaların eğik darbe tepkisini incelemişlerdir. Darbe sonrası hasarlı bölgenin maksimum temas kuvveti, maksimum temas süresi, absorbe edilen enerji ve maksimum yer değiştirmesini çeşitli darbe açıları ve enerjileri için incelemişlerdir. Artan darbe açısı ve darbe enerjisi ile temas süresi hemen hemen sabit kalırken, maksimum yük ve enerji absorpsiyonunun arttığını gözlemlemişlerdir. 15° den daha düşük darbe açıları için sonuçlarda çok büyük farklılıklar olmadığı sonucuna varmışlardır. Buna ek olarak 50° den büyük darbe açıları için deneysel sonuçları incelemek zor olduğundan, sayısal olarak incelemek üzere bir model hazırlamışlardır.

Norouzi ve Rostamiyan [37], çalışmalarında düşük ağırlıkta ve yeni bir çekirdek tipi olarak örgü çekirdekli elyaf/epoksi sandviç panel üretmişlerdir. Hatasız bir laminat elde edebilmek için üretimi vakum destekli reçine kalıplama yöntemi ile yapmışlardır. Ürettikleri panellere basma testleri uygulamışlardır ve sonuçta oldukça hafif olan bu panellerin optimum bir mukavemete sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Sun ve diğ. [38], ızgara takviyeli petek ara tabakalı kompozit sandviç yapıların mekanik özelliklerini araştırmak için basma testleri yapmışlardır. Bu tipteki bir sandviç yapının özgül rijitliği ve enerji absorbe etme yeteneğinde bir artış gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak ızgaralı çekirdeğe sahip sandviç yapıların kritik burkulma yükünü hesaplamak için sonlu elemanlar metodu ile bir model tasarlamışlardır.

Hussein ve diğ. [39], karbon fiber malzemeden ürettikleri kare şeklindeki tüplerin eksenel kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel araştırmalarında tüp içinde kalan alanı alüminyum petek ile doldurarak, bunun eksenel kırılma üzerine etkisini araştırmışlardır. Eksenel basınç yüklerini 0.05 mm/s, 0.5 mm/s, 5 mm/s ve 50 mm/s sabit hızlarda içi boş ve petek dolu olan her iki numuneye de uygulamışlardır ve sonuç olarak petek dolu tüpler tarafından absorbe edilen kırılma kuvveti ve enerjinin boş olan tüplere oranla daha büyük olduğunu ve bu parametrelerin ezici hızının artışına bağlı olarak azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak, alüminyum petek doldurulmuş tüpün spesifik enerji absorpsiyonunun, içi boş olan tüpe göre daha az olduğu sonucuna varmışlardır.

Xiong ve diğ. [40], karbon fiber kompozit malzemeden, yumurta kolisine ve piramit şekline benzer olmak üzere iki farklı şekilde çekirdek yapısına sahip olan sandviç yapılar üretmişlerdir. Çekirdek yapıların üretimini birbirine bağlantılı bir kenetlenme yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yeni üç boyutlu çekirdek yapısına sahip bu kompozit sandviç panellerin basma özelliklerini, hasar modlarını ve enerji absorbe etme yeteneklerini incelemişlerdir. Her iki çekirdek tipinin mukavemet özellikleri hakkında bir fikir edinmek için analitik modeller hazırlamışlardır. Sonuç olarak imal ettikleri sandviç panellerin aynı yoğunluktaki kare petek yapısına göre daha yüksek spesifik enerji absorbe etme yeteneğine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Zhou ve diğ. [41], cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksi malzemelerden, bir dizi birleştirilmiş çelik silindirler yardımıyla ürettikleri oluklu yapıdaki çekirdeği sıcak preste sertleştirilmiş tabakalar arasına yerleştirerek güçlü bir ara yüzey bağı ile sandviç bir yapı elde etmişlerdir. Malzeme türü (cam elyaf, karbon elyaf), oluklu yapıdaki çekirdeğin tabaka kalınlığı ve birim hücre sayısı gibi parametrelerin mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sandviç yapıların mekanik özelliklerini belirlemek üzere deneysel ve sayısal çalışmalar yaparak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yapılan literatür araştırması genel olarak ele alındığında çalışmalar daha çok sandviç panellerin basma [2, 4, 12, 15, 24, 37, 38, 39], eğme davranışları [2, 3, 8, 9, 13, 19, 25, 28, 31] ve darbe dayanımları [4, 11, 17, 18, 27, 36] gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır. Aynı şekilde çalışmalarda sandviç panel çekirdek malzemesi olarak alüminyum [2, 3, 4, 15, 17, 21, 29] veya *Nomex* [4, 6, 19, 27] ve hücre yapısı olarak balpeteği [2-6, 8, 10, 11, 13-19, 21, 22, 24-30, 33, 34] tercih edilmiştir. Ancak çekirdek malzemesi olarak karbon fiber kompozit [12, 20, 23, 28, 31, 40, 41] ve hücre yapısı olarak farklı hücre tiplerinin [9, 12, 20, 23, 31, 35, 37, 38, 40, 41] kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Bunun yanı sıra sandviç paneller ile ilgili olarak;

- Ara yüzey bağı [14, 25, 29],
- Burkulma [15, 38],
- Yorulma davranışları [13, 14, 21, 26],
- Yüksek hızdaki bir darbeye karşı delinme dirençleri [17],
- Sürünme davranışları [22],
- Eğilmeye maruz bir sandviç yapıda yüzey levhalarda büzülme ve çekirdek kısımda bağlar arası kopma davranışı [23],
- Hasarlı sandviç panellerin mekanik davranışları [36],
- Sandviç panellerin enerji ve titreşim sönümleme özelliği [4, 11, 20],

gibi çeşitli konularda çalışmalar yapılmıştır.

Sonuç olarak çalışmalarda genellikle malzeme türü, hücre yapısı ve hücre yüksekliği gibi parametreler değiştirilerek minimum hafiflik ve maksimum mukavemete sahip sandviç panellerin üretimi amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışmada ise, karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılarak; kare, dikdörtgen, üçgen ve delikli tip çekirdek yapıya sahip sandviç levhalar üretilmiştir. Bu tip hücreler farklı yoğunluk ve yüksekliktedir. Ayrıca köpüklü ve köpüksüz numuneler de mevcuttur. İç içe geçme tekniği ile üretilen bu numunelere basma ve eğme testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda levhaların eğme ve ezilme karakteristikleri incelenmiş, sonuçlar sayısal analiz ile desteklenmiştir.

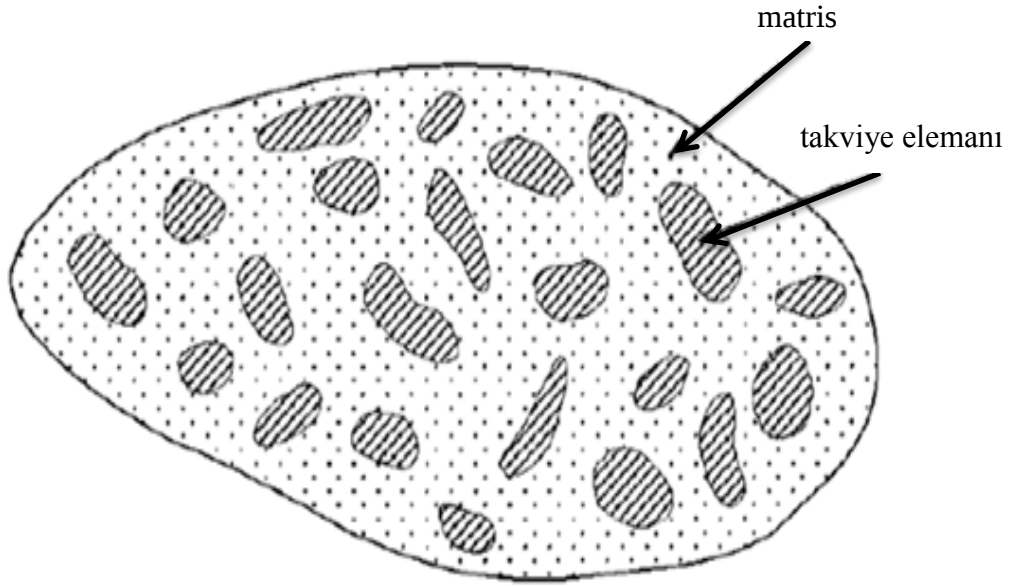
Çekirdek malzemesi olarak karbon fiber kullanımı [12, 20, 23, 28, 31, 39, 40, 41] nolu literatürlerde mevcuttur. Ancak belirtilen çalışmalarda üretilen numunelerin hücre yapıları ve üretim teknikleri, bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelerden farklıdır. Tez çalışmasında kullanılan üretim tekniği ise [12, 37, 40] literatürde mevcut olup, bu çalışmalarda ise sadece tek tip hücre için konular incelenmiştir. Dolayısıyla da literatürden farklı olarak bu çalışmada farklı tip hücre yapısı, yüksekliği ve yoğunluğu deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Uygulama ve üretim kolaylığı için seçilen bu teknikle elde edilen rijit sandviçler, yüksek dayanım gerektiren ileri teknolojik sistemler için önemli bir alternatif oluşturabilir.



3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, kendisini oluşturan malzemelerden daha iyi mukavemet özelliklerine sahip malzemeler elde etmek amacıyla, en az iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerinin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle imal edilirler. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kompozit malzemeler genel olarak matris (bağlayıcı) ve takviye elemanı (fiber, parçacık veya pul) şeklinde iki temel yapı elemanından oluşur. Bir kompozit malzemede matrislerin görevi; fiberleri bir arada tutmak, fiberler arasında gerilim aktarımını sağlamak ve fiberleri fiziksel ve kimyasal olarak dış etkenlere karşı korumaktır. Fiberlerin görevi ise kompozit malzeme üzerine gelen kuvvetleri taşımaktır.



Şekil 3.1 Kompozit malzeme [42].

Kompozit malzemeler güncel ve teknolojik olmalarına rağmen kompozitlerin kullanıldığı çok sayıda tarihi örnekler bulunmaktadır. Kilden yapılmış ve saman ile takviye edilmiş kerpiç evler kompozit uygulamalarının ilk örneklerindendir.

3.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler birçok üstün özelliği bir arada barındırdığından dolayı çeşitli sektörlerde tercih sebebi olmuştur. Özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve çarpma sonucu ortaya çıkan enerjiyi absorbe edebilme özellikleriyle uzay ve havacılık sanayisi başta olmak üzere, otomotiv mühendisliği, rüzgâr enerjisi üretimi, otomasyon ve robot teknolojisi, makine mühendisliği, medikal teknoloji ve spor sanayi gibi birçok dalda geniş bir kullanıma sahiptir. Kullanıldıkları sektörler başlıca şu şekilde sıralanabilir:

3.1.1. Uzay ve Havacılık Sanayi

Kompozit malzemelerin hafif ve mukavemetli olma özellikleri bu malzemelerin uzay ve havacılık sektöründe tercih edilmelerinin en önemli sebeplerindendir. Bu özellikleri sayesinde ciddi miktarda yakıt tasarrufu sağlayarak maddi kazanç sağlarlar.

Havacılıkta son yıllarda yapılan temel bir atılım metal malzeme yerine kompozit malzeme kullanımı konusudur (Şekil 3.2). Uçak yapılarında kullanılan ileri kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlerdir. Genellikle epoksi matris içinde sürekli elyaflar kullanılmaktadır. Uçak yapılarında alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler, düşük ağırlığa oranla yüksek mukavemet özelliğine sahiptirler. Uçak yapısı için malzeme seçiminde önemli bir kriter olan mekanik özelliğin yoğunluğa oranı ile ifade edilen, özgül mekanik özellik değerleri karşılaştırıldığında bor/epoksi ve karbon/epoksi kompozitlerin konvansiyonel malzemelerden önemli farklarla üstün oldukları görülmektedir [43].

Kompozit malzemelerin kullanımı, dayanıklılık, korozyon direnci, yorulma ve hasar toleransı direnci gibi karakteristik özelliklere sahip olduğundan dolayı bazı uçak bileşenleri için geleneksel metallere alternatif malzeme olmuş durumdadır. Ayrıca kompozitler, tasarım gereksinimlerini karşılamada büyük esneklikler sağlar ve ağırlık açısından da büyük avantajları vardır. Dikkatli bir şekilde tasarlanmış kompozit parçalar, aynı ölçülerdeki geleneksel metal parçalardan yaklaşık %20-30 civarında daha hafiftir. Uçak sanayisinde kullanılan kompozit malzemeler genellikle reçine

matris ile fiber veya liflerden oluşur. En yaygın fiberler karbon, aramid, cam ve bunların karışımıdır [44].

3.1.2. Denizcilik Sanayi

Fiber takviyeli kompozit malzemeler ilk olarak 2. Dünya Savaşı'ndan kısa bir süre sonra tekne yapımında kullanılmıştır. O dönemlerde tekne üretiminde geleneksel olarak kullanılan ahşap, giderek zor bulunan ve pahalı olan, deniz suyu ve organizmalar tarafından kolayca hasara uğrayan ve bu hasarların bakım ve onarımları pahalı olan bir malzeme haline gelince tekne üreticileri kereste yerine fiber takviyeli kompozit malzemeler kullanmaya başladılar. Çoğu deniz aracının üretiminde cam fiber takviyeli polyester kompozitler kullanılmaktadır fakat sandviç kompozitler ve karbon içeren ileri kompozit malzemeler vinil ester veya epoksi reçine matrisleri ile aramid liflerdir ve bu kompozitler yaygın olarak yüksek performanslı yapısal uygulamalar için kullanılırlar (Şekil 3.2)[45].



Şekil 3.2 Üretim aşamasındaki kompozit bir tekne [46].

3.1.3. Otomotiv Sanayi

Bir otomobilde ağırlığın azaltılması, otomobil tarafından tüketilen yakıtın azalmasını sağlar. Bu yüzden otomobil üreticileri otomobillerin ağırlıklarını

azaltmaya yönelik metal olarak üretilen bazı otomobil parçalarını hafif ve mukavemetli olan kompozit malzeme ile üretmeye başlamışlardır. Kompozit malzemelerin diğer kullanım alanları:

- Tıbbi cihazlar,
- Robot yapımı,
- Askeri ve savunma sanayi,
- İş makineleri,
- Spor malzemeleri,
- Müzik aletleri,
- Elektrik - elektronik'tir.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

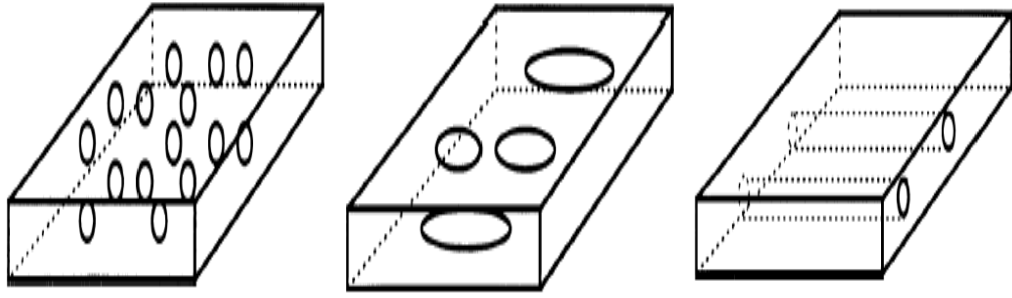
Kompozit malzemeler matris malzemesi ve takviye elemanı olmak üzere iki temel yapı elemanından oluştuğu için bu malzemelerin sınıflandırılması da matris malzemesinin türüne ve takviye elemanının şekline göre iki farklı şekilde yapılmaktadır.

Matris malzemesine göre kompozitler;

- Metal matrisli,
- Seramik matrisli,
- Polimer matrisli kompozitler olarak üç farklı şekilde sınıflandırılabilir.

Benzer şekilde takviye elemanı şekline göre kompozitler (Şekil 3.3);

- Parçacık takviyeli,
- Pul takviyeli,
- Fiber takviyeli kompozitler olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılabilir.



a) Parçacık takviyeli

b) Pul takviyeli

c) Fiber takviyeli

Şekil 3.3 Takviye elemanının şekline göre kompozit tipleri [1].

Parçacık takviyeli kompozitler, alaşımlar ve seramikler gibi matrise daldırılmış parçacıklardan oluşur. Parçacıklar rastgele eklendiğinden genellikle izotropiktirler. Parçacık takviyeli kompozitler, gelişmiş mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı ve oksidasyon direnci gibi avantajlara sahiptir. Kauçuk içinde alüminyum veya alüminyum silikon karbür parçacıklarının kullanımı ve beton yapımında kullanılan çakıl, kum ve çimento tipik örneklerdendir [1].

Pul takviyeli kompozitler düz matris takviyeleri içerir. Tipik pul malzemeleri cam, mika, alüminyum ve gümüşdür. Pul takviyeli kompozitler, yüksek eğilme modülü, daha yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlar. Ancak, pullar kolaylıkla yönlendirilemez ve yalnızca sınırlı sayıda malzeme kullanılabilir [1].

Fiber takviyeli kompozitler, kısa (süreksiz) veya uzun (sürekli) fiber takviyeli matrislerden oluşur. Karbon ve aramid, fiberlere örnek olarak verilebilir ve genellikle anizotropiktirler. Matris örnekleri; epoksi gibi reçineler, alüminyum gibi metaller ve kalsiyum-alümino silikat gibi seramiklerdir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitin temel tipleri, tek yönlü veya dokuma olanlarıdır. Sürekli elyaf kumaşlar, çok yönlü bir tabakalı kompoziti oluşturmak için çeşitli açılardan birbirinin üzerine yığılır [1].

3.3.Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler metallerle karşılaştırıldığında bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu avantaj ve dezavantajlar maddeler halinde sıralanabilir.

Avantajları :

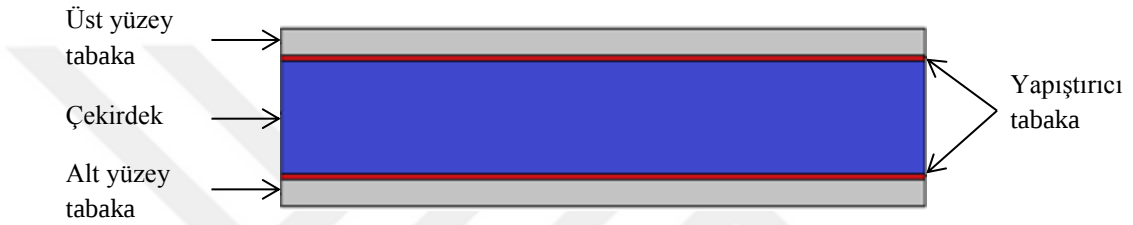
- Hafifliğe oranla yüksek mukavemete sahiptirler.
- Korozyon dirençleri yüksektir.
- Gelişmiş yorulma ömrüne sahiptirler.
- Yüksek sıcaklıklar ve farklı hava koşullarına karşı dayanıklıdırlar.
- Kimyasallara karşı dirençlidirler.
- Düşük duman yoğunluğu ve düşük yanıcılıkları vardır.
- Bileşen seçimine bağlı olarak malzeme çeşitliliği artırılabilir [47].

Dezavantajları :

- Kompozit malzeme yapısı bir metal yapıdan daha karmaşık mekanik karakterizasyona sahiptir.
- Kompozitlerin tamir işlemi metallerinkine kıyasla karmaşıktır.
- Kompozit malzemelerin, metallere kıyasla yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu kombinasyonu kalitesi yoktur.
- Kompozitlerin üretim maliyetleri yüksektir [47].
- Malzemenin kalitesi üretim metodunun kalitesine bağlıdır.
- Bazı kompozitler gevrek olduklarından kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler oluşturabilir. Kompozitlerin tamirata ise günümüzde mekanik bilim dalının önemli çalışma konularından biridir.

4. SANDVIÇ KOMPOZİTLER

Sandviç kompozitler düşük yoğunluklu çekirdek malzemesinin, nispeten iki ince yüzey tabakası arasına yerleştirilerek bir yapıştırıcı malzeme yardımıyla birleştirilmesi sonucunda elde edilen üç tabakalı bir yapıdır (Şekil 4.1). Böylelikle elde edilen yapı, düşük ağırlıklarla yüksek mukavemet elde edilmesini sağlar. Bu özellikleri ile sandviç yapılar uzay ve havacılık sanayisi başta olmak üzere birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur.



Şekil 4.1 Sandviç yapıyı oluşturan elemanlar.

Sandviç yapıyı oluşturan her bir elemanın, bu yapı içerisinde çeşitli fonksiyonları vardır. Bu fonksiyonlar şu şekilde tanımlanabilir;

- *Yüzeyler*, bir sandviç yapıda çekme ve basma gerilmelerini ve bölgesel yükleri taşırlar. Lokal eğilme dayanımı çok küçük olduğu için çoğunlukla ihmal edilebilir. Yüzey malzemesi olarak genellikle çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemeler kullanılır. Çoğu durumda fiber veya cam takviyeli plastikler de yüzey malzemesi için uygundur. Bu malzemelerin uygulaması kolaydır. Takviyeli plastikler, anizotropik mekanik özellikler, tasarım özgürlüğü ve mükemmel yüzey kalitesi gibi talepleri karşılayacak şekilde uyarlanabilir [48].
- *Çekirdek*, yüzeyleri destekleyerek içe veya dışa doğru eğilmesini önlemek ve iki yüzey arası mesafeyi korumakla görevlidir. Bunları gerçekleştirmek için çekirdeğin bazı önemli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Yüzeyler arasındaki mesafeyi sabit tutacak kadar sert ve yüzeylerin birbirine göre kaymasını engelleyecek kadar rijit olmalıdır. Kayma rijitliği yüzeyleri birlikte

hareket etmeye zorlar. Eğer çekirdeğin kayma rijitliği zayıfsa yüzler birlikte hareket etmez ve sandviç sertliğini kaybeder. Düşük yoğunluklu çekirdeğin sahip olması gereken tek özellik, bunlarla sınırlı olmayıp aynı zamanda burkulma, izolasyon, nem absorpsiyonu ve yaşlanma direnci de çekirdekten beklenen özellikler arasındadır. Çekirdek; ahşap, alüminyum ve çeşitli köpükler gibi birçok farklı malzemeden yapılabilir [48].

- *Yapıştırıcı*, yüzeylerin ve çekirdeğin birlikte hareket etmesini sağlamak için kesme kuvvetlerini yüzeyler ve çekirdek arasında aktarabilmelidir. Burada yapıştırıcı tabakadan beklenen özellik, çekirdek ile aynı büyüklükteki kesme gerilmelerini taşıyabilecek özellikte olmasıdır. Yapıştırıcı, kesme kuvvetlerinin yanı sıra çekme gerilmelerini de taşımakla görevlidir [48].

4.1.Sandviç Kompozitlerin Tarihi

Sandviç kompozitlerin çekirdek yapısı çeşitli formlara sahip olmakla birlikte en yaygın kullanılan çekirdek altıgen şeklindeki, *balpeteği* adı verilen yapılardır.

Balpeteği, arıların balpeteği yapısına yakından benzemektedir ve adını buradan almıştır. Balpeteği herhangi ince ve düz bir malzemeden üretilebilir ve geçmişte 500 farklı çeşit balpeteği üretilmiştir. Kâğıt balpeteği ilk olarak yaklaşık 2000 yıl önce Çinliler tarafından günümüzdeki gibi yapısal olarak değil süs olarak kullanılmıştır [49].

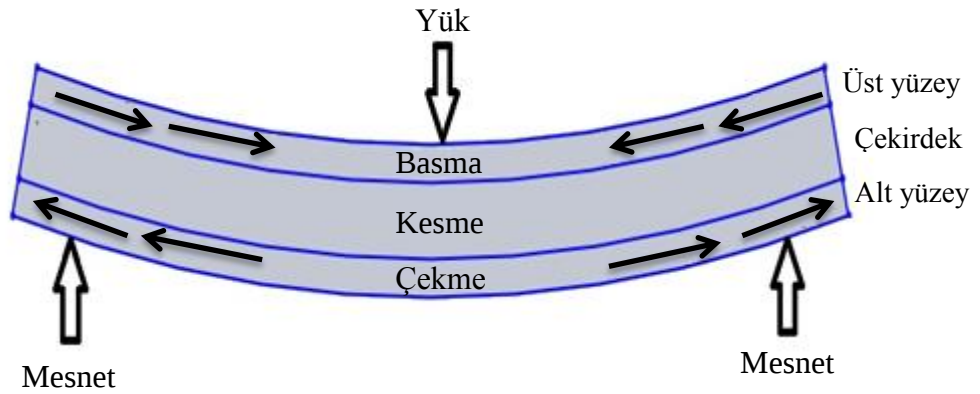
Kraft kâğıt petek imalatı için bir üretim metodunu kapsayan ilk balpeteği çekirdek patenti, 1905 yılında Almanya'da yayınlanan *Budwig Patenti*'dir. Kayıtlara göre ilk sandviç yapılardan biri 1845'te Wales'te inşa edilen boru şeklindeki demiryolu köprüsüdür [49].

İlk uçak sandviç paneli 1919'da maun yüzeyler ve balsa ahşap çekirdek kullanılarak üretilmiştir ve temel yapı elemanı olarak deniz uçaklarının dubalarında kullanılmıştır. Daha sonra 1. Dünya Savaşı ve 2. Dünya Savaşı arasında kontrplak yüzeyler ve balsa çekirdek malzemesi kullanılarak üretilen sandviç yapılar İtalyan deniz uçaklarında kullanılmıştır [49].

4.2.Sandviç Kompozitlerin Özellikleri

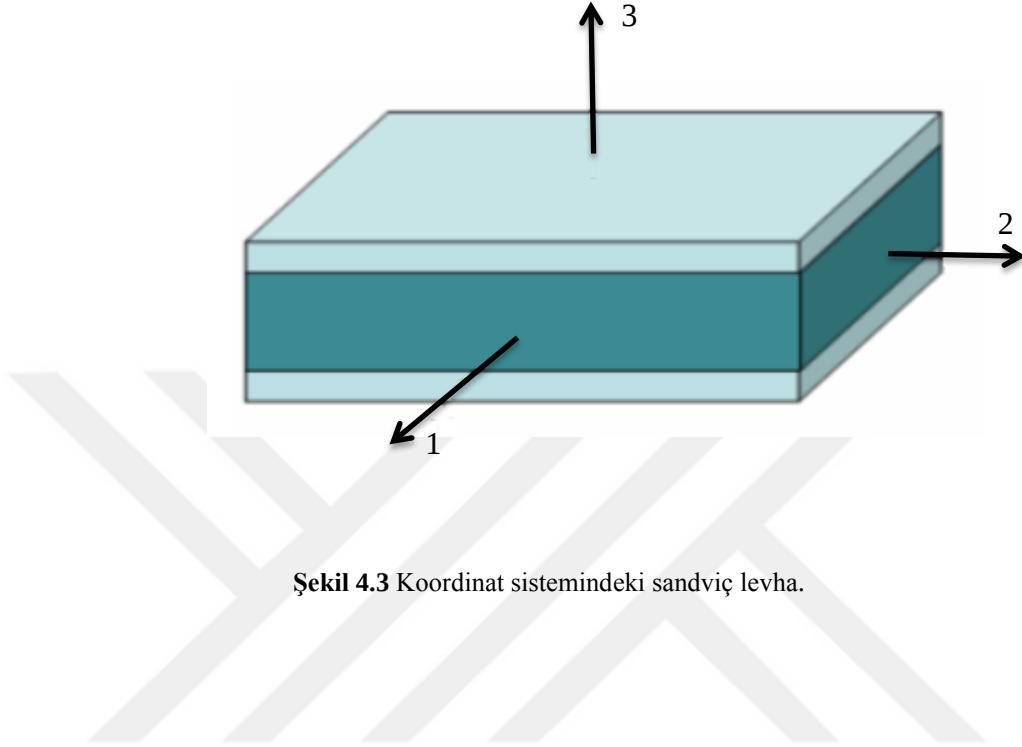
Herhangi bir kompozit malzemenin ana avantajı, özelliklerinin uygulamaya göre ayarlanabilme imkânının olmasıdır. Aynı avantaj, sandviç kompozitleri için de geçerlidir. Çekirdek ve yüzeylerin doğru seçimi, sandviç kompozitleri çok sayıda uygulamaya ve çevre koşullarına uygun hale getirir. Sandviç kompozitlerin bazı genel özellikleri aşağıda tanımlanmıştır:

- *Düşük yoğunluk:* Hafif veya genişletilmiş yüksek yoğunluklu malzeme seçimi, sandviç yapıların toplam yoğunluğunu azaltır. Bir sandviç kompozitte çekirdeğin hacmi, yüzeylerin hacminden önemli derecede büyüktür, bu yüzden çekirdeğin yoğunluğundaki herhangi bir değişiklik, tüm sandviç kompozitin yoğunluğu üzerinde önemli etkilere sahiptir [50].
- *Eğme dayanımı:* Eğme durumundaki bir sandviç yapının her bir elemanında çeşitli gerilmeler meydana gelmektedir (Şekil 4.2). Alt yüzeyde çekme gerilmesi meydana gelirken üst yüzeyde basma gerilmesi, çekirdek kısmında ve yapıştırıcı tabakada ise kesme gerilmesi meydana gelir.



Şekil 4.2 Eğme durumundaki sandviç yapıda meydana gelen gerilmeler.

- *Çekme ve basma dayanımı:* Şekil 4.3'te görüldüğü gibi 3 eksenli çekirdek özellikleri ve 1 ve 2 eksenleri ise yüzey özellikleri ile kontrol edilir [50].



Şekil 4.3 Koordinat sistemindeki sandviç levha.

- *Hasar toleransı:* Çekirdek malzemesi olarak esnek köpük veya ezilebilir malzeme kullanmak sandviç yapıyı hasara karşı oldukça dayanıklı yapar. Özellikle bu sebepten dolayı köpüklü veya oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler paketlenme sektöründe kullanılan popüler malzemelerdendir [50].

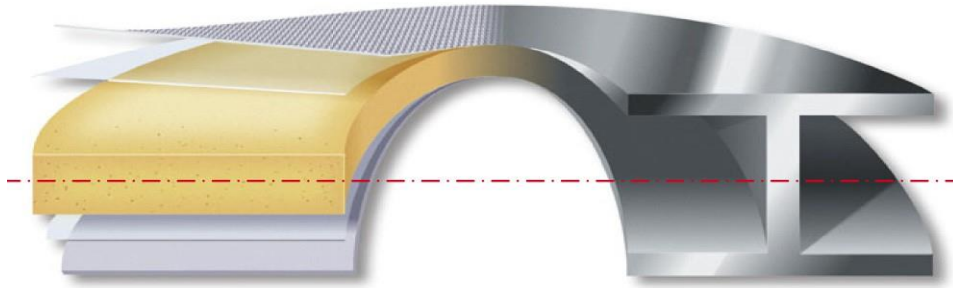
4.3.Sandviç Yapılar Neden Tercih Edilir?

Sandviç yapıları kompozitler, düşük ağırlık, yüksek rijitlik ve yüksek mukavemet gibi tipik özellikleri olan kompozit malzemelerin özel bir sınıfıdır. Sandviç, hafif ve nispeten kalın bir çekirdeğin iki ince, güçlü ve sert yüzey laminat ile birleştirilmesiyle imal edilir. İki malzemenin hafif bir malzeme ile ayrılmasıyla, yapının rijitliğini ve mukavemetini, çok düşük ağırlık ve maliyetle artıracak uzun süredir bilinmektedir. Bu ayırım, çevresel faydalar, aşırı maliyet tasarrufu ve tasarım özgürlüğü gibi pek çok başka avantajın yanı sıra sandviğin yapısal tasarımının giderek daha popüler hale gelmesine neden olmaktadır [48].

4.3.1. Hafiflik

Sandviç kullanmaya en çok iten nedenlerden biri hafif yapılı bir konsept elde etmeye olanak tanınmasıdır. Bu özelliği sayesinde daha hızlı ve etkili çözümler sağlar. Sürat teknesi gibi yapıların malzemelerinde hafiflik, güç ve hız açısından önemlidir. Ayrıca endüstride hafiflik, robot yapımında daha hızlı ve küçük robotlar yapmaya, inşaat sektöründe bir köprü veya cephe yapımında etkili ve kolay kuruluma, taşımacılıkta daha hafif gemi ve konteynerlerle daha fazla yük taşımaya imkân sağlayacak çeşitli avantajlara sahiptir [48].

Sandviç bir yapı eğilmeye maruz kaldığı zaman sonsuz bir I kirişine benzemektedir. Şöyle ki eğilme durumundaki bir I kirişinde başlıklarda basma ve çekme gerilmesi (sandviç yüzeylerinde olduğu gibi), ara bağlantı elemanında ise kesme gerilmesi (sandviç levha çekirdeğinde olduğu gibi) meydana gelir [48].

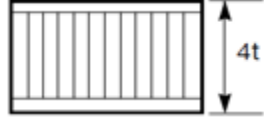


Şekil 4.4 Sandviç kompozit bir kiriş ve çelikten yapılmış bir I kirişi arasındaki benzerlik [48].

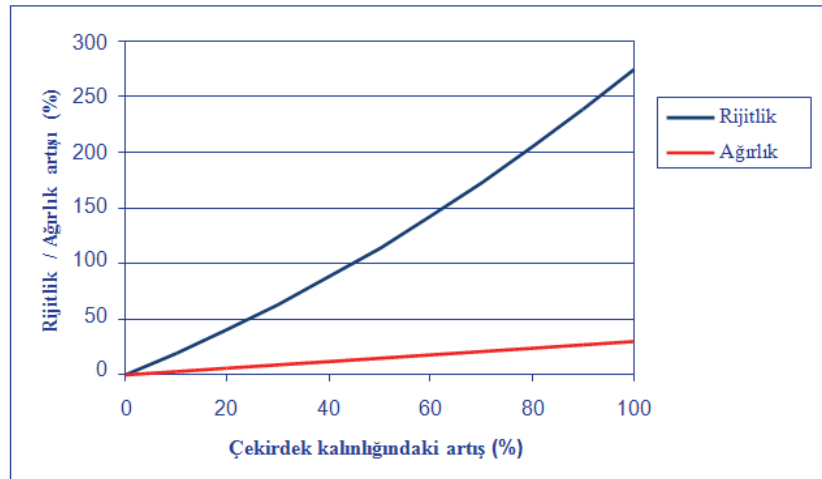
Geleneksel I kirişlerinde başlıklar birbirinden daha ayrı olduğu zaman kiriş orantılı bir rijitlik kazanır. Aynı durum sandviçler için de geçerlidir fakat sandviçler ayrıca daha düşük yoğunluk sağlar ve bu da ağırlık oranına karşı yüksek bir rijitlikle sonuçlanır [48].

Tablo 4.1’de sandviç bir yapının çekirdek kalınlığındaki artışın rijitlik, mukavemet ve ağırlık değerlerine etkisi gösterilmiştir. Tablo incelendiği zaman, ağırlıktaki çok küçük değişime karşılık olarak rijitlik ve mukavemet değerlerinde dikkate değer artışlar elde edildiği görülebilir.

Tablo 4.1 Sandviç yapılarda çekirdek malzemenin kalınlığına göre rijitlik, mukavemet ve ağırlıktaki değişim [51].

Özellik	Katı Metal Plaka	Sandviç Yapı	Daha Kalın Sandviç Yapı
			
Rijitlik	100	700 (7 kat daha rijit)	3700 (37 kat daha rijit)
Mukavemet	100	350 (3.5 kat daha mukavemetli)	925 (9.25 kat daha mukavemetli)
Ağırlık	100	103 (%3 ağırlık artışı)	106 (%6 ağırlık artışı)

Tüm kirişler veya panellerde olduğu gibi rijitlik, kalınlıkla yakından ilgilidir. Sandviç kompozit malzemelerde kalınlık artışı fazla olsa bile çekirdek yoğunluğu düşük olduğu için ağırlıktaki artış pek fazla olmaz (Şekil 4.5). Bu özellik ise sandviç kompozitler ile konvansiyonel malzemeler arasındaki en büyük farktır [48].



Şekil 4.5 Çekirdek kalınlığındaki artışın rijitlik ve ağırlık üzerine etkisi [48].

4.3.2. Çevresel Faydalar

Sandviç kullanarak yapısal tasarımlar daha hafif hale geldiğinden, sandviç kompozitler son derece çevre dostu malzemelerdir. Sandviç kompozit kullanmak bir yapıda kullanılan malzeme miktarını azaltarak malzeme tasarrufu sağlamasının yanı sıra yapının daha hafif olmasını sağlar, böylece yapı, ömrü boyunca daha az enerji tüketir [48].

Hareket eden her şey enerji tüketir ve ağırlık arttıkça tüketilen enerji de artar. Ağırlığın çevre üzerine etkisini göstermek için uçak, gemi, araba tren gibi taşıtlar örnek olarak verilebilir. Bu araçların üretimindeki ağırlık tasarrufu, daha az yakıt tüketimi anlamına gelir, bu ise çevreyi önemli miktarda kirleticiden kurtarır [48].

4.3.3. Tasarım Faydaları

Sandviç kompozitler, genellikle başlangıçtan itibaren şekilleri sınırlı olan geleneksel ahşap ve metal gibi yapı malzemelerinin aksine tasarım özgürlüğüne sahiptir. Kompozit sandviç yapılar inşa edilirken, malzemeler, nihai şekli aldığı son aşamaya kadar hemen hemen her türde şekillendirilebilir [48].

4.3.4. Diğer Faydalar

Aşağıda listelenen özellikler her zaman sandviç bir yapıdan beklenen özellikler arasında yer almamasına rağmen bu özelliklerin sandviç yapıda bulunması maliyetten tasarruf sağlar ve tasarımın değerini artırır [48].

- Isı yalıtımı
- Ses yalıtımı
- Korozyon olmaması
- Çok düşük absorpsiyonu.

4.4. Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması

Sandviç kompozitler, yüzeyler, çekirdek malzemesi ve ara yüzey bağlantısını sağlayan yapıştırıcı olmak üzere üç temel yapı elemanından oluşmaktadır. Bu yüzden sandviç kompozitlerin sınıflandırılması bir bütün olarak değil, kendisini oluşturan yapı elemanlarına göre yapılmaktadır. Sandviç kompoziti oluşturan yapı elemanları dikkate alınarak bazı sınıflandırmalar yapılabilir.

4.4.1. Yüzey Malzemeleri

Yüzey çeşitleri olarak geleneksel malzemelerden olan çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum, sandviç yapılarda çok fazla kullanılmazlar. Bunların yerine uygun koşullarda fiber veya cam takviyeli kompozit levhalar tercih edilir. Ana matrisin içerisine kuvvetlendirici elyafların eklenmesiyle elde edilen kompozitler, hafiflik ve yüksek rijitlikleriyle yüksek yoğunluklu izotropik malzemelere önemli bir alternatif oluştururlar. Kuvvetlendirici elyafları şu şekilde sınıflandırabiliriz [52] ;

a) Cam elyaf

Tıpkı mevcut olan çelik veya alüminyum alaşımlarının farklı bileşimleri gibi piyasada cam elyaflarının da kimyasal bileşimlerinin birçoğu bulunmaktadır. Yaygın olarak cam elyaflar silis esaslı (%50-60 SiO₂) olmakla birlikte bir dizi kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum ve demir oksitleri de içerir. Tablo 4.2’de yaygın olarak kullanılan bazı cam fiberlerin birleşenleri verilmiştir [53].

Tablo 4.2 Bazı cam fiberlerin yaklaşık olarak kimyasal bileşeni [53].

Bileşim	E Camı	C Camı	S Camı
SiO ₂	55.2	65.0	65.0
Al ₂ O ₃	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	-
MgO	4.6	3.0	10.0
Na ₂ O	0.3	8.5	0.3
K ₂ O	0.2	-	-
B ₂ O ₃	7.3	5.0	-

E harfi elektrik anlamına gelir, çünkü E camı iyi bir elektrik yalıtkanlığının yanı sıra iyi mukavemet ve makul bir Elastisite modülüne sahiptir. C harfi korozyon anlamına gelir ve C camı kimyasal korozyona diğer cam elyaflardan daha dirençlidir. S harfi yüksek silika içeriği anlamına gelir, bu ise S camını yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı hale getirir [53].

b) Karbon Elyaf

Karbon elyaflar artan popülerliğiyle polimer matrisli kompozitler arasında cam elyaflardan sonra en yaygın kullanıma sahip olan bir takviye elemanıdır. Yüksek çekme gerilmesi/yoğunluk oranı ve yüksek modül/yoğunluk oranı gibi avantajlara sahip olması bu elyaf tipinin birçok uzay ve teknik uygulamalarda kullanılma sebebidir. Karbon fiber ayrıca düşük termal genleşme, yüksek yorulma direnci ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Bazı uygulamalarda dezavantajı olabilen karbon fiberlerin nispeten yüksek elektriksel iletkenliği bazı durumlarda avantaj sağlayabilir. Karbon fiberin diğer dezavantajları, düşük gerilme direnci, düşük darbe dayanımı ve yüksek maliyetidir [54].

c) Boron Elyaf

Bor doğal olarak kırılğan bir malzemedir. Ticari olarak üretimi bir yüzey üzerinde borun kimyasal buhar birikimi ile gerçekleştirilir. Bu biriktirme işlemi için oldukça yüksek sıcaklıkların gerekli olduğu göz önüne alınırsa, bitmiş bor lifinin çekirdeğini oluşturan alt katman malzemesinin seçimi sınırlıdır. Genellikle bu amaç için ince bir tungsten tel kullanılabileceği gibi karbon bir yüzey de kullanılabilir. İlk boron elyaf 1911'de *Weintraub* tarafından sıcak bir tel üzerine, boron halojenür ile hidrojen indirgemesi vasıtasıyla elde edilmiştir. Bununla birlikte bor elyaf üretiminde büyük gelişme 1959'da *Talley* tarafından yüksek dayanımlı amorf bor fiberler elde etmek için halojenür indirgeme işlemini kullanmasıyla elde edilmiştir. O zamandan itibaren havacılık ve diğer alanlarda yapısal bir bileşen olarak hafif ama güçlü olan boron elyafların kullanımı sürekli olarak artmıştır [53].

d) Aramid Elyaf

Aramid elyaflar genellikle kevlar olarak bilinen, aromatik polyamidlerin kullanıldığı gelişmiş fiberlerdir. Naylon, aramid elyaf olarak düşünülür, ancak polyamidlerin uzun zinciri için kullanılan genel bir addır. Bununla birlikte Kevlar, aromatik birimlerden üretilen spesifik bir ağ poliamididir. Kevlar, tokluğu ve enerji absorbe etme yeteneği ile tanınır. Kevlar çok yönlü olduğundan zayıf hidrojen bağları bitişik molekülere karşı oluşturulur ve bu da kevlarları son derece anizotropik hale getirir [54].

4.4.2. Yapıştırıcı Malzemeler (Reçineler)

Sandviç bir yapıda yapıştırıcı (reçine), kayma gerilmelerinin yanı sıra çekme gerilmelerine maruz kalabilir. Bu yüzden sandviç kompozitin kullanılacağı koşullara göre uygun özelliklere sahip yapıştırıcı seçimi sandviç yapının mukavemeti açısından hayati öneme sahiptir. Bu işlem için birçok farklı reçine türü bulunmasına rağmen en çok kullanılan reçine türleri epoksi, polyester ve vinilesterdir.

a) Epoksi Reçine

Genelde 20-90 °C arasında kürleşen düşük sıcaklık reçineleri ve 130-220 °C arasında kürleşen yüksek sıcaklık reçineleri bulunmaktadır. Bunların çözücüsüz kullanılma ve buhar oluşturmada kürleme gibi avantajları vardır. Bu da malzemede düşük bir hacim küçülmesi sağlar [55].

Çözücülerin bulunmayışı epoksileri neredeyse tüm çekirdek malzemeleri ile kullanılabilir hale getirmektedir. Epoksilerin gerilme dayanımı yaklaşık olarak 20-25 MPa'dır [55].

b) Polyester Reçine

Polyester reçineler dibazik asitlerin, dihidrik alkoller (glükol) ya da dihidrik fenollerle karışımının yoğunlaşması ile şekil alırlar. Polyesterlerin ana tipleri polyester bileşeninin doymuş asitle ya da alternatif malzeme olarak glükolle modifikasyonu

temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi arttırılabilir. Takviyelerin nemini dışarıya kolayca atabilmesini sağlayan düşük vikoze, düşük maliyet ve çevresel koşullara karşı iyi dayanım göstermesi bu reçinelerin avantajlarından [43].

c) Vinilester Reçine

Polyester reçinelerle benzer özellikler gösterirler. En önemli avantajı elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmasıdır. Polyesterle glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler. Korozif ortamlardaki kullanımlar için donatılı plastik bileşenlerin üretiminde yararlanılmaktadır. Bu polimerler kimyasal dayanım gerektiren kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında kullanılmaktadır [43].

4.4.3. Çekirdek Malzemeleri

Piyasada sandviç levha çekirdek malzemesi olarak kullanılan çeşitli malzeme türleri mevcuttur. Saf izolasyon çekirdek malzemesi ile yapısal çekirdek malzemeleri arasında geçerli bir tanım veya çizgi mevcut değildir. Aslında yük taşıyabilen her şeyin yapısal bir çekirdek malzemesi olduğu iddia edilebilir. Ancak asıl amacı yapısal yük taşımak olan bazı çekirdek malzemesi türleri aşağıda açıklanmaktadır [48].

a) Köpük Çekirdekler

Piyasada farklı kimya ve işleme tekniklerine dayanan birçok köpük çekirdeği mevcuttur [48].

- *PVC köpük*; çapraz bağlanmış poliüretanın ve PVC'nin eşsiz kombinasyonudur, çok düşük ağırlıklarda etkileyici mekanik performans sağlar [48].
- *PET köpük*; termoplastik köpükle sonuçlanan polietilen tereftalattan imal edilir. PET mükemmel termal kararlılığa sahiptir. Ancak PVC köpükle

karşılaştırılabilir. Fiziksel özellikler elde etmek için daha yüksek ürün yoğunlukları kullanılmalıdır. Mekanik özelliklerini mümkün olduğu kadar artırmak için köpüğü, yüzey levhanın dikey doğrultusuna döndürmek uygun olmaktadır. Bu, tabakaları bir araya getirerek ve ardından istenilen tabaka kalınlıklarında kesilerek elde edilir. PET ile elde edilen bir diğer avantaj ise geri dönüşümünün mümkün olmasıdır [48].

- *PES köpük*; termoplastik polietersülfon (PES) ekstrüzyonundan yapılır. Havacılık sektöründe birçok fayda sağlar. Termoplastikler için eşsiz yüksek bir servis sıcaklığı vardır. Sıcak ve soğuk şekillendirme, çok düşük su absorpsiyonu gibi avantajlara sahiptir [48].

b) Balsa Çekirdek

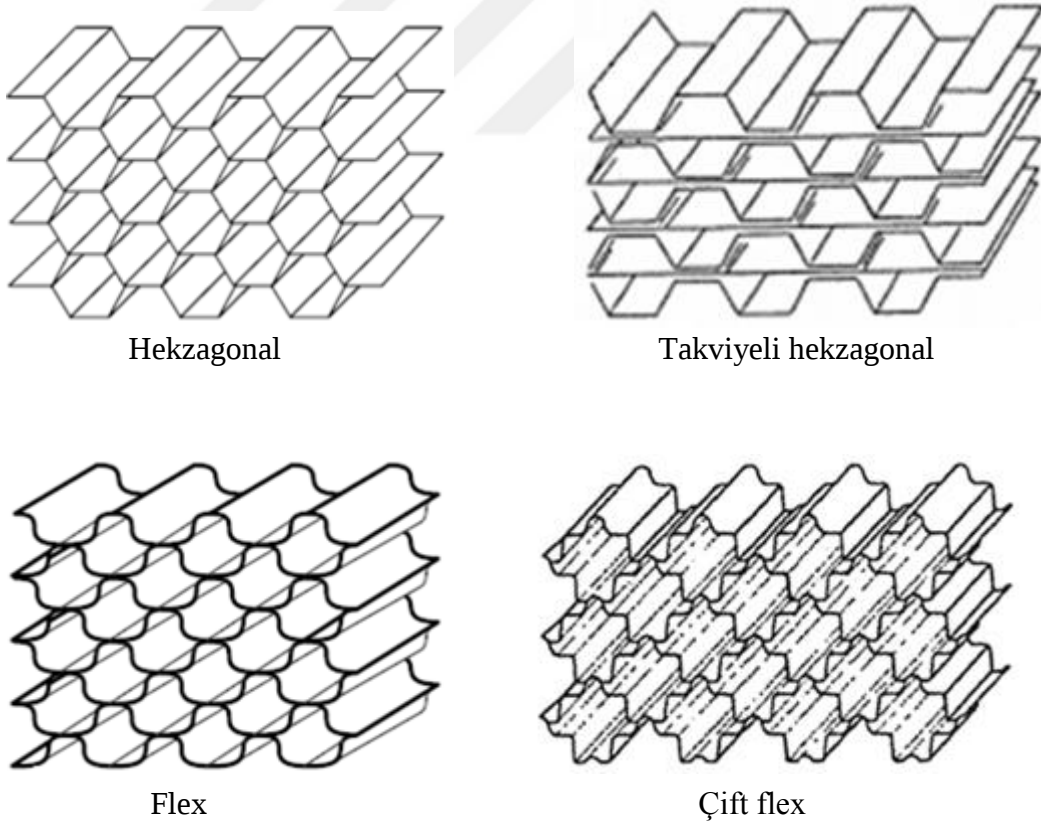
Balsa, birçok farklı uygulamada kullanılan yapısal bir çekirdek malzemesidir. Balsa'dan en iyi şekilde faydalanabilmek için, kerestenin dikey yönde kesilerek yapıştırılması gerekmektedir. Balsa hücrelerinin yeniden yönlendirilmesi sıkıştırma özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Balsa ile ilgili en büyük sorun tüm ahşap malzemelerde olduğu gibi çürümelere neden olabilecek nem alma riskidir [48].

c) Balpeteği (Honeycomb) Çekirdek

Bal peteği metalik veya kompozit esaslı olabilir. Metalik bal peteği çok ince alüminyumdan, kompozit bal peteği ise kâğıt veya naylon/aramid elyafları ve epoksi veya fenolik bir reçineden yapılırlar. Ateşe dayanıklı *Nomex* en popüler bal petek sistemlerinden biridir. Bal petek sistemleri üstün mukavemet/ağırlık oranları sağlayan çekirdek yapıları oluştururlar. Ancak, eğimli yüzeyleri bal peteği ile kaplamak için özel bir teknik gerekmektedir [52].

5. PETEKLİ ÇEKİRDEK YAPIYA SAHİP SANDVIÇ KOMPOZİTLER

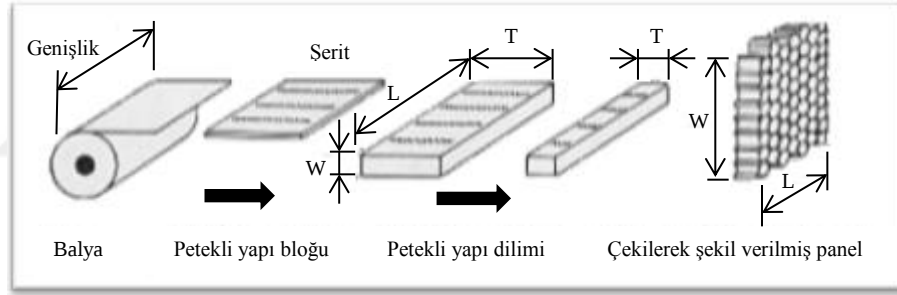
Petekli çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitler, 4. Bölüm’de bahsedilen sandviç türleri arasında en yaygın kullanılan sandviç tipi olduğu için bu bölümde daha detaylı bir şekilde incelenecektir. Sandviç yapılar arasında bu tip sandviç kompozitlerin yoğun bir şekilde tercih edilmesinin en temel iki sebebi, çarpma sonucunda meydana gelen enerjiyi absorbe etme yetenekleri ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmalarıdır. Petekli yapıdaki çekirdekler çeşitli hücre formlarına sahip olmakla birlikte (Şekil 5.1) en yaygın olarak kullanılan hücre şekli balpeteği (honeycomb) olarak adlandırılan altıgen hücre yapısına sahip olan çekirdeklerdir. Bu bölümde petek üretim yöntemleri, petekli yapıdaki çekirdek ile yüzey levhaların birleştirme işlemi ve petekli sandviç bir kompozitte meydana gelebilecek hasar türleri gibi konular üzerinde durulmuştur.



Şekil 5.1 Farklı hücre şekilleri [51].

5.1. Petekli Yapı Çekirdek Üretim Yöntemleri

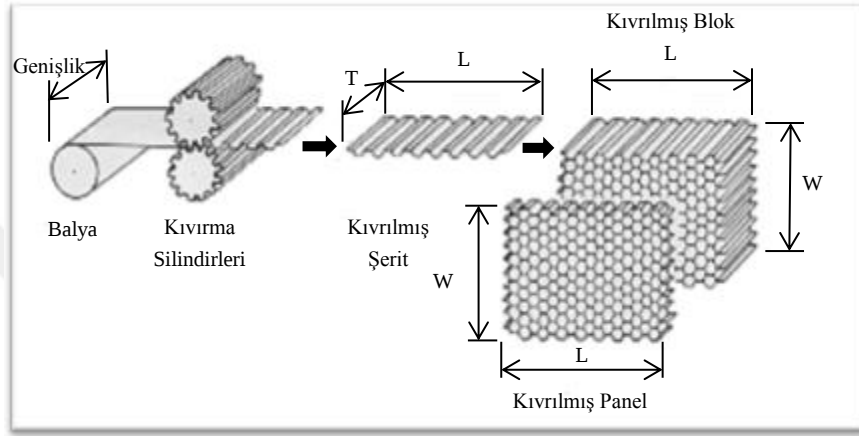
Petekli çekirdek yapıların üretiminde uzatma ve kıvrarak şekil verme olmak üzere genellikle iki temel teknik kullanılır. Uzatarak şekil verme yöntemi şematik olarak Şekil 5.2’de görülmektedir. Bu yöntem metal ve metal olmayan hücre imalatında kullanılır. Petek yapılı hücrelerin büyük bir çoğunluğu bu yöntemle üretilir. Üretim genel olarak; şerit halinde levhaların kesilmesi ve yapıştırıcının sürülmesi, levhaların üst üste dizilmesi ve petekli yapı bloğunun seçilen sıcaklıkta pres içerisinde işlenmesi aşamalarını içerir. Alüminyum blokları çekme işleminden önce genellikle istenilen kalınlıkta dilimlere ayrılırlar. Dilimler kalıpta çekilirken, her bir şerit halindeki plaka, komşu hücrelerle birleştirmenin olmadığı noktalarda akma gösterir ve böylece levhalara şekil verilmiş olur. Aynı yöntem diğer metalik malzemeler için de rahatlıkla kullanılabilir [56].



Şekil 5.2 Uzatarak şekil verme yöntemi ile petekli yapı çekirdek üretimi [56].

Metal olmayan şerit levhalar da benzer biçimde hazırlanmasına rağmen bazı önemli farklar söz konusudur. Metal dışı malzemeler yapıştırıcı sürme işlemi öncesi korozyona karşı direnç artırıcı işlemler gerektirmez. Ancak bazı malzemelerin reçineye iyice doyurulması için bir ilave ön işlem gerekebilir. Metalik malzemelerin aksine metal dışı petekli yapı malzemeleri kalıp içerisinde kalıbın şeklini alması için gerekli çekme işlemi sonunda kendi şekillerini koruyamazlar. Bu malzemelerde kalıplama daha fazla sürede yapılır ve şekil alma işlemi gerçekleşene kadar bir fırın içerisinde ısıtılır. Daha sonra çekilmiş ve ısıtılmış blok sıvı reçineye daldırılır ve hücrelerin oluşumu tamamlana kadar ısıtma işlemi sürdürülür. Daldırma süreci blokların istenilen yoğunluğa ulaşınca kadar tekrarlanır. Petekli yapı imalatı bu bloklardan istenilen kalınlıkta dilimlerin kesilmesi ile tamamlanmış olur [56].

Petekli çekirdek yapıların imalatında oldukça yaygın olarak tercih edilen diğer bir yöntem kıvrırma metodudur (Şekil 5.3). Bu yöntem yüksek sıcaklık altında çalışan, et kalınlığı ve yoğunluğu oldukça fazla olan petekli yapıların imalatında tercih edilir. Bu yöntemde şerit levhalar istenilen biçimde kıvrılarak düğüm noktalarına yapıştırıcı tatbik edilir [56].



Şekil 5.3 Kıvrırma yöntemi ile petekli yapı çekirdek üretimi [56].

5.2. Petekli Sandviç Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

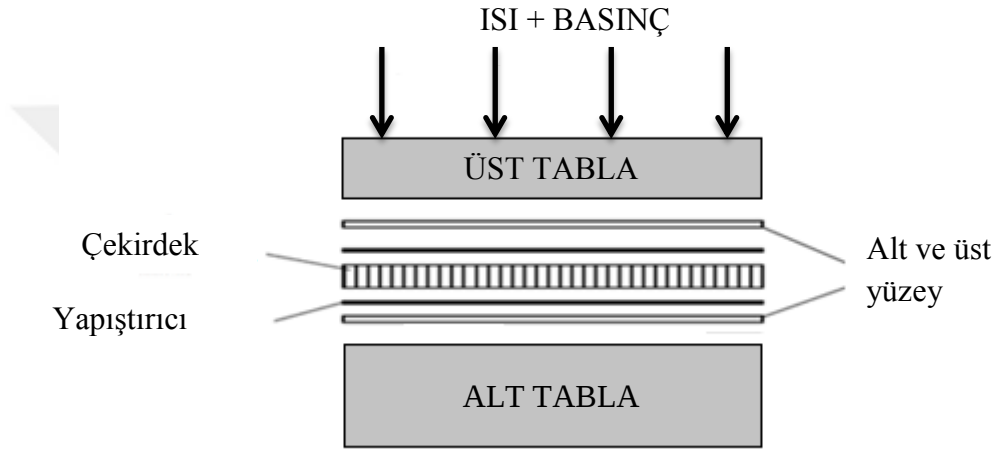
Petek hücreli çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlerin üretimi üç farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

- Genellikle düz ve basit yapıli sandviç panellerin üretimi için kullanılan *sıcak pres yöntemi*,
- Kavisli ve kompleks yapıli panellerin üretimi için kullanılan *vakum yöntemi*,
- Çoğunlukla seri üretim uygulamalarında kullanılan *kalıplama yöntemi* .

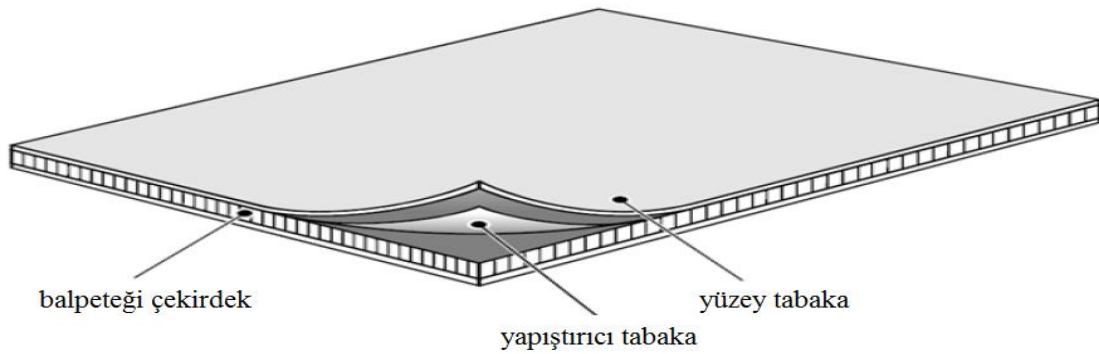
Bu yöntemlerin uygulama şekilleri ve üretilen parça tipleri şöyle özetlenebilir;

5.2.1. Sıcak Pres Yöntemi

Sıcak pres yöntemi ile üretimde genellikle üretilecek parçanın imalatı tek seferde tamamlanacak şekilde uygulanır. Bu yöntem metalik ve prepreg (reçine emdirilmiş elyaf) yüzeylere sahip sandviç kompozit imalatında kullanılır. Alternatif olarak yüzey malzemeleri sıcak preste ön işleme tabi tutulduktan sonra, bir yapıştırıcı yardımıyla sandviç imalatı gerçekleştirilebilir [57]. Sıcak pres yöntemiyle üretim, Şekil 5.4'te ve bu yöntem ile üretilmiş sandviç bir kompozit ise Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



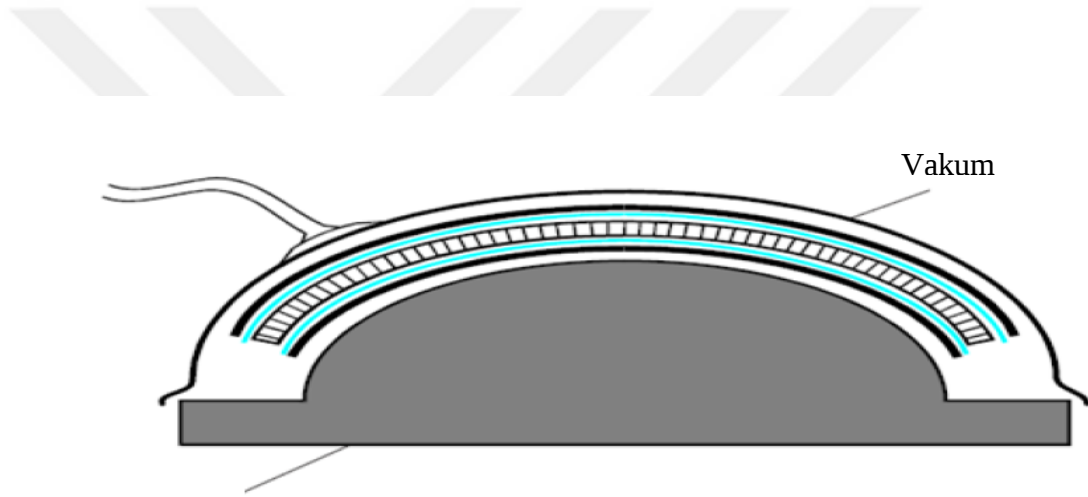
Şekil 5.4 Sıcak pres yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].



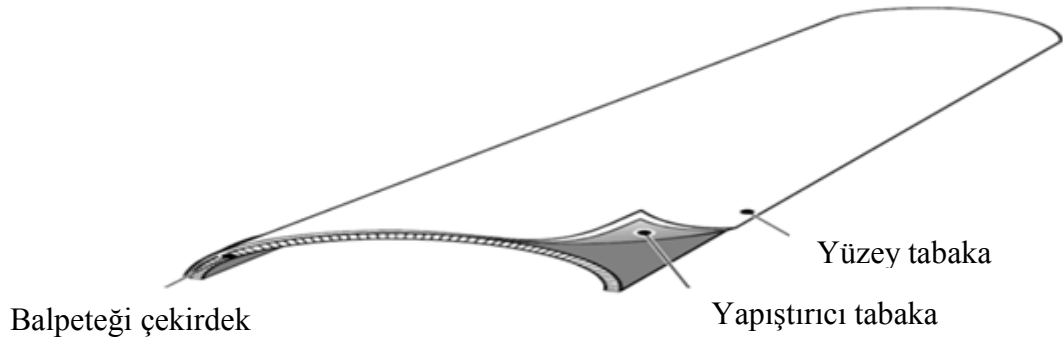
Şekil 5.5 Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].

5.2.2. Vakum Yöntemi

Vakum yöntemiyle üretimde gerekli birleştirme işlemi bir vakum yardımıyla yapılır. Sandviç kompozit parçaları, levha imalatı tek seferde tamamlanacak şekilde düzenlenmelidir. Parçanın kütleme işlemi fırında yapılabileceği gibi ek basınç uygulanarak otoklavda da yapılabilir. Bu yöntem prepreg, önceden oluşturulmuş kompozit ve metalik yüzeylere sahip sandviç levha üretimi için uygundur. Bu yöntemle esnek yapılı balpeteği çekirdek ve yapıştırıcı film kullanılarak karmaşık şekilli sandviç levhaların imalatı mümkündür [57]. Vakum yöntemiyle üretim, Şekil 5.6’da ve bu yöntem ile üretilmiş sandviç bir kompozit ise Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



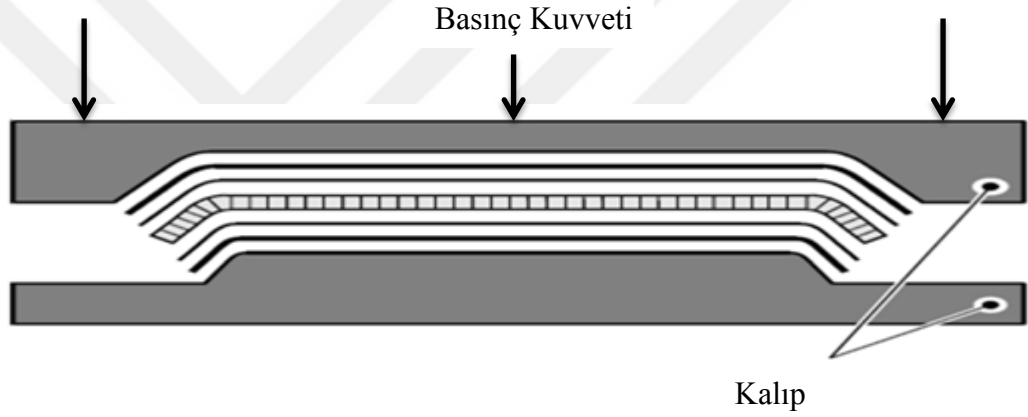
Şekil 5.6 Vakum yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].



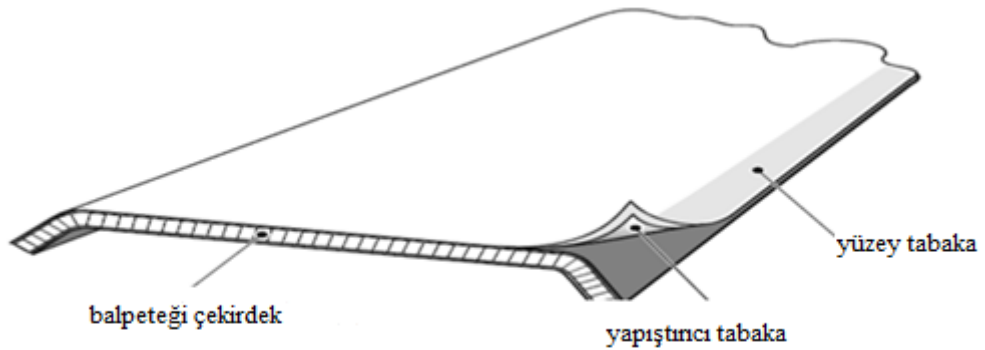
Şekil 5.7 Vakum yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].

5.2.3. Kalıplama Yöntemi

Sandviç yapı imalatında kalıplama yöntemini kullanmanın temel amacı yüksek tolerans ve yüzey kalitesinde parçalar üretmektir. Bu üretim yöntemi için çeşitli yollarla ısı ve basınç optimizasyonu yapmak mümkündür. Dış mekanik basınç altında ısıtılmış veya ısıtılmamış donanımlarla veya fırın içinde kürlemeyle yapılan üretimler kalıplama için kullanılan tipik yöntemlerdir. Ancak, eğer üretimi yapılacak sandviç yapı ısıtıcı ekipman kullanamayacak kadar büyükse, oda sıcaklığında soğuk yapıştırma ile bağlama işlemi de düşünülebilir [56]. Kalıplama yöntemiyle üretim, Şekil 5.8’de ve bu yöntem ile üretilmiş sandviç bir kompozit ise Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Kalıplama yöntemi ile sandviç kompozit imalatı [57].



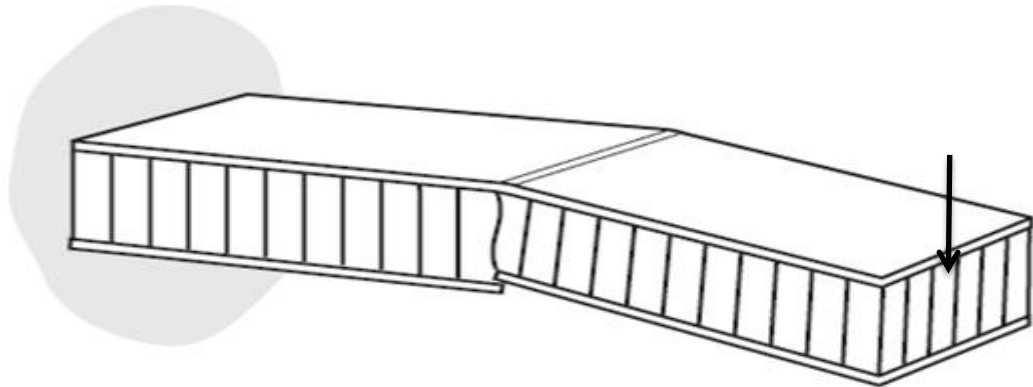
Şekil 5.9 Kalıplama yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit [57].

5.3.Petekli Sandviç Yapılarda Oluşabilecek Hasar Modları

Petekli sandviç kompozitlerde, sandviç yapının maruz kaldığı yükleme durumuna bağlı olarak, yapıda birtakım hasarlar meydana gelebilir. Bu hasar oluşum türleri sandviç yapının yüzey levhalarının, çekirdek yapısının ve ara yüzey bağlantısını sağlayan yapıştırıcının, sandviç yapı üzerine uygulanan yükler karşısında yetersiz kaldığı durumlarda meydana gelebilir. Bu hasar oluşum türlerinin meydana gelmemesi için sandviç yapı tasarımcıları analizlerinde, oluşabilecek tüm hasar modlarını dikkate almaları gerekmektedir. Petekli sandviç kompozitlerde meydana gelebilecek hasar türleri ve bu hasar türlerini önlemek amacıyla dikkate alınması gerekenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

5.3.1. Mukavemet

Sandviç yapının yüzey ve çekirdek malzemeleri tasarım yüklerinin sebep olduğu çekme, basma ve kayma gerilmelerini karşılayabilecek mukavemete sahip olmalıdır. Bunun yanı sıra yapıştırıcı tabaka, sandviç yapının maruz kaldığı kayma gerilmelerini yüzey ile çekirdek malzemesi arasında transfer edebilecek özellikte olması gerekmektedir [57]. Sandviç yapı mukavemet hatasına ait model Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

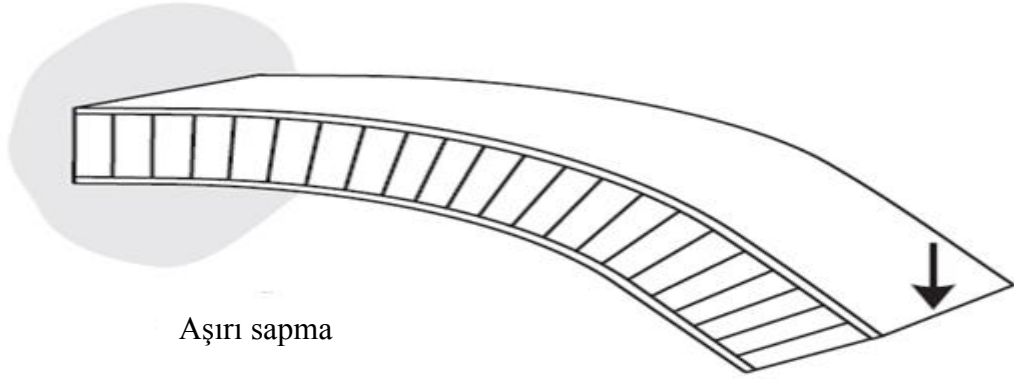


Yüzey gerilme hatası

Şekil 5.10 Tasarım yükünü karşılayamayan düşük mukavemetli sandviç yapı [57].

5.3.2. Rijitlik

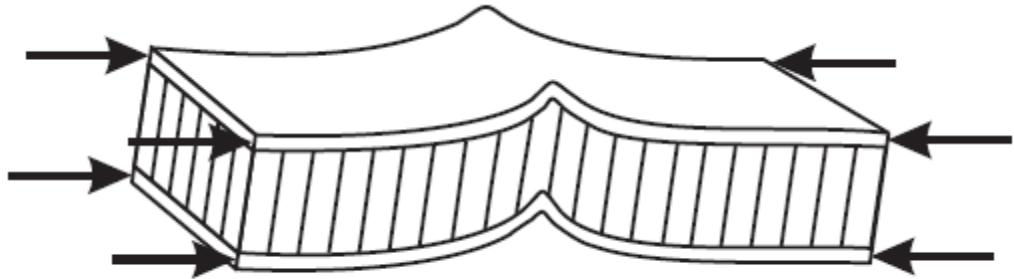
Şekil 5.11’de gösterildiği gibi aşırı bir eğilmeyi önlemek için sandviç bir yapı yeterli eğilme ve kesme rijitliğine sahip olmalıdır.



Şekil 5.11 Yetersiz rijitliğe sahip sandviç yapı [57].

5.3.3. Panel Burkulması

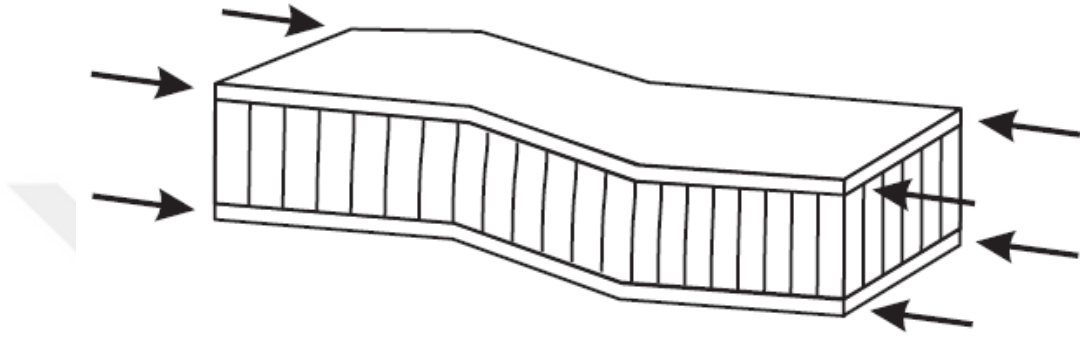
Sandviç bir yapıda çekirdek kalınlığı ve kayma modülü, Şekil 5.12’de gösterildiği gibi sıkıştırma yükü altındaki panelde burkulmayı önleyecek düzeyde olmalıdır.



Şekil 5.12 Panel burkulma hatası [57].

5.3.4. Kesme Kırırımı

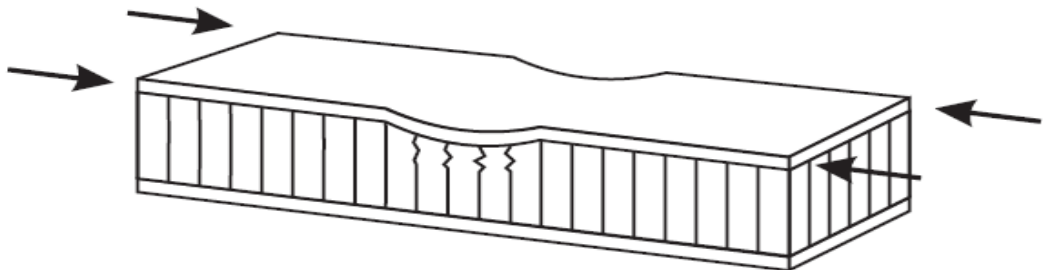
Şekil 5.13'te gösterildiği gibi uç yüklere maruz kalan bir sandviç panelde, sandviç yapı çekirdek kalınlığı ve kayma modülünün, meydana gelecek olan kayma gerilmesini karşılayabilecek özelliğe sahip olması gerekmektedir.



Şekil 5.13 Kesme gerilmesine maruz kalmış bir sandviç yapı [57].

5.3.5. Yüzey Tabakada Çökme

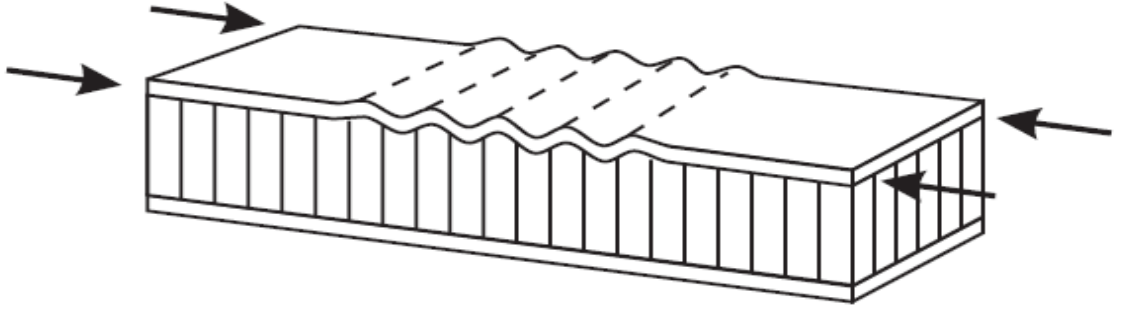
Şekil 5.14'te gösterilen yüklere maruz kalan bir sandviç yapıda, yüzey tabakada çökme meydana gelmemesi için sandviç yapı yüzey tabakası ve çekirdek yapısı yeterli basma mukavemetine sahip olmalıdır.



Şekil 5.14 Sandviç panel yüzeyinde çökme hatası [57].

5.3.6. Hücreler Arası Kıvrılma

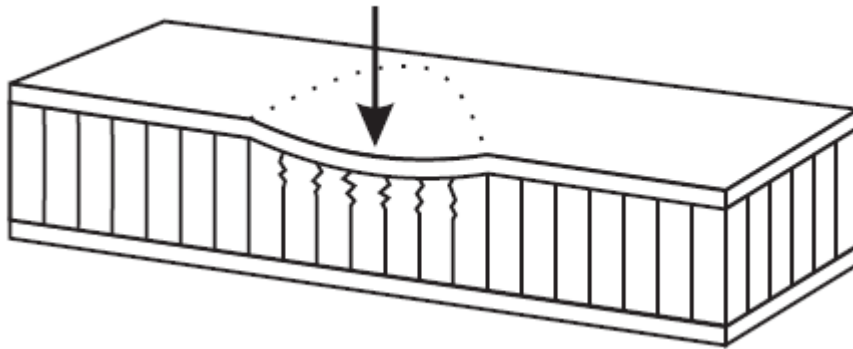
Sandviç bir yapıda Şekil 5.15'te gösterilen hatanın meydana gelmemesi için petekli çekirdek yapıda hücreler arası boşluk, yüzey tabakanın hücre içine çökmesini önleyecek kadar küçük olmalıdır.



Şekil 5.15 Hücreler arası kıvrılma hatası [57].

5.3.7. Bölgesel Basınç

Şekil 5.16'da gösterildiği gibi bölgesel basınç altındaki bir sandviç panelde çökme meydana gelmemesi için çekirdek basma mukavemeti, bölgesel yüklere karşı koymak için yeterli olmalıdır.

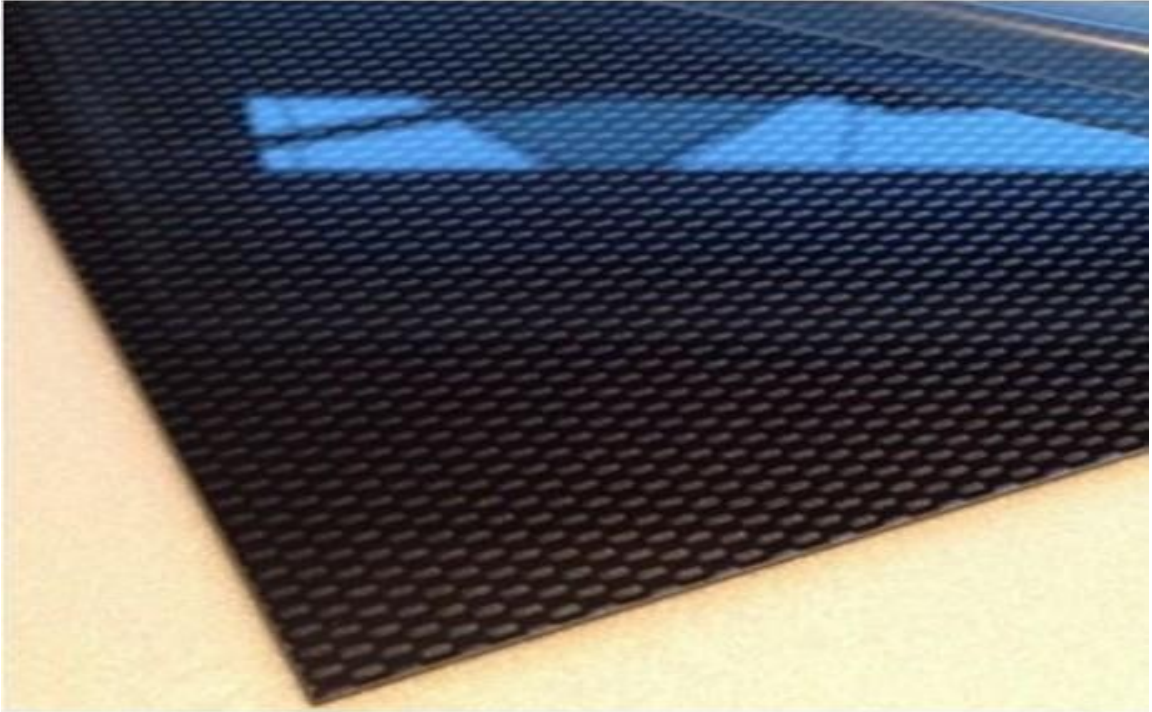


Şekil 5.16 Bölgesel basınca maruz kalmış sandviç yapıda çökme hatası [57].

6. MATERYAL VE METOT

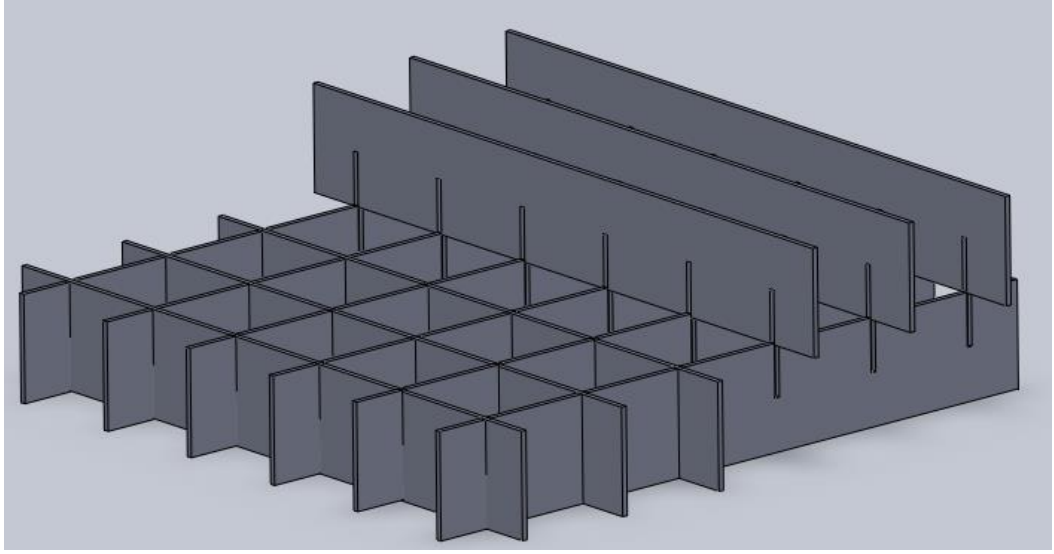
Bu tez çalışması kapsamında üretilen sandviç kompozit levhalar, geleneksel sandviç kompozitlerle karşılaştırıldığı zaman genel olarak; çekirdek malzemesi, çekirdek üretim yöntemi ve hücre şekli bakımından farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar aşağıdaki şekilde açıklanabilir;

- Geleneksel sandviç kompozitlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum, aramid ve *Nomex* yerine karbon fiber kompozit (Şekil 6.1) kullanılmıştır.



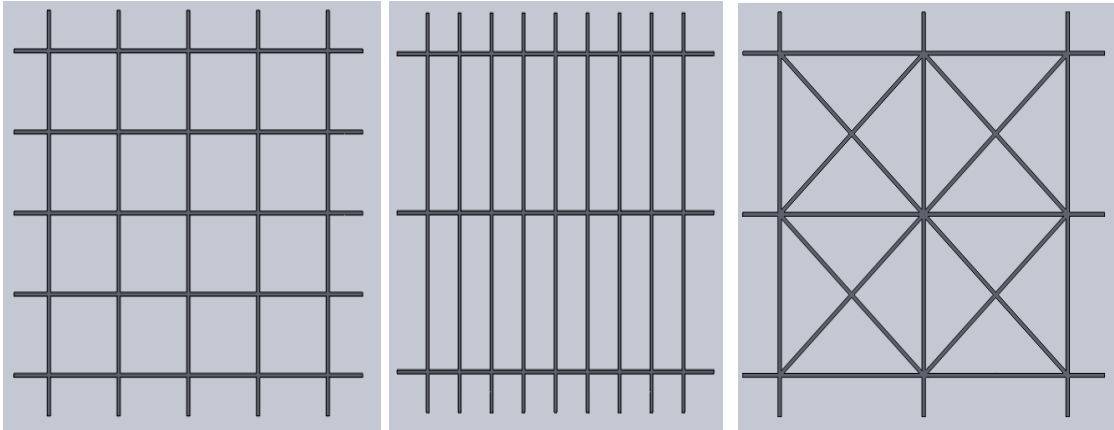
Şekil 6.1 Karbon fiber/epoksi kompozit malzeme.

- Çekirdek malzemesi üretiminde genellikle yapıştırırmalı bağlantılar tercih edilirken, bu tez çalışmasında üretilen sandviç kompozitlerin çekirdek yapısı iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak üretilmiş ve üretimde herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmamıştır. Bu üretim tekniğinin uygulama yöntemi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 İç içe sıkı geçme tekniği uygulaması.

- Geleneksel sandviç kompozitlerin çekirdek yapılarında hücre şekli olarak, çoğunlukla altıgen (balpeteği) hücre tipi tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra altıgen yapının takviyeli ve uzatılmış formları, flex ve çift flex gibi çekirdek hücre şekilleri de mevcuttur. Bu tez çalışmasında çekirdek yapılar kare, dikdörtgen ve üçgen şeklinde olmak üzere üç farklı tipte üretilmiştir (Şekil 6.3).



a) Kare hücre

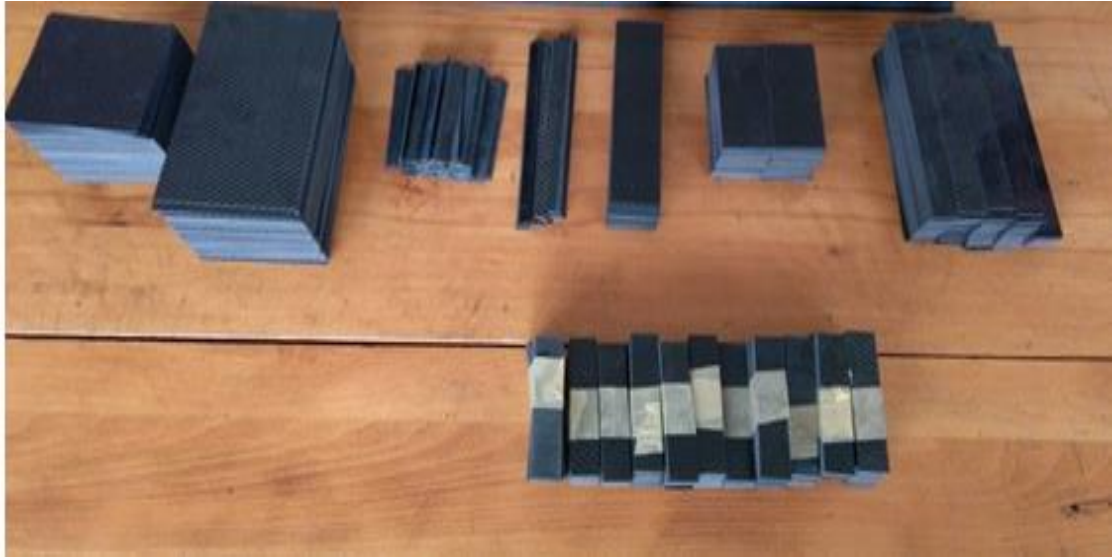
b) Dikdörtgen hücre

c) Üçgen hücre

Şekil 6.3 Çekirdek yapı hücre şekilleri.

6.1.Sandviç Levha Üretim Uygulaması

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen sandviç kompozit malzemelerin imalatı *Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında* gerçekleştirilmiştir. Üretilen sandviç levhaların çekirdek ve yüzey kapak malzemeleri örgülü karbon fiber/epoksi kompozit malzemeden oluşmaktadır. Karbon fiber kompozit malzemeler, üretimi yapılacak olan sandviç levha için uygun ölçülerde hazır olarak alınmıştır (Şekil 6.4). Üretimde kullanılan karbon fiber kompozit malzemelerin ölçüleri ve adetleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Üretimde kullanılan karbon fiber kompozitler.

Tablo 6.1 Üretimde kullanılan karbon fiber kompozitlerin ölçüleri ve adetleri.

En (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)	Adet
100	100	1	90
100	180	1	90
20	100	1	450
20	180	1	230
10	100	1	100
10	180	1	30
40	100	1	100
40	180	1	30

Karbon fiber çekirdekli sandviç kompozitlerin imalatında izlenen adımlar şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Çekirdek üretim yöntemi olarak iç içe sıkı geçme tekniğinin uygulanabilmesi için ilk olarak çekirdek yapıda kullanılan karbon fiber kompozitlere hücre yapısına bağlı olarak uygun aralıklarla kanallar açılmıştır. Bu aşamada önemli olan nokta sıkı geçmeli bağlantının sağlanabilmesi için, kompozit malzeme kalınlığı ve testere kalınlığının aynı olmasıdır. Bu amaca yönelik olarak kanal açma işlemi, testere kalınlığı 1 mm olan “Scheppach Basato 3H Vario” marka elektrikli şerit testere kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.5).



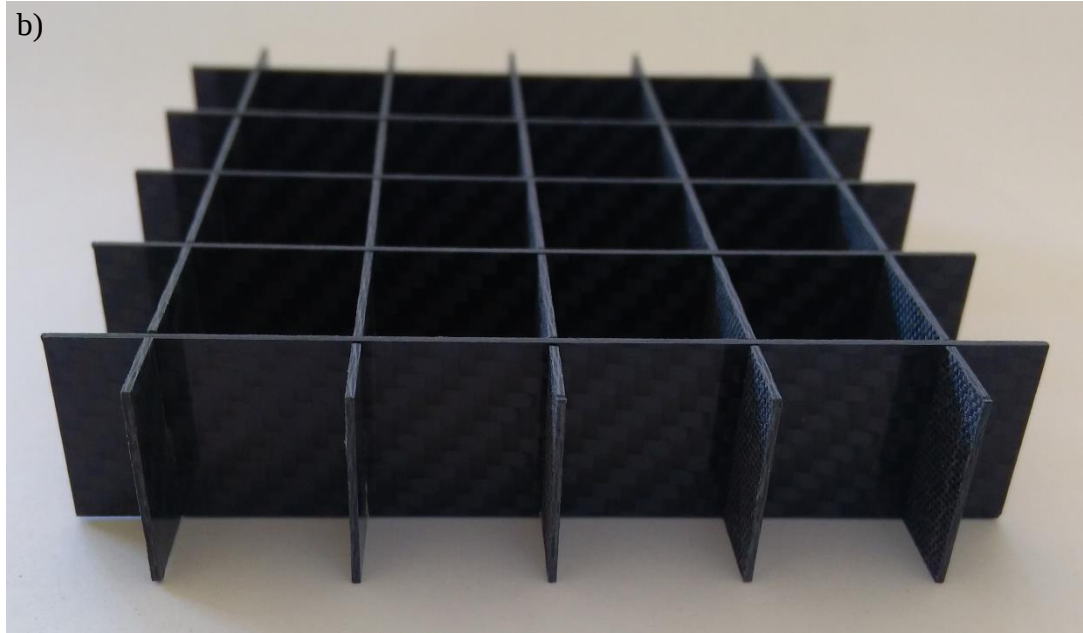
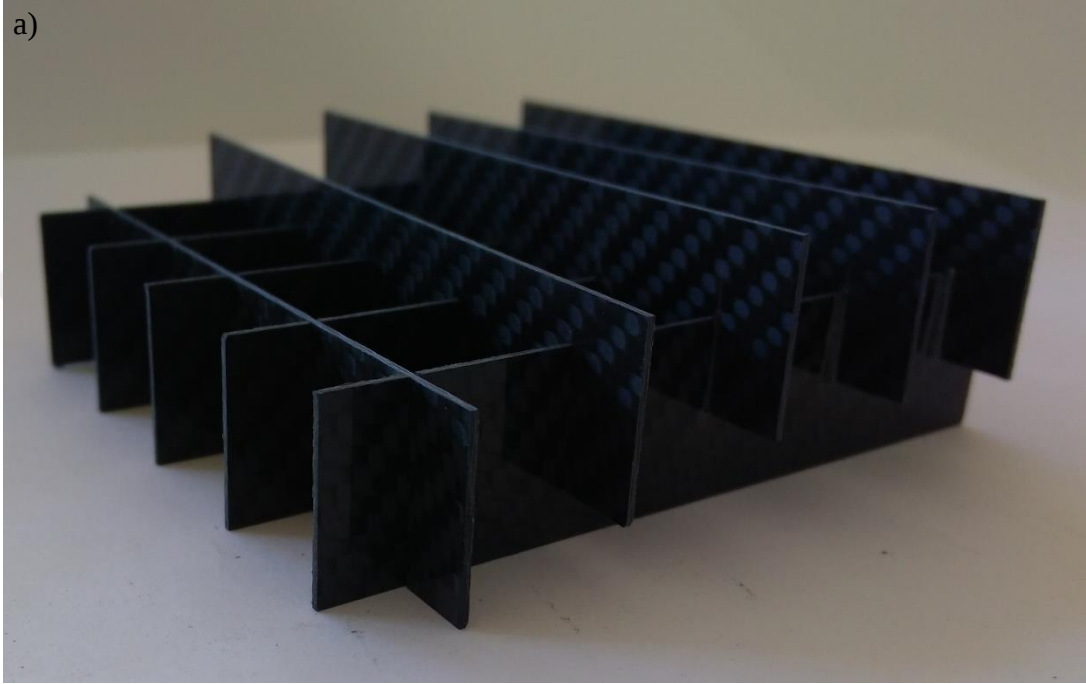
Şekil 6.5 a) Elektrikli şerit testere b) kanal açma işlemi.

Bu işlem sonucunda elde edilen örnek bir kanal açılmış karbon fiber kompozit Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



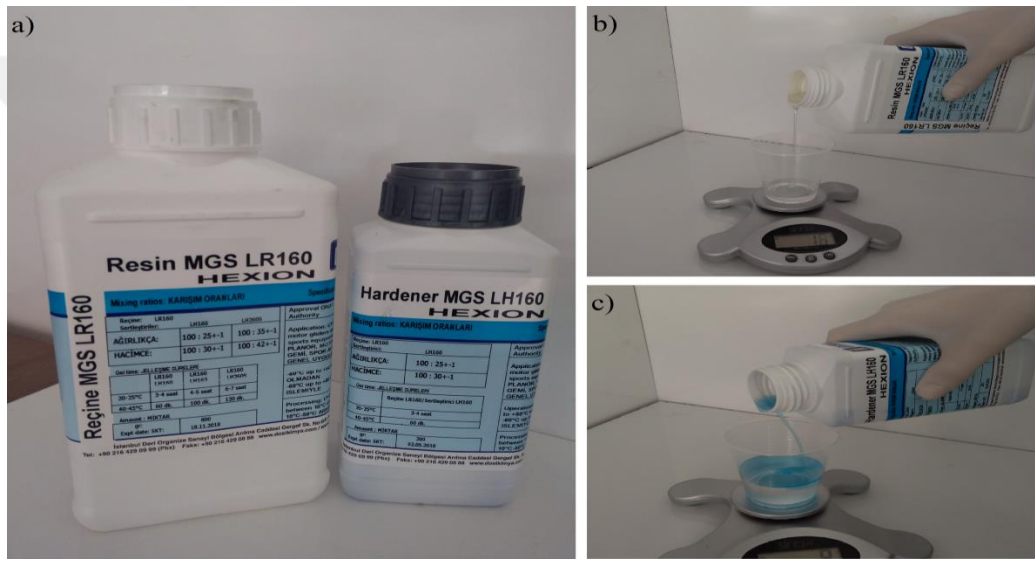
Şekil 6.6 Kanal açılmış karbon fiber kompozit.

- 2) Daha sonra açılmış olan bu kanallar yardımıyla karbon fiber kompozitler herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan iç içe geçirilerek çekirdek yapı üretilmiştir. Şekil 6.7a'da üretim aşamasındaki bir karbon fiber çekirdek, Şekil 6.7b'de ise üretimi tamamlanmış olan bir karbon fiber çekirdek gösterilmiştir.

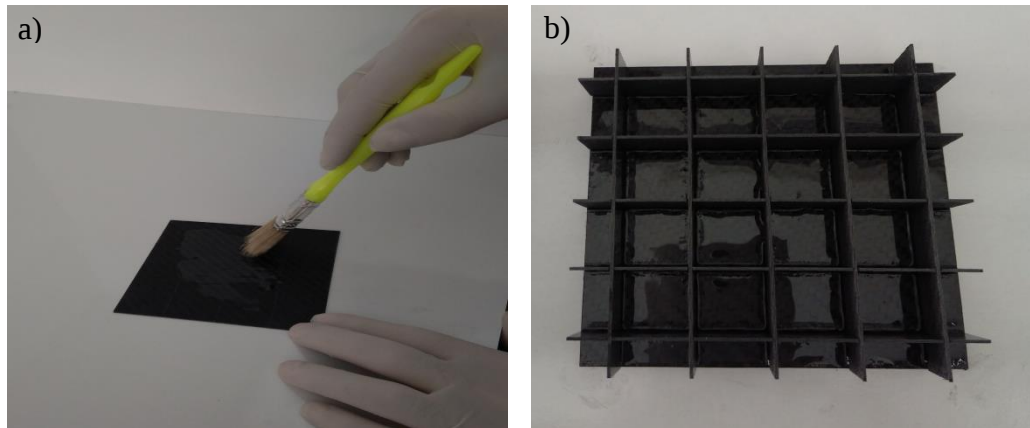


Şekil 6.7 Karbon fiber kompozit çekirdek yapı üretimi a) karbon fiber şeritlerin iç içe geçirilmesi
b) üretimi tamamlanmış çekirdek yapı.

- 3) En son adımda ise yüzey kapakları ile çekirdek yapının yapıştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için yapıştırıcı malzeme olarak *MGs LR160* epoksi reçine ve *MGs LH160* sertleştirici kullanılmıştır. Öncelikle 4 birim epoksi reçine ile 1 birim sertleştirici karıştırılarak reçine, uygulamaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.8). Daha sonra bir fırça yardımıyla sandviç yapının yüzey kapaklarına epoksi reçine yapıştırıcı uygulanmıştır (Şekil 6.9a). Bu işlemin ardından çekirdek yapı reçineli yüzey kapaklar arasına yerleştirilmiş ve üzerine bir ağırlık bırakılarak oda sıcaklığında 24 saat kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 6.8 Yapıştırıcı malzemenin hazırlanması a) reçine ve sertleştirici b) karışıma reçinenin eklenmesi c) karışıma sertleştiricinin eklenmesi.



Şekil 6.9 a) Yapıştırıcı malzemenin yüzey kapaklarına uygulanması b) çekirdek yapı ve yüzey kapaklarının yapıştırılması.

6.2. Üretimi Yapılan Sandviç Levha Çeşitleri

Bu tez çalışması kapsamında 10 farklı tipte çekirdek yapısına sahip sandviç levha, basma deneyi için 100 mm x 100 mm ölçülerinde ve üç nokta eğme deneyi için 100 mm x 180 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Her numune çeşidinden, sonuçları doğrulamak amacıyla üçer adet olmak üzere her iki deney için toplamda 60 adet numunenin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çekirdek yapılar; kare, dikdörtgen ve üçgen formunda üretilerek hücre şekillerinin, sandviç levhanın mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bunun yanı sıra hücre yüksekliği, hücre yoğunluğu (alanı), hücrelerin köpüklü veya delikli oluşunun etkisi de incelenmiştir. Hücre şekli dışındaki parametrelerin mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmak için hücre yapısı olarak kare hücre formu kullanılmıştır. Hücre yoğunluğu dışında diğer parametreler için basma deneyinde kullanılmak üzere 16 hücreli ve eğme deneyinde kullanılmak üzere 32 hücreli çekirdek yapıya sahip sandviç kompozit numuneler üretilmiştir.

Üretimi tamamlanan basma deneyi numunelerine B (B1, B2, B3, ...) şeklinde isimler verilmiştir. Tablo 6.2’de basma deneyi için üretilen numunelerin isimleri ve bu numunelere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 6.2 Basma deneyi için üretilen numune isimleri ve özellikleri.

Numune Adı	Hücre Formu	Numune İçerisindeki Hücre Sayısı (Adet)	Çekirdek Yüksekliği, h (mm)	Birim Hücre Alanı (mm ²)
* B1, B2, B3	Kare	16	20	361
B4, B5, B6	Dikdörtgen	16	20	351
B7, B8, B9	Üçgen	16	20	353
B10, B11, B12	Kare + Köpüklü	16	20	361
B13, B14, B15	Kare + Delikli	16	20	361
B16, B17, B18	Kare + Delikli + Köpüklü	16	20	361
B19, B20, B21	Kare	16	10	361
B22, B23, B24	Kare	16	40	361
B25, B26, B27	Kare	4	20	1521
B28, B29, B30	Kare	64	20	81

*B: Basma numunesi

Üretimi tamamlanan üç nokta eğme deneyi numunelerine E (E1, E2, E3, ...) şeklinde isimler verilmiştir. Tablo 6.3'te üç nokta eğme deneyi için üretilen numunelerin isimleri ve bu numunelere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 6.3 Üç nokta eğme deneyi için üretilen numune isimleri ve özellikleri.

Numune Adı	Hücre Formu	Numune İçerisindeki Hücre Sayısı (Adet)	Çekirdek Yüksekliği, h (mm)	Birim Hücre Alanı (mm ²)
* E1, E2, E3	Kare	32	20	361
E4, E5, E6	Dikdörtgen	32	20	351
E7, E8, E9	Üçgen	32	20	353
E10, E11, E12	Kare + Köpüklü	32	20	361
E13, E14, E15	Kare + Delikli	32	20	361
E16, E17, E18	Kare + Delikli + Köpüklü	32	20	361
E19, E20, E21	Kare	32	10	361
E22, E23, E24	Kare	32	40	361
E25, E26, E27	Kare	8	20	1521
E28, E29, E30	Kare	128	20	81

*E: Eğme numunesi

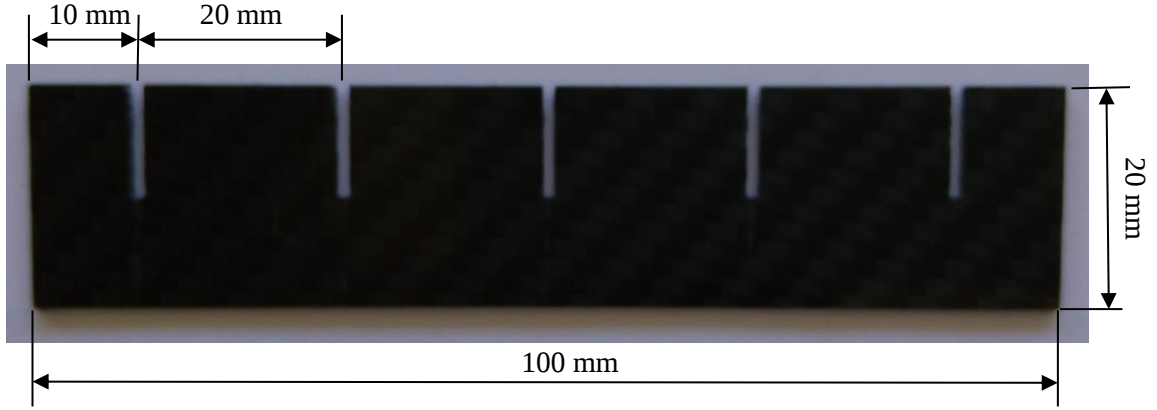
6.2.1. Basma Deneyi İçin Üretilen Numuneler

Basma deneyi için 10 farklı çekirdek yapısına sahip numune ve her numuneden üçer adet olmak üzere toplamda 30 adet numune üretilmiştir. Basma deneyi numunelerinin yüzeyleri yukarıda belirtildiği üzere 100 mm x 100 mm ölçülerinde olup Tablo 6.2'de isimlendirildiği şekliyle her bir numunenin çekirdek yapısına ait bilgiler aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.

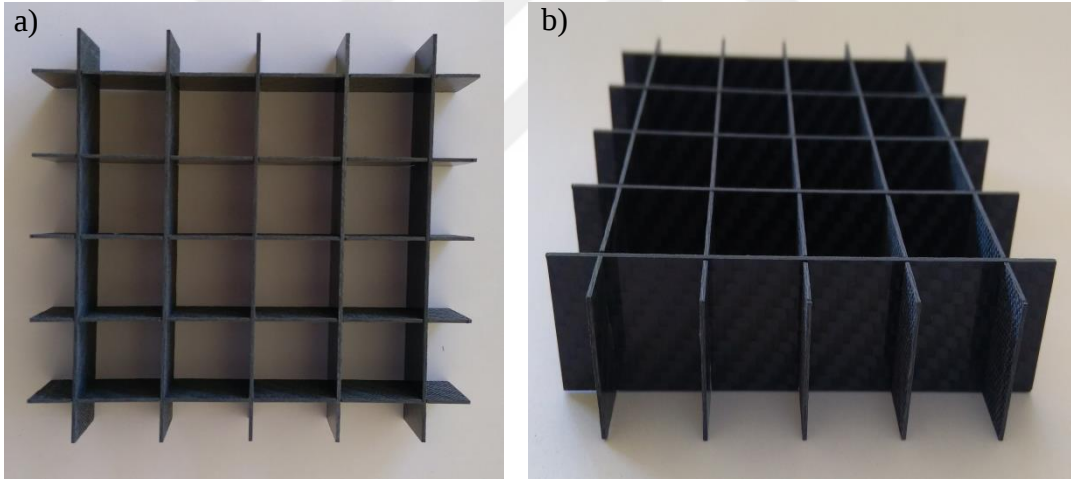
1) B1, B2 ve B3 numuneleri (kare hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapılarındaki hücre şekli kare olup boyutları 19 mm x 19 mm'dir. Hücre yüksekliği ise 20 mm'dir. Her bir numunenin çekirdek yapı imalatı için 10 adet kompozit şerit kullanılmıştır. Öncelikle karbon fiber kompozitlere 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 20 mm aralıklarla ve 10 mm derinliğinde 5 adet

kanal açılmış (Şekil 6.10) daha sonra iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak kare hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.11) üretilmiştir.



Şekil 6.10 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.

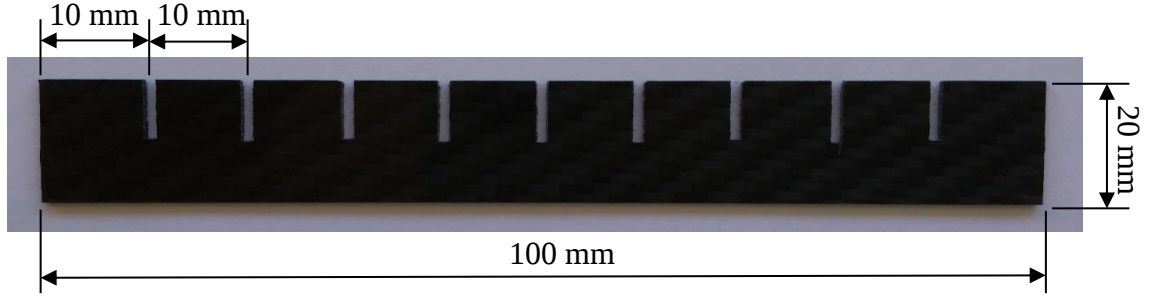


Şekil 6.11 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

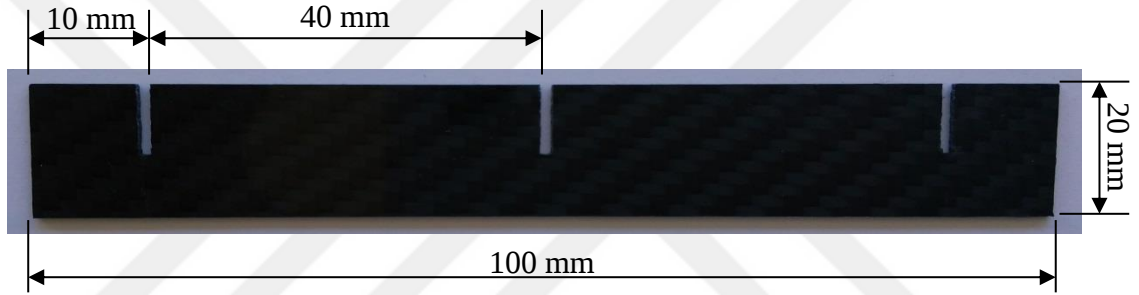
2) B4, B5 ve B6 numuneleri (dikdörtgen hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 12 adet karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. Karbon fiber kompozitlerin 9 tanesine 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 10 mm aralıklarla 9 adet (Şekil 6.12) ve 3 tanesine ise 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 40 mm aralıklarla 3 adet kanal açılmış (Şekil 6.13) ve daha sonra iç içe sıkı geçme tekniği

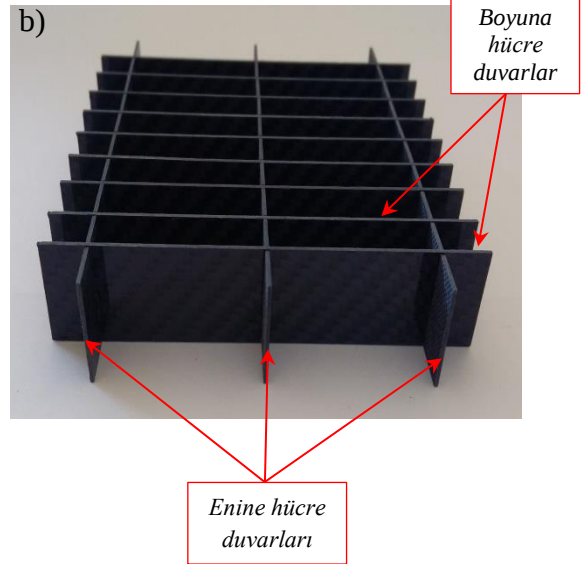
kullanılarak dikdörtgen hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.14) üretilmiştir. B4, B5 ve B6 numuneleri için hücre boyutları 39 mm x 9 mm'dir.



Şekil 6.12 10 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.



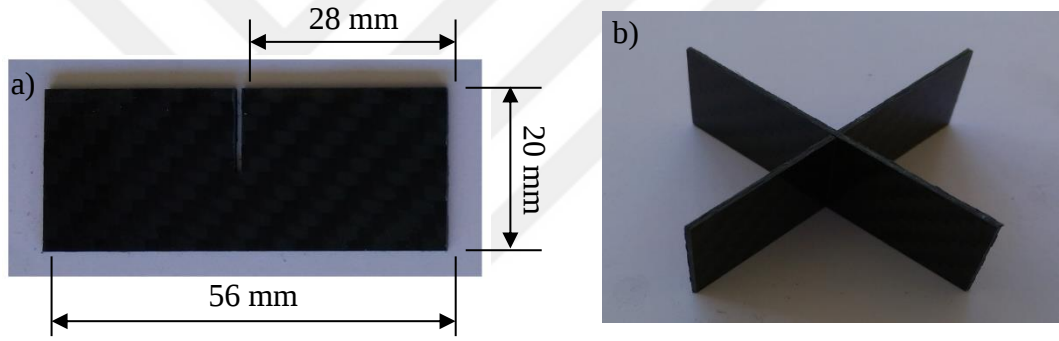
Şekil 6.13 40 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.



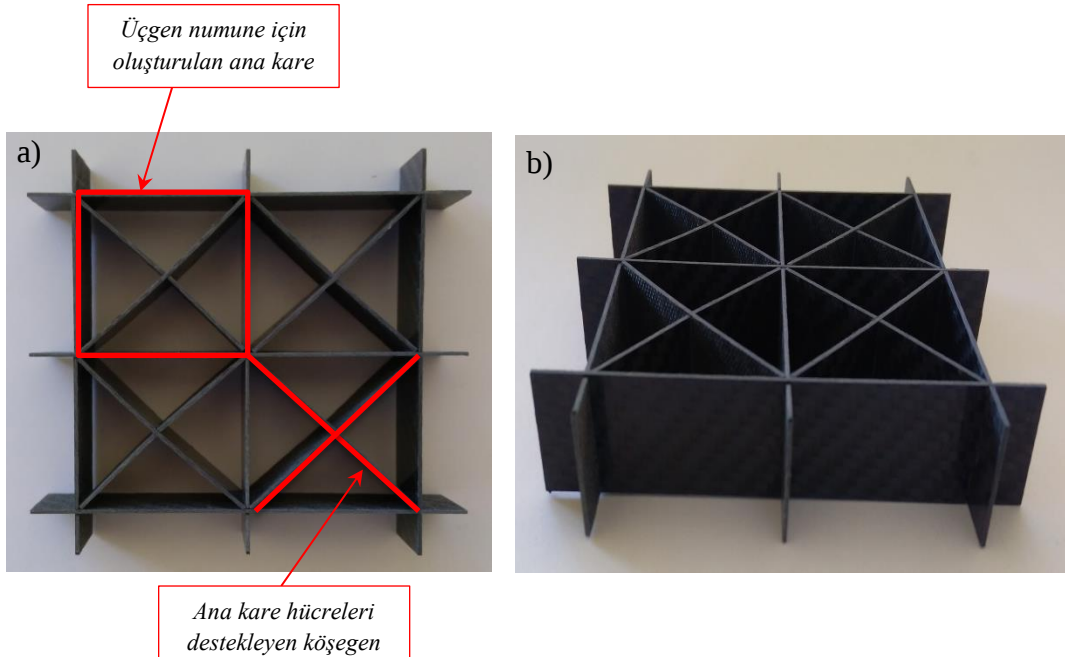
Şekil 6.14 16 hücreli dikdörtgen formdaki çekirdek yapısı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

3) B7, B8 ve B9 numuneleri (üçgen hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 6 adet, 20 mm yüksekliğinde ve 56 mm (kare hücrenin köşegen uzunluğu) uzunluğunda 8 adet karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. 20 mm x 100 mm ölçülerindeki karbon fiber kompozitler 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 40 mm aralıklarla 3 adet (Şekil 6.13) ve 20 mm x 56 mm ölçülerindeki karbon fiber kompozitler ise tam orta noktalarından 1 adet (Şekil 6.15a) kanal açılmıştır. Daha sonra öncelikle 4 hücreli çekirdek imal edilmiş (Şekil 6.26) ve ardından bu hücre boşluklarına 2 adet 56 mm boyundaki parçaların birleştirilmesiyle oluşturulan X parçaları (Şekil 6.15b) yerleştirilerek üçgen hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.16) elde edilmiştir.



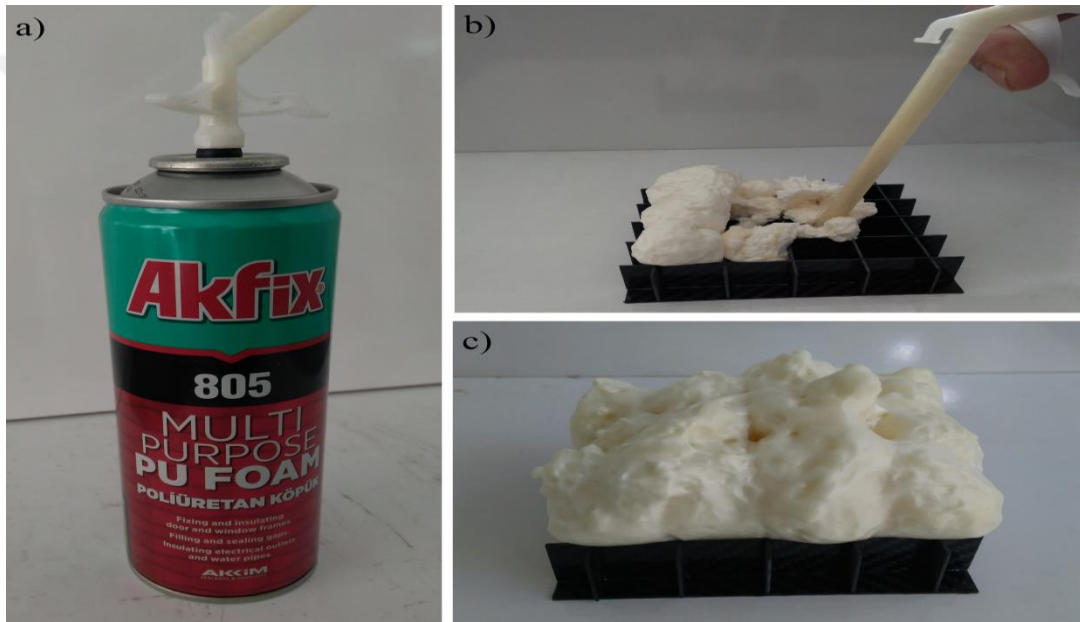
Şekil 6.15 a) Orta noktasına kanal açılmış karbon fiber kompozit b) X parçası.



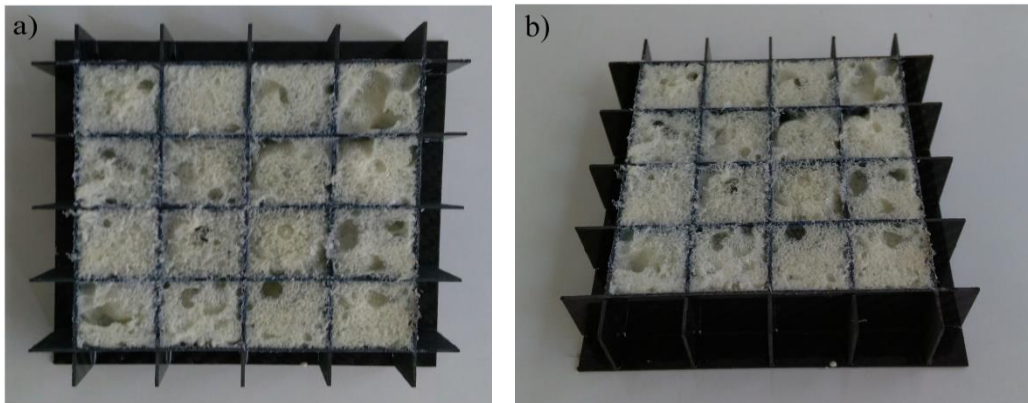
Şekil 6.16 16 hücreli üçgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

4) B10, B11 ve B12 numuneleri (kare + köpüklü hücre)

Bu numunelerin çekirdek imalatı B1, B2 ve B3 numuneleri ile aynıdır. Burada farklı olan nokta boş hücrelerin poliüretan köpük (Şekil 6.17a) doldurulmasıdır. Bu amaçla, bu tip çekirdek imalatı yapılırken öncelikle 16 hücreli kare çekirdek yapı imal edilmiş (Şekil 6.11) ve boş hücreler poliüretan köpükle doldurulmuştur (Şekil 6.17b). Daha sonra köpük kurumaya bırakılmış ve kuruma işleminin ardından fazlalıklar kesilerek kare + köpüklü hücre yapısına sahip çekirdek yapı (Şekil 6.18) elde edilmiştir.



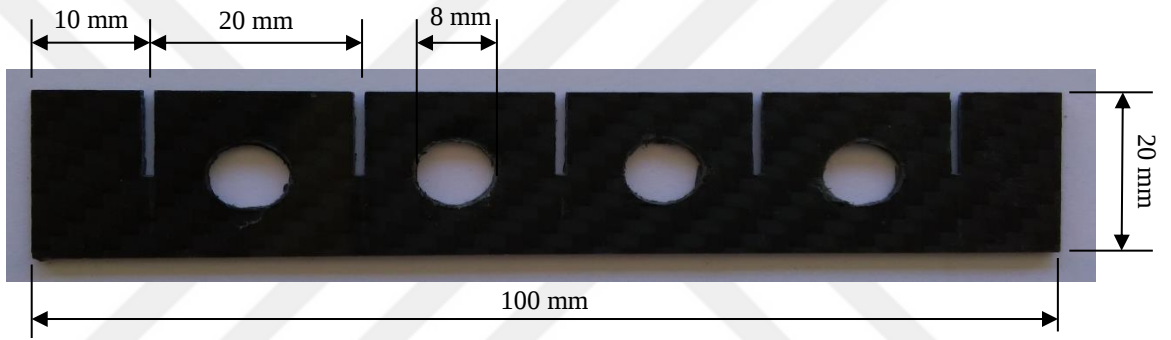
Şekil 6.17 a) Poliüretan köpük b) hücelere köpük doldurulması c) kurumuş haldeki köpük.



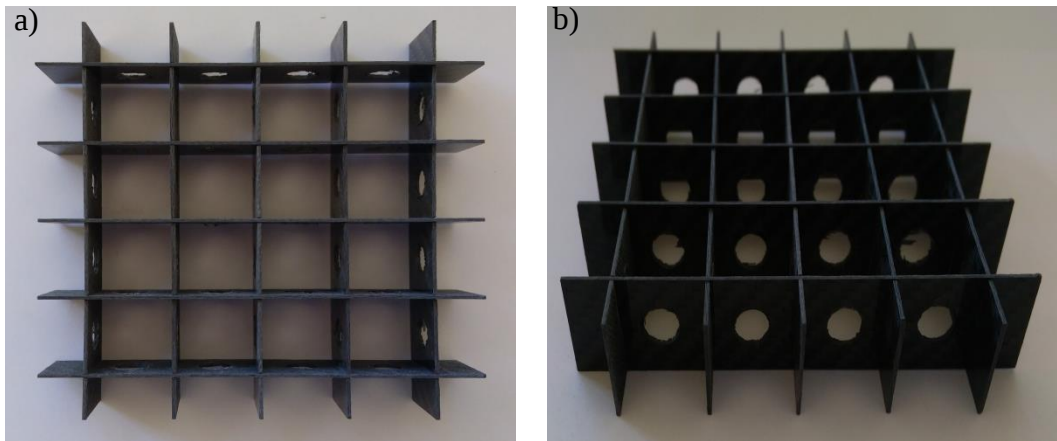
Şekil 6.18 16 hücreli kare + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

5) B13, B14 ve B15 numuneleri (kare + delikli hücre)

Bu numune tipi için çekirdek yapının imalatı yapılırken öncelikle 20 mm x 100 mm boyutlarında karbon fiber kompozit şerite 10 mm uç kısımlarda kalacak şekilde 20 mm aralıklarla 5 adet kanal açılmış (Şekil 6.10), sonrasında ise uygun aralıklarla 8 mm çapında delikler delinmiştir. Daha sonra delikli yapıdaki bu kompozit parçalar (Şekil 6.19) sıkı geçme yöntemi ile üretilerek delikli yapıdaki kare hücre yapısına sahip çekirdek yapı elde edilmiştir (Şekil 6.20). Bu deliklerin açılmasındaki amaç çekirdek yapının yoğunluğunu azaltarak bu numunelerin mukavemet/yoğunluk oranını B1, B2 ve B3 numuneleri ile karşılaştırmaktır.



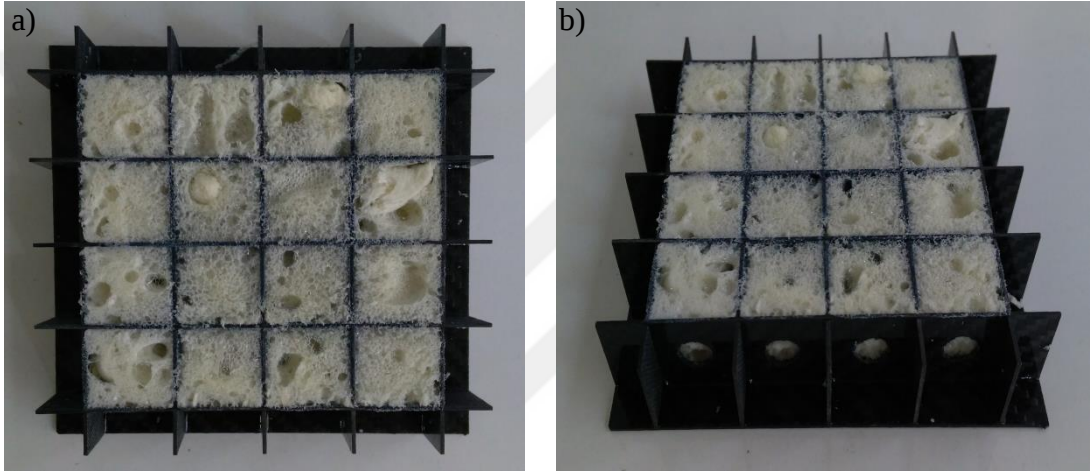
Şekil 6.19 20 mm aralıklarla kanal açılmış delikli yapıdaki karbon fiber kompozit.



Şekil 6.20 16 hücreli kare + delikli formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

6) B16, B17 ve B18 numuneleri (kare + delikli + köpüklü hücre)

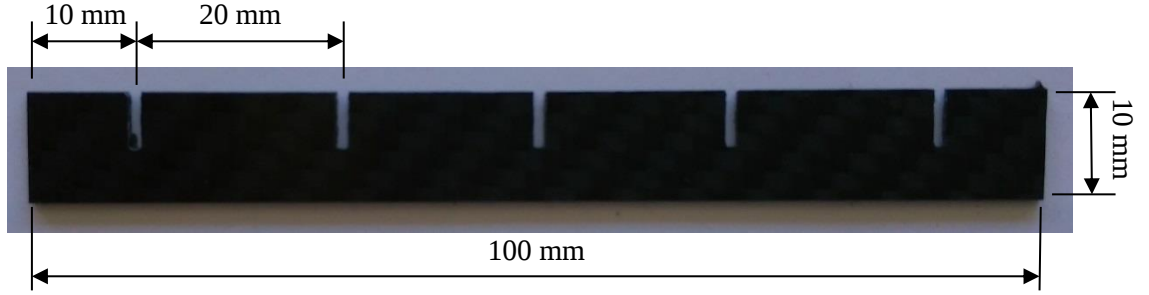
Bu numunelerin çekirdek imalatı B13, B14 ve B15 numuneleri ile aynıdır. Bu numune tipi için kare hücre formundaki çekirdek yapıya delikler açılarak yoğunluğu azaltılmış olup bunun yerine hücre boşlukları poliüretan köpükle doldurulmuştur. Bu yüzden numune üretimi yapılırken öncelikle kare ve delikli yapıda 16 hücreli çekirdek yapı imal edilmiş (Şekil 6.20) ve sonrasında boş hücelere poliüretan köpük (Şekil 6.17a) doldurularak kare hücre formunda delikli ve köpüklü çekirdek yapı (Şekil 6.21) elde edilmiştir.



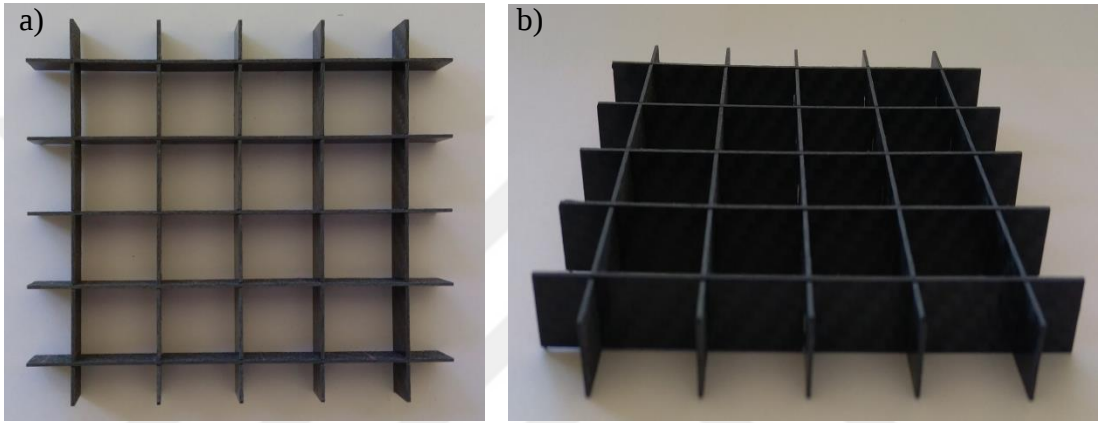
Şekil 6.21 16 hücreli kare + delikli + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

7) B19, B20 ve B21 numuneleri (10 mm yüksekliğinde kare hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 10 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 10 adet karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle karbon fiber kompozitlere 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 20 mm aralıklarla ve 5 mm derinliğinde 5 adet kanal açılmış (Şekil 6.22) daha sonra iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak kare hücre formuna sahip olan 10 mm yüksekliğindeki çekirdek yapı (Şekil 6.23) üretilmiştir.



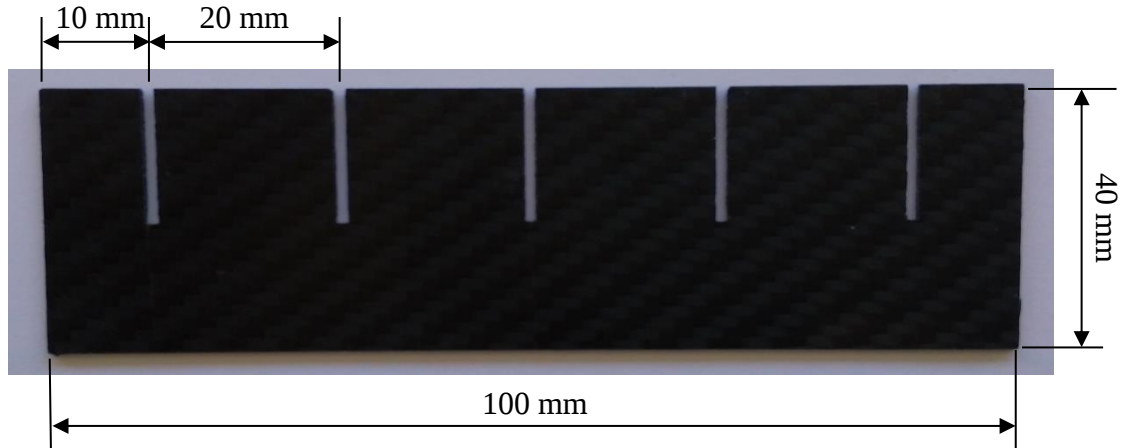
Şekil 6.22 10 mm yüksekliğinde 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.



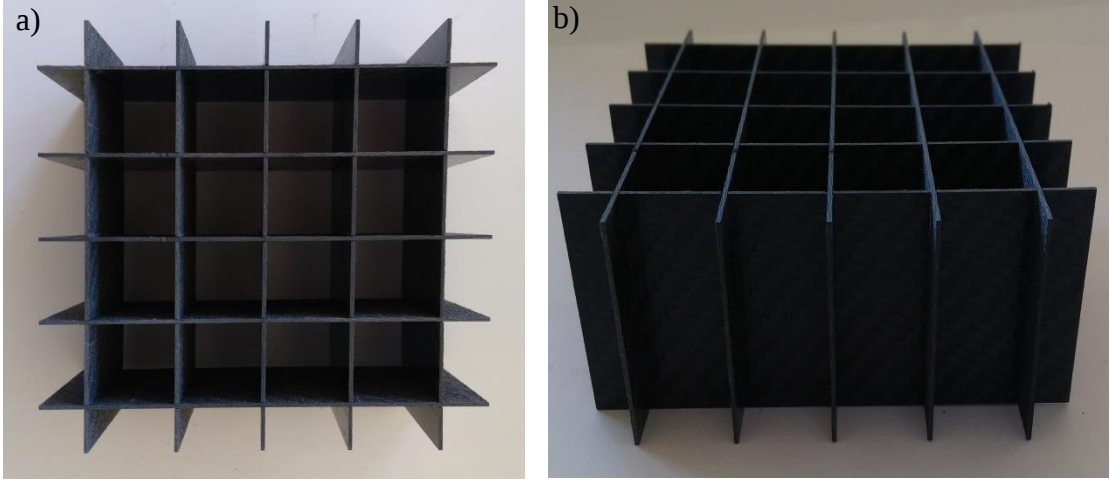
Şekil 6.23 10 mm yüksekliğe sahip 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

8) B22, B23 ve B24 numuneleri (40 mm yüksekliğinde kare hücre)

Bu numuneler B19, B20 ve B21 numuneleri ile aynı olup, tek farkları 40 mm yüksekliğe sahip olmalarıdır (Şekil 6.24-6.25).



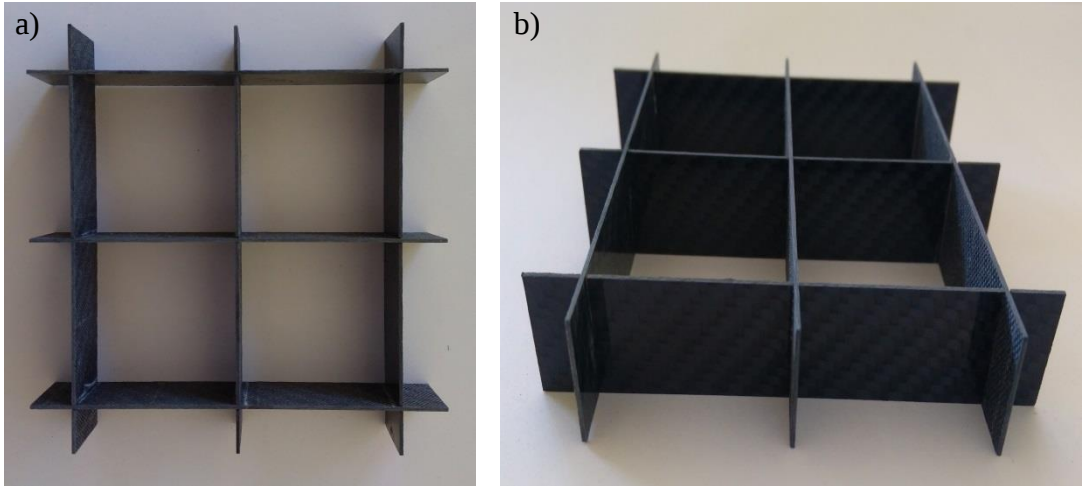
Şekil 6.24 40 mm yüksekliğinde 20 mm aralıklarla kanal açılmış karbon fiber kompozit.



Şekil 6.25 40 mm yüksekliğe sahip 16 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

9) B25, B26 ve B27 numuneleri (4 hücreli kare çekirdek yapı)

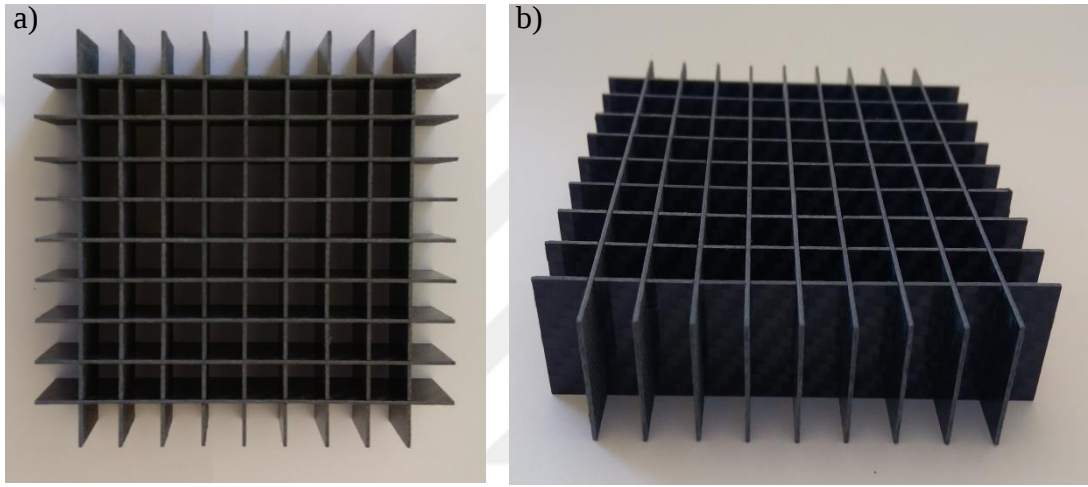
Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 6 adet kompozit şeritin bir araya gelmesinden oluşmuştur. Bu kompozit malzemelere öncelikle 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 40 mm aralıklarla 3 adet 10 mm derinliğinde kanallar açılmış (Şekil 6.13), sonrasında ise sıkı geçme ile 4 hücreli kare çekirdek yapının üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.26).



Şekil 6.26 4 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

10) B28, B29 ve B30 numuneleri (64 hücreli kare çekirdek yapı)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 18 adet kompozit şeritin bir araya gelmesinden oluşmuştur. Bu kompozit malzemelere öncelikle 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 10 mm aralıklarla 9 adet 10 mm derinliğinde kanallar açılmış (Şekil 6.12), sonrasında ise sıkı geçme ile 64 hücreli kare çekirdek yapının üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.27).



Şekil 6.27 64 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

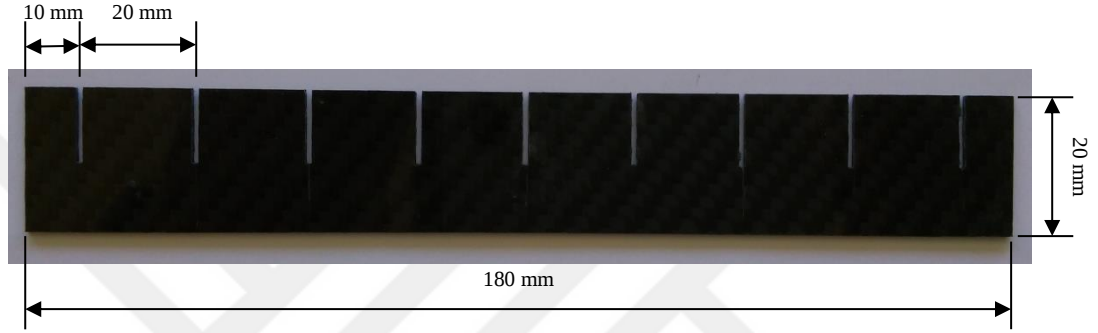
6.2.2. Üç Nokta Eğme Deneyi İçin Üretilen Numuneler

Üç nokta eğme deneyi için 10 farklı çekirdek yapısına sahip numune ve her numuneden üçer adet olmak üzere toplamda 30 adet numune üretilmiştir. Üç nokta eğme deney numunelerinin yüzey kapakları 100 mm x 180 mm ölçülerinde olup Tablo 6.3'te isimlendirildiği şekliyle her bir numunenin çekirdek yapısına ait bilgiler aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.

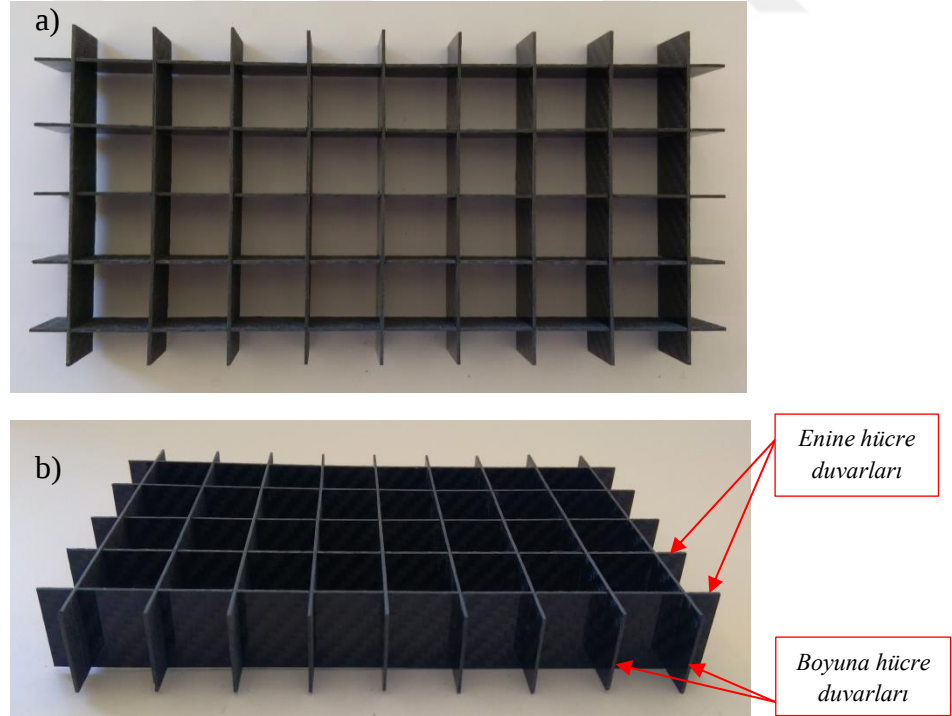
1) E1, E2 ve E3 numuneleri (kare hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları, 20 mm yükseklik ve 100 mm uzunluğunda 9 adet karbon fiber kompozit ile 20 mm yükseklik ve 180 mm uzunluğunda 5 adet

karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle karbon fiber kompozitlere 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde, 100 mm uzunluğundaki parçalar için 5 adet (Şekil 6.10) ve 180 mm uzunluğundaki parçalar için 9 adet (Şekil 6.28) olacak şekilde 20 mm aralıklarla ve 10 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Daha sonra iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak kare hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.29) üretilmiştir.



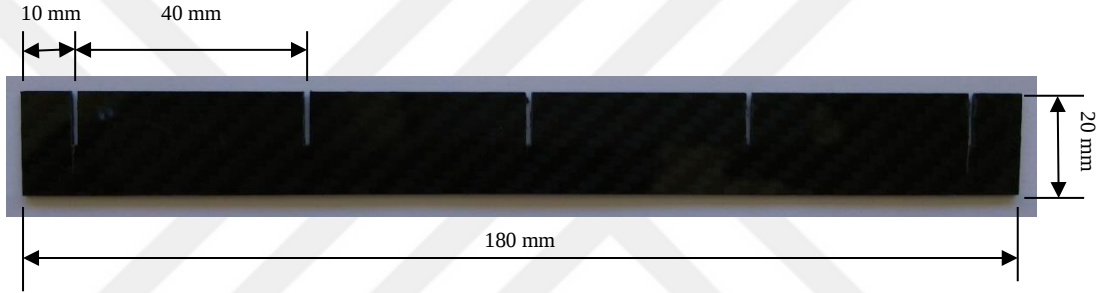
Şekil 6.28 20 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.



Şekil 6.29 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

2) E4, E5 ve E6 numuneleri (dikdörtgen hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 5 adet karbon fiber kompozit ile 20 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğunda 9 adet karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle karbon fiber kompozitlere 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde, 100 mm uzunluğundaki parçalar için 10 mm aralıklarla 9 adet (Şekil 6.12) ve 180 mm uzunluğundaki parçalar için 40 mm aralıklarla 5 adet (Şekil 6.30) 10 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Daha sonra iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak dikdörtgen hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.31) üretilmiştir.



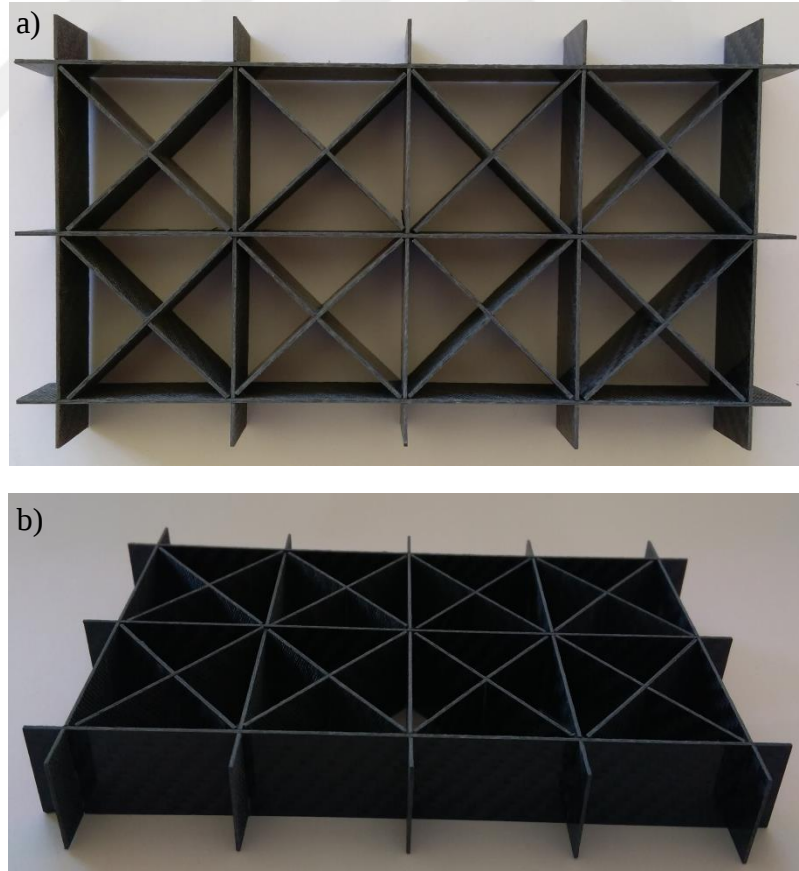
Şekil 6.30 40 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.



Şekil 6.31 32 hücreli dikdörtgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

3) E7, E8 ve E9 numuneleri (üçgen hücre)

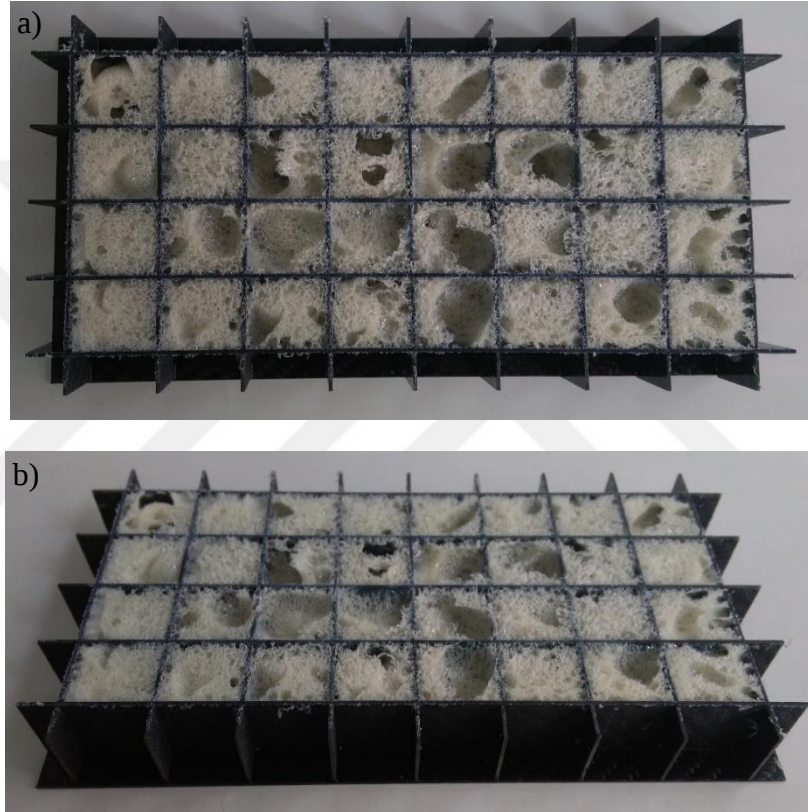
Bu numunelerin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda 5 adet, 20 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğunda 3 adet ve 20 mm yüksekliğinde ve 56 mm (kare hücrenin köşegen uzunluğu) uzunluğunda 16 adet karbon fiber kompozit şerit kullanılarak üretilmiştir. Üretim için 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde 100 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozitlere 40 mm aralıklarla 3 adet (Şekil 6.13), 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozitlere 40 mm aralıklarla 5 adet (Şekil 6.30) ve 56 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozitlere ise tam orta noktalarından 1 adet (Şekil 6.15a) 10 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Daha sonra, öncelikle 8 hücreli çekirdek imal edilmiş (Şekil 6.42) ve ardından bu hücre boşluklarına 2 adet 56 mm boyundaki parçaların birleştirilmesiyle oluşturulan X parçaları (Şekil 6.15b) yerleştirilerek üçgen hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.32) elde edilmiştir.



Şekil 6.32 32 hücreli üçgen formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

4) E10, E11 ve E12 numuneleri (kare + köpüklü hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları E1, E2 ve E3 numuneleri ile aynı olup kare hücre yapısına sahiptir. Çekirdek yapının imalatı yapılırken öncelikle 32 hücreli kare hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.29) üretilmiş sonrasında ise hücre boşlukları poliüretan köpükle (Şekil 6.17a) doldurularak kare + köpüklü hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.33) elde edilmiştir.

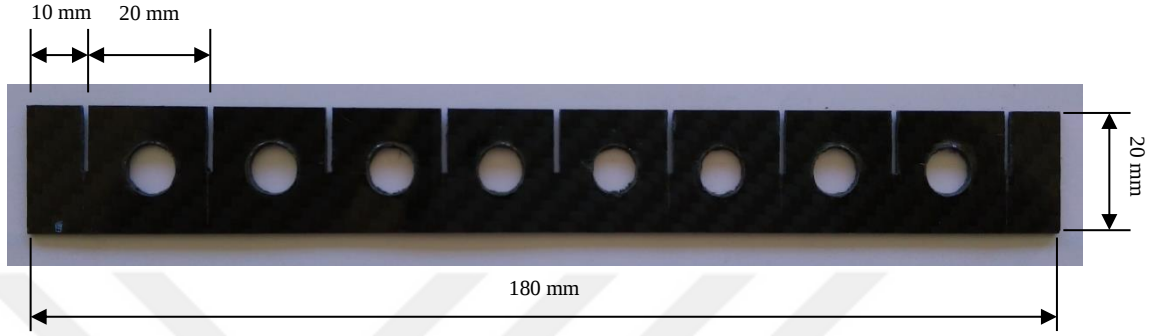


Şekil 6.33 32 hücreli kare + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

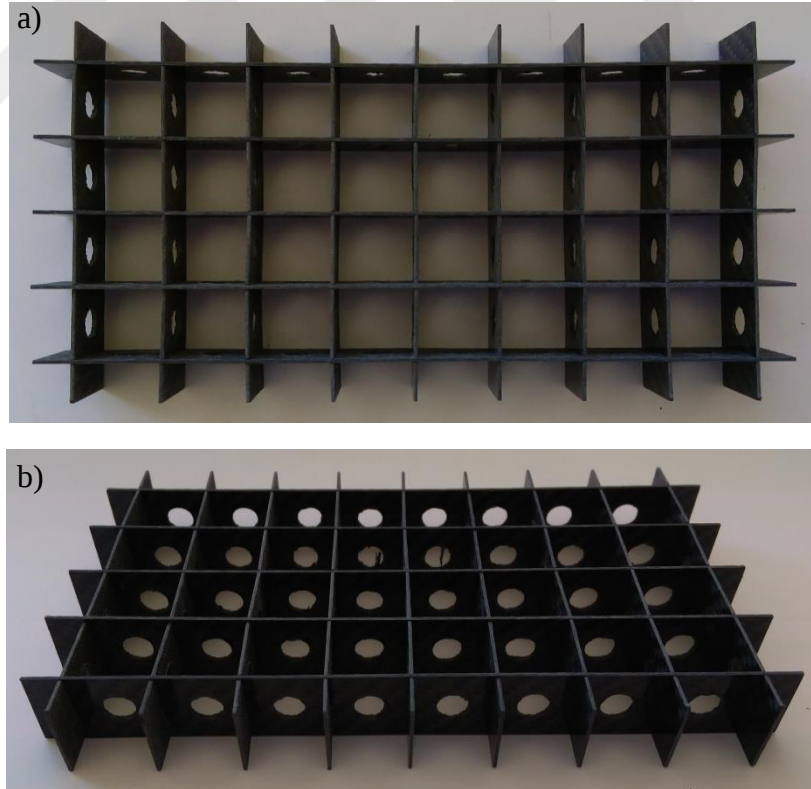
5) E13, E14 ve E15 numuneleri (kare + delikli hücre)

Bu numunelerin çekirdek yapıları, 20 mm yükseklik ve 100 mm uzunluğunda 9 adet karbon fiber kompozit ile 20 mm yükseklik ve 180 mm uzunluğunda 5 adet karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle karbon fiber kompozitlere 10'ar mm uç kısımlarda kalacak şekilde, 100 mm uzunluğundaki parçalar için 5 adet (Şekil 6.10) ve 180 mm uzunluğundaki parçalar için 9 adet (Şekil 6.28) olacak şekilde 20 mm aralıklarla ve 10mm derinliğinde kanallar açılmıştır.

Sonrasında ise yoğunluğu azaltmak amacıyla 100 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozite 4 adet (Şekil 6.19) ve 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozite ise 8 adet (Şekil 6.34) 8 mm çapında delikler açılmıştır. Daha sonra delikli yapıdaki bu karbon fiber kompozitler iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak kare + delikli hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.35) üretilmiştir.



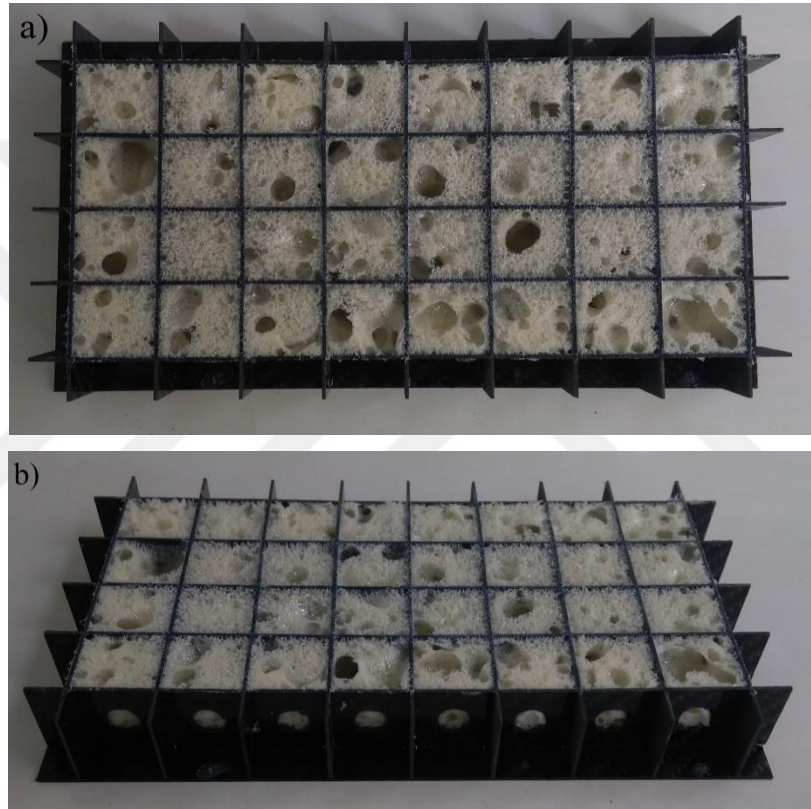
Şekil 6.34 20 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki delikli karbon fiber kompozit.



Şekil 6.35 32 hücreli kare + delikli formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

6) E16, E17 ve E18 numuneleri (kare + delikli + köpüklü hücre)

Bu numunelerin çekirdek üretimleri E13, E14 ve E15 numuneleri ile aynıdır. Bu amaçla, öncelikle kare + delikli hücre yapısına sahip çekirdek (Şekil 6.35) üretilmiş sonrasında ise hücre boşlukları poliüretan köpükle (Şekil 6.17a) doldurularak kare + delikli + köpüklü hücre formuna sahip çekirdek (Şekil 6.36) yapı elde edilmiştir.

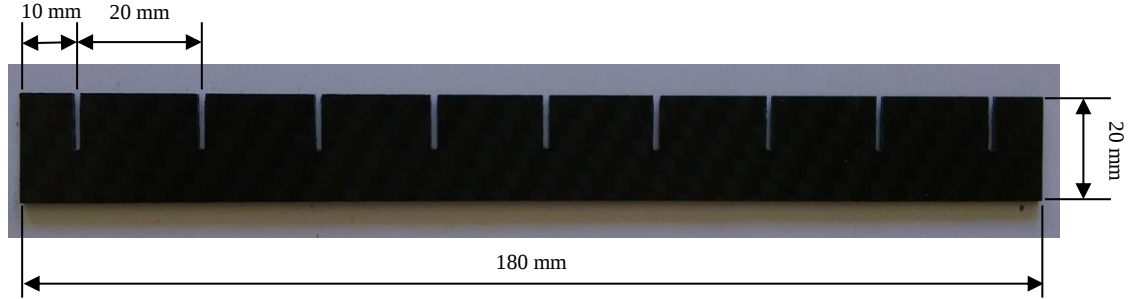


Şekil 6.36 32 hücreli kare + delikli + köpüklü formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

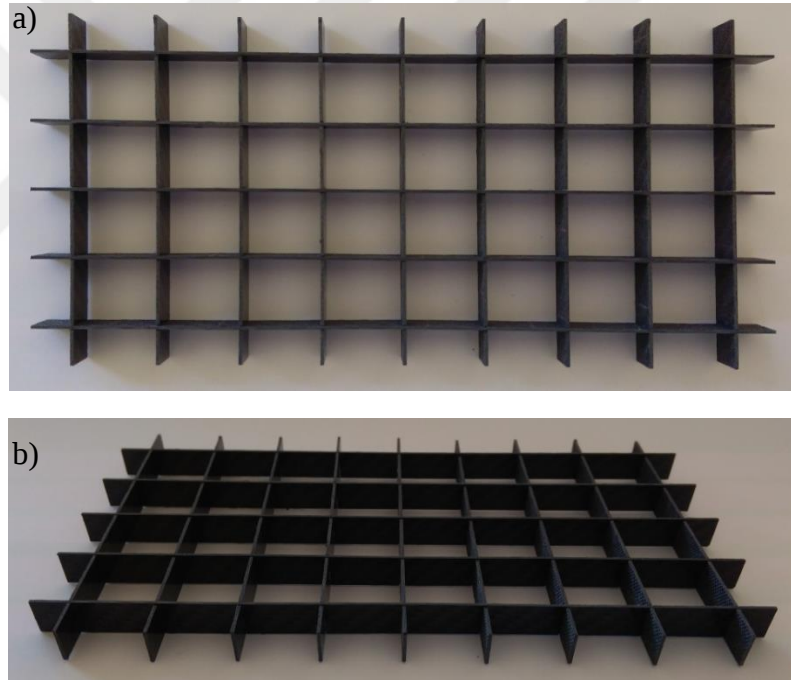
7) E19, E20 ve E21 numuneleri (10 mm yüksekliğinde kare hücre)

Bu numune tipinin çekirdek yapısı 10 mm yüksekliğinde, 100 mm uzunluğunda 9 adet ve 10 mm yüksekliğinde, 180 mm uzunluğunda 5 adet karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle bu karbon fiber kompozit parçaların uç kısımlarında 10'ar mm bırakılarak, kanallar arası 20 mm olacak şekilde 100 mm uzunluğundaki parçalara 5 adet (Şekil 6.22) ve 180 mm uzunluğundaki parçalara 9

adet (Şekil 6.37) 5 mm derinliğinde kanallar açılmış sonrasında ise sıkı geçme yöntemiyle 10 mm yüksekliğe sahip kare formdaki çekirdek yapı (Şekil 6.38) elde edilmiştir.



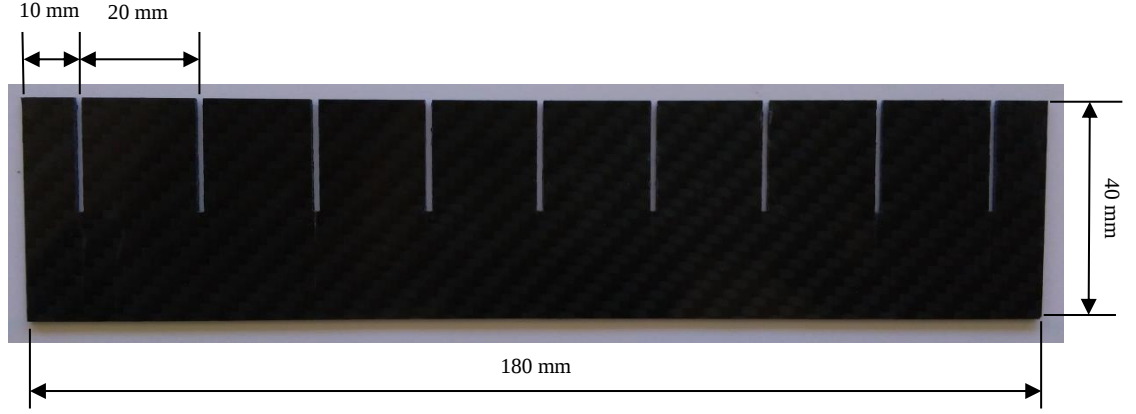
Şekil 6.37 20 mm aralıklarla kanal açılmış 10 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.



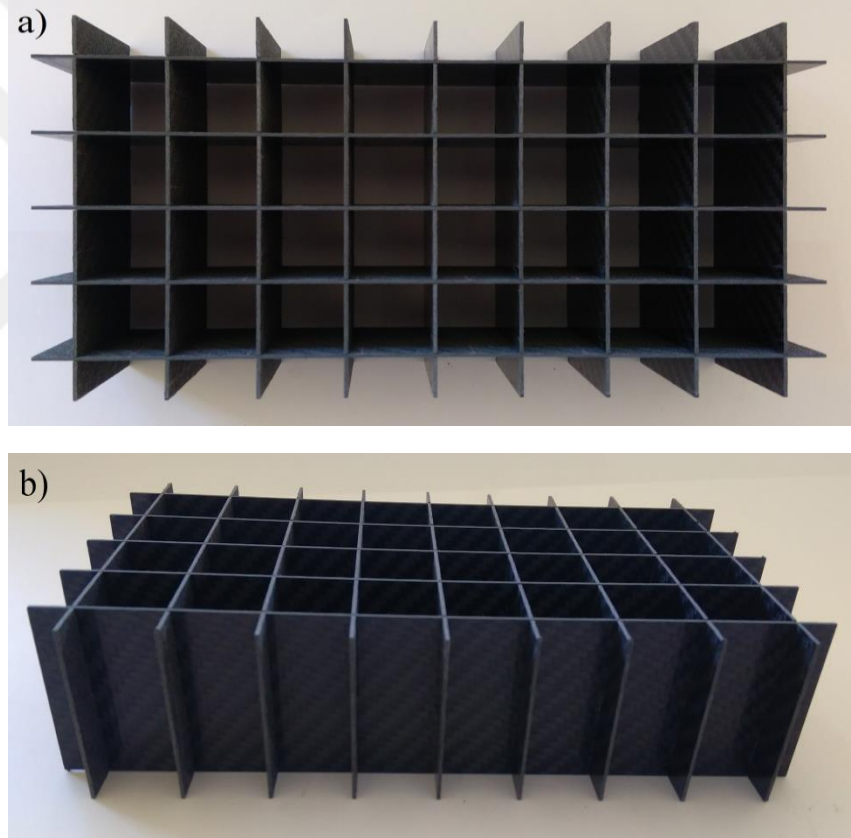
Şekil 6.38 10 mm yüksekliğe sahip 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

8) E22, E23 ve E24 numuneleri (40 mm yüksekliğinde kare hücre)

Bu numuneler E19, E20 ve E21 numuneleri ile aynı hücre boyutlarına sahiptir. Tek fark numunelerin çekirdek yüksekliği olup, bu değer bu grup için 40 mm'dir (Şekil 4.39-6.40)



Şekil 6.39 20 mm aralıklarla kanal açılmış 40 mm yüksekliğinde ve 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.

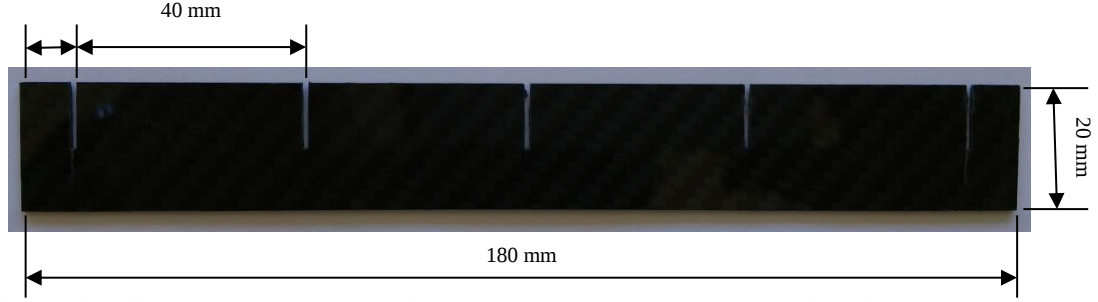


Şekil 6.40 40 mm yüksekliğe sahip 32 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

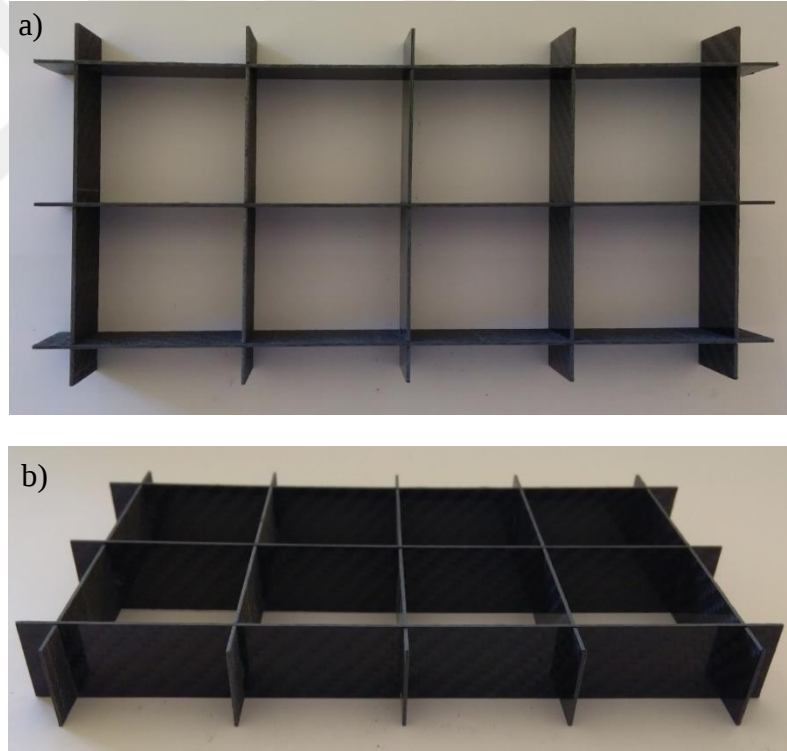
9) E25, E26 ve E27 numuneleri (4 hücreli kare çekirdek yapı)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 5 adet 20 mm yüksekliğinde ve 100 mm uzunluğunda karbon fiber kompozit ile 3 adet 20 mm yüksekliğinde ve 180 mm

uzunluğunda karbon fiber kompozitten oluşmaktadır. Üretim için 100 mm uzunluğundaki kompozit parçalara 3 adet (Şekil 6.13) ve 180 mm uzunluğundaki kompozitlere ise 5 adet (Şekil 6.41) 40 mm aralıklarla ve 10 mm derinliğinde kanallar açılarak sıkı geçme ile 8 hücreli kare formda çekirdek yapı (Şekil 6.42) elde edilmiştir.



Şekil 6.41 40 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.

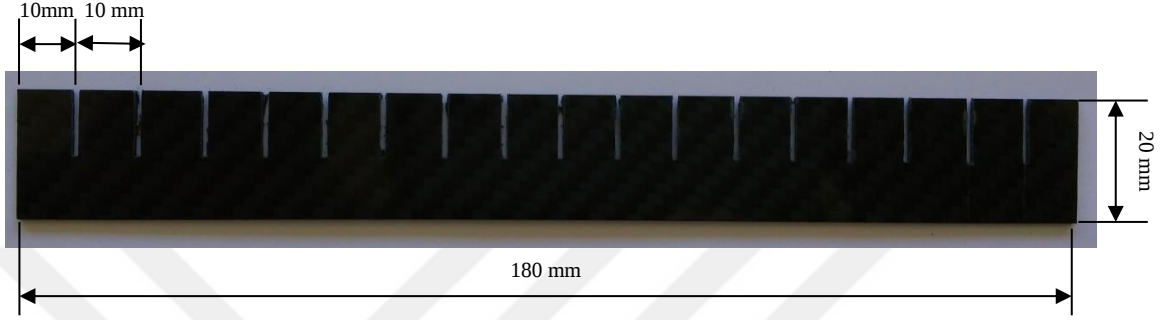


Şekil 6.42 8 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

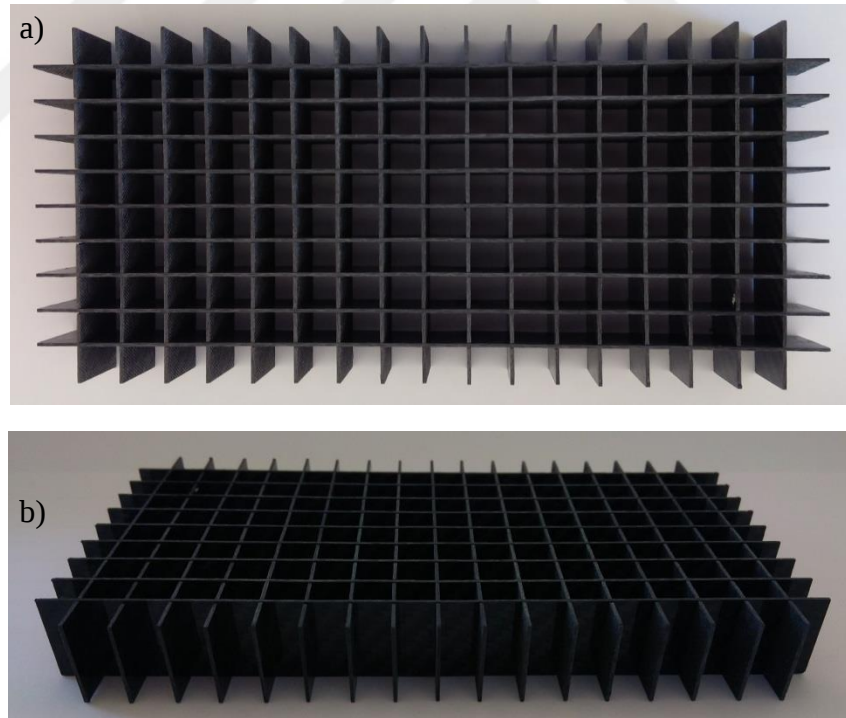
10) E28 , E29 ve E30 numuneleri (128 hücreli kare çekirdek yapı)

Bu numunelerin çekirdek yapıları 17 adet 20 x 100 mm ve 9 adet 20 x 180 mm ölçülerinde karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak üretilmiştir. Üretim için 100

mm uzunluğundaki parçalara 9 adet (Şekil 6.12) ve 180 mm uzunluğundaki parçalara ise 17 adet (Şekil 6.43) 10 mm aralıklarla ve 10 mm derinliğinde kanallar açılmış ve daha sonra sıkı geçme ile 128 hücreli kare hücre formuna sahip çekirdek yapının (Şekil 6.44) üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.43 10 mm aralıklarla kanal açılmış 180 mm uzunluğundaki karbon fiber kompozit.



Şekil 6.44 128 hücreli kare formdaki çekirdek yapı a) üstten görünüş b) perspektif görünüş.

7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Üretimi yapılan deney numunelerinin basma ve üç nokta eğme deneyleri *Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında* bulunan 300 kN kapasiteli “*Mohr Federhaff Losenhausen*” marka universal çekme-basma test cihazı (Şekil 7.1) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde numunelerin basma ve üç nokta eğme deneylerinden elde edilen grafikler ayrı başlıklar altında sunulmuş ve farklı tip çekirdek yapısına sahip numuneler için test sonuçları karşılaştırılmıştır.



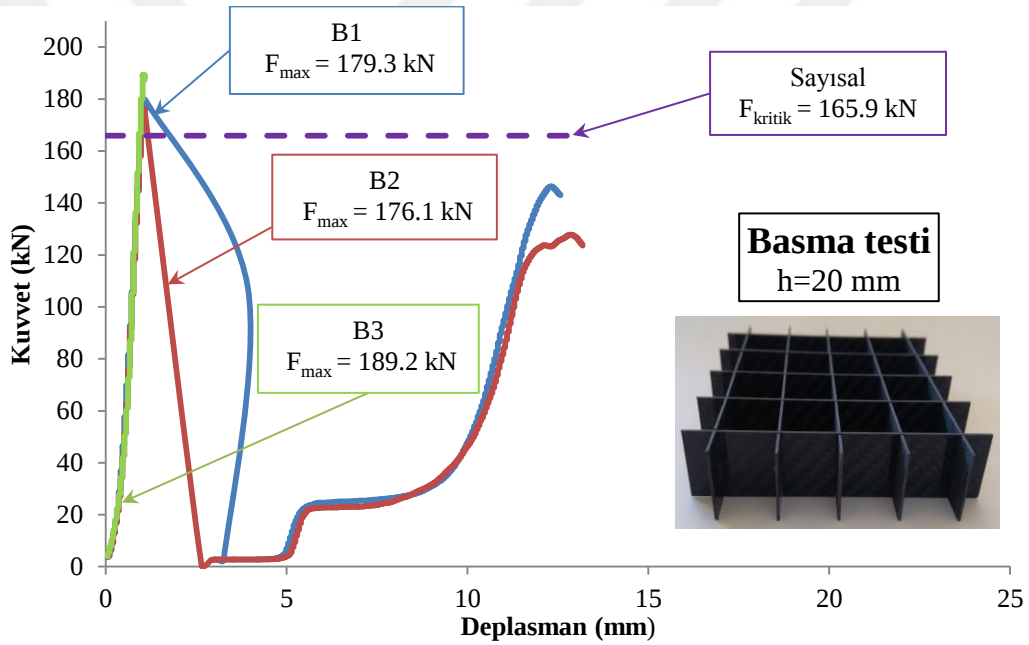
Şekil 7.1 Basma-çekme test cihazı.

7.1.Basma Deney Sonuçları

Bu bölümde, daha önce üretilmiş olan 10 farklı tipte çekirdek yapısına sahip sandviç kompozitlere basma deneyi uygulanmıştır. Bu deney için kullanılan numunelerin yüzey ölçüleri 100 x 100 mm'dir. Deneyde her bir tip numune için 3'er adet olmak üzere toplamda 30 adet numunenin basma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda, statik bir test elde etmek için 0.5 mm/dakika'lık düşük bir sıkıştırma hızı kullanılmıştır.

Şekil 7.2'de B1, B2 ve B3 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip kare hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm² alana sahiptir. Kare çekirdek yapısına sahip numuneler için maksimum basma dayanımı 189.2 kN, minimum basma dayanımı 176.1 kN ve ortalama basma dayanımının 181.7 kN olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi 3. Numuneye, 189.2 kN' a kadar bir basma yükü uygulanmış fakat bu basma yüküne kadar numunede herhangi bir deformasyon meydana gelmediği için deney bu noktada sonlandırılmıştır.

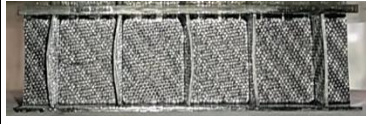
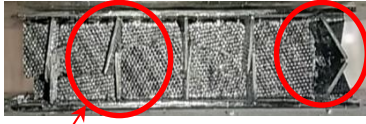
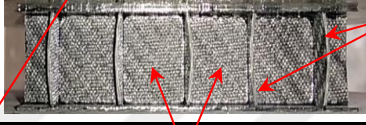


Şekil 7.2 B1, B2 ve B3 numunelerine ait kuvvet - deplasman grafiği.

Tablo 7.1'de kare hücreli çekirdek yapısına sahip olan B1 ve B3 numunelerine ait basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Bu tablonun 1. sütununda deney görüntüsü verilen numune, 2. sütununda numunelerin maksimum basma dayanımından (F_{max}) hemen önceki, çekirdeğin burkulma aşaması ve 3. sütununda ise numunelerin maksimum basma dayanımından sonraki, çekirdeğin deforme olmuş hali gösterilmektedir. B3 numunesi, basma deneyi esnasında deformasyona uğramadığı için tabloda F_{max} öncesi ve sonrasına ait görüntüler aynı olarak görülmektedir. Deney sırasında B2 numunesine ait görüntü elde edilemediği için tabloda, bu numuneye ait

görüntüler verilmemiştir. B1 numunesine ait görüntü incelendiğinde hasar öncesinde enine ve boyuna hücre duvarlarında burkulmanın olduğu ve hasarın hücre duvarı ortasında kırılma ile gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 7.1 Basma yükü altındaki kare hücre yapısına sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B1		
B3		

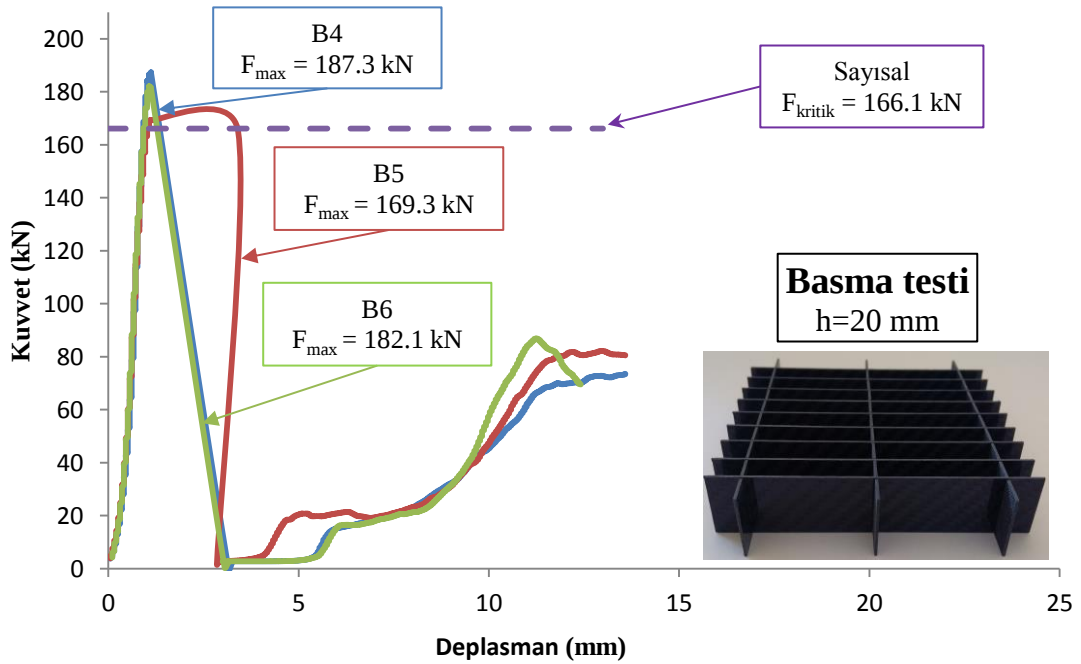
Kırılma hasarı

Boyuna hücre duvarları

Ezilme hasarı

Enine hücre duvarı

Şekil 7.3'te B4, B5 ve B6 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip dikdörtgen hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 351 mm² alana sahiptir.

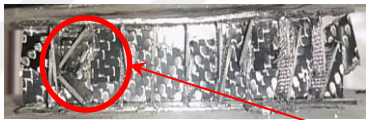


Şekil 7.3 B4, B5 ve B6 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

Dikdörtgen çekirdek yapısına sahip bu numuneler için maksimum basma dayanımı 187.3 kN, minimum basma dayanımı 169.3 kN ve ortalama basma dayanımı 179.6 kN olarak belirlenmiştir. B1, B2 ve B3 numuneleri ile yaklaşık aynı hücre alanına sahip olan bu numunelerin ortalama basma dayanımları da yaklaşık olarak aynıdır.

Tablo 7.2’de dikdörtgen hücreli çekirdek yapısına sahip sandviç levhanın basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. B4, B5 ve B6 numunelerindeki hasarlar, enine ve boyuna hücre duvarlarında burkulmadan dolayı kırılma ve ezilme hasarları şeklinde gerçekleşmiştir.

Tablo 7.2 Basma yükü altındaki dikdörtgen hücre yapısına sahip numuneler.

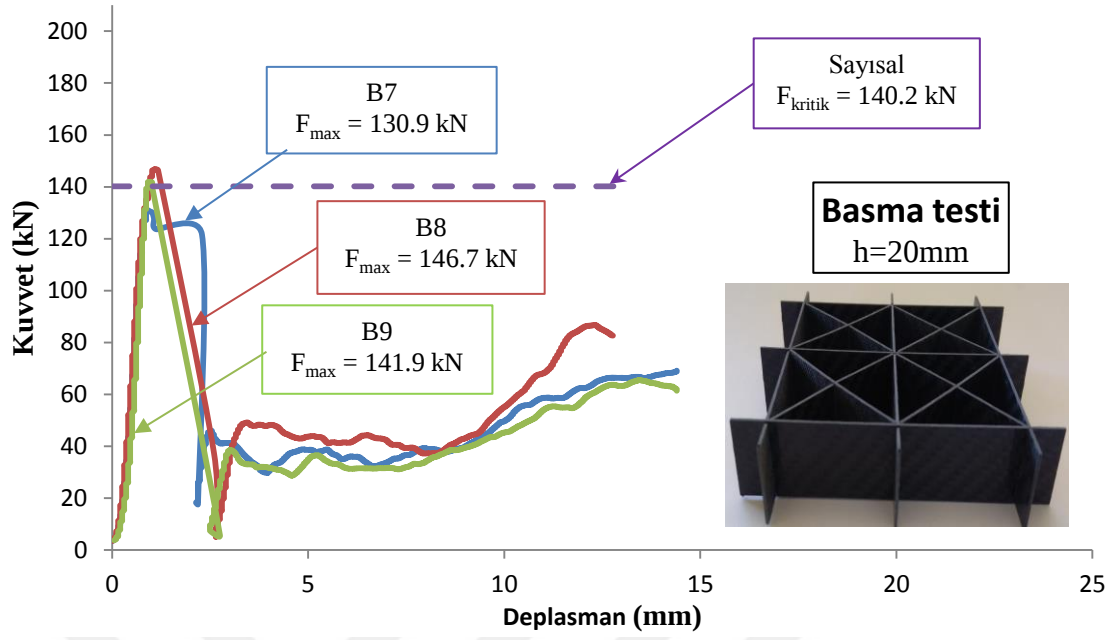
Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B4		
B5		
B6		

Kırılma hasarı

Hücre duvarı burkulması

Ezilme hasarı

Şekil 7.4’te B7, B8 ve B9 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip üçgen hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 353 mm² alana sahiptir. Üçgen çekirdek yapısına sahip bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 146.7 kN, minimum basma dayanımı 130.9 kN ve ortalama basma dayanımı 139.9 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.4 B7, B8 ve B9 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

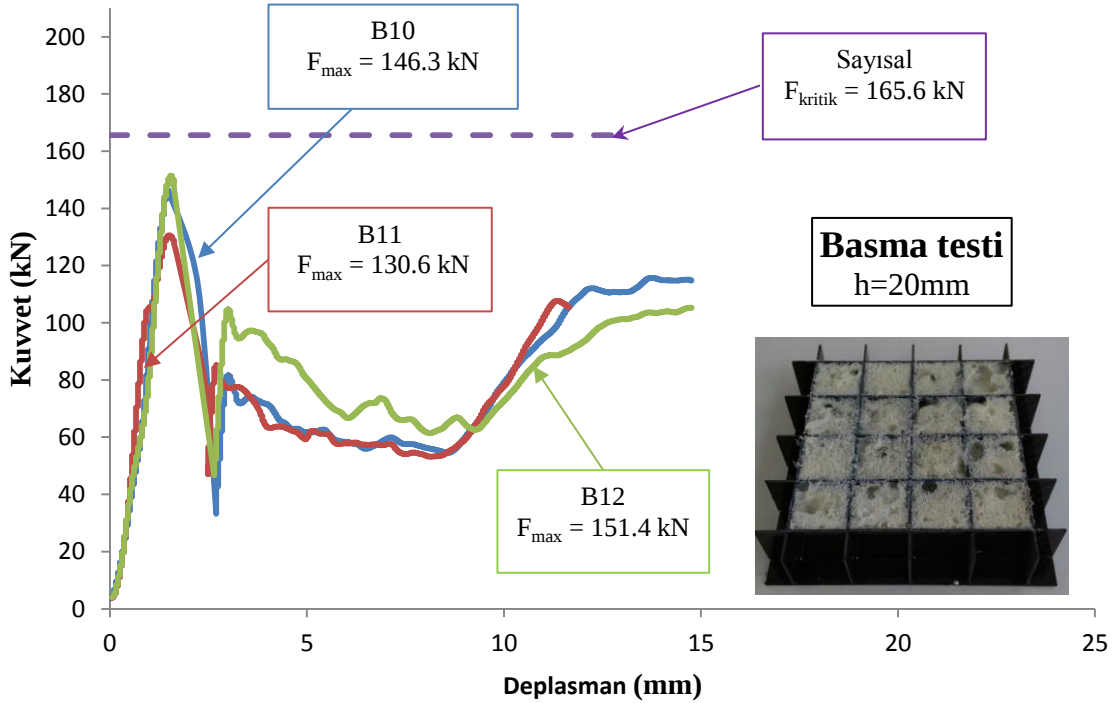
Tablo 7.3'te üçgen hücreli çekirdek yapısına sahip olan B7 ve B9 numunelerine ait basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Deney sırasında B8 numunesine ait görüntü elde edilemediği için tabloda, bu numuneye ait görüntüler verilmemiştir.

Tablo 7.3 Basma yükü altındaki üçgen hücre yapısına sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B7		 <i>Enine hücre duvarında lokal çatlak</i>
B9		 <i>Kırılma hasarı</i>

Aynı çekirdek yüksekliği ($h=20\text{mm}$) için kare ve dikdörtgen numunelerle yaklaşık aynı hücre alanına sahip olan üçgen kesitli numunelerde (B7, B8 ve B9) maksimum basma hasar yükü kare ve dikdörtgene göre %22.5 kadar daha düşüktür. Bu tip numunelerde meydana gelen burkulma hasarları, kare kesitteki gibi orta noktada değil levha tabanına yakın bir yerde meydana gelirken, ek olarak hücre duvarlarında lokal çatlakların olduğu görülmektedir. Kare kesite göre bu tip numunelerde hem enine hem de boyuna hücre duvar sayısının daha az olduğunu vurgulamak gerekir. Köşegen şeritlerin asıl desteklediği kısımlar ana kare hücrenin içidir (Şekil 6.16).

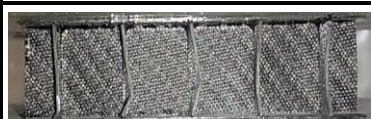
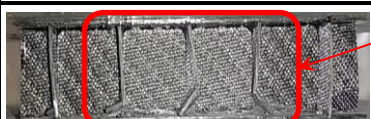
Şekil 7.5'te B10, B11 ve B12 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip poliüretan köpük dolgulu kare hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm^2 alana sahiptir. Poliüretan köpük dolgulu kare hücre yapısına sahip bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 151.4 kN, minimum basma dayanımı 130.6 kN ve ortalama basma dayanımı 142.8 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.5 B10, B11 ve B12 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

Tablo 7.4'te kare çekirdek yapısına sahip poliüretan köpük dolgulu sandviç levhanın basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Köpüklü kare hücre kesitli ($h=20$ mm) numunelerde burkulma ve kırılma hasarı hücre duvarlarının orta bölgesinde ($h\approx 10$ mm) gerçekleşmiştir. Ancak bu tip numunelerde, köpüksüz tip numunenin benzer hasarına ek olarak (Tablo 7.1), enine hücre duvarlarında uzun çatlaklar meydana gelmiştir. Bu durum köpüksüz numunelere göre maksimum hasar yükünde belirli orandaki azalma olarak ta ortaya çıkmaktadır. Hücre içerisine eklenen köpüğün kuruma esnasında genişerek çekirdek hücre duvarlarında küçük te olsa eksen kaymalarına sebep olması ve deney sırasında uygulanan kuvvetin hücre duvarına yaptığı iç basıncın sonucu olarak ortaya çıktığı söylenebilir.

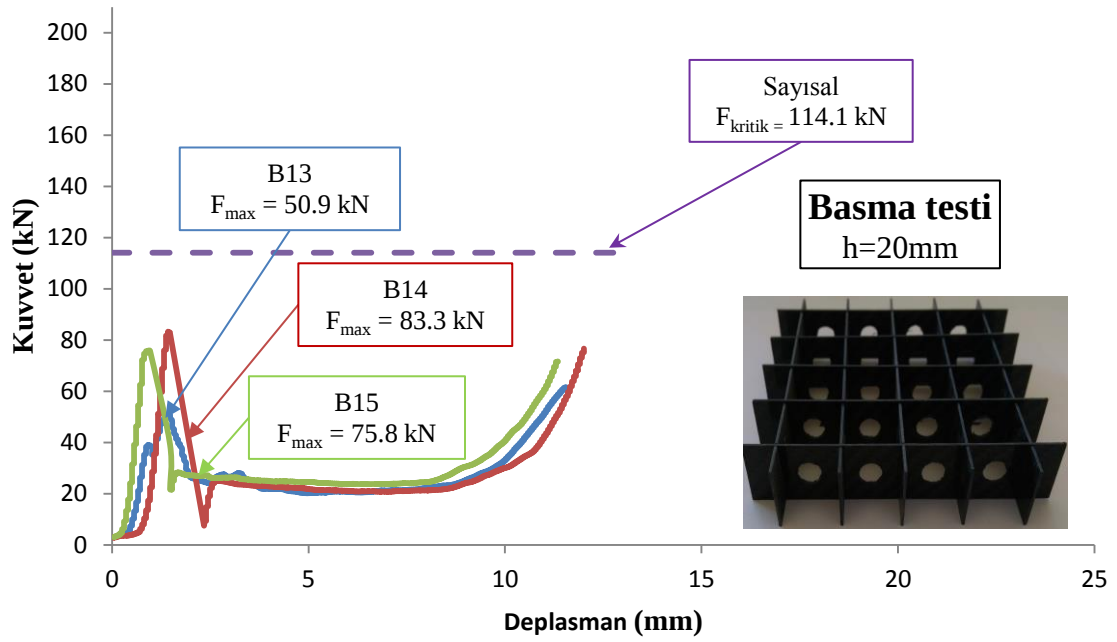
Tablo 7.4 Basma yükü altındaki kare ve köpüklü hücre yapısına sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B10		
B11		
B12		

Enine hücre duvarında lokal çatlaklar

Kırılma hasarı

Şekil 7.6' da B13, B14 ve B15 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip ve delikli kare yapıda hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm^2 alana sahiptir. Kare hücre formundaki delikli tip çekirdek yapısına sahip bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 83.3 kN, minimum basma dayanımı 50.9 kN ve ortalama basma dayanımı 75.6 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.6 B13, B14 ve B15 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

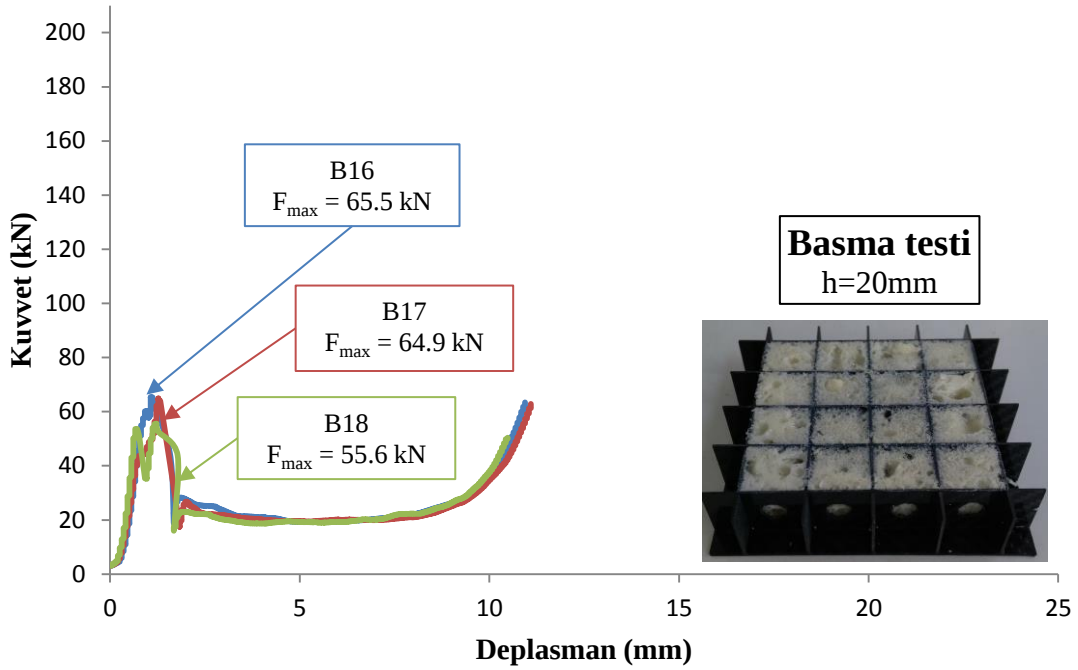
Tablo 7.5’te kare ve delikli çekirdek yapısına sahip sandviç levhaların basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Bu numunelerde yoğunluğu azaltmak amacıyla açılan delikler bu bölgelerde gerilme yığılmasına sebep olmuştur. Bu durumdan dolayı hücre duvarlarında burkulma sonucunda kırılma ve ezilme hasarları, delik çevresinde ($h \approx 10$ mm) meydana gelmiştir.

Tablo 7.5 Basma yükü altındaki kare ve delikli hücre yapısına sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B13		
B14		
B15		

Şekil 7.7’ de B16, B17 ve B18 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip poliüretan köpük

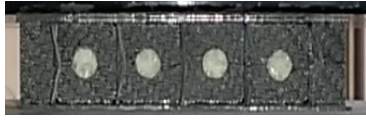
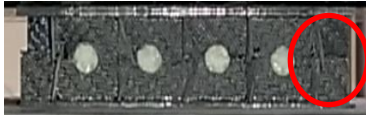
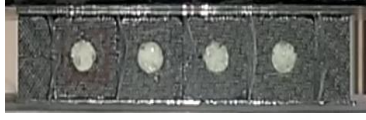
dolgulu ve delikli yapıda kare hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm^2 alana sahiptir. Kare hücre yapısındaki poliüretan dolgulu ve delikli çekirdek yapısına sahip bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 65.5 kN, minimum basma dayanımı 55.6 kN ve ortalama basma dayanımı 61.9 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.7 B16, B17 ve B18 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

Tablo 7.6’da poliüretan köpük dolgulu kare ve delikli yapıdaki çekirdeğe sahip sandviç numunelerin basma deneyi sırasında çekilen görüntüleri verilmiştir. Bu numunelerde, B13, B14 ve B15 numunelerinde görülen hasarlara benzer tip hasarlar meydana gelmiştir. Ancak deliksiz tip numunelerde olduğu gibi bu numunelerde de hücre boşluğunun poliüretan köpükle doldurulması, köpüksüz numunelere göre sandviç levhanın maksimum hasar yükünde azalmaya sebep olmuştur.

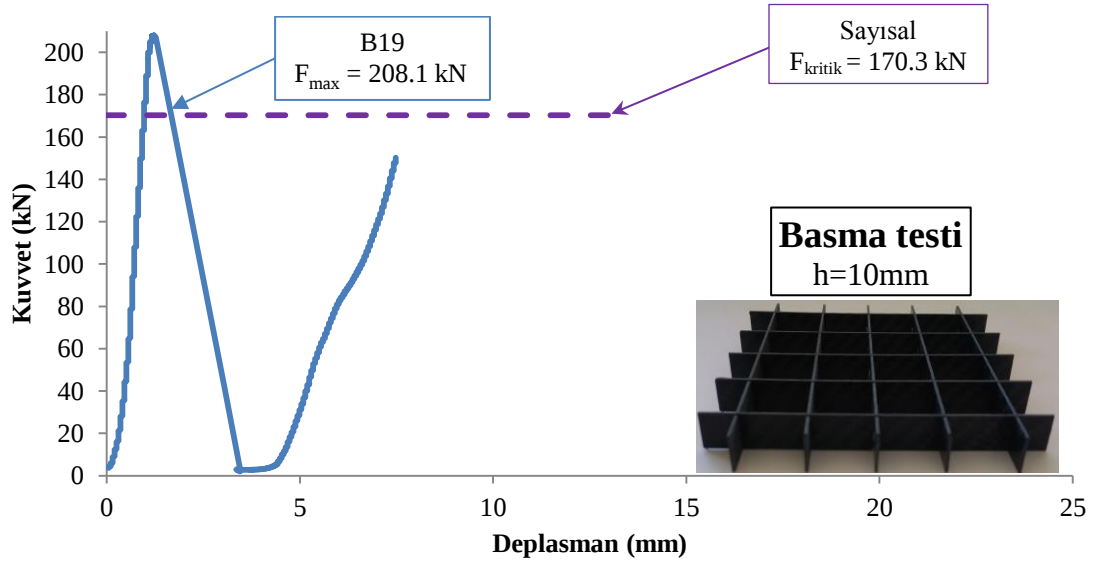
Tablo 7.6 Basma yükü altındaki poliüretan köpük dolgu kare ve delikli hücre yapısına sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B16		
B17		
B18		

Enine hücre duvarında çatlak

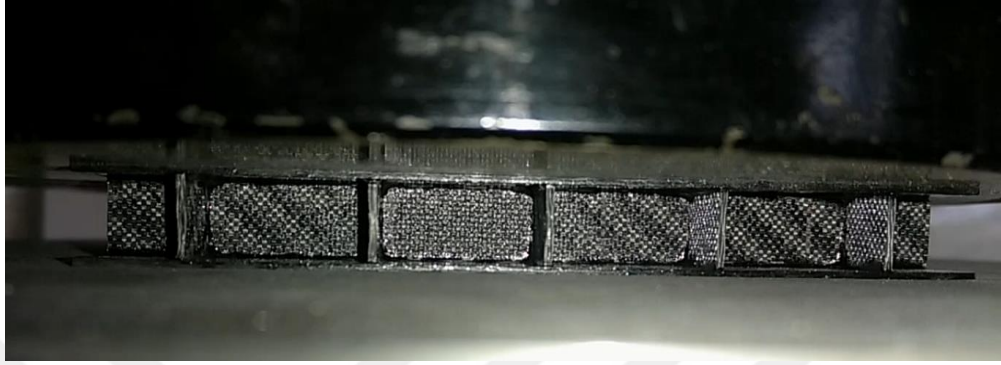
Kırılma hasarı

B19, B20 ve B21 numunelerinin çekirdek yapıları 10 mm yüksekliğinde ve kare forma sahip hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm² alana sahiptir. Bu tip numunelerden 3 adet üretilmiş fakat maksimum basma yükü (F_{max}) basma-çekme test cihazının kapasitesini zorladığı için sadece bir numunenin (B19) basma deneyi gerçekleştirilebilmiştir. Bu deneye ait numunenin kuvvet-deplasman grafiği Şekil 7.8’ de verilmiştir. 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan kare hücre yapısındaki bu numune tipinin maksimum basma dayanımı 208.1 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.8 B19 numunesine ait kuvvet – deplasman grafiği.

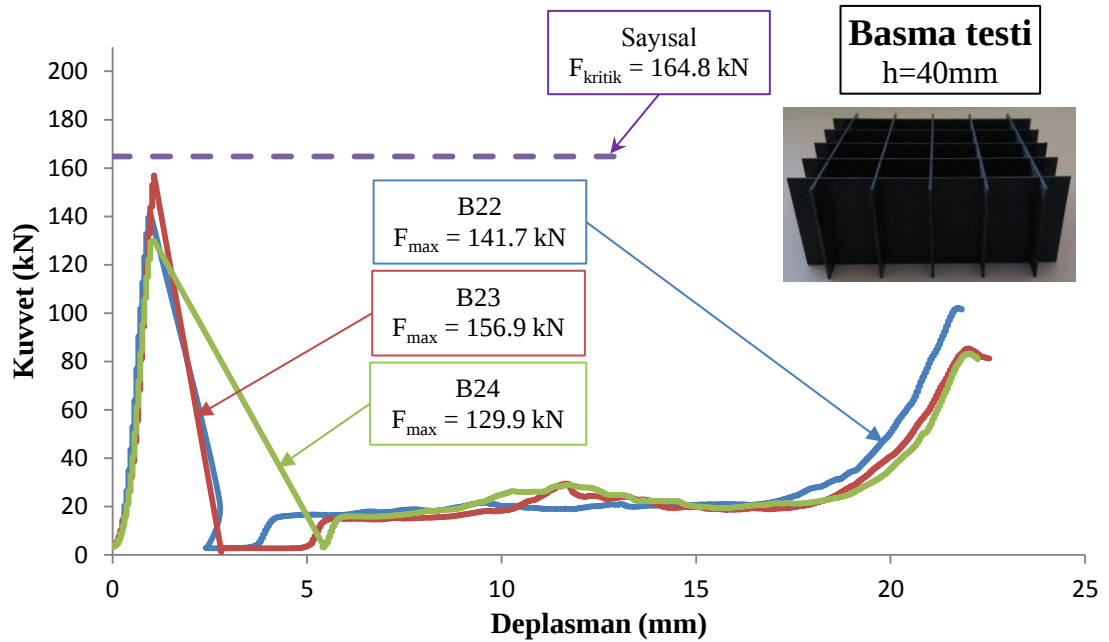
Bu tip numunenin çekirdek yüksekliği küçük olduğundan basma deneyi esnasında çekirdek yapıda meydana gelen burkulmalar gözle görülmeyecek derecede küçük olmuştur. Şekil 7.9’da 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan bu numunenin maksimum basma dayanımından hemen önceki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.9 Basma yükü altındaki 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip numune.

Bu tip numunelerin (B19, B20 ve B22) çekirdek yüksekliği aynı hücre yapısına sahip kare kesitli (B1, B2 ve B3) numunelerin yarısı kadardır. Yüksekliğin $\frac{1}{2}$ oranında azalması maksimum hasar yükününün %14.5 artmasına sebep olmuştur.

Şekil 7.10’da B22, B23 ve B24 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip kare hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 16 olup her bir hücre 361 mm^2 alana sahiptir.

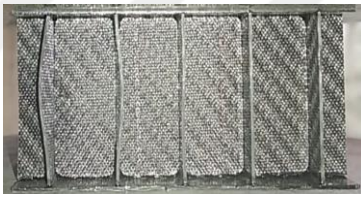
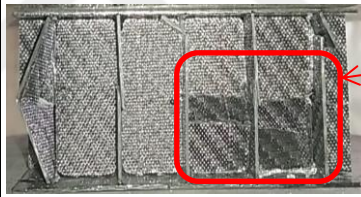
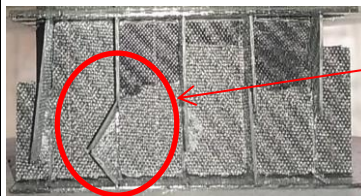
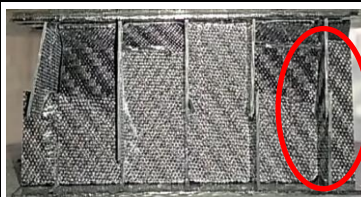


Şekil 7.10 B22, B23 ve B24 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

Kare hücre yapısındaki 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 156.9 kN, minimum basma dayanımı 129.9 kN ve ortalama basma dayanımı ise 142.8 kN olarak belirlenmiştir.

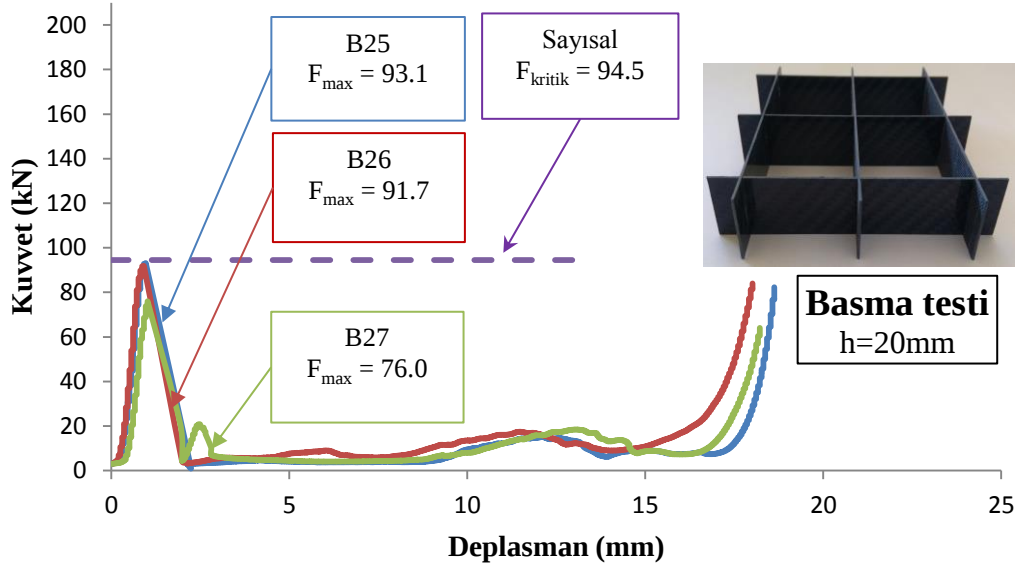
Tablo 7.7’de kare hücre yapısında, 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip sandviç levhanın basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Bu tip numunelerin (B22, B23 ve B24) yüksekliği aynı hücre yapısına sahip kare kesitli (B1, B2 ve B3) numunelerin 2 katıdır. Yüksekliğin 2 kat artması maksimum hasar yükünü %21.4 azaltmıştır. Hasar şekilleri incelendiğinde ise boyuna hücre duvarlarında aynı hücre duvarı üzerinde, farklı birkaç noktada burkulma kırılması oluşmuş, aynı şekilde enine hücre duvarlarında aynı hücre duvarı üzerinde, farklı noktalarda ezilme hasarları meydana gelmiştir.

Tablo 7.7 Basma yükü altındaki kare hücre yapısına ve 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası	
B22			Enine hücre duvarında farklı noktalarda oluşan çatlaklar
B23			Aynı duvar üzerinde farklı iki noktadan kırılma
B24			Ezilme hasarı

Şekil 7.11’ de B25, B26 ve B27 adlı numunelere ait kuvvet – deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip kare hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 4 olup her bir hücre 1521 mm² alana sahiptir. Kare hücre yapısındaki 4 hücreli bu numuneler arasında maksimum basma dayanımı 93.1 kN,

minimum basma dayanımı 76.0 kN ve ortalama basma dayanımı ise 86.9 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.11 B25, B26 ve B27 numunelerine ait kuvvet – deplasman grafiği.

Şekil 7.21’de kare hücre yapısında, 4 hücreli çekirdek yapıya sahip sandviç levhanın basma deneyi sırasında çekilen görüntüler verilmiştir. Enine ve boyuna hücre duvar sayısının azalması basma dayanımını azaltmaktadır. Aynı hücre yapısına sahip B1, B2 ve B3 numunelerine göre alanın %322 oranında artması basma dayanımını %52.2 kadar azaltmıştır.

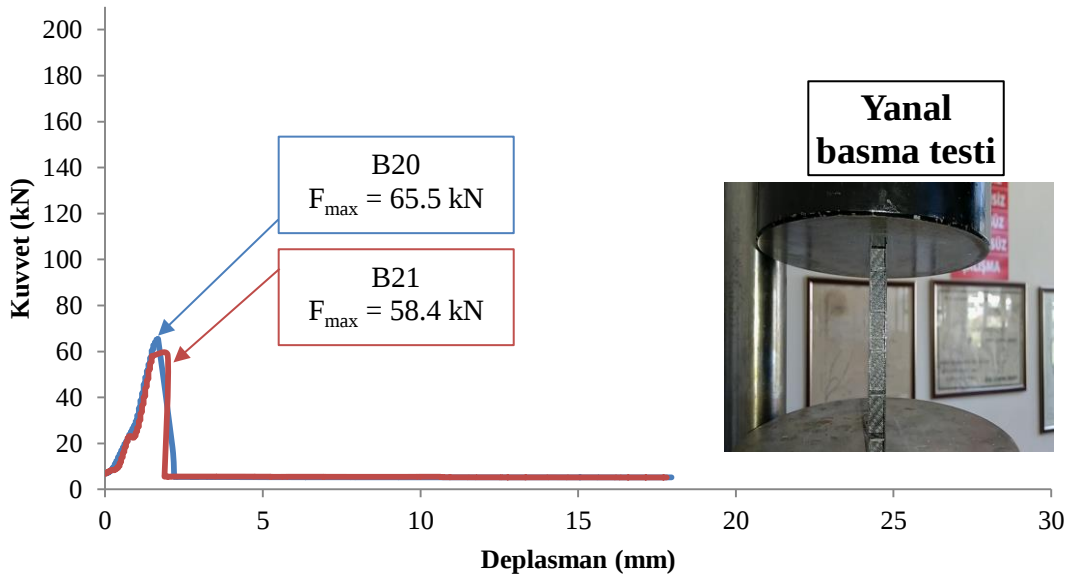
Tablo 7.8 Basma yükü altındaki 4 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numuneler.

Numune	Maksimum basma dayanımı hemen öncesi	Maksimum basma dayanımı hemen sonrası
B25		
B26		
B27		

7.2.Yanal Basma (Edgewise) Deney Sonuçları

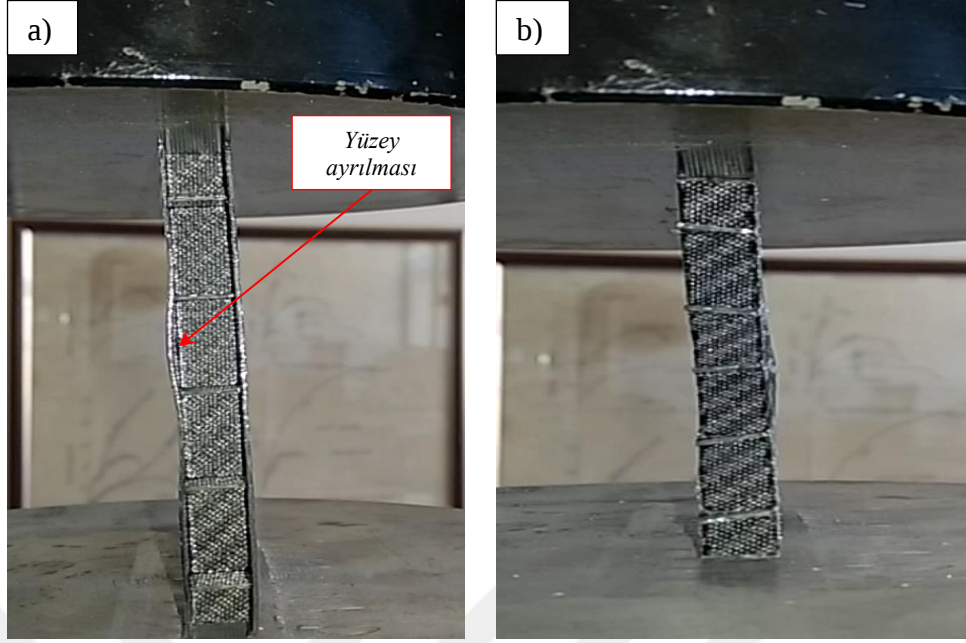
Basma deneyi için hazırlanan bazı numunelerin (B20, B21, B28, B29 ve B30) basma test cihazının kapasitesini aşması nedeniyle yüzeylerine dik doğrultuda basma deneyleri gerçekleştirilememiştir. Bundan dolayı bu numunelere yanal basma testi uygulanarak numunelerin yüzeylerine paralel doğrultudaki basma özellikleri belirlenmiştir.

Şekil 7.12’de kare hücre formunda ve 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan B20 ve B21 numunelerinin yüzeylerine paralel doğrultuda (edgewise) basılarak elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri verilmiştir. Bu deney sonuçlarından elde edilen verilere göre maksimum basma dayanımı 65.5 kN, minimum basma dayanımı 58.4 kN ve ortalama basma dayanımının ise 61.9 kN olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.12 B20 ve B21 numunelerine ait yanal basma testinden elde edilen kuvvet - deplasman grafiği.

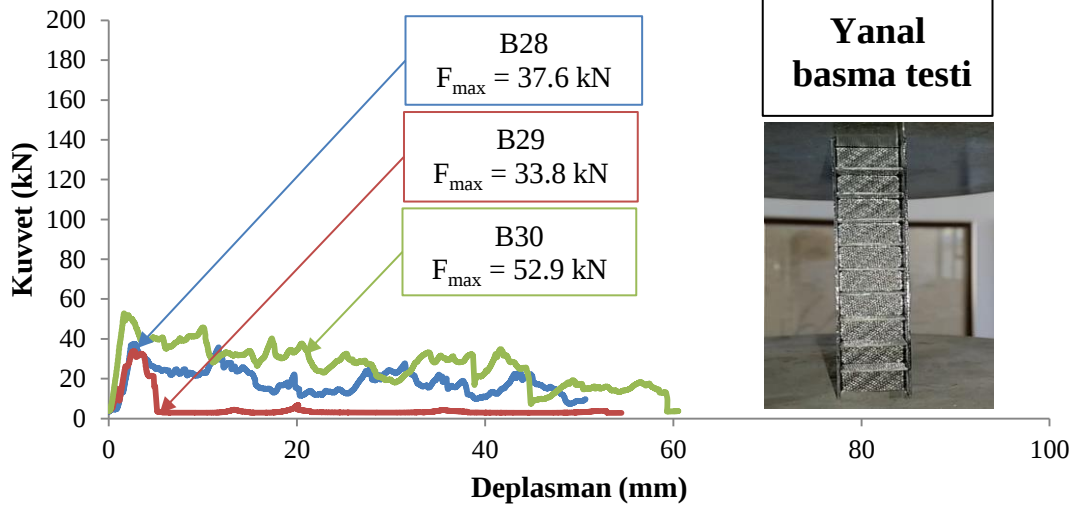
Şekil 7.13’te yanal basma test yöntemi ile yapılan deney sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 7.13a, numunenin F_{max} kuvvetinden hemen önceki görüntüsüdür ve bu aşamada sandviç levhanın yüzey kapakları çekirdek yapıdan ayrılmaya başlamıştır. Şekil 7.13b’de ise sandviç levhanın yüzey kapakları çekirdek yapıdan tamamen ayrılmış ve çekirdek yapı deforme olmuş durumdadır.



Şekil 7.13 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunenin yanal basma test yöntemi ile basma deneyi
a) yüzeyin çekirdek yapıdan ayrılması b) deforme olmuş çekirdek yapı.

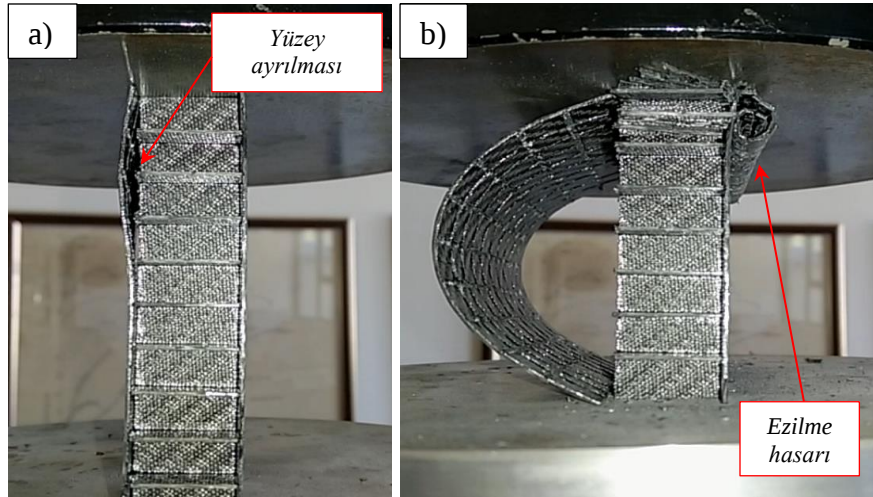
B28, B29 ve B30 numunelerinin çekirdek yapıları 20 mm yüksekliğinde ve kare forma sahip hücrelerden oluşmaktadır. Hücre sayısı 64 olup her bir hücre 81 mm^2 alana sahiptir. Yanal basma deneyinden elde edilen kuvvet – deplasman grafiği Şekil 7.14’te verilmiştir. Deneye ait grafik incelendiği zaman bu numune tipine ait maksimum basma dayanımı 52.9 kN, minimum basma dayanımı 33.8 kN ve ortalama basma dayanımının ise 41.4 kN olduğu belirlenmiştir.

Yanal basma dayanımları, numunelerin eksenel basma dayanımlarından oldukça küçüktür. Aynı hücre yapısına sahip numunelerin farklı hücre yoğunluğunda (hücre alanı) basma dayanımı için gösterdikleri büyük dayanım farkı, yanal basma için geçerli değildir. Bu doğrultuda B19 numunelerinin maksimum basma dayanımları 208.1 kN iken, yanal basma dayanımı ortalama 61.9 kN olup azalma %70.3 kadardır. B28, B29 ve B30 numuneleri için ise yanal basma dayanımı yukarıda belirtildiği üzere ortalama 41.4 kN olup, eksenel basma dayanımı 200 kN’den çok daha fazladır. Dolayısıyla bu tip malzemelerde yanal dayanımların etkisiz olduğu ve yükün önemli bir kısmının kapaklar tarafından taşındığı görülmektedir. Hücre yüksekliğinin artması yük taşıyan alt ve üst kapakların birbirinden uzaklaşmasına ve buna bağlı olarak yanal basma dayanımının kısmen de olsa azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7.14 B28, B29 ve B30 numunelerine ait yanal basma testinden elde edilen kuvvet - deplasman grafiği.

Şekil 7.15'te edgewise test yöntemi ile yapılan deney sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 7.15a, numunenin F_{max} kuvvetinden hemen önceki görüntüsüdür ve bu aşamada sandviç levhanın yüzey kapağı çekirdek yapıdan ayrılmaya başlamıştır. Şekil 7.15b'de ise sandviç levhanın yüzey kapaklarından biri tamamen ayrılırken diğeri çekirdek yapıya bağlı kalarak kademeli bir şekilde ezilmiştir.

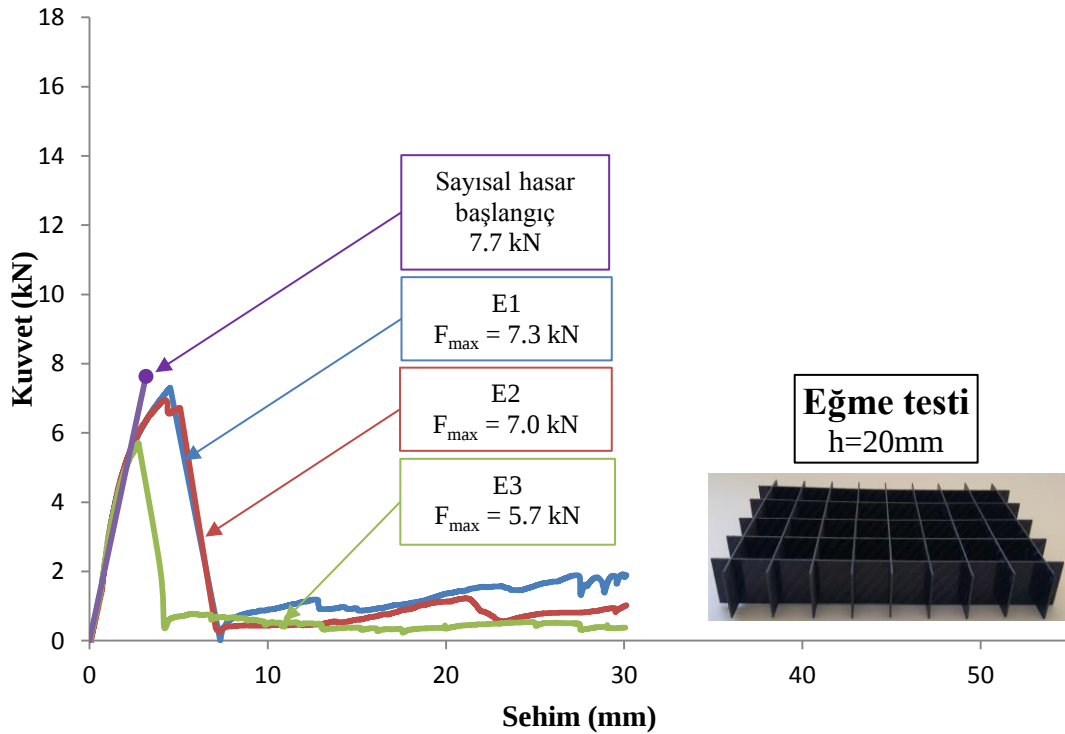


Şekil 7.15 64 hücreli çekirdek yapıya sahip numunenin yanal basma test yöntemi ile basma deneyi
a) yüzeyin çekirdek yapıdan ayrılması b) sandviç yapının ezilmesi.

7.3.Üç Nokta Eğme Deney Sonuçları

Bu bölümde, daha önce üretilmiş olan 10 farklı tipte çekirdek yapısına sahip sandviç kompozitlere üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır. Üç nokta eğme deneyi için kullanılan numunelerin yüzey ölçüleri 180 mm x 100 mm'dir. Her bir tip numune için 3'er adet olmak üzere toplamda 30 adet numunenin üç nokta eğme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda 0.5 mm/dakika'lık bir sıkıştırma hızı kullanılmıştır. Deneyde mesnetler, iki mesnet arası mesafe 140 mm olacak şekilde eğme numunesinin uç kısımlarından 20 mm mesafe bırakılarak konumlandırılmıştır. Eğme kuvveti ise numunenin tam orta noktasından uygulanmıştır.

Şekil 7.16'da E1, E2 ve E3 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır.



Şekil 7.16 E1, E2 ve E3 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

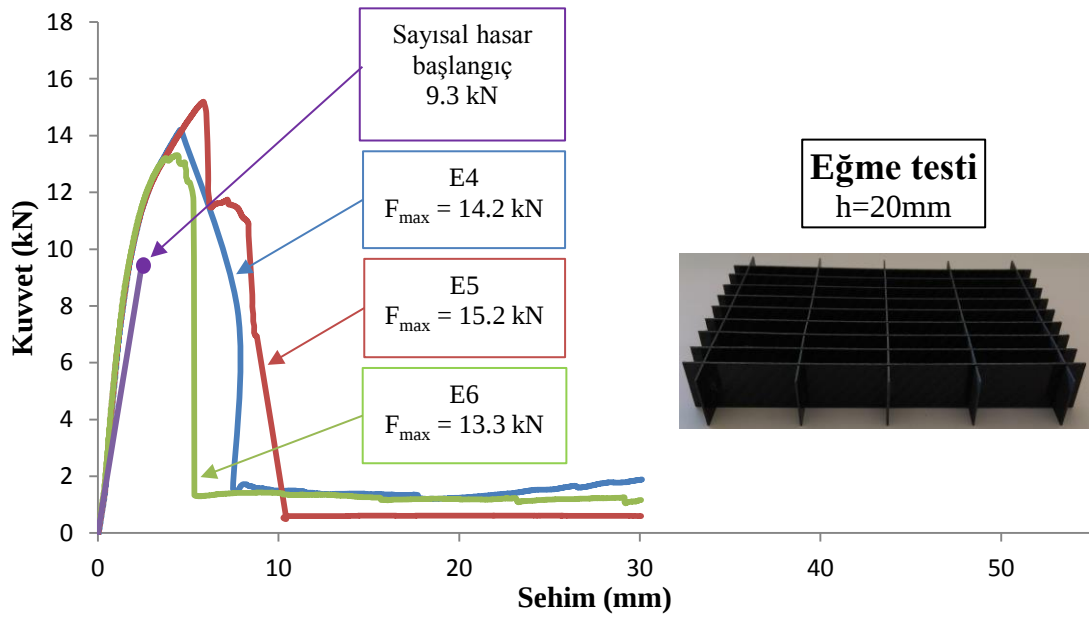
Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 7.3 kN, minimum eğme dayanımının 5.7 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 6.7 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her bir numunenin maksimum kuvvet noktasında kaydedilen sehim değerlerinin ortalaması alınmış ve böylece ortalama eğme dayanımına karşılık gelen ortalama sehim 3.85 mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.9’da kare çekirdek yapısına sahip her bir numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Bu görüntüler numunelerin F_{max} kuvvetini aştıktan sonraki görüntüleri olup bu aşamada numuneler deformasyona uğramıştır. Tüm numunelerde yüzey kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmıştır. Ayrıca E1 ve E2 numuneleri çekirdek yapılarının orta noktasından koparak deforme olmuştur. E3 numunesi ise mesnet noktasına yakın bir mesafede koparak deformasyona uğramıştır.

Tablo 7.9 Kare hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.

Numune	E1	 Kapak yüzeyi ayrılması Enine hücre duvarında kırılma
	E2	 Kapak yüzeyi ayrılması Enine hücre duvarında kırılma
	E3	 Enine hücre duvarında kırılma Kapak yüzeyi ayrılması

Şekil 7.17’de E4, E5 ve E6 numunelerine ait kuvvet – sehîm grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları dikdörtgen formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 351 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 15.2 kN, minimum eğme dayanımının 13.3 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 14.2 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu değere karşılık gelen ortalama sehîm miktarı ise 4.936 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.17 E4, E5 ve E6 numunelerine ait kuvvet - sehîm grafiği.

Tablo 7.10’da dikdörtgen çekirdek yapısına sahip numunelere ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Deneylerde E4 ve E6 numunelerinin yüzeyleri ile çekirdek yapıları birbirinden ayrılırken E5 adlı numunede deney sonuna kadar yüzey kapakları, çekirdek yapıdan ayrılmamıştır. Bunun sonucu olarak ta Şekil 7.17’den görüleceği üzere maksimum hasar yükü E5 numunesi için elde edilmiştir. Tüm numuneler çekirdek yapılarının orta noktasından kırılması sonucu deforme olmuşlardır.

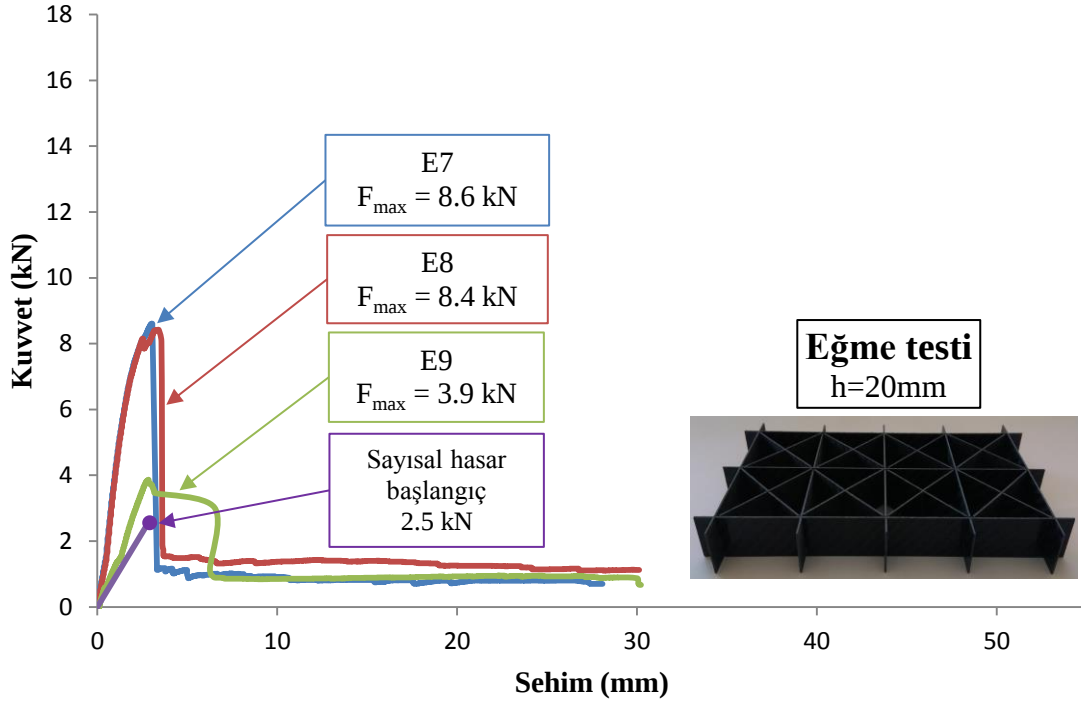
Tablo 7.10 Dikdörtgen hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.

Numune	E4	
	E5	
	E6	

E4, E5 ve E6 numunelerinin çekirdek yükseklikleri ve yaklaşık olarak hücre alanları E1, E2 ve E3 numuneleri ile aynıdır. Ancak E4, E5 ve E6 numuneleri dikdörtgen, E1, E2 ve E3 numuneleri ise karedir. Dikdörtgen kesitli sandviç levha üretilirken kare kesite göre daha fazla enine hücre duvarı kullanılmıştır. Bu durum ise eğme dayanımının 1.13 kat artmasına sebep olmuştur. Kare kesitte ortalama eğme dayanımı 6.7 kN iken dikdörtgen kesitte 14.2 kN'dur. Bu iki numune grubunun basma dayanımlarının da yaklaşık olarak aynı olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 7.18'de E7, E8 ve E9 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları üçgen formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 8.6 kN, minimum eğme dayanımının 3.9 kN ve ortalama eğme

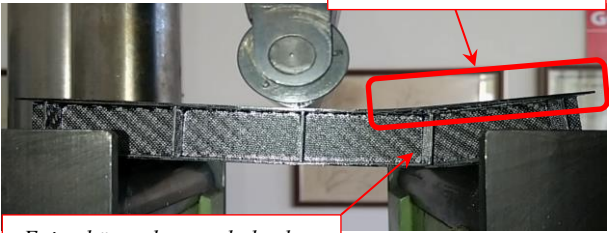
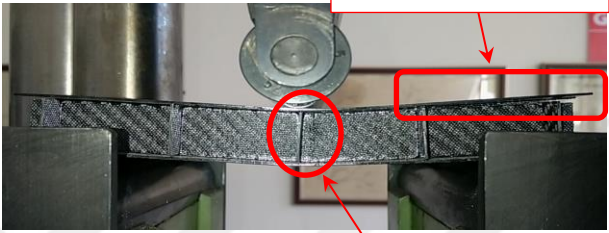
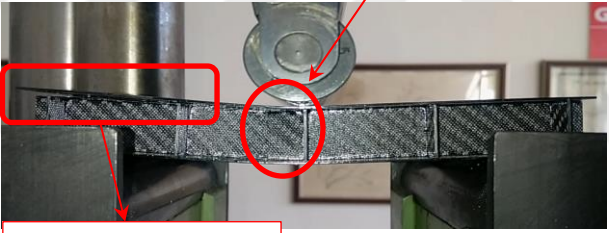
dayanımının ise 7.0 kN olduğu tespit edilmiştir. Bu değere karşılık gelen ortalama sehim miktarı ise 3.104 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.18 E7, E8 ve E9 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

Tablo 1.11’de üçgen çekirdek yapısına sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. E7 adlı numune deney sırasında mesnet noktasına yakın bir noktada çekirdek yapısında kırılma hasarı oluşmuştur. E8 ve E9 numuneleri iste orta noktalarından kırılarak deforme olmuşlardır. Tüm numunelerde yüzey kapakların çekirdek yapıdan ayrılma hasarı meydana gelmiştir.

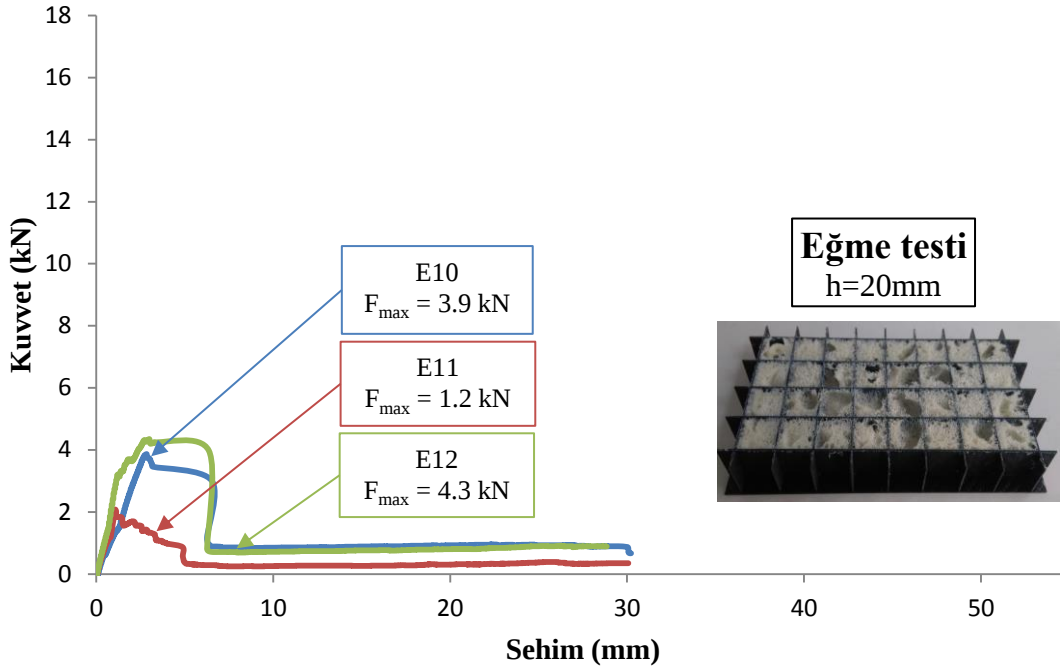
Tablo 7.11 Üçgen hücreli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.

Numune	E7	
	E8	
	E9	

Eğmede üçgen kesitli numunelerden elde edilen sonuçlar, aynı yüksekliğe ve hücre kesit alanına sahip kare kesitli numuneler ile yaklaşık olarak aynıdır. Şekil 6.16’da gösterilen üçgen kesit elde etmek için oluşturulan ana kare kesitler ve köşegenlerin kesim noktaları da göz önünde bulundurulursa, enine hücre duvarlarının kare kesitle aynı olduğu söylenebilir. Ancak üçgen kesitin ortalama eğme dayanımına karşılık gelen sehim miktarı kare kesitten azdır. Bunun sebebi ise üçgen kesiti oluşturmak için ana kare kesitler içine yerleştirilen köşegen hücre duvarlarıdır.

Şekil 7.19’da E10, E11 ve E12 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Ayrıca bu numunelerin hücre boşlukları poliüretan köpük dolguludur.

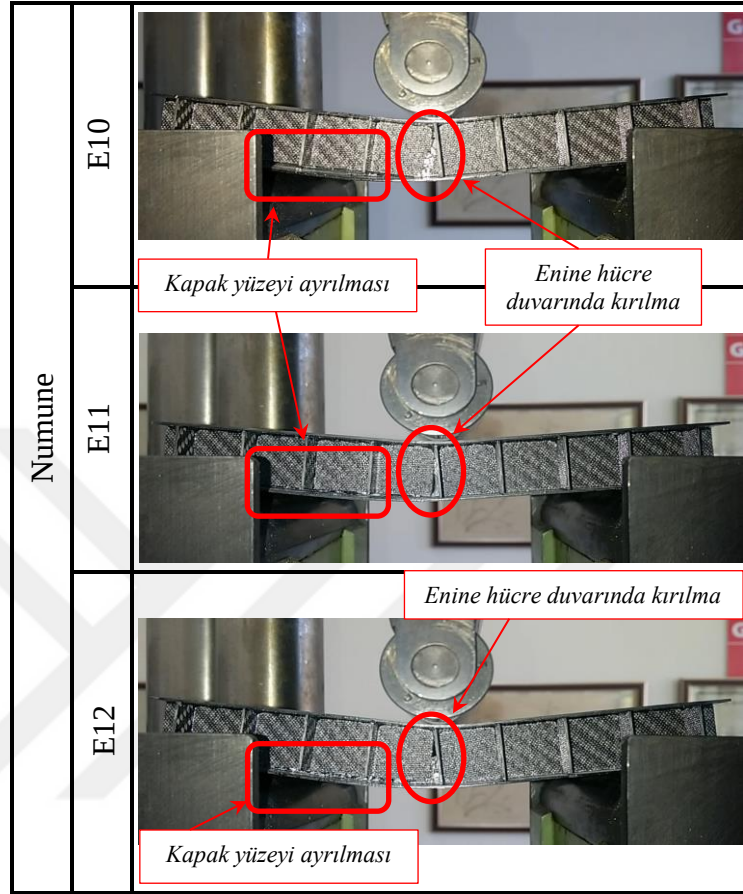
Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 4.3 kN, minimum eğme dayanımının 1.2 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 3.1 kN olduğu tespit edilmiştir. Ortalama eğme dayanımına karşılık gelen sehim miktarı 2.222 mm'dir.



Şekil 7.19 E10, E11 ve E12 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

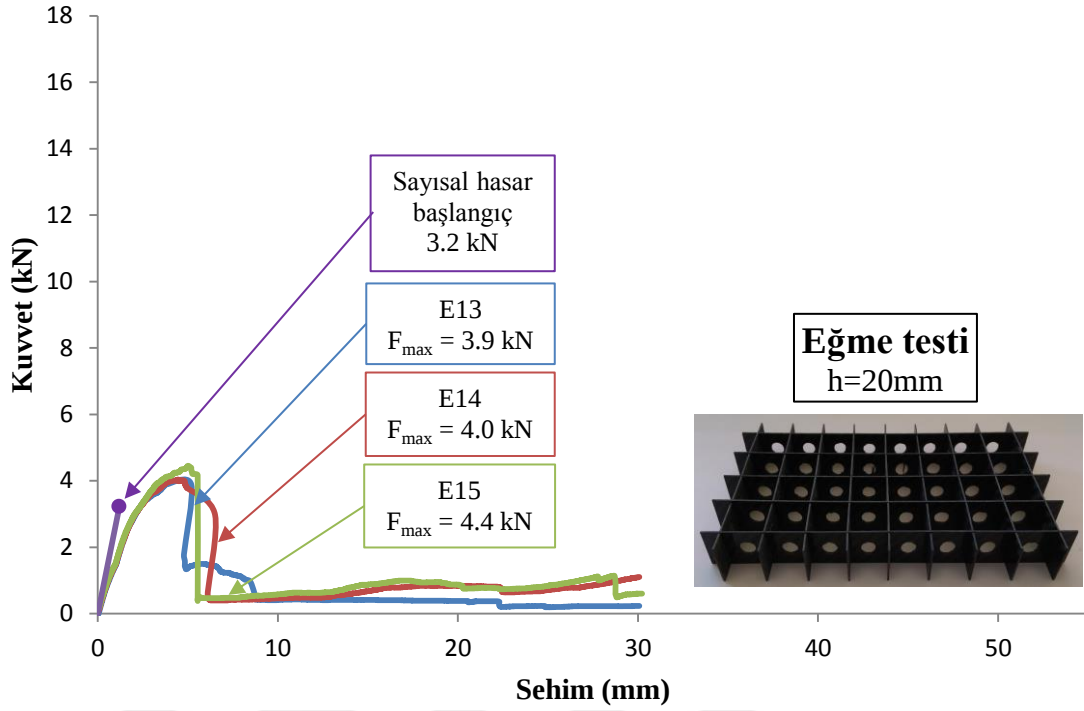
Tablo 7.12’de poliüretan köpük dolgulu kare çekirdek yapısına sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Yapılan üç nokta eğme deneyi esnasında bu çekirdek tipine ait tüm numunelerin yüzey kapakları, çekirdek yapıları ile arasındaki bağlantıdan ayrılmış ve çekirdek yapı orta noktasından koparak numune deforme olmuştur.

Tablo 7.12 Poliüretan köpük dolgulu kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.



Bu tip numunelerde poliüretan köpük kullanımı ortalama eğme dayanımının, aynı çekirdek yüksekliği ve hücre alanına sahip köpüksüz tip numunelere (E1, E2 ve E3) göre 1.13 kat azalmasına sebep olmuştur.

Şekil 7.20’de E13, E14 ve E15 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare ve deliklidir. Çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Kare ve delikli yapıdaki çekirdeğe sahip olan bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 4.4 kN, minimum eğme dayanımının 3.9 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 4.1 kN olduğu tespit edilmiş ve bu değere karşılık gelen sehim miktarı 4.41 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.20 E13, E14 ve E15 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

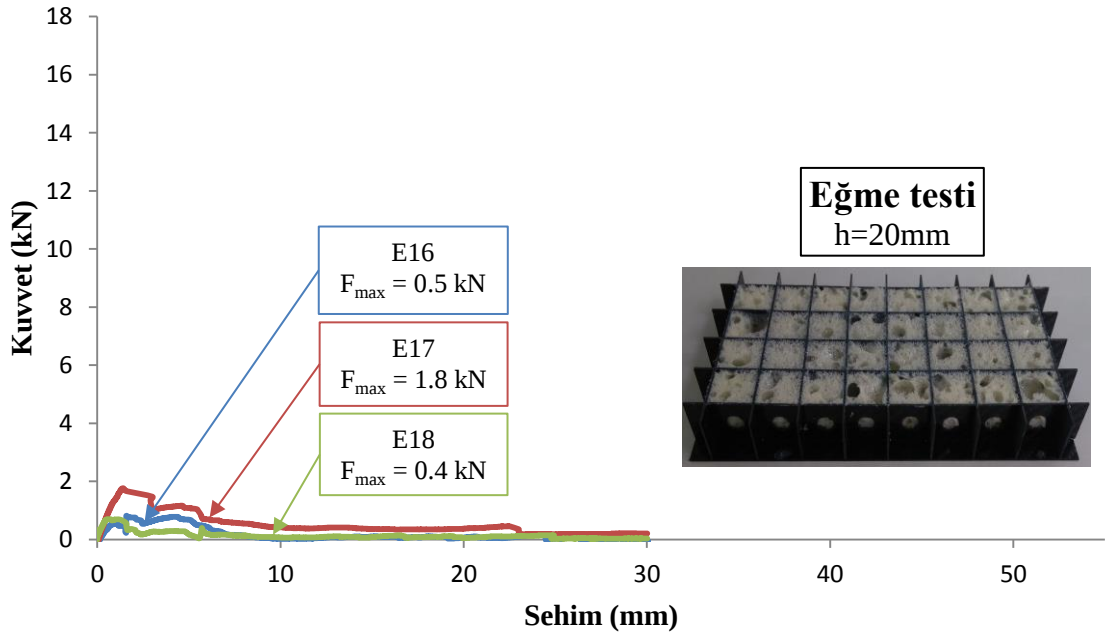
Tablo 7.13'te kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Deney esnasında bu çekirdek tipine ait tüm numunelerin yüzey kapakları ile çekirdek yapıları arasındaki bağlantı kopmuştur. E13 numunesinde enine hücre duvarında kırılma hasarı görülürken E14 ve E15 numunelerinde orta bölgeye yakın noktada bulunan delik çevresinde ezilmeler meydana gelerek numuneler deformasyona uğramıştır.

Tablo 7.13 Kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.

Numune	E13	
	E14	
	E15	

Sonuçlar, doğal olarak deliksiz tip numunelere göre %38 kadar düşüktür. Ancak ağırlıktaki %10.9 ‘luk azalma dikkate alındığında özgül mukavemetin önemli ölçüde değişmediği görülmektedir.

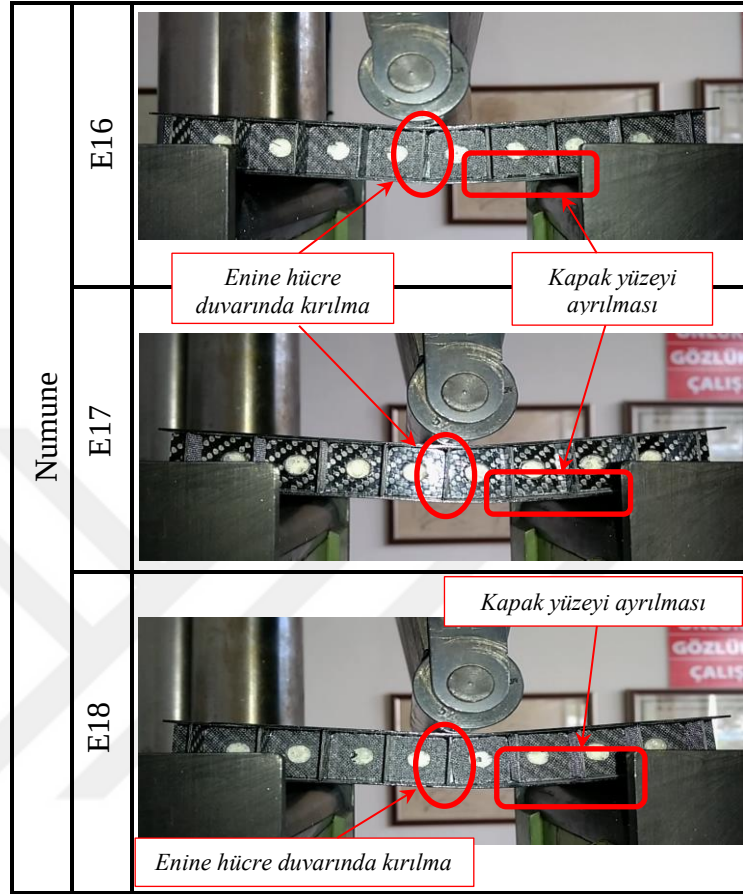
Şekil 7.21’de E16, E17 ve E18 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare ve deliklidir. Ayrıca kare ve delikli yapıda olan bu hücreler poliüretan köpük dolguludur. Çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Kare ve delikli yapıdaki hücrelerden oluşan ve poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe sahip olan bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 1.8 kN, minimum eğme dayanımının 0.4 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 0.9 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ortalama maksimum eğme dayanımı noktasına karşılık gelen sehim değeri 1.02 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.21 E16, E17 ve E18 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

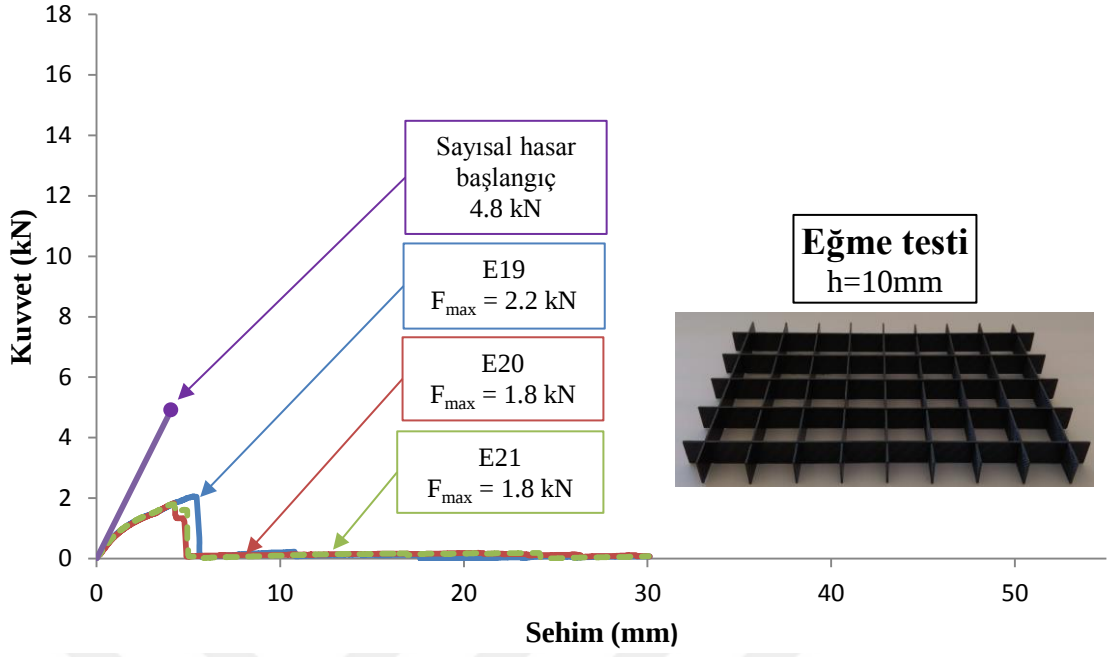
Tablo 7.14'te poliüretan köpük dolgulu kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Deney esnasında bu çekirdek tipine ait tüm numunelerin yüzey kapakları ile çekirdek yapıları arasındaki bağlantı deforme olarak kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmış ve çekirdek yapıların orta noktalarında kopmalar meydana gelerek numuneler deformasyona uğramıştır.

Tablo 7.14 Poliüretan köpük dolgulu kare ve delikli çekirdek yapıya sahip numunelerinin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.



Elde edilen sonuçlardan, bu numunelerde hücre boşluğunun poliüretan köpükle doldurulması, deliksiz tip numunelerde olduğu gibi köpüksüz numunelere göre sandviç levhanın eğme dayanımının kısmen azalmasına sebep olmuştur.

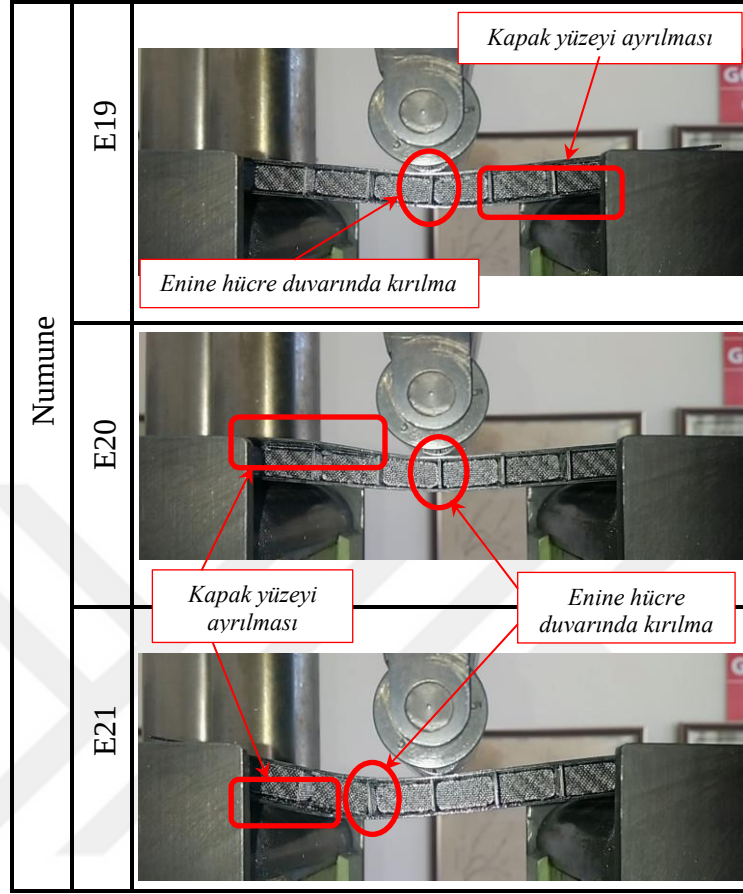
Şekil 7.22’de E19, E20 ve E21 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 2.2 kN, minimum eğme dayanımının 1.8 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 1.9 kN olduğu tespit edilmiştir. Bu değere karşılık gelen sehim miktarı ise 4.56 mm olarak hesaplanmıştır.



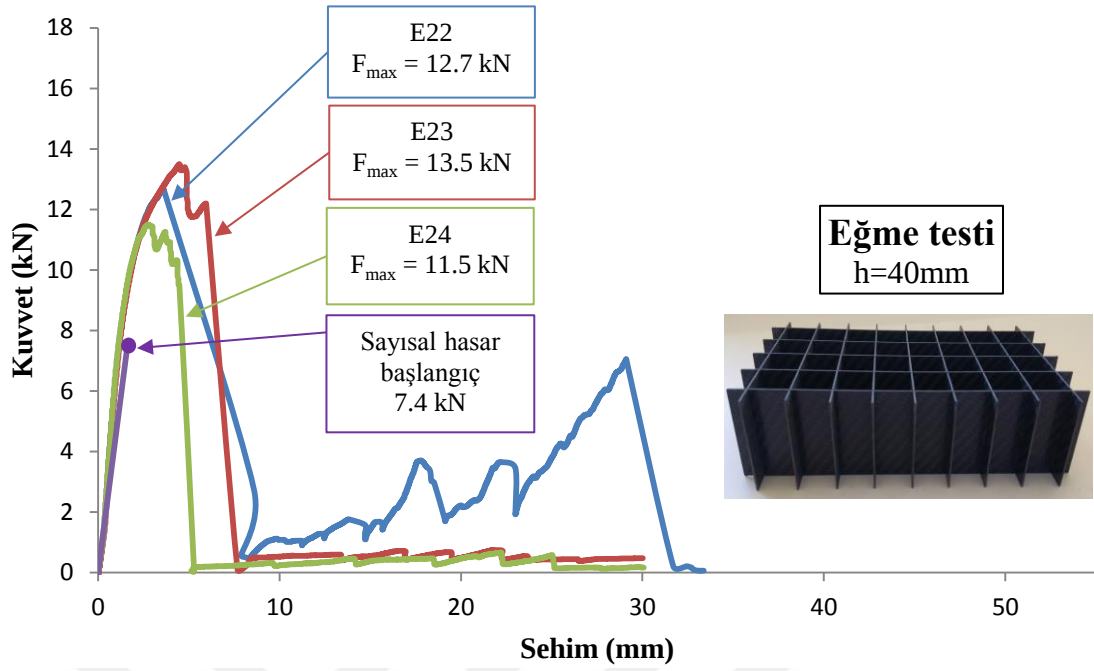
Şekil 7.22 E19, E20 ve E21 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

Tablo 7.15'te 10 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Deney sırasında bu tip çekirdek yapısına sahip olan tüm numunelerin yüzey kapakları ile çekirdek yapıları birbirinden ayrılmıştır. E19 ve E20 numunelerinin çekirdek yapıları orta noktalarından E21 numunesinin çekirdek yapısı ise mesnete yakın bir noktadan koparak numuneler deformasyona uğramıştır.

Tablo 7.15 10 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.



Şekil 7.23'te E22, E23 ve E24 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 361 mm² alana sahip olan 16 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 13.5 kN, minimum eğme dayanımının 11.5 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 12.6 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ortalama eğme dayanımı noktasında sehim miktarının 3.61 mm olduğu hesaplanmıştır.



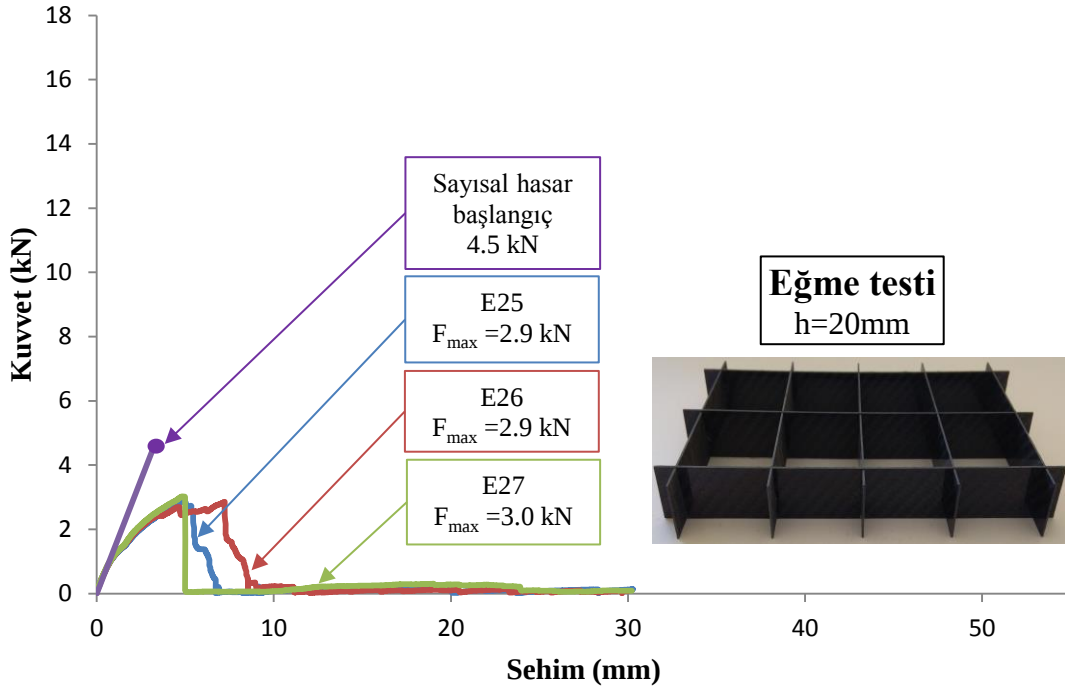
Şekil 7.23 E22, E23 ve E24 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

Tablo 7.16’da 40 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Üç nokta eğme deneyleri yapılan bu tip çekirdek yapısına ait numunelerin tümü, F_{max} kuvvetini aşınca öncelikle yüzey kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmış ve hemen ardından çekirdek yapı kırılarak numunelerde deformasyon meydana gelmiştir. Oluşan çekirdek kırılma hasarı E22 numunesinde mesnete yakın bir noktada meydana gelirken E23 ve E24 numunelerinde, numunelerin yaklaşık orta noktalarında meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliğindeki artış numunenin eğme dayanımını artırmıştır. Ancak enine hücre duvarında, kompozit şeritlerin yüksekliğinin artışına bağlı olarak tehlikeli burkulma çatlakları meydana gelmiştir.

Tablo 7.16 40 mm yüksekliğinde kare çekirdek yapıya sahip numunenin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.

Numune	E22	
	E23	
	E24	

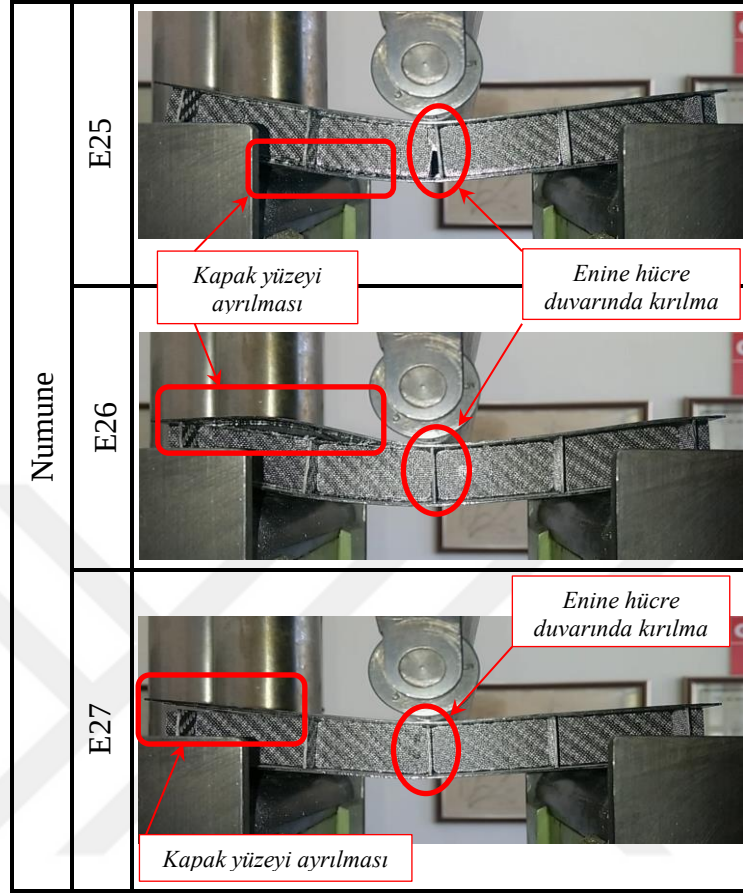
Şekil 7.24'te E25, E26 ve E27 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 1521 mm^2 alana sahip olan 8 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 3.0 kN, minimum eğme dayanımının 2.9 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 2.9 kN olduğu tespit edilmiştir. Bu değer için sehim miktarı ise 5.67 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.24 E25, E26 ve E27 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

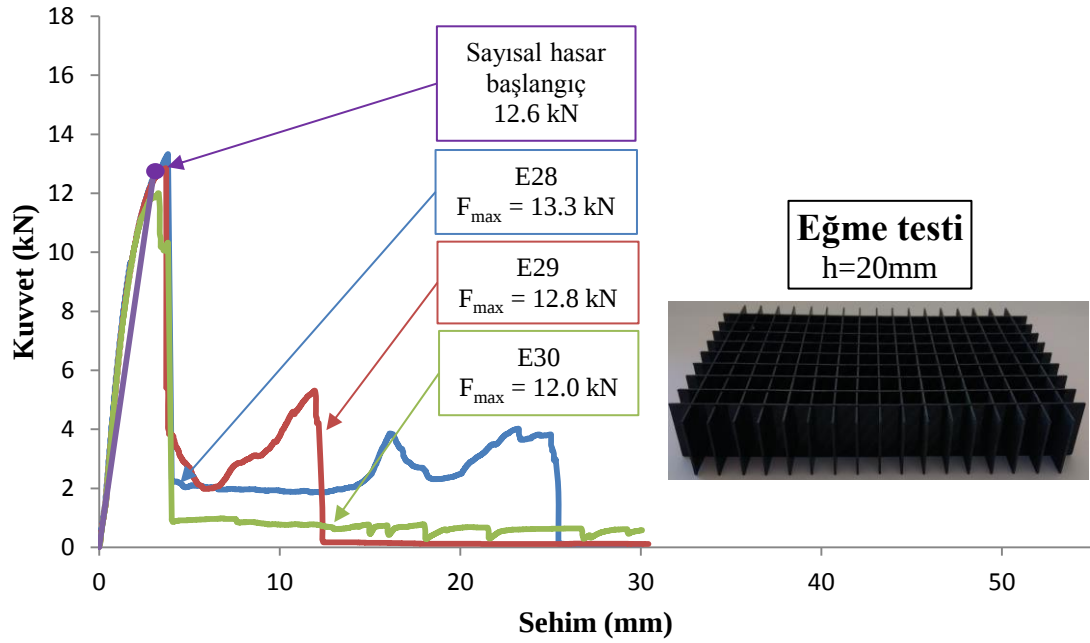
Tablo 7.17’de 8 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Deneylerde, bu tip çekirdek yapısına sahip numunelerin tümünde öncelikle yüzey kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmış sonrasında ise çekirdek yapı yaklaşık olarak orta noktadan kırılarak numunelerin deformasyonu gerçekleşmiştir.

Tablo 7.17 8 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.



Bu tip numunelerin eğme dayanımı, enine hücre duvarı sayısındaki azalma nedeniyle aynı çekirdek yüksekliği ve hücre yapısına sahip E1, E2 ve E3 numunelerine göre %56.7 kadar azalmıştır.

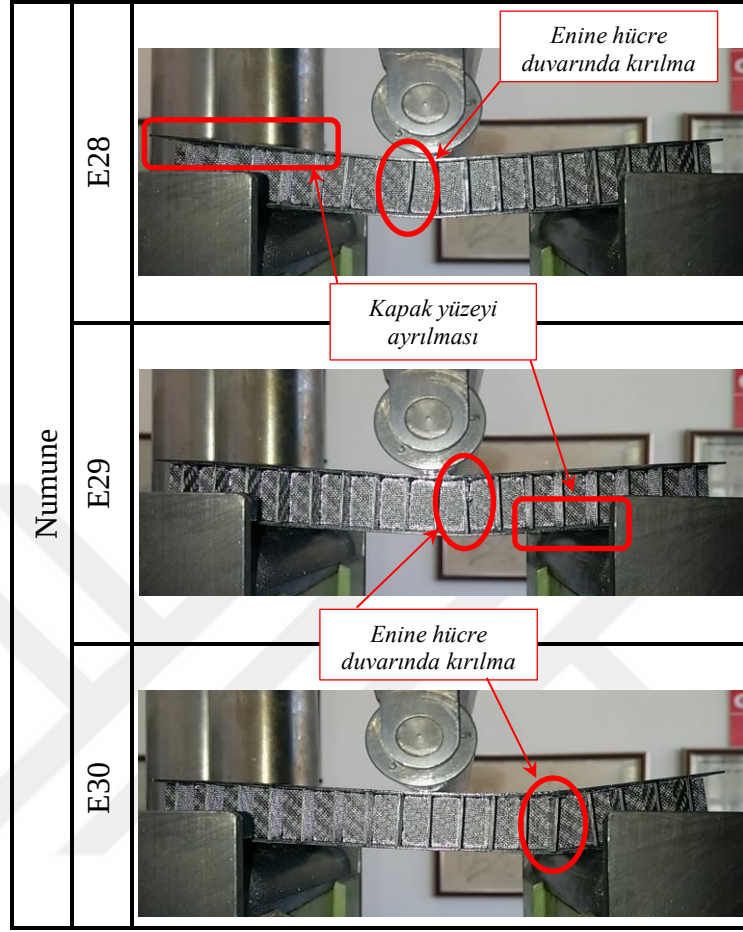
Şekil 7.25'te E28, E29 ve E30 numunelerine ait kuvvet – sehim grafiği verilmiştir. Bu numuneler 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olup hücre yapıları kare formdadır ve çekirdek yapıları ise her biri 81 mm^2 alana sahip olan 128 adet hücreden oluşmaktadır. Bu numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum eğme dayanımının 13.3 kN, minimum eğme dayanımının 12.0 kN ve ortalama eğme dayanımının ise 12.7 kN olduğu tespit edilmiş ve bu değer için sehim miktarı 3.60 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.25 E28, E29 ve E30 numunelerine ait kuvvet - sehim grafiği.

Tablo 7.27’de 128 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numuneye ait üç nokta eğme testi sırasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntülerde numunelerin F_{max} kuvvetini geçtikten sonraki, deforme olmuş halleri görülmektedir. Üç nokta eğme testi sırasında tüm numunelerin, öncelikle yüzey kapakları çekirdek yapıdan ayrılmış sonrasında ise çekirdek yapıda kopmalar meydana gelerek numuneler deforme olmuştur. E28 ve E29 adlı numunelerde çekirdek kopması numunenin orta bölgesine yakın bir noktada meydana gelirken, E30 adlı numunede mesnete yakın bir noktada gerçekleşmiştir.

Tablo 7.18 128 hücreli kare çekirdek yapıya sahip numunelerin üç nokta eğme deneyinde maksimum yük sonrası meydana gelen hasar resimleri.



Bu numunelerin, kare kesitli E1, E2 ve E3 numunelerine göre çekirdek kütlelerinde %80.4 ağırlık oranı artışına karşılık ortalama eğme dayanımlarında %89.5'lik bir artış olmuştur.

7.4. Farklı Tip Çekirdek Yapısına Sahip Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Basma ve üç nokta eğme deneylerine ait sonuçlar incelendiği zaman çekirdek yapısına bağlı olarak numunelerin basma ve eğme özelliklerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu bakımdan, farklı tip çekirdek yapısına sahip numuneler çeşitli parametreler göz önüne alınarak gruplara ayrılmış ve bu parametrelere göre

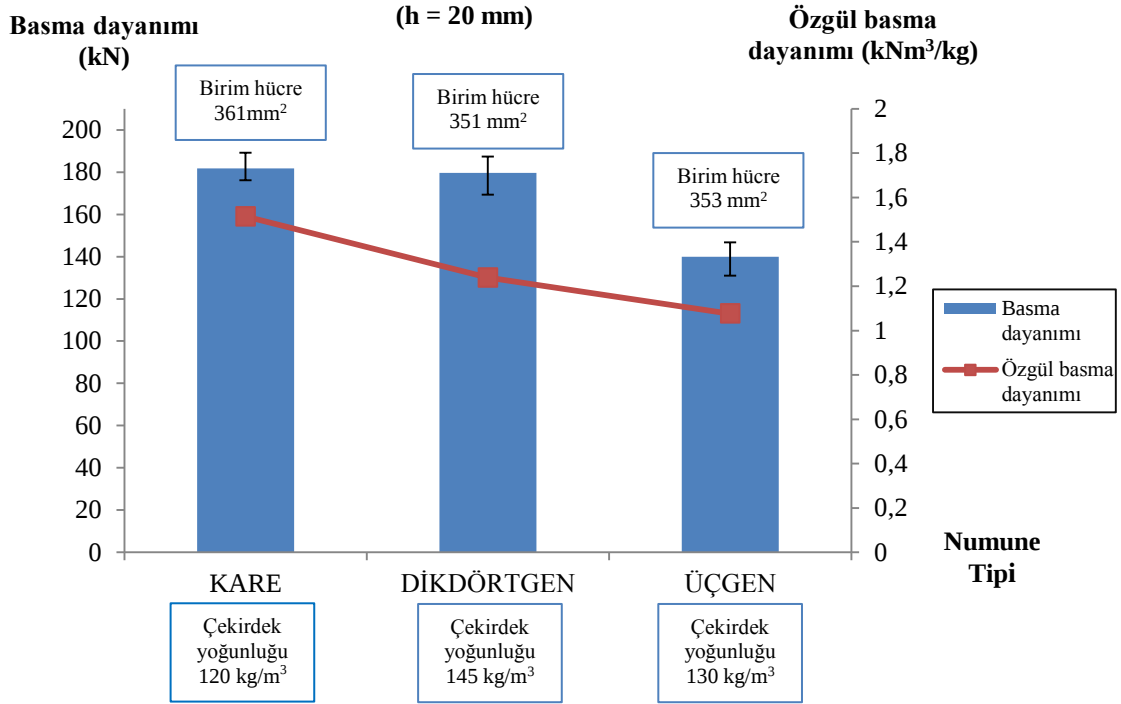
numunelerin mekanik özellikleri basma ve üç nokta eğme deneyleri için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu parametreler;

- Numunelerin çekirdek hücre yapılarına göre,
- Hücre boşluklarının köpüklü-köpüksüz ve çekirdek yapının delikli ve deliksiz oluşuna göre,
- Çekirdek yüksekliğine göre,
- Bir hücrenin sahip olduğu alana göre (hücre sayısı) ,

olmak üzere 4 farklı gruba ayrılabilir.

7.4.1. Hücre Yapısına Göre Karşılaştırma

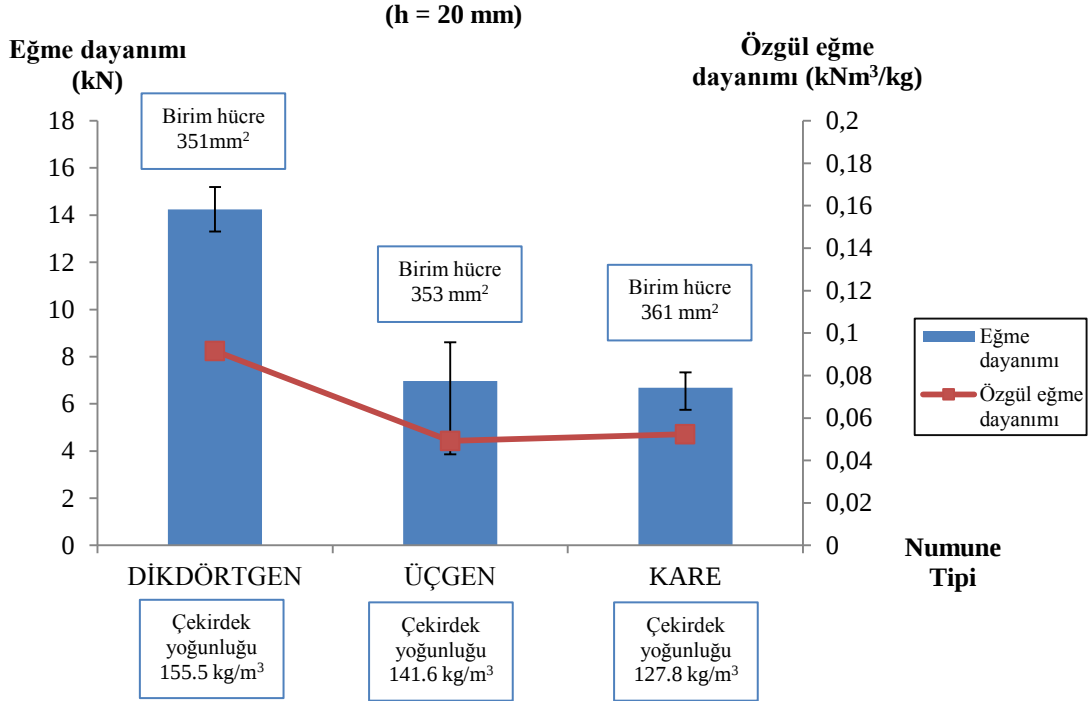
Hücre yapısına göre; kare (B1, B2 ve B3), dikdörtgen (B4, B5 ve B6) ve üçgen (B7, B8 ve B9) olmak üzere üç farklı tip çekirdek yapısında üretilen numunelerin basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve her bir numuneye ait elde edilen ortalama maksimum basma dayanımları ve özgül basma dayanımlarına ait sonuçlar grafik halinde Şekil 7.26’da verilmiştir. Grafik incelendiği zaman kare hücre yapısına sahip sandviç levhaların ortalama 181.7 kN’luk bir kuvvet ile maksimum basma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Dikdörtgen hücre yapısına sahip numuneler ise 179.6 kN ile maksimum basma dayanımına sahip olan kare hücreli numunelere yakın bir basma mukavemetine sahiptir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre minimum basma mukavemeti ise 139.9 kN ile üçgen hücre yapısına sahip numunelere aittir. Dikdörtgen kesitli numunenin çekirdek yoğunluğu kare kesite göre %20.8 oranında bir artış gösterirken basma dayanımı yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Ancak üçgen kesitli numunelerin çekirdek yoğunluğu kare kesite göre %8.3 oranında artarken basma dayanımında %23’lük bir azalma görülmüştür. Özgül basma dayanımları açısından incelendiğinde ise en yüksek kare hücreli ve en düşük ise üçgen hücreli numunelere ait dayanım elde edildiği görülebilir.



Şekil 7.26 Hücre yapısına göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.

Şekil 7.27’de ise kare (E1, E2 ve E3) , dikdörtgen (E4, E5 ve E6) ve üçgen (E7, E8 ve E9) hücreli çekirdek yapılarına sahip numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimum ortalama eğme dayanımları ve özgül eğme dayanımlarına ait sonuçlar grafik halinde verilmiştir. Grafik incelendiğinde kare ve üçgen hücre yapılarına sahip numunelerin eğme dayanımlarının birbirine yakın olduğu, fakat dikdörtgen hücre yapısına sahip numunenin eğme dayanımının büyük farkla bu iki tip numuneden yüksek olduğu görülmektedir. Dikdörtgen hücre yapısına sahip sandviç levhaların 14.2 kN’luk bir kuvvet ile maksimum eğme dayanımına sahiptir. Kare hücre yapısına sahip numuneler minimum eğme özelliği göstermişlerdir ve eğme dayanımlarının 6.7 kN olduğu tespit edilmiştir. Üçgen hücre yapısına sahip numuneler ise 7 kN’luk eğme dayanımları ile eğme özelliği bakımından kare hücreli numunelere göre daha iyi özelliktedir. Ancak bu iki tip numunenin özgül eğme dayanımları incelendiğinde kare kesitli numunenin özgül eğme dayanımının daha yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir. Dikdörtgen kesitli eğme numunelerinin çekirdek yoğunluğu kare kesitli numunelere göre %21.7 oranında bir artış göstermiş ancak buna karşılık olarak eğme dayanımında ise %112’lik bir artış olduğu görülmüştür. Üçgen

kesitli numunelerin çekirdek yoğunlukları ise kare kesite göre %10.8'lik bir artış gösterirken eğme dayanımında çok büyük bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir.



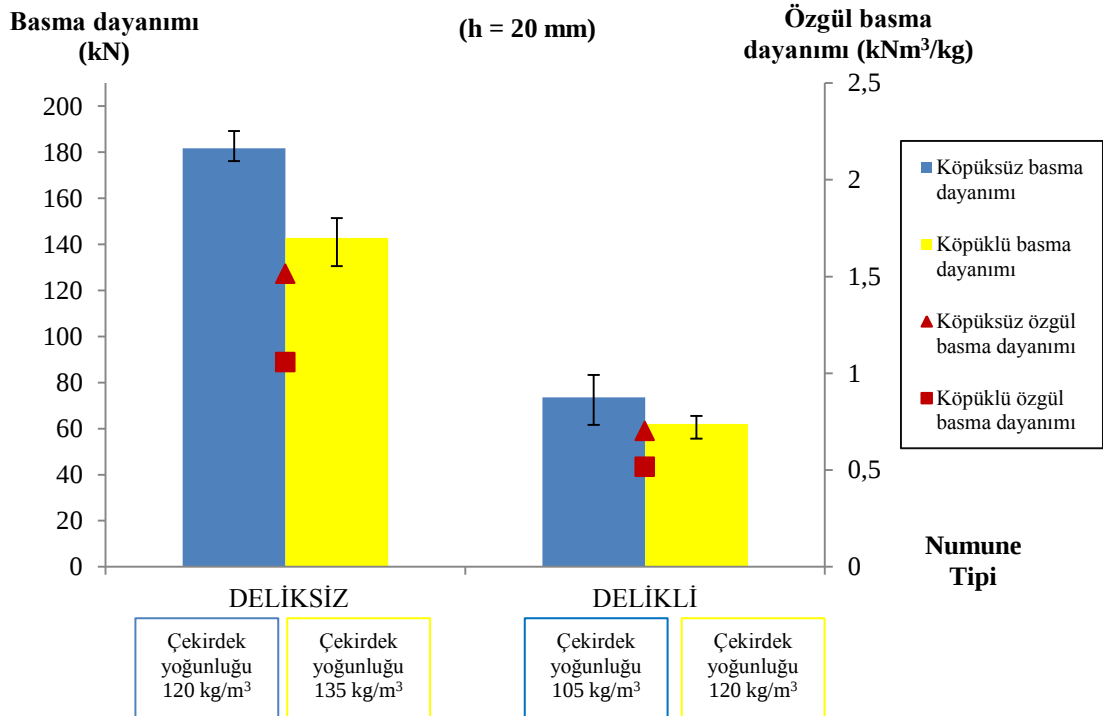
Şekil 7.27 Hücre yapısına göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.

Basma ve eğme deneylerinden elde edilen veriler göz önüne alınarak numunelerin çekirdek hücre yapılarına göre yapılan bu karşılaştırmada, kare hücre yapısı diğer hücre yapıları ile kıyaslandığında maksimum basma dayanımı gösterirken, eğme dayanımının minimum düzeyde olduğu görülmektedir. Bu üç hücre tipi arasından kare hücre yapısındaki numuneye yakın bir basma özelliği göstermesi ve aynı zamanda eğme dayanımının, diğer iki numune tipine göre büyük farkla maksimum seviyede olması dikdörtgen hücre yapısına sahip olan numunenin, hem basma hem de eğme özellikleri bakımından optimum bir özelliğe sahip olduğunu göstermektedir.

7.4.2. Hücrelerin Köpüklü-Köpüksüz ve Çekirdek Yapının Delikli-Deliksiz Oluşuna Göre Karşılaştırma

Bu bölümde çekirdek hücre yapıları kare olan, 4 farklı çekirdek tipine sahip numunenin basma ve üç nokta eğme dayanımları, numunelerin köpüklü-köpüksüz ve delikli-deliksiz oluşuna göre iki farklı parametre için karşılaştırılmıştır. Çekirdek birim

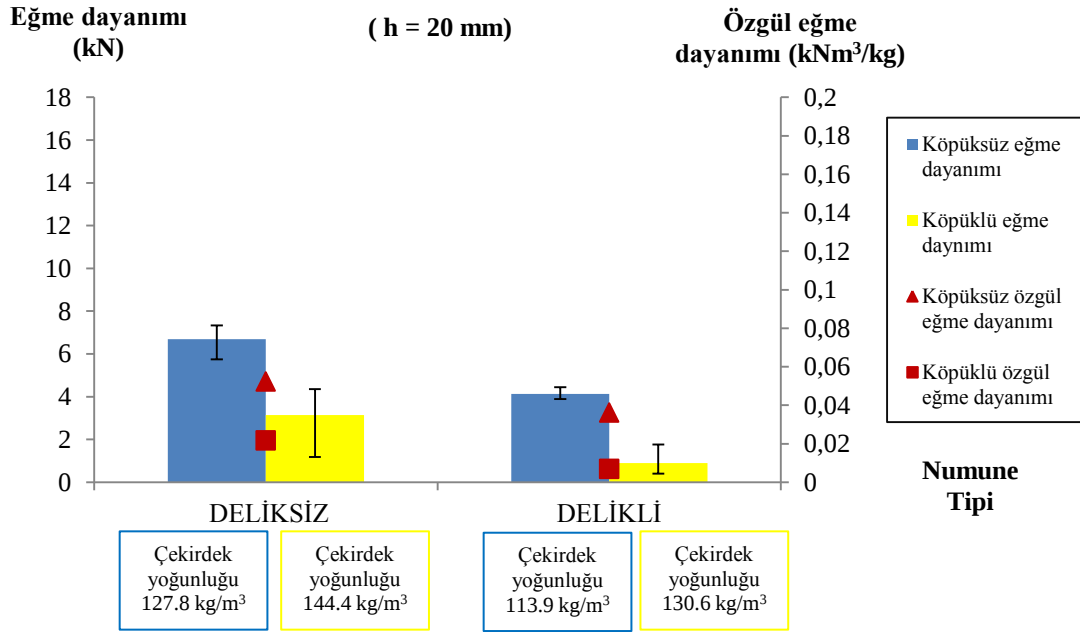
hücre alanları tüm numunelerde aynı olup 361 mm^2 'dir. Şekil 7.28'de bu 4 farklı çekirdek yapısına sahip olan numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımlarına ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 7.28'deki grafik göz önüne alınarak öncelikle numunelerin köpüklü ve köpüksüz oluşuna göre bir kıyaslama yapılırsa, hem deliksiz numunelerin köpüksüz olanları hem de delikli numunelerin köpüksüz olanları kısmen de olsa daha yüksek basma mukavemeti göstermiştir. Yani hücre boşluklarının poliüretan köpükle doldurulması numunelerin basma dayanımlarını azaltıcı yönde bir etkiye sebep olmuştur. Bu etki, deliksiz tip numunelerde delikli tip numunelere göre daha büyük olmuştur. Şöyle ki, köpük kullanımı deliksiz tip numunelerin basma dayanımında %21.4'lük azalmaya sebep olurken, delikli tip numunelerde bu oran %15.8 olmuştur. Numuneler, bir diğer karşılaştırma parametresi olan delikli ve deliksiz oluşlarına göre karşılaştırılırsa, delikli yapıdaki numunelerin deliksiz yapıdaki numunelere göre daha düşük bir basma mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. Ancak delikli yapıdaki numunelere açılan delikler, numunelerin yoğunluklarını azaltmaya yönelik olduğu için numunelerin spesifik mukavemet olarak adlandırılan maksimum kuvvet / yoğunluk değerlerine göre kıyaslanması gerekmektedir.



Şekil 7.28 Numunelerin köpüklü-köpüksüz ve delikli-deliksiz oluşuna göre ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.

Özgül mukavemet değerleri için elde edilen sonuçlar, yalın mukavemet değerleri ile benzerdir. Şekil 7.28’de verilen özgül mukavemet değerlerine göre hem köpüklü hem de köpüksüz numunelerde, deliksiz tip numunenin delikli tip numuneye göre daha yüksek spesifik basma mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 7.29’da ise 4 farklı çekirdek yapısına sahip olan bu numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımlarını gösteren grafik verilmiştir. Grafik, öncelikle köpüklü ve köpüksüz tip numuneler için incelendiği zaman, köpüklü tip numuneler basma dayanımında olduğu gibi eğme dayanımında da köpüksüz tiplere göre daha düşük bir mukavemete sahip olduğu görülmektedir. Diğer bir parametre olan delikli ve deliksiz yapıdaki numunelerde ise aynı şekilde delikli yapı, numunelerin eğme dayanımını azaltıcı yönde bir etki yapmıştır. Özgül mukavemet değerleri de sonuçlarla paralellik göstermektedir.



Şekil 7.29 Numunelerin köpüklü-köpüksüz ve delikli-deliksiz oluşuna göre ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.

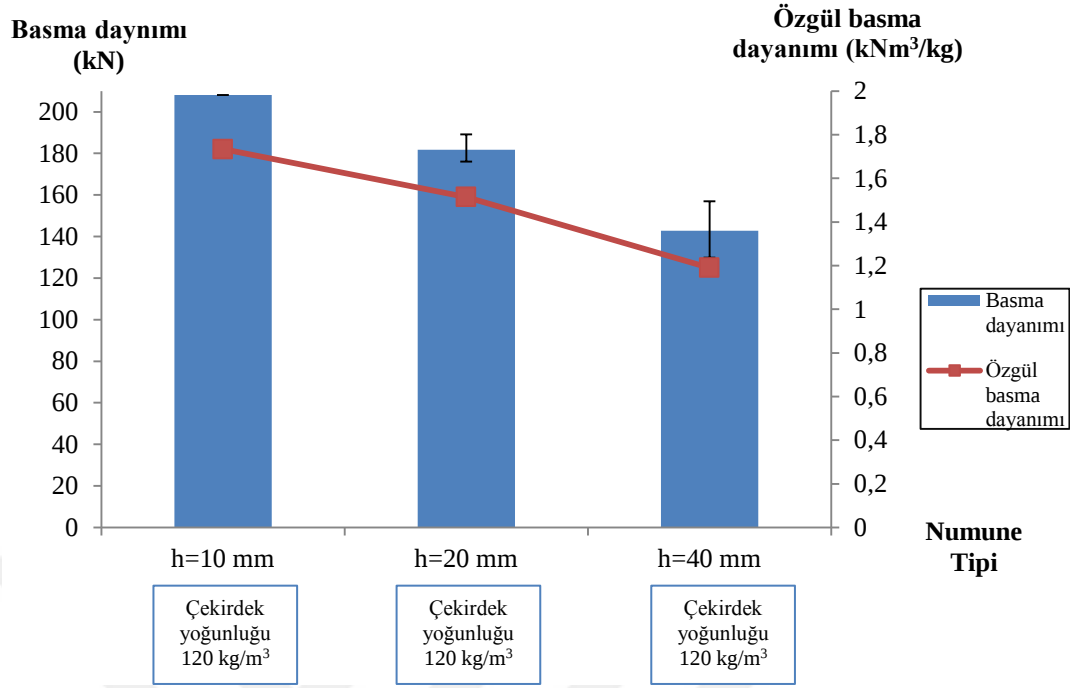
Şekil 7.29’da verilen özgül mukavemet değerlerine göre hem köpüklü hem de köpüksüz numunelerde, deliksiz tip numunenin delikli tip numuneye göre daha yüksek spesifik eğme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.

Farklı tip çekirdek yapılarına sahip numuneler arasında, basma ve eğme testlerinden elde edilen mukavemet değerlerine göre yapılan bu karşılaştırma sonucunda hücre boşluklarının poliüretan köpüklerle doldurulması hem delikli hem de deliksiz tip numunelerin basma ve eğme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerin çekirdek yapılarına delikler açılması, yapılan özgül mukavemet karşılaştırması neticesinde, numunelerin hem basma hem de eğme mukavemetlerini azaltıcı yönde etki yaptığını göstermektedir. Basma testi numuneleri için, numunelere delik açılması yoğunluğu sadece %12.5 azaltırken basma mukavemetinin %59.5 gibi büyük bir oranda azalmasına sebep olmuştur. Aynı şekilde eğme testi için numunelere delik açılması yoğunluğu %12.5 azaltırken numunelerin eğme dayanımlarının %38.8 oranında azalmasına sebep olmuştur.

Yapılan bu değerlendirmeler neticesinde 4 farklı tip çekirdek yapısına sahip numuneler arasında köpüksüz ve deliksiz olan numunenin hem basmada hem de eğmede optimum dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

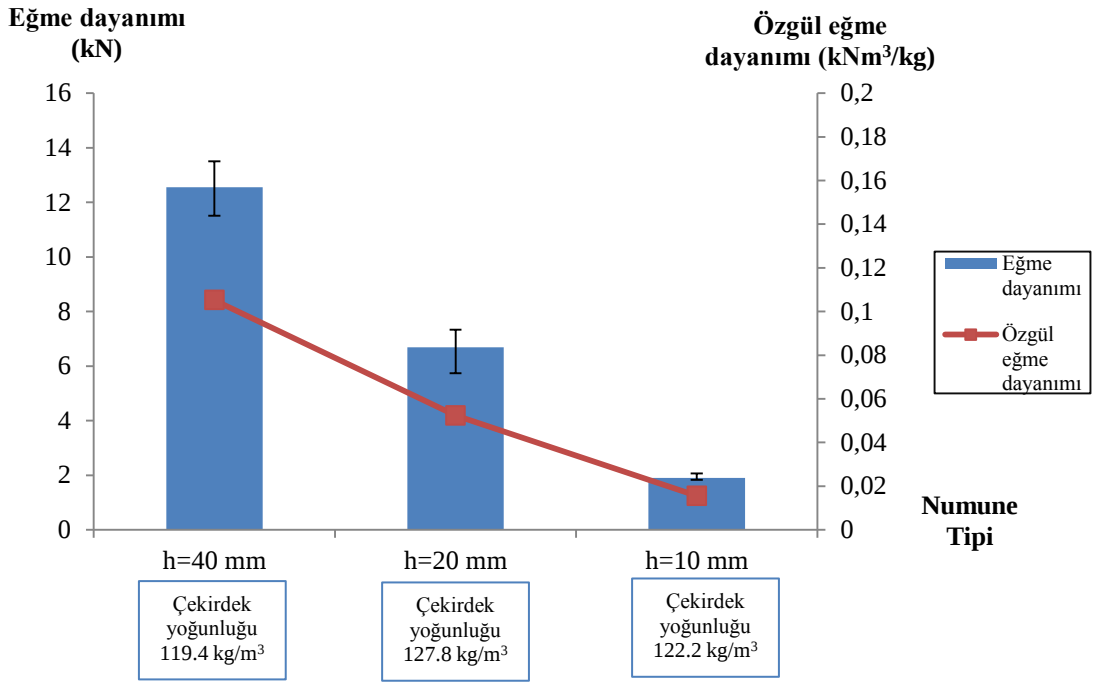
7.4.3. Çekirdek Yüksekliğine Göre Karşılaştırma

Çekirdek yüksekliği olarak 10 mm, 20 mm ve 40 mm olmak üzere üç farklı tipte üretilen numunelerin basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve her bir numuneye ait elde edilen ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımı sonuçları Şekil 7.30'da verilmiştir. Numunelerin tümünde hücre yapısı kare ve birim hücre alanı 361 mm^2 'dir. Şekil 7.30'daki grafik incelendiği zaman 208.1 kN'luk bir basma dayanımı gösteren 10mm yüksekliğindeki numune, bu üç tip numune arasında maksimum basma dayanımına sahip olurken 142.8 kN'luk basma dayanımı ile 40mm yüksekliğindeki numune minimum basma özelliği göstermiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre çekirdek yüksekliği ile numunenin basma dayanımının ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Çekirdek yüksekliği 10 mm'den 20 mm'ye çıkınca numunenin basma dayanımı %12.7 oranında bir azalma gösterirken, 20 mm'den 40 mm'ye çıkınca basma dayanımında %21.4'lük bir azalma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.30 Çekirdek yüksekliğine göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.

Şekil 7.31’de ise 10 mm, 20 mm ve 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen maksimumu ortalama eğme dayanımları verilmiştir. Grafik incelendiği zaman 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan numune 12.6 kN ile üç numune arasından maksimum eğme dayanımına sahip olurken 10 mm yüksekliğindeki numune 1.9 kN ile minimum eğme dayanımı göstermiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre numunelerin eğme dayanımları çekirdek yüksekliği ile doğru orantılı olarak değişmiştir. Çekirdek yüksekliği 10 mm’den 20 mm’ye çıkınca numunenin eğme dayanımında %253’lük bir artış gözlemlenirken çekirdek yüksekliği 20 mm’den 40 mm’ye çıkınca numunenin eğme dayanımı %88 oranında bir artış göstermiştir.

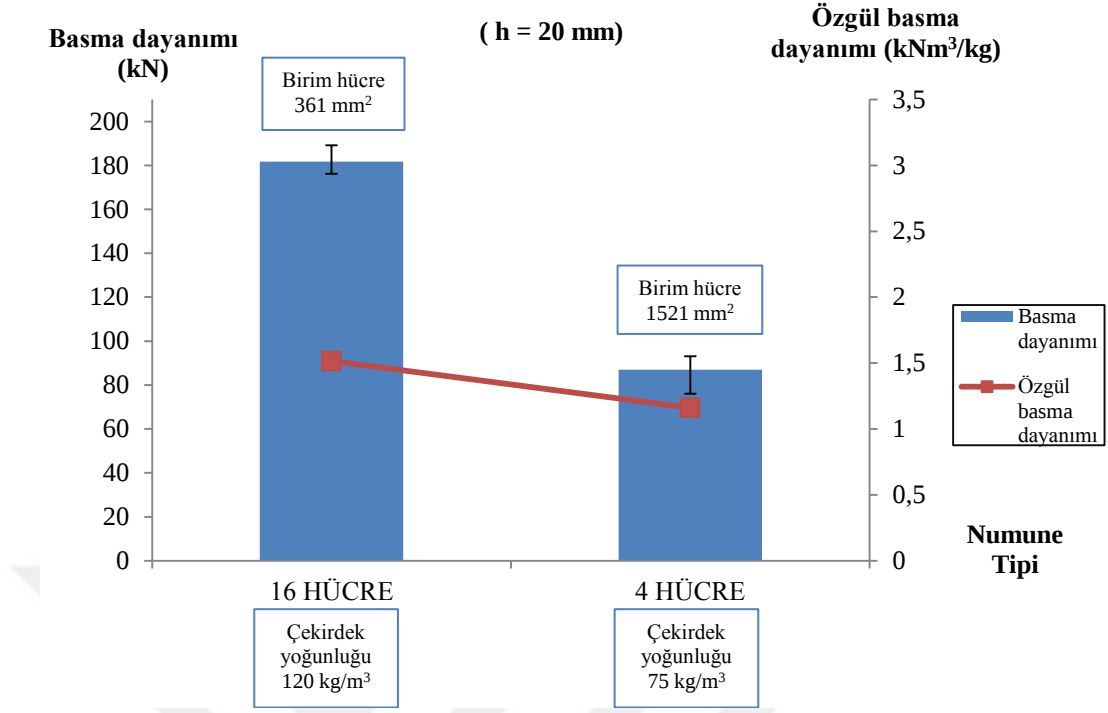


Şekil 7.31 Çekirdek yüksekliğine göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.

Çekirdek yüksekliğinin sandviç yapının mekanik özellikleri üzerine etkisi için genel değerlendirme yapılırsa; basma dayanımı numunenin çekirdek yüksekliği ile ters orantılı bir artış gösterirken eğme dayanımı numunenin çekirdek yüksekliği ile doğru orantılı bir artış göstermiştir.

7.4.4. Hücre Alanına Göre Karşılaştırma (Hücre Sayısı)

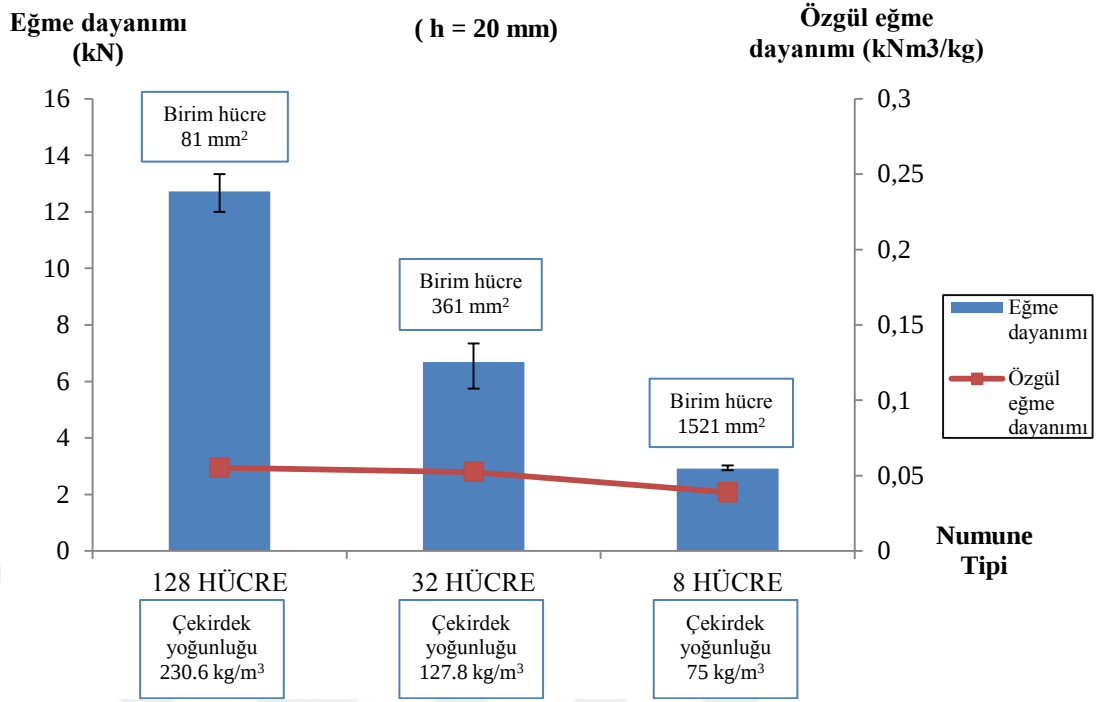
Hücre sayısının basma dayanımı üzerine etkisini araştırmak için 4, 16 ve 64 hücreli olmak üzere 3 farklı tipte hazırlanan numunelerin sadece 4 ve 16 hücreli olanlarının basma testleri yapılabildiği için Şekil 7.32’de bu iki numuneye ait ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımını gösteren grafik verilmiştir. Grafikten elde edilen sonuçlara göre hücre sayısı arttıkça sandviç yapının basma mukavemeti artmaktadır. Ancak bu, bilinen bir durum olduğu için numuneleri özgül basma dayanımlarına göre karşılaştırmak daha doğru olacaktır.



Şekil 7.32 Hücre sayısına göre numunelerin ortalama maksimum basma ve özgül basma dayanımları.

Şekil 7.32’de verilen özgül mukavemet değerlerine göre 16 hücreli numunenin spesifik basma dayanımının 4 hücreli numunenin spesifik basma dayanımından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özgül basma dayanımı açısından incelendiğinde değişimin yalın basma dayanımı kadar etkili olmadığı görülebilir.

Hücre sayısının eğme dayanımı üzerine etkisini incelemek amacıyla 8, 64 ve 128 hücreli olarak üretilen numunelerin üç nokta eğme deneyleri yapılmış ve elde edilen ortalama maksimum eğme dayanımına ait sonuçlar Şekil 7.33’te verilmiştir. Grafik incelendiği zaman numunelerin ortalama maksimum eğme dayanımlarının hücre sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ancak burada numunelerin özgül eğme dayanımlarına göre karşılaştırma yapılması gerekmektedir.



Şekil 7.33 Hücre sayısına göre numunelerin ortalama maksimum eğme ve özgül eğme dayanımları.

Şekil 7.33’te verilen her bir numuneye ait özgül mukavemet değerleri incelenirse, değerler birbirine yakın olmakla birlikte numunelerin eğme dayanımları hücre sayısı ile doğru orantılı olarak artış göstermiştir.

8. SAYISAL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde, mekanik özellikleri deneysel olarak elde edilmiş olan numunelerin basma ve eğme davranışları *ANSYS 14.5* sonlu eleman yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Her bir farklı çekirdek yapısına ait modeller, burkulma analizi için 100 mm x 100 mm ve üç nokta eğme analizi için 100 mm x 180 mm ölçülerinde oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller için, ince ve orta kalınlıktaki kabuk yapıların analizleri için uygun olan *Shell281* elemanı kullanılmıştır. Bu eleman her düğümde altı serbestlik derecesi bulunan sekiz düğüme sahiptir. Analizlerde kullanılan mekanik özellikler, *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında* yapılan ASTM 3039-76 çekme, ASTM 3410 basma ve ASTM 7078 kayma testleriyle belirlenmiş ve bu değerler Tablo 8.1’de verilmiştir. Ayrıca, köpüklü numuneler için hazırlanan modellerde poliüretan köpük için Elastisite modülü 2.78 MPa, Poisson oranı ise 0.44 olarak alınmıştır [58].

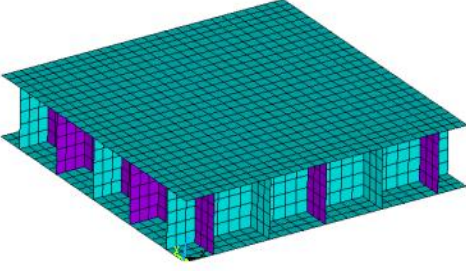
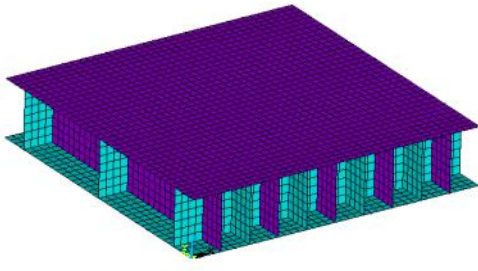
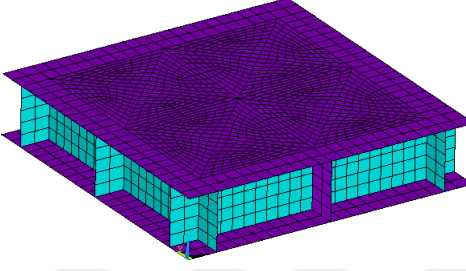
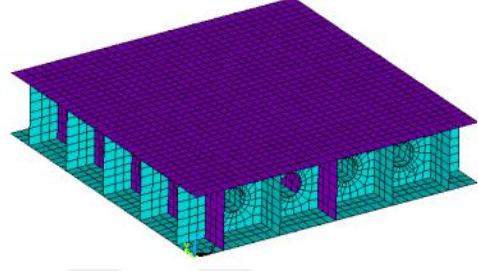
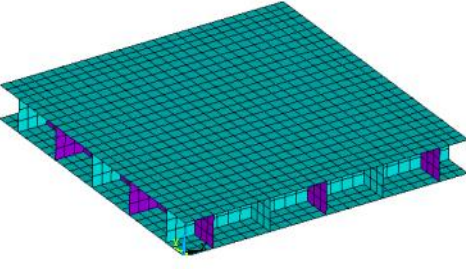
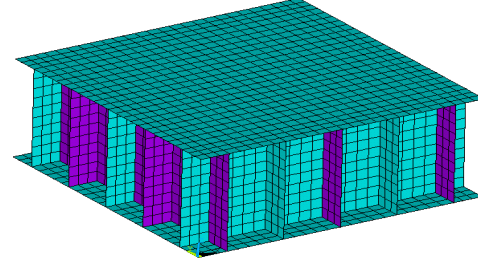
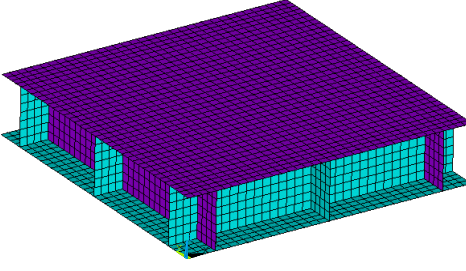
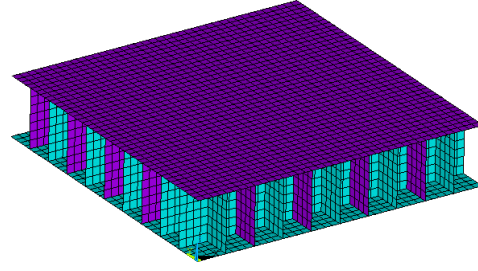
Tablo 8.1 Çapraz fiber takviyeli / epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri.

Fibere paralel doğrultudaki Elastisite modülü (E_1)	51200 MPa
Fibere dik doğrultudaki Elastisite modülü (E_2)	50800 MPa
Fibere paralel doğrultudaki çekme mukavemeti (X_T)	562 MPa
Fibere dik doğrultudaki çekme mukavemeti (Y_T)	560 MPa
Fibere paralel doğrultudaki basma mukavemeti (X_C)	242 MPa
Fibere dik doğrultudaki basma mukavemeti (Y_C)	233 MPa
Kayma modülü (G_{12})	878 MPa
Poisson oranı (ν_{12})	0.25

8.1. Burkulma Analizi Sonuçları

Çalışma için basma deneyleri gerçekleştirilen numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturularak bu modellerin lineer burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 8.2’de burkulma analizi için hazırlanan farklı çekirdek yapısına sahip sonlu eleman ağı modelleri verilmiştir.

Tablo 8.2 Farklı çekirdek yapıya sahip numunelerin burkulma analizi için sonlu eleman modelleri.

 B1-B2-B3	 B4-B5-B6
 B7-B8-B9	 B13-B14-B15
 B19-B20-B21	 B22-B23-B24
 B25-B26-B27	 B28-B29-B30

Tablo 8.2’de verilen modellere göre elde edilen toplam eleman ve düğüm sayısı ANSYS’te hesaplanarak Tablo 8.3’te verilmiştir.

Tablo 8.3 Burkulma analizi modelleri için eleman ve düğüm sayıları.

Model adı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
B1-B2-B3	2652	7511
B4-B5-B6	5988	17187
B7-B8-B9	4272	12267
B10-B11-B12	4652	12375
B13-B14-B15	5936	18121
B19-B20-B21	2132	6011
B22-B23-B24	3952	11261
B25-B26-B27	4104	12131
B28-B29-B30	8240	22783

Tablo 8.4'te her bir numuneye ait deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen kritik yük ve bu iki sonuç arasındaki % değişim değerleri verilmiştir. Deneysel çalışmalar incelendiğinde lineer elastik davranış gösteren malzeme özelliği nedeniyle; basma deneylerinde lineer artan yük-uzama grafiğinin ani hasarla sonuçlandığı görülebilir. Bu nedenle de maksimum basma dayanımı aynı zamanda sandviç levhanın kritik burkulma yükü olarak alınmıştır.

Tablo 8.4 Numunelere ait basma deneyi ve burkulma analizi sonuçları.

Numune	Deneysel sonuç (kN)	Sayısal sonuç (kN)	% Fark
B1-B2-B3	181.7	165.9	8.7
B4-B5-B6	179.6	166.1	7.5
B7-B8-B9	139.9	140.2	0.2
B10-B11-B12	142.8	165.6	13.8
B13-B14-B15	75.6	114.1	33.7
B19-B20-B21	208.1	170.3	18.2
B22-B23-B24	142.8	164.8	13.3
B25-B26-B27	86.9	94.5	7.9
B28-B29-B30	-	250.1	-

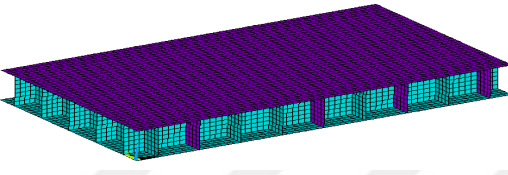
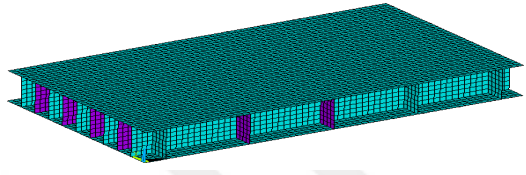
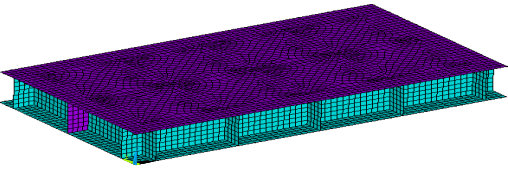
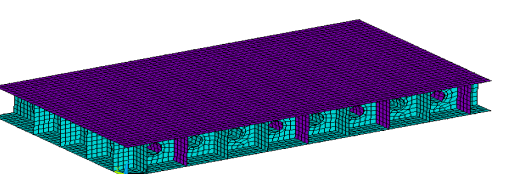
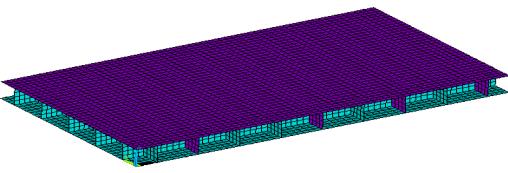
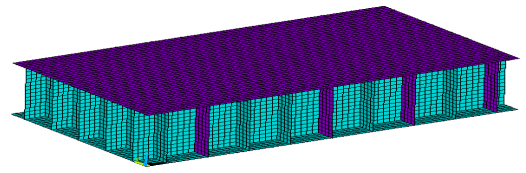
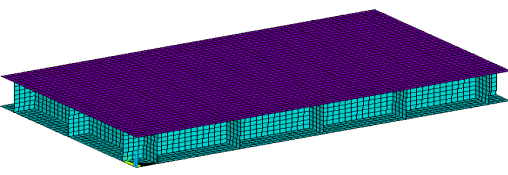
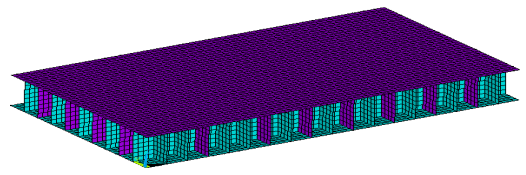
Tabloda verilen deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre bu iki değer arasındaki fark %0.2 ile %33.7 arasında değişmektedir. En büyük uyumsuzluk kare ve delikli çekirdek yapıya sahip (B13-B14-B15) numunelerde

görülürken, en yakın sonucun üçgen hücre yapısına sahip (B7-B8-B9) numunelerden elde edildiği görülmektedir. B13/B14/B15 numuneleri için meydana gelen bu farkın imalat aşamasında açılan deliklerin idealleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel olarak deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların uyumlu olduğu söylenebilir.

8.2. Üç Nokta Eğme Analizi Sonuçları

Çalışma için eğme deneyleri gerçekleştirilen numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturularak bu modellerin eğme analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 8.5'te eğme analizi için hazırlana farklı çekirdek yapısına sahip sonlu eleman ağı modelleri verilmiştir.

Tablo 8.5 Farklı çekirdek yapıya sahip numunelerin eğme analizi için sonlu eleman modelleri.

	
E1-E2-E3	E4-E5-E6
	
E7-E8-E9	E13-E14-E15
	
E19-E20-E21	E22-E23-E24
	
E25-E26-E27	E28-E29-E30

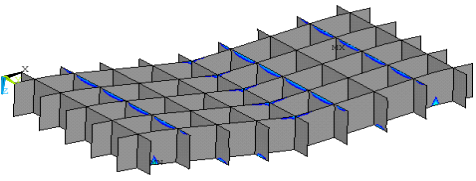
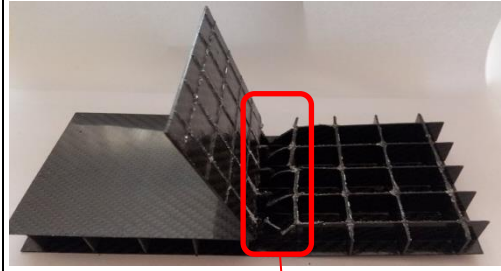
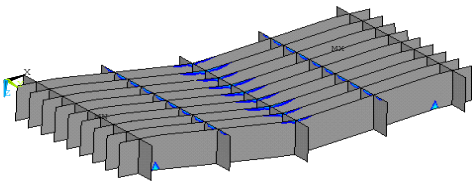
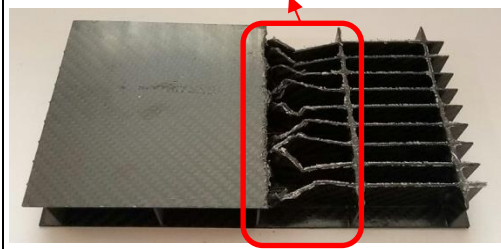
Tablo 8.5’te verilen modellere göre elde edilen toplam eleman ve düğüm sayısı ANSYS’te hesaplanarak Tablo 8.6’da verilmiştir.

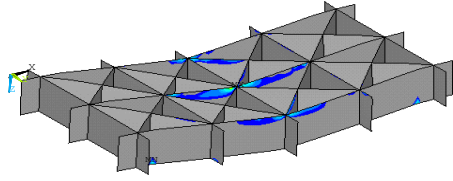
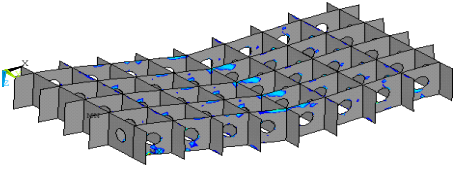
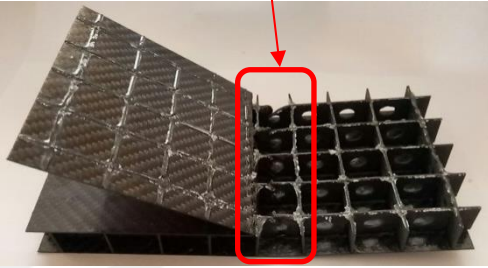
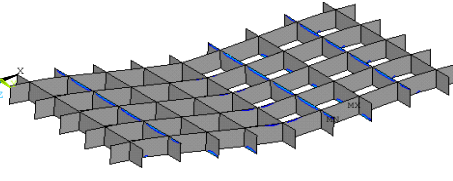
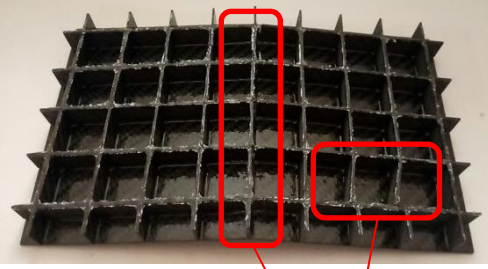
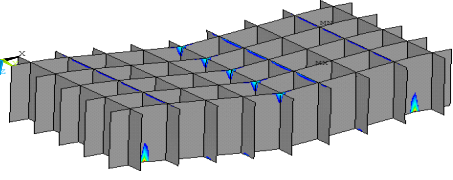
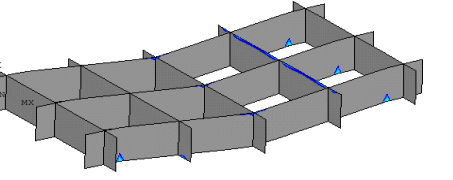
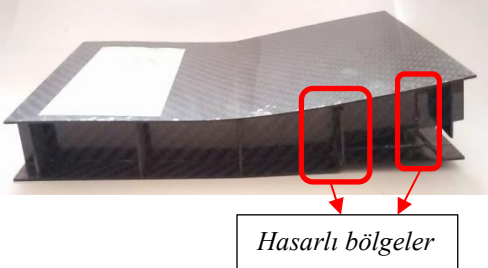
Tablo 8.6 Eğme analizi modelleri için eleman ve düğüm sayıları.

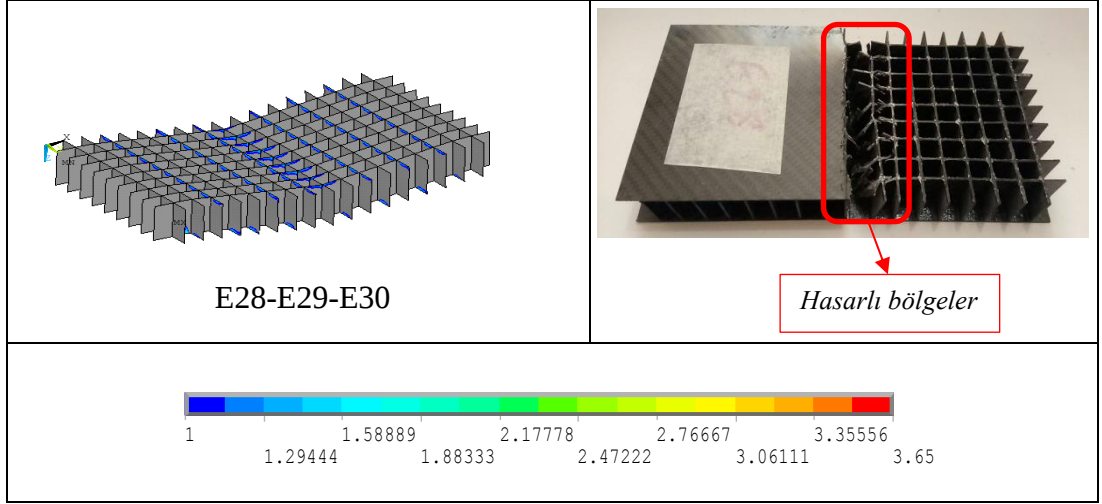
Model adı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
E1-E2-E3	9116	26059
E4-E5-E6	10552	30119
E7-E8-E9	10203	29096
E13-E14-E15	9634	28429
E19-E20-E21	7184	20449
E22-E23-E24	13624	39149
E25-E26-E27	7212	21203
E28-E29-E30	15056	41311

Tablo 8.7’de 4 mm sehim miktarı için eğme analizi yapılan modellerin *Tsai-Wu* hasar kriterine göre hasar bölgeleri ve eğme deneyi yapılan numunelerin hasar bölgeleri gösterilmiştir. Resimlerde gri renkli bölgeler hasarsız yüzeyleri, mavi yoğunluklu renkler ise renk çubuğunda verilen skalaya göre hasarlı bölgeleri göstermektedir.

Tablo 8.7 *Tsai-Wu* hasar kriterine göre eğme analizinde çekirdek yapıda meydana gelen hasar bölgeleri.

Sayısal hasar bölgeleri	Deneysel hasar bölgeleri
 E1-E2-E3	 Hasarlı bölgeler
 E4-E5-E6	

 E7-E8-E9	 Hasarlı bölgeler
 E13-E14-E15	 Hasarlı bölgeler
 E19-E20-E21	 Hasarlı bölgeler
 E22-E23-E24	 Hasarlı bölgeler
 E25-E26-E27	 Hasarlı bölgeler



Tablo 8.7 incelendiği zaman sayısal çalışmadan elde edilen, modeller üzerinde görülen hasarlı bölgeler (mavi renkli bölgeler) ile deneysel çalışma sonucu numunelerde meydana gelen hasarlı bölgelerin benzer bölgeler olduğu görülmektedir.

Ayrıca Şekil 7.16 ile Şekil 7.25 arasındaki eğme test sonuçlarına göre elde edilen kuvvet-sehim grafiklerine sayısal çözüm sonuçları da eklenmiştir. Buna ek olarak grafiklerde sayısal hasar başlangıçları da belirtilmiştir. E19-20-21 ve E25-26-27 numuneleri haricinde değerlerin deneysel değerlerle uyumlu oldukları söylenebilir. Ayrıca kuvvet-sehim doğrusunda lineerlikten sapma noktası olarak kabul edilebilecek sayısal hasar başlangıç yükünün de sonuçları desteklediği görülmüştür.

9. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında mekanik özellikleri belirlenmek üzere 10 farklı tipte, karbon fiber çekirdekli sandviç kompozitin üretimi gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan numunelere basma ve üç nokta eğme testleri uygulanarak her bir numuneye ait mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerle desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

- Kare kesitli numunelerde $h = 20$ mm için maksimum ortalama basma dayanımı 181.7 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 6.7 kN olmuştur. Basma deneyinde hasarlar; çekirdek yapının orta noktasında kırılma ve ezilme şeklinde gerçekleşirken, eğme deneyinde kapak yüzeyi ayrılması ve enine hücre duvarında kopma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Kare kesitli numuneler ile yaklaşık aynı hücre alanına sahip olan dikdörtgen kesitli numunelerin ($h = 20$ mm) maksimum ortalama basma dayanımı 179.6 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 14.2 kN'dur. Bu tip numuneler için basma ve eğme deneylerinde meydana gelen hasarlar, kare kesitli numunelerdeki hasarlarla aynıdır. Dikdörtgen kesitli numunelerin maksimum basma dayanımı kare kesitle yaklaşık olarak aynı iken, eğme dayanımı %52.8 oranında daha yüksektir.
- Kare kesitli numuneler ile yaklaşık aynı hücre alanına sahip olan üçgen kesitli numunelerin ($h = 20$ mm) maksimum basma dayanımı kare ve dikdörtgene göre daha düşük olup, bu değer 139.9 kN'dur. Maksimum ortalama eğme dayanımı ise 7 kN olup kare kesite göre daha yüksektir. Ancak kare ve üçgen kesitli numuneler özgül eğme dayanımlarına göre kıyaslandığında kare kesitli numunenin özgül eğme dayanımı daha yüksektir. Üçgen kesitli numunelerde basma hasarı, köşegen parçalar hücre duvarlarını desteklediğinden dolayı çekirdek yapının tabanına yakın bir noktada kırılma şeklinde gerçekleşmiştir. Buna ek olarak hücre duvarlarında lokal çatlaklar meydana gelmiştir. Eğmede ise yüzey kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmış ve enine hücre duvarında oluşan çatlaklar sonucu numune deformasyona uğramıştır.

- Yukarıda belirtildiği üzere aynı çekirdek yüksekliğine sahip ($h = 20$ mm) kare, dikdörtgen ve üçgen kesitli numunelerde basma dayanımı, kare ve dikdörtgen için yaklaşık olarak aynı olup üçgen kesitli numunede bu değerin daha düşük olduğu görülmüştür. Eğme dayanımında ise kare ve üçgen kesitli numuneler yaklaşık olarak aynı olup dikdörtgen kesitli numunelerde bu değer çok daha büyüktür. Dolayısıyla hem basma hem de eğme dayanımı açısından dikdörtgen kesitli numunelerin, kare ve üçgen kesitli numunelere göre daha iyi özelliğe sahip olduğu söylenebilir.
- Poliüretan köpük dolgulu kare kesitli numunelerin maksimum ortalama basma dayanımının 142.8 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımının 3.1 kN olduğu belirlenmiştir. Hücrelerin poliüretan köpüklerle doldurulması, numunenin enerji absorbe etme yeteneğine katkıda bulunmuştur. Ancak buna karşılık olarak çekirdek yoğunluğu artmış, numunenin basma ve eğme dayanımında kısmi de olsa düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Basmada ve eğmede bu duruma, hücre içerisine eklenen köpüğün kuruma esnasında genişleyerek çekirdek hücre duvarlarında kısmi eksen kaymasına ve devamında kuruyan köpüğün deney sırasında hücre duvarlarına yaptığı iç basınç nedeniyle burkulmaya sebep olabileceği söylenebilir.
- Delikli kare kesitli numunelerin ($h = 20$ mm) maksimum ortalama basma dayanımı 75.6 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 4.1 kN olarak bulunmuştur. Yoğunluğu azaltmak amacıyla açılan delikler, bu bölgelerde gerilme yığılmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla basma ve eğme deneylerinde meydana gelen hasarlar delik çevresinde ezilme şeklinde olmuştur. Çekirdek yapıya deliklerin açılması düşük malzeme yoğunluğu nedeniyle levhanın toplam yoğunluğunu küçük bir miktarda azaltırken, basma ve eğme mukavemetinin deliksiz tip numunelere göre büyük oranda azaltmıştır. Özgül mukavemet değerleri incelendiğinde ise aynı şekilde deliksiz tip numunelerin delikli tip numunelere göre daha iyi özellik gösterdiği tespit edilmiştir.
- Poliüretan köpük dolgulu ve kare delikli çekirdek yapıya sahip numunelerin ($h = 20$ mm) maksimum ortalama basma dayanımı 61.9 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 0.9 kN'dur. Deliksiz tip numunelerde olduğu gibi bu numunelerde de hücre boşluklarının poliüretan

köpükle doldurulması hem basma hem de eğme dayanımında azaltıcı bir etkiye sahip olmuştur.

- 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunelerin maksimum ortalama basma dayanımı 208.1 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 1.9 kN olarak bulunmuştur. 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunelere göre basma dayanımında %12.7'lik bir artış olurken eğme dayanımında %71.6 oranında bir azalma olmuştur.
- 40 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunelerin maksimum ortalama basma dayanımı 142.8 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımı 12.6 kN olarak bulunmuştur. 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip numunelere göre basma dayanımında %21.4'lük bir azalma olurken eğme dayanımında %46.8 oranında bir artış olmuştur. Dolayısıyla da yükseklik değişiminin eğme dayanımı için daha önemli bir parametre olduğu görülebilir.
- Sandviç levhalarda çekirdek yüksekliğinin azaldıkça, hücre duvarlarının burkulma dayanımı ve buna bağlı olarak numunenin basma dayanımı artırmış ancak eğme dayanımı azaltmıştır. Yani sandviç levhaların basma dayanımı çekirdek yüksekliği ile ters orantılı bir değişim gösterirken, eğme dayanımı çekirdek yüksekliği ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir.
- Basma numunesi 4 hücreli, eğme numunesi 8 hücreli ve 1521 mm² hücre alanına sahip olan numunelerin maksimum ortalama basma dayanımının 86.9 kN ve maksimum ortalama eğme dayanımının 2.9 kN olduğu tespit edilmiştir. Bu numunelerin basma ve eğme dayanımlarının 361 mm² hücre alanına sahip numunelere göre daha düşük olduğu bilinen bir durum olduğu için numuneler özgül mukavemetlerine göre karşılaştırılmış, ancak hem basma hem de eğme dayanımları 361 mm² alana sahip numunelerden düşük çıkmıştır.
- Basma numunesi 64 hücreli, eğme numunesi 128 hücreli ve 81 mm² hücre alanına sahip olan numunelerin maksimum basma dayanımları, test cihazının kapasite sınırına yaklaştığı için belirlenememiştir. Ancak sayısal çalışmada kritik burkulma yükünün 250.1 kN olduğu belirlenmiştir. Maksimum ortalama eğme dayanımı ise deneysel çalışmalardan 12.7 kN olarak hesaplanmıştır. Bu numunelerin eğme dayanımları 361 mm² hücre

alanına sahip kare kesitli numunelere göre % 47.2 oranında daha büyüktür. Ancak özgül eğme dayanımları yaklaşık olarak aynıdır.

- 81 mm², 361 mm² ve 1521 mm² (sırasıyla 128, 32 ve 8 hücreli) hücre alanına sahip numunelerin eğme dayanımları hücre alanına ters orantılı bir şekilde artmıştır. Hücre alanı 81 mm²'den 361 mm²'ye %77.6 oranında artarken, numunelerin eğme dayanımı %47.2 azalmıştır. Benzer şekilde hücre alanı 361 mm²'den 1521 mm²'ye artışta %76.3 artarken, basma dayanımı %52.2 ve eğme dayanımı %56.7 oranında azalmıştır. Ancak numuneler özgül eğme dayanımlarına göre incelendiğinde 128 ve 32 hücreli numunelerin özgül eğme dayanımları yaklaşık olarak aynı (%3 fark), 8 hücreli numunelerin ise bu numunelerden %29 oranında daha düşük çıktığı görülmüştür. Özgül eğme sonuçlarına göre hücre sayısını artırmanın, bir noktadan sonra numunelerin özgül eğme dayanımları üzerindeki etkisinin azaldığı söylenebilir.
- Numunelerin yanal basma dayanımları, eksenel basma dayanımlarına göre oldukça küçük bir değere sahip olmuştur. Ayrıca hücre alanına göre numunelerin eksenel basma dayanımında gösterdiği büyük dayanım farkı yanal basmada görülmemiştir. Yanal basma testinde numunelerde görülen ilk hasar yüzey kapakların çekirdek yapıdan ayrılması olmuştur. Bu yüzden ara yüzey bağlantısını sağlayan yapıştırıcı malzemenin, yanal basma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- Hücre şeklinin değişimi basma dayanımını çok fazla etkilemezken, dikdörtgen kesit kullanımı kare ve üçgene göre eğme dayanımını yaklaşık %100 oranında artırmaktadır. Bu yüzden hücre şekli eğme dayanımı üzerinde önemli bir parametredir.
- Sandviç levhanın çekirdek yapısına köpük dolgusu eğme ve basma dayanımını artırıcı bir etki yapmazken, deneylerdeki gözlemlere göre hasar anında yük etkisini köpüksüz numunelere göre önemli bir ölçüde absorbe etmektedir.

- Hücre yüksekliğinin 4 katına çıkarılması ($h=10$ mm'den $h=40$ mm'ye) durumunda basma dayanımı ortalama %31.4 oranında azaltırken eğme dayanımını yaklaşık 6 katına çıkarmıştır. Hücre yüksekliğinin artışı eğme dayanımı üzerinde oldukça önemli bir parametredir.
- Hücre yoğunluğunun 4 kat artması (4 hücreden 16 hücreye) basma dayanımını yaklaşık 2 katına çıkarırken, eğme dayanımını da aynı oranda artırmıştır. Hücre yoğunluğunun değişimi eğme ve basma dayanımı için aynı oranda etkiye sahip bir parametredir.
- Eğme deneyi yapılan tüm numunelerde öncelikli olarak kapaklar çekirdek yapıdan ayrılmış ve buna bağlı olarak çekirdek yapıda çeşitli hasar tipleri meydana gelerek numuneler deforme olmuştur. Dolayısıyla eğme numunelerinde ilk deformasyon, kapaklarda gerçekleşmiştir. Tasarımcılar daha iyi eğme dayanımı sağlamak için, optimum özgül eğme dayanımına sahip olan numuneler ile daha güçlü bir ara yüzey bağlantısı kullanmalıdırlar.

KAYNAKLAR

- [1] Kaw, A.K. (2006). “Mechanics Of Composite Materials” Second Edition, CRC Press Publisher, USA.
- [2] Paik, J.K., Anil K. Thayamballi, A.K. and Kim, G.S.(1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 35(3), 205–231.
- [3] Daniel, I.M. and Abot, J.L. (2000). Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams. *Composites Science and Technology*, 60(12-13), 2455-2463.
- [4] Arslan, N. ve Kaman, M.O.(2002). Alüminyum, kâğıt 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.
- [5] Pan, S.D. ,Wu, L.Z., Sun, Y.G., Zhou, Z.G. and Qu, J.L. (2006). Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores. *Composite Structures*, 72(1), 42–46.
- [6] Bunyawanichakul, P., Castanie, B. and Barrau, J.J.(2008). Non-linear finite element analysis of inserts in composite sandwich structures. *Composites: Part B*, 39(7-8), 1077-1092.
- [7] Aktay, L., Johnson, A. F. and Kroplin, B.H.(2008). Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(9), 2616–2630.
- [8] Galletti, G.G., Vinquist, C. and Es-Said, O.S.(2008). The oretical design and analysis of a honeycomb panel sandwich structure loaded in pure bending. *Engineering Failure Analysis*, 15(5), 555–562.
- [9] Fiedler, T. and Ochsner, A.(2008). Experimental analysis of the flexural properties of sandwich panels with cellular core materials. *Material Wissenschaft und Werkstofftechnik*, 39(2), 121,124.
- [10] He, M. and Hu, W. (2008). A study on composite honeycomb sandwich panel structure. *Materials and Design*, 29(3), 709–713.
- [11] Othman, A.R. and Barton, D.C.(2008). Failure initiation and propagation characteristics of honeycomb sandwich composites. *Composite Structures*, 85(2), 126–138.
- [12] Russell, B. P. , Deshpande, V. S. and Wadley, H. N.G. (2008). Quasistatic Deformation And Failure Modes Of Composite Square Honeycombs, 3, 1315-1340.

- [13] Belouettar, S., Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R. and Freres, P. (2009). Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Structures*, 87(3), 265–273.
- [14] Jen, Y.M., Ko, C. W. and Lin, H.B.(2009). Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams. *International Journal of Fatigue*, 31(3), 455–462.
- [15] Solmaz, M. Y. ve Kaman, M. O. (2010). Petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgusunun kritik burkulma yüküne etkisi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 5, 1306-3111.
- [16] Sakar, G., Yaman, M. ve Bolat F. (2010). Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi.
- [17] Feli, S. ve Namdari Pour, M.H.(2011). An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composites: Part B*, 43, 2439–2447.
- [18] Tan, C.Y. ve Akil H. Md.(2011). Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core, *Composites: Part B*, 43, 1433–1438.
- [19] Du, Y., Yan, N. ve Kortschot, M. T.(2012). Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: Fabrication and evaluation, *Composites: Part B*, 43, 2875–2882.
- [20] Yang, J., Xiong, J., Ma, L., Wang, B., Zhang, G. ve Wu L.(2013). Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal truss sandwich panels with viscoelastic layers, *Composite Structures*, 106, 570–580.
- [21] Jen, Y., Teng, F. ve Teng, T. (2013). Two-stage cumulative bending fatigue behavior for the adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich panels, *Materials and Design*, 54, 805–813.
- [22] Du, Y., Yan, N. ve Kortschot, M. T. (2013). An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite/honeycomb core sandwich panels, *Composite Structures* 106, 160–166.
- [23] Xiong, J. , LiMa, Stocchi, A. , Yang, J. , Wu, L. , Pan S. (2013). Bending response of carbon fiber composite sandwich beams with three dimensional honeycomb cores. *Composite Structures*, 108 (1), 234-242.
- [24] Stocchi, A., Colabella , L., Cisilino , A. ve Alvarez V. (2013). Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics, *Materials and Design*, 55, 394–403.

- [25] Shi, S., Sun, Z., Hu, X. ve Chen, H. (2013). Carbon-fiber and aluminum-honeycomb sandwich composites with and without Kevlar-fiber interfacial toughening, *Composites: Part A*, 67, 102–110.
- [26] Abbadi, A., Tixier, C., Gilgert, J. ve Azari Z. (2014). Experimental study on the fatigue behaviour of honeycomb sandwich panels with artificial defects, *Composite Structures*, 120, 394–405.
- [27] Gilioli, A., Sbarufatti, C., Manes, A. ve Giglio M. (2013). Compression after impact test (CAI) on NOMEX honeycomb sandwich panels with thin aluminum skins, *Composites: Part B*, 67, 313–325.
- [28] Lua, C., Zhao, M., Jie, L., Wang, J., Gao, Y., Cui, X. ve Chen P. (2014). Stress distribution on composite honeycomb sandwich structure suffered from bending load, *Procedia Engineering*, 99, 405 – 412.
- [29] Shi, S., Sun, Z., Hu, X. ve Chen H. (2014). Flexural strength and energy absorption of carbon-fiber-aluminum-honeycomb composite sandwich reinforced by aluminum grid, *Thin-Walled Structures* 84, 416–422.
- [30] Nagasankar P., Prabu, S. B. and Velmurugan R. (2015). Role of different fiber orientations and thicknesses of the skins and the core on the transverse shear damping of polypropylene honeycomb sandwich structures. *Mechanics of Materials*, 91(1), 252-261.
- [31] Boorle, R. K. ve Mallick, P.K. (2015). Global bending response of composite sandwich plates with corrugated core: Part I: Effect of geometric parameters. *Composite Structures*, 141, 375-388.
- [32] Li, J., Hunt, J. F., Gong, S. ve Cai, Z. (2015). Simplified analytical model and balanced design approach for light-weight wood-based structural panel in bending, *Composite Structures*, 136, 16–24.
- [33] Ndiaye, E.B., Marechal, P. ve Duflo, H. (2015). Adhesion characterization and defect sizing of sandwich honeycomb composites, *Ultrasonics*, 62, 103–111.
- [34] Akkuş, H., Düzcükoğlu, H. ve Şahin, Ö. S. (2015). Alüminyum bal peteği yapılarında oluşan eğilme kuvvetlerinin çoklu regresyon ile incelenmesi, *CBÜ Fen Bil. Dergi*, 11, 217-223.
- [35] Xu, G., Yang, F., Zeng, T. Cheng, S. ve Wang, Z. (2015). Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams. *Composite Structures*, 138, 342-351.
- [36] Ivanez, I., Moure, M.M., Garcia-Castillo, S.K. ve Sanchez-Saez S. (2015). The oblique impact response of composite sandwich plates, *Composite Structures*, 133, 1127–1136.

- [37] Norouzi, H. ve Rostamiyan, Y.(2015). Experimental and numerical study of flatwise compression behavior of carbon fiber composite sandwich panels with new lattice cores, *Construction and Building Materials*, 100, 22–30.
- [38] Sun Z., Shi S., Guo X., Hu X. ve Chen H. (2015). On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core, *Composites Part B* (2016), 2016.03.054.
- [39] Hussein, R. D., Ruan, D., Lu , G., Sbarski, I. (2016). Axial crushing behaviour of honeycomb-filled square carbon fibre reinforced plastic (CFRP) tubes, *Composite Structures*, 140, 166–179.
- [40] Xiong, J., Vaziri, A., Ghosh, R., Hu, H., Ma, L. ve 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.
- [41] Zhou, J., Guan, Z.W. ve Cantwell W.J.(2016).Scaling effects in the mechanical response of sandwich structures based on corrugated composite cores, *Composites Part B*, 93, 88-96.
- [42] Berthelot, Jean-Marie (1999). “Composite Materials Mechanical Behavior and Structural Analysis”, Springer-Verlag Publishers, Newyork, USA.
- [43] URL-1 <http://www.bilgiustam.com/kompozit-malzemeler-hakkinda-hersey/> Kompozit Malzemeler, 20 Şubat 2017.
- [44] URL-2 <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IISc-BANG/ Composite %20Materials/pdf/Lecture Notes/LNm11.pdf> , Engineering Applications of Composite Materials, 20 Şubat 2017.
- [45] Dr. Selvaraju, S. ve Ilaiyavel, S. (2011). Applications of Composites In Marine Industry, *Journal of Engineering Research and Studies*, 2, 89-91.
- [46] URL-3 <http://www.compositesworld.com/articles/composites-take-the-hit-in-us-navy-patrol-boat> , Composite Boat, 21 Şubat 2017.
- [47] Thori, P., Sharma, P. ve Bhargava, M. (2013). An Approach Of Composite Materials In Industrial Machinery: Advantages, Disadvantages And Applications, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2, 350-355.
- [48] URL-4 https://www.diabgroup.com/~media/Files/Manuals-Guides/DIABguide-to-Core-and-sandwich_P1r2-locked.pdf , Core and Sandwich, 25 Şubat 2017.
- [49] Bitzer, T. (1997). “Honeycomb Technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing” Chapman & Hall Publisher, Dublin, CA, USA.
- [50] Gupta, N. (2003). “Characterization Of Syntactic Foams And Their Sandwich Composites: Modeling And Experimental Approaches” Bangalore, India.

- [51] URL-5 http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf, Honeycomb Attributes and Properties, 28 Şubat 2017.
- [52] Kolat, K. (2005). Farklı Ortamların Sandviç Kompozitlerin Kırılma Tokluğu üzerindeki Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [53] Chawla, K.K. (2013). “Composite Materials” Department of Materials Science and Engineering, University of Alabama, Birmingham, USA.
- [54] URL-6 <http://www.commonfibers.com/what-is-carbon-fiber> , Common Fibers, 3 Mart 2017.
- [55] Kara, E. (2012). Çeşitli Elyaf Dizilimleriyle Oluşturulmuş Metal Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- [56] Arslan, N., Kaman, M. O. (2002). “Alüminyum, Kâğıt Ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 4 (3): 113-123.
- [57] Hexcel Composites, (2000). “Hexweb Honeycomb Sandwich Design Technology”
- [58] Paulino, M. and Teixeira-Dias, F. (2012). “Polyurethane”, Chapter 15: On the Use of Polyurethane Foam Paddings to Improve Passive Safety in Crashworthiness Applications, InTech Publisher.

ÖZGEÇMİŞ

Burak KIYAK 1990 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğretimini Elazığ'da tamamladı. 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD 'da yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.

