Karma Elyaf Esaslı Termoplastik Kompozit Malzemeler Geliştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Sıcak Şekil Alma Davranışının İncelenmesi

Momen N M ELBHNASAWI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karma Elyaf Esaslı Termoplastik Kompozit Malzemeler Geliştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Sıcak Şekil Alma Davranışının İncelenmesi

Momen N M ELBHNASWI

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS Tezi
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Karma Elyaf Esaslı Termoplastik Kompozit Malzemeler Geliştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Sıcak Şekil Alma Davranışının İncelenmesi

Momen N M ELBHNASAWI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Bu tez çalışmasında cam/PP esaslı termoplastik kompozit sandviç yapıların geliştirilmesi, mekanik özelliklerinin ve sıcak şekil alma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı çekirdek yoğunluklarına sahip cam/PP keçe ve sürekli cam/PP dokuma takviyeli yapıların hem statik hem de dinamik yükler altındaki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Statik çekme testlerinde sürekli cam/PP takviyesiyle çekme dayanımı 42 MPa seviyelerine ulaşmış, keçe esaslı plakaların 0° lif yönünde çekme dayanımı 5.13 MPa ve 90° yönünde 6.34 MPa olarak ölçülmüştür. Statik üç nokta eğilme testlerinde, 2600 g/m² keçe çekirdekli yapı 30 MPa eğilme dayanımıyla en yüksek rijitliği sergilemiştir.

Yüksek hızlı darbe penetrasyon testlerinde, 1000 g/m² keçe çekirdekli yapı optimum delinme direncini göstermiş ve 6572 N maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Dinamik üç nokta eğilme testlerinde ise yine 1000 g/m² keçe çekirdekli yapı en iyi darbe dayanımını sergilemiştir. Keçe yoğunluğunun artışı rijitliği artırsa da deformasyon kontrolünü olumsuz etkileyerek ani göçme modlarını hızlandırmıştır. Sürekli cam/PP yüzey takviyesinin tüm yükleme koşullarında sistem performansını anlamlı şekilde artırdığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, keçe yoğunluğu ve yüzey takviyesinin dengeli kombinasyonlarının sandviç yapıların tasarımında kritik parametreler olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışma, termoplastik sandviç yapıların otomotiv ve savunma gibi uygulamalarda potansiyel kullanımına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karma Elyaf, Termoplastik Kompozit, Kısa Elyaf, Katmanlı Termoplastik Kompozit, Sıcak Şekil Alma
2025 xv + 80 sayfa.

ABSTRACT

MSc/PhD Thesis

Development of Commingled Fiber Based Thermoplastic Composite Materials, Investigation of their Mechanical Properties and Hot Formability

MOMEN N M ELBHNASAWI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

In this thesis, glass/PP-based thermoplastic composite sandwich structures, their mechanical properties, and their thermoforming behaviors have been developed. The mechanical performance of the sandwich structures with varying core densities, produced with glass/PP nonwoven (felt) cores and continuous glass/PP woven surface reinforcements, has been comparatively evaluated under static and dynamic loading conditions. Under static tensile testing, continuous glass/PP reinforced plates achieved a tensile strength of up to 42 MPa, and nonwoven reinforced plates achieved tensile strengths of 5.13 MPa at 0° and 6.34 MPa at 90° fiber direction. Under static three-point bending testing, the sandwich structure with 2600 g/m² felt core obtained the greatest bending strength of 30 MPa.

In high-velocity impact penetration tests, the 1000 g/m² felt core presented the highest resistance to penetration with a maximum force of 6572 N. In dynamic three-point bending impact tests. While felt core density increase enhanced stiffness, it negatively affected deformation tolerance, encouraging more abrupt failure modes. Continuous glass/PP surface reinforcement significantly enhanced overall system performance for all loading types.

The findings indicate that surface reinforcement balance and core density are critical in order to have the best sandwich structure designs. The study forms part of the possible application of thermoplastic sandwich composites in automotive, defense, and structural uses.

Key words: Commingled Fiber, Thermoplastic Composite, Short Fiber, Laminated Thermoplastic Composites, Hot Formability.
2025 xv + 80 sayfa.

TEŞEKKÜR

Bu tezin her aşamasında yanımda olan, sabırları, sevgileri ve desteğiyle bana güç veren sevgili nişanlıma ve canım aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Onların inancı ve desteği olmasaydı bu yolculuk çok daha zorlu olurdu.

Bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, her zaman anlayışı ve sabrıyla destek olan değerli Prof. Dr. Murat YAZICI hocama gönülden teşekkür ederim. Onun rehberliği ve katkıları benim için büyük bir şanstı. Ayrıca, çalışmalarım sırasında katkı ve desteklerini esirgemeyen Dr. Gönenç Duran ve Dr. Harun Güçlü hocalarıma da teşekkürlerimi sunarım.
Bu çalışma sürecinde birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum UMİMAG ekibine katkıları ve iş birlikleri için teşekkür ederim. Ekip çalışması ve dayanışma sayesinde verimli ve keyifli bir çalışma ortamı oluşmuştur.

TÜBİTAK-TEYDİB 1505 programı destekli 5220143 numaralı ve "Geri dönüşüm PET matrisli, doğal ve yüksek mukavemetli elyaf takviyeli karma ipliklerden dokunmuş, çok katmanlı organik plakalar geliştirilmesi, batarya kutusu üretimi ve testleri" başlıklı proje kapsamında gerçekleştirmiştir. Sağlanan desteklerden dolayı TÜBİTAK- TEYDİB'e teşekkürlerimi sunarım.

Momen N M ELBHNASAWI
24/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1 Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler 2
2.2 Cam Elyaf Takviyeli PP Kompozitler 3
2.3 Karma Elyaf Takviyeli Kompozitler 4
2.4 Elyaf-Matris Arayüzey Etkileşimi 5
2.5 Sandviç Yapılar ve Termoplastik Kompozitler 6
2.6 Termoformlama Süreci ve Kompozit Malzemelerde Uygulanabilirliği 7
2.7 Doğal ve Sentetik Elyafların Hibrid Kompozitlerde Kullanımı 9
2.8 Elyaf Özelliklerinin Kompozit Davranışına Etkisi 9
2.8.1 Elyaf Boyu ve Tipi: 10
2.8.2 Elyaf-Çap ve Aspect Ratio (Boy/Çap Oranı): 10
2.8.3 Yüzey Özellikleri ve Arayüzey Bağlanması: 10
2.8.4 Elyaf Yönelimi (Oryantasyonu): 11
2.8.5 Elyaf-Matris Bağlantısının Kompozit Üzerindeki Etkisi: 11
2.9 Matris Malzemeler 11
2.9.1 Termoset Matrisler 11
2.9.2 Termoplastik Matrisler 12
2.9.3 Termoplastik Matrislerin Sınırlamaları 12
2.10 Kompozit Üretim Yöntemleri 13
2.10.1 Film Yığma (Film Stacking) Yöntemi 13
2.10.2 Sıcak Presleme (Hot Pressing) 13
2.10.3 Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Kalıplama 14
2.10.4 Isıl Şekillendirme (Thermoforming) 14
2.11 Kompozit Malzemelerde Geri Dönüştürülmüş Elyaf Kullanımı 14
2.12 Kompozit Malzemelerin Yangın Davranışı ve Termal Kararlılığı 15
2.13 Kompozitlerde Yaşlanma, UV Etkisi ve Çevresel Dayanım 15
2.13.1 UV Işınımının Etkisi 16
2.13.2 Nem ve Su Emilimi 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 17
3.1 Kullanılan Malzemeler 17
3.1.1 Cam/PP Karma Elyaflı Termoplastik Keçeler 17
3.1.2 Dairesel Kesitli Hücreli PP Çekirdek 18
3.1.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Cam/PP Termoplastik Bantlar 18
3.2 Cam Elyaf Türleri ve Kullanılan Elyafın Özellikleri 19
3.3 Elyaf/Matris Oranının Belirlenmesi- Elyaf Uzunluğu Belirlenmesi. 20
3.3.1 Kül Test 20
3.3.2 Cam Elyaf Uzunluk Ölçümü 22
3.4 Kompozit Malzeme Üretimi 23
3.4.1 Kullanılan Pres Cihazı 23
3.4.2 Yüzey Plaka Üretimi 24
3.4.3 Çekirdek Plaka Üretimi 25

3.4.4 Sürekli Elyaf Takviyeli Cam/PP Dokuma Plaka Üretimi 27
3.5 Statik Testler 29
3.5.1 Test Cihazı 30
3.5.2 Çekme Testi 30
3.5.3 Üç Nokta Eğilme Testi 32
3.6 Dinamik Testler 38
3.6.1 Dinamik Test Sistemi Genel Yapısı 38
3.6.2 Yüksek Hızlı Darbe Üç Nokta Eğilme Testi 40
3.6.3 Yüksek Hızlı Darbe Penetrasyon Testi 41
4. BULGULAR 45
4.1 Hesaplama Formülleri 45
4.1.1 Çekme testinde elde edilen veriler 45
4.1.2 3 Nokta eğilme testinde kullanılan formüller 45
4.2 Çekme testi 46
4.2.1 0° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit 46
4.2.2 90° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit 48
4.2.3 SET Cam/PP Dokuma Kompozit Plaka 49
4.3 Statik üç nokta eğilme testi 51
4.3.1 Cam/PP Keçe Takviyeli Dairesel Kesitli Çekirdekli Sandviç 51
4.3.2 Takviyesiz Dairesel Kesitli PP Çekirdek 52
4.3.3 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç 53
4.3.4 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç 54
4.3.5 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç 55
4.4 Yüksek Hızlı Darbe Penetrasyon Testi 56
4.4.1 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç 56
4.4.2 Takviyesiz Dairesel Kesitli PP Çekirdek 60
4.4.3 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 61
4.4.4 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 63
4.4.5 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 65
4.5 Yüksek Hızlı Darbe Üç Nokta Eğilme Testi 66
4.5.1 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç 66
4.5.2 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 68
4.5.3 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 70
4.5.4 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç 72
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 74
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
A	Kesit alanı
ε	Kopma uzaması
σ	Çekme gerilmesi
F	Kuvvet
ΔL	Numune başlangıç ve son boyunun farkı
L0	Numune başlangıç boyu
E	Elastik modülü
σ_f	Eğilme girilme
E_f	Eğilme modülü
b	Numune genişliği
h	Numune kalınlığı
L	Numunenin etkili uzunluğunu
δ	Yer değiştirme
$m_{kül}$	Kül fırınında yakma sonrası kalan cam elyaf kütlesi.
m_{ilk}	İlk numune toplam kütlesi
Kısaltmalar	**Açıklama**
3NE	Üç nokta eğilme
EVA	Etilen Vinil Asetat
g	Gram
Gpa	Gigapascal
m	Metre
mm	Milimetre
MPA	Mega pascal
N	Newton
s	Saniye
SET	Sürekli elyaf takviyeli
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polyetheretherketone
PP	Polipropilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Sandviç yapı bir örnek.	7
Şekil 2.2.	termoformlama süreç.	8
Şekil 2.3	Kompozit Üretim Yöntemleri	13
Şekil 2.4.	Kompozit Malzemede Nem Emilimi.	16
Şekil 3.1.	Şiteks Teknik Tekstil A.Ş.Termoplastik keçesi.	17
Şekil 3.2.	Viking Plastics dairesel kesitli PP çekirdek.	18
Şekil 3.3	Dairesel kesitli 3 boyutlu.	18
Şekil 3.4	Sürekli elyaf takviyeli cam/PP termoplastik bant dokuma yöntem ile plaka üretirken	19
Şekil 3.5	a)Kül test için kullanılan kül fırın.b) Kül test parametreler.	21
Şekil 3.6	Kül testten önce kompzit keçe ağırlıkları. a) 1000 g/m^2. b)1800 g/m^2. c)2600 g/m^2.	21
Şekil 3.7	Kül testten sonra saf cam elyaf ağırlığı. a) 1000 g/m^2. b) 1800 g/m^2. c)2600 g/m^2.	21
Şekil 3.8	İSM-PRO dijital mikroskop.	22
Şekil 3.9	Mikroskop altında cam elyaf görüntüsü.	23
Şekil 3.10	AG Hydraulics marka sıcak pres cihazı.	23
Şekil 3.11	Kompozit keçe üretim akış şeması.	24
Şekil 3.12	1800 (g/m^2) keçe (Preslemeden önce).	24
Şekil 3.13	1800 (g/m^2) keçeden üretilmiş plaka.	25
Şekil 3.14	Yüzey plaka üretirken pres ve presin parametreleri.	25
Şekil 3.15	a) Pres tabla ve kalınlık ayarlayan metal plakalar. b) Çekirdek plakalar üretim esnasında.	26
Şekil 3.16	Çekirdek plakalar için kesilmiş keçe örneği.	26
Şekil 3.17	Çekirdek katman için üretilmiş plaka örneği.	27
Şekil 3.18	Cam/PP şeritlerden örgü yaparak plaka üretimi	28
Şekil 3.19	Dokuma yerleşim şeması.	28
Şekil 3.20	Ön ısıtma işlem için kullanılmış fırın.	29
Şekil 3.21	Presten çıkan Cam/PP 2 katmanlı plaka.	29
Şekil 3.22	Shimadzu AG-X Plus test cihazı.	30
Şekil 3.23	a) 0° lif yönünde çekme numuneler. b) 90° lif yönünde çekme numuneler. c) SET Cam/PP çekme numuneler.	31
Şekil 3.24	Çekme test esnasında.	32
Şekil 3.25	Yüzey plakalar için kesilmiş parçalar. a) Keçeden üretilmiş plakadan. b) SET Cam/PP üretilmiş plakadan.	33
Şekil 3.26	EVA yapıştırıcı uygulama örneği.	33
Şekil 3.27	3NE numune pres altında.	34
Şekil 3.28	Kompozit sandviç yapı üretim metodu.	34
Şekil 3.29	3NE test numuneler örneği.	35
Şekil 3.30	SET yüzey plakalı kompozit sandviç statik 3NE test	37

Şekil 3.31	Dairesel kesitli kompozit sandviç statik 3NE test esnasında.	37
Şekil 3.32	Saf dairesel kesitli çekirdek statik 3NE test esnasında.	37
Şekil 3.33	Dinamik test sisteminin şematik gösterimi.	39
Şekil 3.34	Dinamik test düzeneği.	39
Şekil 3.35	3NE test darbe ucu boyutları.	40
Şekil 3.36	3NE test desteği.	41
Şekil 3.37	3NE test düzeneği şema görseli.	41
Şekil 3.38	Penetrasyon test darbe ucu ve boyutları	42
Şekil 3.39	Penetrasyon test için kullanılan destek.	42
Şekil 3.40	Penetrasyon test düzeneği gösteren şema.	42
Şekil 3.41	Penetrasyon test için hazırlanmış numuneler örneği.	44
Şekil 4.1	Çekme testten sonra numunelere gelen hasar.	47
Şekil 4.2	Çekme testten sonra numunelere gelen hasar mikroskop altındaki görüntüler.	47
Şekil 4.3	0° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit kuvvet-uzama grafiği.	47
Şekil 4.4	Çekme testten sonra numunelere gelen hasar.	48
Şekil 4.5	90° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit kuvvet-uzama grafiği.	49
Şekil 4.6	SET cam/PP numuneler çekme testten sonra.	50
Şekil 4.7	SET cam/PP çekme testi kuvvet- uzama grafiği.	50
Şekil 4.8	Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç kuvvet- sehim grafiği.	51
Şekil 4.9	Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek statik 3NE Kuvvet-sehim grafiği.	52
Şekil 4.10	1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği.	53
Şekil 4.11	1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği	54
Şekil 4.12	2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği.	56
Şekil 4.13	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 1 kuvvet-zaman grafiği.	57
Şekil 4.14	Numune 1 penetrasyon test sonra. a) Numunenin ön taraftaki yüzey plaka ve çekirdek. b) Numunenin arka tarafı.	58
Şekil 4.15	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 2 kuvvet-zaman grafiği.	58
Şekil 4.16	Numune 2 penetrasyon test sonra. a) Numunenin ön yüzey. b) Numunenin arka yüzey.	58
Şekil 4.17	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 3 kuvvet-zaman grafiği	59
Şekil 4.18	Numune 3 penetrasyon test sonra. a) Numunenin ön yüzey. b) Numunenin arka yüzey.	59
Şekil 4.19	Penetrasyon test esnasında hızlı kamera görüntüleri.	59
Şekil 4.20	Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numune 1 test kuvvet-zaman grafiği.	60

Şekil 4.21	Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numune 2 test kuvvet-zaman grafiği.	60
Şekil 4.22	Saf PP çekirdek testten sonra. a) Numune 1. b) Numune 2	61
Şekil 4.23	Saf PP çekirdek hızlı kamera görüntüler test esnasında. a) Penetrasyon başlangıç anı. b) Tamamen çekirdek dilendiği an.	61
Şekil 4.24	1000 g/m² keçe çekirdekli numune 1 penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.	62
Şekil 4.25	1000 g/m² keçe çekirdekli numune 2 penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.	62
Şekil 4.26	Numune 1 penetrasyon test sonra. a) Numunenin ön yüzey. b) Numunenin arka yüzey.	63
Şekil 4.27	1000 g/m² keçe çekirdekli penetrasyon test sandviç hızlı kamera görüntüsü.	63
Şekil 4.28	1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.	64
Şekil 4.29	1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numune 1 penetrasyon testi sonrası.	64
Şekil 4.30	1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test hızlı kamera görüntüleri	65
Şekil 4.31	2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.	65
Şekil 4.32	2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numune 1 penetrasyon testi sonrası.	66
Şekil 4.33	2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test hızlı kamera görüntüleri.	66
Şekil 4.34	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE Kuvvet-zaman grafiği.	67
Şekil 4.35	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE testten sonra numuneler.	68
Şekil 4.36	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç 3NE hızlı kamera görüntüsü.	68
Şekil 4.37	1000 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.	69
Şekil 4.38	1000 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.	69
Şekil 4.39	1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test hızlı kamera görüntüleri.	70
Şekil 4.40	1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.	70
Şekil 4.41	1800 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.	71
Şekil 4.42	1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test hızlı kamera görüntüleri.	71
Şekil 4.43	2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.	72
Şekil 4.44	2600 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.	72
Şekil 4.45	2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE hızlı kamera.	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Termoplastik Matris Özellikleri	3
Çizelge	2.2.	Cam Elyaf ve PP Elyaf Karşılaştırma	5
Çizelge	2.3.	Termoformlama Sürecinde Kritik Parametreler	8
Çizelge	2.4.	Doğal ve Sentetik Elyafların Özellikler	9
Çizelge	2.5.	Matris malzeme türlerinin karşılaştırılması.	12
Çizelge	3.1.	Çalışmada kullanılan keçeler ve kullanım şekli.	17
Çizelge	3.2.	Cam elyaf türlerinin genel karşılaştırılma.	19
Çizelge	3.3.	Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri karşılaştırılma	20
Çizelge	3.4.	Hesaplanan elyaf oranları.	22
Çizelge	3.5	Kompozit keçe üretim özeti.	27
Çizelge	3.6.	0° lif yönünde çekme numunelerin boyutları.	31
Çizelge	3.7.	90° lif yönünde çekme numunelerin boyutları.	31
Çizelge	3.8.	SET Cam/PP çekme numunelerin boyutları.	31
Çizelge	3.9.	Dairesel kesitli Cam/PP keçe yüzey takviyeli 3NE numuneler	35
Çizelge	3.10	Dairesel kesitli PP çekirdek (Takviyesiz) 3NE numuneler	36
Çizelge	3.11	1000 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.	36
Çizelge	3.12	1800 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.	36
Çizelge	3.13	2600 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.	36
Çizelge	3.14	Dairesel kesitli çekirdek Cam/PP keçe yüzey takviyeli penetrasyon numuneleri.	43
Çizelge	3.15	Saf dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numuneleri.	43
Çizelge	3.16	1000 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler	43
Çizelge	3.17	1800 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler	43
Çizelge	3.18	2600 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler	43
Çizelge	4.1.	0° Lif yönü- Cam/PP keçe kompozit çekme test sonuçları	46
Çizelge	4.2.	90° Lif yönü- Cam/PP keçe kompozit çekme test sonuçları.	48
Çizelge	4.3.	SET Cam/PP Dokuma Kompozit Plaka çekme test sonuçları	49
Çizelge	4.4.	Cam/PP Keçe Takviyeli Dairesel Kesitli Çekirdekli Sandviç statik 3NE sonuçları.	51
Çizelge	4.5.	Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek statik 3NE sonuçları.	52
Çizelge	4.6.	1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları.	53
Çizelge	4.7.	1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları.	54
Çizelge	4.8.	2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları	55
Çizelge	4.9.	Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test sonuçları.	57
Çizelge	4.10	Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek test sonuçları.	60
Çizelge	4.11	1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları.	62
Çizelge	4.12	1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları	64
Çizelge	4.13	2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları	65

Çizelge 4.14 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE test sonuçları. 67
Çizelge 4.15 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları. 68
Çizelge 4.16 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları. 70
Çizelge 4.17 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları 72
Çizelge 5.1. Çekme Testleri Karşılaştırması. 74
Çizelge 5.2. Statik Üç nokta eğilme testleri karşılaştırması. 74
Çizelge 5.3. Penetrasyon test karşılaştırması. 75
Çizelge 5.4. Statik Üç nokta eğilme testleri karşılaştırması. 75

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ve endüstriyel gereksinimler doğrultusunda, yüksek mekanik performansa sahip, hafif, geri dönüştürülebilir ve çevresel etkileri minimize edilmiş malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Bu bağlamda, termoplastik matrisli kompozit malzemeler; düşük yoğunlukları, yeniden şekillendirilebilme kabiliyetleri, kısa çevrim süreleri ve geri dönüşüme uygun yapıları sayesinde geleneksel malzemelere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, savunma ve yapı sektörlerinde bu malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır.

Kompozit malzemelerin performansında, matris ve takviye elemanlarının türü, oranı ve aralarındaki etkileşim kritik rol oynamaktadır. Bu tez kapsamında matris fazında termoplastik özellik gösteren polipropilen (PP) kullanılmış, takviye elyafı olarak ayrıca cam elyaf ilave edilmiştir. Bu yaklaşım ile, elyaf-matris arayüz uyumu artırılarak kompozit yapıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Aynı polimer esaslı elyaf ve matris kombinasyonunun kullanılması, üretim süreçlerinde geri dönüştürüle bilirlik açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında geliştirilen karma elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin yalnızca mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, bu malzemelerden sandviç yapıların üretimi gerçekleştirilmiş ve bu yapıların yapısal performansları değerlendirilmiştir. Sandviç yapılar, yüksek özgül rijitlik, enerji sönümleme kapasitesi ve hafiflik gibi özelliklerinden dolayı ileri mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı; PP matrisli, cam ve PP elyaf takviyeli karma kompozit malzemelerin geliştirilmesi, elde edilen yapıların mekanik ve sıcak şekil alma davranışlarının sistematik olarak araştırılmasıdır. Bu bağlamda elde edilen bulguların, Özellikle hafif yapılar ve sürdürülebilir kompozit teknolojileri alanında katkı sunması hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler

Termoplastik matrisli kompozitler, son yıllarda özellikle geri dönüştürülebilirlik, çevresel sürdürülebilirlik ve hızlı üretim süreçlerine uygunluk gibi avantajlarıyla ön plana çıkmıştır. Bu kompozitler, ısı ile şekillendirilebilir yapıları sayesinde tekrar işlenebilirlik imkânı sunmakta ve bu yönleriyle termoset matrisli kompozitlere kıyasla daha çevreci çözümler oluşturmaktadır ((Bajpai et al., 2014; Qiao et al., 2023).

Termoplastik polimerler, yüksek darbe tokluğu, kimyasal direnç ve düşük su absorbsiyonu gibi özellikler göstermektedir. Özellikle polipropilen (PP), düşük yoğunluğu (0.9 g/cm³), düşük erime sıcaklığı (60–170 °C) ve iyi kimyasal dayanımı ile hem matris hem de takviye elyaf olarak kullanıma uygundur (Bledzki & Faruk, 2004; Wang et al., 2020a)

Mekanik olarak, termoplastik matrisli kompozitler, termoset eşdeğerlerine göre daha yüksek darbe dayanımı ve şekil değiştirme kabiliyeti sunmaktadır (Qiao et al., 2023).Aynı zamanda düşük işlenme sıcaklıkları sayesinde enerji tüketimini azaltmakta ve üretim maliyetlerini düşürmektedir. Örneğin, PP matrisli kompozitlerde cam elyaf takviyesiyle yüksek rijitlik ve mukavemet sağlanmakta; bu da yapısal uygulamalar açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Wang et al., 2022).

Ayrıca, bu kompozitlerin üretimi çeşitli yöntemlerle kolaylıkla gerçekleştirilmekte olup, enjeksiyon kalıplama, film yığma, sıcak presleme ve termoformlama gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Özellikle sermaye yoğun sektörlerde, bu yöntemlerin otomasyon ile uyumlu olması, termoplastik matrisli sistemlerin seri üretime uygun hâle gelmesini sağlamaktadır.(Qiao et al., 2023a)

Sonuç olarak, termoplastik matrisli kompozit malzemeler, yalnızca teknik avantajları değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim ve geri dönüşüm kabiliyetleri ile de geleceğin malzeme teknolojilerinde önemli bir yer edinmiştir (Bajpai et al., 2014).

Çizelge 2.1 Termoplastik Matris Özellikleri.

Matris Malzemesi	Yoğunluk(g /cm^3)	Erime Sıcaklığı(^{o}C)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (GPa)	Geri Dönüştürülebilirlik
Polipropilen (PP)	0,9	160	30	1,5	Yüksek
Poliamid (PA)	1,14	220	80	3,0	Orta
Polietilen (PE)	0,94	130	25	1,0	Yüksek
Polikarbonat (PC)	1,2	230	65	2,3	Düşük
Polyetheretherketone (PEEK)	1,32	343	90	4,0	Düşük

2.2 Cam Elyaf Takviyeli PP Kompozitler

Cam elyaf takviyesi, termoplastik matrisli kompozit sistemlerde en yaygın kullanılan takviye yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle polipropilen (PP) gibi matrislerle birlikte kullanıldığında, yüksek rijitlik, iyi darbe dayanımı ve boyutsal kararlılık gibi önemli mekanik avantajlar sunar. Cam elyaflar düşük maliyetli olmalarının yanı sıra yüksek çekme mukavemeti (~2000–3500 MPa) ve elastik modül değerleri (~70–85 GPa) ile mühendislik uygulamaları için oldukça uygundur(Wang et al., 2020).

PP matrisli cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde genellikle kısa elyaf takviyeli enjeksiyon kalıplama veya sürekli cam elyaflarla film yığma (film stacking) yöntemi tercih edilmektedir. Sürekli elyaf kullanılan sistemler, özellikle yapı ve otomotiv parçaları gibi taşıyıcı uygulamalarda önemli ölçüde mekanik performans artışı sağlar (Chen et al., 2024).

Cam elyafın PP matrise entegrasyonu sırasında arayüzey bağlanma kalitesi büyük önem arz eder. PP'nin düşük polaritesi nedeniyle, cam elyaf ile kimyasal bağ oluşturma kapasitesi sınırlıdır. Bu nedenle, erkekleştirilmiş polipropilen (MAPP) gibi kuplaj ajanları kullanılarak arayüzey uyumu iyileştirilmektedir (Hu et al., 2022).

Yüksek sıcaklık işlemleri cam elyafın morfolojisini doğrudan etkilemektedir. 600°C'ye kadar yapılan ısıl işlemlerde elyaf çapında daralma, lif kırılması ve gözeneklilikte artış gibi değişimlerin malzeme performansı üzerinde belirgin etkiler yarattığını raporlamıştır. Bu durum, üretim öncesi elyaf ısıl önişlemlerinin dikkatle planlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda cam elyaf takviyeli PP kompozitlerin, doğal elyaflarla birlikte karma sistemlerde kullanılarak darbe dayanımı ve şekillendirilebilirliğinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir. (Hasan et al., 2024)

2.3 Karma Elyaf Takviyeli Kompozitler

Karma (hibrid) elyaf takviyeli kompozitler, iki veya daha fazla farklı elyaf türünün aynı matris içinde bir araya getirilmesiyle elde edilen sistemlerdir. Bu yapılandırma, elyafların mekanik, fiziksel veya kimyasal avantajlarının sinerjik bir biçimde kullanılmasını mümkün kılar. Hibrid sistemlerde yaygın olarak bir elyaf türü yüksek mukavemet ve rijitlik sağlarken, diğer elyaf tokluk veya şekillendirilebilirlik gibi özellikleri iyileştirir (Ashik & Sharma, 2015).

Bu çalışmada kullanılan cam elyaf ve polipropilen (PP) elyaf kombinasyonu, kompozit malzemenin aynı anda hem rijit hem de şekil verilebilir olmasını sağlar. Cam elyaf yüksek elastik modül ve mukavemet sunarken, PP elyaf matrisle uyumlu yapı göstererek iyi arayüzey bağlanması ve ısıl şekillendirilebilirlik özellikleri sağlar (Hasan et al., 2024)

Karma elyaf sistemlerinin avantajları, yalnızca mekanik dayanımda değil, aynı zamanda üretim kolaylığı, enerji absorpsiyonu ve darbe dayanımı gibi performans kriterlerinde de gözlemlenmektedir(Overberg et al., 2024) tarafından yapılan bir çalışmada, termoplastik matrisli cam ve PP elyaflı hibrid sistemlerin darbe sonrası hasar toleransının ciddi şekilde arttığı rapor edilmiştir.

Özellikle otomotiv, spor ekipmanları ve savunma sanayii gibi alanlarda, yüksek performans gereksinimlerini karşılayan ancak maliyet etkin çözümler sunabilen bu tür kompozit sistemler giderek daha yaygın kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2 Cam elyaf ve PP elyaf karşılaştırma.

Özellik	Cam Elyaf	Cam Elyaf
Yoğunluk (g/cm^3)	2,5-2,6	0,9-0,91
Elastik Modül (GPa)	2000-3500	300-700
Kimyasal Direnç	Yüksek	Yüksek
Şekillendirilebilirlik	Düşük	Yüksek

Bu tablo, cam elyafın üstün mekanik performansını ve PP elyafın düşük yoğunluk, kimyasal direnç ve termoformlanabilirlik gibi avantajlarını açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle hibrit kompozitlerde birlikte kullanımları, dengeli bir performans elde etmek için idealdir.

2.4 Elyaf-Matris Arayüzey Etkileşimi

Kompozit malzemelerde elyaf ile matris arasındaki arayüzey etkileşimi, mekanik özelliklerin belirlenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Elyaf-matris arayüzü, uygulanan yükün elyafa verimli bir şekilde aktarılmasını sağlar ve bu bağlamda çekme, darbe ve bükme dayanımı gibi performans göstergelerini doğrudan etkiler (Karsli & Aytac, 2011).

Etkili bir arayüzey bağı, yüksek yüzey enerjisi, kimyasal uyum, mekanik kilitlenme ve bazı durumlarda kuplaj ajanlarının kullanımı ile geliştirilebilir. Özellikle cam elyaf gibi inorganik liflerin PP gibi apolar bir termoplastik matrisle birlikte kullanıldığı sistemlerde, elyaf yüzeyi ile matris arasında doğal bir bağ zayıftır. Bu nedenle maleik anhidrit ile modifiye edilmiş polipropilen (MAPP) gibi bağlayıcı ajanlar, arayüzey bağını güçlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Fu et al., 2008).

Son araştırmalar, arayüzey modifikasyonlarının mikroskobik seviyede değerlendirildiği SEM ve AFM gibi yöntemlerle bu bağların gözlemlenebildiğini göstermektedir. Arayüzeydeki boşluklar, ayrılmalar veya çatlaklar, arayüzey kalitesinin yetersiz olduğuna işaret ederken; iyi bağlanmış bir arayüzey, düzgün yük aktarımı ve daha homojen bir yapı sunar (Hasan et al., 2024; Hu et al., 2022).

Cam elyaf yüzeyinin plazma veya alkali çözeltiyle ön işleme tabi tutulması, yüzey pürüzlülüğünü ve hidrofilikliği artırarak, matris ile daha kuvvetli bir fiziksel ve kimyasal bağlanma sağlar(Wang et al., 2020b). Aynı şekilde PP elyafın da yüzey modifikasyonları, termoformlama gibi ısıl işlemler sonrası bağ kalitesini korumak adına önemlidir.

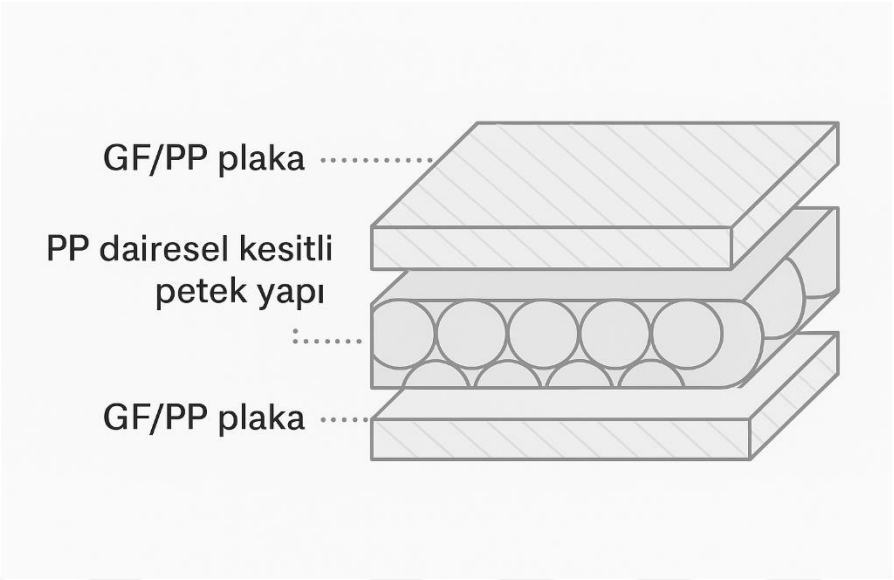
2.5 Sandviç Yapılar ve Termoplastik Kompozitler

Sandviç yapılar, iki rijit dış yüzey tabakası (face sheet) arasında düşük yoğunluklu bir çekirdek (core) malzemenin yer aldığı çok katmanlı kompozit sistemlerdir. Bu yapı, yüksek özgül bükülme sertliği, iyi enerji sönümleme kapasitesi ve hafiflik gibi özellikleri sayesinde ileri mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Åkermo & Åström, 1999).

Termoplastik matrisli kompozitler, sandviç yapıların hem yüzey hem de çekirdek katmanlarında kullanılmak üzere giderek daha fazla araştırılmaktadır. Termoplastiklerin şekillendirilebilirlik, kısa çevrim süresi, kaynaklanabilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları, bu malzemeleri otomotiv ve havacılık gibi yüksek hacimli ve sürdürülebilirlik odaklı endüstriler için cazip hale getirmektedir.

Termoplastik sandviç panellerde kullanılan çekirdek malzemeler arasında polipropilen (PP) köpükler, petek (honeycomb) yapılar, PVC köpükler veya örgülü lif yapılar yer almaktadır. Yüzey katmanlarında ise genellikle cam elyaf, karbon elyaf veya hibrit elyaf takviyeli termoplastik matrisli plakalar kullanılmaktadır (Wang et al., 2020).

Bu yapı kombinasyonu sayesinde hem mekanik mukavemet artırılmakta hem de yapının toplam ağırlığı azaltılmaktadır. Ayrıca çekirdek yapı sayesinde dış yüzeylere uygulanan yükler daha geniş bir alana yayılır ve yapı lokal hasarlara karşı daha dirençli hâle gelir. Bu özellikler özellikle otomotiv panelleri, uçak zeminleri ve enerji absorpsiyonu gereken darbe bölgeleri gibi alanlarda kullanım için uygundur(Overberg et al., 2024).



Şekil 2.1 Sandviç yapı bir örnek.

2.6 Termoformlama Süreci ve Kompozit Malzemelerde Uygulanabilirliği

Termoformlama, düz formda hazırlanmış termoplastik levhaların, belirli sıcaklıklarda yumuşatıldıktan sonra kalıplar yardımıyla üç boyutlu parçalara dönüştürüldüğü bir üretim yöntemidir. Kompozit malzemelerde bu yöntem hem şekillendirme kolaylığı hem de kısa çevrim süresi avantajı ile ön plana çıkmaktadır(Åkermo & Åström, 1999).Özellikle otomotiv ve tüketici elektroniği gibi sektörlerde, hafif yapılar ve hızlı üretim ihtiyacı termoformlama yönteminin yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır.

Termoplastik matrisli kompozitlerde, matrisin yeniden ergitilebilme özelliği, üretim sürecinde malzemenin ısı ile şekillendirilmesine olanak tanır. Bu açıdan PP (polipropilen) matrisli cam elyaf veya hibrit elyaf takviyeli kompozit levhalar, termoformlama sürecine oldukça uygun malzemelerdir(Hasan et al., 2024). Elyaf yönelimi, matrisin viskoelastik davranışı ve ısıtma parametreleri bu süreçte şekil bütünlüğünü doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Ayrıca, çok katmanlı sandviç yapıların termoformlanabilirliği, yalnızca yüzey tabakalarının değil, aynı zamanda çekirdek yapının da ısı ile etkileşimini dikkate almayı

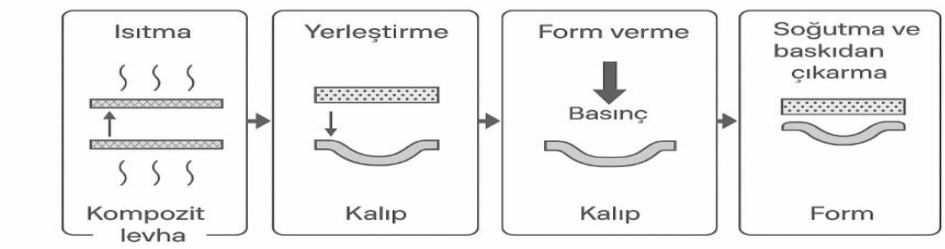
gerektirir. PP petek çekirdekli ve GF/PP yüzeyli sandviç yapılarda, şekillendirme sırasında çekirdekte ezilme, hücre deformasyonu gibi problemler oluşabileceğinden, kontrollü ısıtma ve basınç ayarı kritik önemdedir (Wang et al., 2020).

Sıcak şekillendirme sürecinde dikkat edilmesi gereken başlıca parametreler şunlardır:

- Isıtma süresi ve sıcaklık seviyesi: PP için genellikle 160–180°C aralığı önerilir.
- Basınç ve vakum: Homojen kalıp teması ve yüzey detayları için gereklidir.
- Soğutma hızı: Malzeme iç gerilmelerini ve şekil kararlılığını etkiler.
- Elyaf yönelimi ve kesit kalınlığı: Şekil alma kapasitesini belirleyen önemli değişkenlerdir (Overberg et al., 2024).

Çizelge 2.3 Termoformlama Sürecinde Kritik Parametreler (Hasan et al., 2024; Overberg et al., 2024).

Parametre	Önerilen Aralık / Değer	Etkisi
Isıtma Sıcaklığı	160–180°C (PP için)	Matrisin akışkanlığı ve lif dağılması sağlanır
Basınç Uygulaması	2–6 bar (vakum veya pres)	Kalıp detaylarının düzgün aktarımı ve boşluksuz şekil
Elyaf Yönelimi	Yük yönüne dik tercih edilir	Şekil alma kolaylığı ve mekanik yönlülük sağlanır
Matris Tipi	PP, PA, PEEK (termoplastikler)	Yumuşama-viskozite davranışını belirler
Levha Kalınlığı	1–5 mm	Şekil stabilitesi ve esneme direncini etkiler
Çekirdek Tipi (sandviç yapıda)	PP petek, PET köpük	Enerji sönümleme ve ezilme direnci sağlar



Şekil2.2 Termoformlama süreç.(Friedrich & Almajid, 2013).

2.7 Doğal ve Sentetik Elyafların Hibrid Kompozitlerde Kullanımı

Hibrid elyaf takviyeli kompozit malzemeler, farklı türde elyafların bir arada kullanılmasıyla hem ekonomik hem de mekanik açıdan optimize edilmiş özellikler sunan sistemlerdir. Özellikle doğal ve sentetik elyafların bir arada kullanımı, sürdürülebilirlik ve performans dengesini sağlamak amacıyla son yıllarda yoğun araştırma konusu olmuştur.

Doğal elyaflar (keten, jüt, kenevir gibi), düşük yoğunluk, biyobozunurluk ve yenilenebilirlik gibi çevresel avantajlara sahip olmalarına rağmen, mekanik dayanımları ve nem hassasiyetleri nedeniyle sınırlayıcıdır. Buna karşılık sentetik elyaflar (cam, karbon, aramid vb.), yüksek mukavemet ve dayanım sunmalarına rağmen maliyet ve çevresel etkiler açısından dezavantajlıdır. Bu iki elyaf grubunun hibrid olarak kullanımı, kompozit malzemenin hem ekonomik hem de yapısal yönden optimize edilmesini sağlamaktadır (Hasan et al., 2024; Thwe & Liao, 2003).

Çizelge 2.4 Doğal ve Sentetik Elyafların Özellikleri(Hasan et al., 2024; Mallick, 2007; Pickering et al., 2016)

Özellik	**Doğal Elyaflar (Keten, Jüt)**	**Sentetik Elyaflar (Cam, Karbon)**
Yoğunluk (g/cm³)	1.2–1.5	2.5–2.6
Çekme Mukavemeti (MPa)	200–1000	2000–4000
Elastik Modül (GPa)	10–70	70–200
Maliyet	Düşük	Orta-Yüksek
Geri Dönüştürülebilirlik	Yüksek	Düşük-Orta
Nem Hassasiyeti	Yüksek	Düşük

2.8 Elyaf Özelliklerinin Kompozit Davranışına Etkisi

Kompozit malzemelerde elyafın tipi, boyu, çapı, oryantasyonu ve yüzey özellikleri, elde edilen nihai ürünün mekanik, termal ve fiziksel performansı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar. Elyaflar, matris içerisinde taşıyıcı faz olarak görev yapar ve yük transferinin

büyük kısmını üstlenirler. Bu bağlamda, kullanılan elyafların geometrik ve yüzeysel nitelikleri, matris ile olan etkileşim üzerinden kompozit bütünlüğünü etkiler.

2.8.1 Elyaf Boyu ve Tipi:

Elyaflar genellikle kısa, uzun ya da sürekli formda olabilir. Sürekli elyaflar yüksek yönlü dayanım sunarken, kısa elyaflar üretim kolaylığı ve izotropik dağılım gibi avantajlar sunar. Kısa cam elyafla takviye edilen PP kompozitlerde, lif uzunluğunun artmasıyla birlikte çekme ve eğilme dayanımında iyileşmeler gözlemlenmiştir (Karsli & Aytac, 2011).

2.8.2 Elyaf-Çap ve Aspect Ratio (Boy/Çap Oranı):

Liflerin boyunun çapına oranı (aspect ratio), lifin yük aktarımı kapasitesini belirleyen önemli bir parametredir. Yüksek aspect ratio, matris içinde daha verimli yük transferi sağlar. Ancak bu oran çok yükseldiğinde liflerin yönelimi ve homojen dağılımı zorlaşabilir.

Yüksek olan elyaflar, daha iyi yük transferi sağlayarak daha yüksek çekme dayanımı ve elastikiyet modülü sunar. Sürekli elyaflar, bu açıdan kısa ve yarı uzun elyaflara kıyasla üstün performans sergilerler. Ancak bu avantajlar, yönlenmenin yeterli olduğu üretim teknikleri ile birleştirildiğinde ortaya çıkar (Pickering et al., 2016).

2.8.3 Yüzey Özellikleri ve Arayüzey Bağlanması:

Elyaf yüzeyinin kimyasal yapısı ve pürüzlülüğü, matrisle oluşturduğu bağın kalitesini belirler. Yetersiz yüzey etkileşimi, lif-matris arasında delaminasyon ve zayıf yük transferine yol açabilir. Bu nedenle elyaflar genellikle kuplaj ajanları (örneğin maleik anhidrit modifiye PP) ile modifiye edilir (Fu et al., 2008).

2.8.4 Elyaf Yönelimi (Oryantasyonu):

Liflerin matris içerisindeki yönelimi, özellikle sürekli veya yarı-sürekli elyaf kullanılan sistemlerde belirli yönlerde mukavemetin artmasına neden olur. Rastgele yönelmiş kısa elyaflar daha izotropik davranış sunarken, tek yönde hizalanmış sürekli elyaflar özellikle çekme ve eğilme dayanımını artırır.

Elyaf yönelimi (fiber orientation) kompozitlerin anizotropik davranışlarını belirler. Rastgele yönelmiş kısa elyaf takviyeli kompozitler, izotropik özellikler gösterebilirken, yönlenmiş sürekli elyaf kompozitler belirli doğrultularda yüksek mukavemet sunar(Mallick, 2007). Bu nedenle, kullanım amacına göre elyaf tipi ve yönelimi uygun şekilde seçilmelidir.

2.8.5Elyaf-Matris Bağlantısının Kompozit Üzerindeki Etkisi:

Yüksek performanslı kompozit malzemelerde arayüzey bağı kuvvetli olduğunda, lif kırılması yerine çekme altında daha yüksek enerji absorpsiyonu ve kontrollü hasar gözlemlenir. Bu durum, özellikle darbeye dayanıklı uygulamalar açısından kritik önemdedir (George et al., 2001).

2.9 Matris Malzemeler

Kompozit malzemelerde matris fazı, yapının sürekli bileşeni olarak görev yapar. Elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara etkin şekilde iletmek ve dış etkilere karşı koruma sağlamak gibi çok yönlü işlevleri vardır (Mallick, 2007).

2.9.1 Termoset Matrisler

Termoset reçineler (örneğin epoksi, polyester, vinil ester), çapraz bağlanma (cross-linking) yoluyla kürlendikten sonra yeniden şekillenemezler. Bu sertleşme geri dönüşü olmayan bir kimyasal süreçtir. Termoset matrisler, yüksek mekanik dayanım ve sıcaklık kararlılığı gibi avantajlara sahip olmalarına karşın, darbe dayanımı düşüktür ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sınırlı bir seçenektir (Friedrich & Almajid, 2013b; Kaw, 2005).

2.9.2 Termoplastik Matrisler

ermoplastik polimerler (örneğin polipropilen (PP), poliamid (PA), polietilen (PE), PEEK), ısıtıldıklarında yumuşayan ve tekrar şekillendirilebilen malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde yeniden işlenebilirlik, geri dönüşüm imkânı ve kısa çevrim süreleri gibi avantajlar sunarlar(Qiao et al., 2023). Termoplastik matrisli kompozitler, darbe dayanımı ve şekillendirme esnekliği açısından termosetlere kıyasla daha avantajlıdır.

Bu çalışmada kullanılan **polipropilen (PP)**, hem matris hem de elyaf formunda yer almaktadır. PP'nin düşük yoğunluklu yapısı (yaklaşık 0.90 g/cm³), kimyasal direnç seviyesi ve yüksek üretim verimliliği, onu otomotiv, ambalaj, beyaz eşya ve inşaat sektörlerinde oldukça cazip hale getirmiştir (Hasan et al., 2024).Ayrıca PP'nin kristal yapısı, sıcak şekil alma işlemlerinde (örneğin termoformlama) kalıp uyumu ve kalıcı deformasyon açısından önemli avantajlar sunar (Overberg et al., 2024).

2.9.3 Termoplastik Matrislerin Sınırlamaları

Her ne kadar termoplastikler birçok avantaja sahip olsa da bazı sınırlamaları da mevcuttur. Örneğin, yüksek erime sıcaklığına sahip termoplastiklerin işlenmesi için özel ekipmanlara ve daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, bazı termoplastikler viskoz oldukları için elyaf ıslatma (impregnasyon) açısından zorluk (Qiao et al., 2023).

Çizelge 2.5 Matris malzeme türlerinin karşılaştırılması.

Matris Türü	**Yoğunluk (g/cm³)**	**Maks. Kullanım Sıcaklığı (°C)**	**Darbe Dayanımı**	**Geri Dönüştürülebilirlik**	**Şekillendirilebilirlik**
Epoksi (Termoset)	1,2	120	Orta	Hayır	Düşük
Vinil Ester (Termoset)	1,05	140	Orta	Hayır	Düşük
Polipropilen (PP)	0,9	120	Yüksek	Evet	Yüksek
Poliamid (PA)	1,13	180	Yüksek	Evet	Orta
PEEK	1,3	250	Yüksek	Evet	Orta

2.10 Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, elde edilmek istenen nihai ürünün yapısal özellikleri, kullanılacak elyaf-matris kombinasyonu ve üretim sürecinin ekonomik gereklilikleri doğrultusunda belirlenmektedir. Kompozit üretim teknikleri genellikle **termoset** ve **termoplastik** esaslı sistemlere göre sınıflandırılmaktadır. Termoplastik kompozitler, yeniden şekillendirilebilir yapıları ve kısa çevrim süreleri sayesinde son yıllarda önemli ölçüde tercih edilmektedir (Friedrich & Almajid, 2013b; Mallick, 2007).



Şekil2.3 Kompozit Üretim Yöntemleri.(Dittenber & Gangarao, 2012; Friedrich & Almajid, 2013; Hasan et al., 2024; Mallick, 2007).

2.10.1 Film Yığma (Film Stacking) Yöntemi

Film stacking yöntemi, termoplastik kompozit üretiminde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, termoplastik polimer matrisler film formunda elyaf katmanları arasına yerleştirilir ve ısıtma–basınç işlemi ile eritilerek bütünleşik bir yapı oluşturulur. Özellikle sürekli elyaf takviyeli levhaların üretiminde avantaj sağlar(Hasan et al., 2024).

2.10.2 Sıcak Presleme (Hot Pressing)

Sıcak pres yöntemi, önceden hazırlanmış matris ve elyaf katmanlarının ısı ve basınç altında şekillendirilmesiyle uygulanır. Sürekli veya kesikli elyaf takviyeli levha üretiminde kullanılır. Bu yöntemde lif hacim oranı yüksek tutulabilir ve homojen yapılar elde edilebilir (Dittenber & Gangarao, 2012).

2.10.3 Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Kalıplama

Kısa elyaf takviyeli termoplastiklerin seri üretiminde kullanılır. Matris ve elyaflar ekstrüder içinde karıştırılarak belirli kesit profillerde sürekli üretim yapılır. Enjeksiyon kalıplama ise daha karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek hızla üretilmesini sağlar. Ancak, sürekli elyaf uygulaması sınırlıdır (Qiao et al., 2023).

2.10.4 Isıl Şekillendirme (Thermoforming)

Isıl şekillendirme, daha önceden üretilmiş termoplastik kompozit levhaların ısıtılarak kalıplar içinde şekillendirilmesidir. Levhalar cam geçiş sıcaklığına kadar ısıtılır ve mekanik presleme ile kalıp formunu alması sağlanır. Bu yöntem, karmaşık geometrilerin üretiminde yüksek verim sağlar ve geri dönüştürülebilir malzeme kullanımına uygundur (Friedrich & Almajid, 2013; Overberg et al., 2024).

2.11 Kompozit Malzemelerde Geri Dönüştürülmüş Elyaf Kullanımı

Günümüzde sürdürülebilir malzeme teknolojilerine olan ilgi artmış ve bu doğrultuda geri dönüştürülmüş elyafların kompozit sistemlerde kullanımı önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların yeniden değerlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Wambua et al., 2003).

Geri dönüştürülmüş cam elyaf (rGF) ve karbon elyaf (rCF) gibi materyaller, genellikle kısa kesilmiş formda yeniden kullanıma sunulmakta ve polimer matrislerle harmanlanarak yarı-yapısal uygulamalarda değerlendirilmektedir. Bu malzemelerin yeniden kullanılabilirliği, özellikle otomotiv sektöründe iç panel ve takviye elemanı gibi uygulamalarda tercih edilmelerine olanak tanımaktadır (Oliveux et al., 2015).

Geri dönüştürülmüş elyafların mekanik özellikleri, genellikle orijinal (birincil) elyaflara göre daha düşük olsa da uygun yüzey işlemleri, bağlayıcılar ve katkı malzemeleri ile bu dezavantajlar kısmen giderilebilir. Ayrıca, lif uzunluğu ve dağılımı, geri dönüştürülmüş elyaflı kompozitlerin performansını belirleyen önemli faktörler arasında yer alır (Yang et al., 2017).

Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş elyafların matris ile etkileşimi, özellikle yüzey enerjisi ve arayüzey aderansı bakımından dikkatle değerlendirilmelidir. Bu bağlamda maleik anhidrit ile modifiye edilmiş PP gibi fonksiyonel bağlayıcılar, PP matrisli sistemlerde geri kazanılmış elyaflarla daha iyi bağlanma sağlamaktadır (Karsli & Aytac, 2011).

2.12 Kompozit Malzemelerin Yangın Davranışı ve Termal Kararlılığı

Termoplastik matrisli sistemler (örneğin PP, PE, PA) kolay tutuşabilir yapıları nedeniyle özellikle hava, demiryolu ve inşaat sektörlerinde sınırlı kullanılabilmektedir. Yangın durumunda, hem ısı salımı oranı (HRR) hem de yanma sırasında açığa çıkan gazların toksisitesi sistemin kullanılabilirliğini doğrudan etkilemektedir (Alongi et al., 2015). Bu bağlamda, kompozitlerin yangın davranışının iyileştirilmesi için çeşitli katkı maddeleri ve yüzey kaplamaları kullanılmaktadır.

Alev geciktirici katkılar (örneğin, amonyum polifosfat, melamin, alüminyum trihidroksit, nanokil) genellikle matris fazına eklenerek malzemenin tutuşma sıcaklığı yükseltilir, yangın sırasında ısı yayılımı düşürülür ve karbonlu koruyucu tabaka oluşumu teşvik edilir (Wang et al., 2020b). Ayrıca, karbon elyaf ve cam elyaf gibi inorganik lif takviyeleri, matrisin oksidasyonunu azaltarak yangın sırasında yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlar.

Termal kararlılık ise kompozit malzemenin ısı etkisi altında fiziksel veya kimyasal bozulma göstermeden dayanabilme yetisidir. Bu özellik, sıcaklık altında viskozite değişimi, erime sıcaklığı ve bozunma sıcaklığı gibi parametrelerle değerlendirilir. Termoplastik matrisli kompozitlerde bu sınır genellikle 100–250 °C arasında değişmektedir(Zhou et al., 2019). Hibrit sistemlerde, doğru takviye ve katkı kombinasyonları ile bu değerler artırılabilir.

2.13 Kompozitlerde Yaşlanma, UV Etkisi ve Çevresel Dayanım

Kompozit malzemelerin uzun süreli performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri çevresel koşullara karşı gösterdikleri dirençtir. Bu bağlamda, ultraviyole (UV) ışınım

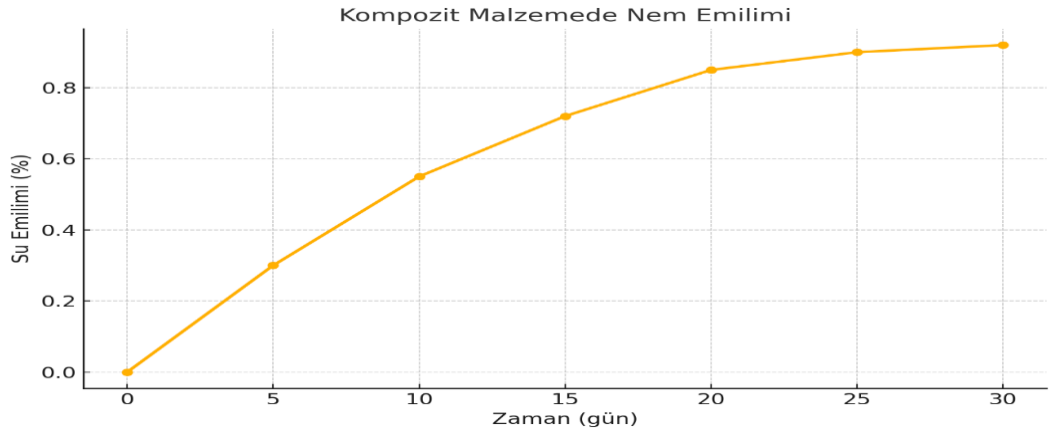
etkisi, nem, ısı değişimleri, kimyasal maruziyet ve donma-çözülme döngüleri, malzeme özelliklerinde zamanla bozunmalara neden olabilir.
Özelliklerde azalma, renk değişimi ve gevrekleşme görülebilir.

2.13.1 UV Işınımının Etkisi

UV ışınları, özellikle açık hava koşullarına maruz kalan kompozit malzemelerde matrisin zincir yapısını bozarak yüzey çatlaklarına ve mikroyapısal hasara neden olur. PP, PE ve bazı PA türleri bu etkiye karşı oldukça hassastır. Elyaf yüzeyinde veya matris fazında oluşan bu bozulmalar zamanla mekanik performans kaybına ve su emiliminin artmasına yol açar (George et al., 2001).

2.13.2 Nem ve Su Emilimi

Nem alımı, özellikle doğal elyaf takviyeli kompozitlerde daha belirgindir. Su molekülleri, matris ve elyaf arasındaki zayıf bölgelerde birikir ve arayüzey ayrışmalarına neden olabilir. Bu durum çekme dayanımı ve darbe tokluğunun azalmasına yol açar (Pickering et al., 2016).



Şekil 2.4 Kompozit Malzemede Nem Emilimi (Pickering et al., 2016)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında kullanılan kompozit yapıların üretiminde, farklı yapısal ve mekanik özelliklere sahip cam/PP esaslı malzemeler tercih edilmiştir. Bu malzemeler hem sandviç yapıların yüzey tabakası hem de çekirdek yapısı için farklı konfigürasyonlarda kullanılmıştır.

3.1.1 Cam/PP Karma Elyaflı Termoplastik Keçeler

Çalışmada kullanılan cam/PP karma elyaflı keçeler, Şiteks Teknik Tekstil A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Bu termoplastik keçeler, matris fazı olarak polipropilen (PP) ve takviye fazı olarak kısa cam elyaf içermekte olup, ısı ve basınç altında herhangi bir ek reçineye ihtiyaç duymadan kompozit yapı oluşturma kapasitesine sahiptir. Üç farklı yüzey yoğunluğuna sahip keçe tipi kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 çalışmada kullanılan keçeler ve kullanım şekli.

Yüzey yoğunluk (g/m^2)	Kulanım şekli
1000	Çekirdek olarak
1800	Hem çekirdek hem de yüzey plaka olarak
2600	Çekirdek olarak



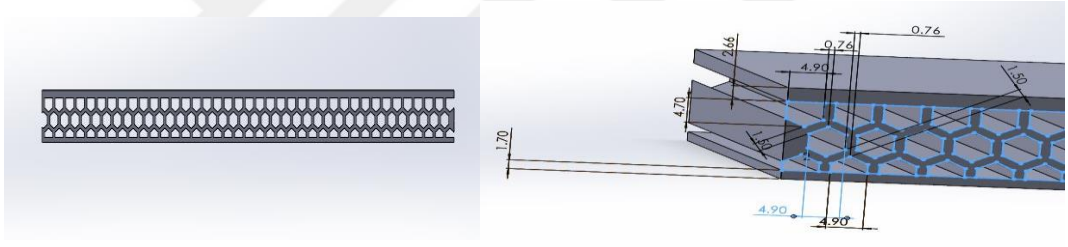
Şekil 3.1 Şiteks Teknik Tekstil A.Ş.Termoplastik keçesi.

3.1.2 Dairesel Kesitli Hücreli PP Çekirdek

Sandviç yapıların çekirdek kısmında ayrıca dairesel kesitli hücresel polipropilen (PP) çekirdek yapı da kullanılmıştır. Bu yapı, Viking Plastics firmasından temin edilmiş olup, düşük yoğunluklu ve enerji absorpsiyonu yüksek hücresel yapısı sayesinde darbe dayanımı ve özgül rijitlik açısından önemli katkılar sunmaktadır.



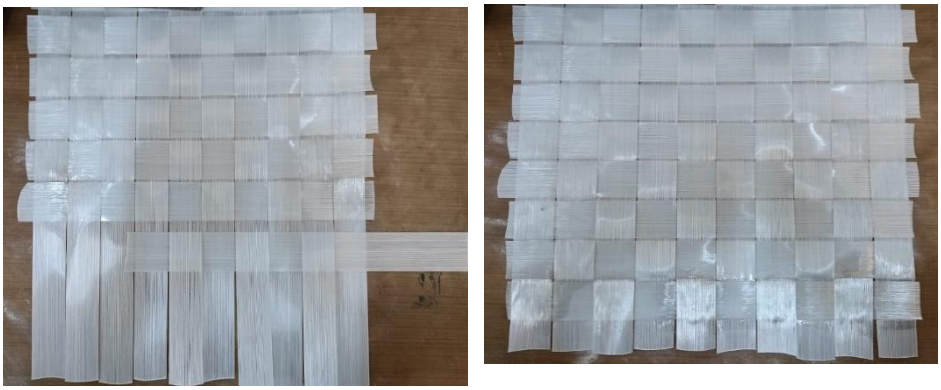
Şekil3.2 Viking Plastics dairesel kesitli PP çekirdek.



Şekil3.3 Dairesel kesitli 3 boyutlu.

3.1.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Cam/PP Termoplastik Bantlar

Yüzey plaka yapısında ayrıca, sürekli takviyeli **cam/PP bant** da kullanılmıştır. Bu bantlar, %60 oranında sürekli cam elyaf içermekte olup, termoplastik matris olarak PP üretilmiştir. Dokuma yöntemiyle elde edilen çok katmanlı yapı, yüzey levha olarak yüksek rijitlik ve mekanik dayanım sağlamak amacıyla değerlendirilmiştir. Sürekli lif takviyesi sayesinde özellikle çekme ve eğilme dayanımında yüksek performans sergilemektedir.



Şekil 3.4 Sürekli elyaf takviyeli cam/PP termoplastik bant dokuma yöntem ile plaka üretirken.

Çizelge 3.2 Cam elyaf türlerinin genel karşılaştırılma(Rajak et al., 2021)

Elyaf türü	Açılımı	Temel Özellikleri	Otomotivde kullanımı
E-cam (Electrical)	Elektriksel cam	Yüksek elektrik yalıtımı, iyi mekanik dayanım, düşük maliyet	Gövde panelleri, tamponlar
S-cam (Strength)	Mukavemet cam	Çok yüksek çekme dayanımı ve ısı direnci, Yüksek maliyet	Kritik yük taşıyan parçalar
C-cam (Chemical)	Kimyasal dirençli cam	Asidik ortamlara karşı dirençli, düşük mekanik özellik	Egzoz/ısı yalıtımı parçaları
A-cam (Alkali Resistant)	Alkali dirençli cam	Alkali ortama dayanıklı	Sınırlı kullanılır

3.2 Cam Elyaf Türleri ve Kullanılan Elyafın Özellikleri

Cam elyaf, kompozit malzemelerde yaygın olarak tercih edilen bir takviye elemanıdır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, ısıya karşı kararlılık, kimyasal direnç ve maliyet etkinliği gibi avantajları sayesinde özellikle termoplastik matrisli sistemlerle başarılı bir uyum sergiler (Mallick, 2007).

Cam elyaflar, kimyasal bileşimlerine ve kullanım amaçlarına göre çeşitli türlere ayrılır. En yaygın türleri arasında E-cam, S-cam, C-cam, A elyaflar yer almaktadı.

Çizelge 3.3 Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri karşılaştırılma (Rajak et al., 2021)

Özellik	E-cam	S-cam	C-cam	A-cam
Yoğunluk (g/cm^3)	2,54	2,49	2,46	2,44
Çekme Mukavemeti (MPa)	3400-3800	4600-5000	3300-3600	3100-3400
Elastik Modül (GPa)	72-76	86-90	68-72	65-70
Uzama (%)	4,5-5,5	5,0-5,6	4,7-5,3	4,5-5,0
Alkali Direnci	Orta	Zayıf	Yüksek	Orta
Kimyasal Direnç	Yüksek	Orta	Çok yüksek	Düşük

3.3 Elyaf/Matris Oranının Belirlenmesi- Elyaf Uzunluğu Belirlenmesi.

3.3.1 Kül Test

Kompozit malzemelerde elyaf miktarının belirlenmesi amacıyla kül testi (ash content test) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, organik matris yüksek sıcaklıkta yakılarak uzaklaştırılır ve geride kalan inorganik faz (elyaf) kütle olarak belirlenir. Bu çalışmada da cam/PP esaslı termoplastik keçelerin cam elyaf oranlarını belirlemek amacıyla kül testi uygulanmıştır.

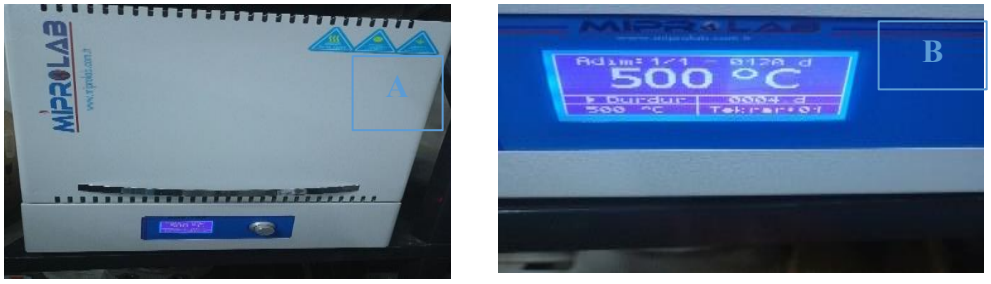
Test Prosedürü

- Şiteks firmasından temin edilen her üç farklı yüzey yoğunluğuna (1000, 1800, 2600 g/m^2) sahip keçe türünden rastgele birer numune alınmıştır.
- Numuneler analiz öncesinde hassas terazi ile tartılmış ve ilk kütleleri kaydedilmiştir.
- Her bir numune, 500 °C sıcaklığa ayarlanmış kül fırınına yerleştirilmiş ve 120 dakika boyunca yakma işlemine tabi tutulmuştur.
- Matris tamamen yandıktan sonra kalan saf cam elyaf kütlesi tekrar hassas tartım ile ölçülmüştür.
- Elde edilen değerlerle elyaf kütlesel oranı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

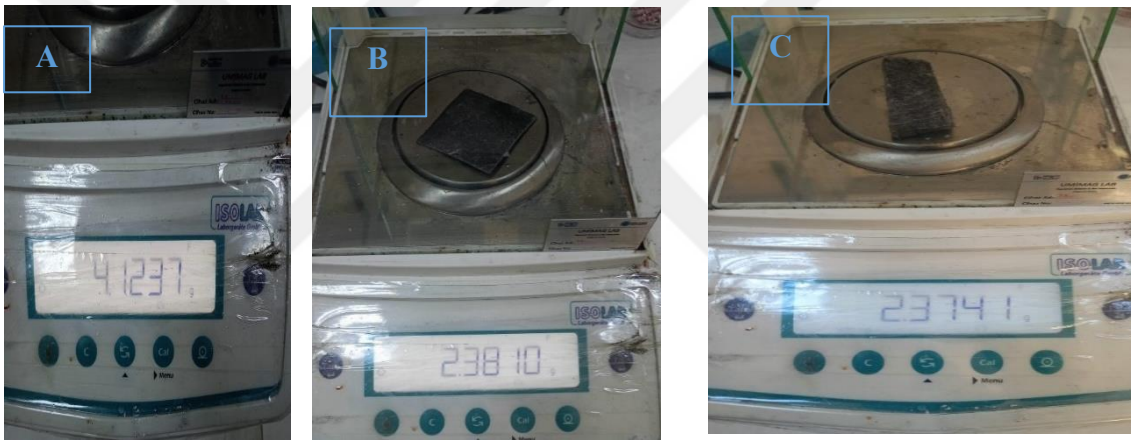
Elyaf Oranı (%) = ($m_{kül}$ / m_{ilk}) x 100 (3.1)

$m_{kül}$: Kül fırınında yakma sonrası kalan cam elyaf kütlesi.

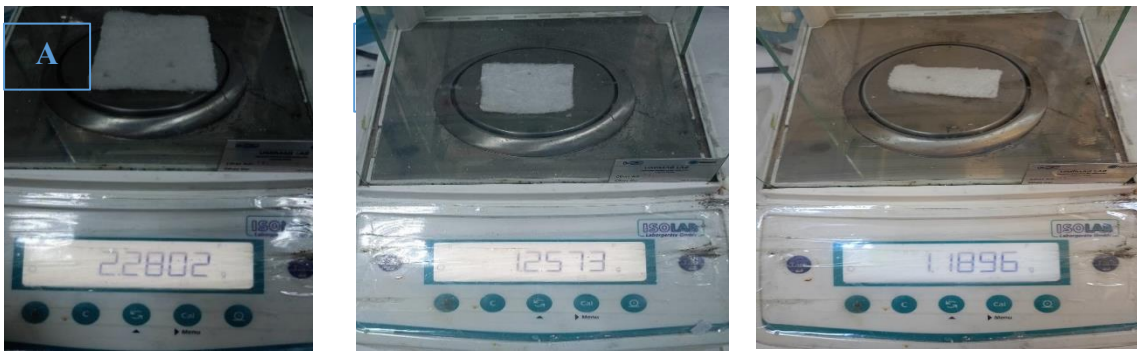
m_{ilk}: İlk numune toplam kütlesi.



Şekil3.5 A) Kül test için kullanılan kül fırın. B) Kül test parametreler.



Şekil3.6 Kül testten önce kompzit keçe ağırlıkları. a) 1000 g/m^2. b) 1800 g/m^2. c)2600 g/m^2.



Şekil3.7 Kül testten sonra saf cam elyaf ağırlığı. a) 1000 g/m^2. b) 1800 g/m^2. c)2600 g/m^2.

Çizelge 3.4 Hesaplanan elyaf oranları.

Keçe Yüzey Yoğunluğu (g/m²)	Kompozit keçe Kütlesi (g)	Kalan Cam Elyaf Kütlesi (g)	Elyaf Kütlesel Oranı (%)
1000	4,1237	2,2802	55,30
1800	2,3810	1,2573	52,81
2600	2,3741	1,1896	50,11

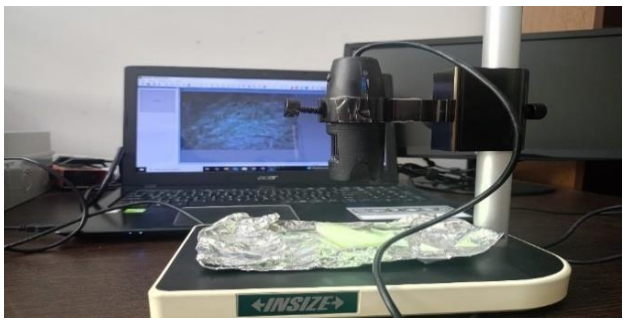
Görüldüğü üzere, keçe yoğunluğu arttıkça numunedeki PP oranı artmakta, buna bağlı olarak elyaf oranı azalmaktadır. Bu durum, yüksek gramajlı keçelerde daha fazla matris içeriği olduğunu göstermektedir.

3.3.2 Cam Elyaf Uzunluk Ölçümü

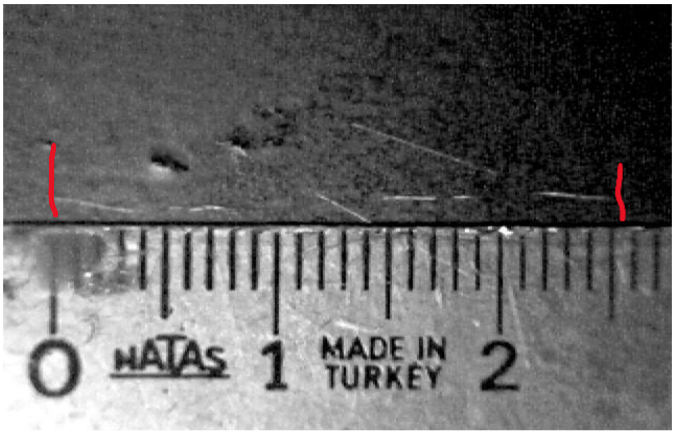
Kül testi sonrasında PP matris tamamen yanarak uzaklaştırıldığında, yalnızca cam elyaflar geride kalmıştır. Bu saf cam elyaf örnekleri, çalışmada kullanılan lif uzunluğunu belirlemek amacıyla mikroskop altında incelenmiştir.

Ölçüm işlemi şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Kül testinden çıkan cam elyaf kalıntılarından rastgele bir miktar alınmıştır.
- Numune, INSIZE marka ISM-PRO dijital mikroskop altında incelenmiştir.



Şekil 3.8 İSM-PRO dijital mikroskop.



Şekil 3.9 Mikroskop altında cam elyaf görüntüsü.

Mikroskoptan elde edilen görsellere göre cam elyafların ortalama uzunluğu 25 mm olarak belirlenmiştir.

3.4 Kompozit Malzeme Üretimi

Bu çalışmada cam/PP esaslı termoplastik kompozit levhalar, sıcak pres yöntemi ile üretilmiştir. Hem yüzey hem de çekirdek katmanlar için farklı yüzey yoğunluğundaki keçe ve sürekli cam/PP bantlar kullanılmıştır.

3.4.1 Kullanılan Pres Cihazı

Üretim sürecinde kullanılan cihaz, AG Hydraulics A/S markalı, 40 ton maksimum kapasiteye sahip bir hidrolik sıcak pres sistemidir. Pres üst ve alt tablalarında bağımsız sıcaklık kontrolü bulunmaktadır ve maksimum çalışma sıcaklığı 300 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Sıcaklık kontrolü, Emko PID Eco kontrol ünitesi ile sağlanmaktadır.



Şekil3.10 AG Hydraulics marka sıcak pres cihazı.

3.4.2 Yüzey Plaka Üretimi

Yüzey tabakalarının üretimi için 1800 g/m² yoğunluğa sahip cam/PP keçe kullanılmıştır. 250x250 mm boyutlarında kesilmiş. Keçeler, ısıtılmış plaka yüzeyine yerleştirilmiş ve aşağıdaki işlem sırasıyla şekillendirilmiştir:

- Presin ısıtıcıları öncelikle 140 °C'ye, ardından işlem süresince 185 °C'ye ulaştırılmıştır.
- Pres basıncı 25 ton olarak ayarlanmıştır.
- İstenen sıcaklık ulaştıktan sonra pres altında oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.
- Keçeler herhangi bir fiziksel kısıtlama (kalınlık sınırlandırıcı parça) olmadan preslenmiş ve yaklaşık 1.3 mm kalınlıkta kompakt yüzey plakalar elde edilmiştir. Bu kalınlık, keçe yoğunluğunun sabitliği sayesinde doğal olarak sağlanmıştır.



Şekil 3.11 Kompozit keçe üretim akış şeması.



Şekil 3.12 1800 (g/m^2) keçe (Preslemeden önce).



Şekil 3.13 1800 (g/m^2) keçeden üretilmiş plaka.



Şekil 3.14 Yüzey plaka üretirken pres ve presin parametreleri.

3.4.3 Çekirdek Plaka Üretimi

Çekirdek katmanların üretiminde ise, farklı yüzey yoğunluğuna sahip cam/PP keçeler (1000, 1800, 2600 g/m²) kullanılmıştır. Her keçeden 250x250 mm boyutunda bir parça kesilmiş. Bu katmanlar için hedeflenen kalınlık 4.5 mm'dir. Bu kalınlığı sabitlemek amacıyla presleme sırasında aşağıdaki yöntem uygulanmıştır:

- Pres kalıbının kenarlarına, hedef kalınlığı sağlayacak şekilde 4.5 mm kalınlığında metal kalınlık ayar plakaları yerleştirilmiştir.
- Keçe malzeme ise pres tablasının ortasına yerleştirilmiş ve metal sınır elemanları arasında sıkıştırılmıştır.

- İstenen sıcaklık ulaştıktan sonra pres altında oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.
- Bu yöntem sayesinde, presleme sırasında uygulanan kuvvetten bağımsız olarak homojen ve tekrarlanabilir kalınlık elde edilmiştir.



Şekil 3.15 A) Pres tabla ve kalınlık ayarlayan metal plakalar. B) Çekirdek plakalar üretim esnasında.



Şekil 3.16 Çekirdek plakalar için kesilmiş keçe örneği.



Şekil 3.17 Çekirdek katman için üretilmiş plaka örneği.

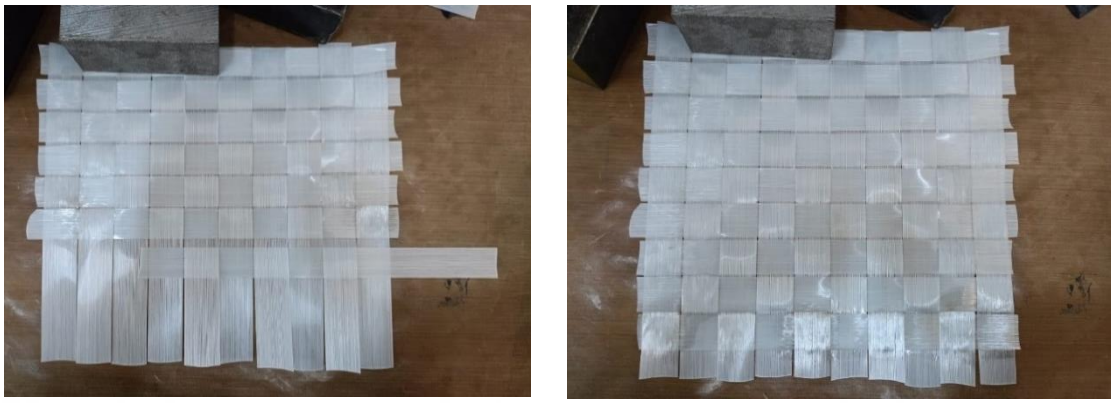
Çizelge 3.5 Kompozit keçe üretim özeti.

Kullanım Yeri	Keçe Yoğunluğu (g/m²)	Pres Sıcaklığı (°C)	Basınç (ton)	Kalınlık (mm)	Soğutma Yöntemi
Yüzey Plaka	1800	185	25	1,3	Pres altında, oda sıcaklığına kadar
Çekirdek Plaka	1000-1800-2600	185	25	4,5	Pres altında, oda sıcaklığına kadar

3.4.4 Sürekli Elyaf Takviyeli Cam/PP Dokuma Plaka Üretimi

Kompozit sandviç yapıların yüzey tabakaları sürekli elyaf takviyeli özel dokuma yapı da plaka formunda üretilmiştir bu sandviç yapı yüzey plakası sürekli elyaf takviyeli cam/PP kullanılmıştır, çekirdek katman ise 1000-1800-2600 g/m^2 keçe katman kullanılmıştır. Bu

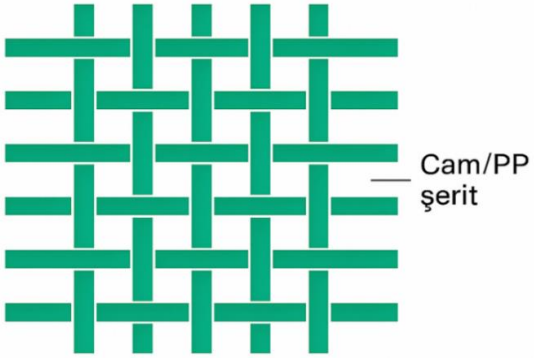
yapıda kullanılan bantlar, %60 cam elyaf içeren cam/PP termoplastik bantlardır. Bantlar tek yönlü şeritler hâlinde kesilmiş ve dik açıyla örgü yaparak dokuma oluşturulmuştur.



Şekil 3.18 Cam/PP şeritlerden örgü yaparak plaka üretimi.

Hazırlanan iki ayrı dokuma tabakası üst üste yerleştirilmiş ve 2 katmanlı bir yapı elde edilmiştir. Bu yapı, 250 °C'ye kadar ısıtılmış bir fırında 5 dakika boyunca ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ardından 10 ton basınç uygulanan presin içine alınarak yaklaşık 15 dakika boyunca pres altında tutulmuştur.

Soğutma işlemi pres açık konuma alınmadan, oda sıcaklığına kadar pres altında kontrollü şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19 dokuma yerleşim şeması.



Şekil3.20 Ön ısıtma işlem için kullanılmış fırın.



Şekil 3.21 Presten çıkan Cam/PP 2 katmanlı plaka.

Bu yöntemle elde edilen plaka, hem sürekli cam elyaf takviyesi sayesinde yüksek rijitlik ve çekme dayanımı sunmuş, hem de PP matrisin akışı sayesinde homojen bir yapıda birleşmiştir.

3.5 Statik Testler

Bu çalışmada üretilen kompozit yapıların mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla statik mekanik testler uygulanmıştır. Statik test kapsamında iki farklı yöntem kullanılmıştır:

1. Çekme testi (ASTM D3039): Yüzey plaka kompozitlerin eksenel yük altındaki davranışlarını değerlendirmek üzere uygulanmıştır.
2. Üç nokta eğilme testi (ASTM D7250): Sandviç yapıların eğilme altındaki taşıma kapasitesi ve rijitliğini incelemek için uygulanmıştır.

3.5.1 Test Cihazı

Statik testleri, Shimadzu AG-X Plus marka 50 kN Yük hücreli sahip evrensel test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, yüksek hassasiyetli yük hücresi, sabit tutucular ve test süreci boyunca sabit hızda hareket eden hareketli kafa sistemine sahiptir.



Şekil 3.22 Shimadzu AG-X Plus test cihazı.

3.5.2 Çekme Testi

Çekme testi, kompozit yüzey plaka malzemelerinin eksenel yöndeki taşıma kapasitesini, deformasyon davranışını ve kopma modunu belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Testler, ASTM D3039 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çekme testleri için aşağıdaki numune türleri hazırlanmıştır:

1800 g/m² cam/PP keçe ile üretilmiş yüzey plakalardan:

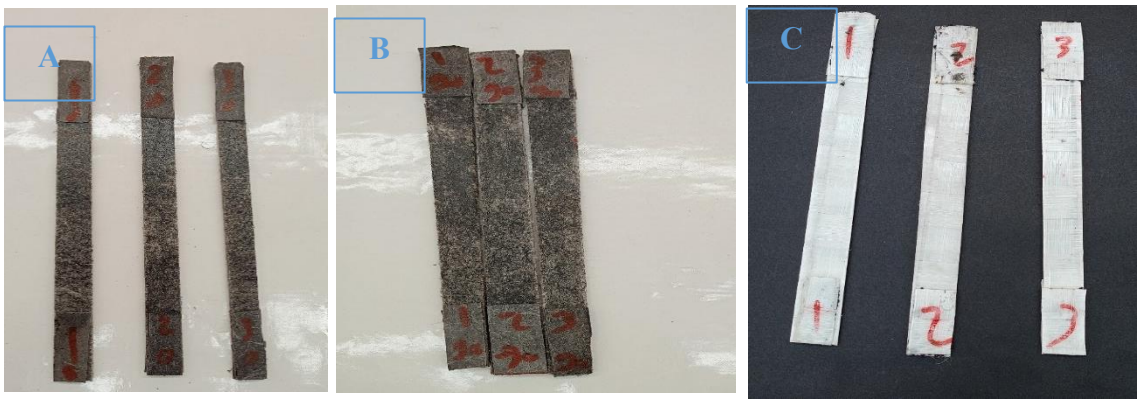
1- 3 adet numune 0° lif yönünde

2- 3 adet numune 90° lif yönünde

Sürekli cam/PP takviyeli dokuma plakalardan:

- 3 adet numune (dokuma yönü 0/90° olacak şekilde ortalama yönelime sahip)

Tüm numuneler ilgili plakadan giyotin makas ile kesilerek çıkarılmış.



Şekil 3.23 A) 0° lif yönünde çekme numuneler. B) 90° lif yönünde çekme numuneler. C) SET Cam/PP çekme numuneler.

Çizelge 3.6 0° lif yönünde çekme numunelerin boyutları.

Numune Numarası	Kalınlığı (mm)	Genişliği (mm)
1	4,08	23,29
2	4,05	22,70
3	4,23	18,70

Çizelge 3.7 90° lif yönünde çekme numunelerin boyutları.

Numune Numarası	Kalınlığı (mm)	Genişliği (mm)
1	3,90	17,84
2	4,01	20,63
3	4,05	19,51

Çizelge 3.8 SET Cam/PP çekme numunelerin boyutları.

Numune Numarası	Kalınlığı (mm)	Genişliği (mm)
1	1,50	28,90
2	1,42	29,18
3	1,50	26,40



Şekil 3.24 Çekme test esnasında.

3.5.3 Üç Nokta Eğilme Testi

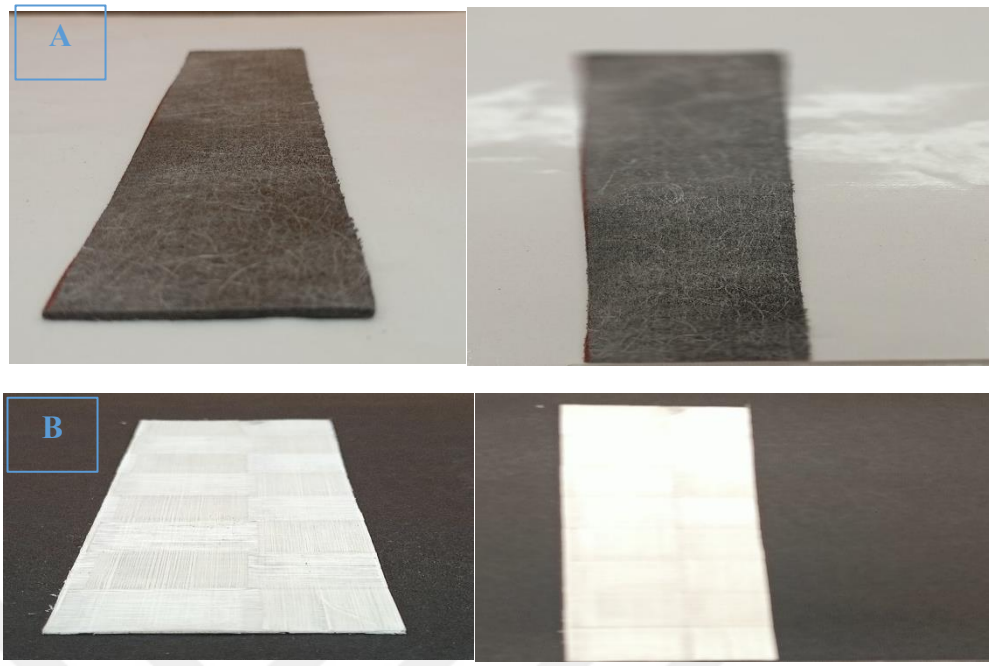
Sandviç yapıların eğilme altındaki yapısal dayanımını ve deformasyon davranışını değerlendirmek amacıyla ASTM D7250 standardına uygun şekilde üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Bu test ile hem çekirdek yapı hem de yüzey plakalarının katkısı bütünsel olarak değerlendirilmiştir.

Test Koşulları ve Parametreler:

- Numune boyutu: 200 mm (uzunluk) × 50 mm (genişlik)
- Destek açıklığı: 150 mm
- Test hızı: 10 mm/dk
- Tekrar sayısı: Her konfigürasyon için 2 adet numune

Bu çalışmada sandviç yapıların hem statik üç nokta eğilme testlerinde hem de dinamik testlerde kullanılacak numuneler ortak bir üretim prosedürüyle hazırlanmıştır. Numune hazırlama aşamaları aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

1. Katmanların Kesimi: Yüzey plaka katmanları ve çekirdek yapılar, son test numune boyutlarını sağlayacak şekilde giyotin makas ile kesilmiştir.



Şekil 3.25 Yüzey plakalar için kesilmiş parçalar. A) Keçeden üretilmiş plakadan. B) SET Cam/PP üretilmiş plakadan.

2. Yapıştırıcı Seçimi ve Katmanların Birleştirilmesi

Sandviç yapı katmanlarının birleştirilmesinde yapışma kuvveti ve esneklik sağlayan EVA (Etilen Vinil Asetat) kopolimer bazlı sıcak yapıştırıcı tercih edilmiştir. EVA yapıştırıcı yüzey plakalara eşit şekilde uygulanmıştır.



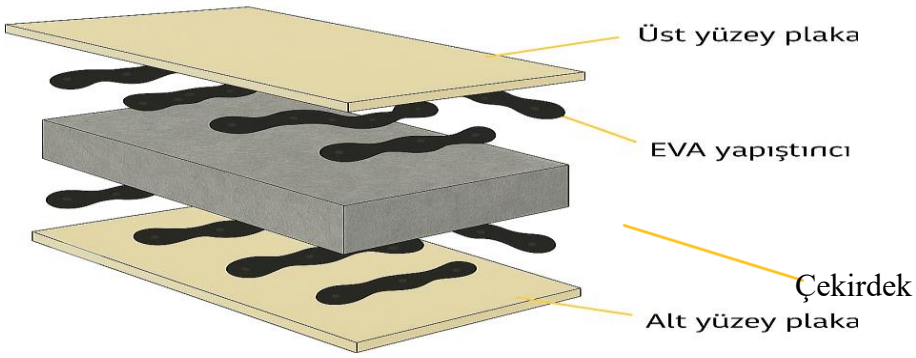
Şekil 3.26 EVA yapıştırıcı uygulama örneği.

3. Presleme Aşaması:

Yapıştırıcı uygulamasından sonra yüzey plaka ve çekirdek katmanları hizalanmış ve 1 ton basınç uygulayan pres sisteminde birleştirilmiştir. Presleme işlemi 5 dakika boyunca sürdürülmüş; böylece yapıştırıcının homojen yayılması ve tam yüzey aderansı sağlanmıştır. İlk yüzey katmanı preslendikten sonra aynı işlem alt yüzey katmanı için tekrarlanmıştır.

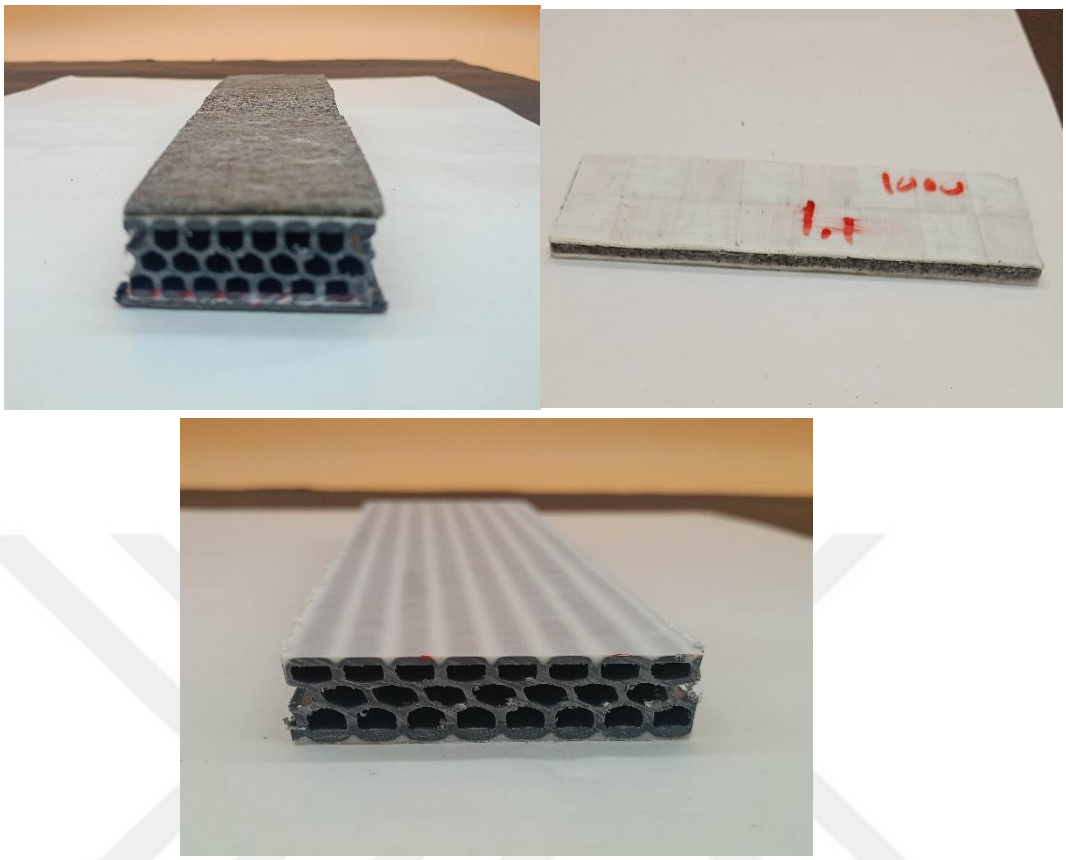


Şekil 3.27 3NE numune pres altında.



Şekil 3.28 Kompozit sandviç yapı üretim metodu.

Bu yöntem sayesinde test numunelerinde katmanlar arasında homojen bağlanma sağlanmış, boşluk ve ayrılma (delaminasyon) riski minimize edilmiştir.



Şekil 3.29 3NE test numuneler örneği. (Hem statik hem dinamik testler için).

Çizelge 3.9 Dairesel kesitli Cam/PP keçe yüzey takviyeli 3NE numuneler.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)	Kullanım Testi
1	200	50	22,1	144,22	Dinamik
2	200	50	20,8	143,62	Statik
3	200	40	20,6	114,57	Statik
4	200	49	20,6	139,30	Dinamik
5	200	49	21,6	148,30	Yok
6	200	47	21,0	140,30	Dinamik
7	200	49	23,7	141,05	Dinamik
8	200	49	21,7	136,75	Statik

Çizelge 3.10 Dairesel kesitli PP çekirdek (Takviyesiz) 3NE numuneler.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)	Kullanım Testi
1	200	52	17,3	110,11	Statik
2	200	48	17,4	102,18	Statik

Çizelge 3.11 1000 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)	Kullanım Testi
1	200	50.03	6.21	44.51	Dinamik
2	200	49.60	6.54	44.63	Dinamik
3	204	49.93	6.48	48.55	Statik
4	198	44.63	6.29	39.59	Statik

Çizelge 3.12 1800 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.

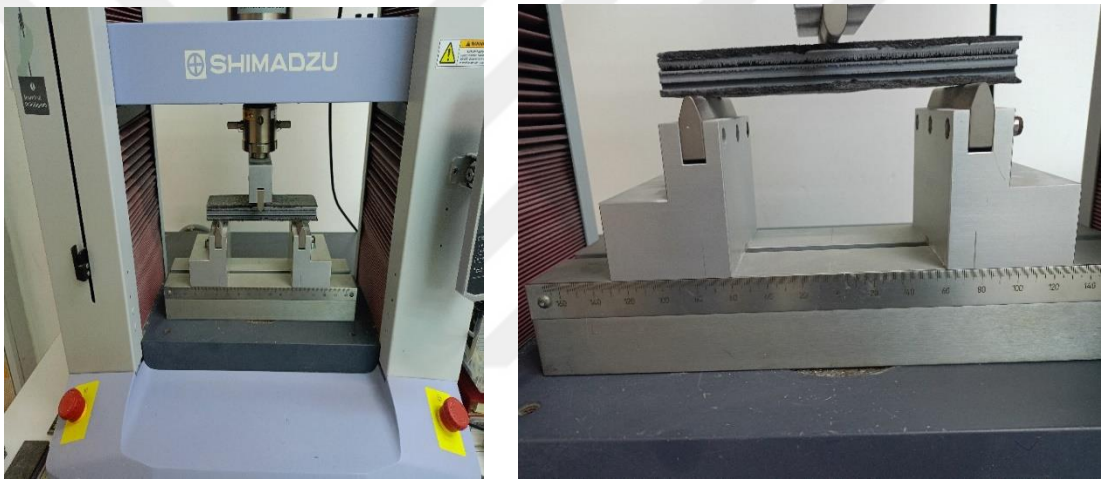
Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)	Kullanım Testi
1	200	37.81	7.40	40.20	Statik
2	202	51.68	7.46	54.48	Dinamik
3	200	44.13	7.52	48.69	Dinamik
4	201	52.13	7.69	57.06	Statik

Çizelge 3.13 2600 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç 3NE numuneler.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)	Kullanım Testi
1	202	50.85	7.70	61.25	Statik
2	203	37.73	7.64	45.05	Statik
3	202	50.37	7.73	62.59	Dinamik
4	200	50.47	7.55	61.20	Dinamik



Şekil 3.30 SET yüzey plakalı kompozit sandviç statik 3NE test esnasında.



Şekil 3.31 Dairesel kesitli kompozit sandviç statik 3NE test esnasında.



Şekil 3.32 Saf dairesel kesitli çekirdek statik 3NE test esnasında.

3.6 Dinamik Testler

Kompozit sandviç yapıların gerçek uygulama koşullarında maruz kalabileceği ani darbe yüklerinin performansa etkisini değerlendirmek amacıyla bu çalışmada yüksek hızlı dinamik testler uygulanmıştır. Sandviç yapıların hem genel eğilme dayanımı hem delici darbe dayanımı iki farklı test prosedürü ile incelenmiştir:

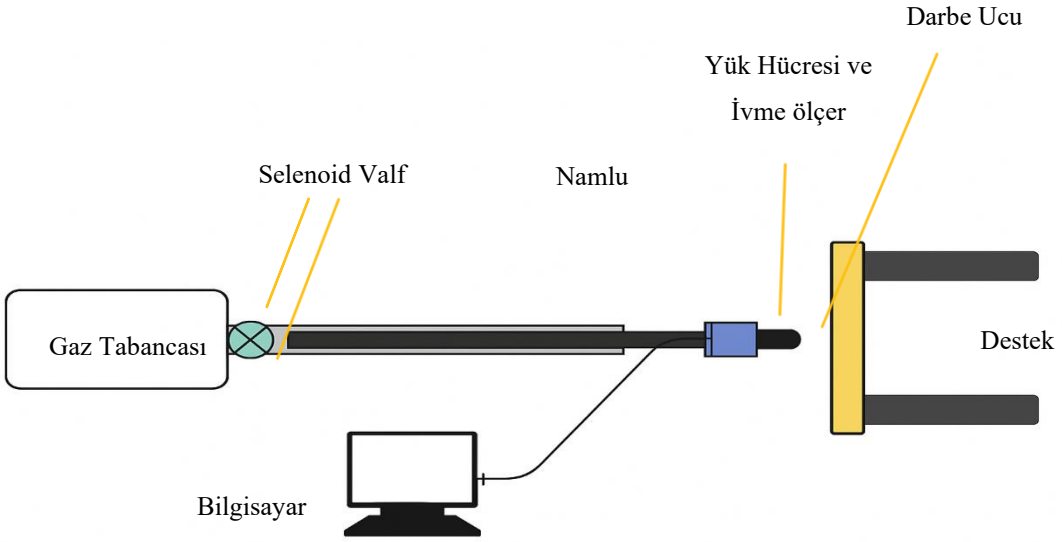
- Yüksek Hızlı Darbe Üç Nokta Eğilme Testi
- Yüksek Hızlı Darbe Penetrasyon Testi

Bu testler, özel olarak tasarlanmış pnömatik kontrollü bir darbe sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem, kontrollü ve tekrarlanabilir darbe yüklemesi sağlama kapasitesine sahip olup, farklı uç geometrileri ve destek sistemleriyle çeşitlendirilmiştir.

3.6.1 Dinamik Test Sistemi Genel Yapısı

Dinamik testler, pnömatik sistemle çalışan bir gaz tabancası düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistem aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Gaz Tabancası: Basınçlı gazın biriktirildiği ve ani salınımla darbe ucu hızlandırdığı bölüm.
- Selenoid Valf: Basıncın kontrollü olarak namluya aktarımını sağlar.
- Namlu: Fırlatılan darbe kafasının yönlendirildiği ve hız kazandığı sistem.
- Darbe Ucu: Test tipine göre farklı çapta uçlarla değiştirilmiştir.
- Yük Hücresi: Darbe anındaki kuvvetin ölçüldüğü hassas sensör.
- İvme ölçer: Test boyunca darbe ucunun anı ivmesi ölçen hassas sensör
- Veri Toplama Ünitesi ve Bilgisayar: Kuvvet–zaman ve kuvvet–yer değiştirme verilerinin kaydedilmesini sağlar.



Şekil 3.33 Dinamik test sisteminin şematik gösterimi.

Yüksek Hızlı Kamera Kullanımı

Tüm dinamik testler esnasında deformasyon ve hasar oluşumlarının detaylı şekilde gözlemlenebilmesi amacıyla yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Kamera aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Çözünürlük: 640 × 480 piksel
- Kayıt Hızı: 4434,59 fps (frame per second)

Bu yüksek hızlı kayıt sistemi sayesinde darbe sırasında oluşan deformasyonun başlangıcı, gelişimi ve nihai hasar mekanizmaları zamana bağlı olarak detaylı şekilde analiz edilmişti



Şekil 3.34 Dinamik test düzeneği (Hızlı kamera ile).

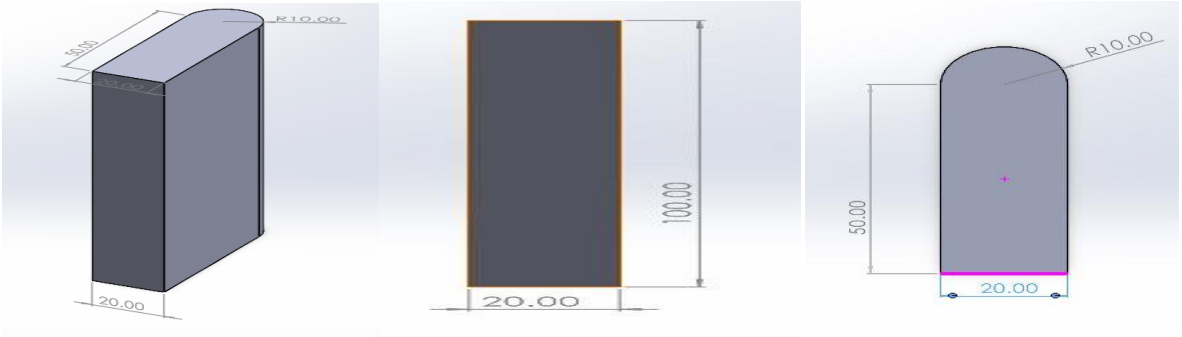
3.6.2 Yüksek Hızlı Darbe Üç Nokta Eğilme Testi

Bu test ile sandviç yapıların yapısal rijitlik ve enerji absorpsiyon kapasitesi değerlendirilmiştir. Yüksek hızlı eğilme testi, düşük süreli ani yük uygulaması altında sandviç yapıların bütünsel davranışını analiz etmeyi sağlar.

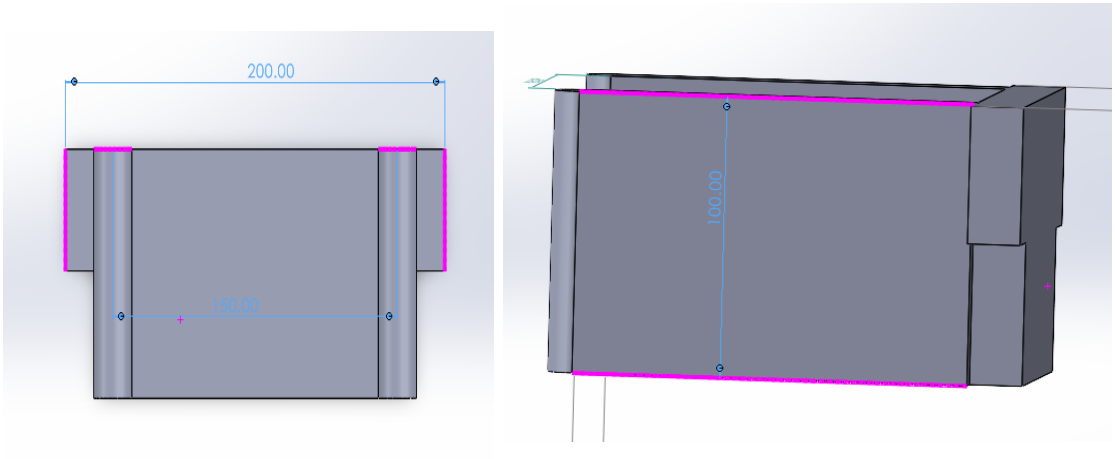
Testlerde kullanılan numuneler Çizelge 3.8, Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12 verildiği gibi hazırlanmış olup, destek açıklığı 150 mm olarak ayarlanmıştır. Darbe uç olarak 20 mm çapında kullanılmıştır. Sisteme 10 bar basınç uygulanarak darbe ucu yüksek hızda ivmelendirilmiş ve numunelere darbe uygulanmıştır. Her konfigürasyon için iki adet numune test edilerek tekrarlanabilirlik sağlanmıştır.

İncelenen yapı konfigürasyonları iki ana grupta toplanmıştır. Birinci grupta cam/PP keçeden yüzey tabakaları ile dairesel kesitli PP çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapılar yer alırken; ikinci grupta ise cam/PP keçe çekirdek malzemeleri (1000, 1800 ve 2600 g/m² yüzey yoğunluğunu sahip) kullanılarak üretilen sandviç yapılar değerlendirilmiştir.

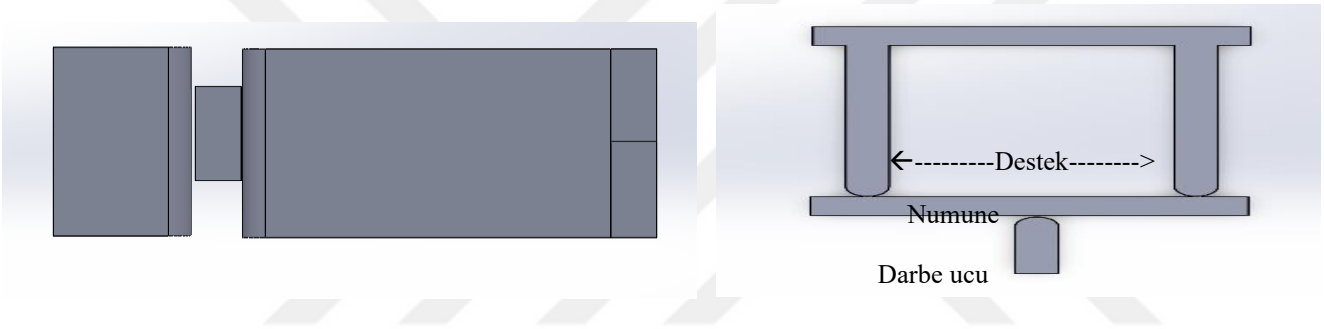
Testler sırasında elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman verileri üzerinden maksimum darbe kuvveti, eğilme rijitliği ve enerji absorpsiyon kapasiteleri hesaplanmıştır. Ayrıca oluşan deformasyon modları detaylı olarak gözlemlenmiş; çekirdek deformasyonu, yüzey kırılması ve katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) gibi hasar türleri belirlenmiştir.



Şekil 3.35 3NE test darbe ucu boyutları.



Şekil 3.36 3NE test desteği.

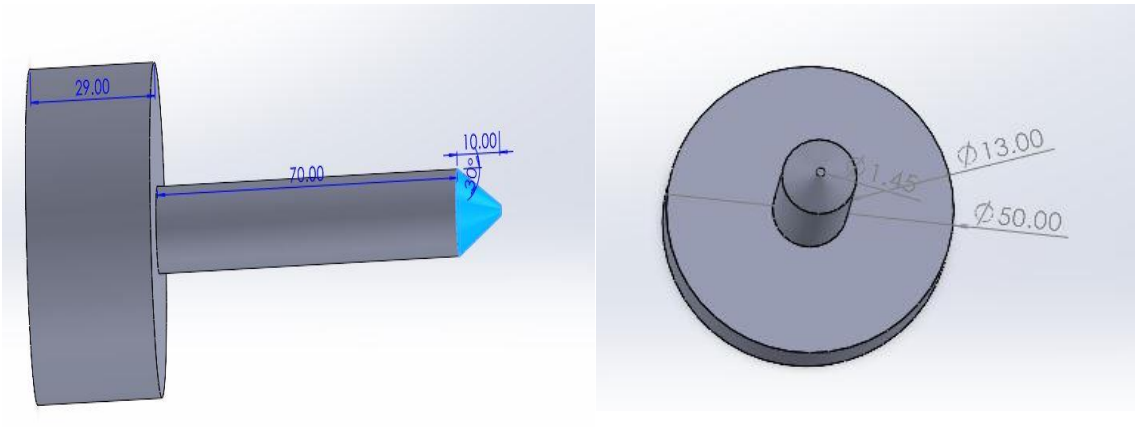


Şekil 3.37 3NE test düzeneği şema görseli.

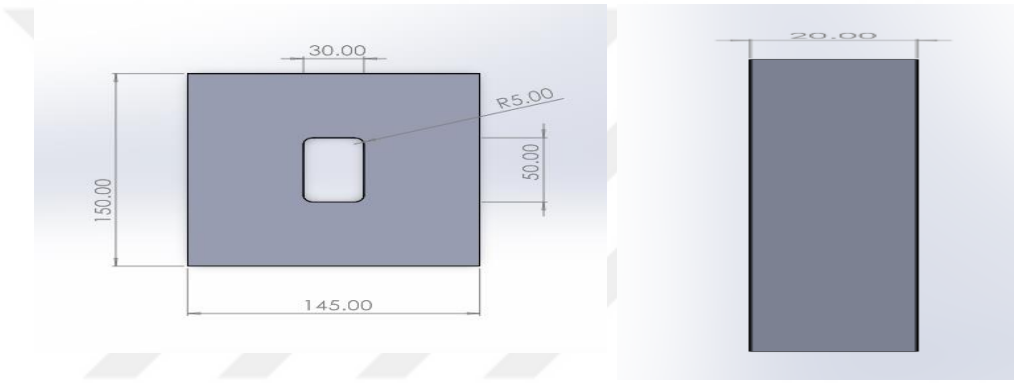
3.6.3 Yüksek Hızlı Darbe Penetrasyon Testi

Sandviç yapıların lokal darbe altındaki delinme ve penetrasyon davranışlarını incelemek amacıyla yüksek hızlı darbe penetrasyon testleri uygulanmıştır. Uygulanan test, sandviç yapıların lokal darbe direncini, enerji absorpsiyon yeteneğini ve hasar toleransını değerlendirmek için önemli bilgiler sunmaktadır.

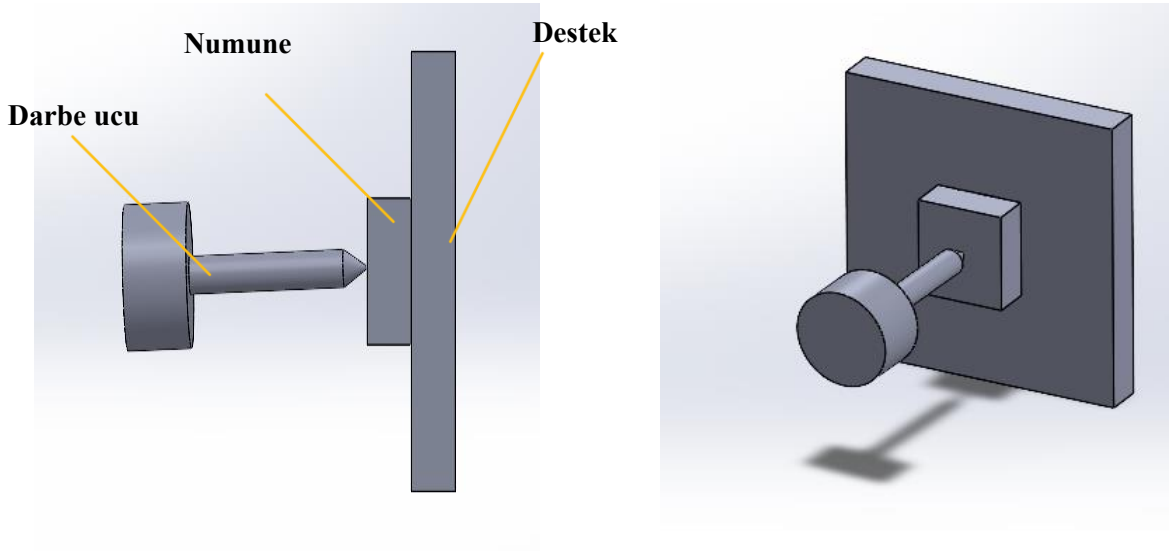
Darbe ucu olarak 1.45 mm çapında konik penetrasyon sivri ucu tercih edilmiştir. Tüm testler, sistemdeki gaz basıncı 10 bar seviyesine ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Cam/PP keçeden yüzey tabakaları dairesel çekirdekli sandviç yapı ve cam/PP keçe çekirdekli sandviç yapılar için üçer adet numune test edilmiştir. Takviyesiz dairesel PP çekirdek için ise iki adet numune değerlendirilmiştir.



Şekil 3.38 Penetrasyon test darbe ucu ve boyutları.



Şekil 3.39 Penetrasyon test için kullanılan destek.



Şekil 3.40 Penetrasyon test düzeneği gösteren şema.

Penetrasyon test numuneler ve numune boyutları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 3.14 dairesel kesitli çekirdek Cam/PP keçe yüzey takviyeli penetrasyon numuneleri.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)
1	48	45	22,0	34,52
2	50	46	21,4	33,94
3	49	46	20,9	32,72

Çizelge 3.15 Saf dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numuneleri.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)
1	50	45	17,3	20,77
2	50	45	17,6	23,60

Çizelge 3.16 1000 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler.

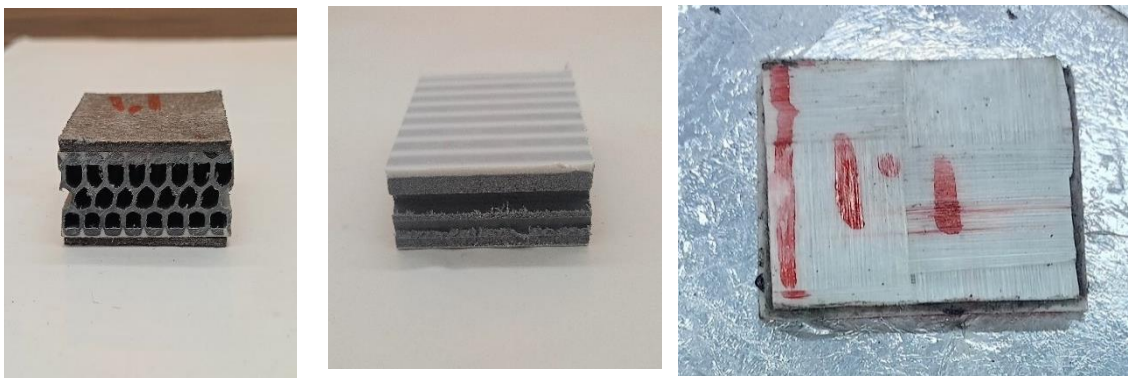
Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)
1	51,40	51,13	6,05	11,33
2	49,09	47,55	6,15	10,39
3	49,77	48,12	5,81	10,89

Çizelge 3.17 1800 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler.

Numune No		Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)
1		51,54	48,05	6,86	13,60
2		53,04	39,50	6,65	11,17
3		51,37	44,17	7,11	11,49

Çizelge 3.18 2600 g/m^2 Cam/PP keçe çekirdekli sandviç penetrasyon numuneler.

Numune No	Boy (mm)	En (mm)	Kalınlığı (mm)	Ağırlığı (g)
1	50.24	42.52	6.93	12.05
2	55.76	50.68	7.16	15.22
3	51.04	41.60	7.55	12.55



Şekil 3.41 Penetrasyon test için hazırlanmış numuneler örneği.

4. BULGULAR

4.1 Hesaplama Formülleri

Bu bölümde hem statik testlerde hem dinamik testlerde hesaplanan verilerin formülleri verilmektedir.

4.1.1 Çekme testinde elde edilen veriler

1- Çekme Gerilmesi (σ):

$$\sigma = F/A \tag{4.1}$$

Burada F: Maksimum kuvvet (N), A: Numune kesit alanı (mm^2) (genişliği x en)

2- Kopma Uzaması (ε):

$$\varepsilon = (\Delta L / L0) \times 100 \tag{4.2}$$

Burada ΔL numune başlangıç ve son boyunun farkı. L0: numune başlangıç boyu.

3- Elastik Modül (E):

$$E = \sigma/\varepsilon \tag{4.3}$$

4.1.2 3 Nokta eğilme testinde kullanılan formüller

1- Eğilme Girilme (σ_f)

$$\sigma_f = (3FL) / (2bh) \tag{4.4}$$

2- Eğilme Modülü (E_f)

$$E_f = (FL3)/(4bd^3\delta) \quad (4.5)$$

Burada: F uygulanan kuvvet (N), L numunenin etkili uzunluğunu (destek noktaların arasındaki mesafe) (mm), b numune genişliği (mm), d numune kalınlığı (mm) ve δ eğilme, merkezi yük altında numunenin orta noktasındaki maksimum yer değiştirmeyi temsil eder (mm).

4.2 Çekme testi

4.2.1 0° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit

Bu bölümde, 1800 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip cam/PP keçe esaslı kompozit yüzey plakaların 0° lif yönünde uygulanan çekme testlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Liflerin yük doğrultusuna paralel hizalanması, mekanik dayanım ve rijitlik üzerinde önemli bir etki göstermiştir. ASTM D3039 standardına uygun olarak gerçekleştirilen çekme testlerinde her numune için maksimum kuvvet, çekme dayanımı, elastik modül ve kopma uzaması değerleri çizelge 4.1 de verilmiştir.

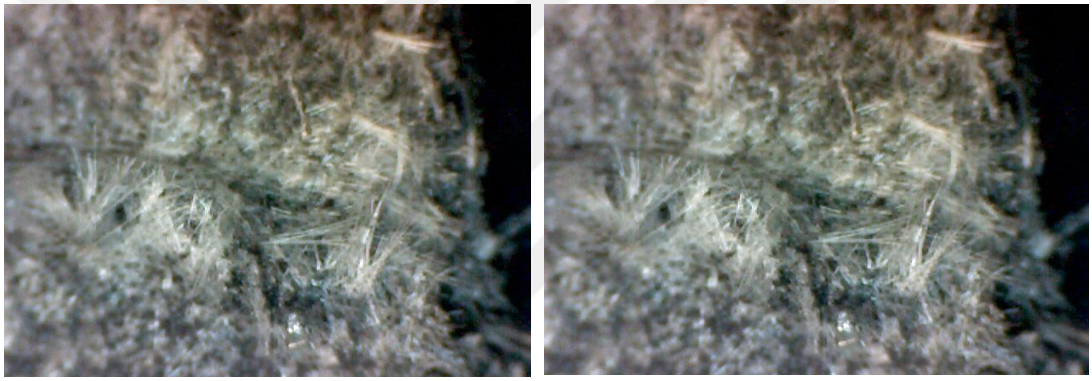
Çizelge 4.1 0° Lif yönü- Cam/PP keçe kompozit çekme test sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Çekme Girilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1_1	439,42	4,624	1,241
1_2	471,51	5,129	1,560
1_3	219,87	2,780	0,733

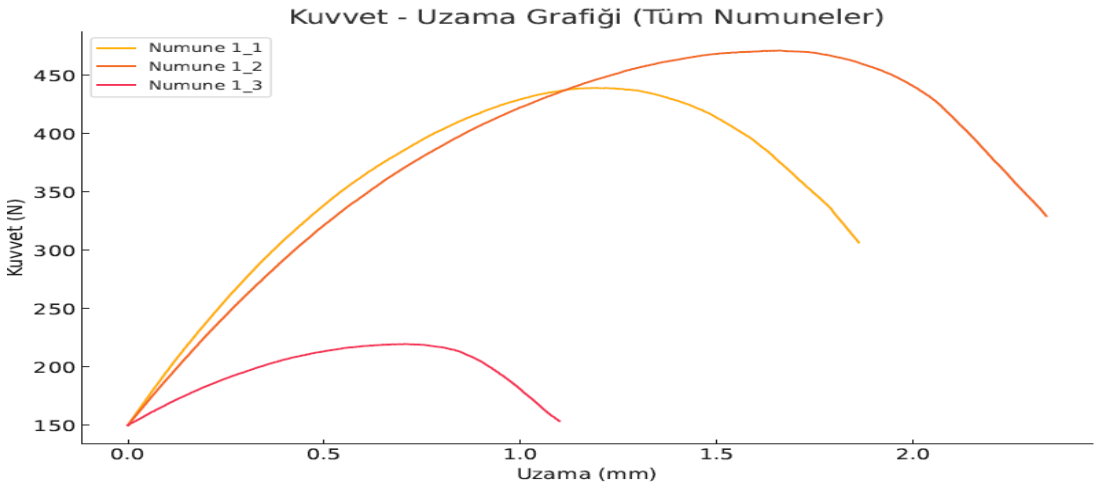
Tabloda da görüldüğü üzere numuneler arasında belirli farklılıklar gözlemlenmemiştir. Sadece 1_3 numunesinde hem çekme dayanımı hem de elastik modülün diğer numunelere göre belirgin şekilde düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu düşüş sebebi genişliği diğer numunelere göre daha düşüktür.



Şekil 4.1 Çekme testten sonra numunelere gelen hasar.



Şekil 4.2 Çekme testten sonra numunelere gelen hasar mikroskop altındaki görüntüler.



Şekil 4.3 0° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit kuvvet-uzama grafiği.

0° lif yönünde gerçekleştirilen çekme testlerinde, elyafların yük doğrultusuna paralel hizalanması nedeniyle yüksek çekme dayanımı ve elastik modül değerleri elde edilmiştir. Numune 1_2, 5.129 MPa çekme dayanımıyla en yüksek değeri göstermiştir. Kopma uzamaları tüm numunelerde %1–1.5 aralığında kalmıştır.

4.2.2 90° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit

Bu bölümde 1800 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip cam/PP keçe kompozit plakaların 90° lif yönünde yapılan çekme testlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

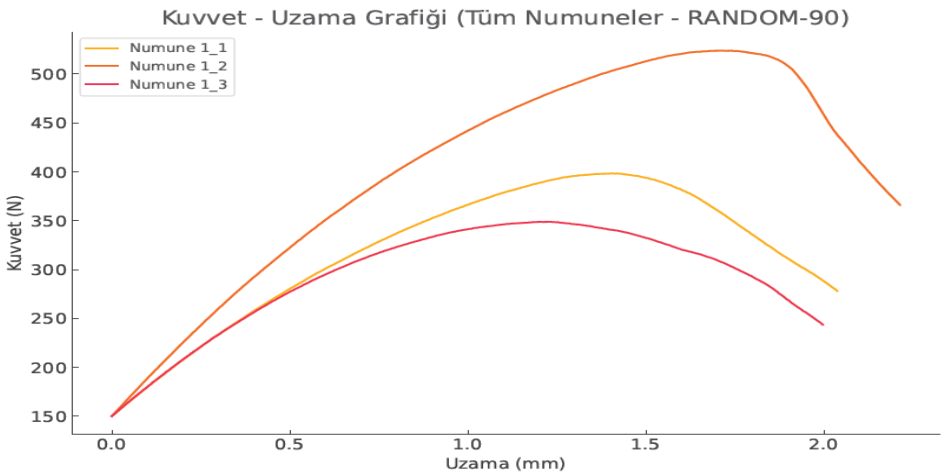
Çizelge 4.2 90° Lif yönü- Cam/PP keçe kompozit çekme test sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Çekme Girilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1_1	398,509	5,728	1,358
1_2	524,155	6,336	1,475
1_3	349,013	4,417	1,331

Veriler incelendiğinde tüm numunelerin maksimum kuvvet ve çekme dayanımı değerlerinin bir önceki 0° lif yönüne göre göreceli olarak düşük olduğu, ancak aralarındaki farkların nispeten daha dengeli dağıldığı gözlemlenmiştir.90° lif yönünde uygulanan çekme testlerinde, yük doğrultusunun elyaf doğrultusuna dik olması nedeniyle taşıma kapasitesi büyük oranda matrisin ve fiber-matris arayüzeyinin performansına bağlı olarak şekillenmiştir. Numune 1_2, 6.336 MPa ile en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Kopma uzamaları tüm numunelerde %1,3- 1.4 seviyelerinde oldukça yakın değerlere ulaşmıştır.



Şekil 4.4 Çekme testten sonra numunelere gelen hasar.



Şekil 4.5 90° Lif Yönü- Cam/PP Keçe Kompozit kuvvet-uzama grafiği.

4.2.3 SET Cam/PP Dokuma Kompozit Plaka

Bu bölümde SET Cam/PP Dokuma Kompozit Plaka üzerinde gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Sürekli elyaf takviyesi, yük taşıma kapasitesini doğrudan artıran ve deformasyon davranışını daha keskin şekilde değiştiren bir katkı sağlamaktadır.

Çizelge 4.3 SET Cam/PP Dokuma Kompozit Plaka çekme test sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Çekme Girilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1_1	1205,341	27,805	6,498
1_2	1745,693	42,130	3,550
1_3	1397,673	35,295	3,430

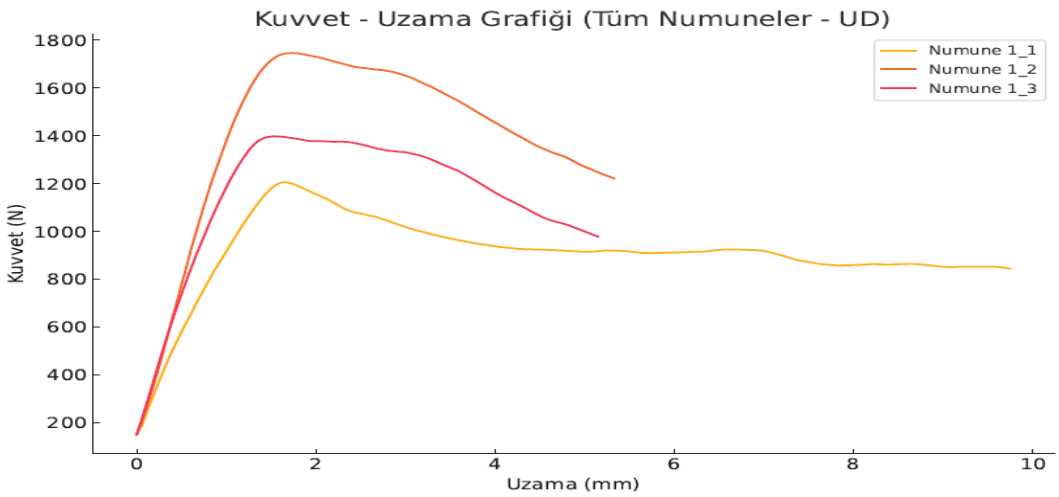
SET cam/PP sayesinde kuvvet değerlerinin keçe takviyeli numunelere göre belirgin şekilde yükseldiği, deformasyon boyunca lineer elastik davranışın daha uzun sürdüğü ve kopma anında daha yüksek toplam uzamalara ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

SET cam/PP numuneler, kısa lifli keçe esaslı numunelere kıyasla çok daha yüksek çekme dayanımı ve rijitlik değerleri sergilemiştir. En yüksek çekme dayanımı 42.13 MPa olarak ölçülmüştür. Kopma uzaması %3,4 ile %6,5 arasında değişmiş ve keçe esaslı numunelere

göre daha sünek davranış göstermiştir. Sürekli elyaf yapısı, yük altında gerilme transferinin daha etkin gerçekleşmesini sağlamış. Şekil 4.6 baksak numunelere gözde görünen hasar olmamıştır.



Şekil 4.6 SET cam/PP numuneler çekme testten sonra.



Şekil 4.7 SET cam/PP çekme testi kuvvet- uzama grafiği.

4.3 Statik üç nokta eğilme testi

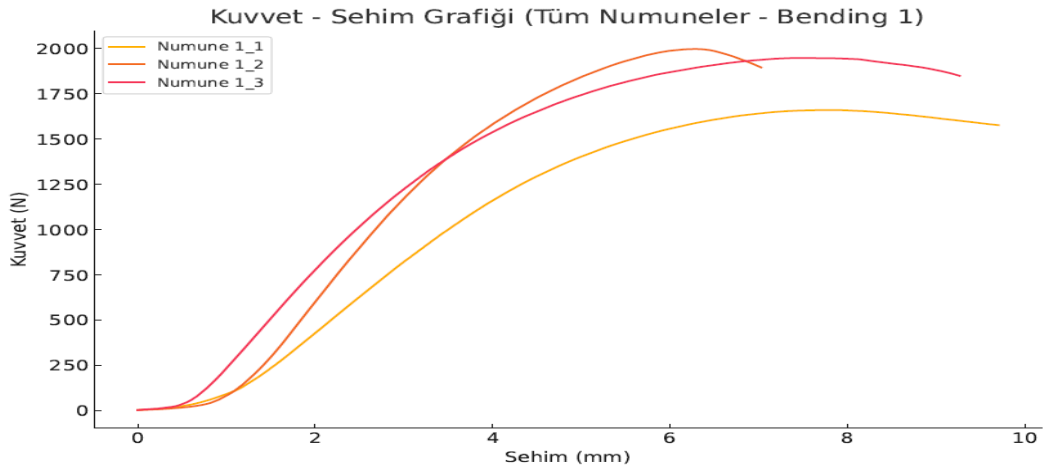
4.3.1 Cam/PP Keçe Takviyeli Dairesel Kesitli Çekirdekli Sandviç

Bu bölümde, dairesel kesitli PP çekirdek ve yüzey tabakası olarak cam/PP keçe kullanılan sandviç yapıların üç nokta eğilme testinden elde edilen bulgular sunulmaktadır. Testler ASTM D7250 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4 Cam/PP Keçe Takviyeli Dairesel Kesitli Çekirdekli Sandviç statik 3NE sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Eğilme Girilme (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Maksimum Sehim (mm)
1_1	1660,554	22,011	473,866	9,69481
1_2	1997,972	20,781	656,986	7,02134
1_3	1948,055	18,996	373,776	9,25768

Cam/PP keçe takviyeli dairesel çekirdekli sandviç yapıların üç nokta eğilme testleri sonucunda yüksek eğilme dayanımı ve rijitlik değerleri elde edilmiştir. Özellikle numune 1_2, 1997.972 N maksimum taşıma kapasitesi ve 656.986 MPa elastik modül değeriyle en iyi performansı göstermiştir. Maksimum sehim değerleri 7–9 mm aralığında değişmiştir. Dairesel çekirdek yapının rijitlik ve deformasyon kontrolüne katkı sağladı.



Şekil 4.8 Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç kuvvet- sehim grafiği.

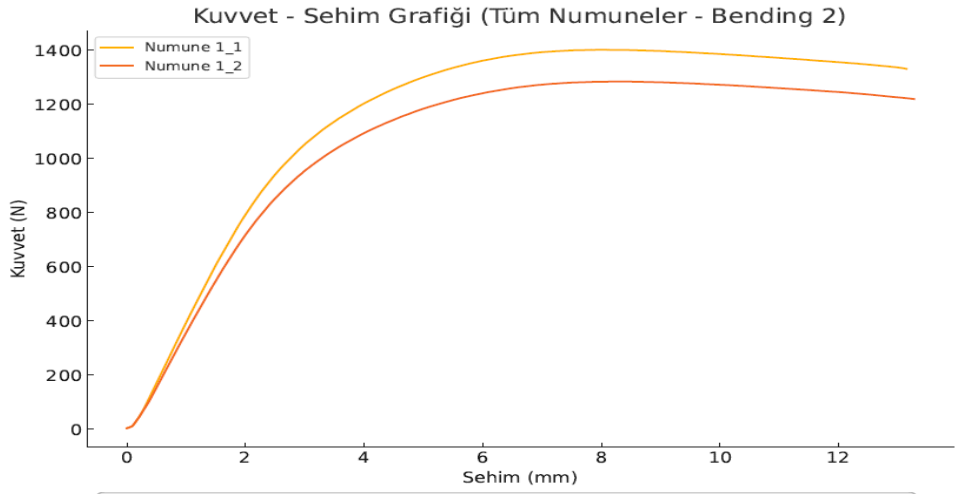
4.3.2 Takviyesiz Dairesel Kesitli PP Çekirdek

Bu bölümde yalnızca dairesel kesitli PP çekirdekten oluşan ve yüzey tabakasında takviye bulunmayan sandviç yapıların üç nokta eğilme testlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Bu yapı, referans sistem olarak değerlendirilmiş ve takviyeli sistemlerle karşılaştırmada temel kıyas noktası olmuştur.

Çizelge 4.5 Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek statik 3NE sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Eğilme Girilme (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Maksimum Sehim (mm)
1_1	1402,243	20,273	232,303	13,13959
1_2	1284,631	19,889	225,520	13,26803

Takviye içermeyen dairesel kesitli PP çekirdekli sandviç yapıların eğilme testlerinde görece düşük elastik modül ve taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Maksimum kuvvet değerleri 1284–1402 N arasında bulunmuş, elastik modül değerleri ise 225–232 MPa arasında değişmiştir. Maksimum sehim değerleri 13 mm civarında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.9 Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek statik 3NE kuvvet-sehim grafiği.

Eğriler incelendiğinde deformasyonun daha yumuşak, rijitliğin ise takviyeli sistemlere kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sehim miktarı test boyunca kademeli artış

göstermiş ve ani kırılma yerine kademeli göçme davranışı sergilenmiştir. Takviyesiz sistemlerde deformasyonun kontrollü ve kademeli gerçekleştiği; elastik deformasyon bölgesinin uzun sürdüğü, fakat yük taşıma kapasitesinin sınırlı olduğu görülmüştür. Bu yapı, takviyeli sandviç yapıların dayanım artışını kıyaslamak için referans kabul edilmiştir.

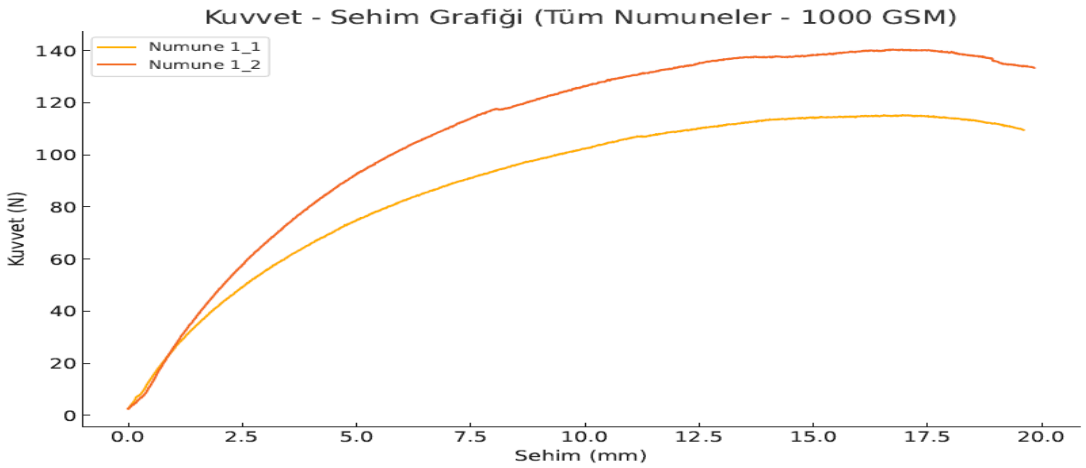
4.3.3 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç

Bu bölümde keçe çekirdeği olarak 1000 g/m² cam/PP keçe ve yüzey tabakalarında SET cam/PP sandviç yapıların 3NE testlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Lif içerikli takviyelerin çekirdek ve yüzey kombinasyonlarıyla birlikte oluşturduğu sandviç sistemlerin rijitlik ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.6 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Eğilme Girilme (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Maksimum Sehim (mm)
1_1	115,283	12,372	402,438	19,60511
1_2	140,428	17,894	619,001	19,83768

1000 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların eğilme testleri sonucunda orta seviyede taşıma kapasitesi ve rijitlik elde edilmiştir. 1_2 numunesinde maksimum 140 N kuvvet ve 17.89 MPa eğilme dayanımı ölçülürken, elastik modül değeri 619 MPa seviyesine ulaşmıştır. Maksimum sehim değerleri yaklaşık 19–20 mm seviyelerine kadar çıkmıştır.



Şekil 4.10 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği.

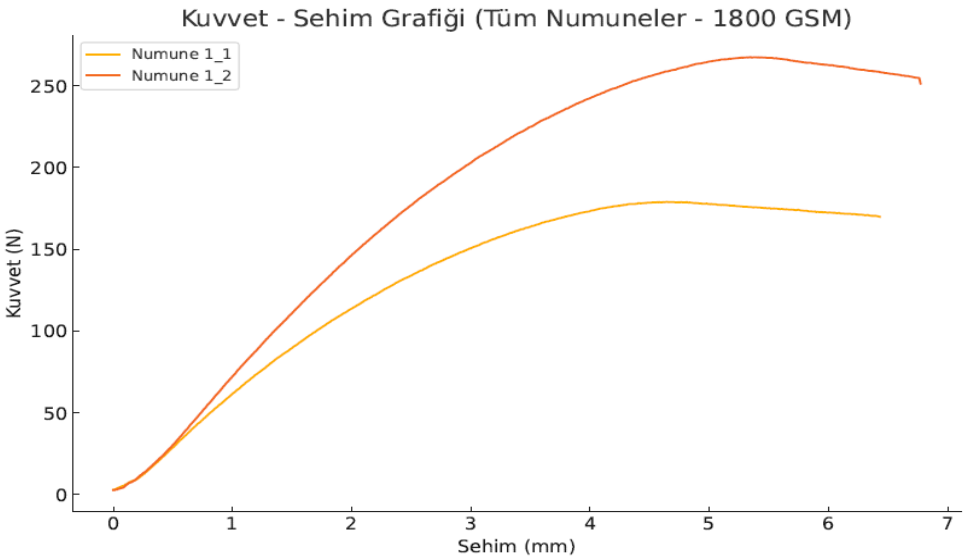
Eğriler incelendiğinde; yük artışına karşı sehim değerlerinin kademeli olarak arttığı, deformasyonun büyük oranda elastik rejimde ilerlediği ve nihayetinde göçme sınırına ulaşıldığı gözlenmiştir. Keçe çekirdeğin düşük yoğunluğu nedeniyle deformasyon süreci esnek gerçekleşmiş ve göçme davranışı yüzey katmanlarındaki delaminasyon ve çekirdek ezilmesi ile sınırlanmıştır. Bu yapı, düşük yoğunluk ve esneklik gerektiren uygulamalar için avantaj sağlayabilecek yapıdadır.

4.3.4 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç

Bu bölümde keçe çekirdek malzemesi olarak 1800 g/m² cam/PP keçe ve yüzey tabakalarında sürekli cam/PP dokuma kullanılan sandviç yapıların üç nokta eğilme testinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Keçe yoğunluğunun artışıyla mekanik performans üzerine etkiler analiz edilmiştir.

Çizelge 4.7 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Eğilme Girilme (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Maksimum Sehim (mm)
1_1	179,092	19,462	1444,322	6,43075
1_2	267,609	19,532	1420,538	6,77294



Şekil 4.11 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği

Eğriler incelendiğinde, deformasyonun daha düşük sehim değerlerinde yoğunlaştığı ve yük artışına karşı daha sert yanıt verdiği görülmektedir. 1800 g/m² keçe yoğunluğu ile yapı önemli oranda rijitlik kazanmıştır.1800 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların eğilme testleri sonucunda hem eğilme dayanımı hem de rijitlik açısından belirgin iyileşme sağlanmıştır. Maksimum kuvvet değerleri 179–267 N arasında değişmiş, elastik modül değerleri ise 1420–1444 MPa seviyelerinde ölçülmüştür. Maksimum sehim miktarları 6–7 mm civarındadır. Keçe yoğunluğunun artışı ile çekirdeğin taşıma kapasitesi ve deformasyon kontrolü daha etkin hale gelmiştir. Yüzey takviyesi ile, yapı genel olarak yüksek rijitlik ve orta seviyede enerji absorpsiyon kapasitesi sergilemiştir.

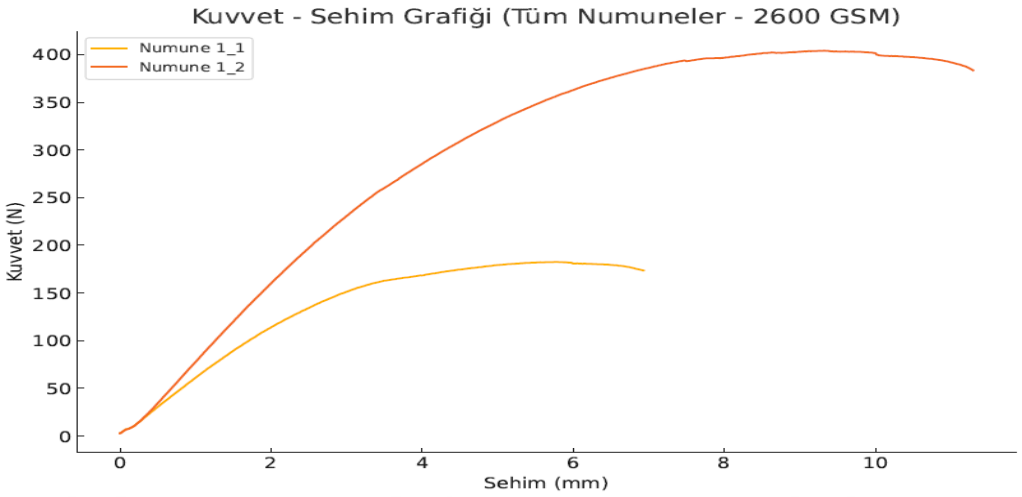
4.3.5 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sürekli Cam/PP Yüzey Takviyeli Sandviç

Bu bölümde çekirdek yoğunluğu 2600 g/m² olan cam/PP keçe çekirdekli ve yüzey tabakası olarak sürekli cam/PP dokuma kullanılan sandviç yapıların üç nokta eğilme testlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Keçe yoğunluğundaki artışın yapısal rijitlik ve dayanım üzerine etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.8 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet (N)	Eğilme Girilme (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Maksimum Sehim (mm)
1_1	182,732	18,669	1218,536	6,931
1_2	404,143	30,161	1231,419	11,29244

2600 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların eğilme testleri sonucunda, özellikle 1_2 numunesinde 404 N maksimum kuvvet ve 30.16 MPa eğilme dayanımı gibi yüksek değerlere ulaşılmıştır. Elastik modül değerleri her iki numunede yaklaşık 1218–1231 MPa seviyelerinde ölçülmüş, maksimum sehim ise 6.9–11.2 mm arasında değişmiştir.



Şekil 4.12 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç statik 3NE kuvvet-sehim grafiği.

Eğriler incelendiğinde düşük deformasyonlarda rijit davranış sergilendiği, yüksek deformasyonlara ulaşıldığında ise çekirdek ezilmesine bağlı olarak deformasyonun hızlandığı gözlemlenmiştir. Keçe yoğunluğunun artışıyla çekirdek rijitliği ve yük taşıma kapasitesi artarken, deformasyon sonrası oluşan ezilme bölgeleri daha kontrollü bir hasar moduna yol açmıştır. Yüksek yoğunluklu keçe çekirdeğin, sandviç yapıların darbe emme ve stabil deformasyon kapasitesi açısından avantaj sağladığı değerlendirilmektedir.

4.4 Yüksek Hızlı Darbe Penetrasyon Testi

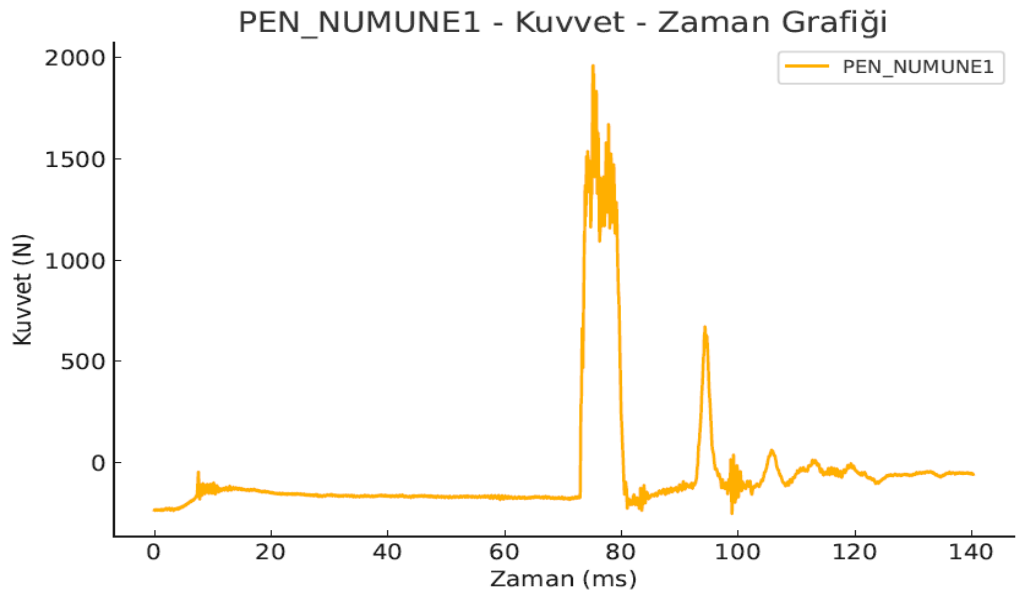
4.4.1 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç

Bu bölümde dairesel kesitli PP çekirdek ve cam/PP kompozit keçe yüzey takviyesine sahip sandviç yapıların penetrasyon testi sonuçları değerlendirilmektedir. Testler, yüksek hızlı darbe yüklemesi altında numunelerin delinme ve deformasyon davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

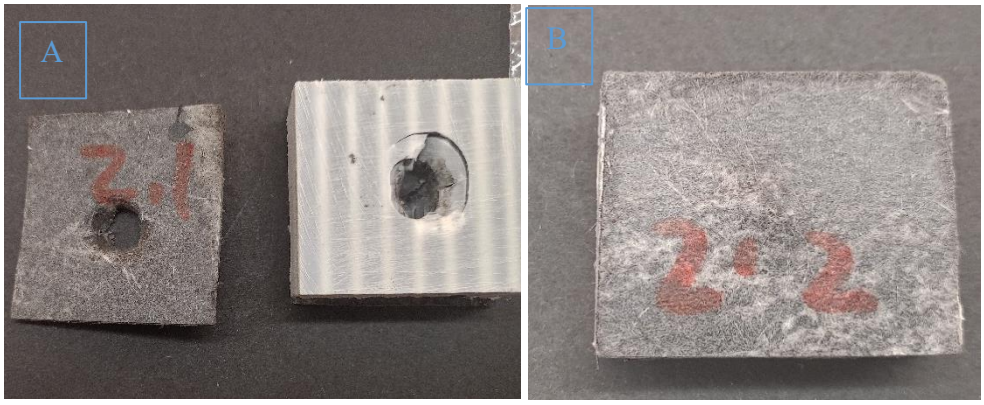
Çizelge 4.9 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	1962
2	2775
3	2547
Ortalama	2428 N

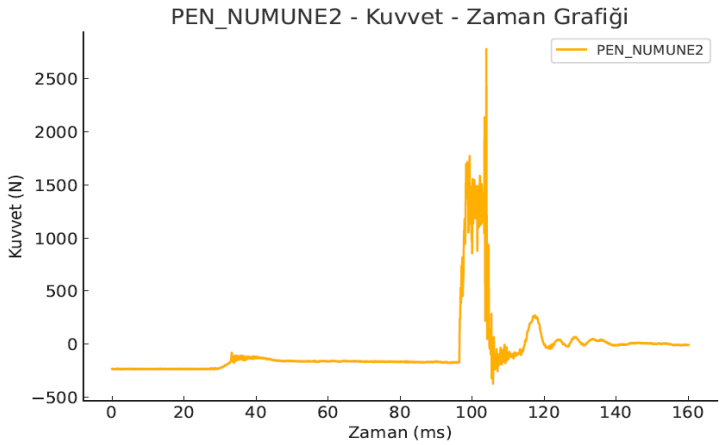
Dairesel kesitli cam/PP keçe takviyeli sandviç yapılar penetrasyon testinde yüksek delinme dayanımı sergilemiştir. Üç numunede de maksimum kuvvet değerleri 1962 N ile 2774 N arasında değişmiş ve ortalama maksimum kuvvet yaklaşık 2428 N seviyesinde oluşmuştur. Yüksek hızda uygulanan lokal darbe altında yüzey katmanlarının etkin enerji sönümlemesi ve çekirdek yapının göçmeyi geciktirme kapasitesi bu performansı sağlamıştır.



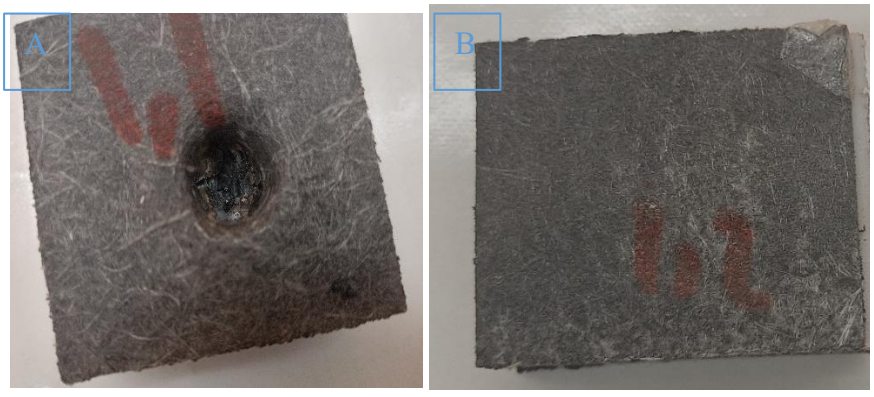
Şekil 4.13 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 1 kuvvet-zaman grafiği.



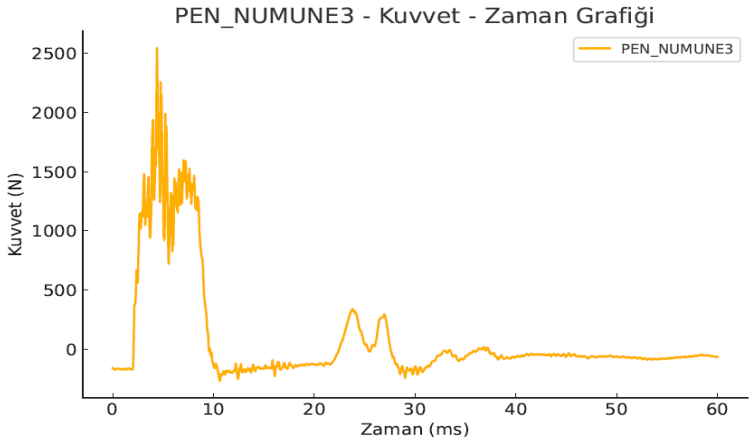
Şekil 4.14 Numune 1 penetrasyon test sonra. A) Numunenin ön taraftaki yüzey plaka ve çekirdek. B) Numunenin arka tarafı.



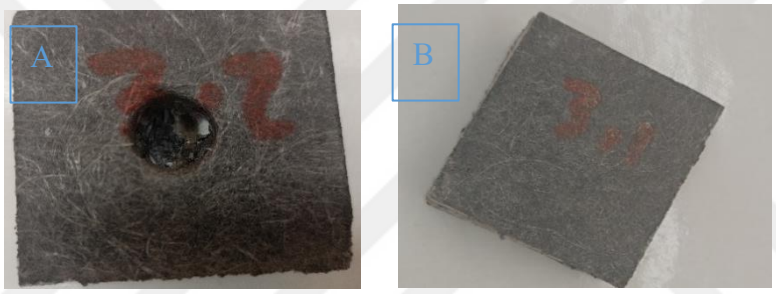
Şekil 4.15 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 2 kuvvet-zaman grafiği.



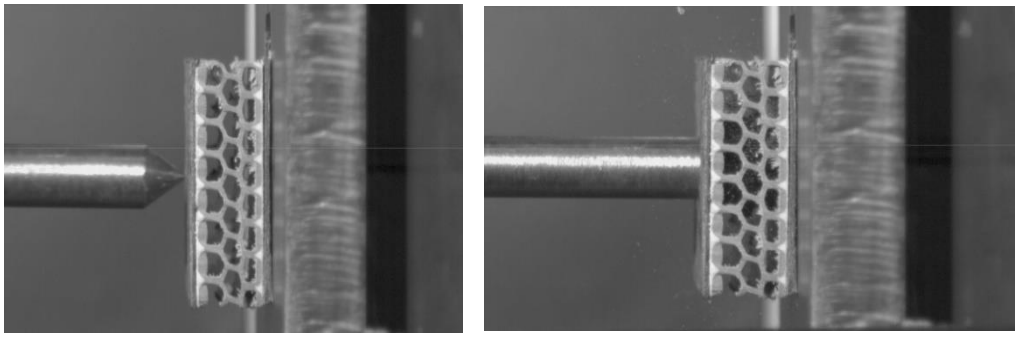
Şekil 4.16 Numune 2 penetrasyon test sonra. A) Numunenin ön yüzey.
B) Numunenin arka yüzey.



Şekil 4.17 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç penetrasyon test numune 3 kuvvet-zaman grafiği



Şekil 4.18 Numune 3 penetrasyon test sonra. A) Numunenin ön yüzey.
B) Numunenin arka yüzey.



Şekil 4.19 Penetrasyon test esnasında hızlı kamera görüntüleri.

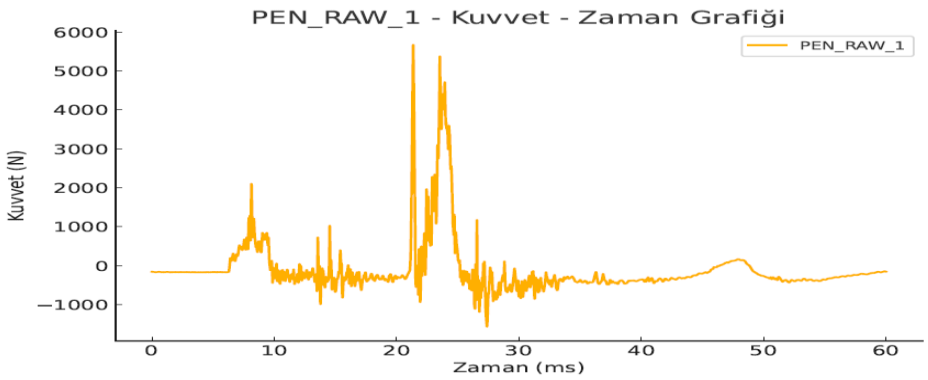
Darbe testleri sonucunda, darbe ucu öncelikle 1. yüzey ve çekirdek yapıyı geçmekte, 2. yüzey tabakasında ise tüm darbe enerjisi sönümlenmektedir.

4.4.2 Takviyesiz Dairesel Kesitli PP Çekirdek

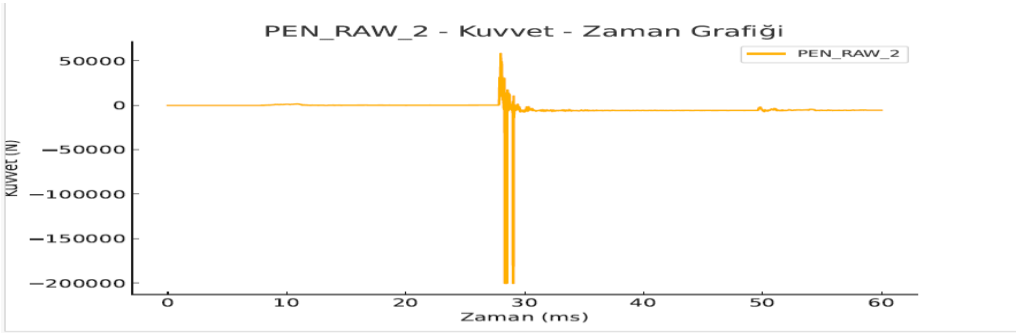
Bu bölümde yüzey tabakasında takviye bulunmayan, yalnızca dairesel kesitli PP çekirdekten oluşan sandviç yapıların penetrasyon testi sonuçları sunulmaktadır. Yapının yalnızca çekirdek tarafından desteklenmesi nedeniyle lokal darbe davranışları doğrudan çekirdek deformasyonu üzerinden değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.10 Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	5671
2	58412



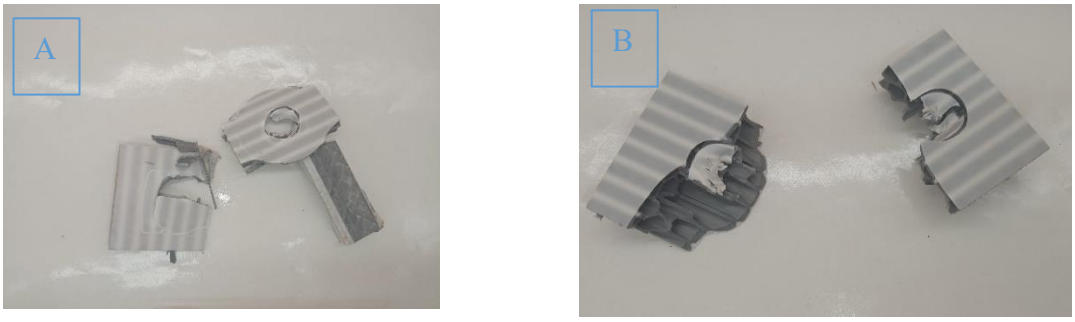
Şekil4.20 Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numune 1 test kuvvet-zaman grafiği.



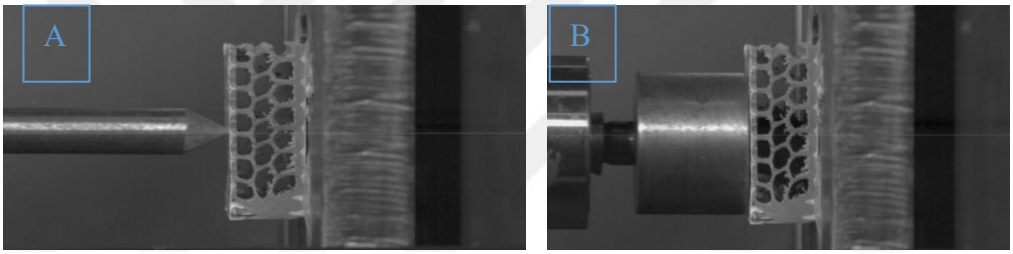
Şekil4.21 Takviyesiz dairesel kesitli PP çekirdek penetrasyon numune 2 test kuvvet-zaman grafiği.

Her iki numuneden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aşağıda sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde 2 numunesinin diğer numuneye kıyasla olağanüstü yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç büyük olasılıkla ölçüm sisteminde oluşan

bir okuma hatasından veya sensör doygunluğundan kaynaklanabilir. 1 numunesi için ise darbe kuvvetinin 5.6 kN seviyelerinde kaldığı ve sistematik olarak normal bir delinme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22 Saf PP çekirdek testten sonra. A) Numune 1. B) Numune 2



Şekil 4.23 Saf PP çekirdek hızlı kamera görüntüler test esnasında. A) Penetrasyon başlangıç anı. B) Tamamen çekirdek dilendiği an.

Takviyesiz dairesel çekirdekli yapının penetrasyon testi sonuçları yüksek varyans göstermiştir. Numune 1 de elde edilen 5671 N maksimum kuvvet, tipik takviyesiz çekirdek göçme direncini temsil ederken; numune 2 de 58412 N gibi olağandışı yüksek bir kuvvet değeri ölçülmüştür. Bu ölçüm, sistem limitleri içinde gerçekçi olmayabileceği için dikkatle değerlendirilmiştir.

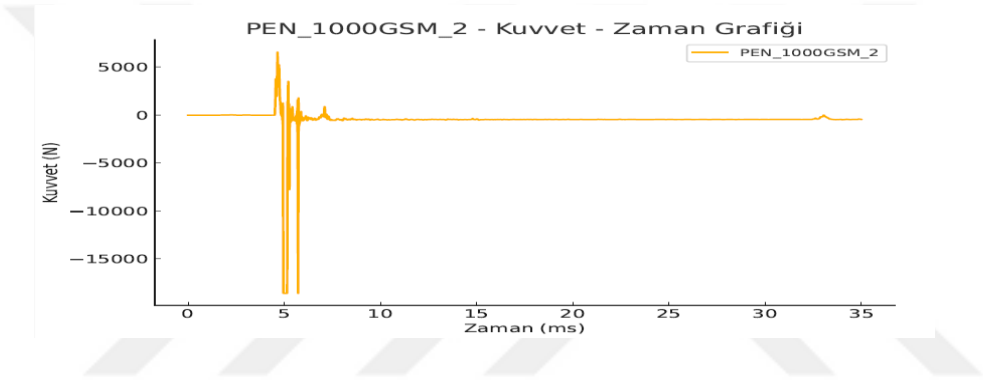
4.4.3 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

Bu bölümde 1000 g/m² yoğunluğunda keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyesine sahip sandviç yapıların yüksek hızlı darbe penetrasyon testi sonuçları sunulmaktadır.

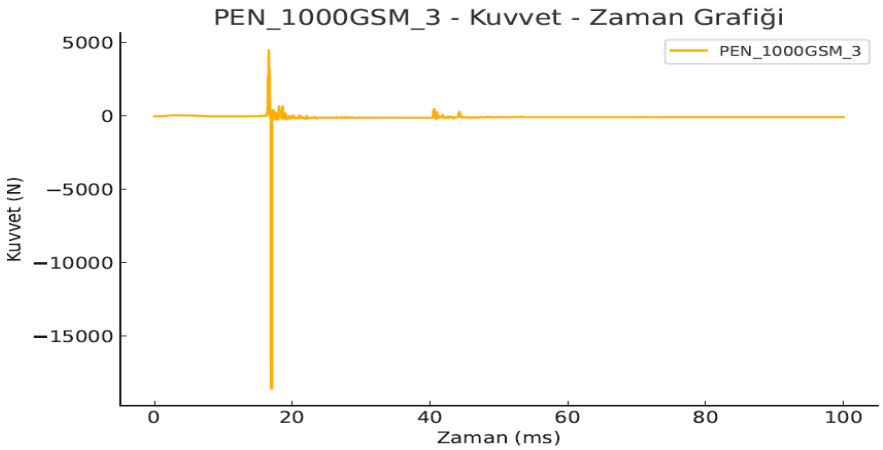
Çizelge 4.11 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	6572
2	4498
Ortalama	5535

Numunelerin darbe sırasındaki kuvvet-zaman eğrileri aşağıdaki grafikte sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde 1. numunede maksimum 6572 N kuvvet seviyesine ulaşılmış, 2. numunede ise maksimum kuvvet 4498 N olarak ölçülmüştür.



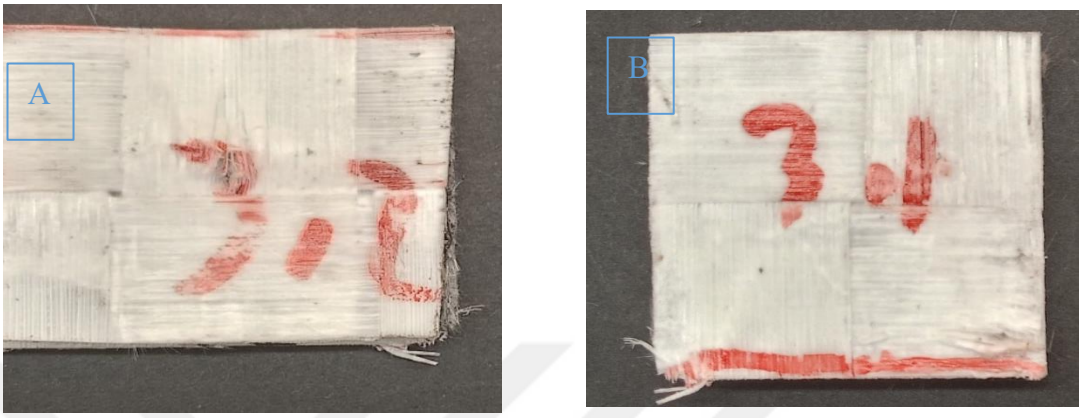
Şekil 4.24 1000 g/m² keçe çekirdekli numune 1 penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.



Şekil 4.25 1000 g/m² keçe çekirdekli numune 2 penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği

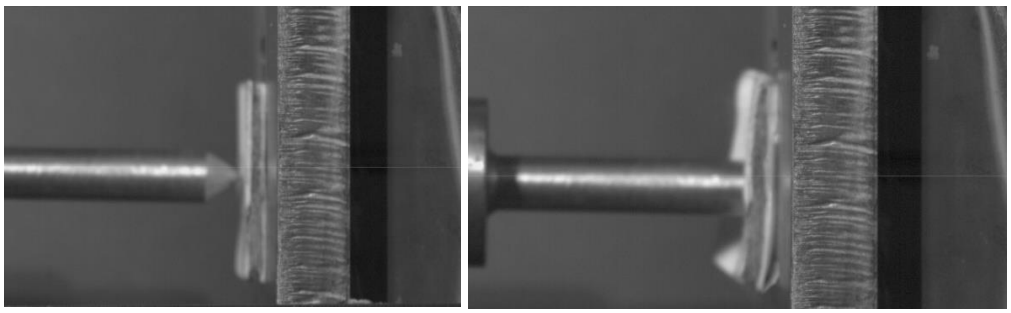
1000 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların penetrasyon testlerinde lokal darbe altındaki delinme dirençlerinin oldukça iyi seviyelerde olduğu görülmüştür. Maksimum kuvvet değerleri 4498–6572 N arasında

ölçülmüştür. Keçe çekirdeğin düşük yoğunluğuna rağmen, sürekli cam/PP yüzey takviyesinin önemli ölçüde katkı sağladığı, darbenin ilk yük transferini karşıladığı ve çekirdeğin göçme sınırına kadar yapının stabil kalmasını sağladığı gözlenmiştir.



Şekil 4.26 Numune 1 penetrasyon test sonra. A) Numunenin ön yüzey.
B) Numunenin arka yüzey.

Şekilde görüldüğü gibi, darbe ucunun yalnızca sivri uç kısmı ön yüzey plakayı penetre etmiş, keçe tabakası ve arka yüzey plaka ise herhangi bir hasar almamıştır.



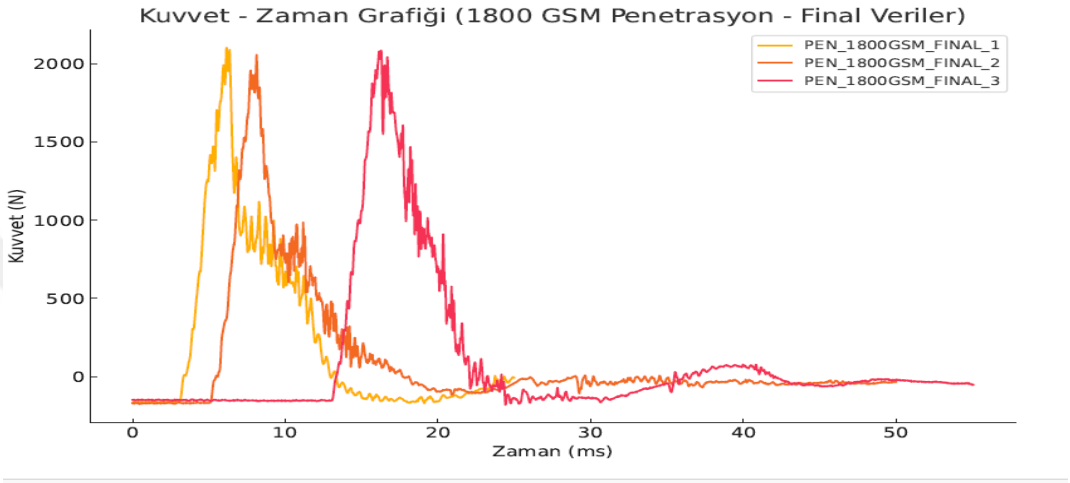
Şekil 4.27 1000 g/m² keçe çekirdekli penetrasyon test sandviç hızlı kamera görüntüsü.

4.4.4 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

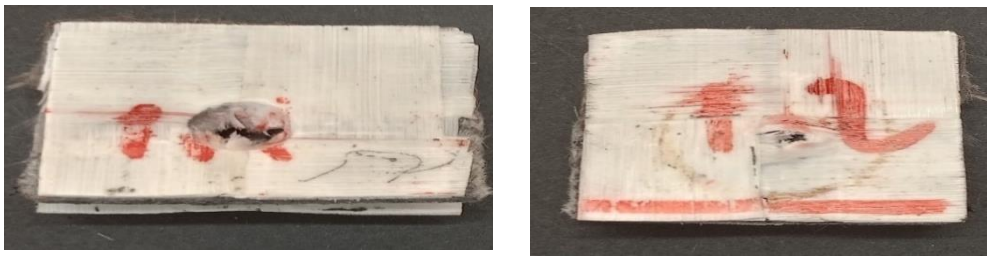
Bu bölümde 1800 g/m² yoğunluğundaki keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların penetrasyon testi sonuçlarının güncellenmiş ve düzeltilmiş verileri değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.121800 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	2102,347
2	2057,048
3	2085,244



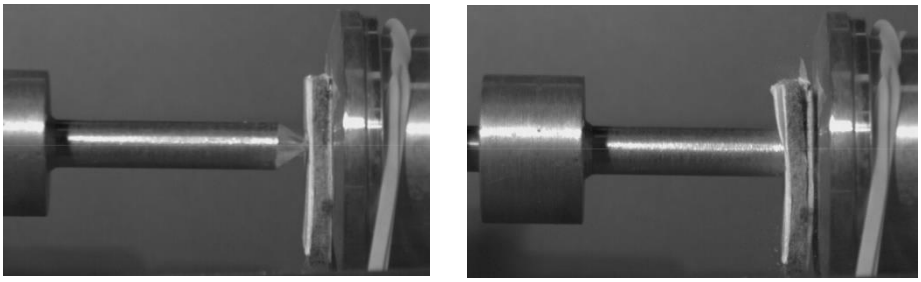
Şekil 4.28 1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.



Şekil 4.29 1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numune 1 penetrasyon testi sonrası.

1800 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların penetrasyon testlerinde yüksek ve tutarlı delinme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Maksimum kuvvet değerleri 2057–2102 N aralığında gerçekleşmiştir. Keçe çekirdek yoğunluğundaki artış, yapının lokal darbe altında deformasyon öncesi rijitliğini artırmıştır. Rijitlikteki bu artış sonucunda darbe ucu, ön yüzey plaka ve keçe çekirdeği

penetre edebilmiş; arka yüzey plakada ise şekilde görüldüğü üzere yalnızca sivri uç kısmı penetre edebilmiştir.



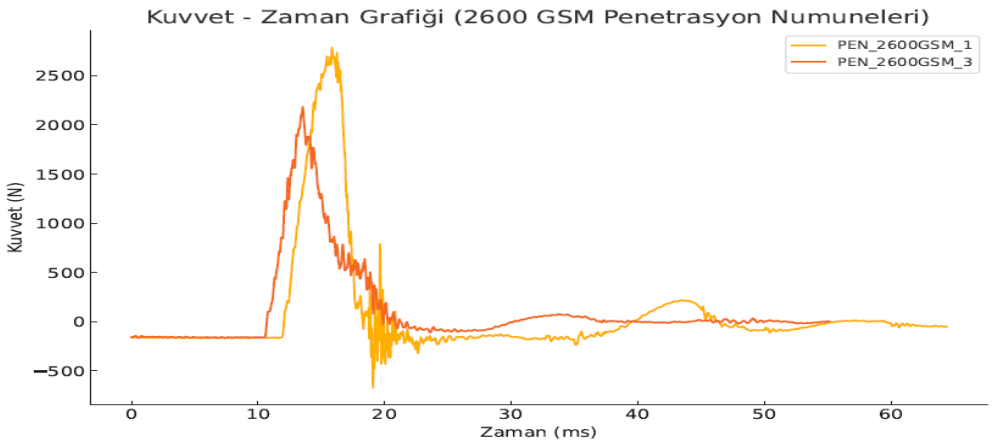
Şekil 4.30 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test hızlı kamera görüntüleri.

4.4.5 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

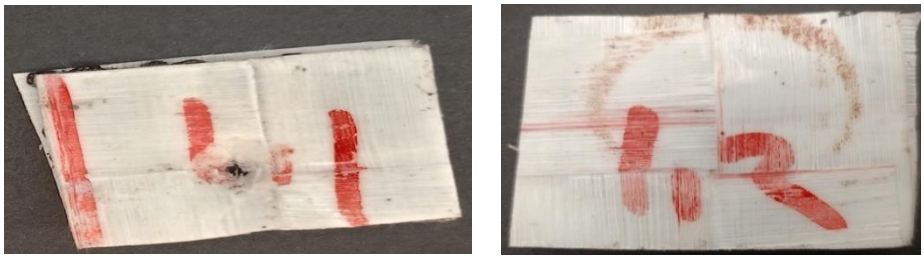
Bu bölümde keçe çekirdek yoğunluğu 2600 g/m² olan ve yüzey tabakalarında sürekli cam/PP takviyesi kullanılan sandviç yapıların yüksek hızlı darbe penetrasyon testlerinden elde edilen bulgular sunulmaktadır.

Çizelge 4.13 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	2788,784
3	2187,387
Ortalama	2488,086 N

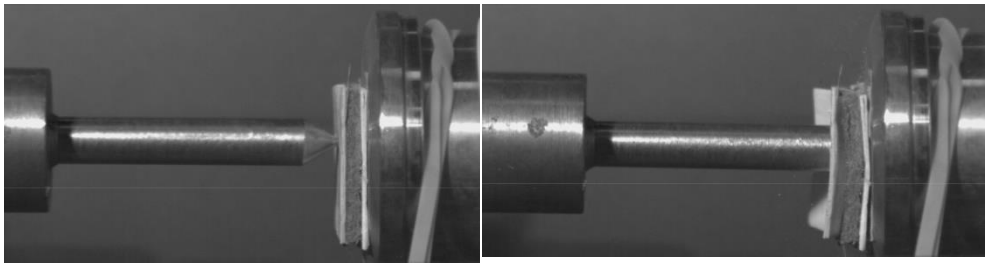


Şekil 4.31 2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği.



Şekil 4.32 2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numune 1 penetrasyon testi sonrası.

2600 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların penetrasyon testlerinden elde edilen veriler, keçe yoğunluğunun delinme dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Maksimum kuvvet değerleri 2187–2788 N aralığında ölçülmüş ve ortalama 2488 N değerine ulaşılmıştır. Daha yoğun keçe yapısının, darbe sırasında deformasyon enerjisinin daha geniş bir alana yayılmasına olanak sağladığı ve ani delinme yerine kademeli hasar mekanizmalarını aktive ettiği değerlendirilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, bu numunelerde darbe ucunun yalnızca sivri uç kısmı ön yüzey plaka ve keçe tabakasını penetre etmiş; arka yüzey plakada ise herhangi bir hasar oluşmamıştır. Tüm numunelerde benzer hasar davranışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.33 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç penetrasyon test hızlı kamera görüntüleri.

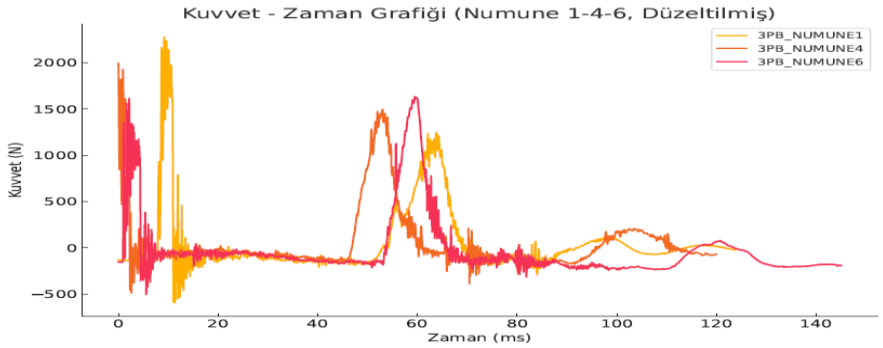
4.5 Yüksek Hızlı Darbe Üç Nokta Eğilme Testi

4.5.1 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç

Bu bölümde dairesel kesitli PP çekirdek ve cam/PP keçe takviyeli yüzey tabakalarından oluşan sandviç yapıların yüksek hızlı darbe altında üç nokta eğilme davranışı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.14 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE test sonuçları.

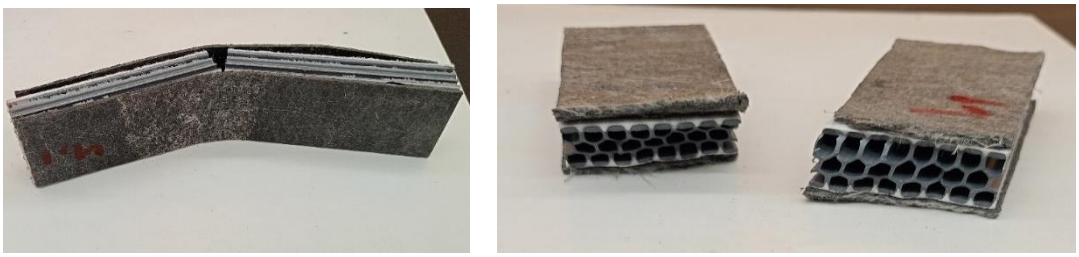
Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	2275,486
4	1994,582
6	1635,381
Ortalama	1968,483



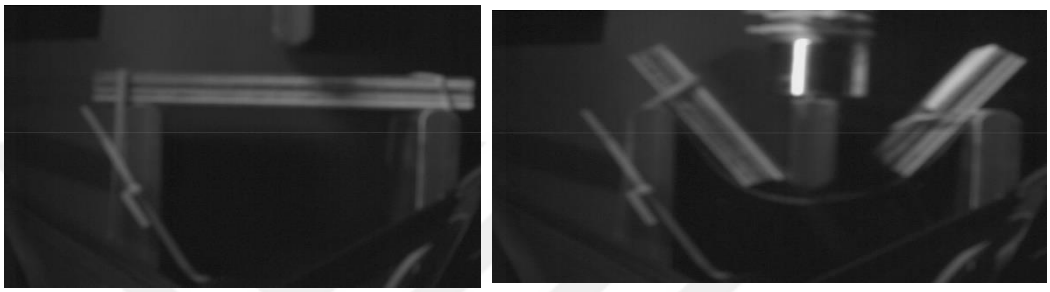
Şekil 4.34 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE Kuvvet-zaman grafiği.

Tüm numunelerde deformasyon sürecinin başlangıcında kuvvet artışının oldukça hızlı gerçekleştiği, ardından kısa sürede maksimum kuvvet seviyelerine ulaşıldığı ve deformasyon modlarının geliştiği gözlemlenmiştir. Göçme davranışı çoğunlukla ani kuvvet düşüşleriyle ilerlemiştir.

Dairesel kesitli cam/PP keçe takviyeli sandviç yapıların yüksek hızlı darbe eğilme testlerinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri 1635 N ile 2275 N arasında değişmiştir. Ölçümler dengeli ve sistematik sonuçlar ortaya koymuştur. Yapı, darbe yüklemesi altında yüksek deformasyon kapasitesi sergilerken, çekirdek göçmesi ve yüzey kırılmaları ana hasar modları olarak gözlenmiştir. Sürekli cam/PP yüzey takviyesi darbe enerjisinin yayılımını kontrol etmiş ve katmanlar arası ayrılma eğilimini sınırlamıştır.



Şekil 4.35 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç dinamik 3NE testten sonra numuneler.



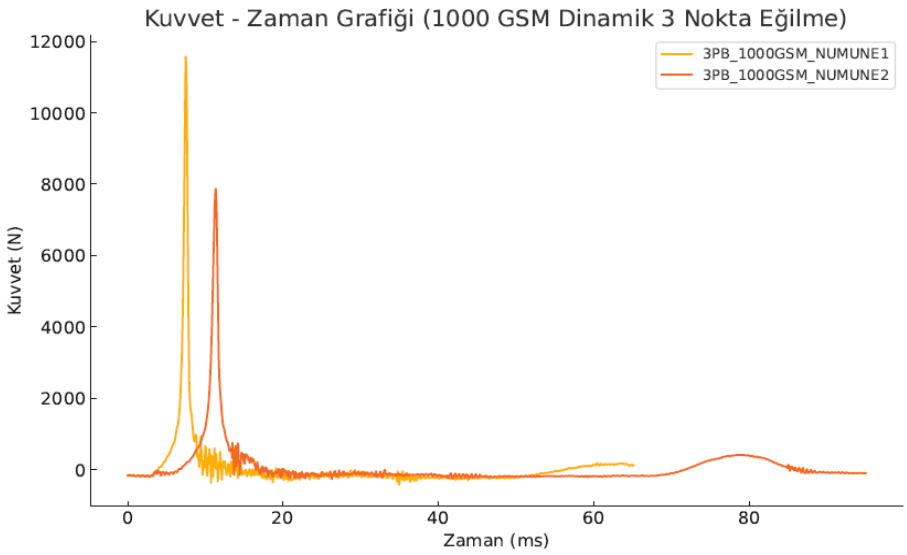
Şekil 4.36 Dairesel Kesitli Cam/PP Keçe Takviyeli Sandviç 3NE hızlı kamera görüntüsü.

4.5.2 1000 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

Bu bölümde keçe çekirdek yoğunluğu 1000 g/m² olan ve sürekli cam/PP yüzey takviyesi bulunan sandviç yapıların dinamik üç nokta eğilme testinden elde edilen bulgular sunulmaktadır.

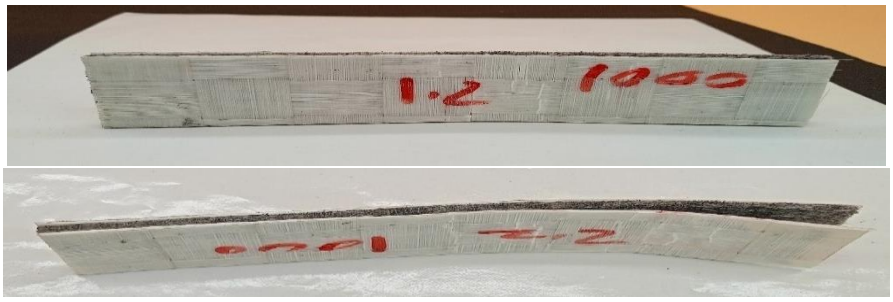
Çizelge 4.15 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
1	11574
2	7862
Ortalama	9718

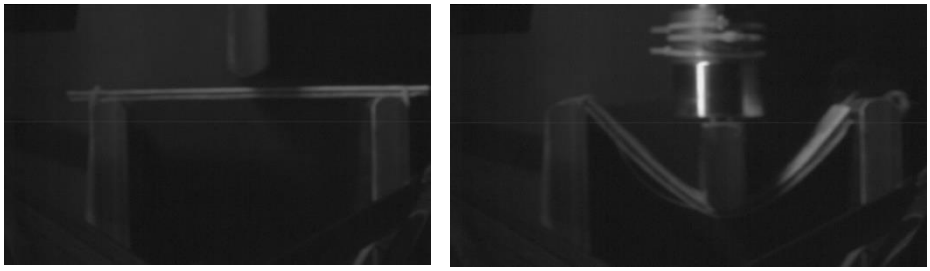


Şekil 4.37 1000 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.

1000 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların yüksek hızlı darbe eğilme testlerinde yüksek taşıma kapasitesi ve rijitlik sergilediği belirlenmiştir. Maksimum kuvvet değerleri 7862 N ile 11574 N arasında değişmiştir. Özellikle ilk numunede oldukça yüksek kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. Deformasyon sırasında çekirdeğin göçme sınırına ulaşmadan önce yüzey takviyesinin önemli ölçüde yük sönümleme görevini üstlendiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.38 1000 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.



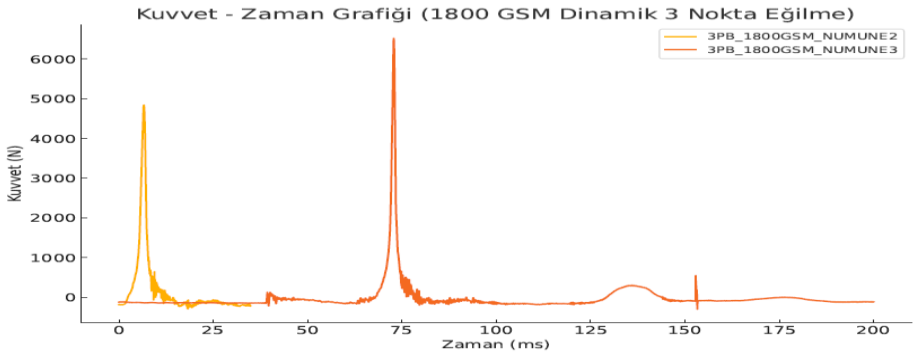
Şekil4.39 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test hızlı kamera görüntüleri.

4.5.3 1800 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

Bu bölümde keçe çekirdek yoğunluğu 1800 g/m² olan ve sürekli cam/PP yüzey takviyesi içeren sandviç yapıların yüksek hızlı darbe üç nokta eğilme testinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Keçe yoğunluğunun artışına bağlı olarak dinamik deformasyon karakteristikleri incelenmiştir.

Çizelge 4.16 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
2	4843
3	6523
Ortalama	**5683**



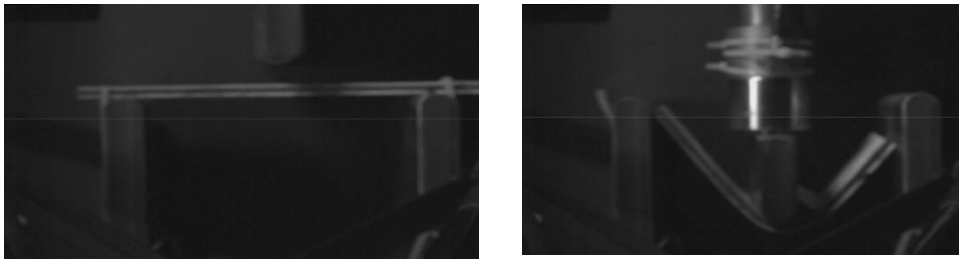
Şekil 4.40 1800 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.

Numunelerin darbe sırasında kaydedilen kuvvet-zaman eğrileri aşağıdaki grafikte sunulmuştur. Numune 3 6523 N ile daha yüksek maksimum kuvvete ulaşırken, numune2 4843 N seviyesinde kalmıştır. Kuvvet artış hızlarının her iki numunede de yüksek olduğu, darbenin deformasyon öncesi rijit karşılık oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.41 1800 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.

1800 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların yüksek hızlı darbe üç nokta eğilme testlerinde, maksimum kuvvet değerleri 4843–6523 N aralığında elde edilmiştir. Keçe yoğunluğunun artışı deformasyon sırasında sistemin rijitliğini artırmış ve daha yüksek kuvvetlere ulaşmasını sağlamıştır.



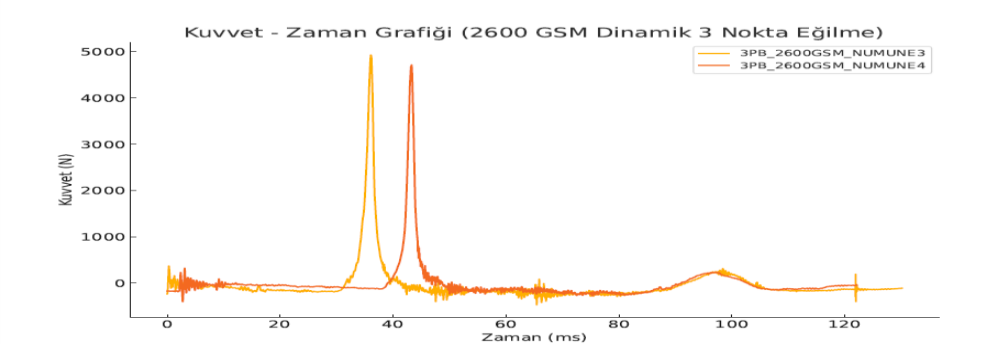
Şekil4.42 1800 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test hızlı kamera görüntüleri.

4.5.4 2600 g/m² Keçe Çekirdekli Sandviç

Bu bölümde keçe çekirdek yoğunluğu 2600 g/m² olan ve sürekli cam/PP yüzey takviyesi içeren sandviç yapıların yüksek hızlı darbe üç nokta eğilme testinden elde edilen bulgular değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.17 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test sonuçları.

Numune	Maksimum Kuvvet (N)
3	4928
4	4713
Ortalama	4820,5



Şekil 4.43 2600 g/m² keçe çekirdekli tüm numunelerin dinamik 3NE testi kuvvet-zaman grafiği.



Şekil 4.44 2600 g/m² keçe çekirdekli numuneler testten sonra.

2600 g/m² keçe çekirdekli ve sürekli cam/PP yüzey takviyeli sandviç yapıların yüksek hızlı darbe eğilme testlerinde maksimum kuvvet değerleri 4712–4927 N aralığında elde edilmiştir. Keçe yoğunluğundaki artış sistemin rijitliğini artırmış, deformasyon sırasında çekirdeğin ani ezilme yerine kademeli enerji absorpsiyonuna imkân tanımıştır. Yüksek keçe yoğunluğu dinamik deformasyon altında daha kararlı ve stabil davranış geliştirmiştir.



Şekil4.45 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç dinamik 3NE test hızlı kamera görüntüleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında cam/PP esaslı termoplastik kompozit sandviç yapıların farklı takviye türleri ve çekirdek yoğunlukları altında hem statik hem de dinamik yükleme koşullarındaki mekanik davranışları detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sandviç yapı tasarımında çekirdek ve yüzey kombinasyonlarının performans üzerindeki karmaşık etkilerini ortaya koymuştur.

Çizelge 5.1 Çekme Testleri Karşılaştırması.

Yapı Konfigürasyonu	Maksimum Çekme Girilmesi (MPa)
SET Cam/PP Dokuma	42,13
Keçe Takviyeli 0° Lif Yönü	5,13
Keçe Takviyeli 90° Lif Yönü	6,34

Çekme testleri sonuçları incelendiğinde sürekli cam/PP dokuma takviyeli yapıların keçe takviyelilere kıyasla açık ara daha yüksek dayanım ve rijitlik sergilediği gözlemlenmiştir. Keçe takviyeli numunelerde 90° lif yönünde matris özelliklerinin daha belirleyici olduğu ve dayanımın nispeten düşük seyrettiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.2 Statik Üç nokta eğilme testleri karşılaştırması.

Yapı Konfigürasyonu	Maksimum Eğilme Girilmesi (MPa)
Dairesel Çekirdek + Keçe Takviyeli	22,01
Takviyesiz Dairesel Çekirdek	20,27
1000 g/m² Keçe Çekirdekli	17,89
1800 g/m² Keçe Çekirdekli	19,53
2600 g/m² Keçe Çekirdekli	30,16

Eğilme testleri sonuçlarında ise 2600 g/m² keçe çekirdekli sandviç yapı en yüksek eğilme dayanımına ulaşmıştır. Keçe yoğunluğunun artışıyla eğilme rijitliğinde artış sağlanmakla birlikte deformasyon kapasitesinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Özellikle yüksek yoğunlukta deformasyon modlarının sertleşerek ani ezilme modlarına kaydığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.3 Penetrasyon test karşılaştırması.

Yapı Konfigürasyonu	Ortalama Maks. Kuvvet (N)
Dairesel Cam/PP Keçe Takviyeli	2428.12
1000 g/m² Keçe Çekirdekli	5535.00
1800 g/m² Keçe Çekirdekli (Final)	2081.55
2600 g/m² Keçe Çekirdekli	2488.09

En dengeli performans, 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç yapı konfigürasyonunda elde edilmiştir. Keçe yoğunluğunun artışıyla beklenen delinme direncinin doğrusal olarak yükselmediği, hatta bazı durumlarda deformasyonun ani göçme modlarına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Sürekli cam/PP yüzey takviyesinin darbe enerjisini sönümleme kapasitesi özellikle düşük yoğunluklu çekirdek yapı ile daha etkili olmuştur.

Çizelge 5.4 Dinamik üç nokta eğilme testleri karşılaştırması.

Yapı Konfigürasyonu	Ortalama Maks. Kuvvet (N)
Dairesel Cam/PP Keçe Takviyeli	1968.48
1000 g/m² Keçe Çekirdekli	9718.20
1800 g/m² Keçe Çekirdekli	5683.44
2600 g/m² Keçe Çekirdekli	4820.44

Dinamik eğilme testlerinde 1000 g/m² keçe çekirdekli sandviç yapı en yüksek darbe taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Keçe yoğunluğu arttıkça sistemin rijitliği artmış, fakat darbe yükleri altındaki taşıma kapasitesi lineer olarak yükselmemiştir. 1800 ve 2600 g/m² yoğunluklarda deformasyonun daha sertleştiği ve çekirdeğin göçme modlarının daha ani gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Genel olarak bu çalışmadan elde edilen bulgular, keçe çekirdek yoğunluğu ve yüzey takviyesinin sandviç yapıların mekanik performansı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. 1000 g/m² keçe çekirdek yoğunluğu, tüm sistem kombinasyonları içerisinde optimum mekanik performansı sağlayarak rijitlik ve deformasyon kontrolünü dengeli bir şekilde sunmuştur. Sürekli cam/PP yüzey takviyesi, tüm yükleme koşullarında sistemin hasar toleransını ve taşıma kapasitesini anlamlı düzeyde artırmıştır. Keçe yoğunluğundaki

aşırı artış ise rijitlik kazancı sağlamasına karşın, darbe deformasyonu sırasında ani göçme modlarının oluşumunu kolaylaştırmıştır. Sistemlerinde sandviç yapı sistemlerinde çekirdek yoğunluğu ile yüzey takviye oranının dengeli bir şekilde optimize edilmesi, tasarım performansı açısından kritik bir faktör olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Åkermo, M., & Åström, B. T. (1999). Experimental Investigation of Compression Molding of Glass/PP-PP Foam Core Sandwich Components. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *12*(4), 297–316. https://doi.org/10.1177/089270579901200404

Alongi, J., Han, Z., & Bourbigot, S. (2015). Intumescence: Tradition versus novelty. A comprehensive review. *Progress in Polymer Science*, *51*, 28–73. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2015.04.010

Ashik, K. P., & Sharma, R. S. (2015). A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, *03*(05), 420–426. https://doi.org/10.4236/jmmce.2015.35044

Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2014). Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *27*(1), 52–81. https://doi.org/10.1177/0892705712439571

Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2004). Creep and impact properties of wood fibre–polypropylene composites: influence of temperature and moisture content. *Composites Science and Technology*, *64*(5), 693–700. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00291-4

Chen, J., Xue, J., Meng, Y., Liu, L., Peng, J., Han, R., Zhang, J., & Yang, Y. (2024). Glass/hot-meltable/aramid fiber wet-laid felts: The influence of manufacturing treatment on acoustics, mechanical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, *96*, 110677. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110677

Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43*(8), 1419–1429. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2011.11.019

Friedrich, K., & Almajid, A. A. (2013a). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, *20*(2), 107–128. https://doi.org/10.1007/S10443-012-9258-7/FIGURES/32

Friedrich, K., & Almajid, A. A. (2013b). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, *20*(2), 107–128. https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7

Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, *39*(6), 933–961. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2008.01.002

George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering and Science*, *41*(9), 1471–1485. https://doi.org/10.1002/PEN.10846;CTYPE:STRING:JOURNAL

Hasan, M. M. B., Overberg, M., Lang, T. G., Abdkader, A., & Cherif, C. (2024). Tensile and impact properties of thermoplastic fibre hybrid composites based on air textured commingling hybrid yarns composed of carbon/aramid/polyamide 6 and carbon/glass/polyamide 6 filament yarns. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. https://doi.org/10.1177/08927057241255880

Hu, J., Zhang, J., Han, R., & Yang, Y. (2022). Correlation between glass fiber suspension characteristics and physical of glass fiber felt: Role of beating time and speed. *Journal of Industrial Textiles*, *51*(1), 1528S-1541S. https://doi.org/10.1177/15280837221076575/ASSET/5251CF16-260E-4BC5-948A-6E5F772B40F7/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_15280837221076575-FIG11.JPG

Karsli, N. G., & Aytac, A. (2011). Effects of maleated polypropylene on the morphology, thermal and mechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials & Design*, *32*(7), 4069–4073. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.03.021

Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of Composite Materials*. https://doi.org/10.1201/9781420058291

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites : Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition*. https://doi.org/10.1201/9781420005981

Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, *72*, 61–99. https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2015.01.004

Overberg, M., Badrul Hasan, M. M., Abdkader, A., Rehra, J., Schmeer, S., & Cherif, C. (2024). Investigations on the development of impact-resistant thermoplastic fibre hybrid composites from glass and steel fibre. *Journal of Composite Materials*, *58*(14), 1675–1687. https://doi.org/10.1177/00219983241246128

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *83*, 98–112. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2015.08.038

Qiao, Y., Fring, L. D., Pallaka, M. R., & Simmons, K. L. (2023a). A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites. *Polymer Composites*, *44*(2), 694–733. https://doi.org/10.1002/PC.27139

Qiao, Y., Fring, L. D., Pallaka, M. R., & Simmons, K. L. (2023b). A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites. *Polymer Composites*, *44*(2), 694–733. https://doi.org/10.1002/PC.27139

Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3721*, *13*(21), 3721. https://doi.org/10.3390/POLYM13213721

Thwe, M. M., & Liao, K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Science and Technology*, *63*(3–4), 375–387. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00225-7

Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, *63*(9), 1259–1264. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4

Wang, F., Yu, J., Liang, X., Lu, S., Zhao, C., Liu, Z., & Liu, L. (2020). The influence of high temperature treatment on morphology and performance of superfine glass fiber

felts. *Textile Research Journal*, *90*(19–20), 2292–2303. https://doi.org/10.1177/0040517520915541

Yang, B., Lu, L., Liu, X., Xie, Y., Li, J., & Tang, Y. (2017). Uniaxial tensile and impact investigation of carbon-fabric/polycarbonate composites with different weave tow widths. *Materials and Design*, *131*, 470–480. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.048

Zhou, Y., He, W., Wu, Y., Xu, D., Chen, X., He, M., & Guo, J. (2019). Influence of thermo-oxidative aging on flame retardancy, thermal stability, and mechanical properties of long glass fiber–reinforced polypropylene composites filled with organic montmorillonite and intumescent flame retardant. *Journal of Fire Sciences*, *37*(2), 176–189. https://doi.org/10.1177/0734904119833014/ASSET/B912CF19-0ECF-4D3D-8621-2E3D951B2652/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_0734904119833014-FIG7.JPG