FARKLI KOMPOZİT YÜZEY PLAKALI ONDÜLA ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇ YAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ VE ANLIK DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Burak ÖZEROL

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KOMPOZİT YÜZEY PLAKALI ONDÜLA ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇ YAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ VE ANLIK DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Burak ÖZEROL
0009-0003-7447-9691

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI KOMPOZİT YÜZEY PLAKALI ONDÜLA ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇ YAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ VE ANLIK DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Burak ÖZEROL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Kompozit malzemeler, üstün mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde havacılık, mimari, otomotiv ve savunma sanayii gibi pek çok sektörde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Çeşitli elyaflarla takviye edilen bu malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün performans göstermekte ve bu nedenle sandviç yapıların yüzey plakaları için ideal bir tercih oluşturmaktadır. Bu çalışmada, alüminyumdan üretilmiş çift yönlü oluklu şerit çekirdek yapılar tasarlanmış ve bu yapılar, noktasal darbelere karşı dayanımı artırmak amacıyla kompozit plakalarla sandviç yapı haline getirilmiştir. Yüzey plakaları, cam, karbon ve kevlar elyaf kumaşların vakum infüzyon yöntemiyle epoksi reçine emdirilmesi yoluyla üretilmiştir. Farklı fiber türlerinden üretilmiş yüzey plakalarına sahip sandviç yapılar, dinamik üç nokta eğilme testine ve sivri uçlu bir darbe başlığı kullanılarak noktasal delme testlerine tabi tutulmuştur. Bu testlerde her bir yapının delinme direnci ve enerji sönümleme kapasitesi analiz edilmiştir. Test sırasında çekirdek yapıda oluşan burkulma davranışları, yüzey plakalarının rijitliği ve elastisite özellikleriyle yakından ilişkilendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen sandviç yapıların batarya kutuları ve yakıt tankerleri gibi noktasal darbelere karşı dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulan uygulamalarda potansiyel bir alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sandviç malzeme, kompozit malzeme, delme testi, penetrasyon, ani darbe, üç nokta eğilme testi.

2025, xiv + 50 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DEVELOPMENT OF SANDWICH STRUCTURES WITH DIFFERENT COMPOSITE SURFACE PLATES AND INVESTIGATION OF THEIR BEHAVIOR UNDER INSTANT IMPACT LOADS

Burak ÖZEROL

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

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Composite materials find a wide range of applications in many sectors such as aviation, architecture, automotive and defense industry due to their superior mechanical and physical properties. These materials, reinforced with various fibers, show superior performance compared to traditional materials and therefore constitute an ideal choice for surface plates of sandwich structures. In this study, double-sided corrugated strip core structures made of aluminum were designed and these structures were made into sandwich structures with composite plates in order to increase resistance against point impacts. Surface plates were produced by impregnating glass, carbon and Kevlar fiber fabrics with epoxy resin by vacuum infusion method. Sandwich structures with surface plates made of different fiber types were subjected to dynamic three-point bending test and point puncture tests using a pointed impact head. In these tests, the puncture resistance and energy absorption capacity of each structure were analyzed. The buckling behaviors occurring in the core structure during the test were closely related to the rigidity and elasticity properties of the surface plates. The results obtained reveal that the developed sandwich structures can be used as a potential alternative in applications requiring materials resistant to point impacts, such as battery boxes and fuel tankers.

Keywords: Sandwich material, composite material, penetration, impact, three point bending test.

2025, xiv + 50 pages.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmamın hazırlanması süresince başta ailem olmak üzere yardım, destek ve yönlendirmelerini esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Murat YAZICI ve Sn. Dr. Ögr. Üy. Hakkı ÖZER' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Tübitak-Teydeb-1505 programı tarafından desteklenen 5220143 nolu proje kapsamında gerçekleşmiştir. Ayrıca ondülasyonlu sac ve Alüminyum malzemeler ERBAB Otomat Yedek Parça San. Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır. TÜBİTAK ve Erbab Ltd. Şti' ye teşekkürlerimi sunarım.

Burak ÖZEROL
…/…/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER 4
2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER 5
2.3. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ 9
2.4. SANDVİÇ PANEL 17
3. MATERYAL ve YÖNTEM 20
3.1. SANDVİÇ PANEL ÜRETİMİ 20
3.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU 27
3.3. ÜÇ NOKTA EĞİLME (DİNAMİK) TESTİ 29
3.4. PENETRASYON TESTİ 30
4. BULGULAR 31
4.1. MALZEMELERİN TEKNİK VERİLERİ 31
4.2. ÜÇ NOKTA EĞİLME (DİNAMİK) TEST SONUÇLARI 32
4.3. PENETRASYON TEST SONUÇLARI 39
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 46
KAYNAKLAR 47
ÖZGEÇMİŞ 51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E_1	Tek kat boyuna modül
E_2	Tek kat enine modül
v_f	Lif hacim oranı
v_m	Matris hacim oranı
E_f	Lif elastisite modülü
E_m	Matris elastisite modülü
σ_1	Tek kat boyuna dayanım
σ_f	Tek kat boyuna dayanım
σ_m	Matris dayanımı
E_x	Katman modülü
σ_U	Katman nihai dayanım
P_{max}	Katman nihai dayanım
A	Numune kesit alanı
E	Soğurulan enerji
δ_{max}	Deney sırasında ulaşılan max yer değiştirme
$F(\delta)$	Yer değiştirme anındaki yük

Kısaltmalar	Açıklama
Bi-CSC	Bi Corrugated Steel Core
FE	Finite Element
3D	Three Dimensional
CT	Computed Tomography
PMC	Polymer Matris Composites
MMC	Metal Matris Composites
CMC	Ceramic Matris Composites
CCC	Carbon Matris Composites
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
AFRP	Aramid Fibre Reinforced Polymer
GF	Glass Fiber
RTM	Resin Transfer Moulding
ASP	Alüminum Sandwich Panel
GFSP	Glass Fiber Sandwich Panel
KSP	Kevlar Sandwich Panel
CFSP	Carbon Fiber Sandwich Panel
ASTM	American Society for Testing and Materials

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Kompozitlerin matris ve takviye malzemeye göre sınıflandırılması	5
Şekil 2.2.	Üretilen CFRP, AFRP ve GFRP plakalar	6
Şekil 2.3.	Elle yatırma yöntemi	9
Şekil 2.4.	Püskürtme yöntemi	10
Şekil 2.5.	Filament winding yöntemi	11
Şekil 2.6.	Vakum infüzyon yöntemi	12
Şekil 2.7.	Pultrüzyon yöntemi	13
Şekil 2.8.	Sıkıştırma kalıplama yöntemi	14
Şekil 2.9.	Vakum kalıplama yöntemi	15
Şekil 2.10.	Otoklav fırında kalıplama	16
Şekil 2.11.	Sandviç panelin elemanları	18
Şekil 2.12.	Sandviç panel çekirdek yapılarının sınıflandırılması	18
Şekil 2.13.	Çeşitli sandviç yapılar için ortak arıza modları	19
Şekil 3.1.	Çift yönlü oluklu sandviç panel üretim aşamaları	20
Şekil 3.2.	Çekirdek yapısının elemanları	21
Şekil 3.3.	Çekirdek yapısının örülmüş hali	21
Şekil 3.4.	Reçine transfer metodunun uygulama aşamaları	23
Şekil 3.5.	Üretilen cam fiber plaka	24
Şekil 3.6.	Üretilen cam fiber plakanın uygun boyutlarda kesilmesi	25
Şekil 3.7.	Üç nokta eğilme testleri için üretilen sandviç paneller	26
Şekil 3.8	Üç nokta eğilme dinamik test düzeneği	29
Şekil 3.9.	Penetrasyon test düzeneği şeması	30
Şekil 4.1.	ASP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri	32
Şekil 4.2.	ASP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri	32
Şekil 4.3.	GFSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri	33
Şekil 4.4.	GFSP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri	34
Şekil 4.5.	CFSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri	35
Şekil 4.6.	CFSP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri	35
Şekil 4.7.	KSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri	36
Şekil 4.8.	KSP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri	36
Şekil 4.9.	Üç nokta eğilme testi dinamik kuvvet-uzama grafiği	37
Şekil 4.10.	Üç nokta eğilme testi dinamik testi enerji grafiği	38
Şekil 4.11.	ASP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri	39
Şekil 4.12.	ASP’ nin penetrasyon test sonrası görüntüleri	39
Şekil 4.13.	GFSP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri	40
Şekil 4.14.	ASP’ nin penetrasyon test sonrası görüntüleri	41
Şekil 4.15	CFSP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri	42
Şekil 4.16.	CFSP’ nin penetrasyon test sonrası görüntüleri	42
Şekil 4.17.	KSP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri	43
Şekil 4.18	KSP’ nin penetrasyon test sonrası görüntüleri	43
Şekil 4.19.	Penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği	44
Şekil 4.20.	Penetrasyon testi enerji grafiği	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Polimer Matrisli Kompozitlerin Elyaf Türüne Göre Sınıflandırılması	6
Çizelge	2.2.	Cam Elyaf Sınıflandırması ve Fiziksel Özellikleri	7
Çizelge	3.1.	Fiber Kumaşların Teknik Özellikleri	22
Çizelge	3.2.	Testler İçin Hazırlanacak Sandviç Panel Numune Sayıları ve Boyutları	22
Çizelge	3.3.	Testler İçin Hazırlanacak Sandviç Panel Numune Ağırlıkları	25
Çizelge	4.1.	Yüzey plakalarının teorik hesaplamalar sonucu elde edilen teknik verileri	33

1. GİRİŞ

Sandviç panel, kalın ve düşük yoğunluklu bir çekirdeğe bağlanmış iki ince ve sert yüzey levhasından oluşan bir kompozit yapıdır. Çekirdek malzemesi olarak bal peteği veya farklı tiplerde köpükler kullanılabilir. Yüzey levhası olarak ise metal veya fiber takviyeli polimer laminantlar kullanılabilir. Yüzey levhalarının çekirdek tarafından ayrılması sandviç panelin ataletini, eğilme ve kesme sertliğini artırır. Yapının bütün ağırlığında küçük bir artışla eğilme ve burkulma yüklerine direnmek için verimli bir yapı üretilmiş olur. Üstün sertlik-hafiflik özellikleri sayesinde sandviç paneller havacılık, inşaat ve otomotiv alanlarında en sık tercih edilen yapılardan biridir.

Bu çalışmada sandviç panel çekirdek malzemesi olarak çift yönlü oluklu alüminyum çekirdek malzeme kullanılmıştır. Yüzey levhalarında ise alüminyum, cam fiber, aramid fiber ve karbon fiber takviyeli polimer laminantlar tercih edilmiştir. Üretilen laminantlar test standartlarına uygun boyutlarda kesilmiş ve çekirdek yapı ile birleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı yüzey plakalarına sahip sandviç panellerin dinamik üç nokta eğilme ve penetrasyon testleri yapılmıştır. Testlerden önce yüzey plakalarının ve çekirdek malzemenin karakterizasyonu için teorik hesaplama yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürde yapılan benzer çalışmalardan bahsedilmiştir. Daha sonra kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde sandviç panellerin üretimi ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde sandviç panellere uygulanan testlere yer verilmiştir. Son bölümde ise deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Leekitwattana, Boyd ve Shenoi, çift yönlü çelik oluklu çekirdekli (Bi-CSC) sandviç yapı için alternatif bir tasarım önermiş ve kuvvet-çarpılma ilişkisi ile modifiye edilmiş sertlik yaklaşımının birleşimine dayanan analitik bir yöntemin çerçevesini sunmayı hedeflemiştir. Bu yöntemde, söz konusu sandviç yapı tipinin enine kesme rijitliğini modellemek üzere matris esaslı bir yaklaşım kullanılmıştır. Elde edilen çözüm sonuçları, üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar (FE) analizleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Önerilen çekirdeğin performansı, benzer çekirdek yapılarıyla kıyaslandığında Bi-CSC' nin enine kayma rijitliği açısından en verimli çekirdek topolojisi olduğu sonucuna varılmıştır. (Leekitwattana vd., 2011)

Rong, Liu, Luo ve He, çeşitli çekirdek şekillerine sahip oluklu sandviç panellerin düzlemsel basınç kapasitesini ve düşük hızlı yerel darbe davranışını incelemiştir. İlk aşamada aynı ağırlık, boyut ve malzemeden oluşan, farklı oluklu çekirdeklere sahip beş sandviç panel türü tanımlanmıştır. Ardından bu beş tip panelin düşük hızlı yerel darbe altındaki tepkileri ile düzlemsel basınç performansı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan testler, oluklu çekirdeklerin geometrik özelliklerinin sandviç panellerin düzlemsel sıkıştırma altındaki performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca sinüzoidal ve yay şeklinde çekirdek kullanılan panellerin düzlem dışı sertliklerinin oldukça düşük olduğu ve düzlemsel basınç altında plastik deformasyona daha yatkın oldukları tespit edilmiştir. (Rong vd., 2018)

Pan ve çalışma arkadaşları, oluklu mukavvanın kesiştiği yeni bir termoplastik kompozit sandviç paneli, basit ama etkili bir oluk açma ve kilitleme yaklaşımı kullanarak üretmişlerdir. Ağırlık düşürme testleri ve sonlu elemanlar analiziyle panelin düşük hız darbe davranışı incelenmiş oluşan hasar mekanizmaları ve yük taşıma kapasitesi hem ileri hem de geri darbe senaryolarında standart oluklu sandviç panellerle karşılaştırılmıştır. Numunelerin darbe merkez bölgesindeki hasarları, bilgisayarlı tomografi (CT) taramasıyla analiz edilerek yeniden yapılandırılmıştır. Elde edilen bulgular, kesişen oluklu çekirdek tasarımının düşük hızlı darbe yüklerine karşı direnci daha da artırabileceğini göstermektedir. (Pan vd., 2023)

Qin ve çalışma arkadaşları, farklı konumlara bağlı olarak yük, yer değiştirme ve hasar davranışlarının anlamlı biçimde çeşitlilik gösterdiğini çeşitli oluklu sandviç yüzey levhalarını incelediklerinde tutarlı bir şekilde rapor etmişlerdir. Dinamik koşullarda darbe noktasının oluklu levhanın mekanik tepkisi üzerinde belirgin bir etki yarattığı açıkça görülmüştür. Analizlere göre, yeni tasarlanan oluklu sandviç yapı darbe altındaki orijinal trapez oluklu sandviç yapıda ortaya çıkan dengesiz kuvvet dağılımını gidermiştir. Bunun yanı sıra daha kararlı mekanik özelliklere ve tasarım esnekliğine sahip olan bu yapının havacılık, denizcilik ve uzay uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur. (Qin vd., 2023)

Atilla Yolcu ve Okutan Baba, kavisli sandviç panellerin darbe performansını, düzlem dışı kiral yardımcı çekirdekler ve E-cam elyaf-epoksi kompozit dış yüzeyler bağlamında incelemişlerdir. Bu kapsamda, farklı panel eğrilik yarıçapları, kiral yardımcı çekirdek tasarımları ve çeşitli darbe enerjilerinin sandviç paneller üzerindeki etkisi, geniş kapsamlı ve karşılaştırmalı deneysel çalışmalar yoluyla araştırılmıştır. Elde edilen bulguların panellerin delinme sürecini ayrıntılı biçimde ele almak ve birçok parametrenin etkisindeki darbe olayını daha iyi anlamak için önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, bu verilerin ilgili teorik modellere girdi sağlamasının yanı sıra optimizasyon çalışmalarında da yararlı olacağı düşünülmektedir. (Atilla Yolcu & Okutan Baba, 2024)

Al Ali, Arhore, Ghasemnejad ve Yasaee, belirli bir düşme yüksekliği altında darbe yüküne maruz kalan çok katmanlı sandviç panel yapıların farklı konfigürasyonlarına odaklanmıştır. Bu doğrultuda çeşitli düzenlemelerin performansı hem deneysel hem de sayısal analizler kullanılarak irdelenmiştir. Sayısal modeller üzerinden yapının enerji sönümleme kapasitesini ve bu konudaki davranışını daha kapsamlı biçimde anlamak amacıyla çok katmanlı sandviç kompozitlerin performansını doğru, düşük maliyetli ve verimli şekilde değerlendirebilecek yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. (Al Ali vd., 2024)

2.1. KOMPOZİT MALZEMELER

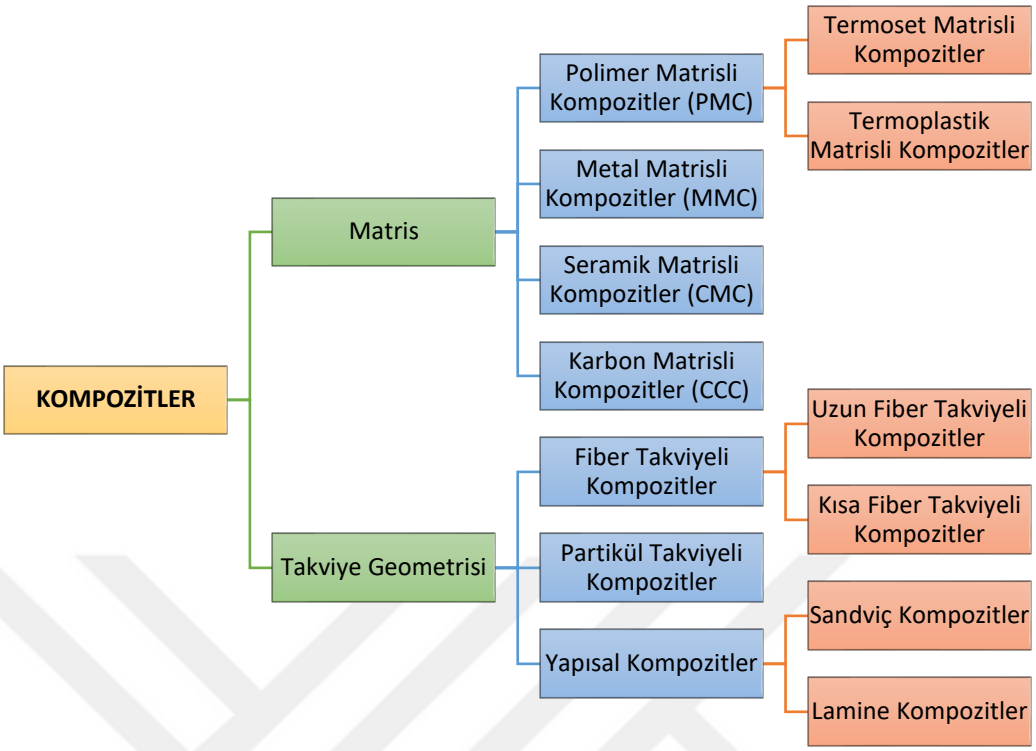
Kompozit malzemeler farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, bileşenlerinin bireysel özelliklerinden daha iyi performans sunmak üzere tasarlanır. Kompozit malzemeler genellikle matris, takviye ve dolgu olmak üzere üç temel bileşenden oluşur.

Matris: Kompozit malzemelerde matris, takviye elemanlarını bir arada tutan ve dış yüklerin takviye elemanlarına iletilmesini sağlayan sürekli fazdır. Matris malzemesi kompozitin şekillendirilmesine yardımcı olur ve çevresel etkilere karşı koruma sağlar. Genellikle polimer, metal veya seramik bazlı malzemeler matris olarak kullanılır. (Mallick, 2007)

Takviye: Takviye bileşeni, kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla matris içinde dağıtılan ve genellikle elyaf, partikül veya tabaka formunda bulunan malzemelerdir. Takviye elemanları, kompozitin mukavemet, sertlik ve diğer mekanik özelliklerini artırır. Yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri arasında cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı bulunur. (Callister & David Rethwisch, t.y.)

Dolgu: Dolgu malzemeleri kompozitlerin maliyetini düşürmek, işlenebilirliğini artırmak veya belirli fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla matris fazına eklenen inert partiküllerdir. Dolgu maddeleri kompozitin yoğunluğunu, termal ve elektriksel özelliklerini ayarlamak için de kullanılır. Örneğin kalsiyum karbonat, silika ve kil gibi malzemeler dolgu olarak kullanılabilir. (Strong, 2008)

Kompozit malzemelerin takviye ve matris malzemeye göre kategorize edilmesi Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kompozitlerin matris ve takviye malzemeye göre sınıflandırılması

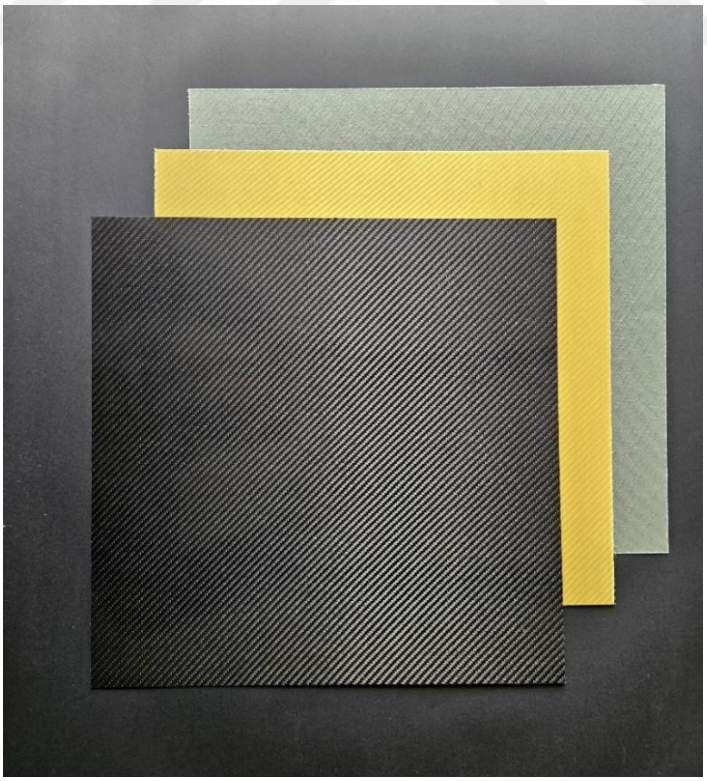
2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimer matris kompozitler (PMC), matris olarak bir polimer reçine ile takviye fazı olarak fiberler ve/veya farklı takviye malzemeler içeren kompozitlerdir. Takviye fazıyla matris arasındaki etkileşim, güçlü kimyasal bağlardan zayıf sürtünme kuvvetlerine kadar geniş bir yelpazede ortaya çıkabilir. "Arayüz" olarak adlandırılan bu etkileşim bölgesi takviye malzemelerinin uygun kaplamalarla kullanılması sayesinde kontrol altına alınır. Kompozit uygulamaları içinde en yaygın kullanılan türlerden biri olan PMC' ler kolay üretim süreçleriyle dikkat çeker. Yüksek çekme dayanımı, sertlik (stiffness) ve kırılma tokluğu (fracture toughness) sergileyerek aşınma, delinme ve korozyona karşı koruma sağlarken düşük ısıl dayanım ve yüksek termal genleşme bu malzemelerin belirgin dezavantajları arasında yer alır. Buna karşın hafiflik, korozyon direnci, yorulma dayanımı ve kolay montaj gibi özellikleri yüksek performanslı fiber takviyeli PMC'lerin çeşitli sektörlerde tercih edilmesini mümkün kılar. Uzay ve hava aracı gövdeleri, elektronik paketleme malzemeleri, tıbbi cihazlar ve ev gereçleri gibi çok sayıda kullanım alanına sahiptir. (Beşergil, 2016)

Çizelge 2.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Elyaf Türüne Göre Sınıflandırılması

Elyaf Türü	Cam Elyaf (Glass Fiber)	Karbon Fiber (Carbon Fiber)	Aramid Fiber (Kevlar)
Özellikler	Ekonomik, korozyona dayanıklı, iyi mekanik özellikler, genellikle düşük sıcaklıklarda kullanılır.	Yüksek mukavemet ve sertlik, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, maliyeti yüksektir.	Hafif, yüksek darbe dayanımı, elastik, balistik koruma ve zırh uygulamalarında kullanılır.
Kullanım Alanları	Otomotiv, denizcilik, inşaat, spor ekipmanları.	Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, enerji sektörü.	Balistik zırh, spor ekipmanları, otomotiv, askeri uygulamalar.

İçerdikleri elyaf türüne göre kompozitlerin özellikleri ve kullanım alanları Çizelge 2.1' de gösterilmiştir. Çalışmamızda kullanılmak üzere üretilen kompozit plaka çeşitleri Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Üretilen CFRP, AFRP ve GFRP plakalar

Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Cam elyafı ateşe dayanıklılık, termal direnç, elektriksel yalıtım, yüksek çekme dayanımı ve son derece kararlı kimyasal özellikleri gibi üstün performansıyla öne çıkan, inorganik ve metalik olmayan bir malzemedir. (Wang vd., 2011)

Farklı kullanım alanlarına göre cam elyafların sınıflandırılması ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Cam Elyaf Sınıflandırması ve Fiziksel Özellikleri

Sınıflandırma	Fiziksel Özellikler
A	Daha yüksek dayanıklılık, mukavemet ve elektriksel direnç
C	Daha yüksek korozyon direnci
D	Düşük dielektrik sabiti
E	Daha yüksek mukavemet ve elektriksel direnç
AR	Alkali direnci
R	Daha yüksek mukavemet ve asit korozyonuna karşı direnç
S	En yüksek çekme mukavemeti
S-2	Yüksek mukavemet, modül (elastisite modülü) ve kararlılık

Cam elyafla güçlendirilmiş polimer (GFRP) kompozitler, kompozit malzeme imalatında oldukça sık tercih edilmektedir. Uygun ham madde bileşimi ve lif yönlendirme stratejileri sayesinde GFRP kompozitlerin hedeflenen özellikleri, çelikle benzer düzeye getirilebilmektedir. Cam fiber (GF) takviyeli kompozitler çevresel etkilere karşı yüksek direnç, darbe yüklerine karşı iyi hasar tolere edebilme kabiliyeti, yüksek özgül mukavemet ve sertlik gibi niteliklerinden ötürü denizcilik ve boru imalatı sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kompozit malzemeler yatak, dişli, tekerlek ve burç gibi pek çok tribolojik uygulamada da tercih edilmektedir. (Sathishkumar vd., 2014)

Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Karbon fiberlerin takviye ögesi, polimerlerin ise matris olarak kullanıldığı kompozitler, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler olarak adlandırılır. Bu kompozit türü son derece yüksek çekme mukavemeti/ağırlık ve çekme modülü/ağırlık oranları, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek yorulma dayanımı ve etkili ısı iletkenliği gibi pek çok olumlu özelliğe sahiptir. CFRP' ler, 4500 MPa' ya varan özgül mukavemetin yanı sıra sönümleme karakteristiği gösteren sertlik ve neredeyse sıfır düzeyine yakın termal genleşme katsayısıyla da öne çıkar. Söz konusu özellikleri; havacılık, otomotiv, elektronik, tıp ve spor malzemeleri gibi geniş bir yelpazede kullanımını teşvik etmektedir. Yine de yüksek elektriksel iletkenlik, maliyet, düşük kopma uzaması ve sınırlı darbe direnci gibi bazı dezavantajlar söz konusudur. Karbon fiber takviyeli kompozitler, 1020 sınıfı çeliğe kıyasla beş kat daha hafif ve beş kat daha güçlüdür. (Ozkan vd., 2020)

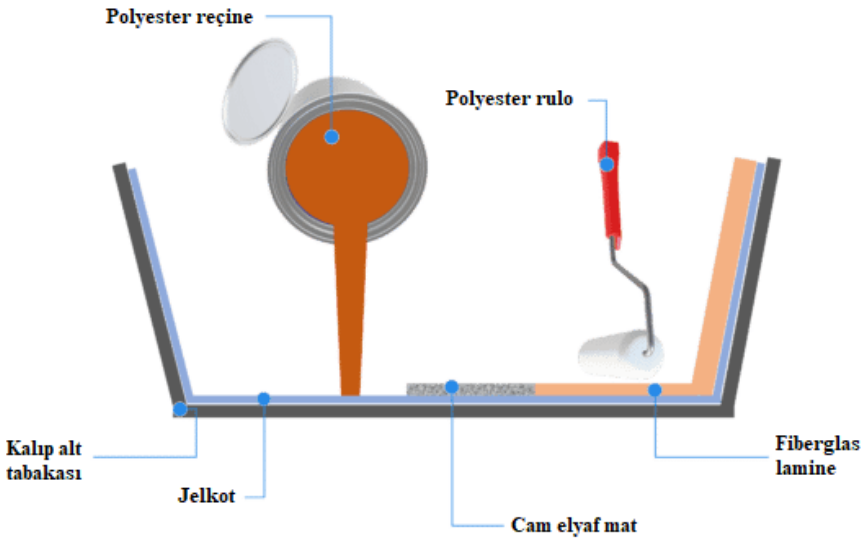
Aramid Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Aramid lifleri yüksek mukavemetleri ve düşük ağırlıkları ile bilinen, özel olarak üretilmiş sentetik liflerdir. Genellikle poliamid türevi olan bu lifler özellikle dayanıklılık ve termal stabilite gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Aramid fiber takviyeli polimer (AFRP), mühendislik alanında oldukça önemli bir yere sahiptir. AFRP'lerin en öne çıkan avantajlarından biri mekanik özelliklerini belirgin ölçüde iyileştirebilme yeteneğidir. Bu lifler polimer matris ile birleşerek, son ürünün çekme dayanımını, sıyırma dayanımını ve darbe dayanımını artırır. Özellikle havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrilerinde, AFRP' lerin kullanımı, malzemelerin hafifliğini ve dayanıklılığını artırarak performansı üst düzeye çıkarmaktadır. Askerî ve uzay uygulamalarında, AFRP malzemeleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür uygulamaların gereksinimleri genellikle geleneksel malzemelerin ötesinde özellikler talep etmektedir. Aramid lifleri yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmasının yanı sıra kimyasal dayanıklılıkları ile de dikkat çekmektedir. Bu özellikler, onları zorlu çevre koşullarında dahi kullanılabilir hale getirmektedir. (Bhat, 2012)

2.3. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Elle Yatırma (Hand Lay-up)

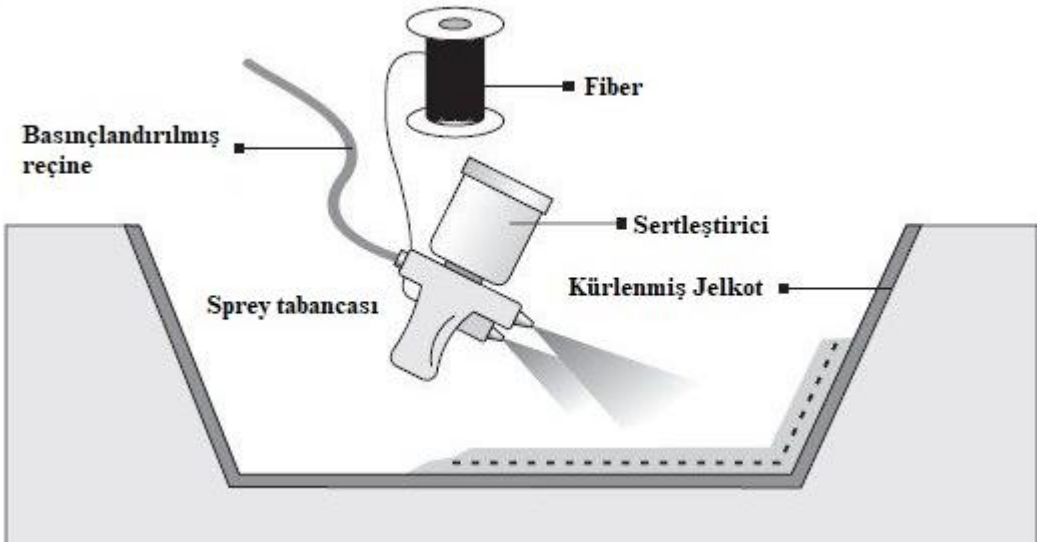
Bu yöntem, kalıba elle yerleştirilmiş elyafların veya kumaşların rulo ya da fırça aracılığıyla reçine ile doyurulması ve kalıbın şeklinin bu şekilde parçaya aktarılması esasına dayanır. Yöntemin uygulanması Şekil 2.3' te gösterilmiştir. Kalıp, basit bir düz levha olabileceği gibi farklı eğrilere veya kenarlara da sahip olabilir. Sürece başlamadan önce cam elyaflı katmanın kalıba yapışmasını engellemek amacıyla bir kalıp ayırıcı uygulanır. Ardından kalıp yüzeyini renklendirmek için "jelkot" adı verilen özel bir reçine tabakası kaplanır. Daha sonra cam lifleri ve polyester reçine, hızlandırıcılı katmanlar halinde eklenir; merdaneler kullanılarak bu katmanlar üzerinden geçilir ve reçinenin düzgün dağılıp hava boşluklarının giderilmesi sağlanır. İstenen kalınlığa ulaşana kadar birden çok katman hâlinde cam lifi ve reçine uygulaması yapılır. Kumaşın özelliklerine göre reçine her bir katmana ayrı ayrı uygulanabileceği gibi, çok katman aynı anda da işlenebilir. Son aşamada reçineyle doygun hale getirilen malzeme oda sıcaklığı ve atmosferik basınçta veya alternatif sıcaklık ve basınç koşullarında kurumaya bırakılır. Kurumanın ardından parça kalıptan çıkarılır; kesme, çapak alma ve boyama gibi son işlemler gerçekleştirildikten sonra kullanıma hazır hale gelir. (Durgun, 2014)



Şekil 2.3. Elle yatırma yöntemi

Püskürtme (Spray-up)

Püskürtme yöntemi, elle yerleştirme tekniğine yönelik ikinci bir iyileştirme olmakla birlikte ilk otomasyon aşaması olarak da kabul edilir. Şekil 2.4' te gösterildiği gibi manuel veya robotik bir kolla çalıştırılabilen bir püskürtme tabancası, kalıbın üzerine elyaf ve reçine püskürtür. Karışım kalıba uygulandıktan sonra karışımın sıkıştırılıp yoğunlaştırılması amacıyla bir silindir kullanılarak konsolidasyon gerçekleştirilir. Karıştırma sürecinin ardından püskürtme yöntemiyle üretilen malzeme kırpılmış iplik mat kompozitine büyük ölçüde benzer ancak lif-reçine oranı konusunda daha fazla esneklik ve kalıp yüzeyinin eğriliklerine daha iyi uyum sağlama özelliği sunar (Takviye kalıp içinde anında oluşturulduğundan ek bir örme işlemine gerek duymaz). Püskürtme işleminin tipik uygulamaları depolama siloları, su veya atık tankları gibi yüksek mekanik mukavemet gereksinimleri olmayan parçalar için büyük yüzeylerin üretilmesidir. Püskürtme tekniği, yarım metreden birkaç metreye kadar çaplarda büyük ila orta boy tanklar üretmek için en ekonomik işlemlerden biri olarak kabul edilir. (Gascons vd., 2012)

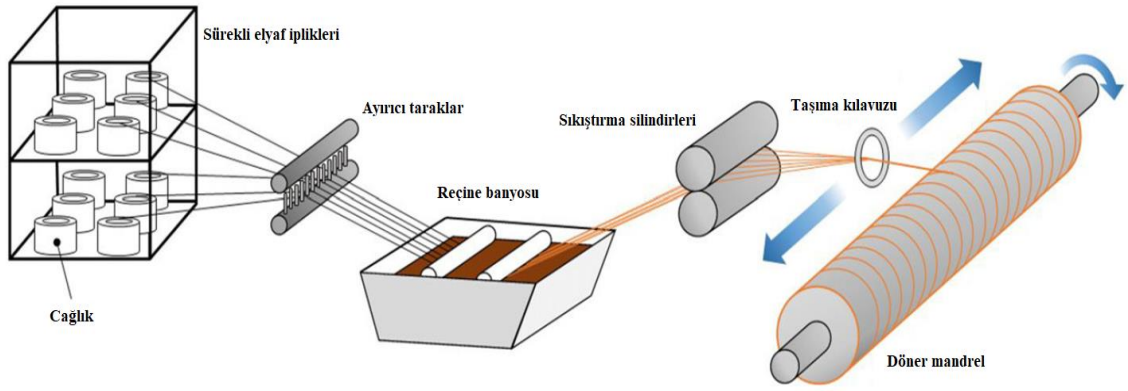


Şekil 2.4. Püskürtme yöntemi

Püskürtme metodu ile üretilen parçalar genellikle büyük, karmaşık ve düşük ilâ orta mukavemet gerektiren kompozit yapılardır. Püskürtme metodu ile kompozit parça üretimi Şekil 2.4' te gösterilmiştir.

Elyaf Sarma (Filament Winding)

Sürekli elyaflar bir elyaf dağıtım sistemiyle filament sarma makinesine yönlendirilir ve önceden tanımlanan yinelemeli bir geometrik düzende mandrele sarılır. Makinedeki hareketli bir taşıyıcıya bağlı olan elyaf dağıtım kafası, çekimlerin nereden geçeceğini belirler. Mandrel eksenine göre sarma açısı olarak bilinen açı, istenen yönlerde dayanım ve sertlik elde edebilmek için ayarlanabilir. Yeterli miktarda çekim tabakası uygulandıktan sonra oluşan katman mandrel üzerinde kürlenir. Bitmiş parçanın boyutu ve şekli mandrelin geometrisi ve uygulanan katmanın kalınlığına göre belirlenir. Sarma açısı parçada mukavemet, rijitlik ve ağırlık gibi mekanik özellikleri şekillendirir. Katmanın yoğunluğu ise sarma sırasında çekimlerin gerginlik miktarına bağlıdır. Bu tekniklerle üretilen kompozit parçalar genellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranı sunar. (Luthada, 2022)

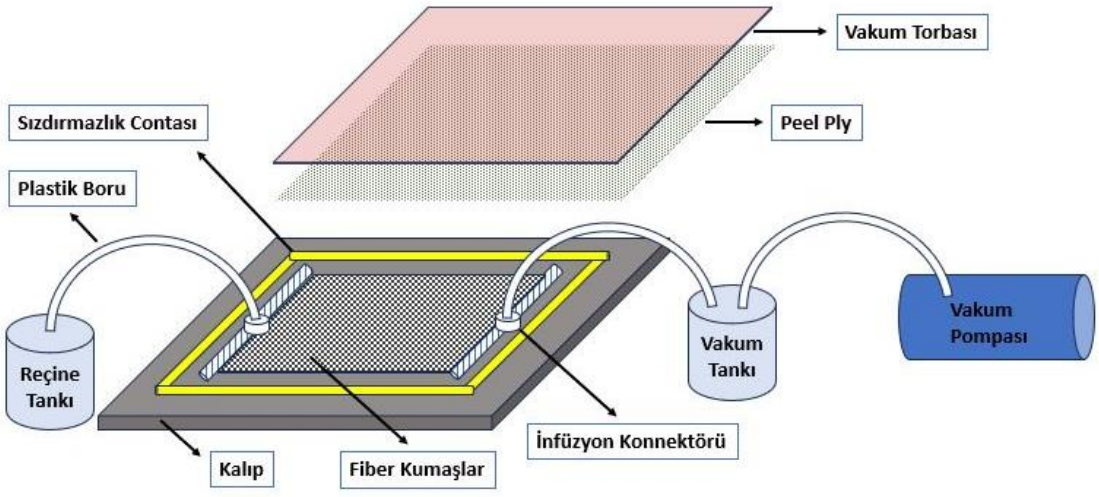


Şekil 2.5. Filament winding yöntemi

Filament winding yöntemi, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci sayesinde havacılık, otomotiv, enerji, savunma, denizcilik ve inşaat gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Roket motor gövdeleri, yakıt tankları, kompozit tahrik milleri, LPG ve CNG depolama tankları gibi hafif ve dayanıklı yapılar üretmek için ideal bir yöntemdir. Filament winding yöntemi ile kompozit parça üretimi Şekil 2.5' te gösterilmiştir.

Reçine Transfer Kalıplama / Reçine Enjeksiyonu

RTM sürecinde genellikle düşük viskoziteli termoset reçineler tercih edilmektedir. Termoplastik reçinelerin ise bu yöntemde yaygın bir kullanım alanı bulunmamaktadır. Reçineyle birlikte sisteme eklenen malzemeler sertleştirici, hızlandırıcı, inhibitör ve dolgu maddelerini kapsar. Reçine olarak çoğunlukla doymamış polyester, vinilester, epoksi, akrilat ya da fenolik reçineler kullanılmaktadır. Şekil 2.6' da RTM yönteminin standart aşamalarına ilişkin şematik bir gösterim yer almaktadır. Bu yöntemde kumaş tabakaları kalıbın içine yerleştirilip gerektiği şekilde kesildikten sonra kalıp kapatılarak sıkıştırılır. Ardından reçine pozitif basınçlar altında bir ya da birden çok tanktan kalıp boşluklarına enjekte edilir ve bu işlem reçine havalandırma deliklerinden çıkış yapana kadar sürer. Akabinde enjeksiyon işlemi kesilir, havalandırma delikleri kapatılır ve reçinenin katılaşması için beklenir. Kürlenme adı verilen bu aşama, kalıbın ısıtılması veya başlangıçta tasarlanan birleşim sisteminin etkinleştirilmesiyle başlatılabilir. Parça yeterince sertleştikten sonra kalıp açılır ve ürün kalıptan alınır. (Kaplan, 2018)

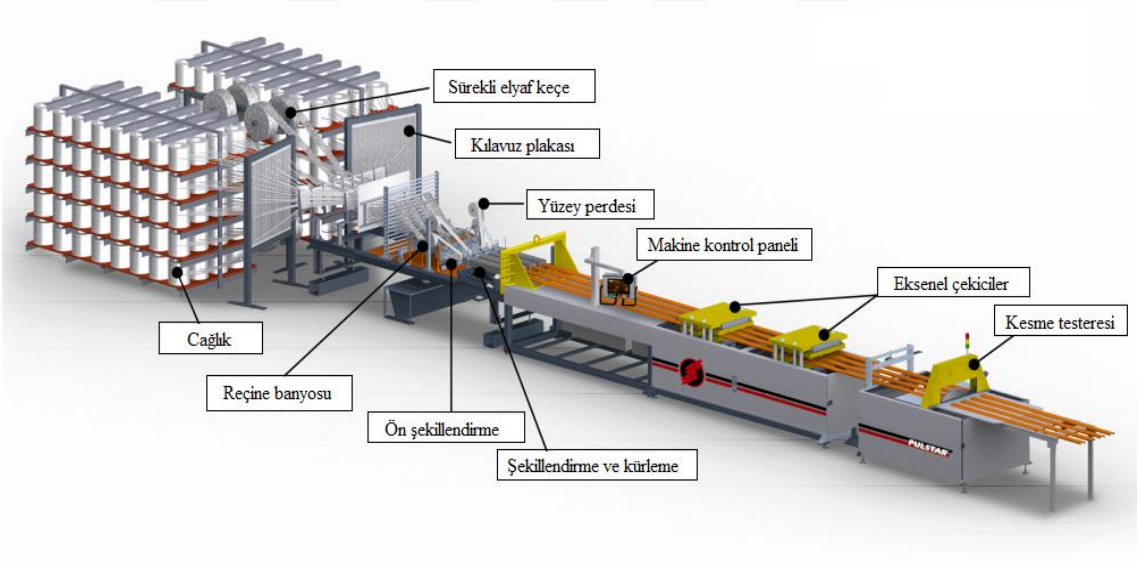


Şekil 2.6. Vakum infüzyon yöntemi

Resin Transfer Molding (RTM) yöntemi, yüksek yüzey kalitesi ve yapısal dayanım avantajları sayesinde havacılık, otomotiv, savunma, denizcilik, enerji, spor ve raylı sistemler gibi birçok endüstride kullanılmaktadır.

Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

Pultrüzyon, “çekme” ile “ekstrüzyon” sözcüklerinin birleşiminden türetilmiştir. Bu yöntem sürekli liflerin sıvı polimer matrisinden çekilmesini içerir. Çubuklar, kirişler, profiller, içi boş kare kesitler ve kaplama levhaları gibi çeşitli iki boyutlu biçimlere sahip ürünlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılır. Süreç, sürekli liflerin roving bobinlerinden çekilmesiyle başlar ve ardından bu liflerin reçine ile ıslatılması (emdirme) aşaması gelir. Islatılan lifler ve takviye paspasları, ön şekillendirme elemanları ve kılavuzlardan geçirilir; sonrasında sürekli lif ve polimer matrisi ısıtılmış kalıpta preslenerek polimerizasyon ve kürleme gerçekleştirilir. Pultrüzyon, bilgisayar kontrollü bir işlem olup istenilen uzunlukta kesilebilen ve uzunlamasına yönde yüksek mukavemet sağlayan kompozit malzemelerin üretimini mümkün kılar. Ayrıca yüzey, kalıp içinde uygulanan tasarım ve basınç sayesinde kabartmalı veya son derece parlak olacak şekilde biçimlendirilebilir. (Payal, 2022)

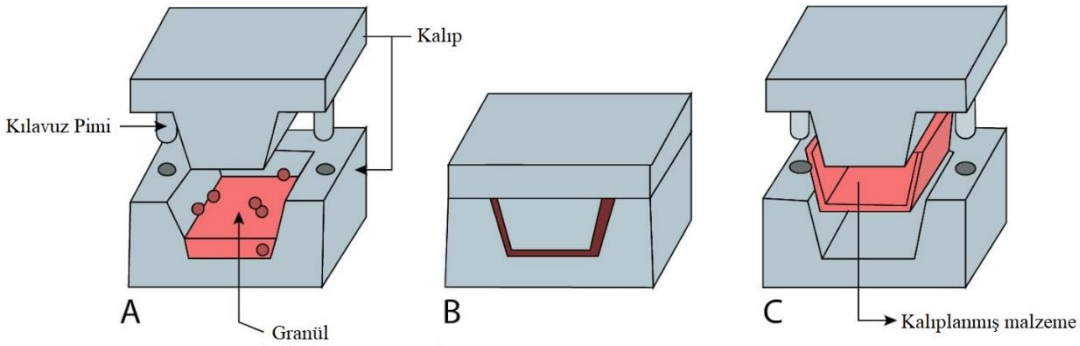


Şekil 2.7. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon yöntemiyle üretilen parçalar genellikle sürekli profil yapılar olup yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Pultrüzyon yöntem ile kompozit parça üretimi Şekil 2.7’ de gösterilmiştir.

Sıkıştırma Kalıplama / Compression Molding

Sıkıştırma kalıplama plastik ve polimer kompozit ürünlerin imalatında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu işlemde kullanılan sac kalıplama bileşiği (SMC) malzemeleri, düşük maliyet ve yüksek kalıplama verimliliği sebepleriyle günümüzde en popüler kompozit malzeme türleri arasındadır. Sıkıştırma kalıplama sürecinde, önceden belirlenmiş miktardaki malzeme üst ve alt kalıplar arasına konur ve presleme ile malzemeye son biçimi verilir. Çevrim süresi genellikle ürün kalınlığına bağlı olarak bir ile üç dakika arasında değişir. Uygulama sırasında malzeme yaklaşık 10 MPa düzeyindeki düşük bir kalıplama basıncı altında 130 °C ilâ 160 °C sıcaklık aralığında işlenir. Bu işlemde pres üzerinde yer alan erkek ve dişi kalıplar sayesinde sıkıştırma kalıplama çoğunlukla "eşleştirilmiş kalıp kalıplama" olarak da anılır. Parça boyutuna göre presin oluşturduğu kuvvet birkaç yüz tona kadar çıkabilir; bu da ürünün düzgünlüğünü artırdığı gibi kalıplama esnasında oluşabilecek boşlukları gidermeye de yardımcı olur. Kalıplar çoğunlukla takım çeliği gibi sert metallerden üretilir ve yüksek yüzey kalitesi elde etmek amacıyla cilalanabilir veya krom kaplanabilir. (Park & Lee, 2012)

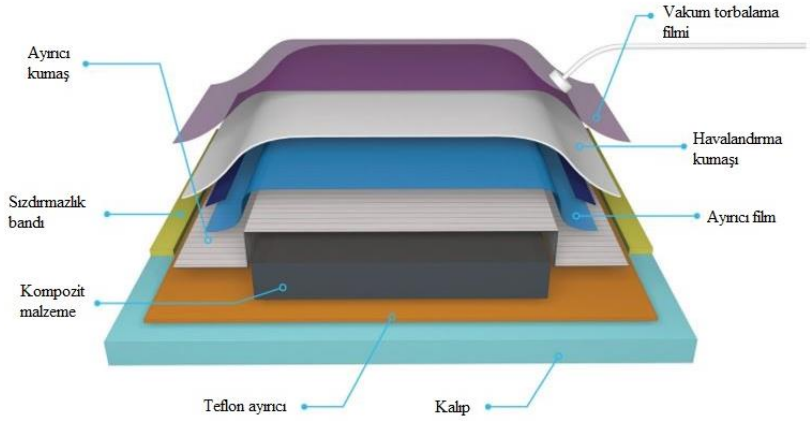


Şekil 2.8. Sıkıştırma kalıplama yöntemi

Sıkıştırma kalıplama yöntemiyle üretilen parçalar yüksek mukavemet, yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Sıkıştırma kalıplama yöntemiyle kompozit parça üretimi Şekil 2.8' de gösterilmiştir.

Vakum Bonding / Vacuum Bagging

Vakum torbası kalıplama havacılık alanında lamine malzemeler üretmek için sıklıkla başvurulan, önde gelen kompozit imalat yöntemlerinden biridir. Bu teknik, katmanı yerleştirdikten sonra ek basınç uygulanmasını sağladığından ıslak yatırma sürecine kıyasla daha iyi sıkıştırma ve sonuç olarak gelişmiş özellikler sunar. Islak yatırılmış katmanın üzerine vakum torbası olarak bilinen esnek bir plastik veya elastomer zar kaplanır. Bir nefes alma (breather) kumaşı, vakum torbası içerisinde ve kalıbın köşelerinde birikme ihtimali olan hava ile uçucu maddelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Vakum pompası ise torbanın altındaki havayı emerek sıkışmış havayı ve fazla reçineyi dış basınç yardımıyla ortadan kaldırır. Böylece daha yüksek bir takviye oranı elde edilir. Kürleme aşaması süresince fazla reçineyi çekmesi amacıyla bir soyma katmanı kullanılır, kür işlemi bittiğinde bu katman kaldırılarak son ürünün istenen yüzey kalitesi sağlanır. Sıkışmış havayı gidererek açık kalıp katmanlarının mekanik performansını artıran vakum torbası kalıplama tutarlı bir sıkıştırma ve daha düşük boşluk içeriği sunan katmanlar elde edilmesine imkân tanır. Bu yöntem pek çok araştırmada başarıyla uygulanmıştır. (Phiri vd., 2024)

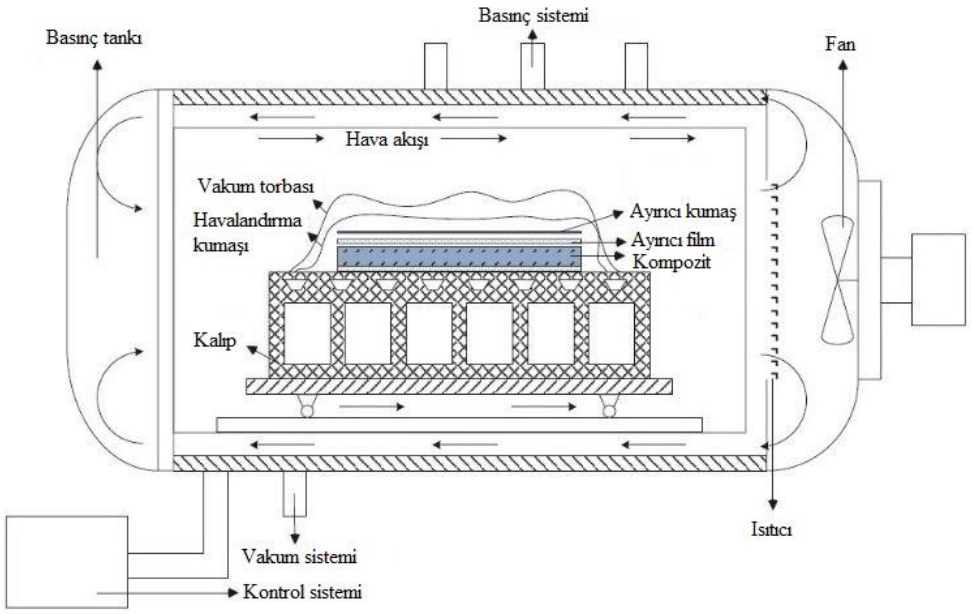


Şekil 2.9. Vakum kalıplama yöntemi

Vakum kalıplama yöntemiyle üretilen parçalar hafif, dayanıklı ve estetik yüzey gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Vakum kalıplama yöntemiyle kompozit parça üretimi Şekil 2.9’ da gösterilmiştir.

Otoklav / Autoclave Bonding

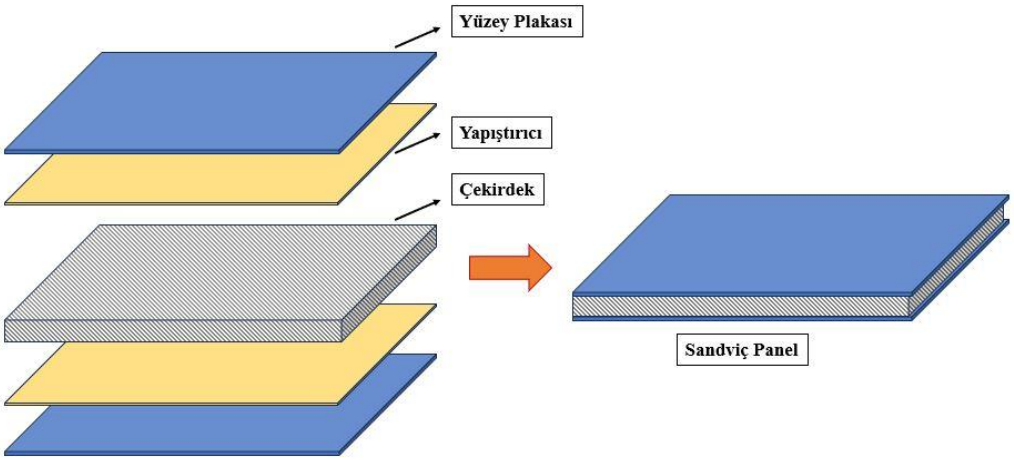
Otoklav kalıplama genellikle havacılık endüstrisinde prepreglerden yüksek değerli kompozitler üretmek için kullanılır. Her iki tarafı ince bir polyester bez soyma katmanıyla (yüzey etkisini artırmak için) kaplı olan katman, kalıp yüzeyine inşa edilir. Katmanın üst yüzeyi gözenekli bir ayırma filmi ve ayırma kumaşı ile kaplanır. Daha sonra tüm düzenek kalıba kapatılmış gözeneksiz bir membranla kaplanır ve daha sonra gösterildiği gibi bir otoklavın içine yerleştirilir. Şekil 2.10' da gösterildiği gibi bir otoklavın içine yerleştirilir. Daha sonra kapak membranının içine uçucu maddeleri ve gözenekliliği gidermek için vakum çekilir ve otoklavın içindeki basınç ve sıcaklık yüzey boyunca basıncın eşit kontrolünü sağlamak ve kürlemeyi termal olarak kontrol etmek için ayrı ayrı kontrol edilir. Basınç ve vakum uygulamasının optimizasyonu tipik olarak basınç çok erken uygulandığında ve düşük viskoziteli reçine dışarı zorlandığında kuru katmanları ve yüksek viskoziteli kürlenmiş reçinelerde basınç çok geç uygulandığında gözenekli katmanları önleyecektir. Genel olarak yüksek kalitede tutarlı kalıplamalar üretilebilir ancak süreç yavaş ve sermaye yoğundur. Tipik sistemler arasında bilgisayar ve havacılık uygulamaları için epoksi karbon fiber ve epoksi cam elyaf prepregleri bulunur. (Halley, 2012)



Şekil 2.10. Otoklav fırında kalıplama (Ju vd., 2021)

2.4. SANDVİÇ PANEL

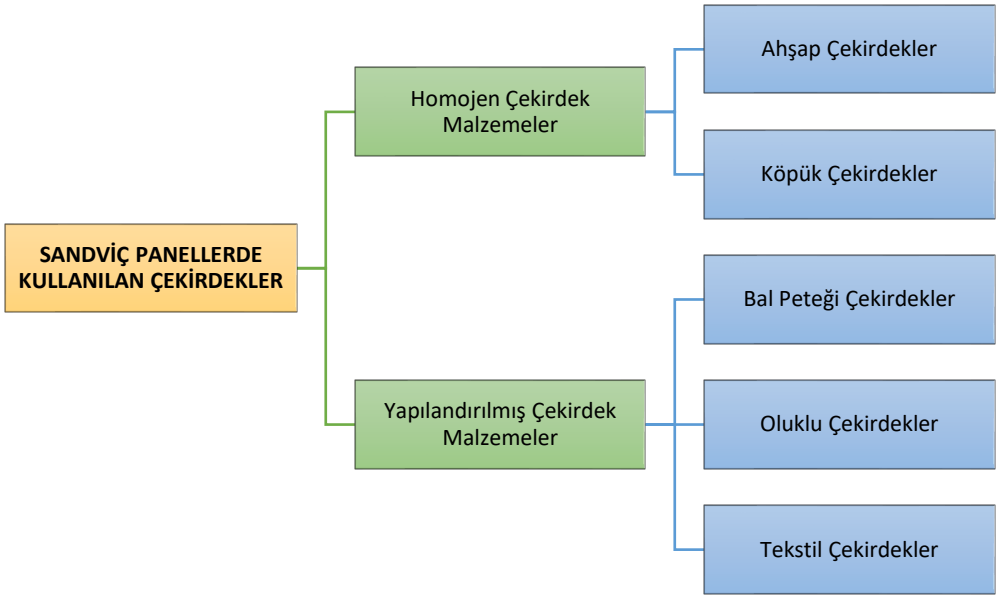
Sandviç yapılar, belirli bir kullanım ömrü boyunca maruz kalacağı yük koşullarına göre optimize edilmiş çok katmanlı kompozit sistemlerin bir alt grubu şeklinde düşünülebilir. Klasik bir sandviç yapı, iki sert ve güçlü yüzey tabakası ile bunların arasında bulunan daha hafif bir çekirdekten meydana gelir. Bu yapı içerisinde tetrahedral kafes çekirdek örneklerine rastlanabildiği gibi köpük, petek, oluklu çekirdek ve doğadan esinlenerek geliştirilmiş başka çekirdek tasarımları da sıklıkla kullanılır. Yüzey tabakaları yüksek dayanım ve rijitlikteki malzemelerden üretilir ve nispeten uyumlu, hafif çekirdek katmanına kıyasla daha incedir. Böylece sandviç yapı I-kirişe benzer bir çalışma prensibine sahiptir: Yüzeyler esas olarak eğilme ve düzlem içi yükleri taşırken çekirdek enine kesme kuvvetlerini üstlenir, yükleri yüzeylere dik doğrultuda dağıtır ve yapının bütünlüğünü korur. Tipik yapısal uygulamalarda yüzeylerin kalınlığı genellikle birkaç milimetreyi geçmezken çekirdek 50 mm' den kalın olacak şekilde tasarlanabilir. Elbette bu boyutlara uymayan örnekler de vardır ancak çoğu durumda farklı bir analiz yöntemi geliştirmek gerekmez. Bir sandviç yapının hem yüzeyleri hem de çekirdeği homojen olmak zorunda değildir; yüzeyler tek bir metalik katmandan oluşabileceği gibi, dokuma veya lamine kompozit seçenekleri de yaygın şekilde tercih edilir. Çekirdek tasarımları ise daha da çeşitlenerek petek, hücresel, kafes veya ağ takviyeli biçimlerde bulunabilir. Sandviç yapının en zayıf halkası genellikle yüzey-çekirdek arayüzüdür; bu bölge çoğunlukla yapıştırıcı ile birleştirilir (Örneğin, alüminyum petek çekirdeğin grafit epoksi yüzeylerle tutturulması). Alternatif olarak bazı seramik-metal sandviç uygulamalarında olduğu gibi yüzey-çekirdek geçişi harmanlanabilir ya da işlevsel olarak derecelendirilebilir. Sandviç yapı malzemesinin seçimi; yapının kullanım amacı, hizmet süresi, piyasadaki bulunabilirliği ve maliyet kriterleri doğrultusunda yapılır. Havacılık alanında sıklıkla grafit-epoksi veya karbon-epoksi yüzey tabakaları ve alüminyum ya da Nomex petek çekirdek kullanılırken sivil ve denizcilik sektörlerinde cam-epoksi veya cam-vinil ester yüzey tabakaları ile köpük veya balsa çekirdekler tercih edilmektedir. İnşaat mühendisliğinde de kapalı hücreli veya açık hücreli köpük çekirdekler, gemi sandviç yapılarında ise çeşitli yoğunluklara sahip balsa oldukça yaygındır. (Birman & Kardomateas, 2018)



Şekil 2.11. Sandviç panelin elemanları

Sandviç panel; yüzey plakaları, çekirdek ve onları birbirine bağlayan yapıştırıcı tabakasından oluşmaktadır. Tipik bir sandviç panelin yapısı Şekil 2.11' de gösterilmiştir.

Sandviç çekirdek malzemelerde kullanılan çekirdek türlerinin gruplandırılması Şekil 2.12' de gösterilmiştir.

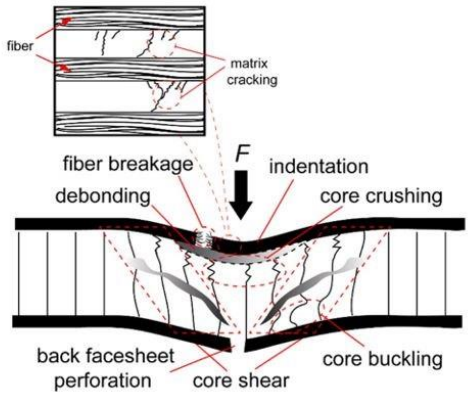


Şekil 2.12. Sandviç panel çekirdek yapılarının sınıflandırılması

SANDVİÇ HASAR MEKANİZMALARI

Sandviç panellere uygulanan yük türüne ve malzeme yapısına bağlı genellikle kaplama (skin) veya çekirdek (core) bölgesinde hasar meydana gelir. Sandviç yapılarda oluşan hasar türleri Şekil 2.13' te gösterilmektedir.

Eğilme Kırılması (Flexural Failure): Yük altındaki üst yüzey plakası basma gerilmeleri nedeniyle çöker veya kırılır.
Çekme Kırılması (Tensile Failure): Alt yüzey plakası çekme gerilmeleri altında kopabilir veya yırtılabilir.
Delaminasyon (Katman Ayrılması): Çok katmanlı kompozit yüzey plakalarında katmanlar arası bağ koparak ayrılmalar meydana gelir.
Yüzey Plakasında Ezilme (Face Crushing): Yükleme bölgesinde, yüzey plakası altında lokal çökmeler veya ezilmeler oluşur.
Çekirdek Ezilmesi (Core Crushing): Yükün uygulandığı bölgede, çekirdek basma kuvvetine dayanamayarak çöker.
Burkulma (Core Buckling): Yüksek basınç altında çekirdek bölgesindeki oluklu veya petek yapılar burkulur.
Çekirdek Göçmesi (Core Shear Failure): Sandviç panelin kesme yükleri altında çekirdek malzemesi koparak ayrılır.
Yanal Ezilme ve Katlanma (Folding and Wrinkling): Çekirdek, yük altında bükülerek yerel katlanmalar oluşturur.

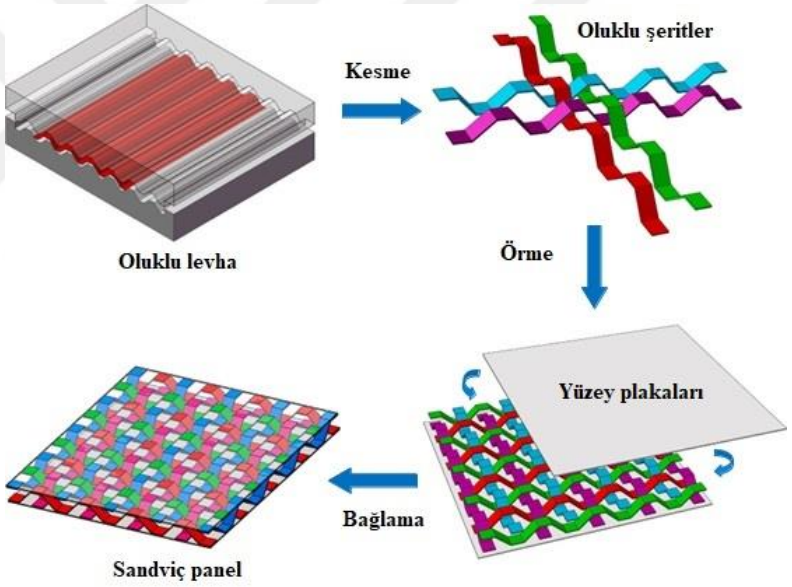


Şekil 2.13. Çeşitli sandviç yapılar için ortak arıza modları (Kueh vd., 2023)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. SANDVİÇ PANEL ÜRETİMİ

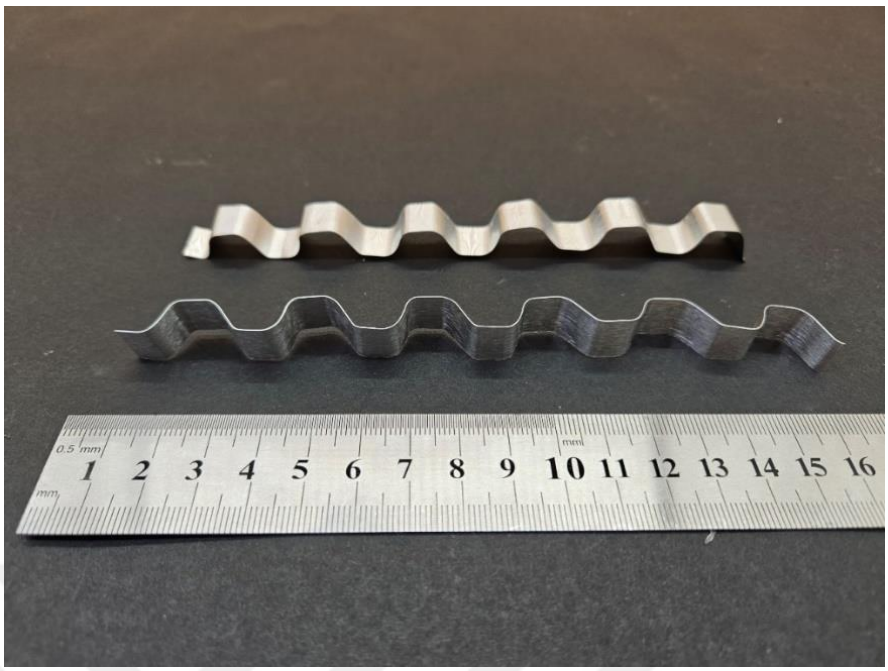
Sandviç panellerin üretim aşamaları Şekil 3.1’ de gösterilmiştir. Öncelikle 0.2 mm kalınlığındaki saclar oluklu kalıpta preslenip form verildikten sonra şeritler halinde kesilmiştir. Daha sonra kesilen büyük şeritler Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi sandviç panele uygun boyutlarda tekrar kesilmiştir. Kesilen şeritler birbiri içinden geçirilerek örülmüştür. Örülen çekirdek yapı bir miktar preslendikten sonra yüzey plakaları yapıştırma işlemi için zımparalanarak ağartıcı ile iyice temizlenmiştir. Daha sonra yüzey plakalarına ince bir katman halinde yapıştırıcı sürülüp çekirdek ile aralarında temasın sağlanması için üzerlerine ağırlıklar koyulup kuruması beklenmiştir.



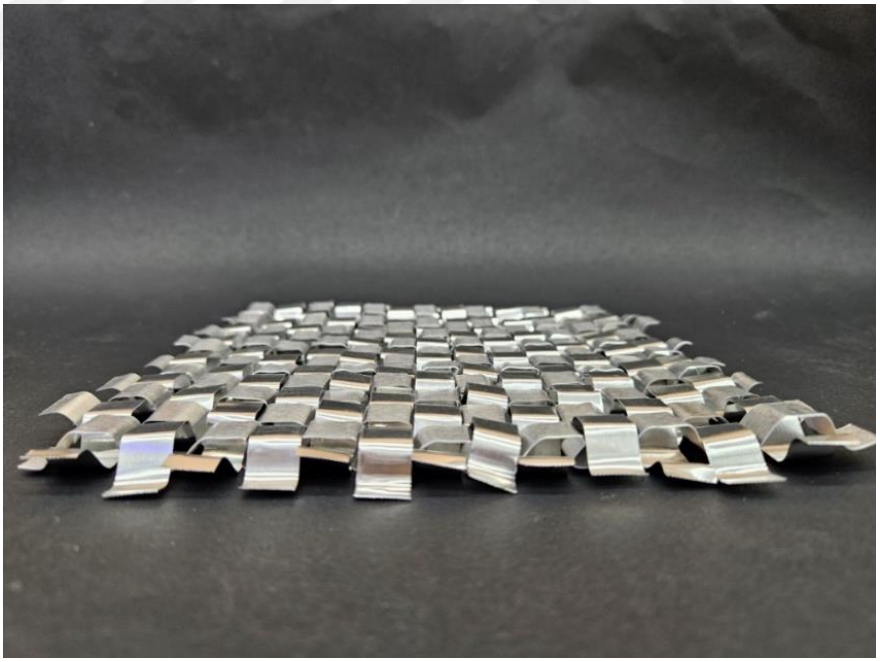
Şekil 3.1. Çift yönlü oluklu sandviç panel üretim aşamaları (Yang vd., 2020)

Çekirdek Üretimi

0.2 mm kalınlığında ve 10 mm genişliğinde Alüminyum saclar birbirleri içerisinde örülerek Şekil 3.3’ te gösterildiği gibi homojen çekirdek yapısına dönüştürülmüştür. Örülen 10 mm kalınlığındaki çekirdek yapı kalıpta preslenerek boşluklar alınmış ve yekpare çekirdek hale getirilmiştir. Böylece yapısal rijitliğe ulaşılmıştır.



Şekil 3.2. Çekirdek yapısının elemanları



Şekil 3.3. Çekirdek yapısının örülmüş hali

Yüzey Plakası Üretimi

Üretilen sandviç panellerin yüzey plakaları cam fiber, karbon fiber ve aramid fiber kumaşlara vakum altında epoksi infüzyonu ile üretilmiştir. Epoksi olarak MGS RIM135 kodlu infuzyon epoksisi ve RIMH137 kodlu sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi/Sertleştirici karışım oranı olarak ağırlıkça 100/35' tir. Kullanılan kumaşların özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Fiber Kumaşların Teknik Özellikleri

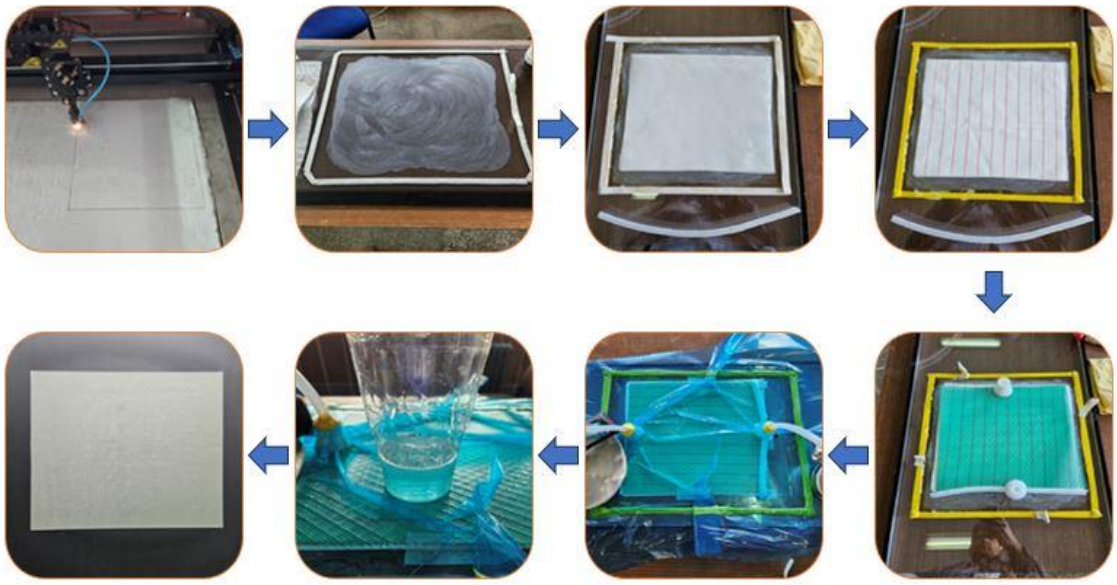
Fiber Adı	Yoğunluk	Örgü	Katman Kalınlığı	Ağırlık Dağılımı	Çekme Mukavemeti	Elastisite Modülü
Cam	300 gr/m2	Twill 2x2	0,23 mm	50/50	3445 Mpa	73 Gpa
Aramid	300 gr/m2	Twill 2x2	0,3 mm	50/50	2944 Mpa	102 Gpa
Karbon	245 gr/m2	Twill 2x2	0.393 mm	50/50	3800 Mpa	240 Gpa

Epoksi ve sertleştiricinin teknik özellikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Epoksi Reçinenin Teknik Özellikleri

Yoğunluk 25 ºC (g/cm³)	1,13 - 1,17
Viskozite 25 ºC (mPas)	700 - 1.100
Eğilme Dayanımı (MPa)	90 - 120
Elastisite Modülü (kN/mm²)	2,7 - 3,2
Çekme Dayanımı (MPa)	60 - 75
Basma Dayanımı (MPa)	80 - 90
Darbe dayanımı (KJ/m²)	70 - 80

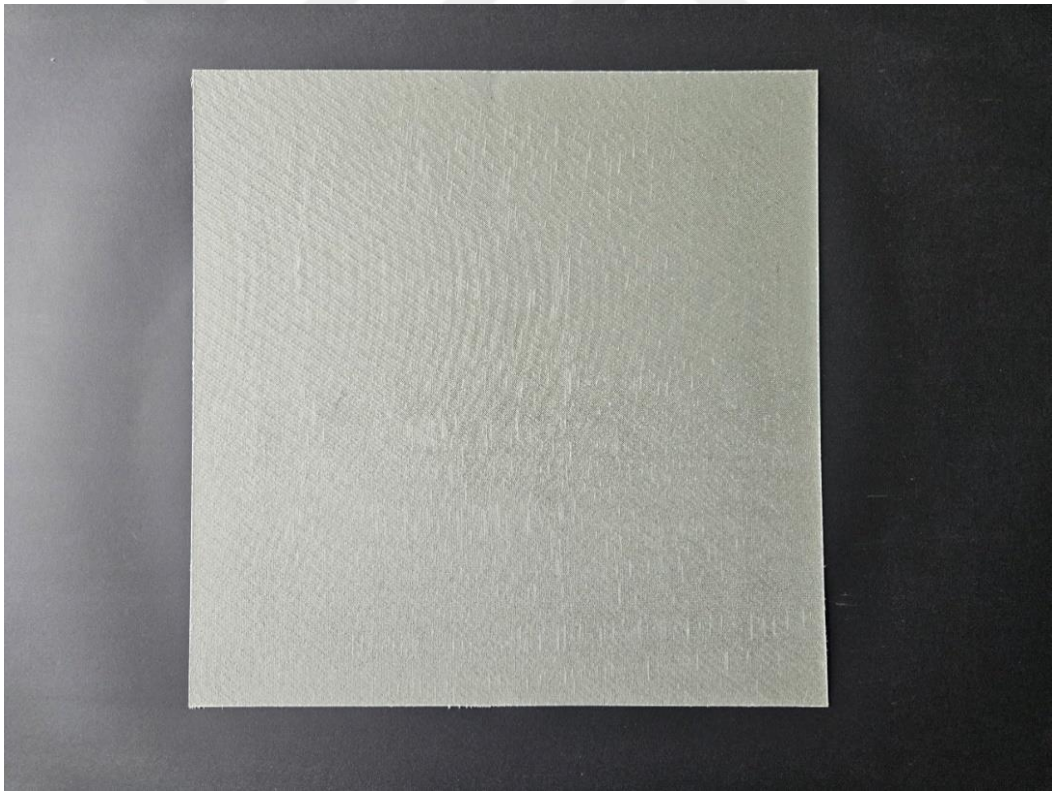
Sandviç panel üretiminde kullanılan yüzey plakalarının üretim aşamaları Şekil 3.4' te adım adım gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Reçine transfer metodunun uygulama aşamaları

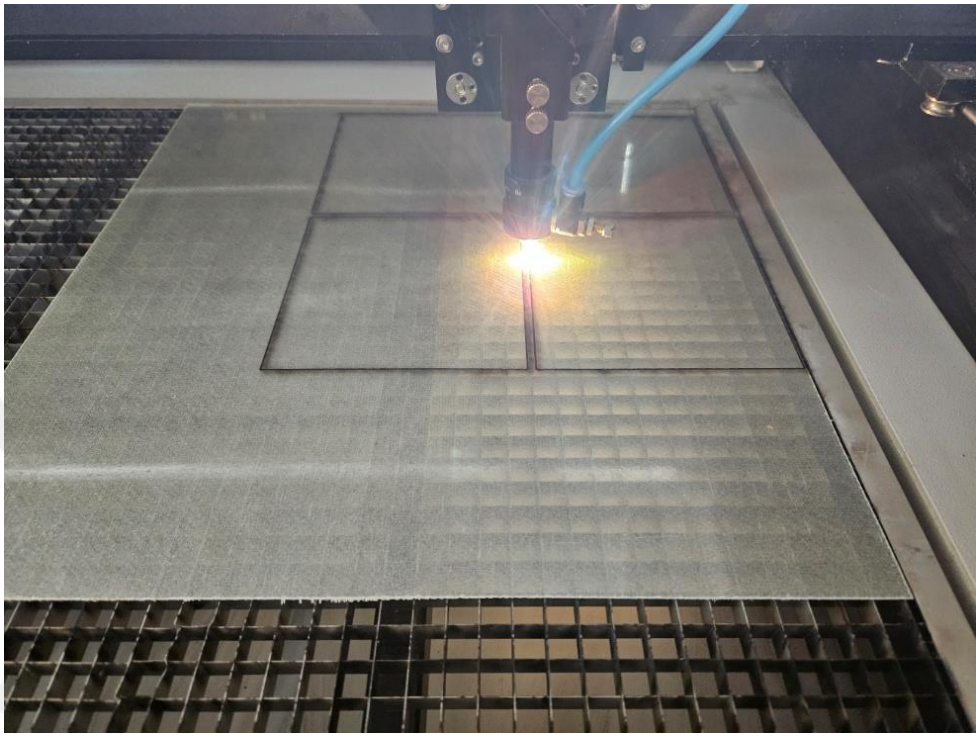
Kalıp olarak temperli cam kullanılmıştır ve işlemden önce çözücü solventler ile temizlenmiştir. Daha sonra etrafına 50x50 cm boyutlarında sızdırmazlık contası çekilmiştir. Fiber kumaşlar 40x40 cm boyutlarında lazer kesici ile kesilmiştir. Her bir yüzey plakası için dört katman kullanılmıştır. Kesilen kumaşlar, eklenecek epoksi/sertleştirici karışımının ağırlığını hesaplamak için hassas tartı ile tartılmıştır. Daha sonra kumaşlar [0/90/0/90] yönelimiyle simetrik olarak üst üste dizilip üzerine ayırıcı peel-ply kumaşı ve infüzyon filesi koyulmuştur. Torbalama yapmadan önce spiral borular, infüzyon konnektörleri conta tertibatı uygun bir şekilde kalıbın üzerine dizilmiştir. Vakumda kaçak olmasını engellemek için contaya çıkıntılar eklenmiştir. Tek taraftan infüzyon konnektörüne bağlanan silikon borunun diğer ucu vakum pompasına epoksi kaçmasını engellemek için önce kaçış tankına daha sonra vakum pompasına bağlanmıştır. Vakum pompası çalıştırılarak kalıp içerisindeki hava vakum yaptırıldıktan sonra silikon boru kelepçe ile kapatılıp kaçak testi yapılmıştır. Yaklaşık bir saat beklendikten sonra düzenek kontrol edilmiştir. Eğer kaçak varsa kaçağın kaynağı bulunup tekrar kaçak testine sokulmuştur. Bu arada epoksi/sertleştirici karışımı üreticinin

belirlediği oranlarda hazırlanıp içindeki hava kabarcıklarının yüzeye çıkması için yavaşça karıştırılmış, yaklaşık yirmi dakika beklenmiştir. Kaçak olmadığına emin olunduktan sonra diğer infüzyon konektörüne de silikon boru takılmış ve kelepçe ile kapatıldıktan sonra hazırlanan epoksi/sertleştirici karışımının olduğu kaba daldırılmıştır. İnfüzyon işlemine başlamadan önce kalıp içindeki hava tekrar vakum pompası ile alınmış, bu esnada diğer kelepçe yavaş yavaş açılmıştır. Vakum etkisiyle epoksi karışımı konnektörden spiral borulara dengeli bir şekilde dağıldıktan sonra bütün kalıpta ilerlemiştir. Diğer spiral boruda toplanan epoksi karışımı yine infüzyon konnektörü sayesinde vakum kaçış tankına dökülmüştür. Hava boşluğu kalmayacak şekilde önce karışımın kalıba giriş yaptığı boru daha sonra çıkış yaptığı boru kelepçeler ile kapatılmıştır. Oda sıcaklığında 48 saat beklendikten sonra vakum torbası, infüzyon filesi ve peel-ply kumaşı plakadan ayrılmıştır. Daha sonra plaka kalıptan çıkarılmıştır. Bu prosesler sonucunda üretilen bir cam fiber plaka Şekil 3.5' te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Üretilen cam fiber plaka

Daha sonra çıkarılan bu plakaların çekirdek ile temas edecek yüzeyleri 400’ lük zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra yüzeyler ağartıcı solüsyonla temizlenmiştir.



Şekil 3.6. Üretilen cam fiber plakanın uygun boyutlarda kesilmesi

Bu plakalardan sandviç panellerimizde kullanılacak plaka boyutları Çizelge 3.2’ de verilmektedir. Bu plakalar Şekil 3.6’ da gösterildiği gibi lazer kesici ile kesilerek çıkarılmıştır. Sandviç paneller yüzey plakasına göre Alüminyum sandviç panel (ASP), Cam Fiber sandviç panel (GFSP), Kevlar sandviç panel (KSP), Karbon Fiber sandviç panel ise (CFSP) olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 3.3. Testler İçin Hazırlanacak Sandviç Panel Numune Sayıları ve Boyutları

Sandviç Panel	Adet	Üç Nokta Eğilme Testleri	Penetrasyon Testleri
ASP, GFSP, KSP, CFSP	3	65 x 200 mm	130 x 130 mm

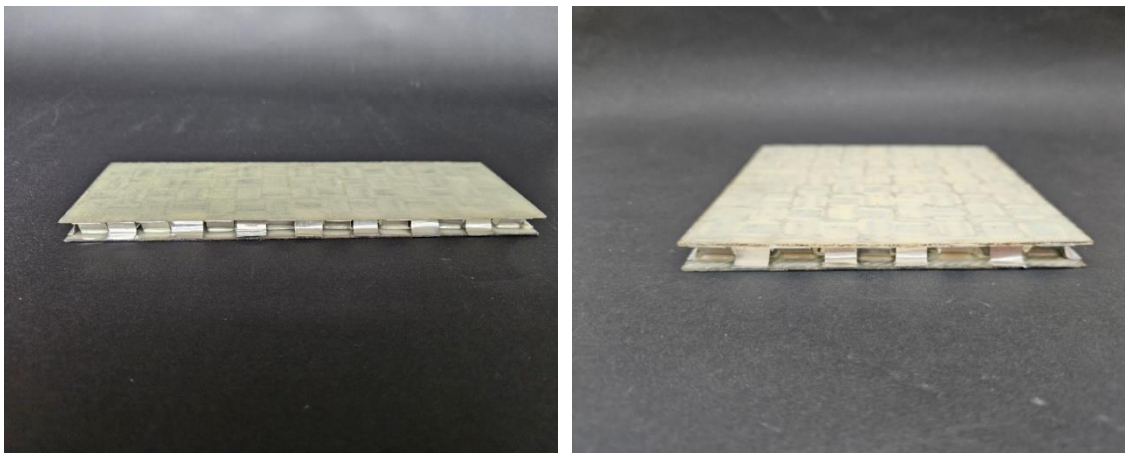
Çekirdek yapısı da kesilen yüzey plakalarına uygun şekilde kesilmiştir. Çekirdek yapısı yapıştırma işleminden önce 10 mm' den 7 mm' ye kadar yapısal bütünlüğü bozulmayacak şekilde preslenmiştir.

Yüzey plakalarına yapıştırıcı fırça ile ince bir film tabakası oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Yapıştırıcı olarak BOSTIK marka (MAROCOL 18576A + SERTLEŞTİRİCİ 4300B) poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Üretilen sandviç panellerin ağırlıkları ise Çizelge 3.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Testler İçin Hazırlanacak Sandviç Panel Numune Ağırlıkları

Sandviç Panel	Üç Nokta Eğilme (Dinamik) Testleri	Penetrasyon Testleri
ASP	95,02 gr	110,85 gr
GFSP	62,74 gr	90,55 gr
KSP	47,90 gr	59,16 gr
CFSP	54,77 gr	77,90 gr

Uygulanacak testler için farklı boyutlarda üretilen cam fiber sandviç panel numuneleri Şekil 3.7' de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Üç nokta eğilme testleri için üretilen sandviç paneller

3.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Alüminyum yüzey plakası ve çekirdek yapısında 1050 serisi soğuk şekillendirilmiş sac malzeme kullanılmıştır. Alüminyumun teknik verileri üreticiden alınmıştır. Kompozit plakaların karakterizasyonu için katmanlı kompozit kanununa göre teorik hesaplamalar yapılmıştır. Kompozit numune boyutları 1 mm kalınlık için ASTM 3039 standardına 15x250 mm olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.1' de verilen kumaş verileri ve Çizelge 3.2' de verilen epoksi verileri hesaplamalarda kullanılmıştır. Lif hacim oranı (V_f) infüzyon yöntemi ile üretim yapıldığı için 0,60 olarak kabul edilmiştir.

Tek kat (0º) boyuna modül hesaplanması Denklem 3.1' de gösterilmiştir. (Gibson, 2016)

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m \tag{3.1}$$

E_1 = Tek kat boyuna modül
v_f = Lif hacim oranı
E_f = Lif elastisite modülü
v_m = Matris hacim oranı
E_m = Matris elastisite modülü

Tek kat (90º) enine modül hesaplanması Denklem 3.2' de gösterilmiştir. (Jones & Millard, 1999)

$$1/E_2 = v_f/E_f + v_m/E_m \tag{3.2}$$

E_2 = Tek kat enine modül
v_f = Lif hacim oranı
E_f = Lif elastisite modülü
v_m = Matris hacim oranı
E_m = Matris elastisite modülü

Tek kat boyuna dayanımın hesaplanması Denklem 3.3' te gösterilmiştir. (Gibson, 2016)

$$\sigma_1 = v_f\sigma_f + v_m\sigma_m \quad (3.3)$$

σ_1 = Tek kat boyuna dayanım

v_f = Lif hacim oranı

σ_f = Lif dayanımı

v_m = Matris hacim oranı

σ_m = Matris dayanımı

Katman modülünün hesaplanması Denklem 3.4' te gösterilmiştir. (Jones & Millard, 1999)

$$E_x = \frac{E_1+E_2}{2} \quad (3.4)$$

E_x = Katman modülü

E_1 = Tek kat enine modül

E_2 = Tek kat boyuna modül

Katman nihai dayanımının hesaplanması Denklem 3.5' te gösterilmiştir. (Gibson, 2016)

$$\sigma_U \approx \frac{1}{2}\sigma_1 + \frac{1}{2}\sigma_m \quad (3.5)$$

σ_U = Katman nihai dayanım

σ_1 = Enine dayanım

σ_m = Matris dayanımı

Max çekme yükü hesaplanması Denklem 3.6' da gösterilmiştir. (Jones & Millard, 1999)

$$P_{max} = \sigma_U A \quad (3.6)$$

P_{max} = Katman nihai dayanım

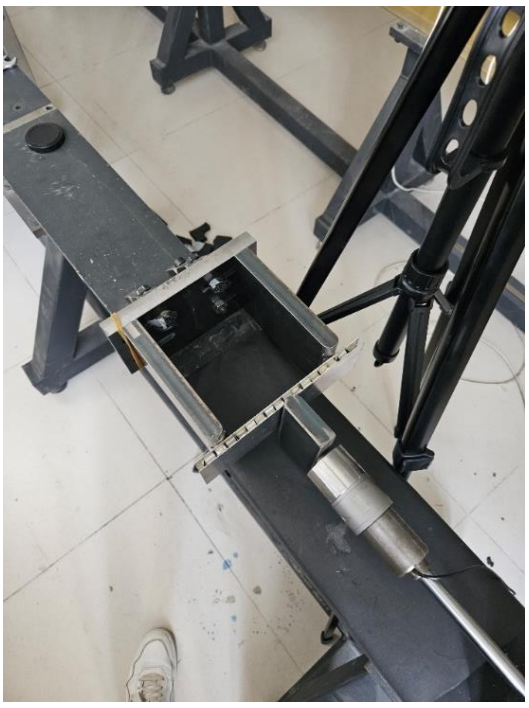
σ_U = Katman nihai dayanım

A = Numune kesit alanı

3.3. ÜÇ NOKTA EĞİLME (DİNAMİK) TESTİ

Sandviç panel malzemelerin yüksek hızda veya zamanla değişen (Darbe, salınım vb.) bir eğilme kuvveti altındaki yapısal davranışını incelemek için bu test yöntemi kullanılmıştır. Düşük hızlar için tanımlanan C393 test yöntemine benzer düzenek kurulmuştur ancak test hızını (yükleme hızını) yükseltmek üzere gas gun kullanılmıştır. Numune boyutları, mesnet aralıkları ve veri toplama (İvme ölçer, yüksek hızlı kameralar vb.) yöntemleri yine C393 çerçevesinde uyarlanmıştır. Test 140 mm çene açıklığı ve 20 m/s çarpma hızında yapılmıştır.

Test düzeneği ve boyutları Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Bu test metodu sayesinde numunenin çökme modu, delaminasyon (katman ayrılması), çekirdek ezilmesi gibi tipik sandviç hasarlarını dinamik koşullarda gözlemlemek ve yük-çatlak oluşumu ilişkisini saptamak mümkündür. Statik testi temel alan formüller (Eğilme gerilmesi, defleksiyon, kesme gerilmesi vb.) dinamik veri toplanırken de kullanılabilir ancak hız etkisi ve atalet etkileri de göz önüne alınmaktadır.



Şekil 3.8. Üç nokta eğilme dinamik test düzeneği

3.4. PENETRASYON TESTİ

Penetrasyon testi fiber takviyeli polimer matris kompozit malzemelerin yüksek hızda uygulanan yoğun (konsantre) bir basma (indantasyon) kuvvetine karşı hasar direncini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu test yöntemi dinamik bir kuvvet ile kompozit malzeme yüzeyine uygulanan basma yükü sırasında meydana gelen hasarı (delaminasyon, fiber kırılması vb.) karakterize etmektedir. Malzemenin hasara karşı dayanıklılığını ve hasar toleransını belirlemeyi amaçlamaktadır. Penetrasyon test düzeneği Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Test gas gun tahrikli 12 mm çaplı sivri uç ile 20 m/s çarpma hızında yapılmıştır.

Absorbe edilen enerjinin formülü Denklem 3.8' de gösterilmiştir.

$$E = \int_0^{\delta max} F(\delta)\, d\delta \qquad (3.7)$$

E = Soğurulan enerji, J

δmax = Deney sırasında ulaşılan maksimum yer değiştirme, mm

$F(\delta)$ = Yer değiştirme anındaki yük, N (ASTM International, 2017)



Şekil 3.9. Penetrasyon test düzeneği şeması

4. BULGULAR

4.1. MALZEMELERİN TEKNİK VERİLERİ

Kompozit plakaların teorik hesaplamalar sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.1' de gösterilmiştir. Ayrıca testlerde kullanılan 1050 Alüminyum sacın teknik verileri üreticiden alınarak tabloya eklenmiştir.

Çizelge 4.1. Yüzey plakalarının teorik hesaplamalar sonucu elde edilen teknik verileri

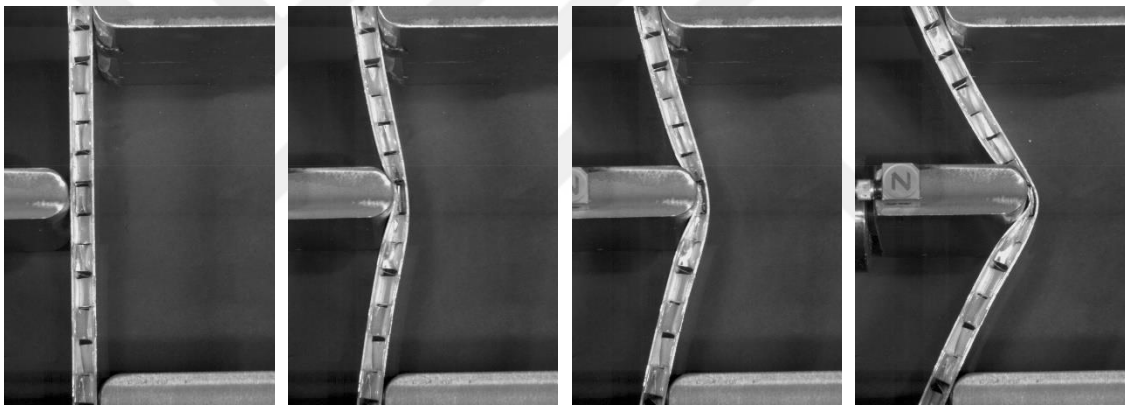
Katman türü	E_x (GPa)	σ_U (MPa)	P_{max} (kN)	ε_u (%)	Toplam Uzama (mm)
Cam Fiber/ epoksi	26	1083	16.2	4.2	10.4
Aramid Fiber/ epoksi	35	932	14.0	2.7	6.7
Karbon Fiber / epoksi	76	1189	17.8	1.6	3.9
Alüminyum 1050	69	120	1.8	10	5

Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen verilere göre Karbon fiber kompozit en sert malzemedir. 1,19 GPa nihai çekme gerilmesi ve 17,8 kN' luk azami yük taşıma kapasitesiyle de en yüksek mukavemeti sergiler. Bununla birlikte kopma gerinimi yalnızca yüzde 1,6' dır. Bu da kırılmanın gevrek karakterde olduğunu göstermektedir.
Cam Fiber kompozit 26 GPa'lık modülüyle en esnek yapıdır ancak 1,08 GPa gerilme ve 16,2 kN azami yük değerleriyle karbon kompozite çok yakın bir dayanım sunmaktadır. Yüzde 4,2' lik kopma gerinimi ve 10,4 mm' lik toplam uzama sayesinde yüksek enerji soğurma kapasitesine sahiptir. Aramid fiber kompozit 35 GPa'lık orta seviye modülü ve 0,93 GPa'lık nihai gerilmesiyle üç kompozit arasındaki ara pozisyondadır. Yüzde 2,7'lik gerinimi, karbon kompozitten daha sünek, cam katmandan daha gevrek bir davranım ortaya koymaktadır. Kevlar liflerinin fibrilasyonu, darbe anında ilave tokluk ve delinmeye karşı direnç gösterir. 1050-H14 alüminyum sac, 69 GPa' lık modülüyle karbon kompozite yakın bir rijitliğe ulaşsa da nihai gerilmesi yalnızca 120 MPa'dır ve 1,8 kN azami yük taşıyabilir. Buna karşılık yüzde 10' luk kopma gerinimiyle oldukça sünektir.

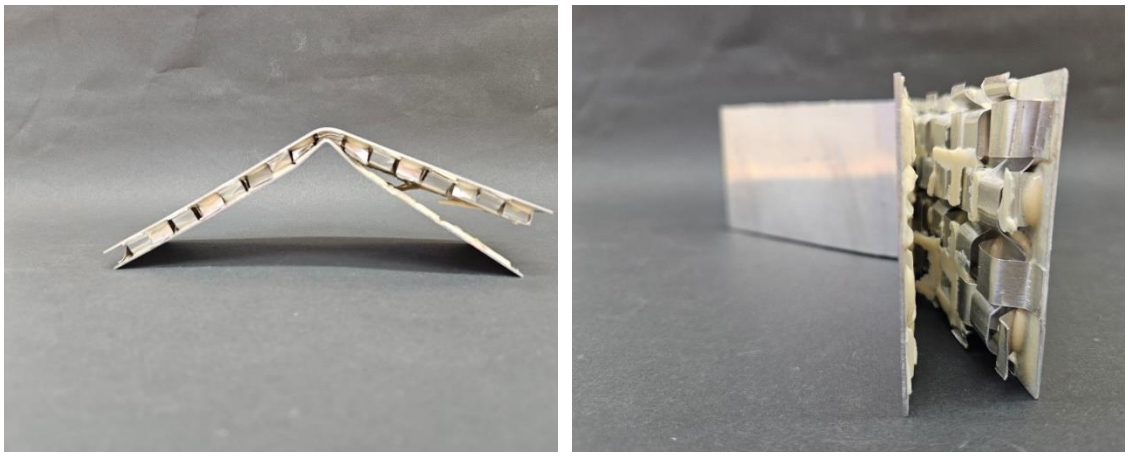
İnce levha formunda büyük şekil değişimlerine olanak tanımaktadır. Yoğunluk dikkate alındığında karbon kompozitin özgül modülü ve özgül mukavemeti alüminyuma göre çok yüksektir. Karbon kompozit birim kütle başına yaklaşık on yedi kat daha yüksek mukavemet sağlar. Cam kompozit maliyet açısından cazip olup yüksek uzaması sayesinde enerji emici görevlerde kullanılabilir. Aramid kompozit, darbe ve delinme direnci istendiğinde iyi bir denge sağlayabilir.

4.2. ÜÇ NOKTA EĞİLME (DİNAMİK) TEST SONUÇLARI

Üç nokta eğilme (dinamik) testinin yüksek hızlı kamera ile çekilen görüntüleri Şekil 4.1' de verilmiştir. Testler sonucunda elde edilen kuvvet-zaman ve enerji grafikleri de her bir sandviç panel için yorumlanmıştır.

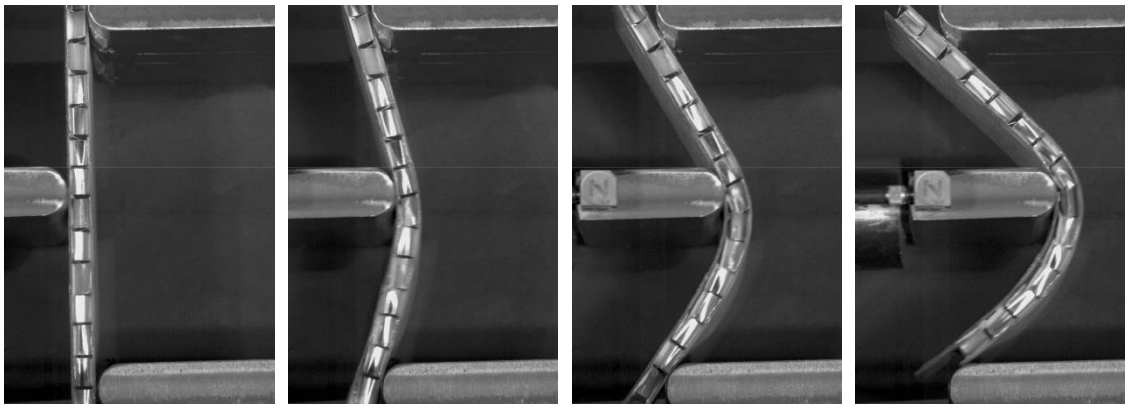


Şekil 4.1. ASP' nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri

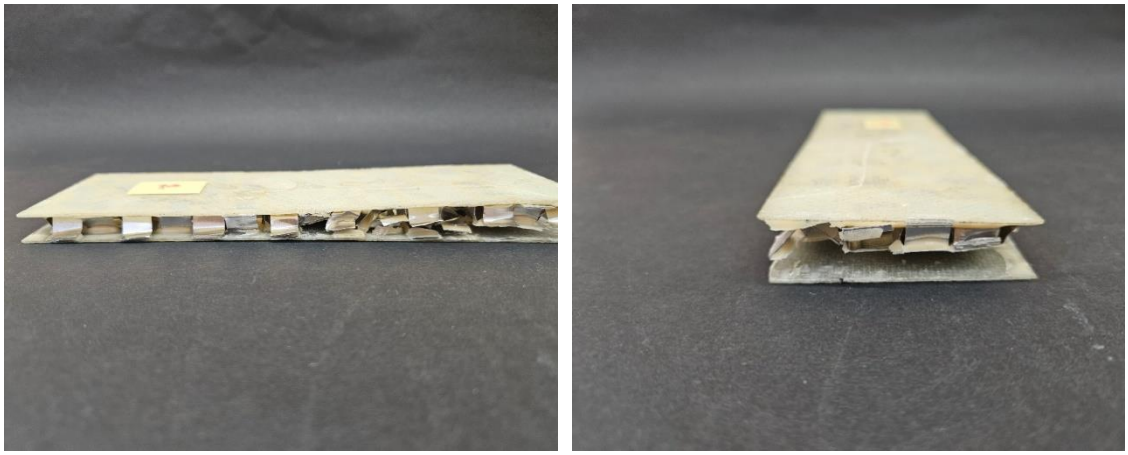


Şekil 4.2. ASP' nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri

Şekil 4.2’ de ilk görüntüde ASP’ nin tam orta bölgesinde keskin bir kırılma açısı oluşmuş, bu da yükün aniden ve şiddetli bir şekilde çekirdeğe ve yüzey plakalarına etki ettiğini göstermektedir. Şekil 4.2’ de ikinci görüntüde çekirdeğin ciddi şekilde ezildiği, burkulduğu ve katlandığı görülmektedir. Bu da darbe yükünün etkisiyle çekirdeğin mekanik stabilitesini tamamen kaybettiğini göstermektedir. Alt ve üst yüzey plakalarında belirgin bir kopma ya da ayrılma gözlemlenmemekle birlikte çekirdek ile yüzey plakaları arasındaki bağlantının zayıfladığı görülmektedir. Yüksek hız nedeniyle deformasyon süresi çok kısa olup panelin orta bölgesinde keskin bir kırılma oluşmuştur. Bu da sandviç panelin sünek deformasyon yerine ani kırılmaya maruz kaldığını göstermektedir. Oluklu alüminyum çekirdek yüksek darbe yükü altında göçmeye uğramış ve katlanmıştır. Yüksek hızda malzeme ani gerilmelere maruz kaldığından çekirdeğin plastik deformasyona uğramadan çöktüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’ de ikinci görüntüde çekirdeğin bazı bölgelerinde yerel burkulmalar ve kırışmalar meydana gelmiştir. Bu da çekirdeğin darbe yükü altında ani stabilite kaybına uğradığını göstermektedir. Yüzey plakaları ile çekirdek arasındaki bağın bazı bölgelerde zayıfladığı gözlemlenmiştir. Bu da darbe yükü nedeniyle plakalar arasındaki bağlanma mukavemetinin zayıfladığını göstermektedir.

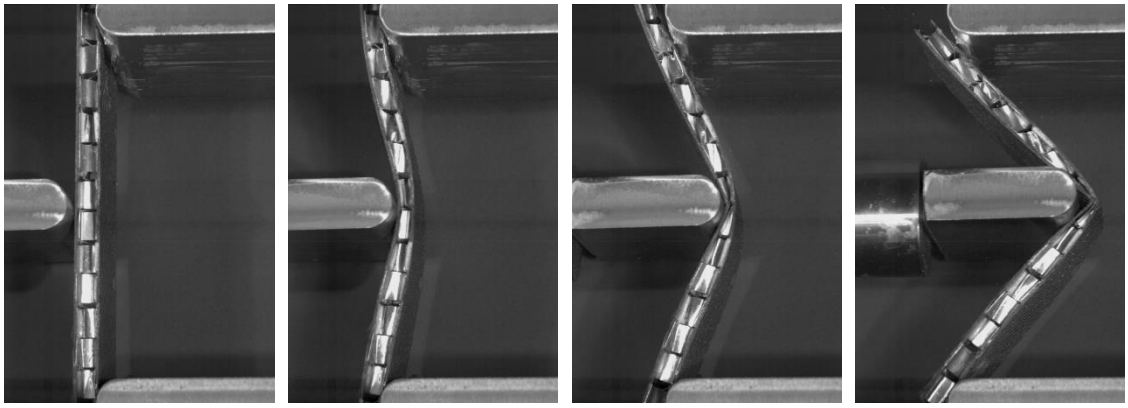


Şekil 4.3. GFSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri

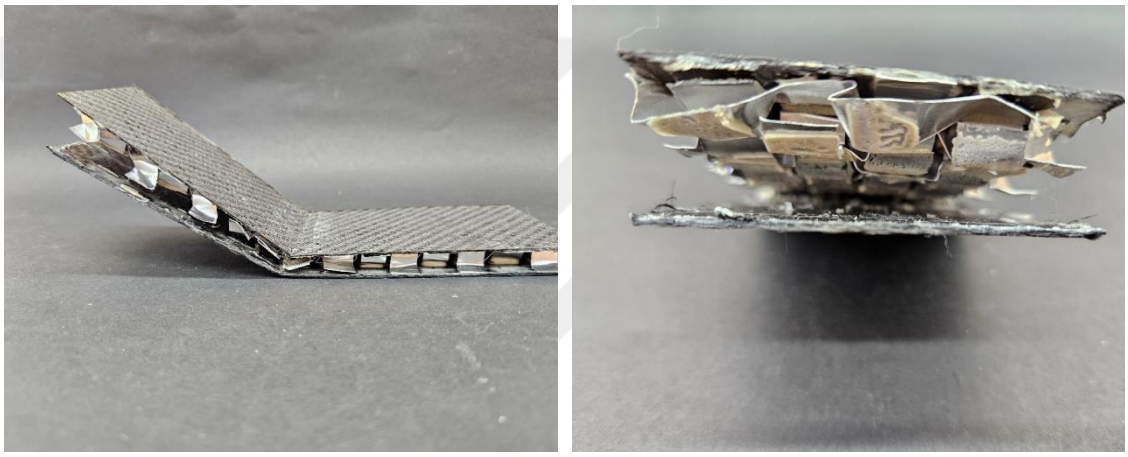


Şekil 4.4. GFSP' nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri

Şekil 4.4' de ilk görüntüde GFSP' nin çekirdek bölgesinin yükleme noktasına yakın alanlarda ciddi şekilde burkulduğu ve ezildiği görülmektedir. Yüzey plakalarında belirgin bir kırılma veya kopma görülmemiştir ancak yerel deformasyonlar mevcuttur. Bu da cam fiber yüzey plakalarının sünek bir yapıya sahip olduğunu ve yükü dağıtarak kırılmayı geciktirdiğini göstermektedir. Şekil 4.4' de ikinci görüntüde ise panelin uç bölgelerinde de çekirdek çökmeleri meydana gelmiştir. Bu da darbenin sadece yükleme noktasında değil tüm yapı boyunca yayıldığını göstermektedir. Çekirdek yüksek hızdaki yükleme altında stabilitesini kaybederek yer yer kıvrılmış ve katlanmıştır. Bu da panelin belirli bir noktaya kadar yük taşıdığını ancak kritik seviyeyi aşınca aniden çökmeye başladığını göstermektedir. Yüzey plakalarının çekirdek ile bağlantı noktalarında ayrılmaların başladığı gözlemlenmiştir. Bu da yüksek hızın oluşturduğu ani yük değişimi nedeniyle bağlanma mukavemetinin zayıfladığını göstermiştir. Cam fiber yüzey plakaları kırılma yerine eğilme ve esneme göstererek yük dağılımını sağlamıştır. Bu da malzemenin sünek deformasyon yeteneğini kanıtlamaktadır. Çekirdek deformasyonu yalnızca yükleme noktasında değil kenarlara kadar uzanmıştır. Bu da yüksek hızın şok dalgalarını nasıl yaydığını göstermektedir.



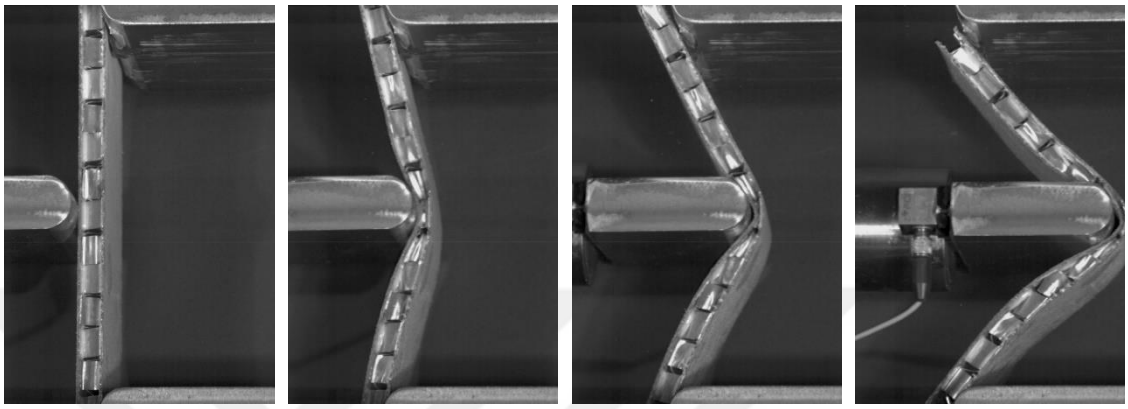
Şekil 4.5. CFSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri



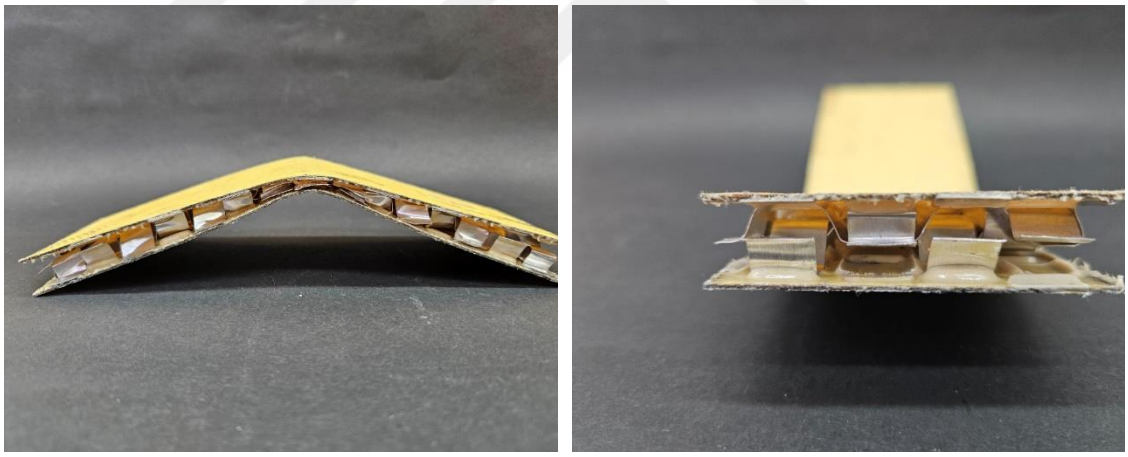
Şekil 4.6. CFSP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri

Şekil 4.6’ da ilk görüntüde CFSP’ nin yükleme noktasında keskin bir kırılma açısı oluşturduğu görülmektedir. Bu da panelin yüksek hızda ani yüklemeye maruz kaldığını ve çekirdek ile yüzey plakalarının dayanım sınırlarını aştığını göstermektedir. Alt yüzey plakasında kopma veya büyük bir yırtılma gözlemlenmemekle birlikte ciddi derecede bükülmüş ve ayrılmalar başladığı görülmüştür. Bu da yüksek rijitliğe sahip karbon fiber yüzeyin esneklikten çok kırılmaya eğilimli olduğunu göstermektedir. Şekil 4.6’ da ilk görüntüden çekirdeğin ciddi bir ezilme, burkulma ve katlanmaya maruz kaldığı net bir şekilde görülmektedir. Karbon fiber yüzey plakaları yüksek elastik modülü nedeniyle ani kırılma eğilimi göstererek büyük ölçüde bükülmüştür. Bu da karbon fiberin rijit ancak sünek olmayan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Yüzey plakaları ile çekirdek arasındaki bağların bazı bölgelerde koptuğu görülmüştür. Yüksek hız nedeniyle yüzey ve çekirdek arasındaki yük paylaşımı dengesiz olmuş ve çekirdeğin deformasyonu yüzey

plakalarına etkili bir şekilde iletilememiştir. Şekil 4.6’ da ikinci görüntüde olukların bazı bölgelerde yana doğru kaydığı ve katlandığı görülmüştür. Bu da çekirdek içerisindeki dalga yayılımı ve yük aktarımının yüksek hız nedeniyle düzgün gerçekleşmediğini göstermektedir.



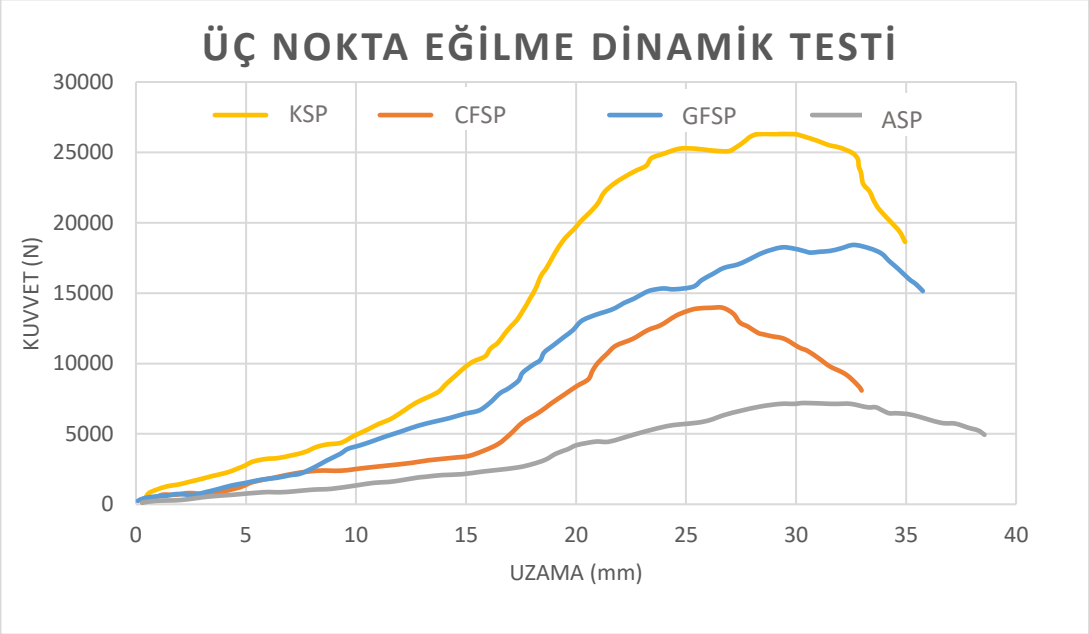
Şekil 4.7. KSP’ nin üç nokta eğilme testi kamera görüntüleri



Şekil 4.8. KSP’ nin üç nokta eğilme dinamik test sonrası görüntüleri

Şekil 4.8’ de ilk görüntüde KSP’ nin yükleme noktasında keskin bir katlanma açısı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu da yüksek hızda ani yükleme nedeniyle çekirdeğin ve yüzey plakalarının kritik bir noktaya ulaştığını ve ani deformasyon sergilediğini göstermektedir. Şekil 4.8’ de ikinci görüntüde çekirdeğin ciddi şekilde burkulduğu ve bazı bölgelerde ezildiği görülmektedir. Özellikle yük uygulama bölgesinde oluklu yapı büzüşerek iç içe geçmiş ve yerel göçmeler oluşmuştur. Yüzey plakalarında büyük kırılmalar veya kopmalar gözlemlenmemiş ancak Kevlar yüzeyin belirli bölgelerinde

ayrılmaların başladığı görülmüştür. Kevlar yüzey plakaları esnek ve sünek bir malzeme olduğundan yüksek rijitlik göstermemiş, belirli bir noktada yükü yayarak katlanma oluşturmuştur. Bu da Kevlar'ın darbe dayanımı yüksek bir malzeme olduğunu ancak eğilme dayanımının karbon fiber kadar rijit olmadığını göstermektedir. Çekirdek yüksek hız nedeniyle ani yükleme altında göçmeye uğramış, oluklar basma yönünde sıkışmış ve burkulmalar meydana gelmiştir. Yüzey plakaları ile çekirdek arasındaki bağın bazı bölgelerde zayıfladığı görülmüştür. Bu da yüksek hızdaki ani darbe yükü nedeniyle bağ mukavemetinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Çekirdeğin bazı bölgelerinde olukların yana doğru kaydığı ve burkulduğu gözlemlenmiştir. Bu da yükün tüm panel boyunca dengeli dağılmadığını ve bazı bölgelerde yerel stabilite kaybına neden olduğunu göstermektedir.

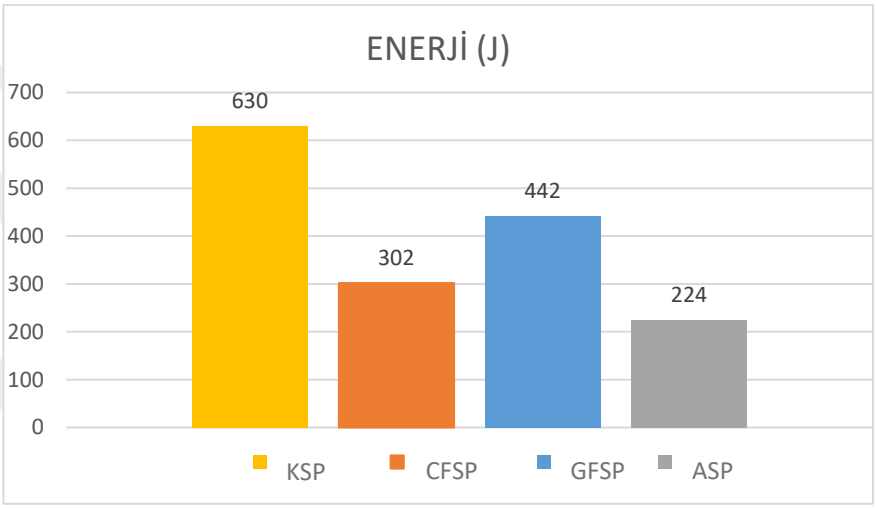


Şekil 4.9. Üç nokta eğilme testi dinamik kuvvet-uzama grafiği

KSP 30 kN civarında pik yüke ulaşarak en yüksek kuvvet değerini göstermiş, bunu sırasıyla GFSP yaklaşık 25 kN, CFSP 20 kN ve ASP 10–12 kN takip etmiştir. Özellikle KSP GFSP uzun bir deformasyon aralığı (30 mm ve üzeri) boyunca yüksek yük taşıyabilmiştir. CFSP orta seviyede, ASP ise daha kısa uzama aralığında pik kuvvete ulaşmıştır.

Bu bulgular, KSP' nin en yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olduğunu, GFSP' nin izleyen en yüksek değeri aldığını, CFSP' nin orta seviyede kaldığını ve ASP' nin ise bu dört numune arasında en düşük enerji değerini sergilediğini göstermektedir.

ASP' de gövde (çekirdek) hızlı şekilde katlanıp "Z" benzeri bir bükülme meydana getirmiştir. Üst plakada lokal kıvrılma ve çekirdekte ezilme/basınç kırılması gözlemlenmiştir. Genel anlamda "sünek" bir şekilde kıvrılarak son hasara ulaşmıştır.
Pik kuvvet düşük kaldığından enerji soğurma en düşük değeri 224 J ile almıştır.



Şekil 4.10. Üç nokta eğilme testi dinamik testi enerji grafiği

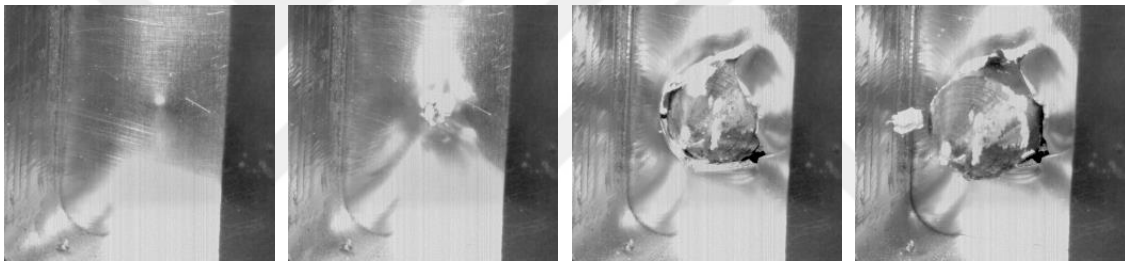
GFSP' de çekirdek, üst katmanda artan basınçla birlikte kademeli olarak bükülmüş cam elyaf tabakada kısmi mikro çatlak oluşumu gözlenmiştir. Üst yüzeyde elyaf kopması/ayrılması ve çekirdekte belirgin katlanma gözlemlenmiştir. Ani kırılma yerine kademeli hasar ilerlemesi görülmüştür. Enerji soğurma 442 J ile Kevlar'dan sonra ikinci en yüksek değeri almıştır.

CFSP' de yüksek rijitliğe rağmen çekirdeğin erken katlanmasıyla birlikte üst tabakadaki karbon lifleri aniden hasara uğramıştır. Kuvvet azaldıkça artık taşıma kapasitesi hızla düşmüştür. Enerji soğurma 302 J ile cam ve Kevlar'a göre daha sınırlı kalmıştır.

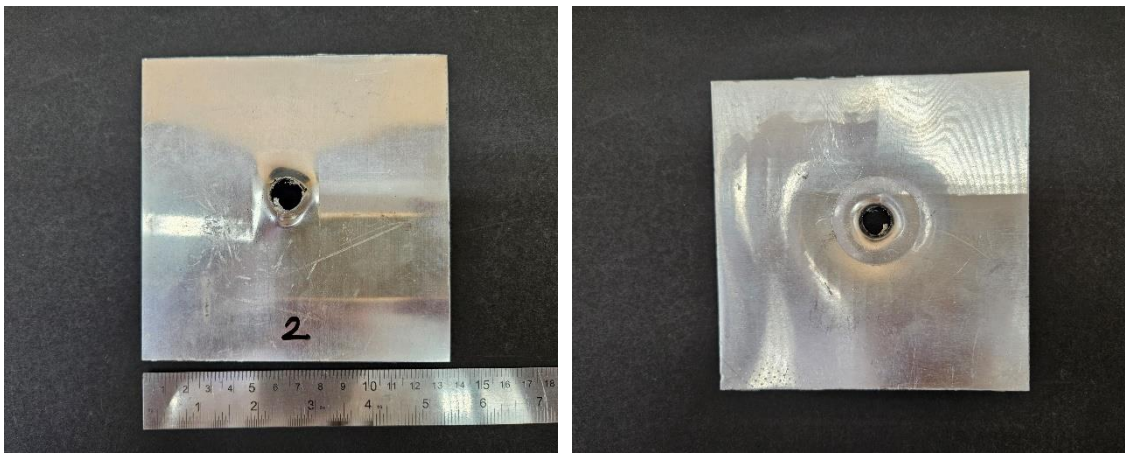
KSP' de aramid liflerin yüksek darbe ve çekme dayanımı çekirdeğin ezilmesini geciktirerek numunenin uzun süre yük taşımasına olanak tanımıştır. Üst yüzeyde lif kopmaları gecikmeli olarak ortaya çıkmış; çekirdek aşamalı katlanma göstererek geniş bir deformasyon bölgesi yaratmıştır. Dinamik yüklerde Kevlar'ın tipik yüksek tokluk özelliği sayesinde enerji soğurma 630 J ile tüm numuneler arasında en yüksek değere ulaşmıştır.

4.3. PENETRASYON TEST SONUÇLARI

Penetrasyon testi esnasında yüksek hızlı kamera ile çekilen sandviç panellerin görüntüleri şekilde verilmiştir. Test sonucunda elde edilen kuvvet-zaman ve enerji grafikleri her bir sandviç panel için yorumlanmıştır.



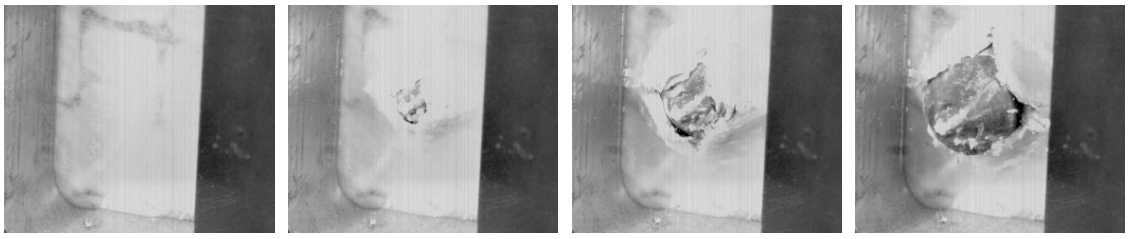
Şekil 4.11. ASP' nin penetrasyon testi kamera görüntüleri



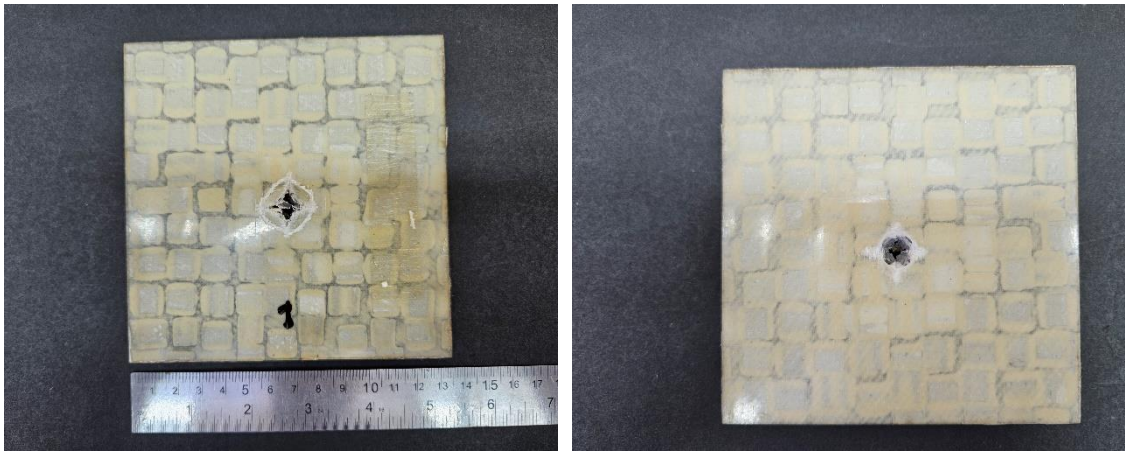
Şekil 4.12. ASP' nin penetrasyon test sonrası görüntüleri

Şekil 4.12’ de ilk görüntüde darbe bölgesinde temiz ve dairesel bir delik oluşmuştur ancak çevresinde küçük deformasyon izleri mevcuttur. Şekil 4.12’ de ikinci görüntüde darbe bölgesinin arka yüzeyde çıkış yaptığı noktada belirgin bir şok dalgası etkisiyle genişleme ve bükülmeler oluştuğu görülmektedir.

Her iki yüzeyde de delme işleminin belirgin şekilde gerçekleştiği ancak malzemenin büyük ölçüde bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Şekil 4.12’ de ilk görüntü darbe çevresinde hafif bir göçme ve bükülme oluştuğu görülmektedir. Bu da yüksek hız nedeniyle alüminyumun plastik akma sınırına ulaşarak akmaya başladığını göstermektedir. Deliğin düzgün ve yuvarlak olması, yükün malzemeye odaklı ve delici bir etkiyle nüfuz ettiğini göstermektedir. Şekil 4.12’ de ikinci görüntüde (çıkış bölgesinde) malzemenin çevreye doğru genişleyerek yırtıldığı ve deformasyonun arttığı görülmektedir. Bu da delme işlemi sırasında darbenin bir şok dalgası oluşturarak arka yüzeyde ekstrüzyon etkisiyle deformasyon meydana getirdiğini göstermektedir. Malzemenin ön yüzünde (ilk temas bölgesi) hafif göçme varken, arka yüzeyde daha belirgin bir genişleme gözlemlenmiştir. Bu da darbe sırasında malzemenin enerjiyi emmeye çalıştığını ve bir kısmının plastik deformasyon olarak yayıldığını göstermektedir.



Şekil 4.13. GFSP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri



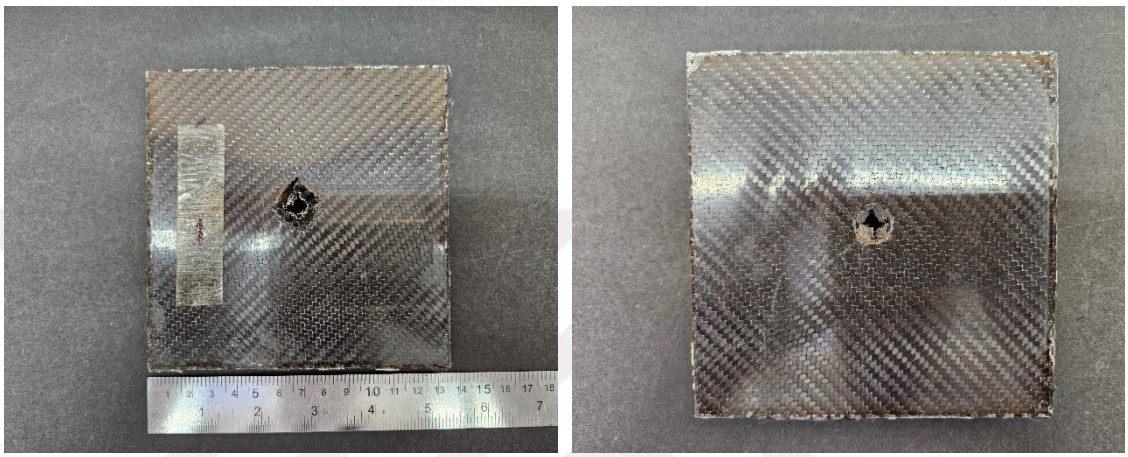
Şekil 4.14. ASP' nin penetrasyon test sonrası görüntüleri

Şekil 4.14' te ilk görüntüde darbe bölgesinde belirgin bir delik açılmış ve çevresinde çatlaklar ile katman ayrılmaları gözlemlenmiştir. Şekil 4.14' te ikinci görüntüde çıkış yüzeyindeki deliğin daha düzgün olduğu ancak çevrede küçük çaplı hasarlar bulunduğu görülmektedir. Delik çevresinde cam fiber matrisinde lokal yırtılmalar ve katmanlar arası ayrılmalar mevcuttur. Cam fiber yüzey plakalarının darbe enerjisini sönümleme mekanizması nedeniyle ilk temas bölgesinde mikro çatlaklar ve matris ayrışmaları oluşmuştır. Şekil 4.14' te ilk görüntüde darbe bölgesinin çevresinde cam fiber katmanlar arasında belirgin bir ayrılma gözlemlenmiştir. Bu da yüksek hız nedeniyle darbenin enerjisinin katmanlar arasında yayıldığını göstermektedir. İlk temas bölgesinde darbenin açtığı delik etrafında daha fazla malzeme çıkıntısı ve düzensiz deformasyon mevcutken çıkış bölgesinin daha düzgün olduğu görülmüştür. Bu da darbenin enerjisini öncelikle yüzey plakası boyunca yaydığını ve ardından çekirdek bölgeden geçerek çıkış yaptığını göstermektedir. Delik çevresinde cam fiber liflerinin koparak ayrıldığı bazı bölgelerde ise matrise bağlı kaldığı görülmüştür. Bu da cam fiberin yüksek rijitliğe sahip olduğunu ve kırılmadan önce belirli bir esneklik gösterdiğini göstermektedir.

Şekil 4.16' da ilk görüntüde darbe bölgesinde net bir delik açıldığı çevresinde ise karbon fiberin katmanlar arası ayrışma (delaminasyon) gözlemlenmiştir. Şekil 4.16' da ikinci görüntüde ise arka yüzeyde delik çapının daha küçük ve daha düzgün olduğu görülmüştür. Bu da delici yükün enerjisinin büyük kısmının ön yüzeyde absorbe edildiğini ve arka yüzeyde daha az deformasyon meydana geldiğini göstermektedir.

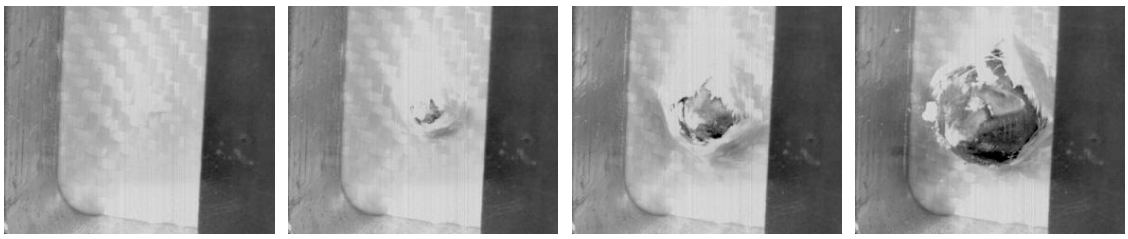


Şekil 4.15. CFSP' nin penetrasyon testi kamera görüntüleri

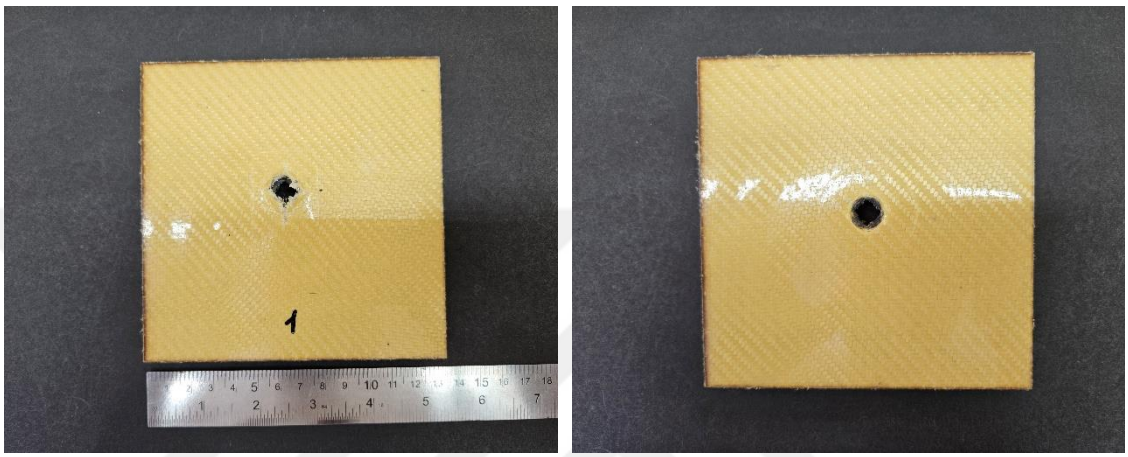


Şekil 4.16. CFSP' nin penetrasyon test sonrası görüntüleri

Karbon fiber yüzeyinde örgü dokusunun bozulmadığı bölgeler mevcuttur ancak delik çevresinde fiber kırılmaları gözlemlenmiştir. Karbon fiber katmanların yüksek rijitliği nedeniyle darbe enerjisi elyaf katmanları boyunca yayılmış ve katmanlar arasında delaminasyon başladığı gözlemlenmiştir. Delik çevresinde karbon fiber liflerinde belirgin kopmalar ve matris reçinesinde kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu da yükün lokalize bir şekilde uygulandığını ve karbon fiberin gevrek kırılma mekanizması sergilediğini göstermektedir. İlk temas yüzeyindeki delik, fiber örgü yönüne bağlı olarak asimetrik bir şekil almış ancak çıkış bölgesinin daha düzgün olduğu görülmüştür. Bu da darbenin ilk etkileşimde fiberleri parçalayarak delik açtığını ancak kalan enerjinin arka yüzeyde daha düzgün bir delik oluşturmaya yettiğini göstermektedir.



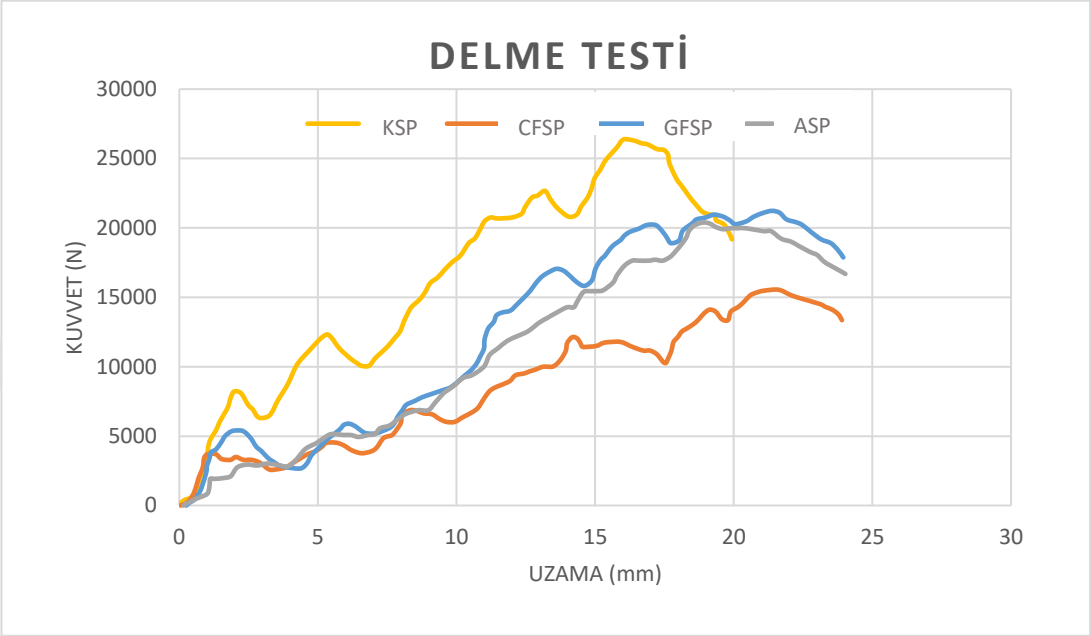
Şekil 4.17. KSP’ nin penetrasyon testi kamera görüntüleri



Şekil 4.18. KSP’ nin penetrasyon test sonrası görüntüleri

Şekil 4.18’ de ilk görüntüde, darbe bölgesinde delik açıldığı ve çevresinde hafif bir deformasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.18’ de ikinci görüntüde ise çıkış deliğinin oldukça düzgün olduğu, kenarlarında belirgin bir yırtılma veya büyük çaplı hasar olmadığı görülmüştür. Kevlar yüzey darbe etkisini absorbe ederek minimum deformasyonla delme yüküne karşı dayanım göstermektedir. Deliğin etrafında yırtılma veya büyük çaplı fiber kopmaları görülmemiştir. Bu da Kevlar’ın yük altında sünek bir deformasyon mekanizması sergilediğini göstermektedir. Malzemenin yükü geniş bir alana yayarak enerjiyi absorbe ettiği ve kritik bir noktada delinmeye izin verdiği gözlemlenmiştir. Darbe bölgesinde Kevlar liflerinin belirli bir noktada koptuğu ancak büyük ölçüde yüzey bütünlüğünün korunduğu görülmüştür. Bu da Kevlar’ın yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu ve darbe yükünü dağıtarak kırılma yerine plastik deformasyon mekanizmalarını devreye soktuğunu göstermektedir.

Şekil 4.18’ de ikinci görüntüde çıkış bölgesinde deliğin oldukça düzgün olması Kevlar’ın enerjiyi iç katmanlarda absorbe ettiğini ve böylece kırılma yerine kademeli delme gerçekleştiğini göstermektedir.



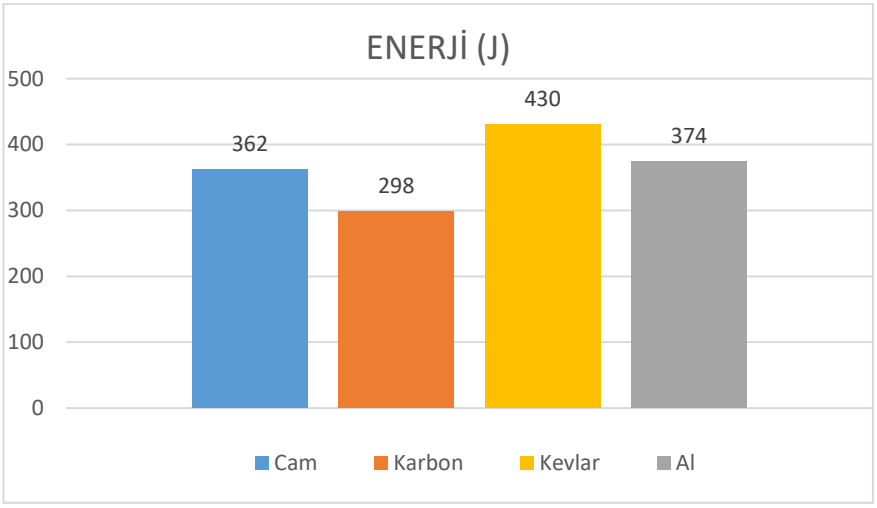
Şekil 4.19. Penetrasyon testi kuvvet-zaman grafiği

KSP’ de kuvvet yaklaşık 28–29 kN seviyelerine kadar çıkmıştır ve tok davranış sergilemiştir. Aramid liflerin yüksek darbe dayanımı, uzun uzamayla birleşerek yüksek enerji emilimine katkıda bulunmuştur.

ASP’ de kuvvet 22–25 kN dolayında pik yapmıştır ancak yüzey plakanın plastik şekil değiştirme özelliği nedeniyle hasar kademeli olarak ilerlemiştir.

GFSP’ de kuvvet 20–25 kN aralığında pik yapmıştır. Kısmen kademeli hasar ilerlemesi, lif kopması ve çekirdek ezilmesi gözlemlenmiştir.

CFSP’ de kuvvet yaklaşık 15–20 kN düzeyinde pik yapmıştır. Yüksek rijitlik olmasına rağmen düşük uzama kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla ani lif kırılması/kopması ve alt katmanda hızlı çekirdek ezilmesi görülmüştür.



Şekil 4.20. Penetrasyon testi enerji grafiği

Aramid fiber, darbe ve delme gibi "yüksek deformasyon hızı" içeren senaryolarda sıklıkla yüksek tokluk (toughness) sergilediğinden KSP 430 J ile en yüksek enerji soğurma değerine sahiptir. Çekirdeğin ezilmesine karşı aramid liflerin direnci sayesinde daha uzun bir uzama aralığı gözlemlenmiştir.

Alüminyum yüzey plakanın sünek davranışı, darbe sırasında plastik şekil değiştirmeye izin vererek enerji emilimini arttırmıştır. ASP 374 J ile KSP' den sonra ikinci en yüksek enerji değerine erişmiştir. Uzun uzama ve kademeli yük düşüşü eğri altında daha geniş bir alan oluşmasına yol açmıştır.

GFSP, CFSP' den daha fazla uzama kapasitesine sahip olduğu için delme sırasında nispeten kademeli lif kopması ve çekirdek ezilmesiyle belli bir tokluk sunmuştur. Elde edilen 362 J enerji soğurma ASP' den az farkla düşük olsa da "ortalama üstü" bir performans gösterirmiştir.

CFSP yüksek elastik modülü ve rijitliği ile yüksek deformasyon gerektiren (Darbe veya delme gibi) durumlarda daha kırılgan bir davranış sergilemiştir. 298 J değerinin diğer üç malzemeye kıyasla en düşük çıkması, karbon liflerinde ani lif kopuşu ve/veya delaminasyonun nispeten hızlı gelişmesinden kaynaklanmıştır. Uzama kapasitesinin sınırlı olması, eğri altında kalan toplam alanı düşürmüştür.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çekme testi sonuçlarına göre maksimum rijitlik ve hafiflik gerektiren yapılar karbon kompozit ile elde edilirken, yüksek süneklik veya şekil verme zorunluluğu bulunan tasarımlarda Alüminyum, darbe dayanımı ve tokluk ön planda ise aramid kompozit ya da cam fiber kompozit kullanılabileceği görülmüştür.

Üç nokta eğilme dinamik testlerinde KSP' ler en yüksek pik kuvveti ve en geniş deformasyon aralığını sergileyerek en yüksek enerji soğurma kapasitesine ulaşmıştır. Bu sonuç aramid liflerin darbe ve dinamik yükleme altındaki bilinen üstün tokluk özelliklerini doğrulamaktadır. GFSP' ler yüksek pik kuvvet ve kademeli hasar ilerlemesi sayesinde hatırı sayılır bir enerji soğurma düzeyine erişmiştir ve KSP' den sonra ikinci sırada yer almıştır. Hafiflik–dayanım dengesi açısından cazip bir seçenek olarak değerlendirilebilir. CFSP' ler yüksek rijitlik ve pik yük elde edilmesine karşın uzama kapasitesinin daha sınırlı olması sebebiyle toplam enerji düşük bir değerde kalmıştır. Yüksek hızda delaminasyon ve çekirdek ezilmesi, ani hasar modlarına yol açarak olası iyileştirmelerin önemini vurgulamaktadır. ASP' ler en düşük enerji değerine sahip olmasına rağmen plastik şekil değiştirme kapasitesi sayesinde kademeli (sünek) bir hasar göstermiştir.

Penetrasyon testinde ise yüzey katmanları ve çekirdek ortaklaşa enerji soğurmuştur. Kevlar veya Al yüzeylerin esnekliği/sünekliliği çekirdeğin hasar mekanizmasını kademeli hale getirip yüksek enerji soğurma sağlamıştır. Karbon gibi yüksek rijitlikli dokular ise daha ani kırılmalarla enerji emilimini sınırlamıştır. Al oluklu çekirdek düzenlemesinde dalga yüksekliği, sıklığı ve yüzey–çekirdek yapıştırma kalitesi değiştirilerek darbe performansı optimize edilebilir. Özellikle hücre (wave) boyutunun, hasarın yayılma biçimini doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Bu sonuçlar sandviç yapının sadece statik eğilme veya çekme performansı ile değil penetrasyon ve darbe koşullarında da malzeme seçimindeki kritik faktörleri net biçimde ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda hibrit elyaf kullanımı, çekirdek geometrisinin farklılaştırılması ve yüzey ön işlemleri gibi parametrelerin daha yüksek darbe dayanımı veya daha yüksek enerji emilimi hedefleri doğrultusunda incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Al Ali, A., Arhore, E., Ghasemnejad, H., & Yasaee, M. (2024). Experimental and numerical investigation of multi-layered honeycomb sandwich composites for impact mechanics applications. *Results in Engineering*, *21*, 101817. https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101817

Atilla Yolcu, D., & Okutan Baba, B. (2024). Experimental investigation on impact behavior of curved sandwich composites with chiral auxetic core. *Composite Structures*, *329*, 117749. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117749

Beşergil, B. (2016). *Kompozitler*. Gazi Kitabevi.

Bhat, G. (Ed.). (2012). *Structure and Properties of High-Performance Fibers*. Woodhead Publishing.

Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, *142*, 221-240. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.01.027

Callister, W. D., & David Rethwisch, J. G. (t.y.). *MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING*.

Durgun, I. (2014). *Composite Parts Production With Hand Lay Method*. https://www.researchgate.net/publication/280080526

Gascons, M., Blanco, N., & Matthys, K. (2012). Evolution of manufacturing processes for fiber-reinforced thermoset tanks, vessels, and silos: A review. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, *44*(6), 476-489. https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.590177

Gibson, R. F. (2016). PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS, FOURTH EDITION. *Principles of Composite Material Mechanics, Fourth Edition*, 1-657. https://doi.org/10.1201/B19626/PRINCIPLES-COMPOSITE-MATERIAL-MECHANICS-RONALD-GIBSON/RIGHTS-AND-PERMISSIONS

Halley, P. J. (2012). Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behaviour. *Thermosets: Structure, Properties and Applications*, 92-117. https://doi.org/10.1533/9780857097637.1.92

Jones, R. M., & Millard, R. (1999). *MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS SECOND EDITION Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*.

Ju, X., Xiao, J., Wang, D., Zhao, C., & Wang, X. (2021). Research on the manufacturing quality of co-cured hat-stiffened composite structure. *Materials*, *14*(11). https://doi.org/10.3390/MA14112747

Kaplan, M. (2018). *Resin Transfer Molding in the Automotive Industry: Recent Developments and Succeeded Applications*. https://www.researchgate.net/publication/325012026

Kueh, A. B. H., Abo Sabah, S. H., Qader, D. N., Drahman, S. H., & Amran, M. (2023). Single and repetitive low-velocity impact responses of sandwich composite structures with different skin and core considerations: A review. *Case Studies in Construction Materials*, *18*. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01908

Leekitwattana, M., Boyd, S. W., & Shenoi, R. A. (2011). Evaluation of the transverse shear stiffness of a steel bi-directional corrugated-strip-core sandwich beam. *Journal of Constructional Steel Research*, *67*, 248-254. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.010

Luthada, P. (2022). *The Introduction to the Filament Winding Process*. https://www.researchgate.net/publication/366055181

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites*. https://doi.org/10.1201/9781420005981

Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2020). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability. *Advanced Structured Materials*, *124*, 235-253. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20

Pan, X., Chen, L., Deng, J., Zhao, W., Jin, S., Du, B., Chen, Y., Li, W., & Liu, T. (2023). Low-velocity impact response of thermoplastic composite sandwich panels with the intersected corrugated core. *Composite Structures*, *324*, 117574. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117574

Park, C. H., & Lee, W. I. (2012). Compression molding in polymer matrix composites. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, 47-94. https://doi.org/10.1533/9780857096258.1.47

Payal, R. (2022). Green composites: Versatile uses and applications in life. *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science: Green Composites: Preparation, Properties and Allied Applications*, 165-193. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99643-3.00002-4

Phiri, R., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., Oladijo, O. P., & Ozbakkaloglu, T. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*, *10*(21), e39661. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E39661

Qin, Y., Xiong, C., Zhu, X., Yin, J., Zhang, Y., Fan, Z., Zou, Y., & Huang, Z. (2023). *Failure mechanism and impact resistance of a novel all-composite double-corrugated sandwich plate under low-velocity impact*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02724

Rong, Y., Liu, J., Luo, W., & He, W. (2018). *Effects of geometric configurations of corrugated cores on the local impact and planar compression of sandwich panels*. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.130

Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *33*(13), 1258-1275. https://doi.org/10.1177/0731684414530790

Strong, A. Brent. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing : materials, methods and applications*. 620. https://books.google.com/books/about/Fundamentals_of_Composites_Manufacturing.html?hl=tr&id=aCm9yvodiJcC

Wang, R.-M., Zheng, S.-R., & Zheng, Y.-P. (2011). Reinforced materials. *Polymer Matrix Composites and Technology*, 29-548. https://doi.org/10.1533/9780857092229.1.29

Yang, J.-S., Liu, Z.-D., Schmidt, R., Schröder, K.-U., Ma, L., & Wu, L.-Z. (2020). *Vibration-based damage diagnosis of composite sandwich panels with bi-directional corrugated lattice cores*. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105781

ASTM International. (2017). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials* (ASTM D3039/D3039M-17). West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17

ASTM International. (2019). *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)* (ASTM D1002–19). West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1002-19

ASTM International. (2022). *Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure* ASTMC393/C393M–22ASTM C393/C393M–22ASTMC393/C393M–22. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0393_C0393M-22

ASTM International. (2017). *ASTM D6264/D6264M-17: Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer-matrix composite to a concentrated quasi-static indentation force*. ASTM International.

ŞEKİLLER

Şekil 2.2. https://www.resinlibrary.com/knowledge/guide/lay-up-methods-for-fibreglass-grp-composites/
Şekil 2.3. https://polymer-composites.cz/en/spray-up/
Şekil 2.4. https://www.addcomposites.com/post/filament-winding
Şekil 2.6. https://www.strongwell.com/about/the-pultrusion-process/
Şekil 2.7. https://www.compositesone.com/vacuum-bagging-films-take-the-heat-in-vacuum-infusion/
Şekil 2.8. https://www.iqsdirectory.com/articles/rubber-molding/compression-molding.html